



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

SISTEMA DE PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS VIALES EN LIMA
METROPOLITANA UTILIZANDO MODELO DE TRÁFICO DE BECKMANN Y
TEORÍA DE GRAFOS PARA MEJORAR LA GESTIÓN DE PROYECTOS DE
TRANSPORTE URBANO

Línea de investigación:

Seguridad vial e infraestructura de transporte

Tesis para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería de Transportes

Autora:

Soto Vargas, Luis

Asesor:

Mayhuasca Guerra, Jorge Victor
(ORCID: 0000-0002-6465-4738)

Jurado:

Gamboa Cruzado Javier Arturo
Petrlik Azabache Ivan Carlo
Valencia Pomareda Jorge Guillermo Francisco

Lima - Perú

2024



SISTEMA DE PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS VIALES EN LIMA METROPOLITANA UTILIZANDO MODELO DE TRAFICO DE BECKMANN Y TEORÍA DE GRAFOS PARA MEJORAR LA GESTIÓN DE PROYECTOS DE TRANSPORTE URBANO

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	cdn.www.gob.pe Fuente de Internet	2%
2	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	documentop.com Fuente de Internet	1%
4	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
5	qdoc.tips Fuente de Internet	1%
6	repositorio.une.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to ITESM: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey	<1%



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

SISTEMA DE PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS VIALES EN LIMA
METROPOLITANA UTILIZANDO MODELO DE TRÁFICO DE BECKMANN Y
TEORÍA DE GRAFOS PARA MEJORAR LA GESTIÓN DE PROYECTOS DE
TRANSPORTE URBANO

Línea de Investigación:

Seguridad vial e infraestructura de transporte

Tesis para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería de Transportes

Autor:

Soto Vargas, Luis

Asesor:

Mayhuasca Guerra, Jorge Victor

(ORCID: 0000-0002-6465-4738)

Jurado:

Gamboa Cruzado, Javier Arturo

Petrlik Azabache, Ivan Carlo

Valencia Pomareda, Jorge Guillermo Francisco

**Lima – Perú
2024**

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
I. Introducción	3
1.1 Planteamiento del Problema	15
1.2 Descripción del Problema	17
1.3 Formulación del Problema.....	31
1.3.1. <i>Problema General</i>	31
1.3.2. <i>Problemas Específicos</i>	31
1.4 Antecedentes	32
1.4.1. <i>Historia Breve del Modelamiento del Transporte</i>	32
1.4.2. <i>Antecedentes Modernos del Modelamiento en Gobiernos</i>	33
1.5 Justificación de la Investigación	34
1.6 Límites de la Investigación	35
1.7 Objetivos.....	35
1.7.1. <i>Objetivo General</i>	35
1.7.2. <i>Objetivos Específicos</i>	36
1.8 Hipótesis	36
1.8.1. <i>Hipótesis General</i>	36
1.8.2. <i>Hipótesis Secundarias</i>	36
II. Marco Teórico.....	38
2.1 Bases Teóricas	38
2.1.1. <i>Teorías de Grafos</i>	38
2.1.2. <i>Demanda y Oferta</i>	40
2.1.3. <i>Prerrequisitos de Matemática y Estadística</i>	41

2.1.4.	<i>Máxima y Mínima de Funciones</i>	42
2.1.5.	<i>Ecuaciones Diferenciales</i>	43
2.1.6.	<i>Multiplificadores de Lagrange</i>	45
2.1.7.	<i>Punto de Equilibrio</i>	46
2.1.8.	<i>Conceptos de Flujo, Densidad y Velocidad</i>	47
2.1.9.	<i>El Modelo de 4 Etapas para Transporte</i>	48
2.1.10.	<i>Principios de Wardrop: Equilibrio por Usuario y Equilibrio del Sistema</i> 48	
2.1.11.	<i>Modelo de Formulación de Beckmann y su Transformación de Ecuación Diferencial a Condicional para Programación en Software</i>	52
2.1.12.	<i>Condiciones de Equilibrio Derivados de Beckmann</i>	54
2.1.13.	<i>Método de Promedios Sucesivos</i>	54
III.	Método	56
3.1	Tipo de Investigación	56
3.2	Población y Muestra	57
3.2.1.	<i>Población de Estudio</i>	57
3.2.2.	<i>Muestra Poblacional</i>	57
3.2.3.	<i>Muestreo</i>	57
3.3	Estrategia de Prueba de Hipótesis	58
3.3.1.	<i>Hipótesis General</i>	58
3.3.2.	<i>Hipótesis Secundarias</i>	58
3.3.3.	<i>Operacionalización de Variables</i>	60
3.4	Instrumentos	61
3.5	Procedimientos	61
3.6	Análisis de Datos	62

IV.	Resultados	63
4.1	Resultados	63
4.2	Prueba de Normalidad.....	64
4.3	Análisis de Resultados	68
4.4	Contrastación de Hipótesis	73
V.	Discusión de Resultados	80
5.1	Indicador 1: Tiempo de Priorización de Proyectos (días).....	80
5.2	Indicador 2: Costo de Priorización de Proyectos	81
5.3	Indicador 3: Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos	81
VI.	Conclusiones	82
VII.	Recomendaciones	83
VIII.	Referencias.....	84
IX.	Anexos	89
	Anexo A.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: INCREMENTO VIAL 1968 - 1978 DEL PERÚ	9
TABLA 2: PORCENTAJE DE LA POBLACIÓN URBANA SIN ACCESO A LOS SERVICIOS DE MOVILIDAD URBANA A TRAVÉS DE PISTAS Y VEREDAS.....	12
TABLA 3: PORCENTAJE DE LA POBLACIÓN URBANA SIN ACCESO A LOS SERVICIOS DE MOVILIDAD URBANA A TRAVÉS DE PISTAS Y VEREDAS.....	13
TABLA 4: OBJETIVO ESTRATÉGICO INSTITUCIONAL 02 SECTOR TRANSPORTE DE LA MUNICIPALIDAD DE LIMA...	13
TABLA 5: INDICADOR DE BRECHA (IB) DEL OBJETIVO ESTRATÉGICO INSTITUCIONAL 02 SECTOR TRANSPORTE DE LA MUNICIPALIDAD DE LIMA	13
TABLA 6: OBJETIVO ESTRATÉGICO INSTITUCIONAL 07 SECTOR TRANSPORTE DE LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE AREQUIPA	14
TABLA 7: REPORTE DE CONDICIÓN DE VÍAS VECINALES DE LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE AREQUIPA.....	14
TABLA 8: OBJETIVO ESTRATÉGICO INSTITUCIONAL 06 SECTOR TRANSPORTE DE LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO.....	14
TABLA 9: INDICADOR DE BRECHA (IB) DEL OBJETIVO ESTRATÉGICO INSTITUCIONAL 01 SECTOR TRANSPORTE DE LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE TRUJILLO	15
TABLA 10: TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO EN HORA NO PICO Y HORA PICO EN AVENIDAS MAS IMPORTANTES DE LIMA METROPOLITANA NORTE.....	17
TABLA 11: TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO EN HORA NO PICO Y HORA PICO EN AVENIDAS MAS IMPORTANTES DE LIMA METROPOLITANA SUR	18
TABLA 12: TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO EN HORA NO PICO Y HORA PICO EN AVENIDAS MAS IMPORTANTES DE PARIS.....	19
TABLA 13: COMPARATIVO ENTRE AVENIDAS DE SIMILAR LONGITUD EN TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO EN HORA PICO Y NO PICO (LIMAPARIS)	20
TABLA 14: TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO EN HORA NO PICO Y HORA PICO EN AVENIDAS MAS IMPORTANTES DE BUENOS AIRES	21
TABLA 15: COMPARATIVO ENTRE AVENIDAS DE SIMILAR LONGITUD EN TIEMPO DE DESPLAZAMIENTO EN HORA PICO Y NO PICO (LIMABUENOS AIRES).....	22
TABLA 16: RANKING TOM TOM TRAFFIC DE CIUDADES DEL MUNDO Y USA 2022.....	22

TABLA 17: OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	23
TABLA 18: CONCEPTUALIZACIÓN DE INDICADORES.....	60
TABLA 19: RESUMEN DE CONCEPTUALIZACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES.....	60
TABLA 20: INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	61
TABLA 21: RESULTADOS.....	61
TABLA 22: ESTADÍSTICAS PARA EL INDICADOR 1.....	63
TABLA 23: ESTADÍSTICAS PARA EL INDICADOR 2.....	68
TABLA 24: ESTADÍSTICAS PARA EL INDICADOR 3.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: COMPARATIVO GRÁFICO DE TRÁFICOS EN PARIS Y BUENOS AIRES	22
FIGURA 2: INCREMENTO DE COMBUSTIBLE SEGÚN VELOCIDAD Y CAMBIO EN UN VW POLO 1.4 DIESEL Y VW PASSAT SYNCHRO 1.8.....	24
FIGURA 3: EJEMPLO DE ROBO EN VÍAS DE LIMA METROPOLITANA.....	29
FIGURA 4: GRAFOS COMO REPRESENTACIONES DE REDES DE VÍAS Y CIUDADES	38
FIGURA 5: COMPARACIÓN DE SITUACIÓN REAL CON REPRESENTACIÓN SEGÚN GRAFOS	40
FIGURA 6: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE SOLUCIÓN DE EJEMPLO DE MULTIPLICADOR DE LAGRANGE	46
FIGURA 7: PROPORCIONALIDAD ENTRE FLUJO, VELOCIDAD Y DENSIDAD	47
FIGURA 8: FLUJO DE DESARROLLO DEL MODELO DE 4 ETAPAS PARA TRANSPORTE.....	48
FIGURA 9: EXPLICACIÓN ESPECÍFICA DEL PRIMER PRINCIPIO DE WARDROP	50
FIGURA 10: EXPLICACIÓN ESPECÍFICA DEL SEGUNDO PRINCIPIO DE WARDROP	51
FIGURA 11: EXPLICACIÓN ESPECÍFICA DE LAS CONDICIONES DE EQUILIBRIO DE USUARIO SEGÚN LA SOLUCIÓN DE BECKMANN	54
FIGURA 12: EJEMPLO DESCRIPTIVO DEL MÉTODO DE PROMEDIOS SUCESIVOS.....	55
FIGURA 13: PRUEBA DE NORMALIDAD G_c TIEMPO DE PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS (DÍAS).....	64
FIGURA 14: PRUEBA DE NORMALIDAD G_e DEL TIEMPO DE PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS (DÍAS)	65
FIGURA 15: PRUEBA DE NORMALIDAD G_c DEL COSTO DE PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS	65
FIGURA 16: PRUEBA DE NORMALIDAD G_e DEL COSTO DE PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS	66
FIGURA 17: PRUEBA DE NORMALIDAD G_c DEL NÚMERO DE PERSONAS NECESARIAS PARA DESARROLLAR LA PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS	67
FIGURA 18: PRUEBA DE NORMALIDAD G_e DEL NÚMERO DE PERSONAS NECESARIAS PARA DESARROLLAR LA PRIORIZACIÓN DE PROYECTOS	68
FIGURA 19: HISTOGRAMA DEL G_e DEL INDICADOR 1	69
FIGURA 20: BOXPLOT DEL G_e DEL INDICADOR 1.....	69
FIGURA 21: HISTOGRAMA DEL G_e DEL INDICADOR 2	70
FIGURA 22: BOXPLOT DEL G_e DEL INDICADOR 2.....	71
FIGURA 23: HISTOGRAMA DEL G_e DEL INDICADOR 3	72
FIGURA 24: BOXPLOT DEL G_e DEL INDICADOR 3.....	72
FIGURA 25: MÉTODO DE CONTRASTACIÓN PARA LA HIPÓTESIS 1	73

FIGURA 26: ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS PARA LA HIPÓTESIS 1	74
FIGURA 27: ESTIMACIÓN PARA LA DIFERENCIA CON INTERVALO DE CONFIANZA PARA LA HIPÓTESIS 1	74
FIGURA 28: TEST DE HIPÓTESIS PARA REDUCCIÓN EN EL TIEMPO DE PRIORIZACIÓN	75
FIGURA 29: MÉTODO DE CONTRASTACIÓN PARA LA HIPÓTESIS 2	75
FIGURA 30: ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS PARA LA HIPÓTESIS 2	76
FIGURA 31: ESTIMACIÓN PARA LA DIFERENCIA CON INTERVALO DE CONFIANZA PARA LA HIPÓTESIS 2	76
FIGURA 32: TEST DE HIPÓTESIS PARA REDUCCIÓN DE COSTOS DE PRIORIZACIÓN.....	77
FIGURA 33: MÉTODO DE CONTRASTACIÓN PARA LA HIPÓTESIS 3	77
FIGURA 34: ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS PARA LA HIPÓTESIS 3	78
FIGURA 35: ESTIMACIÓN PARA LA DIFERENCIA CON INTERVALO DE CONFIANZA PARA LA HIPÓTESIS 3	78

RESUMEN

En esta investigación se propone un sistema que facilitará la implementación del modelo de transporte de 4 etapas, así como una solución basada en la teoría de grafos y el modelo de tráfico de Beckmann. Ante la necesidad de desarrollar soluciones efectivas en la gestión del transporte, es esencial que Perú disponga de una herramienta eficaz para analizar tanto áreas amplias como medianas, incluyendo distritos e intersecciones o avenidas. Resolver el tráfico en cualquier zona del país reducirá el gasto de combustible y los problemas derivados de la congestión vehicular. La ejecución de este proyecto de investigación requiere un marco teórico sólido en matemáticas y de nivel intermedio en lenguajes de programación. Se utilizarán grafos conocidos para validar el algoritmo y datos del JICA de 2013 para simular zonas relevantes en Lima Metropolitana. Los resultados de la simulación reflejarán situaciones reales en avenidas de la capital, demostrando así las capacidades del sistema de priorización de proyectos. Esto permitirá reducir la congestión vial en el área de estudio y ofrecerá una herramienta económica y fácil de instalar para distritos y entidades gubernamentales.

Palabras Claves: Priorización de Proyectos, Tráfico Urbano, Modelo de Beckmann, Planificación de Transporte, Reducción de Costos, Optimización de Recursos.

ABSTRACT

In this research, a system is proposed that will facilitate the implementation of the 4-stage transportation model, as well as a solution based on graph theory and Beckmann's traffic model. Given the need to develop effective solutions in transportation management, it is essential for Peru to have an effective tool to analyze both large and medium areas, including districts and intersections or avenues. Solving traffic in any area of the country will reduce fuel expenditure and problems arising from vehicular congestion. The execution of this research project requires a solid theoretical framework in mathematics and an intermediate level in programming languages. Known graphs will be used to validate the algorithm, and data from JICA 2013 will be used to simulate relevant areas in Metropolitan Lima. The results of the simulation will reflect real situations on the capital's avenues, thus demonstrating the capabilities of the project prioritization system. This will allow reducing road congestion in the study area and will offer an economical and easy-to-install tool for districts and governmental entities.

Keywords: Project Prioritization, Urban Traffic, Beckmann Model, Transport Planning, Cost Reduction, Resource Optimization.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de la economía es complejo porque explora de diversas maneras el comportamiento humano y la toma de decisiones. Gracias a la matemática, se busca explicar los fenómenos observados del comportamiento humano mediante modelos o simulación. Por ejemplo, los modelos de demanda y oferta se fundamentan en el principio de equilibrio, cuya importancia se detallará en capítulos posteriores por su rol esencial en este trabajo de investigación, junto a otros modelos más complejos como los de recursos compartidos, información asimétrica en equilibrio, elección pública y moral en economía.

Además, es importante reconocer que, aunque existen diversos modelos para diferentes temas, también se pueden desarrollar varios modelos para un mismo tópico. En el comercio internacional, por ejemplo, contamos con los modelos Ricardianos, Heckscher-Ohlin y de Factores específicos que ofrecen distintas perspectivas. Según Krugman, estos modelos intentan explicar la competencia en el comercio internacional entre dos sociedades desde diferentes enfoques. El modelo Ricardiano se centra en la ventaja comparativa; el modelo Heckscher-Ohlin mejora el anterior al asumir que los factores de producción y trabajo pueden ser comunes entre productos; y el modelo de Factores específicos considera diversos factores como el capital, las tierras de producción y los salarios (Krugman, 2003).

Como señala Batten (1996), debido a la complejidad inherente de la economía y del comportamiento humano, cualquier modelo o solución es solo una perspectiva en un punto del análisis que, inevitablemente, generará errores. Batten no desalienta la generación de conocimiento, pero subraya la importancia de reconocer que ningún modelo es perfecto y que solo representa una pieza de un rompecabezas inacabado.

Lewis señala que la infraestructura incide significativamente en la estructura del empleo, el incremento de la riqueza familiar, el transporte de productos y la productividad,

impactando así en la economía general (Lewis, 1993). Se explicará una relación compleja que subraya la importancia del estudio del transporte mediante simulación y modelación, no solo para mejorar los tiempos de viaje, sino también para analizar la infraestructura de transporte en la sociedad.

Desde 1990, estudios importantes sobre la relación entre la inversión en infraestructura y la productividad económica han sido promovidos por el Federal Highway Administration de Estados Unidos (FHWA), enfocándose en la interconexión de estados mediante autopistas, como reporta Hickling Corporation, indicando que el 87% de la infraestructura planeada buscaba principalmente la interconexión o distribución de productos entre estados (Lewis, 1991).

En un cambio de paradigma, la FHWA publicó el "High Priority Research Areas for the Office of the Associate Administrator for Policy", explorando mediante diversas metodologías y perspectivas la relación entre la inversión en transporte y el aumento de la productividad pública y privada, priorizando obras con mayor impacto económico en la zona de influencia del proyecto.

Este esfuerzo culminó en el proyecto "Primer on Transportation, Productivity and Economic Development", que identificó metodologías para el análisis costo-beneficio de los proyectos en cartera, describiendo exitosamente la relación entre transporte, economía y retorno de inversión.

Adicionalmente, un estudio detallado del Oak Ridge National Laboratory analizó la correlación entre la congestión vehicular y el crecimiento económico, estudiando también cómo el mantenimiento de vías afecta el desarrollo económico de sectores conectados por estas. Este estudio confirmó que el mantenimiento y la eficiencia de las vías de comunicación tienen

un impacto significativo en la productividad y la economía de regiones tan grandes como un estado norteamericano (Greene, 1997).

Finalmente, Prud'homme (1996) estableció una relación entre la economía y otros elementos naturales de la sociedad, aplicable tanto en Francia como en otros países (Prud'homme, 1996). Este proyecto de investigación continuará documentando cómo la infraestructura influye en la economía a nivel tanto nacional como internacional.

$$Y = f(L, K, J)$$

Donde:

Y = La economía de un sector cualquiera

L = El trabajo de un sector cualquiera

K = Capital privado de un sector cualquiera

J = Capital publico de un sector cualquiera (i. e. Infraestructura Vial)

Prud'homme excluyó regiones significativas y aisladas de Francia, como Ile de France y Córcega, para no distorsionar los resultados de la correlación matemática, analizando datos de la década anterior a la publicación de su estudio. Su enfoque demuestra una metodología estadística y de regresión matemática para crear un modelo simple a partir de la data disponible. Aunque este ejercicio es interesante, plantea más preguntas que respuestas. Inicialmente, Prud'homme no encontró indicios de que la infraestructura fuera un factor determinante en la economía de Francia; sin embargo, al ajustar la regresión a valores per cápita (Y/P), observó un aumento en Y relacionado con los valores de infraestructura por metro cuadrado. Esto plantea la cuestión de si el resultado podría deberse únicamente a variaciones en J/P, L/P o al

impulso del capital privado K/P, un aspecto que requiere más exploración en la historia económica de Francia, tal como lo hace el autor para fundamentar sus conclusiones.

Estos modelos, con sus limitaciones y valiosos aportes, revelan relaciones significativas, fuertemente vinculadas a otras características económicas, entre la infraestructura y la economía de una región o área de estudio.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2004) destaca tres aspectos clave en la relación entre infraestructura y economía en Latinoamérica. Primero, la infraestructura impacta directamente en el aumento del Producto Interno Bruto a través de la producción de servicios de transporte, abastecimiento de agua potable, electricidad, saneamiento y telecomunicaciones. Segundo, la infraestructura genera externalidades sobre la producción que impulsan el crecimiento a mediano y largo plazo. Por último, las inversiones en infraestructura influyen indirectamente en la productividad de los insumos del proceso productivo, incrementando factores productivos como la tierra, el trabajo y el capital físico.

Para comprender el origen del problema abordado en este trabajo de investigación, es conveniente analizar el inicio de la infraestructura en Perú. La historia contemporánea comienza con la creación del Ministerio de Fomento en el gobierno de Nicolás de Piérola en 1896. Según el Ministerio de Transporte y Comunicaciones, este nuevo ministerio asumió funciones relacionadas con el manejo territorial y los expedientes de proyectos de construcción, reparación y mantenimiento de infraestructura a través de la Dirección de Obras Públicas. Unos años antes se había firmado el contrato Grace, en el que Peruvian Corporations Ltd. se comprometía a mejorar y expandir el sistema ferroviario y a establecer nuevas rutas de conexión. Antes del Contrato Grace, la vía férrea había alcanzado solo hasta Chicla, a 140 kilómetros de Callao, pero tras la gestión de la corporación, se extendió hasta La Oroya hacia Huancayo y Cerro de Pasco. Sin embargo, el Estado peruano no gestionó correctamente este

contrato, ya que la corporación no mantuvo las redes ferroviarias de acuerdo con lo especificado en el contrato (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2024).

Comparando los sistemas ferroviarios y los sistemas de carreteras, estos difieren matemáticamente en niveles de servicio y manejo de demanda. Mientras los automóviles se analizan bajo un marco teórico que se explicará en capítulos posteriores, los ferrocarriles se gestionan con una demanda agregada en estaciones y un nivel de servicio modelado con teoría de colas. Esto ya evidencia desde temprano la baja productividad y eficacia del servidor público que ha provocado retrasos en varios sectores a nivel nacional, no solo en transporte.

Con la aparición del automóvil, se destacó la importancia de mejorar los caminos de herradura en Perú, ya que este nuevo invento requería una geometría y características de mejor calidad que las utilizadas por carretas o caballos. En 1902, Pedro Dávalos y Lissón reflexionaba sobre la necesidad de enfocar la obra pública en el adecuamiento de caminos a carreteras para automóviles, ante la insuficiencia de los funcionarios públicos y los recursos económicos para mantener las concesiones ferroviarias: “Se impone [...] como una necesidad suprema e inaplazable para los estadistas nacionales, resolver favorablemente el problema de la comunicación rápida, segura y barata. Para esto es necesario decidirse por un sistema que concuerde con los medios económicos de que dispone la nación para acometer la obra. [...] Por lo pronto hay que renunciar a los ferrocarriles. El país no tiene capitales para hacerlos, ni crédito suficiente, como tampoco sobrantes en su presupuesto para garantizar un interés que pague el costo de ello” (Dávalos y Lissón, 1902).

Otro aspecto importante, además del peso económico de la construcción de carreteras, era la falta de previsión logística y conectividad que advertían exploradores y científicos extranjeros entre ciudades, que aún no se había resuelto ni con ferrocarriles ni puertos. Aunque los caminos de herradura conectaban algunos departamentos, estos habían sido creados por los

propios pobladores que trataban de comerciar sus productos, por lo que eran meros trazos de caballo o carreta sin mantenimiento ni previsión de seguridad. Raimondi describía dos casos específicos en sus travesías por el territorio nacional en busca de conocimiento científico, Moyobamba y Loreto: “El mal estado de los caminos que de Moyobamba se dirigen a la costa, hace que esta ciudad se halle separada del resto de la República por una gran barrera que impide el comercio con los departamentos limítrofes; de suerte que no se lleva sino rara vez a Moyobamba el alimento más indispensable a la vista, cual es la harina, y es por este motivo que en toda la provincia litoral de Loreto casi no se conoce el pan, al que se le suple con plátanos y yuca”. “La provincia litoral de Loreto, considerando su extensión, tiene muy pocos habitantes de manera que casi todos sus caminos son enteramente despoblados y faltos de recursos; siendo muy común viajar a veces muchos días sin encontrar un lugar habitado. En la mayor parte de estos caminos se han construido, de trecho en trecho, algunos techados que se conocen en el país con el nombre de tambos, y adonde el viajero no halla otro recurso que un abrigo contra las fuertes lluvias durante la noche” (Raimondi, 1862).

Como se destaca en las memorias de Raimondi, la conectividad en Perú era prácticamente inexistente, lo cual constituye una de las principales causas del atraso en el desarrollo de las regiones y provincias del país. Tiempo después, un esfuerzo significativo para mejorar esta situación se materializó con la creación del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) durante el gobierno de Juan Velasco Alvarado en 1968. Este nuevo ministerio asumió responsabilidades previamente manejadas por la Dirección General de Vialidad, la Junta Permanente de Telecomunicaciones, la Dirección de Marina Mercante y Aeronáutica Civil. Aunque el anuario del MTC, '220 años de historia, 52 años conectando vida', describe al MTC como una entidad disruptiva y altamente eficiente, los datos revelan un progreso limitado en la velocidad de uso de recursos en los primeros diez años desde su establecimiento (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2024).

Tabla 1*Incremento Vial 1968 - 1978 del Perú*

Sistema	1968	1978	Variación	
			Km	%
Nacional	14483	15138	655	4.5
Departamental	11405	12046	641	5.6

En el anuario del MTC se menciona que, durante el periodo de Juan Velasco Alvarado, se "incrementó la extensión de las carreteras asfaltadas en más de 1400 kilómetros, lo que representó un aumento de cerca del 30% respecto a lo que se había recibido a finales de la década de 1960". Sin embargo, esta afirmación puede considerarse sesgada, ya que para el año 1964 ya se habían aprobado los estudios para la Carretera Marginal de la Selva, proyecto en el cual, al final del gobierno de Juan Velasco Alvarado, se habían asfaltado al menos 900 kilómetros que fueron planificados previamente por el Ministerio de Fomento (Universidad San Ignacio de Loyola, 2020). Estos ejemplos sugieren que la eficacia de ejecución por parte del estado y, en particular, del MTC, ha sido históricamente limitada.

Por esta razón, la propuesta de crear una Autoridad Nacional de Infraestructura que adopte prácticas internacionales y sea liderada, en lo posible, por profesionales extranjeros o nacionales educados completamente en el extranjero, en países líderes en ingeniería como el Reino Unido, Estados Unidos, Australia y Francia, representa una nueva oportunidad para mejorar los servicios de conectividad en Perú. Esta iniciativa busca superar las deficiencias históricas, a pesar de las numerosas excusas presentadas por profesionales peruanos. Ejemplos de proyectos exitosos dirigidos por extranjeros incluyen la implementación de los Juegos Panamericanos de 2019, gestionados por británicos, y otros proyectos planificados como la Vía Expresa Santa Rosa y la Nueva Carretera Central.

Comex realizó un reporte de cierre de brechas de infraestructura considerando las implicancias de la desaceleración económica producida por el COVID-19 (Sociedad de Comercio Exterior del Perú [COMEX], 2023). Los resultados revelaron que Perú experimentó una contracción del PBI de al menos el 17.7% al inicio de la cuarentena. Además, la pobreza aumentó del 20.2% al 25.9% de la población en 2021. De los 11 sectores de obra pública analizados, 8, incluyendo el de carreteras, mostraron un incremento en su brecha de infraestructura de entre el 3% y el 37%. En términos generales, la brecha de infraestructura se refiere a las obras necesarias para alcanzar un nivel de servicio mínimo en un área territorial específica. En el caso de la infraestructura vial, los servicios principales incluyen la conectividad entre dos puntos, el tiempo de viaje, el transporte de mercancía, la inclusión de lugares seguros de pernocte y descanso durante los viajes, entre otros.

La conectividad entre dos puntos tiene un impacto significativo en la economía y en las personas, ya que un sistema de áreas territoriales interconectadas ofrece un abanico de oportunidades más amplio que las áreas aisladas. Por ejemplo, Corea construyó una red de autopistas de aproximadamente 2600 km entre 1970 y 2000, lo que, según el Korea Research Institute for Human Settlements (KRIHS), resultó en una baja productividad laboral, ineficiencia en las cadenas de suministro, precios altos en productos y desconexión entre la mano de obra disponible y los mercados productivos, entre otros problemas (Korea Research Institute for Human Settlements, 2011). El mismo estudio también encontró que esta red de autopistas ayudó a que las zonas urbanas pudieran capitalizar áreas dedicadas al turismo, la diversión y el paisajismo, aumentando así el crecimiento en sus áreas territoriales.

KRIHS explica que un sistema de ciudades conectadas presenta enormes oportunidades para transformar áreas urbanizadas a nivel metropolitano, que han cruzado la transición de manufactura pesada a una industria de valor agregado o una economía orientada a los servicios.

Las industrias tienden a relocalizarse en ciudades secundarias bien conectadas para reducir los costos de mano de obra, materiales y terrenos, como se observó en Corea, donde el crecimiento se desplazó hacia el sur en el corredor regional alejado de Seúl.

Las Naciones Unidas identifican a las redes de producción global y regional como un mecanismo en el cual las grandes y pequeñas empresas pueden colaborar para desarrollar diferentes tipos de producción y distribución, apoyados en la inversión de los gobiernos en infraestructura (Naciones Unidas, 2024). Sin embargo, es crucial destacar que, aunque la inversión en infraestructura es fundamental para la mejora económica, no será suficiente sin la inversión necesaria en infraestructura "soft" como la legislación, la liberalización del mercado y el intercambio comercial, y el marco institucional del área territorial. El flujo de mercancías y personas también transporta conocimiento y servicios que potencian el aumento del crecimiento económico en regiones de altos ingresos como Corea, el Reino Unido y Europa.

Las Naciones Unidas también señalan que la conectividad de transporte regional, tanto vial como ferroviaria, debe mantenerse como una prioridad en los países en desarrollo para sostener el comercio con territorios colindantes y no colindantes. Este incremento en el comercio potencia el crecimiento económico de las personas y de los gobiernos. Según Rietveld y Nijkamp, los efectos de las inversiones en infraestructura pueden clasificarse de dos maneras: temporales, derivados de la construcción y la primera implementación, que incluyen directamente el aumento del empleo y, de manera indirecta, otros sectores relacionados; y permanentes, que comprenden ahorros de tiempo que aumentan la productividad diaria, reducción de accidentes, disminución de los costos monetarios por mejoras en la infraestructura y reducción de los costos ambientales, como la disminución de gases de efecto invernadero y problemas respiratorios (Rietveld, 2000).

Según el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, en 2022, una de las funciones clave del sector es el servicio de movilidad urbana. El Reglamento Nacional de Edificaciones define este servicio como compuesto por el sistema vial de la ciudad, el cual incluye diferentes tipos de vías urbanas tales como vías expresas, arteriales, colectoras, locales y pasajes. Estas vías facilitan el desplazamiento de personas y vehículos tanto en ámbitos urbanos como rurales (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2022).

Un análisis de la evolución y proyección de los indicadores de cierre de brecha en movilidad urbana, llevado a cabo por el mismo ministerio en 2022, indica una reducción en el porcentaje de población urbana sin acceso a servicios de movilidad urbana a través de pistas y veredas. En 2021, este porcentaje disminuyó en 1.14%, pasando de una brecha del 49.46% a un 48.32%.

Tabla 2

Porcentaje de la población urbana sin acceso a los servicios de movilidad urbana a través de pistas y veredas

Indicador Brecha	Brecha Al 2020	Situación	Brecha Al 2021	
			Pendiente	Cierre
Porcentaje de la población urbana sin acceso a los servicios de movilidad urbana a través de pistas y veredas	49.46%	Programado	48.32%	1.14%
		Ejecutado	48.70%	0.76%

De acuerdo con las proyecciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento para los próximos años, se espera que el indicador de población urbana sin acceso a servicios de movilidad urbana a través de pistas y veredas continúe reduciéndose. Según el plan, se anticipa una disminución de al menos 1.14% en 2022, de 0.28% en 2023, y de 0.18% en 2024. Como resultado de estas reducciones anuales, se proyecta un cierre de brecha

consecutivo que llevaría el porcentaje de 47.56% en 2022, a 47.28% en 2023, y finalmente a 47.09% en 2024 (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2024).

Tabla 3

Porcentaje de la población urbana sin acceso a los servicios de movilidad urbana a través de pistas y veredas

Indicador Brecha	Brecha Al 2021	Año	Proyección de la Brecha	
			Pendiente	Cierre
Porcentaje de la población urbana sin acceso a los servicios de movilidad urbana a través de pistas y veredas	48.70%	2022	47.56%	1.14%
		2023	47.28%	0.28%
		2024	47.09%	0.18%

En 2020, la Municipalidad de Lima, amparada por la Ley Orgánica de Municipalidades (Ley Nro. 27972), ejecutó sus competencias especiales asignadas en el artículo 151. Este artículo confiere a la Municipalidad Metropolitana de Lima un régimen especial con competencias y funciones específicas de carácter local metropolitano y regional. Adicionalmente, en concordancia con lo establecido en el artículo 161 de la misma ley y su Reglamento de Organización y Funciones, la Municipalidad Metropolitana de Lima estableció objetivos estratégicos institucionales para el año 2020 enfocados en el transporte (Municipalidad de Lima, 2020).

Tabla 4

Objetivo Estratégico Institucional 02 Sector Transporte de la Municipalidad de Lima

OEI	Objetivos Estratégicos Institucionales
OEI. 02	Mejorar la movilidad urbana sostenible en beneficio de la ciudadanía

Así también, la Municipalidad Metropolitana de Lima ha identificado el siguiente Indicador de Brecha (IB) para la función de transporte:

Tabla 5

Indicador de Brecha (IB) del Objetivo Estratégico Institucional 02 Sector Transporte de la Municipalidad de Lima

OEI	Indicador de Brecha (IB)	Valor del IB	UM del IB
OEI. 02	Porcentaje de la población urbana sin acceso a los servicios de movilidad urbana a través de pistas y veredas	43.0	%

Por otro lado, la Municipalidad Provincial de Arequipa, en 2020, dentro de sus competencias ha desarrollado el Plan de Mejoramiento Institucional (PMI) y sus respectivos criterios de priorización, donde reconocen el transporte y el tránsito como pilares fundamentales para su gestión (Municipalidad Provincial de Arequipa, 2020).

Tabla 6

Objetivo Estratégico Institucional 07 Sector Transporte de la Municipalidad Provincial de Arequipa

Objetivos Estratégicos Institucionales		Nombre del Indicador
Código	Descripción	
OEI. 07	Mejorar el servicio de transporte y tránsito en la provincia.	Porcentaje de vehículos que prestan servicio masivo urbano de manera formal. % de vías pavimentadas en mal estado % vías no pavimentadas con afirmado % vías no pavimentadas sin afirmado

Se identificó así también, en las vías bajo su jurisdicción, lo siguiente:

Tabla 7

Reporte de Condición de vías vecinales de la Municipalidad Provincial de Arequipa

Longitud de vías vecinales (Km)	Total de vías	Brecha (Vías en mal estado)
Pavimentada	-	-
Asfaltado	262.97	65.94
No Pavimentado	-	-
Afirmado	150.58	42.16
Sin Afirmado	29.69	3.41

Por último, la Municipalidad Provincial de Trujillo, en 2023, dentro de sus competencias ha desarrollado el Plan de Mejoramiento Institucional (PMI) y sus respectivos criterios de priorización, en donde reconocen el transporte y el tránsito como pilares fundamentales para su gestión, al igual que otros municipios dentro del territorio nacional (Municipalidad Provincial de Trujillo, 2023).

Tabla 8

Objetivo Estratégico Institucional 06 Sector Transporte de la Municipalidad Provincial de Trujillo

Objetivos Estratégicos Institucionales		Servicio Identificado
Código	Descripción	
OEI. 06	Reducir la brecha de infraestructura en la provincia de Trujillo	Servicio de Movilidad Urbana (Pistas y veredas, infraestructuras diversas, como comisarias, centros de salud, etc.)

El indicador seleccionado por la Municipalidad Provincial de Trujillo es el porcentaje de sistemas integrados de transporte por implementar.

Tabla 9

Indicador de Brecha (IB) del Objetivo Estratégico Institucional 01 Sector Transporte de la Municipalidad Provincial de Trujillo

Nro.	Nombre de indicador de brecha	Valor IB
1	Porcentaje de ciudades con Sistemas Integrados de Transporte Urbano Sostenible no Implementados	100%

Los siguientes ejemplos demuestran que, en diversas ciudades del Perú, la brecha de infraestructura vial es notablemente elevada y el progreso hacia su eliminación avanza lentamente. Los porcentajes de brecha oscilan entre el 40% y el 100%, con avances de apenas un máximo de 1% al año. Esto no toma en cuenta la incorporación de nuevas asociaciones de vivienda y asentamientos humanos que, de manera desordenada y sin planificación, incrementan exponencialmente esta necesidad. Además, algunas vías han sido construidas de manera artesanal por los ciudadanos, quienes, a pesar de sus buenas intenciones, carecen de los conocimientos necesarios para mantener las vías operativas de manera correcta y eficiente.

1.1 Planteamiento del Problema

El Perú ha enfrentado desafíos significativos en el sector transporte desde 1990, especialmente en obras viales. Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC), en 1990 había un déficit del 63.4% en vías pavimentadas a nivel nacional, cifra que ha disminuido al 16.3% actualmente. También persiste un gran déficit en vías departamentales, que ha bajado del 92.6% en 1990 al 83.0% hoy en día.

Además, se identifica una brecha de infraestructura a largo plazo en el sector transporte valorada en 160,958 millones de soles (Ministerio de Economía y Finanzas, 2019) y un presupuesto asignado de 13,298.9 millones de soles para el Ministerio de Transporte en 2022

(Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2024). Esta situación subraya la importancia de identificar y priorizar proyectos que sean más relevantes y eficientes en el cierre de brechas, especialmente cuando los fondos son limitados.

La escasez de recursos para cubrir estas demandas, tanto en Perú como en otros países, ha llevado al desarrollo de la planificación de transporte para priorizar distintos proyectos según criterios específicos de cada país o región. Con la llegada de las computadoras personales y la revolución informática, se han desarrollado programas informáticos que facilitan el desarrollo de modelos y simulaciones para apoyar la toma de decisiones en proyectos de infraestructura vial, optimizando la transitabilidad de manera eficiente. Empresas como CALIPER, AIMSUM, VISUM e INRO han desarrollado diversos modelos adaptados a diferentes realidades nacionales.

En la actualidad, estos programas informáticos son herramientas esenciales para la planificación de obras viales, no solo a nivel nacional sino también supranacional, incluyendo regiones, distritos e incluso asociaciones humanas. Sin embargo, en Perú, su utilización es limitada principalmente por el alto costo de las licencias y la necesidad de profesionales capacitados para operar y desarrollar estos sistemas. Esto ha resultado en que autoridades y representantes tomen decisiones erróneas o con dificultad, contribuyendo al problema de congestión vial elevada en Lima Metropolitana.

Según el TOMTOM Traffic Index, Lima Metropolitana tiene una congestión vial que afecta al menos al 61% de las vías, posicionándola como la quinta ciudad más congestionada del mundo. A pesar de los esfuerzos en proyectos significativos como la red básica de metro de Lima y el Metropolitano, ciudades importantes como Piura, Arequipa y Trujillo, con poblaciones superiores al millón de habitantes, aún no han visto proyectos de esta magnitud.

Esto también se extiende a ciudades de menor población que igualmente requieren proyectos de gestión de tráfico y el uso de herramientas de planificación de transporte (TOMTOM, 2023).

1.2 Descripción del Problema

Para contextualizar adecuadamente la situación actual del tráfico en Lima Metropolitana, es crucial mencionar que el último estudio exhaustivo sobre la recolección de información de viajes en la región se llevó a cabo en 2005 por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA). Dicho estudio proporcionó datos sobre el estado del tráfico, las vías más utilizadas y los destinos más comunes en Lima Metropolitana. Sin embargo, utilizar esa data hoy sería inapropiado debido a su antigüedad. Según AUSTROADS, los datos empleados en modelos matemáticos y de transporte deben ser actuales y precisos para garantizar resultados relevantes y útiles; por tanto, aunque el estudio de JICA fue significativo en su momento, su utilidad actual es limitada (AUSTROADS, 2021).

En consecuencia, este estudio se apoyará en tecnologías actuales y accesibles para la demostración y calibración del modelo a utilizar. Específicamente, se empleará la plataforma de Google Maps para determinar tiempos y distancias entre diferentes puntos de la capital. Esto permitirá ilustrar el desempeño de los corredores más importantes para Lima Norte, según lo identificado por la Autoridad de Transporte Urbano de Lima y Callao (ATU) y la Policía Nacional, basándose en los resultados proporcionados por Google Maps (Google, 2024).

Tabla 10

Tiempo De Desplazamiento en Hora No Pico y Hora Pico en Avenidas Mas Importantes de Lima Metropolitana Norte

Tramo	Longitud (Km)	Tiempo De Desplazamiento Hora Pico	Tiempo De Desplazamiento Hora No Pico
Vía Panamericana Norte, (Av. Nestor Gambeta / Av. Ramiro Priale)	32.2	1 hr 40 min	35 min
Av. Túpac Amaru (Av. Caquetá / Av. Manuel Prado)	32.4	1 hr 50 min	30 min
Av. Proceres de la Independencia (Av. Malecón Checa / Av. El Sol)	6.1	40 min	12 min
Av. Néstor Gambetta (Av. Elmer Faucett / Av. Morales Duarez)	4.6	22 min	10 min

Av. Eduardo de Habich (Av. Universitaria / Av. Tupac Amaru)	3.1	22 min	7 min
Av. Argentina (Av. Alfonso Ugarte / Av. Elmer Faucett)	6.0	12 min	35 min
Av. Universitaria (Av. Morales Duarez / Av. German Aguirre)	2.0	22 min	8 min
Av. Alfonso Ugarte (Vía Panamericana Norte / Plaza Bolognesi)	2.5	16 min	6 min
Av. Los Alisos (Av. Canta Callao / Av. Tupac Amaru)	4.2	28 min	9 min
Av. Tomas Valle (Av. Elmer Faucett / Av. Tupac Amaru)	6.1	35 min	12 min
Av. República de Venezuela (Av. Alfonso Ugarte / Av. Elmer Faucett)	6.2	35 min	14 min
Av. La Marina (Av. Javier Prado / Av. Antonio Jose de Sucre)	2.2	26 min	9 min
Av. Universitaria (Av. Argentina / Av. German Aguirre)	3.2	20 min	6 min
Av. Nicolas Ayllón (Av. Las Torres / Av. Miguel Grau)	4.1	14 min	26 min
Av. Aviación (Vía Expresa Grau / Ovalo Arriola)	2.3	9 min	22 min
Vía Panamericana Norte, (Vía Expresa Grau/ Av. San Juan de Dios)	4.4	10 min	30 min

Efectivamente, podemos utilizar los resultados obtenidos a través de Google Maps para demostrar el rendimiento de los corredores más importantes para Lima Sur. Esta información, respaldada por la Autoridad de Transporte Urbano de Lima y Callao (ATU) y la Policía Nacional, proporciona una visión actual y relevante del estado del tráfico en estas áreas críticas de la ciudad. Esta metodología permite evaluar de manera precisa las condiciones de movilidad y los tiempos de desplazamiento en diferentes puntos de la capital, lo cual es fundamental para la planificación y mejora del transporte urbano en Lima Metropolitana (Google, 2024).

Tabla 11

Tiempo De Desplazamiento en Hora No Pico y Hora Pico en Avenidas Mas Importantes de Lima Metropolitana Sur

Tramo	Longitud (Km)	Tiempo De Desplazamiento Hora Pico	Tiempo De Desplazamiento Hora No Pico
Av. República de Panamá (Vía Expresa Paseo de la Republica / Av. Tomas Marsano)	1.3	16 min	4 min
Av. Tomas Marsano (Av. República de Panamá / Ovalo Higuiereta)	3.2	30 min	9 min
Av. Guardia Civil (Av. Tomas Marsano / Vía Expresa Javier Prado)	2.2	20 min	7 min
Av. Aviación (Vía Expresa Javier Prado / Ovalo Higuiereta)	4.6	35 min	12 min
Av. Angamos (Vía Expresa Paseo de la Republica / Vía Panamericana Sur)	5.2	35 min	10 min
Vía Panamericana Sur (Av. Angamos / Av. Tomas Marsano)	4.5	24 min	14 min
Av. Arequipa (Av. Javier Prado / Av. Jose Pardo)	3.0	22 min	7 min
Av. Santa Cruz (Av. Arequipa / Plaza Centro América)	2.1	18 min	7 min
Av. Jose Pardo (Plaza Centro América / Vía Expresa Paseo de la Republica)	1.9	18 min	6 min
Av. El Polo (Ovalo Monitor / Vía Panamericana Sur)	3.8	28 min	9 min
Av. Benavides (Vía Panamericana Sur / Ovalo Higuera)	2.5	22 min	8 min
Vía Costa Verde (Calle Independencia / Subida Armendáriz)	8.6	40 min	20 min

Av. Pachacútec (Av. 26 de noviembre / Vía Panamericana Sur)	5.7	28 min	12 min
Av. Defensores del Morro (Av. Malecón Grau / Av. Paseo de la Republica)	2.9	22 min	7 min
Vía Panamericana Sur (Av. Los Héroes / Av. Mateo Pumacahua)	4.9	20 min	9 min
Vía Antigua Panamericana Sur (Av. Lima / Calle Los Eucaliptos)	1.5	10 min	4min

Para ilustrar la gravedad y la precaria situación del tráfico en Lima Metropolitana, se hace necesario establecer comparaciones con ciudades de tamaño y población similar, utilizando Google Maps para obtener una perspectiva más clara. Por ejemplo, París, con una población en 2023 de aproximadamente 11 millones 277 mil personas, sirve como un punto de comparación relevante frente a los 11 millones 362 mil habitantes de Lima. Al analizar tramos y avenidas similares en ambas ciudades, se puede obtener una visión comparativa del manejo de tráfico, los desafíos de movilidad y las estrategias de planificación urbana implementadas en cada metrópoli. Esta comparación ayuda a contextualizar la situación del tráfico en Lima y a identificar posibles áreas de mejora basándose en las prácticas de otras ciudades con desafíos similares.

Tabla 12

Tiempo De Desplazamiento en Hora No Pico y Hora Pico en Avenidas Mas Importantes de Paris

Número	Tramo	Longitud (Km)	Tiempo De Desplazamiento Hora Pico	Tiempo De Desplazamiento Hora No Pico
1	Paris Super Peripherique (Technicentre Paris Est/ Autoroute de Normandie)	33.1	40 min	24 min
2	Paris Super Peripherique (Boulevard Charles de Gaulle / Marche International de Rungis)	33.8	1 hr	26 min
3	Av. Jean Lolive (Boulevard Peripherique / Av. Chem du Pont)	7	35 min	14 min
4	Av. Marceau (Av. Francis de Pressense / Rue Anatole France)	4.5	22 min	10 min
5	Av. Henri Barbusse (Rue Auguste Polissard / Av. De la Resistance)	3.1	14 min	8 min
6	Autostrada A106 (Marche International de Rungis / Av. Camelnat)	6.0	12 min	35 min
7	Rue Adolphe Pajeaud (Rue Prosper Legoute / Rotonda de 19 Mars 1962)	2.0	8 min	4 min
8	Boulevard Marguerite de Rochechuiart (Boulevard de Clichy / Av. De Flandre)	2.5	18 min	7 min
9	Boulevard de Sebastopol (Place Denfert – Rochereau / Boulevard St Denis)	4.4	35 min	14 min
10	Boulevard Garibaldi (Quai Jacques Chirac/ Place d'Italie)	5.9	40 min	16 min

En la tabla 12, se evidencian las diferencias entre avenidas, calles, vías y similares de Lima y París. Es notable que durante las horas pico, las principales vías de Lima enfrentan

tiempos de recorrido significativamente más largos comparados con sus equivalentes en París. Por ejemplo, en la Panamericana Norte de Lima, se registra un tiempo de recorrido adicional de una hora en comparación con la Paris Super Peripherique, que también funciona como una vía de circunvalación en forma de anillo.

Además, la Avenida Túpac Amaru en Lima, que actúa como una vía de evitamiento periférica, muestra un tiempo de recorrido adicional de 50 minutos para la misma longitud de tramo en comparación con la Paris Super Peripherique. Mientras que otras avenidas en Lima muestran una reducción de minutos en algunos casos, la Avenida Javier Prado es otra excepción, con un tiempo de recorrido mayor comparado con su contraparte en París.

Estos datos resaltan la severidad de los problemas de congestión en Lima, sugiriendo la necesidad de estrategias de gestión de tráfico más efectivas y posiblemente la implementación de mejoras en infraestructura y servicios de transporte público para aliviar la situación.

Tabla 13

Comparativo entre Avenidas de similar longitud en Tiempo de Desplazamiento en Hora Pico y No Pico (Lima-Paris)

Número	Diferencia de Longitud entre ciudades	Diferencia de Tiempo de Desplazamiento en Hora Pico	Diferencia de Tiempo de Desplazamiento en Hora No Pico
1	-0.9	60	11
2	-1.4	50	4
3	-0.9	5	-2
4	0.1	0	0
5	0	8	-1
6	0	0	0
7	0	14	4
8	0	-2	-1
9	-0.2	-7	-5
10	0.2	-5	-4

Para continuar con el análisis comparativo, se puede observar a Buenos Aires que, con una población en 2023 de aproximadamente 15 millones 618 mil personas, sirve como un ejemplo relevante frente a los 11 millones 362 mil habitantes de Lima. Esta comparación permite evaluar cómo ciudades con diferentes tamaños poblacionales manejan problemas

similares de tráfico y movilidad, destacando los enfoques y estrategias que podrían ser aplicables o adaptados para mejorar la situación en Lima.

Tabla 14

Tiempo De Desplazamiento en Hora No Pico y Hora Pico en Avenidas Mas Importantes de Buenos Aires

Tramo	Longitud (Km)	Tiempo De Desplazamiento Hora Pico	Tiempo De Desplazamiento Hora No Pico
Av. San Martin (Av. General Paz / Calle Gutenberg)	1.3	10 min	3 min
Av. Cabildo (Av. General Paz / La Pampa)	3.2	20 min	7 min
Av. De los Incas (Av. Cramer / Calle Torrent)	2.2	20 min	7 min
Av. Perito Moreno (Calle. Enrique Ochoa / Av. Luis Dellepiane)	4.6	18 min	8 min
Av. Corrientes (Plaza de la Republica / Av. Raúl Scalabrini)	5.3	35 min	1 min
Av. Paseo Colon (Av. Ricardo Balbín / Av. 9 de Julio)	4.5	30 min	10 min
Av. 9 de Julio (Calle México / Av. Del Libertador)	3.0	20 min	7 min
Av. Regimiento de Patricios (Av. Martin García / Av. Pedro de Mendoza)	2.2	14 min	4 min
Av. Del Libertador (Av. General Paz / Av. Guillermo Udaondo)	2.0	9 min	3 min
Av. Amancio Alcorta (Av. Sáenz / Calle Ramon Carrillo)	3.6	20 min	8 min

En la tabla 14 se presentan las diferencias entre avenidas, calles, vías y similares entre Lima y París. Es evidente que durante las horas pico, las vías principales de Lima enfrentan demoras significativas. Por ejemplo, la Panamericana Norte en Lima registra un tiempo de recorrido adicional de una hora en comparación con la Paris Super Peripherique, una vía de circunvalación en forma de anillo.

Además, la Avenida Túpac Amaru en Lima, que funciona como vía de evitamiento periférica, muestra un tiempo de recorrido adicional de 50 minutos para la misma longitud de tramo en comparación con la Paris Super Peripherique. En cambio, otras avenidas en Lima exhiben una reducción de minutos en algunos casos, aunque hay excepciones como la Avenida Javier Prado, que también presenta un tiempo de recorrido significativamente mayor en comparación con su equivalente en París.

Estos datos resaltan los desafíos de tráfico que enfrenta Lima y subrayan la necesidad de considerar estrategias de gestión de tráfico más efectivas, además de posibles mejoras en infraestructura y servicios de transporte público para aliviar la congestión en estas rutas críticas.

Tabla 15

Comparativo entre Avenidas de similar longitud en Tiempo de Desplazamiento en Hora Pico y No Pico (Lima-Buenos Aires)

Número	Diferencia de Longitud entre ciudades	Diferencia de Tiempo de Desplazamiento en Hora Pico	Diferencia de Tiempo de Desplazamiento en Hora No Pico
1	-0.9	60	11
2	-1.4	50	4
3	-0.9	5	-2
4	0.1	0	0
5	0	8	-1
6	0	0	0
7	0	14	4
8	0	-2	-1
9	-0.2	-7	-5
10	0.2	-5	-4

Figura 1

Comparativo gráfico de tráficos en Paris y Buenos Aires



Consecuencias en los pasajeros:

Tiempo Perdido:

La congestión vial representa un problema significativo para los pasajeros principalmente debido al tiempo de demora adicional en las vías de circulación. Este retraso es conocido como "tiempo perdido" en el estudio del tráfico, ya que bajo condiciones normales de capacidad vehicular, las personas deberían llegar a sus destinos en menos tiempo.

Según el informe INRIX Global Traffic Scorecard, las ciudades de Estados Unidos registraron las siguientes cantidades de horas perdidas por mes durante las horas pico en 2022 (INRIX, 2022).

Tabla 16

Ranking TOM TOM TRAFFIC de ciudades del Mundo y USA 2022

Ciudades de Estados Unidos	Ciudades del Mundo
Chicago, IL: 155 hours delayed	London, UK: 156 hours
Boston, MA: 134 hours delayed	Chicago, USA: 155 hours
New York, NY: 117 hours delayed	Paris, France: 138 hours
Philadelphia, PA: 114 hours delayed	Boston, USA: 134 hours
Miami, FL: 105 hours delayed	Bogota, Colombia: 122 hours
San Francisco, CA: 97 hours delayed	Palermo, Italy: 121 hours
Los Angeles, CA: 95 hours delayed	Toronto, Canada: 118 hours
Washington, D.C.: 83 hours delayed	New York City, USA: 117 hours
Houston, TX: 74 hours delayed	Philadelphia, USA: 114 hours
Atlanta, GA: 74 hours wasted	Miami, USA: 105 hours

Perdida de Combustible:

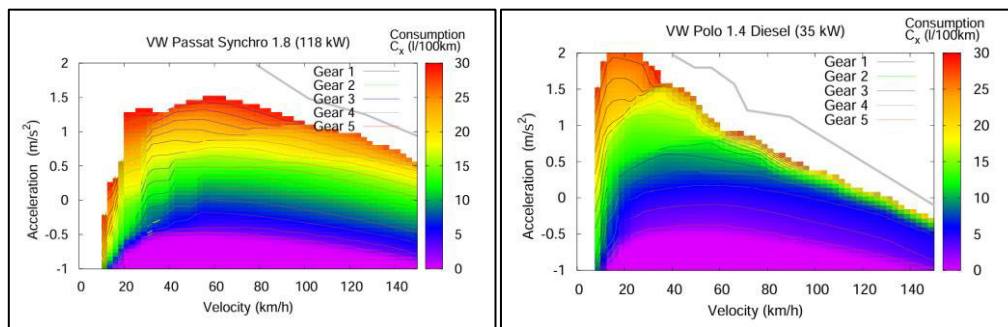
Por supuesto, es esencial abordar un tema tan relevante como el consumo de combustible en situaciones de congestión vehicular, que puede cuantificarse incluso sin recurrir a un modelo matemático complejo. Treiber y colaboradores ilustran este punto a través de su investigación, que aborda el modelamiento del consumo de combustible en vehículos durante

la congestión. El estudio se centra en la transformación de la mecánica de transmisión en una función que puede ser optimizada (Treiber, 2008).

Como parte de esta investigación, se modelaron dos tipos de vehículos: un VW Passat Synchro 1.8 y un VW Polo 1.4 Diesel. Estos ejemplos ayudan a entender cómo distintas configuraciones de vehículos pueden influir en el consumo de combustible bajo condiciones de tráfico denso.

Figura 2

Incremento de combustible según velocidad y cambio en un VW Polo 1.4 Diesel y VW Passat Synchro 1.8



Podemos observar en los gráficos que cuando los autos están en la primera marcha (Gear 1), consumen una cantidad de gasolina cercana a las 30 unidades, mientras que en marchas superiores el consumo se reduce a aproximadamente 10 unidades. Si un auto enfrenta congestión vehicular en medio de un viaje, esto generalmente implica que el vehículo circula a velocidades inferiores a las recomendadas para un viaje seguro, o incluso que se detiene periódicamente.

Esto implica que, durante una congestión vehicular, es más probable que se utilicen frecuentemente las marchas bajas, lo que conduce a un aumento del consumo de combustible. En contraste, cuando el vehículo puede viajar a mayor velocidad, predominan las marchas superiores, las cuales son más eficientes en términos de consumo de combustible. Por lo tanto, el tráfico denso no solo afecta el tiempo de viaje, sino que también incrementa

significativamente el consumo de combustible, lo que tiene implicaciones tanto económicas como ambientales.

La Federal Highway Administration (FHWA) destaca que el rendimiento de una vía es tanto consistente y repetitivo como variable e impredecible. Se considera consistente y repetitivo porque su comportamiento se manifiesta regularmente y puede predecirse con cierta precisión. Por ejemplo, los patrones de congestión vehicular durante las horas pico son bien conocidos por quienes transitan frecuentemente por esas rutas. Sin embargo, factores imprevistos como accidentes, eventos sociales y otras ocurrencias pueden alterar drásticamente las expectativas de los habituales usuarios de las vías y de los expertos en tráfico.

En ciudades como Lima, la presencia de una gran cantidad de servicios de transporte informal complica aún más la situación. Estos servicios a menudo varían sus horarios de operación y rutas, adaptándose día a día a las condiciones del momento. Además, la fluctuación en el uso de transporte formal debido a la menor utilización de colectivos o la irregularidad en el uso de corredores formales son eventos comunes. Esto resulta en una dificultad significativa para mantener una regularidad en los tiempos de viaje planificados para los diferentes modos de transporte en la ciudad (Federal Highway Administration, 2020).

Existen tres puntos importantes a considerar en situaciones de tráfico denso. En primer lugar, el incremento de temperatura es notable, debido a que los vehículos se encuentran próximos entre sí, lo que genera un aumento de la temperatura del aire cerca del radiador y una reducción del flujo de aire. Esto interfiere con el proceso de enfriamiento del motor, provocando un aumento de su temperatura. Si esta situación ocurre con frecuencia, puede acelerar el desgaste del motor y del radiador, resultando en la necesidad de realizar mantenimientos más frecuentes.

En segundo lugar, el tráfico intenso implica que los frenos se utilicen más activamente debido al frenado constante en los embotellamientos. Esto conlleva un desgaste acelerado de componentes como las fajas, discos y pastillas de freno, lo cual aumenta la frecuencia de los mantenimientos necesarios y, por ende, los gastos operativos del vehículo.

Estos factores no solo afectan la durabilidad y el rendimiento del automóvil, sino que también inciden en el costo económico para los conductores, que deben invertir más en el cuidado y mantenimiento de sus vehículos debido a las condiciones adversas generadas por el tráfico congestionado.

La congestión vehicular, especialmente en ciudades como Lima, indudablemente genera grandes molestias y frustraciones durante el día a día de las personas. Anderson (2016) encontró que los estadounidenses están dispuestos a intercambiar cinco minutos de actividad recreativa por solo un minuto menos en un viaje congestionado, resaltando la aversión general a la congestión vehicular.

Por su parte, la Universidad de Queensland (2016) identifica varios factores que pueden desencadenar ataques de ira en las vías, incluyendo la congestión vehicular pesada, la presión por llegar a tiempo, las obras en las vías y las temperaturas extremas. Estos elementos contribuyen a un ambiente estresante que puede precipitar reacciones emocionales intensas.

Además, la Fundación White Swan (2024) explica que la pérdida de control en una situación, la sensación de no ver mejoras y la baja tolerancia a la frustración pueden provocar respuestas impulsivas. Físicamente, la frustración puede causar aumentos en la presión sanguínea que afectan funciones involuntarias como la respiración, la digestión y los latidos del corazón. A largo plazo, estos estados pueden debilitar el sistema inmune y llevar a enfermedades más graves.

Hennessy (1999) señala que estos ataques de ira en las vías a menudo pueden llevar a la agresión. En Lima, donde se percibe un nivel educativo bajo, la falta de modales y otras carencias sociales se hacen más evidentes en las vías. Los comportamientos agresivos pueden variar desde acciones leves como el uso innecesario del claxon, gritos entre conductores, y el "tailgating" intencional, hasta comportamientos más severos como la violencia física hacia vehículos o personas, el uso de armas blancas o proyectiles como forma de intimidación, y la persecución. Todos estos actos están asociados con la congestión vehicular como un evento desencadenante, dependiendo del estado emocional y psicológico del individuo.

Ghazali (2019) destaca que la congestión vehicular genera una gran frustración y molestia, más que muchas otras situaciones cotidianas, debido a su impacto directo en la realización de otras actividades. Las personas perciben el tráfico intenso como una pérdida de tiempo fuera de su control, lo que reduce las horas disponibles para dedicarse a otras actividades significativas.

Además, según Singhakant (Kittipichai, 2015), la calidad de vida se mide por la satisfacción con la vida diaria de las personas. El hecho de que los individuos pasen una parte considerable del día atrapados en el tráfico, en una situación incómoda y desagradable, implica que tendrán una menor satisfacción en general, afectando negativamente tanto su tiempo de ocio como su desempeño laboral. Por lo tanto, la congestión vehicular no solo es una fuente de estrés inmediato, sino que también tiene un efecto prolongado al reducir la calidad de vida general de las personas.

Los automóviles son una fuente principal de contaminación atmosférica en entornos urbanos. La lenta circulación vehicular, unida a los frecuentes estacionamientos o las constantes aceleraciones y desaceleraciones, provoca que los motores emitan mayores

volúmenes de emisiones nocivas. Entre las emisiones más comunes generadas por los vehículos se encuentran:

- ***Dióxido de Nitrógeno (NO₂)***. Este gas es perjudicial para la vegetación, ya que inhibe su crecimiento y reduce su densidad. Además, el dióxido de nitrógeno y otros óxidos de nitrógeno pueden interactuar con el agua, oxígeno y otros químicos en la atmósfera para formar lluvia ácida, afectando también a los cuerpos de agua.
- ***Monóxido de Carbono (CO)***. Aunque no afecta directamente la temperatura del planeta, sí compromete la capacidad de la atmósfera para limpiarse a sí misma de muchos gases nocivos. Junto con otros agentes contaminantes y bajo la influencia de la luz solar, contribuye a la formación de ozono.
- ***Dióxido de Carbono (CO₂)***. Es uno de los gases de efecto invernadero más comunes y significativos. Esencial para la vida en la Tierra, ayuda a mantener una temperatura ideal para la vida. No obstante, su exceso puede desequilibrar la temperatura del planeta y contribuir al calentamiento global.
- ***Hidrocarburos sin Combustionar***. Estos compuestos reaccionan con la luz solar y otros contaminantes, como los óxidos de nitrógeno, para formar ozono, un componente principal del smog fotoquímico. También contribuyen al efecto invernadero y pueden interferir con la capacidad de las plantas para realizar la fotosíntesis.
- ***Benceno***. Este compuesto puede reaccionar con otros químicos para crear smog, además de combinarse con la lluvia y la nieve y contaminar el agua y el suelo, donde puede permanecer por largos períodos.
- ***Formaldehído***. Es altamente tóxico para la fauna marina y otras criaturas que dependen de cuerpos de agua.

Consecuencias Sociales en Lima

Uno de los impactos sociales más significativos en Lima es la inseguridad ciudadana asociada a la congestión vehicular. Debido a la falta de seguridad en muchos distritos metropolitanos, la congestión se convierte en una oportunidad para los delincuentes. Según un reporte de Radio Programas del Perú, los criminales aprovechan cuando los vehículos están detenidos para romper ventanas con bujías y robar objetos personales como carteras y celulares. Situaciones similares ocurren en el transporte público, donde los delincuentes pueden abordar brevemente los vehículos y asaltar a los pasajeros cerca de las puertas (Infobae, 2023).

Figura 3

Ejemplo de Robo en Vías de Lima Metropolitana



La contaminación del aire derivada del uso de vehículos de combustión es una preocupación de salud pública significativa, como lo indica el Ministerio de Salud. Este tipo de contaminación puede provocar varias enfermedades crónicas y condiciones que deterioran la calidad de vida de las personas afectadas. Según un informe del Ministerio de Salud de 2005, algunas de las afecciones relacionadas con la exposición a contaminantes atmosféricos incluyen:

- A. **Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC).** Esta es una enfermedad pulmonar común que dificulta la respiración. Existen dos formas principales de EPOC:
- **Bronquitis crónica.** Involucra una tos prolongada acompañada de moco.
 - **Enfisema.** Ocurre cuando hay daño progresivo en los pulmones a lo largo del tiempo. La mayoría de las personas con EPOC presentan una combinación de ambas condiciones (MedlinePlus, 2024).
- B. **Asma.** Esta enfermedad crónica provoca la inflamación y el estrechamiento de las vías respiratorias en los pulmones, resultando en dificultades para respirar, sibilancias, falta de aliento, opresión en el pecho y tos (MedlinePlus, 2024).
- C. **Fatiga.** A diferencia de la somnolencia, la fatiga se caracteriza por una falta de energía y motivación. La somnolencia y la apatía pueden ser síntomas que acompañan a la fatiga, indicando un estado de baja energía más que solo necesidad de dormir (MedlinePlus, 2024).
- D. **Hipertensión.** La hipertensión o presión arterial alta se produce cuando hay una fuerza excesiva contra las paredes de las arterias a medida que el corazón bombea sangre. Si no se trata, puede conducir a condiciones graves como enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares, insuficiencia renal y problemas oculares, entre otros (MedlinePlus, 2024).

Estos datos subrayan la importancia de abordar la contaminación del aire, especialmente en áreas urbanas con altos niveles de tráfico vehicular, para mejorar la salud pública y prevenir condiciones médicas asociadas con la calidad del aire deteriorada.

1.3 Formulación del Problema

1.3.1. Problema General

¿De qué manera el uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos optimiza la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿De qué manera el uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el tiempo de priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano?
- ¿De qué manera el uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el costo de priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano?
- ¿De qué manera el uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el número de personas necesarias para desarrollar la priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano?

1.4 Antecedentes

1.4.1. *Historia Breve del Modelamiento del Transporte*

La evolución del modelamiento de transporte ha sido significativa desde sus inicios en los años 50, cuando se desarrollaron los fundamentos en el contexto de estudios matemáticos aplicados al transporte por los departamentos de Detroit y Chicago. Estas técnicas luego se exportaron a otros países, como el Reino Unido, donde se aplicaron en los suburbios de Londres y continuaron desarrollándose y revisándose a lo largo de los años (Hensher D. A., 2008).

Con la expansión de las computadoras personales a las universidades en los años 60 y la creación de un marco teórico unificado bajo teoría matemática/económica, surgió un interés creciente en la comunidad científica por utilizar las computadoras para avanzar en la teoría de simulación. El Departamento de Transporte de Washington D.C (DCDOT) formuló el primer requerimiento estadounidense de software para modelamiento y planificación, conocido como TRANS.

La década de los 70 marcó el inicio de la evaluación microscópica con el software estadounidense TRANSYT, originario del modelo DAFT, que se especializa en el análisis de intersecciones y señales programables de tránsito, como los semáforos. Uno de los primeros ejemplos documentados de su aplicación fue en White Stone Parkway. Más tarde, en los años 70, la Administración Federal de Carreteras creó el proyecto de desarrollo e investigación UTCS (Urban Traffic Control System), que resultó en la creación del modelo de simulación de tráfico UTCS-1.

En los años 80, se expandieron las capacidades de simulación de tráfico gracias a la interpretación matemática de las teorías de Wardrop. Nuevas inclusiones como operaciones de autobuses y control adaptativo, así como emisiones de vehículos, fueron parte de un nuevo

modelo de la FHWA llamado INTRAS. La disponibilidad de computadoras más potentes y la creación de lenguajes de programación como UNIX y C facilitaron el desarrollo de TRAFLO, adecuado para modelos regionales más grandes y complejos.

Recientemente, el enfoque del modelamiento de tráfico ha cambiado. Antes se priorizaba la capacidad de las vías para soportar el tráfico y evitar la congestión, pero los avances recientes promueven un enfoque más ambientalista, buscando soluciones que no necesariamente incrementen la capacidad vial, sino que favorezcan la peatonalización y la gestión del precio por uso de carriles.

Además, se han introducido nuevos enfoques en el modelamiento, como los modelos basados en agentes y el modelo multiagentes, este último siendo una técnica prometedora que debería ser probada en futuras investigaciones en Lima.

Finalmente, desde los años 90 se han impulsado modelos de transporte basados en el uso del suelo en varios países europeos, aunque estos modelos pueden no ser completamente aplicables en una ciudad como Lima, donde las normativas de uso de suelo no son estrictamente respetadas, limitando la efectividad de suposiciones sobre la funcionalidad de los terrenos en zonas donde los edificios pueden tener usos comerciales, residenciales u otros no regulados de esa manera.

1.4.2. Antecedentes Modernos del Modelamiento en Gobiernos

NISMOD representa la primera base de datos y plataforma de modelado de sistemas de infraestructura en el Reino Unido. Este avanzado sistema de modelamiento opera en tres dimensiones clave: 1) Planificación de infraestructura a nivel estratégico de largo plazo, 2) Desarrollo de infraestructura sostenible, y 3) Verificación de riesgos y resiliencias. Es crucial para el desarrollo de modelos independientes que se basan en diferentes escenarios de

desarrollo y estrategias. Adicionalmente, NISMOD es útil para crear métricas de funcionamiento y rendimiento de la infraestructura modelada, utilizando datos de infraestructura en operación.

Kohler (2008) menciona que, en el pasado, se ha utilizado el modelo SCENES (Modelo Europeo de Transporte de pasajeros y carga) y E3ME, un modelo macroeconómico, para calcular los efectos de programas de inversión a nivel nacional o continental. SCENES es un modelo que incluye la demanda y la red de asignación de transporte tanto para carga como para pasajeros, abarcando redes de transporte marino, terrestre y aéreo y considerando los servicios intermodales. Este modelo está operativo en 15 estados miembros de la Unión Europea, incluyendo España, Grecia y Portugal.

E3ME, por su parte, es un modelo económico que emplea la demanda en diversos sectores de producción y en categorías de consumo para proporcionar un análisis econométrico detallado por sector y región. Este análisis incluye la producción, cantidad de insumos, precios, empleo, entre otros, teniendo en cuenta ciertas suposiciones fiscales y de mercadeo internacional. Estos modelos ofrecen herramientas críticas para la planificación y evaluación de políticas de infraestructura y desarrollo económico, permitiendo a los planificadores y políticos tomar decisiones informadas basadas en proyecciones confiables y análisis integrales.

1.5 Justificación de la Investigación

La evidente escasez de investigaciones sobre la gestión del transporte urbano, observable tanto en bases de datos gubernamentales como privadas, subraya la necesidad de implementar un Sistema de Priorización de Proyectos Viales. Este sistema debería aprovechar el modelo de Tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos para optimizar la gestión del transporte urbano. Estos modelos proporcionan una base sólida para analizar y priorizar proyectos viales de manera eficiente, asegurando que los recursos se utilicen de la manera más

efectiva posible para mitigar los problemas de tráfico y mejorar la infraestructura de transporte en áreas urbanas.

1.6 Límites de la Investigación

La principal limitación en el desarrollo de este trabajo de investigación es el tiempo disponible del investigador para realizar actividades esenciales de recolección de datos, tales como la Encuesta de Origen-Destino, el Conteo de Vehículos y el Seguimiento de la Velocidad de los Vehículos. Estas actividades son cruciales para obtener una comprensión detallada y actualizada del estado y comportamiento del tráfico, lo que a su vez es indispensable para un análisis eficaz y la propuesta de soluciones pertinentes.

Adicionalmente, la falta de esfuerzos recientes en el modelamiento por parte de instituciones privadas y públicas representa una barrera significativa para la implementación de un sistema nuevo y efectivo de control de proyectos. Esta carencia de modelamiento actualizado limita la capacidad de ajustar y sensibilizar un nuevo sistema para que responda de manera efectiva a las dinámicas cambiantes del tráfico y la infraestructura urbana. La implementación de modelos más recientes podría proporcionar una base más sólida para la toma de decisiones estratégicas y la priorización de proyectos críticos, lo cual es fundamental para mejorar la gestión del transporte urbano.

1.7 Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Demostrar que el uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana optimiza la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

1.7.2. *Objetivos Específicos*

- Demostrar que el uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el tiempo de priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.
- Demostrar que el uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el costo de priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.
- Demostrar que el uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el número de personas necesarias para desarrollar la priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

1.8 Hipótesis

1.8.1. *Hipótesis General*

El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana optimiza la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

1.8.2. *Hipótesis Secundarias*

H01: El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el tiempo de priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

H02: El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el costo de priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

H03: El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el número de personas necesarias para desarrollar la priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

II. MARCO TEÓRICO

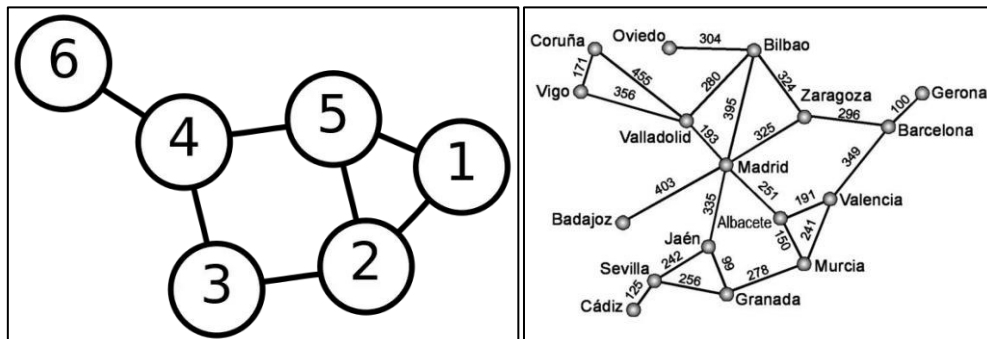
2.1 Bases Teóricas

2.1.1. Teorías de Grafos

La Universidad de Pamplona (2012) expone que, tanto en matemáticas como en ciencias de la computación, la teoría de grafos se dedica al estudio de las propiedades de las estructuras conocidas como grafos. Un grafo es un conjunto, que nunca está vacío, compuesto por vértices o nodos y una selección de aristas que conectan estos vértices, las cuales pueden ser dirigidas o no dirigidas. Esta teoría es fundamental para analizar y resolver problemas complejos en numerosos campos, incluyendo el modelamiento de redes de transporte, la optimización de rutas y la planificación de proyectos, entre otros.

Figura 4

Grafos como representaciones de redes de vías y ciudades



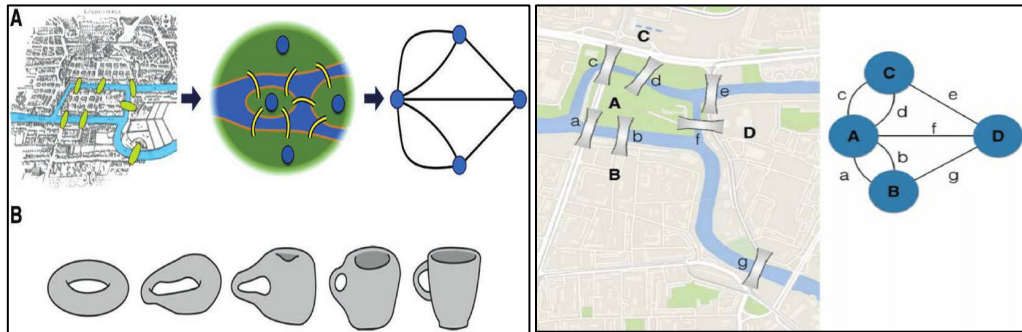
En el contexto del transporte, los grafos son una herramienta crucial para representar estructuras compuestas por vectores y nodos, que en este caso, son utilizados para mapear rutas y conexiones entre diferentes puntos o intersecciones en una red de transporte. Los grafos pueden representarse en dos tipos de matrices principales que facilitan su análisis y manipulación:

- A. **Matriz de Incidencia.** En esta representación, los grafos se plasman como una matriz de A (aristas) por V (vértices), donde el elemento [arista, vértice] contiene información sobre la conexión entre ellos; es decir, un '1' indica que están conectados y un '0' que no lo están. Esta matriz es especialmente útil para identificar qué nodos están directamente conectados por una arista.
- B. **Matriz de Adyacencia.** Esta matriz representa el grafo como una matriz m^2 , donde m es el número de vértices. Si existe una arista entre un vértice x y un vértice y , entonces el elemento $m_{(x,y)}$ se establece en '1'; de lo contrario, se establece en '0'. Esta forma de representación es efectiva para visualizar rápidamente las conexiones directas entre todos los vértices en el grafo.

La teoría de grafos proporciona una manera efectiva y visual de representar problemas de transporte, lo que resulta extremadamente útil para los planificadores de transporte y otras personas involucradas en la gestión de sistemas urbanos multidisciplinares. Un ejemplo histórico y muy conocido del uso de la teoría de grafos en el contexto del transporte es el problema de los puentes de Königsberg. En este problema, se plantea la cuestión de si es posible recorrer la ciudad, pasando por todos sus puentes exactamente una vez y regresar al punto de partida. Este desafío llevó a la formulación de un grafo simplificado donde los puentes se representan como aristas (a, b, c, d, e, f, g) y las masas de tierra como nodos (A, B, C, D). Este caso no solo marcó un punto de inicio en la teoría de grafos, sino que también demostró cómo un problema de transporte puede transformarse en un problema matemático manejable, lo cual puede ser visualizado claramente en representaciones gráficas de la ciudad y sus conexiones, como se ilustra en las figuras mencionadas.

Figura 5

Comparación de situación real con representación según grafos



2.1.2. *Demanda y Oferta*

Hensher (2008) subraya la importancia de las nociones de demanda y oferta, no solo en teoría económica, sino también en el modelamiento de transporte y economía del transporte. Esta relación es crucial porque un sistema de transporte se define por la cantidad de pasajeros y la disponibilidad de medios de transporte para ellos. Similar a las dinámicas del mercado, donde el precio de un producto puede disminuir si la oferta aumenta, como ha ocurrido con los operadores móviles y el internet en Lima durante la última década.

Esta misma dinámica se observa en los usuarios de los modos de transporte y vías de la ciudad. Por ejemplo, los usuarios optarán por un vehículo o modo de transporte que les permita llegar más rápidamente a su destino en lugar de uno que ya esté congestionado o sea incómodo. Del mismo modo, si se incrementa el número de vehículos o vagones en un servicio de transporte, o se añaden carriles a una vía, o se implementan mecanismos que aumenten la capacidad de una avenida, las personas tenderán a preferir estas opciones sobre otras alternativas.

Un ejemplo práctico es la hora punta en Lima, donde los conductores que se trasladan del Centro de Lima a San Borja prefieren utilizar la Vía Expresa Bedoya y la Vía Expresa Javier Prado, siempre que estas conserven su condición de vías expresas y no estén

congestionadas. Fuera de la hora punta, los conductores suelen consultar sus celulares o sistemas de navegación para buscar rutas alternativas que no impliquen largas esperas, como las vías auxiliares de la Vía Expresa o la avenida Canadá.

Es esencial entender este equilibrio entre demanda y oferta para comprender que las personas necesitan moverse, que es la demanda fundamental en esta área de estudio. Esto forma parte de nuestros esfuerzos para encontrar soluciones responsables que cubran esa demanda. Además, es crucial manejar esta balanza de modo que, cuando sea posible, no solo se aumente la oferta sino también la demanda o ambos.

Nuestros modelos pueden sugerir que una solución a un problema de transporte es añadir tres carriles a una vía, aunque esto podría afectar la estética del lugar y la habitabilidad de la zona. En tales casos, incluso se pueden considerar planes para eliminar la oferta o reducir la demanda como alternativas creativas y bien planificadas.

2.1.3. Prerrequisitos de Matemática y Estadística

Es crucial no omitir esta sección del presente trabajo de investigación, dado que, aunque la ingeniería de transporte no profundiza en matemáticas al nivel de otras ramas de la ingeniería, en Perú se ha enfocado principalmente en el uso técnico e informado de los principales software de modelamiento disponibles en el mercado. Sin embargo, es fundamental destacar que Perú y cada área de estudio presentan dinámicas particulares que difieren de las previstas por académicos de otros orígenes, por lo que comprender los principios matemáticos que subyacen a estas herramientas es esencial para su adecuada implementación y adaptación a nuestra realidad.

Aunque no se presentarán los principios básicos de álgebra y cálculo detalladamente, estos son imprescindibles para la comprensión de los usuarios. Se recomienda especialmente

el capítulo 2 del libro *Modelling Transport* de Ortúzar (2011), que ofrece una explicación didáctica y accesible de estos conceptos. Esta lectura proporcionará una base sólida que ayudará a los lectores a entender mejor cómo aplicar estas técnicas de modelamiento de manera efectiva en el contexto específico del transporte en Perú.

2.1.4. *Máxima y Mínima de Funciones*

En este estudio nos enfocaremos en optimizar los tiempos de viaje para transportar a un usuario desde un punto de origen A hasta un destino B. Para ello, aplicaremos funciones matemáticas que representen el movimiento de los usuarios y la capacidad de las vías. Es crucial entender que en el análisis matemático de funciones, generalmente se usa la segunda derivada $f''(x)$ para determinar la naturaleza de los puntos críticos:

- Para encontrar un **máximo** local en una función, se busca que $f''(x) < 0$.
- Para encontrar un **mínimo** local en una función, se busca que $f''(x) > 0$.

En este particular estudio de investigación, no será necesario identificar los puntos de inflexión, donde:

$$f''(x) = 0,$$

ya que nos centraremos en un tipo de modelamiento que no requiere de estos puntos. Este enfoque se detallará más adelante, explicando por qué los puntos de inflexión no son relevantes para un modelamiento a nivel estático en este estudio y por qué se ha optado por utilizar modelamiento estático en lugar de dinámico.

El uso de modelamiento estático, en contraposición al dinámico, se justifica en este contexto porque buscamos representar nuestras ecuaciones de la manera más convexa posible. Esto implica que nuestras funciones deben mostrar una curvatura constante que facilite la identificación de soluciones óptimas sin la necesidad de considerar cambios en el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo, lo cual es típico en modelos dinámicos.

Este enfoque permite simplificar el análisis y la implementación de soluciones prácticas y eficientes para la gestión de tráfico y transporte, adaptadas a las condiciones y limitaciones específicas de la infraestructura vial disponible. Asimismo, se proporcionará una nota complementaria en el marco teórico y las limitaciones de la investigación que explique detalladamente estas decisiones metodológicas.

2.1.5. Ecuaciones Diferenciales

Al considerar la Vía Expresa Javier Prado, se establece una función de capacidad vehicular actual de acuerdo con las siguientes especificaciones:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n)$$

$$i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$$

En el modelo que estamos considerando, la capacidad actual de la Vía Expresa Javier Prado se determina mediante una serie de variables que incluyen, pero no están limitadas a, $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$. Estas variables representan factores como la hora actual, el día de la semana, eventos en la cercanía, obras en curso cerca de la vía, y la cantidad de vehículos en la vía, entre otros factores que pueden influir en la capacidad de la vía.

Para analizar el comportamiento de esta función con respecto a su capacidad máxima y mínima, nos interesaría encontrar los valores extremos de la función que representa esta

capacidad. Esto implica resolver las condiciones de primer orden, y verificar las condiciones de segundo orden para determinar si son máximos o mínimos. Matemáticamente, esto se representa como:

1. Encontrar los puntos críticos:

Resolver el sistema de ecuaciones derivado de igualar a cero las derivadas parciales de la función de capacidad con respecto a cada variable:

$$\frac{dy}{dx_i} = 0$$

$$i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$$

2. Determinar la naturaleza de los puntos críticos:

Utilizar la matriz hessiana Hf de la función en los puntos críticos para determinar si son máximos, mínimos o puntos de silla. Un determinante positivo de la matriz hessiana y todos los eigenvalores positivos indican un mínimo local, mientras que todos los eigenvalores negativos indican un máximo local. Si los eigenvalores tienen signos mezclados, el punto crítico es un punto de silla.

Este análisis nos permitirá entender cómo varía la capacidad de la Vía Expresa Javier Prado en función de diversos factores ambientales y circunstanciales, proporcionando información valiosa para la planificación y gestión del tráfico en esa área específica. Este tipo de modelamiento es crucial para optimizar el flujo vehicular y mejorar las políticas de transporte urbano, adaptando la infraestructura y las operaciones a las necesidades y condiciones cambiantes.

2.1.6. Multiplicadores de Lagrange

La solución de ecuaciones diferenciales condicionales es crucial para comprender el modelo matemático que se presentará más adelante. Por ello, realizaremos una demostración sencilla: Si deseamos minimizar una función sujeta a una ecuación condicional, es necesario emplear ecuaciones diferenciales.

$$\min x_1^2 + x_2^2$$

$$x_1 + x_2 = 5$$

Los multiplicadores de Lagrange ofrecen una solución a este problema de optimización de la siguiente manera:

$$L(x_1, x_2, \rho) = x_1^2 + x_2^2 + \rho(5 - x_1 - x_2)$$

En el cual la solución es:

$$\nabla L(x_1, x_2, \rho) = 0$$

Lo cual significa que se necesita resolver para:

$$\frac{dL}{dx_{1,2}, \rho} = 0$$

Entonces las soluciones para este sistema de optimización sería:

$$\frac{dL}{dx_1} = 2x_1 - \rho = 0 \rightarrow x_1 = \rho/2$$

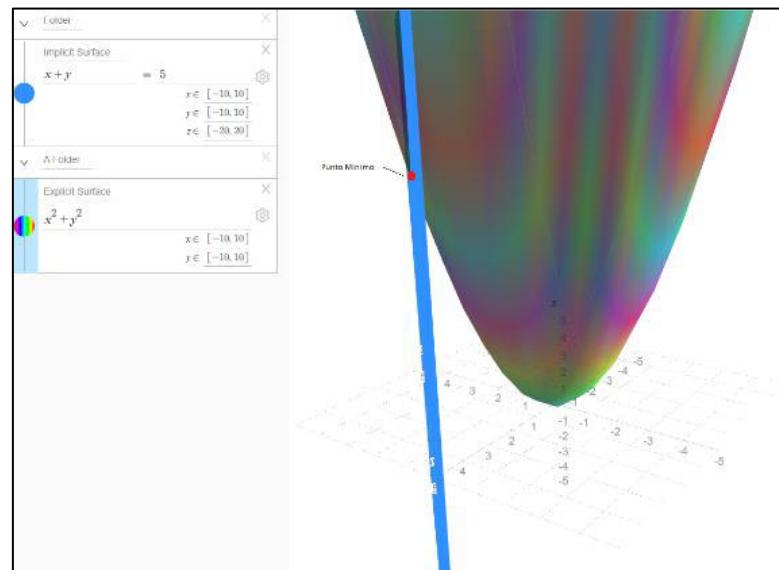
$$\frac{dL}{dx_2} = 2x_2 - \rho = 0 \rightarrow x_2 = \rho/2$$

$$\frac{dL}{d\rho} = 5 - x_1 - x_2 = 0 \rightarrow x_1 = x_2 = 5/2$$

Entonces esto significaría que el punto mínimo de la función sería en donde $x_1 = x_2 = 5/2$ como en el gráfico adjunto mostrado.

Figura 6

Representación Gráfica de solución de ejemplo de Multiplicador de Lagrange



2.1.7. Punto de Equilibrio

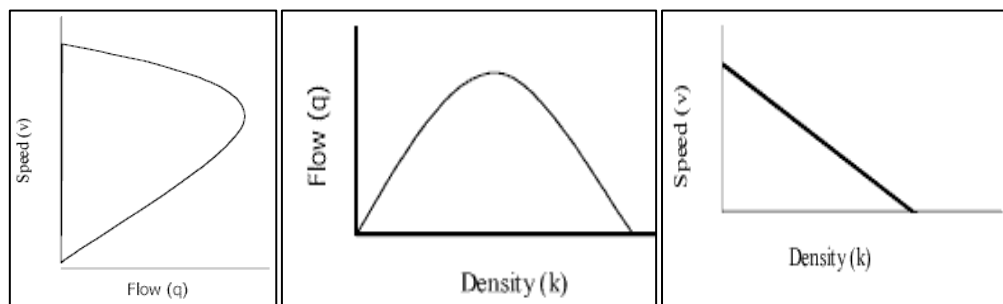
El punto de equilibrio constituye un componente esencial en el modelamiento de transporte que planeamos emplear. Es importante entender que un punto de equilibrio representa una solución de equilibrio para una ecuación diferencial, donde la solución permanece constante, es decir, no se ve alterada por perturbaciones. En términos matemáticos, un punto de equilibrio ocurre donde la derivada de la función es cero, lo que indica que no hay cambios en la tasa de crecimiento o decrecimiento en ese punto específico. Esto puede corresponder a un mínimo o máximo local de la función, o a un punto donde la función se estabiliza, proporcionando así una solución estable para la ecuación diferencial en cuestión.

2.1.8. Conceptos de Flujo, Densidad y Velocidad

En los primeros años tras la creación de los automóviles, surgieron los primeros planificadores de tráfico, quienes implementaron soluciones empíricas para gestionar el flujo vehicular. Estos pioneros utilizaban fotografías para analizar las vías por hora, estudios de velocidades individuales y encuestas sobre la situación actual y las expectativas de los usuarios de las vías. De estos esfuerzos surgió el modelo de Greenshield, que postula una relación lineal entre la velocidad y la densidad del tráfico cuando el flujo es continuo. Según este modelo, a mayor velocidad observada, menor será la densidad de vehículos en la vía. Sin embargo, el flujo de tráfico aumenta de forma parabólica inversa: comienza con pocos vehículos y baja densidad, pero a medida que la densidad aumenta, el flujo alcanza un punto máximo antes de disminuir debido a la congestión. Finalmente, el flujo y la velocidad están inversamente relacionados; inicialmente, la velocidad es máxima, pero disminuye a medida que el flujo de vehículos incrementa y la congestión se intensifica.

Figura 7

Proporcionalidad entre Flujo, Velocidad y Densidad



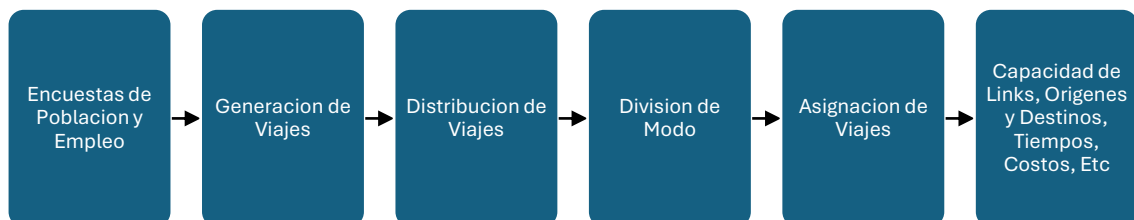
Pronto surgió un modelo innovador que, a diferencia de los enfoques anteriores basados en la observación visual de la densidad del tráfico mediante fotografías, incorpora principios económicos de demanda y oferta en el modelamiento de transporte. Este enfoque representa un cambio fundamental, al enfocarse en las dinámicas subyacentes de cómo las variaciones en la oferta de vías y la demanda de uso afectan el flujo del tráfico.

2.1.9. El Modelo de 4 Etapas para Transporte

El marco conceptual teórico empleado para determinar los tiempos, costos y capacidades de las vías es el modelo de las 4 etapas. Este enfoque se compone de cuatro procesos fundamentales: generación de viajes, distribución de viajes, división modal y asignación de viajes. Estos pasos permiten que, mediante el uso de conteos de tráfico, encuestas y otras técnicas de recolección de datos de campo, se realicen simulaciones precisas de los tiempos, costos y capacidades de las vías, que posteriormente pueden ser verificadas en el campo. En este trabajo de investigación, el foco principal se sitúa en la etapa de asignación de viajes. Las etapas anteriores se establecerán basándose en suposiciones validadas mediante herramientas como Google Maps y conteos de tráfico específicos.

Figura 8

Flujo de desarrollo del modelo de 4 etapas para transporte



2.1.10. Principios de Wardrop: Equilibrio por Usuario y Equilibrio del Sistema

En 1952, Wardrop publicó en una revista británica el artículo "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research", donde introduce dos principios fundamentales para el modelamiento de transporte. El primero de estos principios establece que los tiempos de viaje en las trayectorias utilizadas deben ser iguales o menores que los tiempos de viaje en las trayectorias no utilizadas. Este principio puede definirse matemáticamente de la siguiente manera:

Consideremos el distrito de San Borja, representado por un grafo dirigido y conectado G , con

un conjunto de vértices V y un conjunto de aristas o enlaces E , numerados de manera consecutiva y con dirección única. Definamos W como el conjunto de orígenes y destinos dentro del grafo G , donde $w \in W$ es un origen-destino específico del conjunto W . R^w representa el conjunto de rutas disponibles para un origen y destino w . Sea x_e el flujo de tráfico que pasa por el enlace e , que pertenece al conjunto E . Podemos representar x_e^w como el flujo de tráfico que pasa por el enlace e para un origen-destino w , y f_e^w como el flujo de tráfico que recorre la ruta $r \in R^w$ en una arista o enlace del conjunto E . F^w es el flujo de tráfico total para un origen-destino $w \in W$. Finalmente, $t_e(x_e)$ es una función convexa y no decreciente que modela el tiempo de viaje para un flujo de tráfico x_e que recorre un enlace $e \in E$.

Esta descripción no solo aclara la aplicación de los principios de Wardrop sino que también facilita la comprensión de su relevancia en el análisis del tráfico y la planificación de rutas en contextos urbanos. (Wardrop, 1952)

Así también tenemos que $\delta_{e,r}^w$

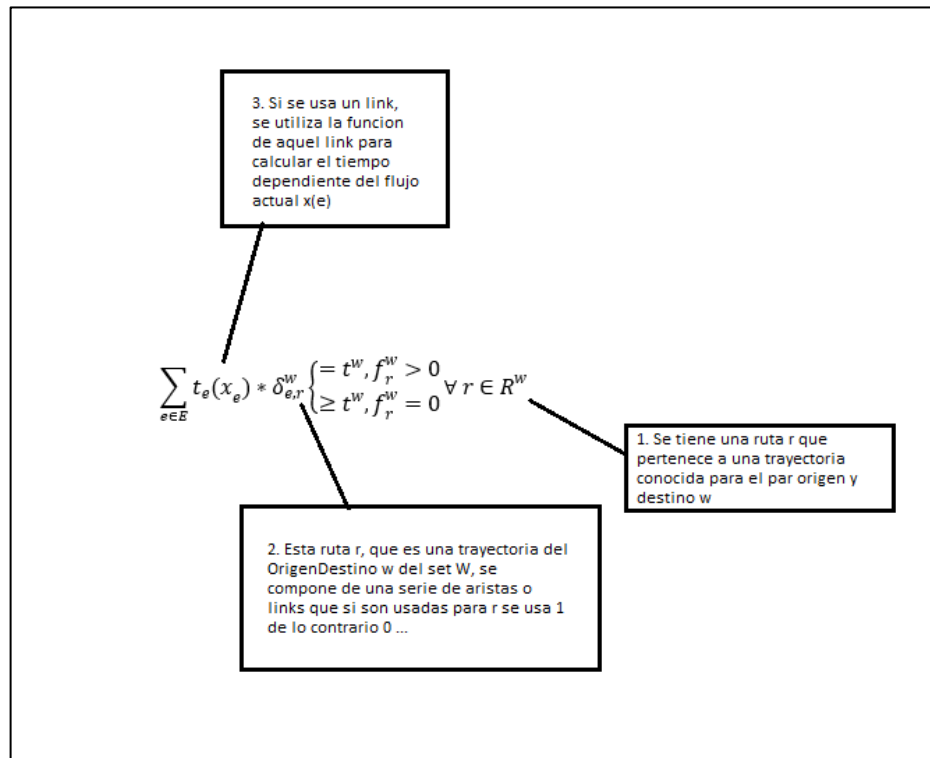
$$\delta_{e,r}^w = \begin{cases} 1, & \text{si la arista o el link } e \text{ pertenece a la ruta } r \\ 0, & \text{de modo contrario} \end{cases}$$

Si el primer principio de Wardrop nos dice que los tiempos de viaje en trayectorias usadas deben ser iguales y no mayores que los tiempos de viaje en trayectorias no usadas, por lo que se puede decir que:

$$\sum_{e \in E} t_e(x_e) * \delta_{e,r}^w \begin{cases} = t^w, f_r^w > 0 \\ \geq t^w, f_r^w = 0 \end{cases} \forall r \in R^w$$

Figura 9

Explicación específica del primer principio de Wardrop



Según el primer principio de Wardrop, si t^w representa el tiempo de viaje de cualquier ruta usada por un par origen-destino $w \in W$, entonces el postulado indica que las rutas con tiempos de viaje mayores o iguales a t^w no deberían ser utilizadas, es decir, $f_r^w = 0$ para esas rutas. Sin embargo, si una ruta tiene un tiempo de viaje igual al de otra ruta utilizada, su flujo debería ser considerado en el modelamiento. Esta formulación matemática actúa como un candado al comparar rutas, asegurando que se elijan aquellas con menor tiempo de recorrido y que los usuarios siempre recorran el grafo de manera óptima. Este estado se denomina 'Equilibrio por Usuario'.

Por otro lado, el segundo principio de Wardrop, según el Indian Institute of Technology Bombay (2024), establece que el tiempo total del sistema, también conocido como TTST (Total Travel System Time), debería ser mínimo. Este concepto busca alcanzar un tiempo de viaje teóricamente mínimo en el sistema, donde se considera que todos los viajeros actúan de manera

que el tiempo total de todos los viajeros como un todo sea el menor posible. Aunque esta situación es ideal y no ocurre en la vida real, los resultados derivados de este modelo son útiles para simular escenarios alternativos, como el comportamiento de vehículos autónomos, o para comparar entre el Equilibrio de Usuario y el Equilibrio de Sistema. Este último se calcula de la siguiente manera:

$$\min \sum_{e \in E} x_e t_e(x_e)$$

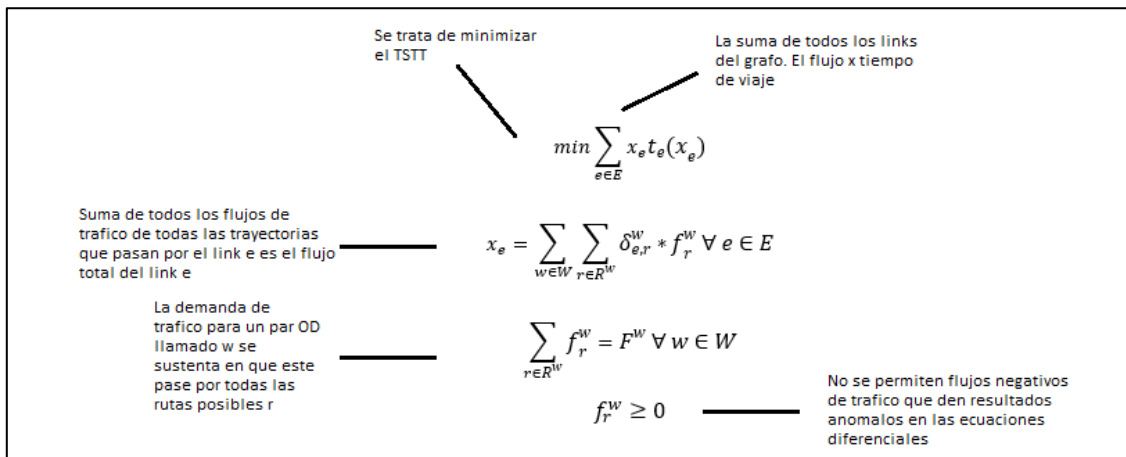
$$x_e = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R^w} \delta_{e,r}^w * f_r^w \quad \forall e \in E$$

$$\sum_{r \in R^w} f_r^w = F^w \quad \forall w \in W$$

$$f_r^w \geq 0$$

Figura 10

Explicación específica del segundo principio de Wardrop



2.1.11. Modelo de Formulación de Beckmann y su Transformación de Ecuación Diferencial a Condicional para Programación en Software

Ahora que ya tenemos el algoritmo, que sería el primer principio de Wardrop para Equilibrio de Usuario, necesitamos transformar el algoritmo mostrado en una solución que pueda ser desarrollada en lenguaje de programación. Para ello, abordaremos el primer principio de Wardrop utilizando los multiplicadores de Lagrange y la formulación de Beckmann (Beckmann, 1957). Beckmann propuso la siguiente solución matemática:

$$\min \sum_{e \in E} \int_0^{x_e} t_e(u) du$$

$$\sum_{r \in R^w} f_r^w = F^w \quad \forall w \in W$$

$$f_r^w \geq 0 \quad \forall r \in R^w, w \in W$$

$$x_e = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R^w} \delta_{e,r}^w * f_r^w \quad \forall e \in E$$

Al resolver la transformación de Beckmann mediante los multiplicadores de Lagrange, tendríamos:

$$L = \sum_{e \in E} \int_0^{x_e} t_e(u) du + t^w \left(F^w - \sum_{r \in R^w} f_r^w \right) + \sum_{r \in R^w} (-f_r^w) * n_r^w$$

Donde t^w y n_r^w es mayor a 0, para todos $w \in W$, $r \in R^w$. La derivada parcial de L con respecto a f_r^w se establece como:

$$\frac{\partial L}{\partial f_r^w} = \sum_{e \in E} t_e(x_e) * \frac{\partial x_e}{\partial f_r^w} - t^w - f_r^w = 0$$

Recordemos que:

$$x_e = \sum_{w \in W} \sum_{r \in R^w} \delta_{e,r}^w * f_r^w \quad \forall e \in E$$

$$\frac{\partial x_e}{\partial f_r^w} = \delta_{e,r}^w$$

Utilizando una de las condiciones fundamentales de la Optimización Matemática de Kuhn-Tucker (Gordon, 2024) y la teoría del hiperplano de apoyo (The European Mathematical Society, 2024), válida únicamente en funciones convexas como las funciones de tiempo de viaje, tenemos que:

$$L(x, \mu, \rho) = f(x) + u^t g(x) + \rho^t h(x)$$

$$u^t g(x^*) = 0$$

$$\rho^t h(x^*) = 0$$

En el caso de nuestra solución de Beckmann podríamos decir entonces que:

$$\frac{\partial L}{\partial f_r^w} = \sum_{e \in E} t_e(x_e) * \delta_{e,r}^w - t^w - f_r^w = 0$$

Y debido a que $t^w * f_r^w = 0$, como explica Kuhn-Tucker, resulta en:

$$\sum_{e \in E} t_e(x_e) * \delta_{e,r}^w \begin{cases} = t^w, f_r^w > 0 \\ \geq t^w, f_r^w = 0 \end{cases} \quad \forall r \in R^w$$

Esto nos ayuda a demostrar que el postulado de Wardrop es ciertamente efectivo y que existe una solución única demostrable que se puede trabajar dentro del ámbito de los números reales.

2.1.12. Condiciones de Equilibrio Derivados de Beckmann

La resolución de las ecuaciones diferenciales de cada condición y de la función objetivo a minimizar establece las bases necesarias para desarrollar un programa computacional que proporcione la solución de equilibrio requerida. Para ello, se transforma el problema de optimización matemática en postulados matemáticos explícitos, los cuales son:

Figura 11

Explicación específica de las condiciones de Equilibrio de Usuario según la solución de Beckmann

$f_k^{rs}(c_k^{rs} - \kappa_{rs}) = 0$	$\forall r, s \in N, \forall k \in \Pi_{rs}$	Si una trayectoria k es usada el tiempo de viaje debe ser igual al de menor tiempo de viaje para todos los OD (Origen Destino) rs (Primer Principio de Wardrop)
$c_k^{rs} - \kappa_{rs} \geq 0$	$\forall r, s \in N, \forall k \in \Pi_{rs}$	Siempre existe una trayectoria con el menor tiempo de viaje entre rs (Se demuestra con la función de Beckmann)
$d_{rs} - \sum_{k \in \Pi_{rs}} f_k^{rs} = 0$	$\forall r, s \in N$	Toda la demanda debe ser colocada en el grafo
$f_k^{rs} \geq 0$	$\forall r, s \in N, \forall k \in \Pi_{rs}$	No existen flujos negativos

2.1.13. Método de Promedios Sucesivos

Ahora, Ahora que hemos definido las cuatro condiciones necesarias para alcanzar el Equilibrio de Usuario, debemos seleccionar un método adecuado para resolverlo. Existen numerosas formas de formular una solución para este tipo de problemas, incluyendo métodos numéricos, grafológicos, y técnicas basadas en la experiencia y observación. Para esta investigación, optaremos por un método sencillo que permitirá ilustrar el desarrollo de nuestro modelo de manera eficaz.

El principio detrás de este método consiste en introducir jugadores al grafo de Equilibrio de Usuario de manera consecutiva y por etapas, de tal forma que eventualmente los enlaces del grafo se equilibren. Para ilustrar este proceso, consideremos el siguiente ejemplo:

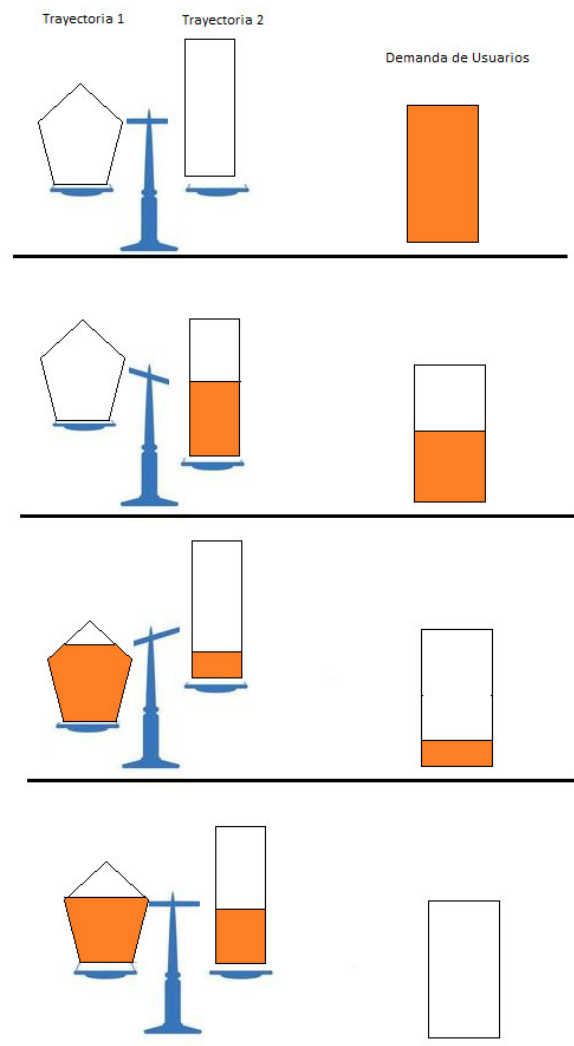
imagine dos jarras vacías de distintas formas y capacidades de volumen, colocadas en una balanza, y una jarra llena de jugo de manzana. Para alcanzar el equilibrio en la balanza, vertemos el jugo de manera gradual entre las jarras vacías hasta que se equilibren. Este proceso es análogo al método que emplearemos, utilizando una variable de continuidad, φ , que se define como:

$$\varphi = 1/x_n, 1/x_{n+1}, 1/x_{n+2}, \dots, 1/x_{n+m}$$

donde $n, m \in \mathbb{N}$.

Figura 12

Ejemplo descriptivo del método de promedios sucesivos



III. MÉTODO

3.1 Tipo de Investigación

La investigación será de los siguientes tipos:

- A. ***Investigación Aplicada.*** Este enfoque implica la aplicación de teorías de transporte y matemáticas para crear simulaciones de soluciones viables específicamente para Lima Metropolitana. Se utilizará data generada por entidades públicas y se basará en supuestos reconocidos por ingenieros de transporte y modeladores de tráfico. Este método busca aplicar conocimientos teóricos a problemas prácticos, proporcionando soluciones directas y aplicables.
- B. ***Investigación Explicativa.*** Esta fase de la investigación se centrará en explicar detalladamente cómo se pueden utilizar teorías de tráfico y grafos para fundamentar la priorización en la construcción de vías en Lima Metropolitana. El objetivo es clarificar las teorías detrás de las decisiones de planificación urbana y de transporte, proporcionando una base sólida para futuras intervenciones y desarrollos.
- C. ***Investigación Cuantitativa.*** Se realizará un análisis de los datos numéricos disponibles sobre Lima Metropolitana para evaluar y demostrar la efectividad del sistema propuesto. Este enfoque cuantitativo permitirá validar las soluciones ofrecidas mediante el análisis estadístico y la interpretación objetiva de los datos, asegurando que las conclusiones sean robustas y fiables.
- D. ***Investigación No Experimental.*** Dado que el tráfico ocurre de manera independiente a los deseos o intervenciones del investigador, este estudio se clasifica como no experimental. Se observarán y analizarán los fenómenos de

tráfico sin manipular o alterar las condiciones existentes, lo que permite estudiar los comportamientos y patrones naturales del tráfico en su contexto real.

3.2 Población y Muestra

3.2.1. Población de Estudio

La población de este estudio incluye todos los procesos de priorización de transporte urbano que se han llevado a cabo a nivel mundial. Este enfoque amplio permite una comparación global de diferentes metodologías y resultados, proporcionando un contexto extenso para entender las prácticas de priorización.

3.2.2. Muestra Poblacional

La muestra específica para este estudio consiste en treinta procesos de priorización de transporte urbano implementados en Lima Metropolitana. Esta selección está diseñada para reflejar una variedad de enfoques y resultados dentro de un contexto urbano específico, permitiendo un análisis detallado de las estrategias de priorización aplicadas en esta metrópoli.

3.2.3. Muestreo

Se trata de obtener las subpoblaciones del tamaño muestral para cada dependencia de la población de estudio, a partir de las cuales se obtendrán datos que permitan comprobar la verdad o falsedad de la hipótesis.

A partir de los criterios de inclusión, para la selección de la muestra se ha tomado en cuenta a las 44 empresas de la muestra poblacional.

3.3 Estrategia de Prueba de Hipótesis

3.3.1. *Hipótesis General*

El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana optimiza la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

3.3.2. *Hipótesis Secundarias*

H01. El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el tiempo de priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

H02. El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el costo de priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

H03. El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el número de personas necesarias para desarrollar la priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

A. *Formulación de Hipótesis Nulas*

a. *Hipótesis Específica 1 (H1)*

- **Alternativa (Ha1):** El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el tiempo de priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

- **Nula (H01):** El uso del Sistema no minimiza el tiempo de priorización de proyectos comparado con el método anterior ($\mu_1 \geq \mu_2$).

b. ***Hipótesis Específica 2 (H2)***

- **Alternativa (Ha2):** El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el costo de priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

- **Nula (H02):** El uso del Sistema no reduce los costos de priorización de proyectos comparado con el método anterior ($\mu_1 \geq \mu_2$).

c. ***Hipótesis Específica 3 (H3)***

- **Alternativa (Ha3):** El uso del Sistema con modelo de tráfico de Beckmann y la Teoría de Grafos en la priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana minimiza el número de personas necesarias para desarrollar la priorización de proyectos en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano.

Nula (H03): El uso del Sistema no reduce el número de personas necesarias para la priorización de proyectos comparado con el método anterior ($\mu_1 \geq \mu_2$).

3.3.3. Operacionalización de Variables

Tabla 17

Operacionalización de variables

Variable	Indicadores
Variable Independiente: Sistema con Modelo de Tráfico de Beckmann y Teoría de Grafos	Presencia_Ausencia Tiempo de Priorización de Proyectos
Variable Dependiente: Priorización de Proyectos Viales para Lima Metropolitana en la Gestión de Proyectos de Transporte Urbano	Costo de Priorización de Proyectos El Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos

Tabla 18

Conceptualización de Indicadores

Variable	Indicadores
Variable Independiente	
Presencia_Ausencia	Se define como la presencia o ausencia del Sistema Con Modelo De Tráfico De Beckmann Y Teoría De Grafos en la investigación
Variable Dependiente	
Tiempo de Priorización de Proyectos	Es el indicador que se define como el número de días desde el inicio de la priorización de proyectos hasta la conformidad del Jefe del área de Planeamiento y Programación.
Costo de Priorización de Proyectos	Es el indicador que se define como el costo en soles desde el inicio de la priorización de proyectos hasta la conformidad del Jefe del área de Planeamiento y Programación.
El Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos	Es el indicador que se define como el número de personas necesarias desde el inicio de la priorización de proyectos hasta la conformidad del Jefe del área de Planeamiento y Programación.

Tabla 19*Resumen de Conceptualización de Variables e Indicadores*

Variable	Indicador	Índice	Unidad de Medida	Unidad de Observación	Instrumento de Recolección de Datos
Independiente	Presencia_Ausencia	[NO...SI]	-	Orden de Compra de Solución Tecnológica	Entrevista
	Tiempo De Priorización De Proyectos	[1...Z]	Minutos	Cronograma de Proyecto	Encuesta Cuestionario
Dependiente	Costo de Priorización de Proyectos	[1...Z]	Soles	Cotización de Proveedores	Simulador de Gobernaciones Simulador de Proyectos
	El Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos	[1...Z]	Personas	Planilla de trabajadores asignados a priorización de proyectos	Cuestionario

3.4 Instrumentos

Tabla 20

Instrumentos de recolección de datos

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
OBSERVACIÓN DIRECTA	Ficha de Observación
ESPONTANEA	Excel
PARTICIPANTE	Datasheets
INDIVIDUAL	
OBSERVACIÓN INDIRECTA	Ficha de Observación
SISTEMÁTICA	Excel
NO PARTICIPANTE	Datasheets
GRUPAL	
ENTREVISTAS	Formato de Entrevistas
ESTRUCTURADAS	Ficha de Observación
NO ESTRUCTURADAS	Excel
ESPONTANEA	Datasheets

3.5 Procedimientos

En esta investigación, se utilizaron diversas técnicas para recolectar datos, como se describe en el punto 3.4 Instrumentos de recolección de datos. A partir de la Tabla 21, se pueden identificar las siguientes técnicas e instrumentos utilizados en el proceso de recolección de datos:

- A. **Observación Directa.** Se emplearon fichas de observación para recopilar datos de manera espontánea y participante, utilizando hojas de cálculo en Excel y datasheets para registrar la información obtenida.

- B. **Observación Indirecta.** Se utilizaron las mismas fichas de observación para una observación sistemática y no participante, con Excel y datasheets para el registro y organización de los datos.

3.6 Análisis de Datos

En este estudio, el análisis de datos se llevó a cabo en varias fases, cada una con un propósito específico y utilizando herramientas estadísticas apropiadas para validar las hipótesis y analizar los resultados. A continuación, se describen las etapas clave del proceso:

- A. **Fase 1.** Se seleccionó el software Minitab para el análisis de datos. Este software fue elegido por su robustez en el análisis estadístico y su capacidad para realizar diversas pruebas estadísticas.
- B. **Fase 2.** Se ejecutó Minitab para comenzar el análisis de datos. En esta fase, se llevó a cabo la exploración inicial de los datos, realizando análisis descriptivos y visualizando los datos por variable para identificar tendencias y patrones.
- C. **Fase 3.** Se aplicaron técnicas de análisis estadístico inferencial para contrastar las hipótesis propuestas. Este análisis incluyó la prueba de normalidad Ryan-Joiner (similar a Shapiro-Wilk) para verificar si los datos seguían una distribución normal.
- D. **Fase 4.** Para la contrastación de hipótesis, se utilizó la prueba t para dos muestras (Two-Sample t for the mean) para analizar diferencias entre grupos. Se realizaron gráficos como el "individual value plot" y "boxplot" para visualizar la distribución de los datos y detectar posibles outliers o tendencias.
- E. **Fase 5.** Se realizó un análisis adicional para confirmar los resultados y explorar otras posibles correlaciones o patrones en los datos.
- F. **Fase 6.** Finalmente, se prepararon los resultados para su presentación, utilizando tablas, gráficos y figuras para ilustrar los hallazgos de manera clara y comprensible.

IV. RESULTADOS

4.1 Resultados

Tabla 21

Resultados

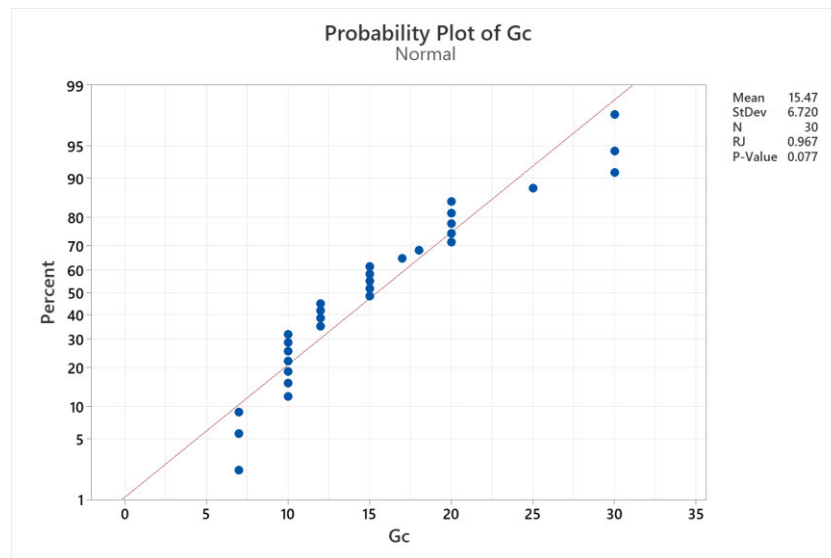
Nro.	Tiempo de Priorización de Proyectos (días)		Costo de Priorización de Proyectos		Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos	
	Sin Sistema	Con Sistema	Sin Sistema	Con Sistema	Sin Sistema	Con Sistema
1	10	6	25,000.00	21,250.00	7	5
2	12	10	32,000.00	30,720.00	4	3
3	10	6	20,000.00	16,600.00	8	5
4	15	12	22,000.00	18,480.00	3	3
5	15	13	29,300.00	26,077.00	5	3
6	7	5	22,000.00	18,260.00	5	6
7	20	15	30,000.00	29,100.00	3	2
8	30	15	28,000.00	27,160.00	3	2
9	15	12	27,000.00	24,570.00	4	3
10	12	11	30,000.00	28,500.00	5	3
11	10	7	29,000.00	27,550.00	6	5
12	10	9	28,000.00	26,600.00	7	5
13	7	4	33,000.00	31,350.00	6	6
14	18	14	20,000.00	19,200.00	5	3
15	20	17	34,000.00	29,240.00	3	2
16	15	11	20,000.00	16,400.00	4	3
17	20	17	32,000.00	27,840.00	3	3
18	30	15	29,000.00	26,390.00	7	3
19	7	5	31,000.00	29,140.00	10	5
20	10	10	24,000.00	20,880.00	7	6
21	12	12	30,200.00	28,600.00	6	5
22	25	15	25,250.00	21,400.00	5	3
23	20	17	32,450.00	27,500.00	4	2
24	10	7	20,200.00	17,100.00	8	6
25	12	11	33,450.00	30,500.00	5	3
26	10	8	20,200.00	16,400.00	9	6
27	17	15	26,200.00	25,000.00	5	3
28	15	13	23,200.00	20,500.00	4	3
29	30	15	27,300.00	24,500.00	2	2
30	20	16	24,100.00	22,000.00	2	2

4.2 Prueba de Normalidad

Resultados de Prueba de Normalidad Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk)

Figura 13

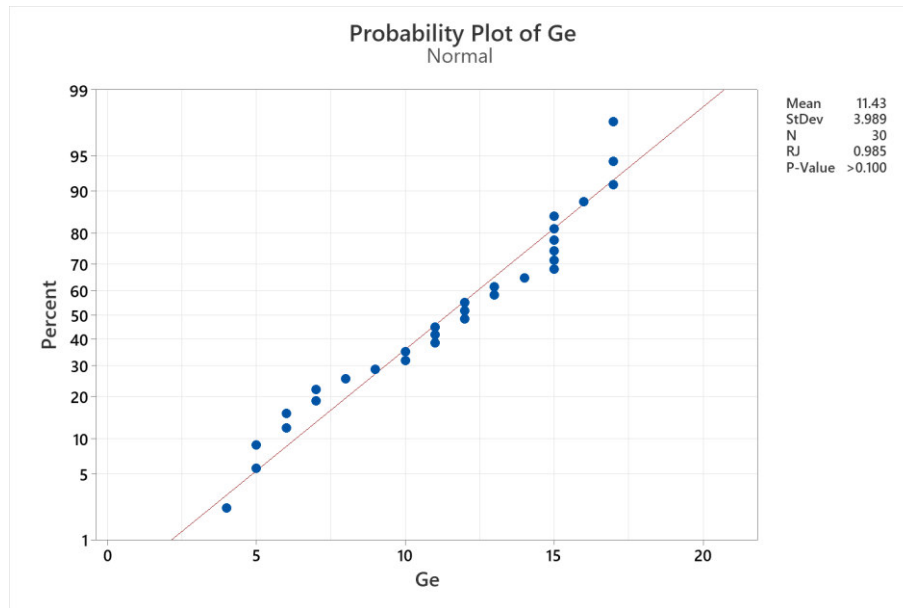
Prueba de Normalidad Gc Tiempo de Priorización de Proyectos (días)



En la Figura 12, la Prueba de Normalidad para el Grupo de Control (Gc) en el Tiempo de Priorización de Proyectos (días) muestra un valor p de 0.077, lo que indica que los datos podrían seguir un comportamiento cercano a la distribución normal. Sin embargo, al estar por debajo del nivel de significancia tradicional ($\alpha = 0.05$), se podría requerir precaución en la interpretación.

Figura 14

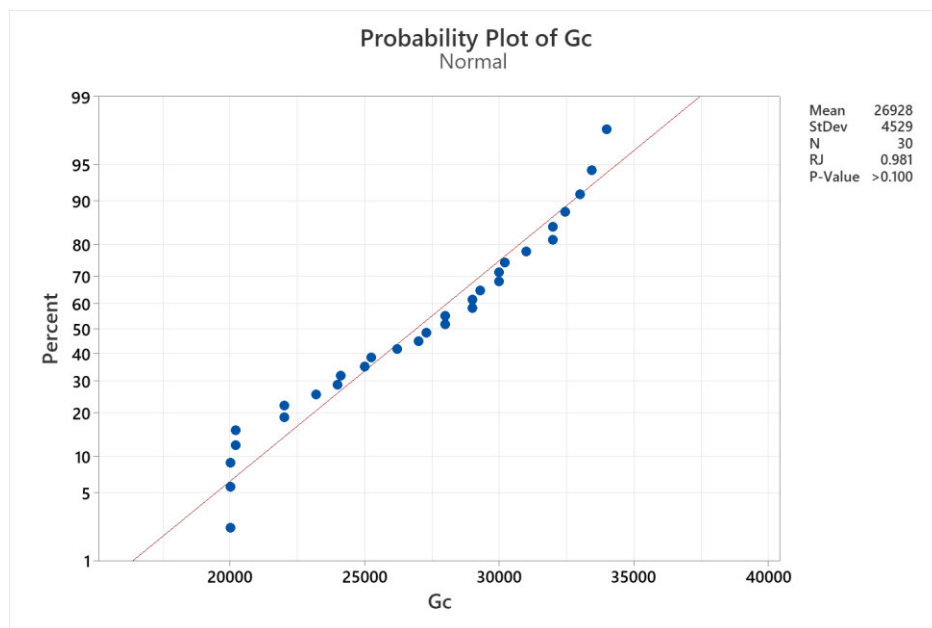
Prueba de Normalidad Ge del Tiempo de Priorización de Proyectos (días)



Como podemos ver en la Figura 13, para el Grupo Experimental (Ge) en el Tiempo de Priorización de Proyectos, el valor p es mayor a 0.100, lo que sugiere que los datos siguen una distribución normal. Esto permite el uso de pruebas paramétricas para el análisis posterior.

Figura 15

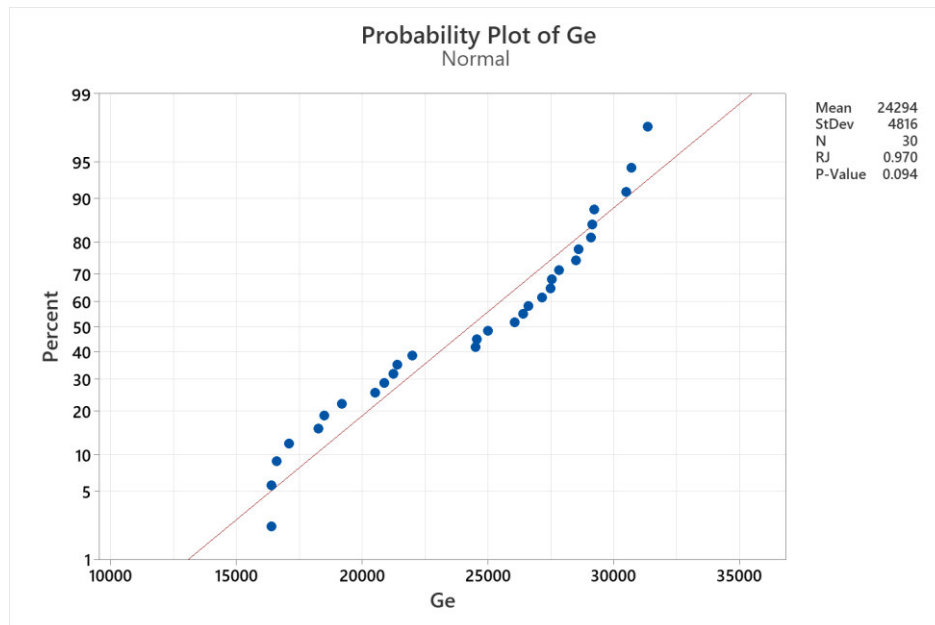
Prueba de Normalidad Gc del Costo de Priorización de Proyectos



La Prueba de Normalidad, de la Figura 14, para el Costo de Priorización de Proyectos en el Grupo de Control (Gc), el valor p es mayor a 0.100, indicando un comportamiento normal de los datos.

Figura 16

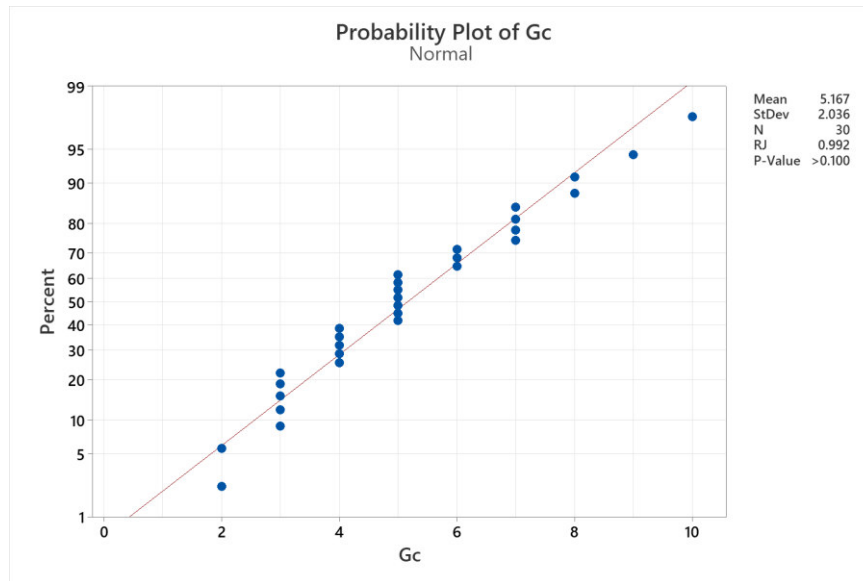
Prueba de Normalidad Ge del Costo de Priorización de Proyectos



Para el Grupo Experimental (Ge) de la Figura 14 podemos ver que en el Costo de Priorización de Proyectos, el valor p es 0.094, lo que sugiere un comportamiento cercano a la normalidad. Al estar ligeramente por debajo de 0.100, se recomienda analizar cuidadosamente si las pruebas paramétricas son apropiadas.

Figura 17

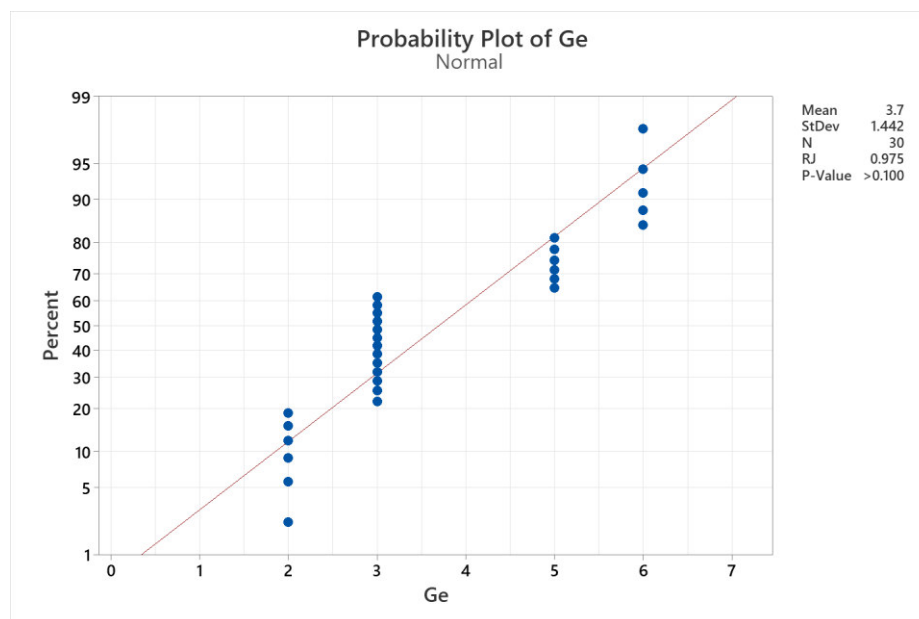
Prueba de Normalidad Gc del Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos



En la Figura 16, la Prueba de Normalidad para el Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos en el Grupo de Control (Gc), el valor p es mayor a 0.100, indicando una distribución normal de los datos.

Figura 18

Prueba de Normalidad Ge del Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos



Finalmente, en la Figura 17, para el Grupo Experimental (Ge) en el Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos, el valor p es también mayor a 0.100, lo que respalda el uso de pruebas paramétricas en el análisis.

4.3 Análisis de Resultados

Indicador 1:

Tabla 22

Estadísticas para el Indicador 1

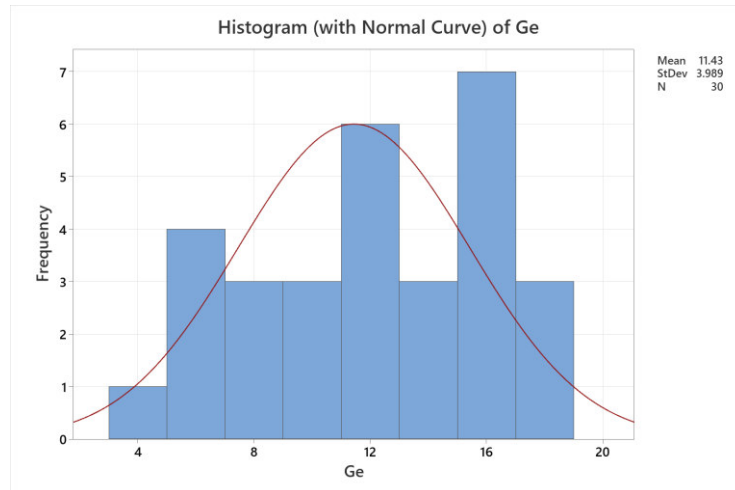
Variable	N	N*	Mean	SE M.	StDev	Min.	Q1	Median	Q3	Max.	Skewness	Kurtosis
Ge	30	0	11.433	0.728	3.989	4.000	7.750	12.000	15.000	17.000	-0.34	-1.07

En la tabla 23 se muestran las estadísticas del Grupo Experimental (Ge) para el indicador de Tiempo de Priorización de Proyectos (días). La media es de 11.433 días con una desviación estándar de 3.989. Los valores oscilan entre 4 días como mínimo y 17 días como máximo. La mediana es de 12 días, mientras que el primer cuartil es 7.750 y el tercer cuartil

15.000. El skewness de -0.34 sugiere un ligero sesgo hacia la izquierda, y la kurtosis de -1.07 indica una distribución más plana que la normal.

Figura 19

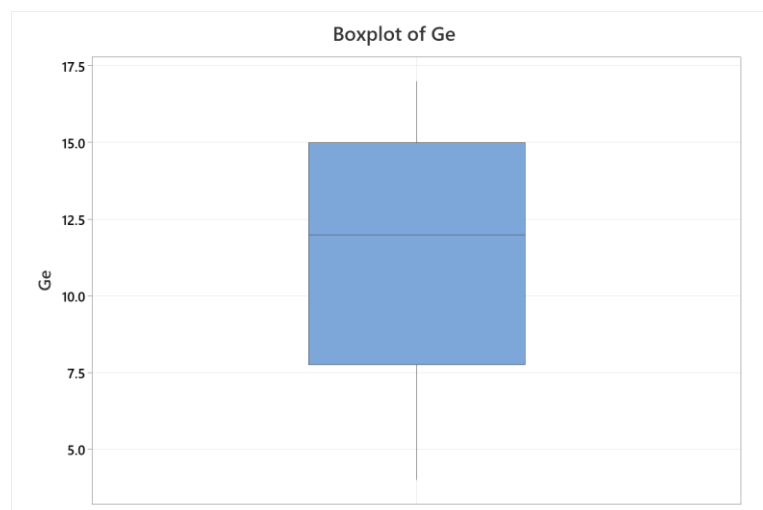
Histograma del Ge del Indicador 1



En el histograma del indicador de Tiempo de Priorización de Proyectos, se observa una distribución moderadamente simétrica. El gráfico presenta algunas variaciones, pero la curva normal muestra una tendencia hacia el centro, con ligeros picos en ambos lados. La desviación estándar es 3.989, y la media 11.43.

Figura 20

Boxplot del Ge del Indicador 1



El boxplot para el indicador de Tiempo de Priorización de Proyectos muestra que la mayor parte de los datos se encuentra entre 7.750 y 15.000 días, con algunos valores cercanos al extremo superior. Esto sugiere que, aunque la distribución general es simétrica, existe cierta variabilidad en los tiempos de priorización.

Indicador 2:

Tabla 23

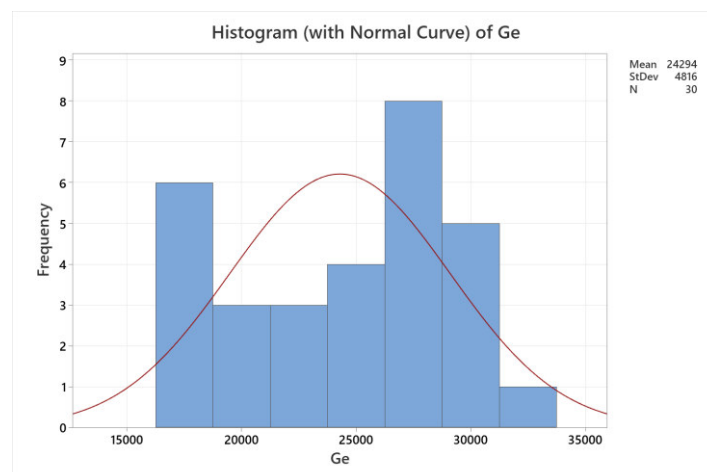
Estadísticas para el Indicador 2

Variable	N	N*	Mean	SE M.	StDev	Min.	Q1	Median	Q3	Max.	Skewness	Kurtosis
Ge	30	0	24294	879	4816	16400	20175	25539	28525	31350	-0.33	-1.28

La tabla 24 muestra las estadísticas para el indicador de Costo de Priorización de Proyectos en el Grupo Experimental. La media es 24,294 soles, con una desviación estándar de 4,816. El rango oscila entre 16,400 soles como mínimo y 31,350 como máximo, con una mediana de 25,539 soles. El skewness de -0.33 indica un ligero sesgo a la izquierda, mientras que la kurtosis de -1.28 sugiere una distribución más plana que la normal.

Figura 21

Histograma del Ge del Indicador 2

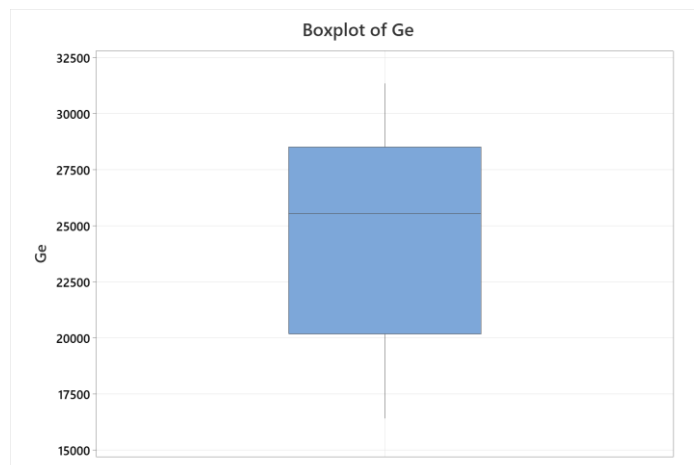


En el histograma del indicador de Costo de Priorización de Proyectos, se aprecia una distribución algo sesgada hacia la izquierda, pero con una tendencia central clara. La curva

normal muestra una dispersión moderada, lo que concuerda con el alto valor de desviación estándar.

Figura 22

Boxplot del Ge del Indicador 2



El boxplot para el indicador de Costo de Priorización de Proyectos muestra una amplia dispersión entre el primer y tercer cuartil, con valores mínimos y máximos que indican variabilidad significativa en el costo de priorización. Esto sugiere que los costos pueden variar considerablemente, lo cual puede deberse a factores externos o a la naturaleza de los proyectos.

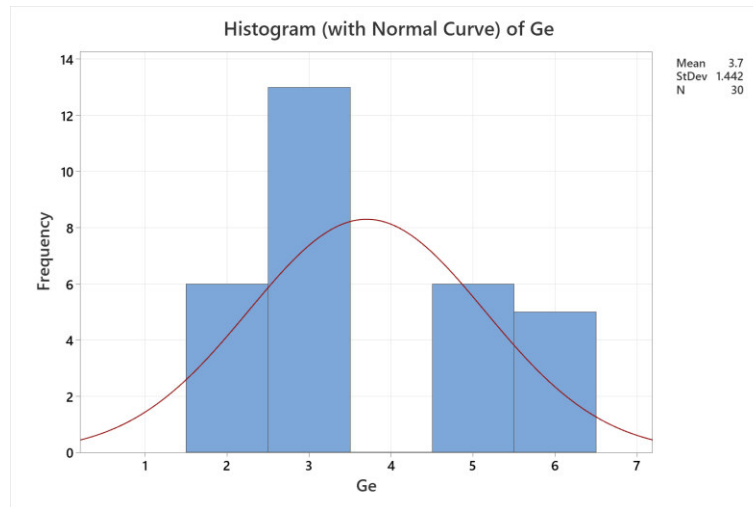
Indicador 3:

Tabla 24

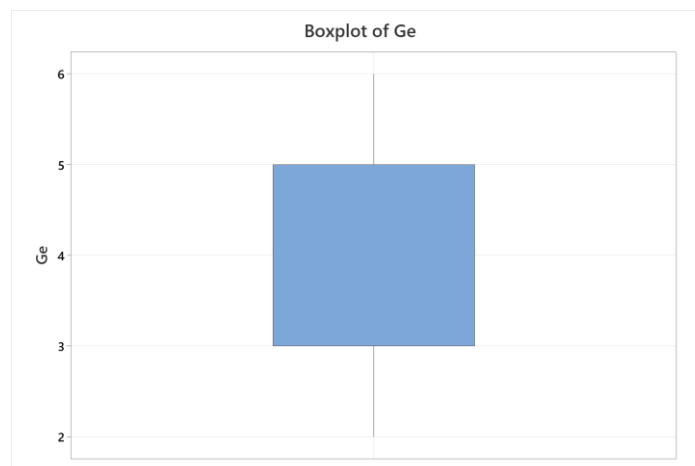
Estadísticas para el Indicador 3

Variable	N	N*	Mean	SE M.	StDev	Min.	Q1	Median	Q3	Max.	Skewness	Kurtosis
Ge	30	0	3.700	0.263	1.442	2.000	3.000	3.000	5.000	6.000	0.49	-1.27

En la tabla 25 se muestran las estadísticas para el indicador del Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos en el Grupo Experimental. La media es 3.700 personas, con una desviación estándar de 1.442. El mínimo es 2 personas y el máximo 6, con una mediana de 3. El skewness de 0.49 muestra un ligero sesgo hacia la derecha, mientras que la kurtosis de -1.27 indica una distribución más plana.

Figura 23*Histograma del Ge del Indicador 3*

En el histograma del indicador del Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos, se observa una distribución con picos en varios puntos, con un sesgo hacia la derecha. La curva normal muestra cierta dispersión, reflejando la variabilidad en la necesidad de personal.

Figura 24*Boxplot del Ge del Indicador 3*

El boxplot para el indicador del Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos muestra una concentración de datos entre 3 y 5 personas, con algunos

valores superiores que sugieren variabilidad. Esto puede indicar que, aunque la mayoría de los proyectos requieren un número constante de personal, existen casos en los que se necesita más personal para ciertas tareas.

4.4 Contrastación de Hipótesis

Para probar las hipótesis de este estudio, se aplicaron pruebas estadísticas utilizando los datos obtenidos en la investigación. Se realizó la contrastación para cada hipótesis con el fin de determinar la validez de la hipótesis nula (H_0) o de la hipótesis alterna (H_a). El método de análisis estadístico se basa en pruebas de t para muestras independientes y se considera un nivel de significancia (α) de 0.05.

Hipótesis H01: Reducción en el tiempo necesario para la priorización de proyectos

Planteamiento de Hipótesis:

Figura 25

Método de Contrastación para la Hipótesis 1

Method

μ_1 : population mean of Gc

μ_2 : population mean of Ge

Difference: $\mu_1 - \mu_2$

Equal variances are not assumed for this analysis.

H_0 : El sistema de priorización de proyectos no reduce el tiempo necesario para la priorización ($\mu_1 - \mu_2 \geq 0$).

H_a : El sistema de priorización de proyectos reduce el tiempo necesario para la priorización ($\mu_1 - \mu_2 < 0$).

Datos Descriptivos:

Figura 26

Estadísticas Descriptivas para la Hipótesis 1

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Gc	30	15.47	6.72	1.2
Ge	30	11.43	3.99	0.73

El grupo de control (Gc) tiene un promedio de 15.47 días con una desviación estándar de 6.72. El grupo experimental (Ge) muestra un promedio de 11.43 días con una desviación estándar de 3.99.

Estimación de la Diferencia:

Figura 27

Estimación para la Diferencia con Intervalo de Confianza para la Hipótesis 1

Estimation for Difference

Difference	95% Lower Bound for Difference
4.03	1.64

La diferencia media es de 4.03, con un límite inferior del intervalo de confianza del 95% de 1.64.

Prueba de t para muestras independientes:

Figura 28

Test de Hipótesis para Reducción en el Tiempo de Priorización

Test

Null hypothesis $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis $H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$

<u>T-Value</u>	<u>DF</u>	<u>P-Value</u>
2.83	47	0.003

T-valor de 2.83, con 47 grados de libertad y un valor-p de 0.003, indicando un rechazo significativo de la hipótesis nula.

Decisión Estadística:

Dado que el valor-p es menor que α , **se rechaza la hipótesis nula** y se acepta la hipótesis alterna. El resultado es significativo, indicando una reducción en el tiempo necesario para la priorización.

Hipótesis H02: Reducción en los costos de priorización de proyectos**Planteamiento de Hipótesis:****Figura 29**

Método de Contrastación para la Hipótesis 2

Method

μ_1 : population mean of Gc

μ_2 : population mean of Ge

Difference: $\mu_1 - \mu_2$

Equal variances are not assumed for this analysis.

H_0 : El sistema de priorización no reduce los costos ($\mu_1 - \mu_2 \geq 0$).

H_a : El sistema de priorización reduce los costos ($\mu_1 - \mu_2 < 0$).

Datos Descriptivos:

Figura 30

Estadísticas Descriptivas para la Hipótesis 2

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Gc	30	26928	4529	827
Ge	30	24294	4816	879

El grupo de control (Gc) tiene un promedio de 26,928 soles con una desviación estándar de 4,529, mientras que el grupo experimental (Ge) muestra un promedio de 24,294 soles con una desviación estándar de 4,816.

Estimación de la Diferencia:

Figura 31

Estimación para la Diferencia con Intervalo de Confianza para la Hipótesis 2

Estimation for Difference

Difference	95% Lower Bound for Difference
2635	617

La diferencia media es de 2,635, con un límite inferior del intervalo de confianza del 95% de 617.

Prueba de t para muestras independientes:

Figura 32

Test de Hipótesis para Reducción de Costos de Priorización

Test

Null hypothesis $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis $H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$

T-Value	DF	P-Value
2.18	57	0.017

T-valor de 2.18, con 57 grados de libertad y un valor-p de 0.017, sugiriendo una reducción significativa de los costos.

Decisión Estadística:

El valor-p es menor que α , por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, confirmando que el sistema de priorización reduce los costos.

Hipótesis H03: Reducción en el número de personas necesarias para la priorización

Planteamiento de Hipótesis:

Figura 33

Método de Contrastación para la Hipótesis 3

Method

μ_1 : population mean of Gc

μ_2 : population mean of Ge

Difference: $\mu_1 - \mu_2$

Equal variances are not assumed for this analysis.

Ho: El sistema de priorización no reduce el número de personas necesarias ($\mu_1 - \mu_2 \geq 0$).

Ha: El sistema de priorización reduce el número de personas necesarias ($\mu_1 - \mu_2 < 0$).

Datos Descriptivos:

Figura 34

Estadísticas Descriptivas para la Hipótesis 3

Descriptive Statistics

Sample	N	Mean	StDev	SE Mean
Gc	30	5.17	2.04	0.37
Ge	30	3.70	1.44	0.26

El grupo de control (Gc) tiene un promedio de 5.17 con una desviación estándar de 2.04. El grupo experimental (Ge) tiene un promedio de 3.70 con una desviación estándar de 1.44.

Estimación de la Diferencia:

Figura 35

Estimación para la Diferencia con Intervalo de Confianza para la Hipótesis 3

Estimation for Difference

Difference	95% Lower Bound for Difference
1.467	0.704

La diferencia media es de 1.467, con un límite inferior del intervalo de confianza del 95% de 0.704.

Prueba de t para muestras independientes:

Figura 36

Test de Hipótesis para Equilibrio de Usuario

Test

Null hypothesis $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Alternative hypothesis $H_1: \mu_1 - \mu_2 > 0$

<u>T-Value</u>	<u>DF</u>	<u>P-Value</u>
3.22	52	0.001

T-valor de 3.22, con 52 grados de libertad y un valor-p de 0.001, indicando una diferencia significativa.

Decisión Estadística:

El valor-p es menor que α , por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, confirmando que el sistema de priorización reduce el número de personas necesarias.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección, se presenta la discusión de los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología de priorización de proyectos viales utilizando el modelo de tráfico de Beckmann y la teoría de grafos. El objetivo es analizar las diferencias entre el Grupo Experimental (Ge) y el Grupo de Control (Gc) en términos de tiempo de priorización, costo de priorización y número de personas necesarias para llevar a cabo este proceso.

Para cada indicador, se discuten las conclusiones principales y se comparan con estudios y trabajos previos relevantes, destacando las similitudes y diferencias encontradas. Se busca, de este modo, contextualizar los resultados obtenidos en el estudio con respecto a investigaciones existentes, brindando una visión más amplia sobre el impacto de la metodología utilizada.

5.1 Indicador 1: Tiempo de Priorización de Proyectos (días)

El promedio del Grupo Experimental (Ge) es de 11.43 días, mientras que el Grupo de Control (Gc) tiene un promedio de 15.47 días, lo cual indica una reducción significativa en el tiempo de priorización. Este resultado sugiere que la metodología utilizada en el Ge permite una mayor eficiencia en el proceso de priorización de proyectos.

La similitud entre estos resultados y el artículo de Mirowski et al. (2016) se centra en la reducción de tiempos a través de la optimización de procesos. En ambos casos, el uso de herramientas y estrategias optimizadas reduce el tiempo necesario para completar tareas clave. Si bien el estudio de Mirowski et al. se enfoca en la industria forestal, ambos coinciden en la importancia de la planificación eficaz para optimizar procesos y tiempos.

5.2 Indicador 2: Costo de Priorización de Proyectos

El costo de priorización de proyectos promedio para el Grupo Experimental (Ge) es de 24,294 soles, mientras que para el Grupo de Control (Gc) presenta un promedio de 26,928 soles, evidenciando una reducción en los costos de priorización. Este resultado sugiere que la metodología aplicada en el Ge puede ser eficaz para disminuir los costos asociados con la priorización.

La tesis de Vázquez Corte (2018) destaca la importancia de la evaluación socioeconómica para proyectos de transporte masivo. Los resultados refuerzan la idea de que la planificación adecuada y el uso eficiente de los recursos pueden contribuir a una reducción significativa de costos. Aunque la tesis de Vázquez Corte aborda un ámbito distinto, ambos estudios muestran que una gestión efectiva puede llevar a menores costos de operación.

5.3 Indicador 3: Número de Personas Necesarias para Desarrollar la Priorización de Proyectos

El Grupo Experimental (Ge) presenta un promedio de 3.7 personas para desarrollar la priorización de proyectos, mientras que el Grupo de Control (Gc) presenta un promedio de 5.2 personas. Esta diferencia sugiere que la metodología aplicada en el Ge permite una mayor eficiencia en términos de personal necesario para la priorización de proyectos.

En el estudio de Mirowski et al. (2016), se observa que el uso de herramientas de optimización también puede llevar a una reducción en la necesidad de recursos humanos para la planificación y el transporte. Aunque el contexto es diferente, ambos estudios resaltan que la eficiencia puede lograrse mediante la optimización de procesos y la disminución del personal requerido para tareas específicas.

VI. CONCLUSIONES

- a) La aplicación del sistema de priorización de proyectos permitió reducir significativamente el tiempo necesario para la priorización, como se demostró en el Grupo Experimental (Ge). Esta reducción en el tiempo puede mejorar la eficiencia en la gestión de proyectos de transporte urbano, contribuyendo a una mejor planificación y ejecución.
- b) El sistema implementado logró disminuir el costo de priorización de proyectos, como se evidenció en el Grupo Experimental. Este resultado indica que la metodología aplicada puede ser útil para reducir gastos y optimizar el uso de recursos en la gestión de proyectos viales.
- c) Se constató una reducción en el número de personas necesarias para la priorización de proyectos con el sistema aplicado. El promedio de personas requeridas fue menor en el Grupo Experimental, lo que sugiere que el sistema de priorización propuesto puede aumentar la eficiencia en términos de recursos humanos y simplificar el proceso de gestión de proyectos.

VII. RECOMENDACIONES

- a) El sistema de priorización de proyectos debe ser revisado y ajustado periódicamente para asegurar su eficacia y adaptarse a cambios en las necesidades de transporte y tráfico. Este mantenimiento garantizará que la priorización siga siendo eficiente a lo largo del tiempo.
- b) Se recomienda llevar a cabo pruebas adicionales para validar el sistema de priorización y asegurarse de que cumpla con los estándares de eficiencia y seguridad. Esto puede implicar simulaciones o pruebas en condiciones controladas para detectar posibles problemas antes de su implementación a gran escala.
- c) Se sugiere capacitar a los responsables de la gestión de proyectos en el uso adecuado del sistema de priorización para maximizar su potencial y reducir errores humanos. Estas capacitaciones deben enfocarse en el análisis de datos y en la toma de decisiones basadas en evidencia para asegurar la correcta aplicación del sistema.

VIII. REFERENCIAS

- Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). (2013). *Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el Área Metropolitana de Lima y Callao*.
- Anaconda Inc. (27 de marzo de 2024). *Anaconda*. <https://www.anaconda.com/>
- Anderson, M. L. (2016). Superstitions, street traffic, and subjective well-being. *Journal of Public Economics*, 142, 1-10
- AUSTROADS. (2021). *Management of traffic modelling processes and applications*.
- Bar-Gera, H. (2024, marzo 27). *Sioux Falls variants for network design*. https://tzin.bgu.ac.il/~bagera/tntp/SiouxFalls_CNDP/SiouxFallsVariantsForNetworkDesign.html
- Batten, D. F. (1996). *Infraestructura y la complejidad del desarrollo económico: una introducción exploratoria*. Springer.
- Beckmann, M. (1957). Studies in the economics of transportation. *The Economic Journal*, 67(265), 116–118,
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2004). *Desarrollo de infraestructura y crecimiento económico: revisión conceptual*.
- Dávalos y Lissón, P. (1902). *Las vías de comunicación en el Perú*. Editorial Propaganda.
- Ebrary.net. (27 de marzo de 2024). *Wardrop First Principle and its Dynamic Extensions*. https://ebrary.net/10792/economics/wardrops_first_principle_dynamic_extensions
- Federal Highway Administration. (2020). *Traffic congestion and reliability: trends and advanced strategies for congestion mitigation*. Federal Highway Administration.
- Ghazali, W. N. (2019). *The effect of traffic congestion on quality of community life*. *Carving The Future Built Environment: Environmental, Economic And Social Resilience*. European Proceedings.
- Google. (2024). *Google Maps*. <https://www.google.com/maps>

- Gordon, G. (27 de marzo de 2024). *Karush-Kuhn-Tucker Conditions*.
<https://www.cs.cmu.edu/~ggordon/10725-F12/slides/16-kkt.pdf>
- Greene, D. L. (1997). *The Full Costs and Benefits of Transportation: Conceptual and Theoretical Issues*. Springer.
- Hennessy, D. A. (1999). Traffic Congestion, Driver Stress, and Driver Aggression. *Aggressive Behavior*, 25(6), 409-423
- Hensher, D. (2008). Assessing systematic sources of variation in public transport elasticities: Some comparative warnings. *Transportation Research Part A Policy and Practice* 42(7), 1031-1042.
- Hensher, D. A. (2008). *Handbook of Transport Modelling*. Elsevier.
- Indian Institute of Technology Bombay. (27 de marzo de 2024). *System Optimal Assignment*.
<https://civil13-iitb.vlabs.ac.in/exp12/theory.php>
- Infobae. (26 de marzo de 2023). *Asalto en puente Bella Unión: ladrón lanza bujía e ingresa a vehículo en pleno tráfico en Cercado de Lima*.
<https://www.infobae.com/peru/2023/12/27/asalto-en-puente-bella-union-ladron-lanza-bujia-e-ingresa-a-vehiculo-en-pleno-trafico-en-cercado-de-lima/>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (27 de marzo de 2024). *Portal Estadístico*.
<https://www.gob.pe/inei/>
- INRIX. (2022). *INRIX 2022 Global Traffic Scorecard*.
- Kittipichai, W. (2015). Quality of Life Among Thai Workers in Textile Dyeing Factories. *Glob J Health Sci*, 7(3), 274–282.
- Korea Research Institute for Human Settlements. (2011). *Measures to Facilitate Connectivity Between Roads by Installing Road Station*.
- Krugman, P. (2003). *International Economics*. Addison Wesley World Student Series.

- Lewis, D. (1991). *Primer on Transportation, Productivity, and Economic Development*. Transportation Research Board.
- Lewis, D. (1993). *Ensuring Productive Investment in Transportation Infrastructure*. Policy Study.
- Medlineplus. (27 de marzo de 2024). *Bienvenido a MedlinePlus en español*. <https://medlineplus.gov/>
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2019). *Plan Nacional de Infraestructura para la Competitividad*.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (27 de marzo de 2024). *Transparencia Económica*. <https://apps5.mineco.gob.pe/transparencia/Navegador/default.aspx>
- Ministerio de Salud. (2005, marzo 30). *Minsa vigila contaminación ambiental para prevenir efectos dañinos en la salud*. <https://www.gob.pe/institucion/minsa/noticias/43016-minsa-vigila-contaminacion-ambiental-para-prevenir-efectos-daninos-en-la-salud>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2024). <https://www.gob.pe/mtc>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2022). <https://www.gob.pe/vivienda>
- Mirowski, L., Ghaffariyan, M. R., Wise, A., Acuna, M., & Turner, P. (2016, enero). *Reducing transport costs through optimised transport planning: a case study using the FastTRUCK software tool*. Paper presented at the Australasian Conference on Information Systems, Wollongong, Australia. <https://www.researchgate.net/publication/309389881>
- Municipalidad de Lima. (2020). <https://www.munlima.gob.pe/>
- Municipalidad Provincial de Arequipa. (2020). <https://www.muniarequipa.gob.pe/>
- Municipalidad Provincial de Trujillo. (2023). <https://www.gob.pe/munitrujillo>
- Naciones Unidas. (2024). *Transport Infrastructure Development*. <https://unece.org/transport/transport-infrastructure-development>
- Ortuzar, J. de D. (2011). *Modelling Transport*. John Wiley & Sons.

- Prud'homme, R. (1996). *Assessing the Role of Infrastructure in France by Means of Regionally Estimated Production Functions*. Infrastructure and the Complexity of Economic Development.
- Raimondi, A. (1862). *Apuntes sobre la provincia litoral de Loreto*. Apuntes.
- Rietveld, P. (2000). *Transport infrastructure and regional development*. En Polak y Heertje. Analytical transport economics.
- Sociedad de Comercio Exterior del Perú [COMEX]. (2023). *Solo uno de once sectores pudo mantener un avance continuo en el cierre de la brecha de infraestructura*. <https://www.comexperu.org.pe/articulo/solo-uno-de-once-sectores-pudo-mantener-un-avance-continuo-en-el-cierre-de-la-brecha-de-infraestructura>
- Spyder Website Contributors. (27 de marzo de 2024). *Spyder*. <https://www.spyder-ide.org/>
- Stabler, B. (27 de marzo de 2024). *Transportation Network*. <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks>
- The European Mathematical Society. (27 de marzo de 2024). *Supporting hyperplane*. https://encyclopediaofmath.org/wiki/Supporting_hyperplane
- Tomtom Traffic Index. (2023). *TomTom Traffic Index Ranking 2023*.
- Transportation Research Board. (2016). *Planning and Preliminary Engineering Applications Guide to the Highway Capacity Manual*. National Cooperative Highway Research Program.
- Treiber, M. (2008). *How Much Does Traffic Congestion Increase Fuel Consumption and Emissions? Applying Fuel Consumption Model to NGSIM Trajectory Data*. Environmental Science, Engineering.
- Ukkusuri, S. V. (2009). A methodology to assess the criticality of highway transportation networks. *Journal of Transportation Security*, 2(1), 29-46.

Universidad de Pamplona. (2012). *Teoría de grafos*.

https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_23/recursos/general/11072012/grafos3.pdf

Universidad San Ignacio de Loyola. (2020). *La Marginal de la Selva, Infraestructura de Carreteras y Relanzamiento del Turismo*.

University of Queensland. (5 de agosto de 2016). *Road rage: why normal people become harmful on the roads*. <https://theconversation.com/road-rage-why-normal-people-become-harmful-on-the-roads-60845>

Vázquez Corte, C. (2018). *Propuesta de metodología para la evaluación socioeconómica de proyectos de transporte masivo BRT*. [Tesina de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ingeniería, Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado].

Wardrop, J. G. (1952). *Some theoretical aspects of road traffic research*. *Operational Research Quarterly*.

White Swan Foundation. (27 de marzo de 2024). *White Swan Foundation*. <https://www.whiteswanfoundation.org/>

IX. ANEXOS

Anexo A

Codigo Python del trabajo de Investigacion

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Updated on '24

@author: LSV
"""

#####---GetData

#from xlrd import open_workbook
import networkx as nx
import sympy as sp
#from docx import Document
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from operator import add
import pandas as pd
import math

class Msa:

    def create_dataframes(self):
        #Import from excel as dataframes
        file = 'Network_n_test.xls'
```

```

xl = pd.ExcelFile(file)
self.dfNet = xl.parse('Net')
self.dfOD = xl.parse('OD_UE')

self.num_links=len(self.dfNet)
print("self.num_links")
print(self.num_links)

def ini_flow_np(self,num_links,t_player):
    #Create array of flow 0 and start iteration
    self.num_iteration=1
    self.convergence_list=[]
    self.flow_msa_np=[0] * num_links
    print("flow_msa_np")
    print(self.flow_msa_np)
    #1 for UE, 2 for SO
    self.type_of_player=t_player
    #for i in range (0,num_links):

def time_link_computation(self,num_links,Net,flow):
    #Calculate time
    self.time_flow=[]
    if self.type_of_player == 1:
        for i in range (0,num_links):
            temp_ft=Net.loc[i][3]
            temp_a=Net.loc[i][4]

```

```

temp_b=Net.loc[i][5]
temp_c=Net.loc[i][6]
temp_x=flow[i]
temp_flow=temp_ft*(1+temp_a*(temp_x/temp_c)**temp_b)
self.time_flow.append(temp_flow)
print("self.time_flow")
print(self.time_flow)
if self.type_of_player == 2:
    temp_ft,temp_a,temp_b,temp_c,temp_x=sp.symbols('temp_ft temp_a temp_b
temp_c temp_x',real=True)
expre=sp.diff((temp_ft*(1+temp_a*(temp_x/temp_c)**temp_b)*temp_x),temp_x)
for i in range (0,num_links):
    temp_ft1=Net.loc[i][3]
    temp_a1=Net.loc[i][4]
    temp_b1=Net.loc[i][5]
    temp_c1=Net.loc[i][6]
    temp_x1=flow[i]
    temp_flow=expre.subs({temp_ft:temp_ft1,
temp_a:temp_a1,temp_b:temp_b1,temp_c:temp_c1,temp_x:temp_x1})
    self.time_flow.append(temp_flow)
print("self.time_flow")
print(self.time_flow)

```

- Resultados de Convergencia

compute_path_time

-----assign_xasteristic-----

compute_path_time

-----convergence_number-----

self.convergence

0.07166723384157482

self.num_iteration

297

-----FIN-----

compute_path_time

-----assign_xasteristic-----

compute_path_time

-----convergence_number-----

self.convergence

0.07039939687745898

self.num_iteration

298

-----FIN-----

compute_path_time

-----assign_xasteristic-----

compute_path_time

-----convergence_number-----

self.convergence

0.06978674209321303

self.num_iteration

299

-----FIN-----

compute_path_time

-----assign_xasteristic-----

compute_path_time

-----convergence_number-----

self.convergence

0.06955359356481214

self.num_iteration

300

-----FIN-----

compute_path_time

-----assign_xasteristic-----

compute_path_time

-----convergence_number-----

self.convergence

0.06992769032014773

self.num_iteration

301

-----FIN-----

compute_path_time

-----assign_xasteristic-----

compute_path_time

-----convergence_number-----

self.convergence

0.07013714943832448

self.num_iteration

302

-----FIN-----

compute_path_time

-----assign_xasteristic-----

compute_path_time

-----convergence_number-----

self.convergence

0.06833479257345694

self.num_iteration

303

-----FIN-----