



Análisis de reducción de gases contaminantes atmosféricos mediante la optimización de la red de transporte público de autobuses en la ciudad de Riobamba

Analysis of the reduction of atmospheric polluting gases by optimizing the public bus transport network in the city of Riobamba

Análise da redução de gases poluentes atmosféricos por meio da otimização da rede de transporte coletivo de ônibus na cidade de Riobamba

Otto Fernando Balseca-Sampedro ^I
otto.balseca@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-6713-0991>

Diego Fernando Chimbo-Condor ^{III}
diegofer_nando_1994@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7777-9134>

Telmo Jesús Gerardo Moreno-Romero ^{II}
telmo.moreno@epoch.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9354-5995>

Vicente David Paucar-Carrillo ^{IV}
vicente.davi16@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0112-2785>

Correspondencia: otto.balseca@epoch.edu.ec

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículos de investigación

***Recibido:** 16 de marzo de 2021 ***Aceptado:** 22 de abril de 2021 * **Publicado:** 05 de mayo de 2021

- I. Magister en Sistemas de Transporte de Petróleo y Derivados, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Especialista en Computación Aplicada al Ejercicio Docente, Master en Ciencias, Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Investigador Independiente, Ecuador.
- IV. Investigador Independiente, Ecuador.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar una propuesta de reducción de gases contaminantes atmosféricos, mediante la optimización de la red de transporte público de autobuses de Riobamba mejorado el ámbito de movilidad urbana en la ciudad a través de la aplicación de ingeniería de operaciones; para la cual se identificó los problemas de las rutas de transporte público de autobuses de la urbe y evaluó la cantidad de gases contaminantes emitidos al ambiente; se realizó la implementación de una nueva distribución de rutas en el transporte urbano para una óptima movilización mediante el software ArcGIS 10.4.1 y su complemento especializado en ruteo vehicular "Network Analyst". Se contemplo los datos previos y reales de la investigación otorgado por el municipio de Riobamba sobre las rutas actuales del transporte público, y las rutas propuestas por el GADR en el Plan de Movilidad del 2019. Se realizó un total de 16 procesos iterativos obteniendo la solución con mayores beneficios, se calculó la contaminación ambiental en toneladas anuales para el transporte existentes. Se ejecutó un análisis comparativo entre las contaminaciones anuales de las rutas actuales, las rutas propuestas por el GADR y las rutas propuestas en la presente investigación, resultando una reducción del 13% de contaminación ambiental en comparación con la contaminación actual de los buses con un total de 1.595,76 toneladas anuales reducidas.

Palabras claves: Ingeniería de Operaciones; Ruteo Vehicular; ArcGIS (software); Network Analyst (software); Método Dijkstra; Contaminantes de Autobuses; Factores de Emisión; Reducción de Contaminación.

Abstract

The aim of this research was to develop a proposal for the reduction of atmospheric pollutant gases by optimizing the public bus transportation network of Riobamba to improve urban mobility in the city through the application of operations engineering; for which we identified the problems of public bus transportation routes in the city and evaluated amount of pollutant gases emitted into environment; we implemented a new distribution of routes in urban transportation for optimal mobilization using ArcGIS 10.4.1 software and its specialized vehicle routing complement "Network Analyst". Previous and actual research data provided by municipality of Riobamba on current public transportation routes, and routes proposed by GADR in the 2019 Mobility Plan,

were considered. A total of 16 iterative processes were carried out to obtain the solution with greatest benefits; environmental pollution was calculated in tons per year for existing transportation. A comparative analysis was made between the annual pollution of current routes, routes proposed by GADR and routes proposed in this research, resulting in a 13% reduction of environmental pollution compared to current pollution of buses with a total of 1,595.76 tons per year reduced.

Keywords: Operations Engineering; Vehicle Routing; ArcGIS (software); Network Analyst (software); Dijkstra method; Bus Pollutants; Emission Factors; Pollution Reduction.

Resumo

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma proposta de redução de gases poluentes atmosféricos, por meio da otimização da rede de transporte coletivo de ônibus de Riobamba, melhorando o escopo da mobilidade urbana na cidade por meio da aplicação de engenharia de operações; para o qual foram identificados os problemas das rotas de transporte público de ônibus da cidade e avaliada a quantidade de gases poluentes lançados ao meio ambiente; A implementação de uma nova rota de distribuição no transporte urbano para uma mobilização ótima foi efectuada utilizando o software ArcGIS 10.4.1 e o seu complemento especializado em encaminhamentos veiculares “Analista de Rede”. Foram considerados os dados anteriores e reais da investigação concedida pelo município de Riobamba sobre as atuais rotas de transporte público, e as rotas propostas pelo GADR no Plano de Mobilidade 2019. Foram realizados 16 processos iterativos no total, obtendo a solução com maior benefícios, a poluição ambiental foi calculada em toneladas por ano para o transporte existente. Foi realizada uma análise comparativa entre a contaminação anual das rotas atuais, as rotas propostas pelo GADR e as rotas propostas na presente investigação, resultando em uma redução de 13% da contaminação ambiental em relação à contaminação atual dos ônibus com um total de 1.595,76 toneladas por ano reduzido.

Palavras-chave: Engenharia de Operações; Roteamento de veículos; ArcGIS (software); Analista de Rede (software); Método de Dijkstra; Poluentes de ônibus; Fatores de emissão; Redução da poluição.

Introducción

Ciertamente la expansión humana ha generado efectos sociales, económicos y políticos; no solo en varias ciudades principales, sino en todos los lugares donde se mantiene un servicio de transporte público de autobuses, dando aquí la importancia de optimizar el servicio de ruteo vehicular. Una mejor planeación en un sistema de transporte urbano depende de organizar una demanda de pasajeros, paradas o estaciones durante todo el trayecto de tránsito, capacidades de los vehículos, horarios disponibles del servicio de transporte público, tiempos de llegada requeridos por los usuarios, horas de destino objetivo. Los inconvenientes que se presentan en el momento de organizar un sistema de transporte es la cantidad de viajeros durante las horas pico, los horarios de salida de los viajeros de sus hogares ya que muchas veces este factor no se lo planifica (Alfa y Chen, 1995:p. 137-153) y (CastilloMardonesy Vila, 2017).

En general existen métodos de planificación en lo que refiere a transporte, primero los trabajos deben enfocarse en una planificación en las rutas para brindar un servicio de calidad óptimo con un coste mínimo. La infraestructura relacionada al transporte debe planificarse y ejecutarse conduciendo a una sostenibilidad lo cual significa brindar respeto al medio ambiente y ocasionar un mínimo impacto en este. Las rutas pueden planificarse o programarse mediante métodos de ahorro de tiempos, método Trioptimal, simplificado de reparto, travelling salesman. Los beneficios con una buena planificación en las rutas es reducir horas extras en los conductores, optimización del uso en toda la flota, minimización de distancias recorridas con carga y vacíos, reducciones en las cargas administrativas, mayores ingresos, mejor servicio a los usuarios (Fernández Díez de los Ríos, 2015).

Además; actualmente las rutas de transporte público urbano se deben planificar con las zonas con probabilidad de contagios de enfermedades y lugares de congestionamientos optando por conocer de mejor manera el número de rutas, itinerarios, tipos de vehículos que prestan el servicio público en la ciudad de Lima, Perú (Garaychoa y Ticona, 2015:p. 93-97).

Por lo tanto, crear una red de autobuses que cubra convenientemente la demanda de pasajeros son un ingrediente importante en el proceso de planificación de operaciones de tránsito, la determinación de un modelamiento de una red de bus óptima es altamente sensible cualquier cambio de la demanda. muchas de las ciudades de todo el mundo experimentan variaciones de la demanda o aumento poblacional que naturalmente tienen un impacto en la optimización del

servicio de tránsito es decir la red autobuses debe proporcionar un servicio conveniente en toda su ruta (AmiripourCedery Mohaymany, 2014:p. 322-338).

Es preciso tener en consideración que la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo cuenta con un servicio de transporte público urbano que está compuesto por 7 operadoras y 16 líneas que cubren diferentes rutas, movilizand o a las personas que viven en los 247 barrios de la ciudad, recorre de forma transversal y longitudinal la urbe Riobambeña, brindando el servicio a 733 pasajeros promedio diariamente por unidad de bus (Movilidad de Tránsito y Transporte, 2015:p. 10).

En la presente investigación propone una optimización del sistema de transporte urbano público y por consecuencia una mitigación del consumo del combustible en la ciudad de Riobamba, una vez determinada la situación actual del transporte en el área de estudio se establecerá una nueva distribución de buses con el software ArcGIS en función de minimizar costos, tiempos de trayecto, tiempos de descarga, fijar tiempos entre los distintos trayectos necesarias para el correcto funcionamiento del sistema de transporte urbano público.

Marco teorico

La planificación del transporte público presenta un mayor enfoque a países de América Latina y el Caribe ya que están experimentando un proceso de urbanización similar al de los países más desarrollados. América latina con 519 millones de habitantes en el año 2000 el 75% viven en ciudades y se prevé que para el año 2030 presentará 726 millones de habitantes con el 83% que habitaran las urbes de esta región (Celi Santiago Fernando, 2018:p. 15). Una tendencia que se ha demostrado bastante eficiente es la operación mediante sistemas integrados de transporte. Este tipo de sistemas que consiste en involucrar a diferentes medios de transporte como buses articulados, trenes, estaciones, paradas de autobuses y otros; pero una de las situaciones más críticas es la economía que se requiere para que estos sistemas entren en funcionamiento ya que no son nada baratos su implementación y mucho menos mantener su funcionamiento. Viendo desde este punto de vista realizar sistemas integrados en cada modo de transporte independientemente si puede resultar más factible y accesible para las diferentes regiones del mundo, esta necesidad se debe al crecimiento poblacional y aumento en el número de viajes de los diferentes modos de transporte. Con los estudios realizados se ha demostrado que para brindar soluciones de movilidad en las diferentes urbes no se requiere de ampliación de sus vías o de la construcción de nuevas mallas

viales; sino más bien se puede dar soluciones con una buena planificación y optimización del transporte con mayor jerarquía social o transporte masivo. Para que se pueda lograr esta solución se deben controlar los recursos de manera que se designan a cada ciudad. Los métodos para planificación de nuevas rutas se han estudiado extensamente, pero se ha desarrollado un método bastante eficaz que utiliza el software ArcGIS y sus complementos para determinar las rutas más optimas según las variables que el diseñador considere necesario como tiempo, distancia, número de buses, número de paradas, lugares de aglomeración entre otros (Serna-UranGarcía-Castrillón y Flórez-Londoño, 2016:p. 89-95).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son muy utilizados hoy en día ya que contienen bases de datos detalladas de cada región del mundo, estos sistemas permiten recopilar, planear, compartir y discutir sobre información espacial mediante las funciones que presenta cada software, sus herramientas y demás datos. Estos Sigs. permiten a los usuarios una variedad infinita de soluciones según el usuario necesite o restrinja su trabajo, principalmente se encarga del ruteo vehicular y toda su logística para optimizar la movilidad de los vehículos, disminuir los gastos de operación y ordenar diferentes tipos de rutas con mayores eficiencias (Aguilar, 2017:p. 203).

(Verdugo, 2014) Realizó una optimización de las rutas para la Lectura de los medidores para la empresa eléctrica Regional Centro-Sur en la que utilizo el software ArcGIS; ingresando variables de distancia, costo, tiempo y otras para poder evaluar, reordenar y optimizar las rutas sabiendo que este software utiliza el algoritmo de Dijkstra, el cual es bastante utilizado para organizar rutas con menores distancias, tiempos y gastos posibles.

Otra de las funciones que tiene Network Analyst es planificar rutas en el sector turístico, gestión de riesgos, cartografía, mapeo, ordenamiento territorial, rutas más rápidas para asistir a emergencias, alcance de una servicio de están de bomberos, rutas de buses, rutas para movilizarse en una universidad o desplazarse en un campus (Ángel et al., 2019). Para una mejor sostenibilidad en el uso del transporte público se ha basado cinco pilares fundamentales como son: la gestión de seguridad vial que consiste en promover iniciativas de seguridad vial para las distintas regiones y con métodos diferentes, vías de tránsito y una movilidad más segura que consiste en mejorar los diseños de rutas y sus construcciones considerando primordialmente seguridad para los transeúntes, vehículos con mayor seguridad que consiste en utilizar la tecnología para proporcionar una mayor tasa de sobrevivencia frente a choques o colisiones, usuarios más seguros en las vías

ya que con un mejor comportamiento y respeto por parte de estos se puede disminuir el índice de mortalidad en las calles y el quinto y último pilar, que consiste en asistencia frente a cualquier accidente en el menor tiempo posible para intentar salvaguardar la vida de los usuarios de transporte y transeúntes. Otra de las funciones que tiene Network Analyst es planificar rutas en el sector turístico, gestión de riesgos, cartografía, mapeo, ordenamiento territorial, rutas más rápidas para asistir a emergencias, alcance de una servicio de están de bomberos, rutas de buses, rutas para movilizarse en una universidad o desplazarse en un campus (Ángel et al., 2019).

El plan de movilidad de Riobamba es considerado una herramienta para todas las instituciones públicas o privadas, ya que permite organizar sus actividades actuales o futuras que lo requieran; gracias a este documento pueden planear o evaluar tráfico, medios de transporte pasados, actuales y futuros. El último plan de movilidad a ser estudiado es publicado en el 2019 donde se proponen mejoras para toda la ciudad, mejores rutas, soluciones para problemas anteriores y visiones a futuro para el bienestar de la ciudad de Riobamba (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba, 2019).

A. Planificación, selección de rutas y modos de transporte.

La generación de nuevas rutas y métodos óptimos para la distribución de toda una cadena de logística es muy importante actualmente, para disminuir tiempos de entregas, una mayor satisfacción de los antiguos y nuevos clientes. Esta es una demanda actual y más aún lo será en el futuro.

El éxito o fracaso de una cadena de logística depende en su mayoría el sistema de transporte y su forma de distribución; otro punto que debe considerarse es la satisfacción de los clientes con el menor coste posible. Debido a estos objetivos los principales objetivos al momento de brindar un buen servicio de transporte se deben contemplar:

- Aumentar el nivel de satisfacción del cliente.
- Incluir un valor agregado dirigido a los clientes del transporte.
- Se debe racionalizar toda la red de distribución del transporte.
- Incluir de ser posible la exploración de servicios compartidos o interconectados.

B. Programación de rutas SIGs.

1. Introducción a los sistemas de Información Geográfica

Un SIG o Sistema de Información Geográfica se hace referencia a una aplicación que se utiliza para crear, manipular o establecer mapas y precisamente con esta finalidad se evidenciara en esta

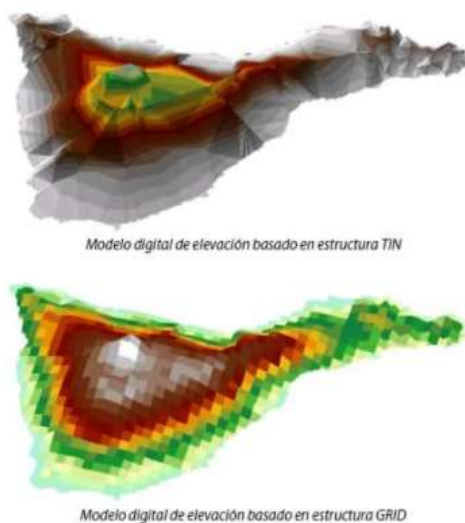
investigación. Otros autores se refieren a SIGs como hardware, bases de datos de todas las regiones con sus mapas. Otra forma de interpretar a los SIGs es una infraestructura de datos espaciales o IDE.

2. Tipos de SIGs

Estos pueden ser de dos tipos dependiendo de lo que se desee analizar como vegetaciones, distribución geográfica, temperaturas, ondas de alcance, distribución de vías, hidrografía, divisiones administrativas. En estos softwares la información se presenta en capas y se guarda en múltiples extensiones como son:

Capas Ráster: Se define como un grupo de celdillas o píxeles en las cuales se guarda información de datos propios de una región y posteriormente modelizar estos caracteres como se muestra en la Fig.1. Se pueden guardar valores como altitud, latitud, ondas de temperatura, contaminaciones y otros continuando con estructuras similares que se pueden operar entre capas.

Figura 1: Capas en formato ráster.



Fuente: Rodríguez & Elizabeth, 2010.

Capas vectoriales: Se define como un conjunto de puntos, líneas o en su conjunto polígonos que modelan en un determinado medio como se muestra en la Fig.2. En estas capas se conoce a estos objetos como caracteres(features). Se puede almacenar gráficos, geografía, localidades, letras o números. cada punto en esta capa es conocido por su latitud y altitud en X,Y y Z. (Rodríguez y Elizabeth, 2010).

Figura 2: Puntos y líneas de forma vectorial.



Fuente: Rodríguez & Elizabeth, 2010.

C. Extensión Network Analyst de ArcGIS

Es una extensión de ArcGIS que permite optimizar distancias entre dos puntos determinados. Entre las principales funciones que tiene esta extensión están:

- Optimización del tiempo en rutas
- Ruteo de nuevas rutas entre dos puntos determinados
- Ruteo para flotas vehiculares
- Análisis del área de servicio
- Análisis de las rutas más rápidas, optimas
- Análisis de tiendas o puntos cercanos
- Designación de locales
- Análisis de origen y sus destinos con sus puntos de visita.

1. Servicio de transporte a varias órdenes con una flota

Para trabajar con Network Analyst se debe activar la extensión con todas las funciones que se muestran en la Fig.3.

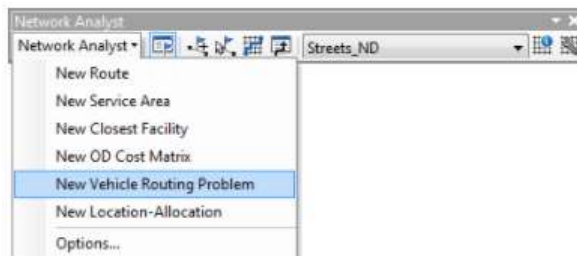
Figura 3: Barra de herramientas de Network Analyst



Fuente : ESRI, 2020.

Entre las funciones principales que se puede realizar en una red de calles están nuevas rutas, áreas de servicio, ruteo vehicular, etc.

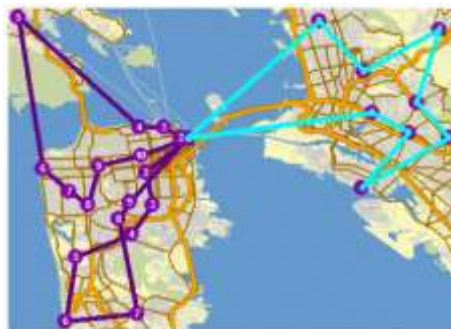
Figura 4: Tipos de ruteo de transportes que permite ArcGIS.



Fuente: ESRI, 2020.

Según (ESRI, 2020), para la generación de rutas en ArcGIS se debe limitar el error, insertar variables y conocer a profundidad el lugar en él se generan las nuevas rutas. Esto puede ocasionar resultados, en ocasiones confusos ya que en lugar de optimizar se podrían estar creando nuevas rutas por lugares con acceso restringido o lugares innecesarios. Un ejemplo de la generación de rutas es:

Figura 5: Generación de rutas para una flota de vehículos.



Fuente: ESRI, 2020.

D. Contaminación del aire

La contaminación del aire debe ser considerada como un riesgo para la salud de todo ecosistema; de controlarse la contaminación ambiental muchos países podrían controlar en un mayor nivel el índice de mortalidad proveniente de cáncer de pulmón y neupatias crónicas como el asma. Según la organización mundial de la salud (OMS) la contaminación atmosférica provoca 3.7 millones de muertes prematuras cada año. El origen de las emisiones es fijas y móviles; las fijas provienen de chimeneas de centrales térmicas y del sector industrial, mientras que las móviles son aviones, ferrocarriles, buses y demás maquinaria que puede movilizarse (Digesa, 2005).

Existe mucha evidencia de que un aire contaminado de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), alrededor de 249 mil muertes prematuras fueron atribuibles a la contaminación del aire exterior y alrededor de 83 mil muertes a causa de la contaminación del aire de combustible sólidos en América. El aire puro consiste en un 78% de Nitrógeno, 21% de Oxígeno y el 1% de otros gases en pequeñas cantidades como el dióxido de carbono, argón, ozono, etc. Por lo tanto, se define por contaminación del aire como cualquier forma o modificación a este equilibrio de componentes, y que además este produce un efecto negativo en las personas, animales, vegetales, bienes materiales y demás partes de un ecosistema. Los contaminantes del aire se clasifican en primarios y secundarios; los primarios son los que permanecen en la atmósfera en su estado de cómo fueron emitidos y entre estos están monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre e hidrocarburos. Los contaminantes secundarios son los que se forman durante su ascenso o reaccionan con cambios químicos en la atmósfera como el ácido sulfúrico, ácido nítrico, ozono, smog fotoquímico y compuestos orgánicos volátiles(COV) (Zhao et al., 2018:p. 928-933).

Para esta investigación se consideran los motores de los vehículos que son los causantes de las emisiones principales al medio ambiente como: Monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y otros gases que son el resultado durante el proceso de combustión; pero se realizara una evaluación con los datos del dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y metano que se genera en gran medida en vehículos a diésel datos presentados en la Tabla 1. de Emisiones por tipo de vehículo de la población de una institución.

La clasificación más clásica en la contaminación del aire son fuentes fijas y móviles.

Las fuentes fijas se consideran las que permanecen fijas en su entorno y únicamente son el resultado de alguna actividad como procesos industriales, minería, calderas, centrales energéticas, canteras, etc. Las fuentes móviles son consideradas las que cambian de lugar y emiten contaminación durante su proceso de funcionamiento como el sector automotriz de todo tipo, aviones, motos, etc. Además la contaminación del aire aumenta en gran medida en sectores urbanizados, y se debe a la presencia de industrias a gran escala, aumento de vehículos, construcciones de todo tipo, incendios, control inestable de los desechos sólidos y muchos factores más (Zhao et al., 2018:p. 928-933).

Tabla 1: Emisiones por tipo de vehículo de la población de una institución.

Estrato	Tipo de transporte	CO	MP	SO ₂	VOC	NO _x
E1	pie/Bicicleta	-	-	-	-	-
E1	Moto	14.738	189	10	3.784	632
E1	Transporte Público Colectivo	18.757	3.356	2.005	3.629	36.821
E1	Vehículo particular	33.857	7	38	4.157	2.656
E2	pie/Bicicleta	-	-	-	-	-
E2	Moto	24.864	375	23	10.844	685
E2	Transporte Público Colectivo	21.003	3.757	2.244	4.063	41.208
E2	Vehículo particular	26.526	15	66	3.294	2.178
E3	Moto	51.148	606	64	15.192	2.399
E3	Transporte Público Colectivo	34.173	6.097	3.640	6.611	66.970
E3	Vehículo particular	59.652	65	205	6.661	7.076
E4	Moto	9.248	89	18	2.699	516
E4	Transporte Público Colectivo	12.271	2.168	1.292	2.374	23.870
E4	Vehículo particular	7.992	123	130	963	3.670
Total Emisiones [g/semana]		314.229	16.847	9.735	64.271	188.681
Total Emisiones [g/año]		10'055.287	541.050	311.525	2'056.684	6'037.786

Fuente: Valencia-Arroyave et al., 2015.

Elaborado por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2020.

E. Tipos de emisiones

1. Emisiones en caliente

Este tipo de emisión consiste en la contaminación al ambiente por medio de los gases de escape, una vez que el motor ha alcanzado su etapa de funcionamiento. Técnicamente esta etapa ocurre cuando el agua del sistema de refrigeración alcanza 70°C.

2. Emisiones en frío

Este tipo de emisión consiste en la contaminación al ambiente por medio de los gases de escape, una vez que el motor ha alcanzado su etapa de funcionamiento. Técnicamente esta etapa ocurre cuando el agua del sistema de refrigeración alcanza 70°C.

3. Emisiones evaporativas

Este tipo de contaminación se produce por una evaporación espontánea de los combustibles, principalmente ocurre con la gasolina y ocurre en las salidas de los tubos de escape, en los tanques de almacenamiento cuando están abiertos o recargando el combustible.

F. Factores de emisión de gases

Entre los medios móviles que más contaminan están los buses, pero obtener un valor promedio resultado un tanto difícil, el factor de emisión en estos medios de transporte y en general en todo vehículo depende mucho de las condiciones en las que esté trabajando y de acuerdo con el año de su fabricación, como ejemplo de variable es el año de fabricación ya que desde el año 2000 los buses obtuvieron mejoras para reducir la contaminación y emisión de gases de efecto invernadero. En la Tabla 2. se aprecia los factores de emisión para buses de acuerdo con la tecnología vehicular.

Tabla 2: Factores de emisión para buses[g/Km].

Tecnología vehicular	CO	MP	SO2	VOC	NOx
Buses Modelo ≤1980	12,24	1,51	0,83	2,36	20,02
1980 < Buses modelo ≤2000	12,24	1,51	0,83	2,36	20,02
2000 < Buses Modelo ≤2005	2,18	1,21	0,81	0,46	18,55
Buses Modelo ≥2005	2,18	1,21	0,81	0,43	5,74

Fuente: Valencia-Arroyave et al., 2015.

Elaborado por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2020.

Según (Davis et al., 2005:p. 157-165) el factor de emisión es una relación entre el porcentaje de contaminante emitido al ambiente por cada longitud unitaria recorrida, generalmente viene dado en [g/Km] los valores del factor de emisión han sido obtenidos de otra investigación donde se detallan 450 tecnologías vehiculares de distintos tipos de medios de transporte, según los tipos de combustibles, pesos, dispositivos para obtener la mezcla, forma de controlar las emisiones, edad de los vehículos.

Tabla 3: Factores de emisión de CO2 y SO2.

Combustible	PCI (MJ/Kg)	Contenido de C (%)	Contenido de S (ppm)	Factor de emisión (Kg/TJ)	
				CO2	SO2
Gasolina	45,02	86,5	300	70.450,4	13,33
Diésel	43,98	86,4	50	72.034	2,27
Gas natural vehicular	47,12	73	0,1	56.804,4	0,0042

Fuente: Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018.

Elaborado por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

En la Tabla 3. se muestran los factores de emisión de CO2 y de SO2 para vehículos según el tipo de combustible usado, estos valores se presentan en Kilogramos por Tera Joule.

G. Gases potenciales de efecto invernadero

Además de conocer los gases de efecto invernadero, el objetivo principal de esta investigación reducir los gases de efecto invernadero o gases que afectan de forma potencial al medio ambiente. Según (Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018:p. 50), los gases que son obtenidos de los tubos de escape más perjudiciales son el dióxido de carbono CO₂ y el óxido nitroso [NO]_x que, en mayor porcentaje, son obtenidos de fuentes móviles pequeñas como automóviles; mientras que en los medios de transporte grandes a diésel se destaca la contaminación por metano [CH₄] y estos valores se detallan en la Tabla 4.

Tabla. 4: Emisión de gases de efecto invernadero por categoría vehicular [ton], año 2016.

Categoría	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Autos	988.323	2.815	39
Taxis	157.505	34	4
Buses	128.647	5.878	4
Camiones	648.781	17.422	18
Metroplús	7.171	17	1
Tractocamiones	74.143	0	1
Volquetas	254.942	0	8
Motos 2T	2.470	54	0
Motos 4T	465.561	1.006	0
Auto servicio especial	125.000	27	5
Buses servicio especial	363.797	16.359	8
Total	3'216.341	43.611	88
CO ₂ -eq	4'332.907		

Fuente: Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018.

Elaborado por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

Los factores de emisión pueden ser obtenidos de dos formas, se puede proceder a los cálculos mediante la toma de datos directamente en los tubos de escape con equipos técnicos, en los cuales se pueda obtener datos reales de una región o sector; pero también, se pueden obtener del modelo IVE (International Vehicle Emissions) que presenta datos generales de diferentes factores de emisión para distintos tipos de transporte.

Calculos

A. Cálculos de distancia y gases contaminantes emitidos actualmente

La distancia optimizada en esta investigación para las rutas de transporte es de 18.000,91 Kilómetros anuales por cada unidad de transporte como se muestra en la Tabla 5. Este valor es únicamente la distancia que recorre en las vías durante el servicio de transporte; es decir, no se ha considerado las distancias recorridas para las distintas actividades como visitas a gasolineras, salidas a comer, retornos a las viviendas, entre otros

Tabla 5: Distancia total recorrida en un año por cada unidad de transporte de las rutas actuales.

Recorrido /7 semanas [Km]	2.423,2
Número semanas/año	52
Número veces /año	7,43
Distancia/bus/año [Km]	18.000,91

Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

La Tabla 6. contiene los datos de contaminación con la distribución actual de rutas, tanto para una unidad de transporte como de toda la flota vehicular. Además, contiene los valores de contaminación anuales con un valor total de 12.391,72 toneladas anuales con 184 buses en funcionamiento.

Tabla 6: Resultados de la contaminación de los diferentes gases de las rutas actuales.

CONTAMINANTE\BUSES	1 Unidad Vehicular	184 unidades
CO(ton/año)	11,75	2.161,59
MP(ton/año)	4,14	762,26
SO₂(ton/año)	2,69	495,30
VOC(ton/año)	2,34	430,91
NOx(ton/año)	46,42	8.541,65
TOTAL GASES (ton/año)	67,35	12.391,72

Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

B. Análisis de contaminación para la propuesta del GADR (Gobierno Autónomo Descentralizado de Riobamba).

La distancia recorrida para las rutas de transporte propuestas por el GADR será de 22.057,51 Kilómetros anuales por cada unidad de transporte como se muestra en la Tabla 7. Este valor es

únicamente la distancia que recorre en las vías durante el tiempo de servicio urbano; es decir, no se ha considerado las distancias recorridas para las distintas actividades como visitas a gasolineras, salidas a comer, retornos a las viviendas, entre otros.

Tabla 7: Distancia total recorrida en un año por cada unidad de transporte de las rutas propuestas del GADR.

Distancia/7 semanas [Km]	2.969,28
Número semanas/año	52,00
Factor semanas	7,43
Distancia/bus/año [Km]	22.057,51

Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

La Tabla 8 contiene los datos de contaminación con la propuesta presentada por el (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba, 2019), tanto para una unidad de transporte como de toda la flota vehicular. Además, contiene los valores de contaminación anuales con un valor total de 10.795,96 toneladas anuales con 218 buses en funcionamiento.

Tabla 8: Resultados de la contaminación de los diferentes gases de las rutas propuestas por el GAD, 2019.

CONTAMINANTE\BUSES	1 BUS	218 BUSES
CO(ton/año)	16,03	3.494,56
MP(ton/año)	5,98	1.304,46
SO₂(ton/año)	3,91	851,50
VOC(ton/año)	3,19	695,89
NO_x (ton/año)	61,19	13.339,03
GASES (ton/año)	90,30	19.685,43

Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

C. Análisis de la propuesta planteada en esta investigación

Los valores de kilometraje recorrido en cada línea de transporte para la propuesta de esta investigación, el número de vueltas promedio de cada bus en las diferentes líneas de transporte son tomadas de los estudios previos del (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba, 2019).

La distancia optimizada en esta investigación para las rutas de transporte es de 15.682,83 Kilómetros anuales por cada unidad de transporte como se muestra en la Tabla 9. Este valor es únicamente la distancia que recorre en las vías durante el servicio de transporte; es decir, no se ha

considerado las distancias recorridas para las distintas actividades como visitas a gasolineras, salidas a comer, retornos a las viviendas, entre otros.

Tabla 9: Distancia total recorrida en un año por cada unidad de transporte de las rutas propuestas en la presente investigación.

Distancia/7 semanas [Km]	2111,15
Número semanas/año	52
factor semanas	7,43
Distancia/bus/año [Km]	15682,83

Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

La Tabla 10. contiene los datos de contaminación con la propuesta presentada en esta investigación, tanto para una unidad de transporte como de toda la flota vehicular. Además, contiene los valores de contaminación anuales con un valor total de 10.795,96 toneladas anuales con 184 buses en funcionamiento.

Tabla 10: Resultados de la contaminación de los diferentes gases de las rutas propuestas en la presente investigación.

CONTAMINANTE\BUSES	1 BUS	184 BUSES
CO (ton/año)	10,23	1883,23
MP (ton/año)	3,61	664,10
SO2(ton/año)	2,35	431,52
VOC (ton/año)	2,04	375,42
NOx(ton/año)	40,44	7441,69
GASES (ton/año)	58,67	10795,96

Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

Resultados

A. Rutas actuales del sistema de transporte de Riobamba

El sistema de transporte urbano actual se muestra en el Fig.6. con un notable cruce de vías en el centro de la ciudad, esta situación es la que ha genera congestionamientos, smog, contaminación ambiental y especialmente una inconformidad por parte de la ciudadanía según las encuestas realizadas en esta investigación.

Figura 6: Rutas actuales del sistema de transporte de Riobamba



Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

B. Rutas propuestas por el GAD, 2019 para la ciudad de Riobamba

Mediante el plan de movilidad de Riobamba 2019, el sistema de transporte urbano propuesto se muestra en el Fig.7. con nuevas rutas llegando a lugares donde el sistema actual de autobuses no cubre.

Figura 7: Rutas propuestas por el GAD,2019 para la ciudad de Riobamba



Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

C. Rutas propuestas en la presente investigación para la ciudad de Riobamba

La Fig. 8. es el resultado final del sistema de transporte mediante el software ArcGIS 10.4, el sistema se forma con un total de 16 líneas de transporte, cubriendo un área similar a la propuesta del plan de movilidad 2019 pero con menores distancias recorridas.

Figura 8: Rutas propuestas en la presente investigación para la ciudad de Riobamba



Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

D. Análisis comparativo de la investigación

La Tabla 11. muestra las diferencias entre los distintos gases contaminantes de forma individual y total de las rutas actuales del transporte público con 12.391,72 toneladas/año, la propuesta en el plan de movilidad 2019 que generara 19.685,43 toneladas/año y los valores del presente trabajo con una contaminación de 10.795,96 toneladas/año.

Tabla 11: Comparaciones en (toneladas/año) entre las rutas de transporte.

Contaminante	Actualidad	Propuesta GAD	Propuesta TI
CO	2.161,59	3.494,56	1.883,23
MP	762,26	1.304,46	664,10
SO2	495,30	851,50	431,52
VOC	430,91	695,89	375,42
NOx	8.541,65	13.339,03	7.441,69
TOTALES	12.391,72	19.685,43	10.795,96

Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

La Tabla 12. muestra los valores de aumento y reducción de contaminación ambiental respecto a una contaminación actual del sistema de transporte urbano. Con la propuesta en el plan de movilidad de la ciudad de Riobamba se obtendrá un aumento del 59% y el presente trabajo manifiesta una reducción del 13% de contaminación ambiental.

Tabla 12: Porcentajes de variación de la contaminación posible en referencia a la contaminación actual de los buses de Riobamba

Porcentajes de variación en la contaminación de Riobamba	
Propuesta del GADR 2019	+59%
Propuesta de (Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.)	-13%

Elaborador por: Chimbo, D.; Paucar, V. 2021.

Analisis y discusion

La contaminación ambiental en la ciudad de Riobamba actualmente es de 12391,72 toneladas por año mediante la ecuación “Modelo Simplificado de Estimación de Emisiones o Botton Up”. Este valor presentaría un aumento considerable de emisiones de gases contaminantes en la propuesta del Plan de Movilidad de Riobamba 2019 con un valor de 19685,43 toneladas. Los valores de contaminación ambiental se han optimizado teóricamente a un valor de 10795,96 toneladas de contaminantes anuales considerando la flota actual y sin ningún tipo de inversión. La ecuación empleada para la estimación de la emisión de los diferentes gases fue determinada en base a los datos disponibles de la flota vehicular de buses de Riobamba como: la cantidad de buses y sus años de fabricación, el kilometraje que recorre cada una de las unidades de transporte diaria y anualmente. Los tipos de gases contaminantes estudiados en esta investigación son el Monóxido de Carbono, material particulado, dióxido de azufre, compuestos orgánicos volátiles y compuestos con Nitrógeno debido a la disponibilidad de los factores de emisión para el servicio de transporte de buses en general. Los factores de emisión considerados para esta investigación pertenecen a fuentes confiables y han sido fundamentales para la obtención de los valores de contaminación ambiental. No se han utilizado factores de emisión propios de la ciudad de Riobamba ya que en el Ecuador únicamente tres provincias cuentan con los equipos para realizar la revisión técnica vehicular y además afirman que es información confidencial por lo que no se logró disponer de factores de emisión de nuestro país en los centros de revisión vehicular de Quito y Cuenca.

Con la presente investigación se propone un porcentaje de reducción del 13% respecto a la contaminación actual; considerando además que el área de servicio por parte de los buses se optimizó semejante al (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba, 2019b) pero con menores distancias recorridas y evitando cruces innecesarios dentro de la ciudad. La distancia obtenida en cada una de las Líneas de transporte es menor en comparación con las

rutas vigentes y con las rutas propuestas para el GAD de Riobamba en el Plan de Movilidad 2019. Todas las distancias han sido calculadas mediante el software ArcGIS y su base de datos interna. De acuerdo con las encuestas realizadas en la presente investigación se concluye que los principales problemas que enfrenta el sistema de transporte de buses de Riobamba son: el cruce excesivo de las líneas por las calles del centro, el recorrido excesivo para movilizarse de un lugar a otro, el tiempo de espera en las paradas, lugares a los que no llega el servicio de transporte, recorridos que rodean toda la ciudad y demoran mucho en retornar a la base. Por estas razones las personas prefieren utilizar otros medios de transporte en lugar de un servicio de transporte público ineficiente. Los valores de las distancias optimizadas se detallan en el presente documento.

Conclusiones

Se ha logrado identificar principales problemas en el servicio de transporte público urbano, son tiempos excesivos en la movilización, distancias muy extensas, rutas con demasiadas vueltas, rutas en zigzag que afectan directamente a los usuarios para usar constantemente este medio de transporte.

La nueva implementación de la red de transporte urbano con el software ArcGIS 10.4.1 y su complemento Network Analyst, disminuye las distancias recorridas por cada unidad de transporte, pero alcanzando la misma área de servicio.

En cuanto a la cantidad de contaminación del transporte público urbano se analiza los gases: Monóxido de Carbono, material particulado, dióxido de azufre, compuestos orgánicos volátiles y compuestos con Nitrógeno con un valor de 12.391,72 toneladas emitidas anualmente según el Modelo Simplificado de Estimación de Emisiones.

Se ha desarrollado una propuesta para reducir los gases contaminantes en la ciudad de Riobamba, mediante la evaluación del sistema de ruteo vehicular actual, el sistema propuesto por el (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Riobamba 2019b) y el presente estudio.

Referencias

1. AGUILAR, Andrés David Endara, Propuesta De Rutas Óptimas Para La Recolección De Desechos Sólidos En La Zona Centro Norte De La Parroquia Sangolquí Mediante La Extensión Network Analyst Del Software Arcgis. Previa Obtención De Título De Ingeniero En Ciencias, 2017. pp. 203.

2. ALFA, Attahiru Sule & CHEN, Mingyuan, Temporal distribution of public transport demand during the peak period. *European Journal of Operational Research*, 1995. vol. 83, no. 1, pp. 137-153. ISSN 03772217. DOI 10.1016/0377-2217(93)E0311-K.
3. AMIRIPOUR, Mahd., CEDER, Avishai Avi & MOHAYMANY, Afshin Shariat, Designing large-scale bus network with seasonal variations of demand. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* [en línea], 2014. vol. 48, pp. 322-338. ISSN 0968090X. DOI 10.1016/j.trc.2014.08.017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2014.08.017>.
4. ÁNGEL, Miguel, PIEDRAHITA, Moran, ELIZABETH, Nancy & ALCOCER, Meras, Optimización de las rutas inter-facultades que recorren los estudiantes en el campus Gustavo Galindo de ESPOL. , 2019. no. September.
5. CASTILLO, Simón, MARDONES, Marcelo & VILA, Waldo, 2017. El Estado sobre ruedas. Transporte público, política y ciudad. La ETCE 1945-1981. S.l.: s.n.
6. CELI SANTIAGO FERNANDO, Análisis del comportamiento del transporte público a nivel mundial. [en línea], 2018. pp. 15. Disponible en: <https://bit.ly/37IjSBB>.
7. DAVIS, Nicole, LENTS, James, OSSES, Mauricio, NIKKILA, Nick & BARTH, Matthew, Development and application of an international vehicle emissions model. *Transportation Research Record*, 2005. no. 1939, pp. 157-165. ISSN 03611981. DOI 10.1177/0361198105193900118.
8. DIGESA, Inventario de emisiones de fuentes fijas cuenca atmosférica de la ciudad de Arequipa. [en línea], 2005. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/inventario-emisiones-fuentes-fijas-cuenca-atmosferica-ciudad-arequipa>.
9. ESRI, Extensión Network Analyst de ArcGIS. [en línea], 2020. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.4/extensions/network-analyst/exercise-7-servicing-a-set-of-orders-with-a-fleet-of-vehicles.htm>.
10. FERNÁNDEZ DÍEZ DE LOS RÍOS, Javier, Transporte de larga distancia: organización del transporte y la distribución (COML0209). Madrid, ES: Editorial CEP, SL, 2015.
11. GARAYCHOA, Octavio & TICONA, Eduardo, Original Breve RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO Y SITUACIÓN DE LA TUBERCULOSIS IN LIMA , PERU. , 2015. vol. 32, no. 1, pp. 93-97.
12. GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DEL CANTÓN RIOBAMBA, Plan de Movilidad del Cantón Riobamba Informe Fase II. , 2019.

13. METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ, Área; Eugenio Prieto Soto, Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá-Año 2016. [en línea], 2018. pp. 50. ISSN 00221767. Disponible en: http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/isdocConvenio243/Informe_Inventario_emisiones_2015.pdf.
14. MOVILIDAD DE TRÁNSITO Y TRANSPORTE, 2015. GAD Municipal de Riobamba. 2015. Riobamba: s.n.
15. RESTREPO C., JORGE HERNÁN, SÁNCHEZ C, John Jairo, Aplicación de la teoría de grafos y el algoritmo de Dijkstra para determinar las distancias y las rutas más cortas en una ciudad. [en línea], 2004. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84911640021.pdf>.
16. RODRÍGUEZ, Chaglla & ELIZABETH, Liliana, Diseño e implementación de un aplicación SIG para administración del sistema hídrico en la Unidad del Plan de Ordenamiento Territorial Rural de la Municipalidad de Cuenca, utilizando ArcGIS Desktop y ArcGIS Server Enterprise. , 2010.
17. SALAS, Alvaro H. Salas, Acerca del Algoritmo de Dijkstra. , 2008. pp. 1-9.
18. SERNA-URAN, Cornado Augusto, GARCÍA-CASTRILLÓN, Jorge Alberto & FLÓREZ-LONDOÑO, Ossman, Análisis de Rutas de Transporte de Pasajeros Mediante la Herramienta Network Analyst de Arcgis. Caso Aplicado en la Ciudad de Medellín. Ingenierías USBMed, 2016. vol. 7, no. 2, pp. 89-95. ISSN 2027-5846. DOI 10.21500/20275846.2631.
19. VALENCIA-ARROYAVE, Daniela, MUÑOZ-DUQUE, Michelle Andrea, RAMÍREZ MUÑOZ, Alejandra, ALEJANDRO, Luis, JARAMILLO, Builes & HOYOS-RESTREPO, Carlos Arturo, A commuting emissions estimation model as a tool for the institutional environmental management Modelo para a estimativa de emissões veiculares como ferramenta para a administração ambiental institucional. , 2015. vol. 10, no. 1, pp. 1-22.
20. VERDUGO, Xavier Romero, Análisis y Optimización de Rutas de Lectura de Medidores para la Empresa Eléctrica Regional Centrosur. , 2014.
21. ZHAO, Zhenxing, XU, Qianming, DAI, Yuxing, LUO, An & CHEN, Yandong, Efficiency optimization design of LLC resonant converter for battery charging. Proceedings of the 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2018, 2018. pp. 928-933. DOI 10.1109/ICIEA.2018.8397845.