



**ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**  
**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO**  
**DE INGENIERO GEOGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**PLANIFICACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO BASADO EN**  
**ALGORITMO A\* PARA EL HIPERCENTRO DE QUITO**

**AUTOR: SALGADO ORTÍZ, MARÍA FERNANDA**

**COLABORADOR: TIERRA CRIOLLO, ALFONSO TIERRA**

**SANGOLQUÍ**

**2018**

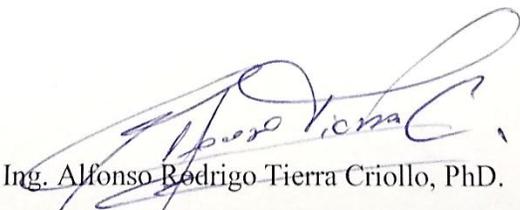


**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**CERTIFICADO**

Certifico que el trabajo de titulación, **“PLANIFICACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO BASADO EN ALGORITMO A\* PARA EL HIPERCENTRO DE QUITO”** realizado por la señorita MARIA FERNANDA SALGADO ORTIZ, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software antiplagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar la señorita MARÍA FERNANDA SALGADO ORTIZ para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 27 de febrero del 208



Ing. Alfonso Rodrigo Tierra Criollo, PhD.

**DIRECTOR**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, MARIA FERNANDA SALGADO ORTIZ, con cédula de identidad No. 1721875241, declaro que este trabajo de titulación “PLANIFICACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO BASADO EN ALGORITMO A\* PARA EL HIPERCENTRO DE QUITO” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 27 de febrero del 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'María Fernanda Salgado Ortiz', is positioned above the printed name.

María Fernanda Salgado Ortíz



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, MARIA FERNANDA SALGADO ORTIZ, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “PLANIFICACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO BASADO EN ALGORITMO A\* PARA EL HIPERCENTRO DE QUITO” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 27 de febrero del 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'María Fernanda Salgado Ortiz', is positioned above the printed name.

María Fernanda Salgado Ortíz

## DEDICATORIA

*A dios por darme fortaleza y coraje frente a las diferentes adversidades que se presentaron a lo largo de toda mi carrera universitaria, proporsionandome salud, sabiduría, entendimiento y sobre todo por haber puesto en mi camino a las personas correctas que han sido mi soporte y compañía durante éste período de estudio.*

*A mi madre, por darme ejemplo de tenacidad, constancia y perseverancia, por el apoyo y exigencia, formando en mí una persona de bien y de buenos valores.*

*A mi padre por su consejo de salir adelante y ayudarme a superarme constantemente.*

*A mis hermanos por su cariño incondicional y estar en los momentos importantes en mi vida.*

*A mi hermosa sobrina, que con sus abrazos y ocurrencias siempre me sacan una sonrisa.*

*A novio, por estar pendiente en todo momento, ayudarme en cada una de mis dificultades, ser mi fortaleza, enseñarme que puedo ir más allá de lo que puedo realizar y descubrir lo mejor de mí en cada momento.*

*Y finalmente, a todo aquel que le sirva esta investigación.*

## AGRADECIMIENTO

*A lo largo de toda esta etapa, no ha sido sencillo culminar cada período estudio, a pesar de las largas noches de realización de trabajos y estudio, Dios ha estado presente en darme bendiciones y sobretodo permitirme pisar y colocarme en los lugares correctos que han llegado a formarme durante toda esta fase en mi vida.*

*La presencia de mis padres, que fueron pilares importante en el desarrollo de mi vida, por su motivación constante, y ayudarme en todo lo que pudieron durante el cumplimiento de este período de estudio.*

*A mis amigas y amigos que compartieron conmigo durante mi vida universitaria, pasando momentos inolvidables en mi vida.*

*A mi novio, por estar conmigo en los momentos difíciles, confiar en mí, motivarme a sobrellevar cada situación que se presentaba.*

*Debo agradecer por su aporte, participación activa a mi tutor de tesis el Dr. Alfonso Tierra destacando su disponibilidad, paciencia y su constante motivación para ser una buena profesional para cumplir los objetivos que me he planteado. Para cada uno de los profesores que aportaron con su conocimiento aplicado durante el desarrollo de este proyecto.*

## INDICE

CERTIFICADO .....	II
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	III
AUTORIZACIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
INDICE .....	VII
INDICE DE TABLAS .....	X
INDICE DE FIGURAS .....	XI
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
CAPITULO I.....	1
ASPECTOS GENERALES.....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA .....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	2
1.4. ÁREA DE INFLUENCIA .....	4
1.5. OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS .....	4
1.6. METAS.....	5
1.7. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	5
CAPITULO II .....	6
MARCO TEÓRICO .....	6
1.8. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
1.8.1. Teoría de grafos .....	6
1.8.2. Algoritmos para encontrar el camino más corto.....	11

1.8.3. Redes de transporte público.....	11
1.8.4. Algoritmo A*.....	14
1.9. VALIDACIÓN DE DATOS .....	16
1.9.1. Muestra de población Finita: .....	16
1.9.2. Tipos de Muestreo: .....	17
1.9.3. Estadística inferencial.....	17
CAPITULO III .....	18
MARCO METODOLÓGICO .....	18
3.1. CARACTERIZACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO.....	18
3.1.1. Digitalización de las rutas de transporte público.....	18
3.1.2. Extracción de las paradas de transporte público.....	19
3.1.3. Cálculo de distancia entre paradas de transporte público.....	21
3.1.4. Cálculo de Tiempo a cada parada según la ruta de transporte público.....	22
3.1.5. Validación de Datos.....	22
3.1.6. Validación de rutas .....	23
3.1.7. Validación de paradas de transporte público y tiempo entre las mismas. ....	24
3.1.8. Identificación de Rutas que circulan por cada parada. ....	31
3.2. GENERACIÓN DE ALGORITMO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMO A* .....	32
3.2.1. Matriz de Adyacencia.....	32
3.2.2. Matriz de Distancia.....	34
3.2.3. Algoritmo.....	36
3.3. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO .....	54
3.3.1. Distribución de Pantalla.....	55
3.3.2. Navegación .....	55
3.3.3. Ingreso de datos .....	57
3.3.4. Alarmas.....	57
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	59
4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	59

4.1.1. Validación de rutas de transporte público .....59

4.1.2. Validación del Algoritmo A\* .....60

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....67

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....69

5.1. CONCLUSIONES.....69

5.2. RECOMENDACIONES .....70

BIBLIOGRAFÍA:.....71

ANEXOS:.....75

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Atributos de Geodatabase para digitalización</i> .....	18
<b>Tabla 2.</b> <i>Lista de paradas.</i> .....	36
<b>Tabla 3.</b> <i>Lista de nodos de Ruta 431-1</i> .....	38
<b>Tabla 4.</b> <i>Ruta 431-371</i> .....	41
<b>Tabla 5.</b> <i>Código de rutas que pasan en 431-371.</i> .....	41
<b>Tabla 6.</b> <i>Nodos por los que pasa cada Ruta de TP.</i> .....	42
<b>Tabla 7.</b> <i>Horario de la ruta 221</i> .....	44
<b>Tabla 8.</b> <i>ID de distancia</i> .....	45
<b>Tabla 9.</b> <i>Nodos por los que pasa cada ruta de TP en la sección (168-121)</i> .....	48
<b>Tabla 10.</b> <i>Comparación de nodos generados por Minimización de Transferencias</i> .....	48
<b>Tabla 11.</b> <i>Matriz de correlación de distancias sección 348-84.</i> .....	51
<b>Tabla 12.</b> <i>Selección Nodos.</i> .....	51
<b>Tabla 13.</b> <i>Primera prueba de usuario.</i> .....	60
<b>Tabla 14.</b> <i>Segunda prueba de usuario</i> .....	61
<b>Tabla 15.</b> <i>Datos de la tercera prueba a usuario.</i> .....	62
<b>Tabla 16.</b> <i>Datos de la cuarta prueba de usuario</i> .....	64
<b>Tabla 17.</b> <i>Datos de la quinta prueba de usuario.</i> .....	65
<b>Tabla 18.</b> <i>Afectación de parámetros al aplicar función de ruta nueva.</i> .....	66
<b>Tabla 19.</b> <i>Minimización de transferencia en las 5 pruebas realizadas a usuarios</i> .....	67
<b>Tabla 20.</b> <i>Minimización de distancia a prueba de usuarios</i> .....	67

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la Zona de Estudio .....	4
<b>Figura 2.</b> Grado de un vértice.....	7
<b>Figura 3.</b> Composición de un Grafo.....	8
<b>Figura 4.</b> Grafo simple .....	8
<b>Figura 5.</b> Grafo ponderado .....	8
<b>Figura 6.</b> Grafo Orientado.....	9
<b>Figura 7.</b> Matriz de adyacencia .....	9
<b>Figura 8.</b> Matriz de incidencia .....	10
<b>Figura 9.</b> Circuito Euleriano.....	10
<b>Figura 10.</b> Matriz de Origen y destino .....	12
<b>Figura 11.</b> Niveles de servicios en carreteras.....	13
<b>Figura 12.</b> Planificación de transporte .....	14
<b>Figura 13.</b> Digitalización de rutas de transporte público .....	19
<b>Figura 14.</b> Flujograma para la extracción de las paradas de transporte público .....	20
<b>Figura 15.</b> Cálculo de la distancia entre paradas.....	21
<b>Figura 16.</b> Relación para el cálculo de tiempo en cada sección entre paradas.....	22
<b>Figura 17.</b> Evidencia Fotográfica de toma de datos en campo .....	23
<b>Figura 18.</b> Diseño de la hoja de registro de campo .....	24
<b>Figura 19.</b> Hoja de registro de paradas y tiempo entre secciones. ....	25
<b>Figura 20.</b> Comprobación Hipótesis Ruta 1 .....	26
<b>Figura 21.</b> Comprobación Hipótesis Ruta 2.....	27
<b>Figura 22.</b> Comprobación de Hipótesis de Ruta 3 .....	28
<b>Figura 23.</b> Comprobación Hipótesis Ruta 4.....	29
<b>Figura 24.</b> Comprobación de Hipótesis Ruta 5 .....	30
<b>Figura 25.</b> Comprobación de Hipótesis Ruta 6 .....	31
<b>Figura 26.</b> Flujograma para rutas en cada parada. ....	31
<b>Figura 27.</b> Lista de Adyacencia del Hipercentro de Quito.....	32
<b>Figura 28.</b> Flujograma para Generación de Matriz de Adyacencia. ....	33
<b>Figura 29.</b> Identificador de distancia entre paradas .....	34

<b>Figura 30.</b> Flujograma para la Matriz de Distancia.....	35
<b>Figura 31.</b> Flujograma Función A*.....	37
<b>Figura 32.</b> Distancia Euclidiana Ruta 431-1 .....	39
<b>Figura 33.</b> Flujograma de Ruta Nueva. ....	39
<b>Figura 34.</b> Flujograma Algoritmo de Búsqueda.....	40
<b>Figura 35.</b> Distancia y Tiempo de recorrido de la ruta 221. ....	43
<b>Figura 36.</b> Cálculo de tiempo de espera de embarque. ....	44
<b>Figura 37.</b> Gráfico de la ruta 431-371.....	46
<b>Figura 38.</b> Rutas de TP sección (168-121).....	47
<b>Figura 39.</b> Minimización de Transferencias sección 168-121 .....	49
<b>Figura 40.</b> Planificación de Rutas en la sección 348-84. ....	50
<b>Figura 41.</b> Minimización de distancia sección 348-84 a). Ruta calculada con algoritmo A* b). Ruta minimizada distancia. ....	52
<b>Figura 42.</b> Flujograma Minimización de Distancia.....	53
<b>Figura 43.</b> Esquema general de la metodología de desarrollo de la interfaz.....	54
<b>Figura 44.</b> Distribución de elementos en la pantalla. ....	55
<b>Figura 45.</b> Botones de navegación de mapa.....	56
<b>Figura 46.</b> Navegación de Botones. ....	56
<b>Figura 47.</b> Distribución de Ingreso de datos. ....	57
<b>Figura 48.</b> Mensaje de Advertencia en ingreso de datos.....	57
<b>Figura 49.</b> Ejemplo de mensajes de advertencia. ....	58
<b>Figura 50.</b> Valores estadísticos t de Student de las rutas muestreadas.....	59
<b>Figura 51.</b> Primera prueba de usuario. ....	61
<b>Figura 52.</b> Segunda prueba de usuario. ....	62
<b>Figura 53.</b> Tercera prueba de usuario.....	63
<b>Figura 54.</b> Datos de la cuarta prueba de usuario. ....	64
<b>Figura 55.</b> Datos de la quinta prueba de usuario.....	65

## RESUMEN

Un usuario de transporte público que puede ser foráneo a ciertas zonas de la ciudad de Quito, o un extranjero, busca la forma más rápida ya sea en distancia o tiempo, de movilizarse de un lugar a otro, por lo que en el presente proyecto, se realizó un programa mediante el software MATLAB a través de su herramienta GUIDE, y desarrollando una interfaz gráfica interactiva hacia el usuario, que facilite la información de las rutas de transporte público, horarios de embarque, tiempos de espera y tiempos estimados de viaje, de igual forma proporcionando información gráfica a través de mapas sobre la planificación de rutas de transporte público, calculadas mediante la utilización del algoritmo de búsqueda informada A\* e implementando la función heurística de distancia euclidiana. La aplicación de este algoritmo permitió calcular la ruta mínima en distancia, por lo que se establecieron otras funciones como la minimización de transferencias, que llegó a aumentar la distancia de ruta de viaje por parte del usuario, pero minimizar los posibles transbordos que puede generar este algoritmo, por otra parte, la minimización de distancias que generó un transbordo de caminata, minimizando una posible distancia, inadecuada a la preferencia del usuario al momento de planificar su viaje en transporte público.

### Palabras Claves:

- **MOVILIDAD**
- **RUTAS**
- **TRANSPORTE PÚBLICO**
- **ALGORITMO A\***
- **GRAFOS**

## ABSTRACT

A user of public transport that can be foreign to certain areas of the city of Quito, or a foreigner, seeks the fastest way, either in distance or time, to move from one place to another, so in the present project, a program was carried out using the MATLAB software through its GUIDE tool, and developing an interactive graphic interface to the user, which facilitates information on public transport routes, boarding times, waiting times and estimated travel times, same way providing graphic information through maps on the planning of public transport routes, calculated by using the search algorithm A \* and implementing the Euclidean distance heuristic function. The application of this algorithm allowed calculating the minimum distance route, so other functions were established such as the minimization of transfers, which increased the travel route distance on the part of the user, but minimizing the possible transfers that this can generate. algorithm, on the other hand, the minimization of distances that generated a walk overload, minimizing a possible distance, inappropriate to the user's preference when planning his trip on public transport.

### Key words:

- **MOBILITY**
- **RUTES**
- **PUBLIC TRANSPORT**
- **ALGORITHM A STAR**
- **GRAPH**

## CAPITULO I

### ASPECTOS GENERALES

#### 1.1. Antecedentes

En la teoría de grafos (rama que estudia un conjunto de vértices y aristas) una aplicación representativa, es el desarrollo de algoritmos para encontrar un camino corto entre dos vértices dentro del grafo, destacando el algoritmo Dijkstra creado en 1956. Actualmente, se han derivado algoritmos a partir del mismo (Reddy, 2015), como es el caso del que se aplicará para este proyecto, el algoritmo A\*.

Un primer trabajo corresponde a Bast con “*Car or Public Transport—Two Worlds*” en el 2009, que describe la forma algorítmica de calcular la forma más rápida de llegar de A hacia B, y que son aplicables a las líneas de transporte público, y el análisis de una posible aplicación de algoritmos como el A\*, aptos para caminos direccionados como las redes de transporte público.

Así mismo, un estudio de Osvaldo et al. (2009), en su trabajo “Teoría de Grafos y Sistemas de Información Geográfica aplicados al Transporte Público de Pasajeros en Resistencia (Argentina)”, realiza un análisis de la oferta de transporte público en la Provincia del Chaco (Argentina), integrando la teoría de grafos y los sistemas de información geográfica encontrando una relación entre la oferta y la demanda del transporte público.

Sin embargo, existe otro tipo de proyectos que de igual forma trabajan con algoritmos de planificación de trayectorias, como es caso de Canca, et al. (2016), dentro de su investigación “*A general rapid network design, line planning and fleet investment integrated model*”, el cual establece como se debería distribuir las líneas de transporte público para llegar a cierta demanda, e inclusive satisfacer al cliente con la minimización de tiempo y cobertura de viaje, los resultados determinan una estructuración matemática y la construcción de una red de transporte público de forma teórica.

## **1.2. Planteamiento de Problema**

Un usuario del sistema de transporte público busca la forma más rápida y económica para movilizarse de un lugar a otro. Toda la información referente a rutas de transporte público, paradas y frecuencias de salida, debe ser presentada al usuario de forma integrada y organizada para posibilitar su elección y planificación de viaje (Mnasser, et al. 2010). La información sobre viajes es uno de los factores que contribuyen a la calidad del transporte público, dado que existen múltiples formas para llegar al destino deseado, y así disminuir la sensación de que un viaje es difícil o inconveniente (Grotenhuis, et al. 2007).

En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) en ciertas paradas de transporte público, se proporciona una lista de rutas, dentro de los sistemas integrados se brindan información gráfica mediante coremas, que podrían ayudar al usuario a planificar su viaje. Sin embargo, el problema se presenta cuando los usuarios que pueden ser extranjeros, personas foráneas a ciertas zonas de la ciudad (Grotenhuis, et al. 2007), o personas que rompen con su rutina de transporte y carecen de vehículo propio, no conocen en su totalidad las trayectorias de los buses de transporte público, o también desconocen la localización del destino, el tiempo y la distancia que se invertirá en el viaje. En efecto, se genera una pérdida de tiempo y no permitir llegar al usuario al destino adecuado. El propósito de este proyecto es realizar un sistema de planificación de viaje, proporcionando información al usuario de las rutas de transporte público y transferencias posibles a realizar.

## **1.3. Justificación e importancia**

Según la Secretaría de Movilidad en su informe de Plan Metropolitano Ordenamiento Territorial (PMOT), el DMQ cuenta con una población de 2'239.191 habitantes, que generan un total de 4'600.000 de viajes, englobando el flujo motorizado y no motorizado; dentro de esta cifra, se ha registrado una cantidad de 2'800.000 de viajes en transporte público, que representan un 61,3% del total de movilizaciones en la ciudad, evidenciando mayor demanda hacia éste medio de transporte. Existe una zona de mayor flujo vehicular, ya que contiene la mayor cantidad de fuentes de trabajo como es la del Centro histórico de la Ciudad Quito, causando el 46,5% del total de viajes atraídos en transporte público en el DMQ.

En la ciudad de Quito se busca impulsar la utilización y calidad del transporte público, para que de esta forma se pueda reducir el tráfico vehicular y la disminución de la huella de carbono (Alcaldía Metropolitana de Quito, 2015). La información sobre viajes es un factor importante en calidad del transporte público, ayuda a los usuarios a tomar decisiones sobre la planificación de viaje (Grotenhuis, et al. 2007). Este proyecto tiene la finalidad de elaborar un sistema de búsqueda informada que permita proporcionar varias ventajas al usuario como son: conocer las rutas de transporte, tiempo aproximado de llegada, transferencias que debe realizar y el cálculo de rutas óptimas, para planificar su viaje mediante la utilización de transporte público, dentro del hipercentro de la Ciudad de Quito.

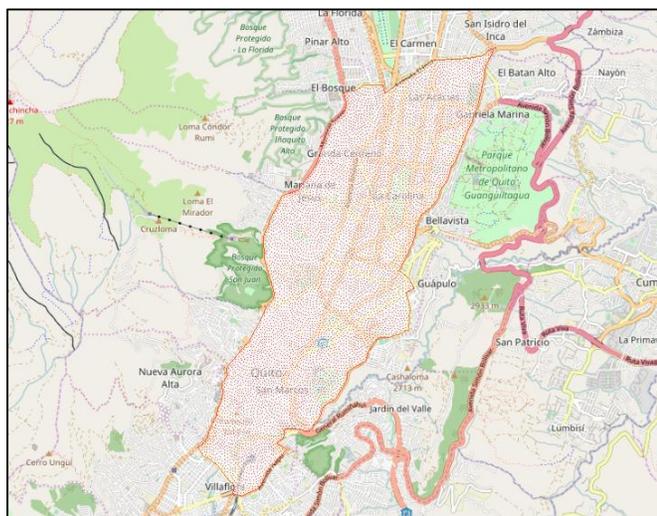
Es necesario recalcar que, este proyecto se encuentra alineado al objetivo 3 del Plan Nacional del Buen Vivir (PNBV), dentro de sus políticas y lineamientos el 3.12, subartículo “a. *Incentivar el uso del transporte público masivo, seguro, digno y sustentable, bajo un enfoque de derechos*”. (SENPLADES, 2013). Las redes de transporte público pueden ser modeladas como grafos, existen algoritmos diseñados que pueden solucionar este tipo de problemas, entre los más usados se encuentra el algoritmo Dijkstra, que calcula la trayectoria más corta entre un nodo de inicio a un nodo final (Reddy, 2015). Sin embargo, resulta muy iterativo, ya que recorre todas las posibles trayectorias hasta encontrar la solución óptima.

Se han realizado diversas modificaciones a Dijkstra, resultando al algoritmo A\*, el cual implementa un criterio de heurística que aumenta la velocidad de búsqueda y disminuye dichas iteraciones (Nosrati, et al. 2012). Esta técnica se aplicará para la planificación de viaje en transporte público. Mediante la utilización del algoritmo A\*, se pretende establecer un criterio de heurística y tomar en cuenta variables como: las rutas de transporte público, tiempo y distancia, que permita dar información al usuario de la planificación de su viaje de un punto a otro, obteniendo la ruta más óptima.

Sin embargo, el alcance de este proyecto es programarlo en computador, para comprobar el funcionamiento del algoritmo A\* sobre este tipo de problema de movilización, dejando hacia un trabajo futuro, pueda ser implementado en una aplicación móvil o un geoportal para disponibilidad de los usuarios.

#### 1.4. Área de influencia

Para el presente proyecto se seleccionó parte del hipercentro de la ciudad de Quito, en la *Figura 1* se puede visualizar el área de interés para este trabajo, definido al Sur por la Av. Napo y Av. Rodrigo de Chávez, al este por la Av. Mariscal Sucre, norte por la Av. El Inca, y al oeste por la Av. Francisco de Orellana, 6 de Diciembre y Av. Velasco Ibarra.



**Figura 1.** Ubicación de la Zona de Estudio

#### 1.5. Objetivos generales y específicos

##### OBJETIVO GENERAL

- Planificar rutas de transporte público mediante la aplicación del algoritmo A\* para facilitar la movilización de los usuarios en el hipercentro de la ciudad de Quito

##### OBJETIVO ESPECÍFICOS:

- Caracterizar las rutas de transporte público urbano dentro de la zona de estudio para estimar distancias y tiempos a cada una de las paradas mediante la digitalización de información.
- Generar el algoritmo para la planificación de viaje mediante el algoritmo A\* calculando la ruta más óptima.

- Desarrollar la interfaz de usuario mediante la guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión (GEDIS), para que el usuario seleccione las condiciones de menor costo e introduzca las coordenadas de su posición inicial y destino.

#### **1.6. Metas**

- Una geodatabase con las rutas y paradas de transporte público del hipercentro de la ciudad de Quito
- El pseudocódigo que permita el cálculo de la ruta óptima para viajes en transporte público
- El programa aplicando el algoritmo A\* utilizando el software Matlab.
- La interfaz para usuario mediante el Toolbox GUIDE del software Matlab
- Realizar pruebas a 5 usuarios para la comprobación el funcionamiento del algoritmo.
- Un manual de Usuario para la utilización del sistema de búsqueda de rutas de transporte público.

#### **1.7. Pregunta de Investigación**

¿La aplicación del algoritmo A\* permite la planificación de rutas de transporte público?

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 1.8. Fundamentación Teórica

##### 1.8.1. Teoría de grafos

Es parte de las ciencias matemáticas, y se dedica al estudio exclusivo de los gráficos o grafos, que son estructuras matemáticas utilizadas para modelar relaciones entre parejas entre objetos, originada tras el problema de los puentes de Königsberg en 1736 por el trabajo de Leonard Euler donde dio resultados topológicos en geometría para el estudio de grafos (Molina, 2004).

##### 1.8.1.1. Definición de un Grafo

Un grafo es un conjunto de vértices y aristas definidas por (Hernández, 2003):

$$G = (V, A) \quad (1)$$

Dónde:

V: conjunto de Vértices o nodos.

A: conexiones que unen los vértices llamadas aristas.

##### 1.8.1.2. Grado de un Vértice

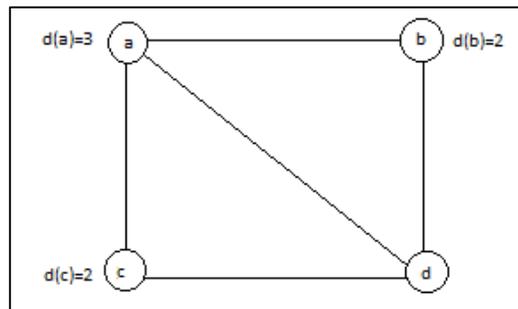
Como se puede ver en la Figura 2, el grado de un vértice dentro de un grafo está definido por el número de aristas que pertenecen al mismo, en la ecuación 2, se puede visualizar la representación del grado de un vértice (Zambrano & Semprún, s.f)

$$n_g = k(V) \quad (2)$$

Dónde:

$n_g$ : Grado de un vértice.

$k$ : número de aristas.



**Figura 2.** Grado de un vértice

### 1.8.1.3. Orden de un Grafo

En la ecuación 3, se visualiza la representación matemática del orden de un grafo, donde el número de nodos que contiene totalmente el grafo ( $G$ ) se define como:

$$ord(G) = |N(G)| \quad (3)$$

Dónde:

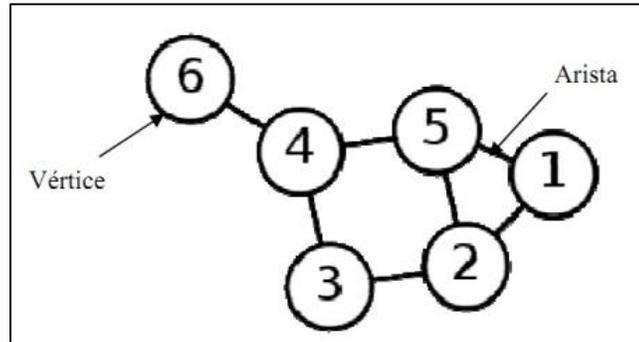
$ord$ : orden de un grafo.

$N(G)$ : número total de nodos dentro del grafo .

### 1.8.1.4. Composición de un grafo

La composición de un grafo como se puede visualizar en la *Figura 3* posee los siguientes elementos (Erdős, Rényi, & Sós, 1996):

- **Aristas.-** Son las líneas que conectan los vértices.
- **Vértices.-** Son puntos que poseen una numeración y están dispersos en el espacio.
- **Camino.-** Es el conjunto de vértices interconectado por las aristas.

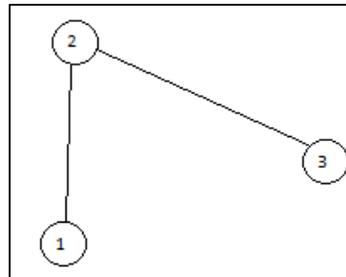


**Figura 3.** Composición de un Grafo

#### 1.8.1.5. Tipos de Grafos

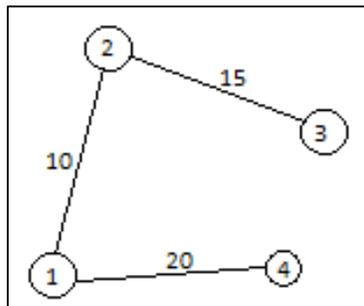
Los grafos al poseer la estructura descrita con anterioridad, se clasifican de la siguiente forma (Biggs, Lloyd, & Wilson, 1976):

- **Grafo simple.-** En la Figura 4, se puede visualizar la estructura de un grafo es simple, donde solamente es la conexión de los vértices con sus respectivas aristas.



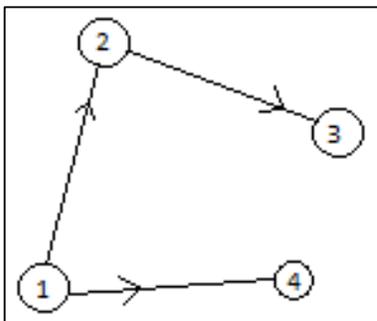
**Figura 4.** Grafo simple

- **Grafo ponderado.-** En la Figura 5 se puede visualizar un grafo ponderado, sus aristas poseen un valor característico, como por ejemplo la distancia.



**Figura 5.** Grafo ponderado

- **Grafo orientado.-** Sus conexiones poseen una dirección fija y sus caminos pueden ser recorrido en dos sentidos, como se puede visualizar en la Figura 6.



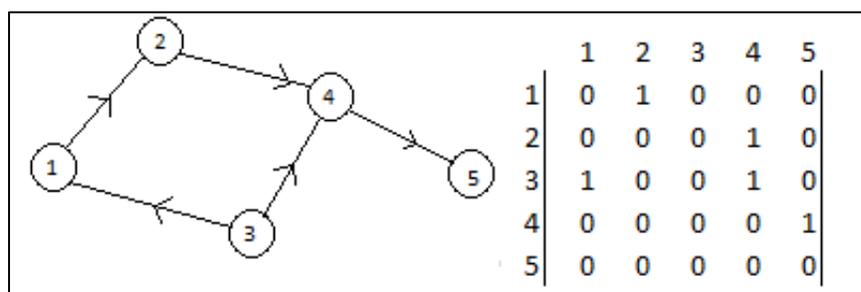
**Figura 6.** Grafo Orientado

#### 1.8.1.6. Representación matricial de un grafo.

Los grafos finitos pueden ser representados de forma matricial, donde se pueden interpretar las conexiones de los nodos, y su relación con los vértices, generalmente representado en matrices booleanas (Johnsonbaugh, 2005).

- **Matriz de adyacencia**

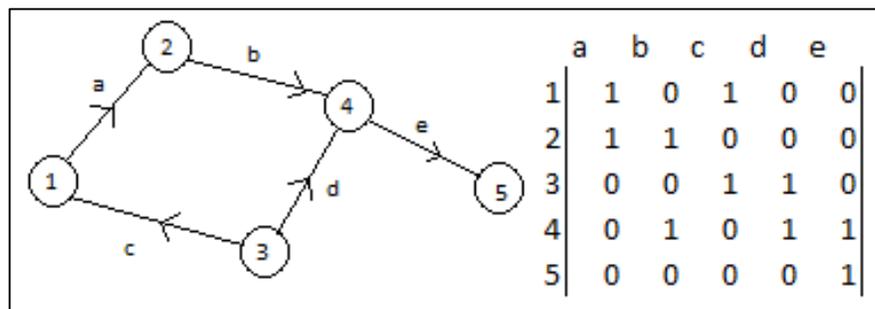
Es una matriz cuadrada donde las columnas y filas son los distintos nodos que contienen el grafo a representar, si una arista une dos nodos se colocará el valor de 1, caso contrario se colocará el valor de 0 (indicando nula conexión) (Zambrano & Semprún, s.f). En la *Figura 7*, se visualiza un ejemplo de representación de un grafo dirigido en una matriz de adyacencia, generalmente antes de esta representación se realizan listas de adyacencia siendo una lista de vectores (Caicedo, Wagner, & Méndez, 2010).



**Figura 7.** Matriz de adyacencia

- **Matriz de incidencia**

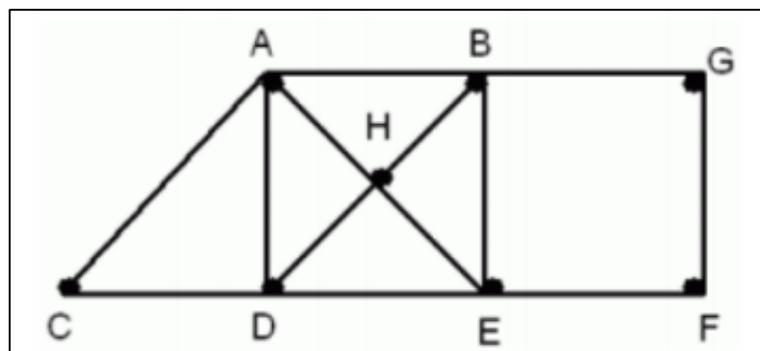
Las columnas de esta matriz representan las aristas de un grafo, y las filas los distintos nodos que se encuentran dentro del grafo. Se colocará el valor de 1 por cada nodo unido, caso contrario el valor de 0, dicha matriz no es necesariamente cuadrada (Zambrano & Semprún, s.f). En la *Figura 8* se visualiza la matriz de incidencia utilizando el mismo grafo del ejemplo anteriormente mencionado.



*Figura 8.* Matriz de incidencia

### 1.8.1.7. Circuito Euleriano

Representa un circuito cerrado dentro de un grafo que recorre todos los nodos, pero las aristas solo son visitadas una vez. Por ejemplo en la *Figura 9*, el circuito es de la siguiente forma ACDEFGBEHDAHBA, los nodos D, E, B y H son visitados 2 veces pero las aristas o conexiones son solamente recorridos una sola vez (Zambrano & Semprún, s.f).



*Figura 9.* Circuito Euleriano

### 1.8.1.8. Circuito Hamiltoniano

Representa la trayectoria dentro de un grafo donde los nodos no pueden ser visitados más que solamente una vez, en la Figura 9, se puede decir que el recorrido ACDEFGBH, los nodos son visitados solo una vez (López & Ardila Urueña, 2008).

### 1.8.2. Algoritmos para encontrar el camino más corto

Existen varios algoritmos que calculan el camino más corto y estos se resuelven a través de la teoría de grafos, entre ellos se encuentra los siguientes (Meyer & Sanders, 2003) :

- **Algoritmos Dijkstra:** resuelve el problema del camino más corto de un grafo, donde cada vértice tiene su peso según la impedancia utilizada.
- **Algoritmo A\*:** Evolución del Algoritmo Dijkstra implementando el criterio de heurística, mayor explicación se encuentra en el apartado 1.8.4.
- **Bellman Ford:** resuelve el problema de un grafo dirigido, y ponderado. En comparación con el algoritmo Dijkstra este incluye pesos en las aristas que pueden ser negativos.
- **Floyd Warshall:** resuelve todos los pares de nodos en caminos más cortos.
- **Johnson's algorithm:** resuelve todos los pares de trayectorias más cortas, y puede ser más rápido que Floyd-Warshall en grafos que son dispersos.

### 1.8.3. Redes de transporte público

Tanto las redes de carreteras como las redes de transporte público pueden ser modeladas de forma muy natural como gráficos dirigidos. Para una red de carreteras, cada nodo corresponde a una unión, donde dos o más segmentos de carretera se encuentran, y los arcos de la gráfica corresponden a segmentos de carretera, por lo que las redes de transporte público pueden ser modeladas de manera similar (Bast, Car or Public Transport—Two Worlds, 2009).

### 1.8.3.1. Matrices de origen y destino

Las matrices origen destino son muy empleadas en el transporte, debido a que de manera matricial es posible conocer los flujos entre los diferentes puntos analizados, es decir, la matriz representa los flujos de transporte existentes entre diferentes puntos de la red de transporte. En la Figura 10, se puede visualizar que las filas y columnas de la matriz ordenan los puntos considerados de la red de transporte, siendo representados en las filas los posibles orígenes y en las columnas, los posibles destinos. En las celdas de cada par origen-destino, se indica el número de vehículos que circulan entre dicho origen y dicho destino. De esta manera, es posible conocer a partir de una representación esquemática todos los flujos existentes entre los nodos de la red (Newell, 1980).

Origen\ Destino	1	2	j	Viajes Generados
1	$V_{11}$	$V_{12}$	$V_{1j}$	$V.G._1$
2	$V_{21}$	$V_{22}$	$V_{2j}$	$V.G._2$
i	$V_{i1}$	$V_{i2}$	$V_{ij}$	$V.G._i$
Viajes Atraídos	$V.A._1$	$V.A._2$	$V.A._j$	Total de viajes

*Figura 10.* Matriz de Origen y destino

*Fuente:* (Newell, 1980)

Dónde:

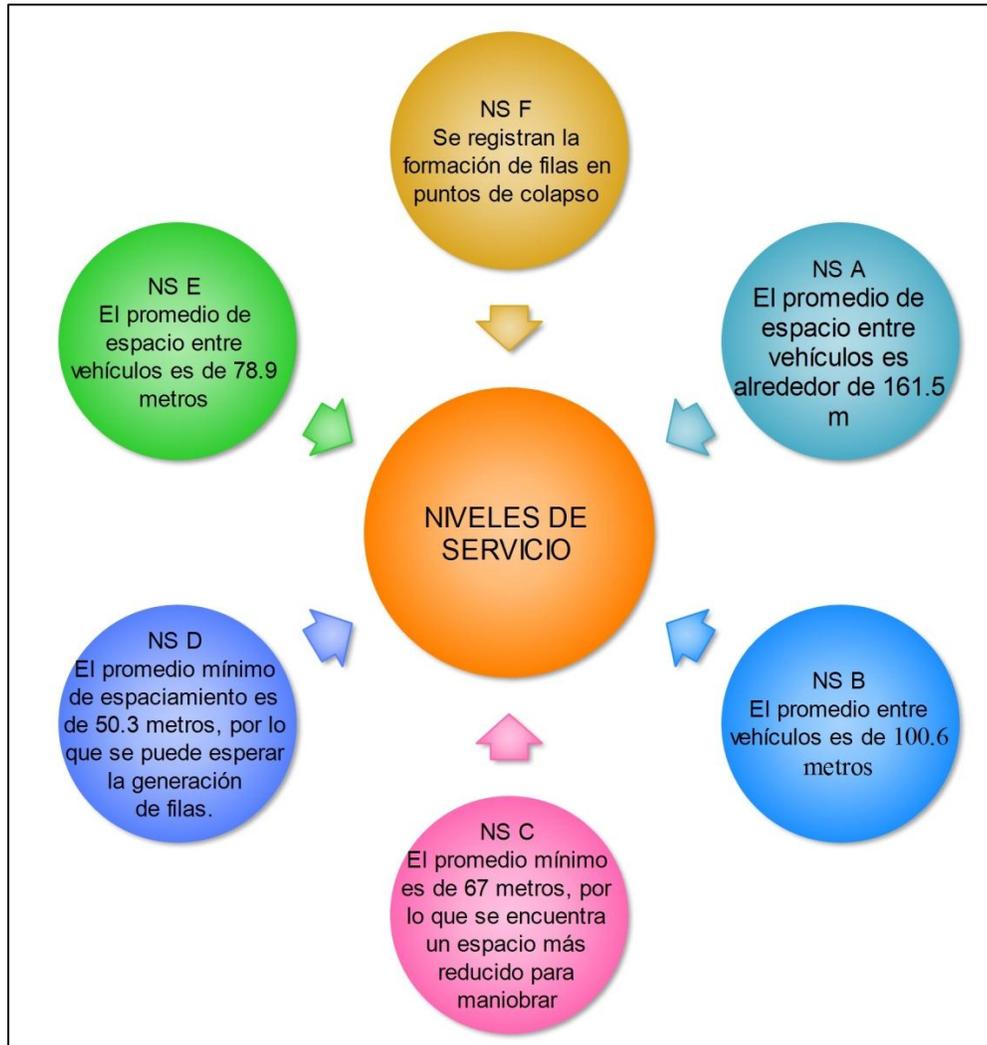
$V_{ij}$  : viajes desde el origen i con destino j.

$V.G._1$ : cantidad de viajes generados desde el sitio 1.

$V.A._1$  : cantidad de viajes atraídos hacia el sitio 1.

### 1.8.3.2. Niveles de servicio de corredores viales

El nivel de servicio es una forma de medir la fluidez que existe dentro de un corredor vial, y el parámetro utilizado es el de densidad (vehículos por hora). Para carreteras existen por lo menos 6 niveles de servicios explicados en la Figura 11.



**Figura 11.** Niveles de servicios en carreteras

**Fuente:** (Tapia & Veizaga, 2006)

### 1.8.3.3. Planificación de transporte

La planificación de transporte es una fase fundamental para el proceso de organización y desarrollo del mismo, permitiendo conocer problemáticas importantes como optimizar y organizar los recursos de transporte para atender la demanda de movilidad dentro de la ciudad. En la Figura 12 se muestra los diferentes aspectos que se deben considerar a la hora de planificar las rutas de transporte.



**Figura 12.** Planificación de transporte  
**Fuente:** (Allen-Monge, 2011)

### 1.8.4. Algoritmo A\*

Es un algoritmo de búsqueda informada que utiliza un criterio de heurística, utilizado para solucionar problemas dentro de grafos permitiendo encontrar el camino de menor coste entre un nodo de inicio y un nodo de destino. Fue creado por Peter E. Hart, Nils J. Nilsson y Bertram Raphael en el año de 1968 (Yao, Lin, Xie, Wang, & Hung, 2010).

#### 1.8.4.1. Función del algoritmo A\*

El algoritmo A\* utiliza la función de evaluación en el nodo ( $n_{od}$ ), de acuerdo a la ecuación (4) (Duchon, Babinec, Kajan, Beño, Florek, & Fico, 2014) :

$$f(n_{od}) = g(n_{od}) + h(n_{od}) \quad (4)$$

Dónde:

$f(n_{od})$ : Valor final de coste

$g(n_{od})$ : coste (impedancia)

$h(n_{od})$ : función heurística

#### 1.8.4.2. Función heurística admisible

Una función de heurística admisible es utilizada para determinar el costo de alcanzar a un objetivo en un algoritmo de búsqueda informada. El algoritmo de búsqueda usa ésta heurística para encontrar una estimación del camino óptimo hasta el objetivo desde el nodo actual (Szczerba, Galkowski, Glicktein, & Ternullo, 2000).

Hay varias funciones heurísticas utilizadas según el problema que se pretenda solucionar, mediante la utilización teoría de grafos entre ellas se encuentran los siguientes ejemplos:

- **Distancia de Manhathan**

Es el número de bits en que se diferencian dos palabras del código. Si dos palabras están separadas una distancia  $d$ , se requerirán  $d$  errores simples para convertir una en la otra. Utilizada, para resolver los puzles (Bregón & A, 2005).

- **Distancia de Hamming**

Se denomina distancia de Hamming a la efectividad de los códigos de bloque y depende de la diferencia entre una palabra de código válida y otra, utilizada para problemas de puzles (Prieto, Ramos, & Delgado, 2007).

- **Distancia de Euclideana**

Es la distancia entre dos puntos , con respecto a sus coordenadas (x, y) dentro de un plano de referencia, utilizada en los problemas de viajeros, cumpliendo la ecuación 5 (Pardo & Del Campo, 2007).

$$d_E(P_1, P_2) = \sqrt{(Px_2 - Px_1)^2 + (Py_2 - Py_1)^2} \quad (5)$$

## 1.9. Validación de datos

### 1.9.1. Muestra de población Finita:

El conjunto al que pertenece debe ser finito, es decir un número limitado de elementos, donde se conoce el valor de N, que es el valor total de casos esperados (Hernández, 2003).

$$n = \frac{N \cdot Z_\alpha \cdot p \cdot q}{d^2 \cdot (N - 1) + Z_\alpha \cdot p \cdot q} \quad (6)$$

Dónde:

$N$ : Total de la población

$Z_\alpha$ : 1.96 al cuadrado (95%)

$p$ : Proporción esperada (5% = 0.05)

$q$ : 1-p (1-0.05=0.95)

$d$ : Precisión (5%)

Los valores de: niveles de confianza, proporción esperada, y precisión fueron tomados según el criterio de cálculo de una muestra (Gallego, 2004).

### **1.9.2. Tipos de Muestreo:**

Existen varios criterios de clasificación para los distintos tipos de muestreo, pueden dividirse en dos grandes grupos: métodos de muestreo probabilísticos y métodos de muestreo no probabilísticos y estos pueden ser los siguientes (Mendenhall, 2010).

- Muestreo por conglomerados
- Muestreo probabilístico
- Muestreo Sistemático

### **1.9.3. Estadística inferencial**

En la estadística, en general está el campo de la estadística inferencial, que es el camino que hay que recorrer para llegar de una pregunta a la respuesta adecuada (Pardo & Del Campo, 2007).

- **t de student**

Es una distribución de probabilidad que surge del problema de estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño. Aparece de manera natural al realizar la prueba t de Student para la determinación de las diferencias entre dos medias muestrales y para la construcción del intervalo de confianza para la diferencia entre las medias de dos poblaciones (Johnsonbaugh, 2005).

## CAPITULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Caracterización de rutas de transporte público urbano

##### 3.1.1. Digitalización de las rutas de transporte público.

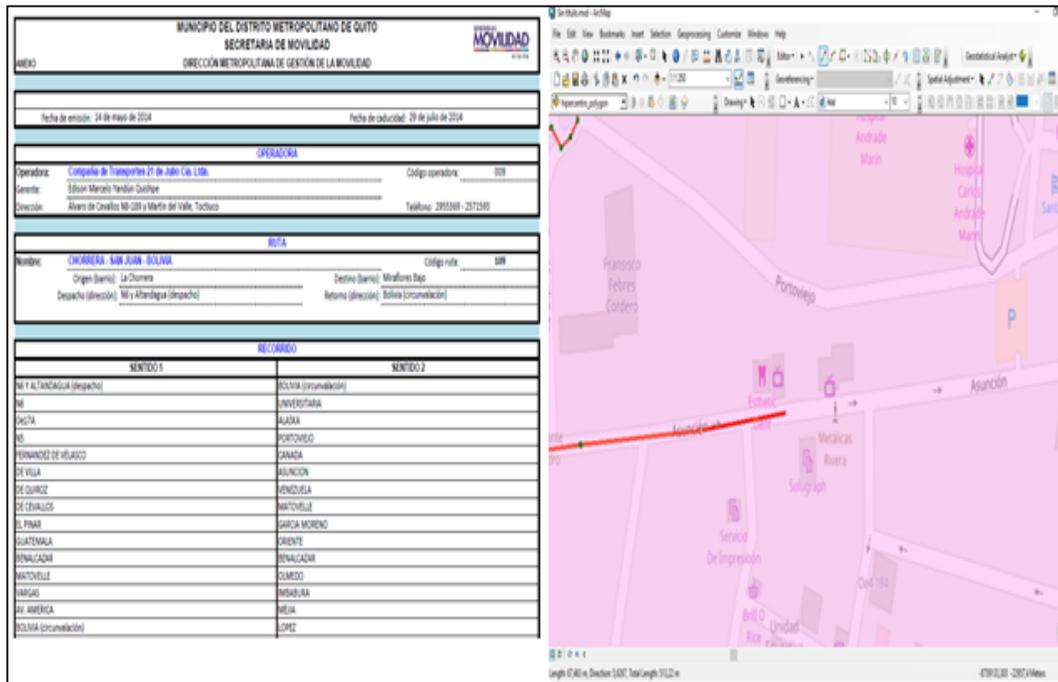
Se generó una geodatabase en ArcCatalog, considerando las categorías que se visualiza en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Atributos de Geodatabase para digitalización*

Nombre de Atributo	Tipo de Dato	Descripción
RUTA	Text	Indica el lugar de partida y llegada.
OPERADORA	Text	nombre de la cooperativa participe en la ruta
SENTIDO	Long Integer	1 o 2, dependiendo que sentido sea la digitalización
COD_RUTA	Long Integer	Las hojas de datos registran el código de la ruta.
DIST_VUELTA	Double	Distancia total de la vuelta registrada en las hojas de datos
TIEMPO_VUELTA	Double	Tiempo que se deben demorar por vuelta

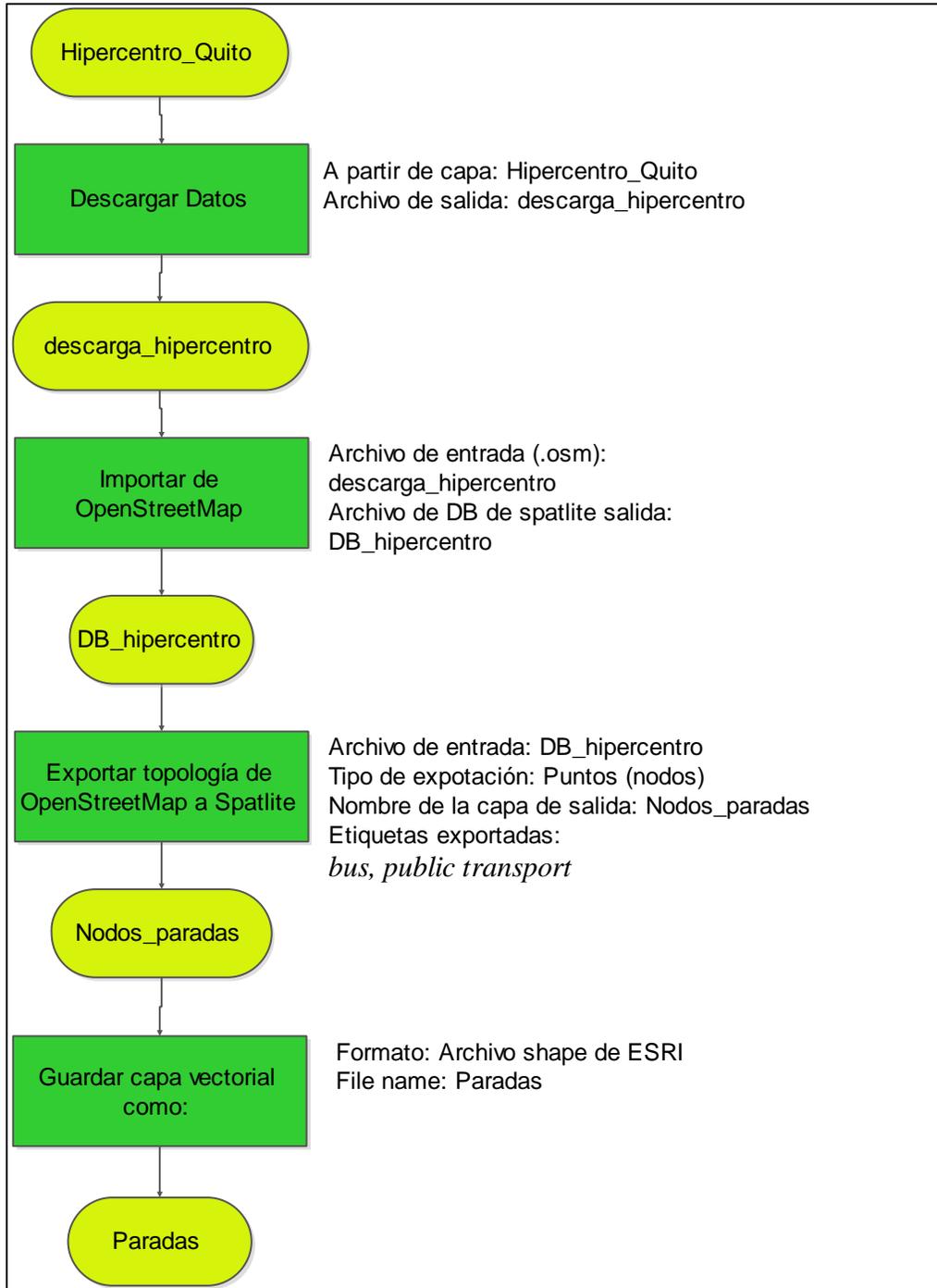
Se procedió a la digitalización de las rutas de transporte público en el software ArcGIS, mediante la hoja de recorrido (descargada en la página Secretaría de Movilidad de Quito) y con base la capa de Openstreetmap, mediante la cual se identificaron las calles del trayecto (Figura 13).



**Figura 13.** Digitalización de rutas de transporte público

### 3.1.2. Extracción de las paradas de transporte público

Para la extracción de las paradas que se encuentran dentro de la zona de estudio, se utilizó el software QGIS; primero cargando como capa inicial OpenStreetMap, se filtró la información de la base de datos correspondiente a los atributos de tipo punto, especificando, las del tipo *bus*, *public transport* (Figura 14).



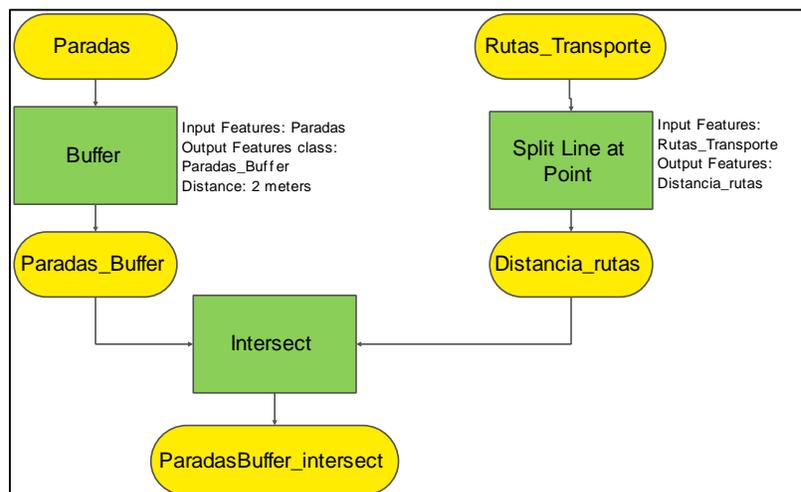
**Figura 14.** Flujograma para la extracción de las paradas de transporte público

### 3.1.3. Cálculo de distancia entre paradas de transporte público

Para el cálculo de la distancia se utilizó la ecuación (5), mediante el cálculo de la distancia euclidiana en cada sección de nodos que se iban digitalizando, posteriormente se obtiene la distancia total entre paradas.

Mediante la herramienta de ArcGIS *Split line to point*, se realizó la división de las rutas de transporte público utilizando como vértices o puntos de quiebre las paradas, al generar esta intersección se generará un identificador para cada sección de distancia (*Distancia\_rutas*). A las paradas de transporte público se generó un *Buffer* con una distancia de 2 metros, donde cada parada tiene su identificación (*Paradas\_Buffer*).

Se realizó una intersección entre la capa de Rutas de Transporte Publico y el Buffer recién generado, con ello, se obtendrá el identificador de la distancia de cada sección y de igual forma se podrá obtener información de las paradas que contienen cada tramo (Figura 15)



**Figura 15.** Cálculo de la distancia entre paradas

### 3.1.4. Cálculo de Tiempo a cada parada según la ruta de transporte público.

Durante la creación de las categorías para la geodatabase y en la digitalización se ingresaron los respectivos datos de los tiempos y distancias totales de vuelta de cada ruta, que deben cumplir las operadoras de transporte público vigentes en la Secretaría de Movilidad. En la *Figura 16*, se visualiza la relación aplicada para el cálculo parcial por sección entre paradas.

Distancia total de vuelta (m)	Tiempo total de vuelta (min)
25000	150
Distancia a cada parada (Ej)	Tiempo a cada parada
125.5	x

*Figura 16.* Relación para el cálculo de tiempo en cada sección entre paradas

Esto permitirá obtener el tiempo estimado en cada sección entre paradas, y en teoría es el tiempo ideal que debería cumplir las operadoras de transporte público.

### 3.1.5. Validación de Datos

Al terminar la digitalización de cada una de las rutas de transporte público se registraron un total de 113 dentro del hipercentro de Quito. Por lo que se calculó el tamaño de la muestra a validar, mediante la fórmula de muestra de población finita. La cual dio un resultado de 6 rutas de transporte público a validar. En la *Figura 17*, se muestra la evidencia fotográfica de las tomas en campo.



**Figura 17.** Evidencia Fotográfica de toma de datos en campo

### 3.1.6. Validación de rutas

Para la validación de rutas explicaremos el ejemplo con la ruta “COCHAPAMBA SUR – COCHAPAMBA NORTE – DON BOSCO”, de la operadora “Transporte Carcelén Tarqui C.A”, mediante una hoja de campo, que se puede visualizar su diseño en la Figura 18, en donde se registraron mediante una *Check List* las calles digitalizadas de cada ruta a validar.

Fecha:			
Operadora		Transportes Carcelén Targui C.A.	
Ruta		COCHAPAMBA SUR - COCHAPAMBA NORTE - DON BOSCO	
<b>Sentido 1</b>	Verificación	<b>Sentido 2</b>	Verificación
AV. CARVAJAL		DON BOSCO (circunvalación)	
AV. DE LA PRENSA		VALPARAISO	
AV. AMÉRICA		SODIRO	
AV. NACIONES UNIDAS		AV. GRAN COLOMBIA	
AV. SHYRIS		AV. 12 DE OCTUBRE	
AV. DIEGO DE ALMAGRO		AV. CORUÑA	
AV. ORELLANA		AV. ORELLANA	
AV. CORUÑA		AV. DIEGO DE ALMAGRO	
AV. 12 DE OCTUBRE		AV. REPÚBLICA	
AV. GRAN COLOMBIA		AV. ELOY ALFARO	
SODIRO		AV. SHYRIS	
RIOS		AV. NACIONES UNIDAS	
DON BOSCO (circunvalación)		AV. REPÚBLICA DE EL SALVADOR (retorno)	
		AV. NACIONES UNIDAS	
		IÑAQUITO	
		ARIZAGA	
		AV. 10 DE AGOSTO	
		AV. DE LA PRENSA	
		AV. CARVAJAL	

**Figura 18.** Diseño de la hoja de registro de campo

### 3.1.7. Validación de paradas de transporte público y tiempo entre las mismas.

Para las paradas de transporte público, se realizó otro diseño de hoja para el registro de campo como se visualiza en la Figura 19, donde en la casilla de #Paradas se registró las paradas contabilizadas en esa calle, adicionalmente se anotó en la sección de Observaciones Tiempo, el número de parada y el tiempo tomado con cronómetro.

Para la validación de tiempos de viaje se realizó una prueba t de Student para cada una de las rutas que se tomaron de muestra, partiendo de la hipótesis de que los tiempos tomados en campo son similares a los tiempos estimados.

Fecha:					
Operadora:		Transportes Carcelén Targui C.A.			
Ruta:					
COCHAPAMBA SUR - COCHAPAMBA NORTE - DON BOSCO					
Sentido 1	#Paradas	Observaciones Tiempo	Sentido 2	#Paradas	Observaciones Tiempo
AV. CARVAJAL			DON BOSCO (circunvalación)		
AV. DE LA PRENSA			VALPARAISO		
AV. AMÉRICA			SODIRO		
AV. NACIONES UNIDAS			AV. GRAN COLOMBIA		
AV. SHYRIS			AV. 12 DE OCTUBRE		
AV. DIEGO DE ALMAGRO			AV. CORUÑA		
AV. ORELLANA			AV. ORELLANA		
AV. CORUÑA			AV. DIEGO DE ALMAGRO		
AV. 12 DE OCTUBRE			AV. REPÚBLICA		
AV. GRAN COLOMBIA			AV. ELOY ALFARO		
SODIRO			AV. SHYRIS		
RIOS			AV. NACIONES UNIDAS		
DON BOSCO (circunvalación)			AV. REPÚBLICA DE EL SALVADOR (retorno)		
			AV. NACIONES UNIDAS		
			IÑAQUITO		
			ARIZAGA		
			AV. 10 DE AGOSTO		
			AV. DE LA PRENSA		
			AV. CARVAJAL		

**Figura 19.** Hoja de registro de paradas y tiempo entre secciones.

A continuación se presentan cada una de las rutas que se validó mediante la t de Student:

- **RUTA: PLANADA MARÍN**  
**COOPERATIVA: TRANSPORTE EJECUTIVO RAPITRANS S.A.**

**Fecha: 31-10-2017**

**Hora: 10:50 am**

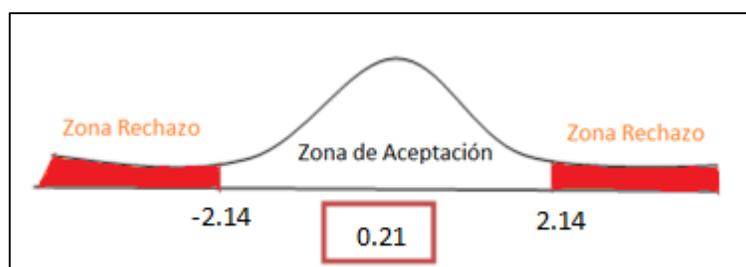
**Hipótesis:** Los tiempos de viaje estimados son iguales a los tiempos de viaje tomados en campo

Tiempos de Viaje

Ho:  $u_1 = u_2$

H1:  $u_1 \neq u_2$

	Variable 1	Variable 2
Media	259.25	233.09
Varianza	70804.21	48766.02
Observaciones	8.00	8.00
Grados de libertad	14.00	
Estadístico t	0.21	
P(T<=t) dos colas	0.83	
Valor crítico de t (dos colas)	2.14	



**Figura 20.** Comprobación Hipótesis Ruta 1

**Decisión:**

Ho se acepta, por lo que los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta “Planada Marín” son similares a los tiempos estimados.

- **RUTA: COCHAPAMBA SUR – COCHAPAMBA NORTE – DON BOSCO**  
**COOPERATIVA: Transportes Carcelén Tarqui C.A.**

**Fecha: 31-10-2017**

**Hora: 12:00 pm**

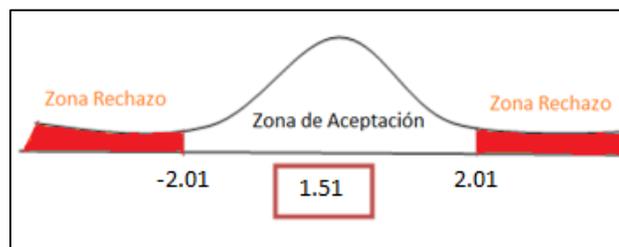
**Hipótesis:** Los tiempos de viaje estimados son iguales a los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta “Cochapamba Sur – Cochapamba Norte – Don Bosco”

Tiempos de Viaje

Ho:  $u_1 = u_2$

H1:  $u_1 \neq u_2$

	Variable 1	Variable 2
Media	113.30	85.86
Varianza	5074.85	2455.90
Observaciones	23.00	23.00
Varianza agrupada	3765.38	
Grados de libertad	44.00	
Estadístico t	1.51	
P(T<=t) una cola	0.06	
Valor crítico de t (una cola)	1.68	
P(T<=t) dos colas	0.13	
Valor crítico de t (dos colas)	2.01	



**Figura 21.** Comprobación Hipótesis Ruta 2

**Decisión:**

Ho se acepta, por lo que los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta: Cochapamba Sur – Cochapamba Norte – Don Bosco, son similares a los tiempos estimados.

• **RUTA: CAMAL – HIPODROMO**

**COOPERATIVA: Compañía Nacional de Transportes y Comercio S.A.**

**Fecha: 32-10-2017**

**Hora: 8:30 am**

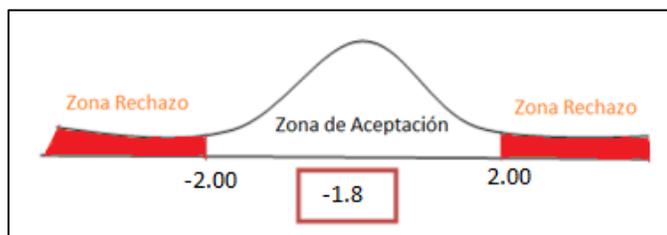
**Hipótesis:** Los tiempos de viaje estimados son iguales a los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta: “Camal - Hipódromo”.

Tiempos de Viaje

Ho:  $\mu_1 = \mu_2$

H1:  $\mu_1 \neq \mu_2$

	Variable 1	Variable 2
Media	69.22	91.35
Varianza	1847.25	2791.43
Observaciones	31.00	31.00
Varianza agrupada	2319.34	
Grados de libertad	60.00	
Estadístico t	-1.80	
P(T<=t) una cola	0.03	
Valor crítico de t (una cola)	1.67	
P(T<=t) dos colas	0.07	
Valor crítico de t (dos colas)	2.00	



**Figura 22.** Comprobación de Hipótesis de Ruta 3

**Decisión:**

Ho se acepta, por lo que los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta: Camal Hipódromo, son similares a los tiempos estimados.

- **RUTA: 18 DE OCTUBRE - CAMAL METROPOLITANO - SAN ROQUE**  
**COOPERATIVA: Compañía de Transportes Ecuatoriana Transheroica S.A.**

**Fecha: 32-10-2017**

**Hora: 12:00 am**

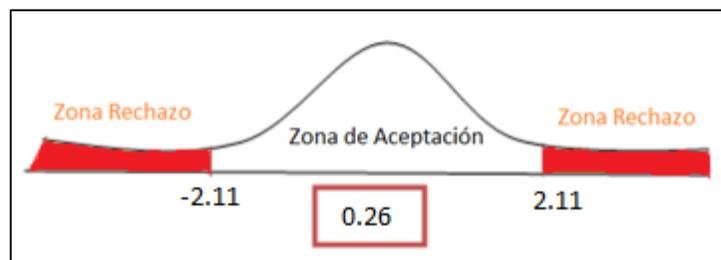
**Hipótesis:** Los tiempos de viaje estimados son iguales a los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta: “18 de Octubre – Camal Metropolitano – San Roque”.

Tiempos de Viaje

Ho:  $u_1 = u_2$

H1:  $u_1 \neq u_2$

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	93.96	88.00
Varianza	3084.46	1649.50
Observaciones	9.00	9.00
Varianza agrupada	2366.98	
Grados de libertad	16.00	
Estadístico t	0.26	
P(T<=t) una cola	0.39	
Valor crítico de t (una cola)	1.74	
P(T<=t) dos colas	0.79	
Valor crítico de t (dos colas)	2.11	



**Figura 23.** Comprobación Hipótesis Ruta 4.

**Decisión:**

$H_0$  se acepta, por lo que los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta: 18 de Octubre – Camal Metropolitano – San Roque, son similares a los tiempos estimados.

- **RUTA: CAMAL - ANDALUCIA**

**COOPERATIVA: Compañía de Transportes en Colectivos Quito C.A. Colectrans.**

**Fecha: 32-10-2017**

**Hora: 5:00 pm**

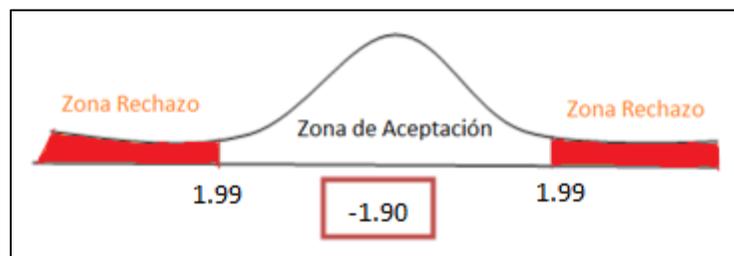
**Hipótesis:** Los tiempos de viaje estimados son iguales a los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta: “Camal – Andalucía”.

Tiempos de Viaje

$H_0: \mu_1 = \mu_2$

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$

	Variable 1	Variable 2
Media	72.94	96.07
Varianza	1610.22	4269.76
Observaciones	40.00	40.00
Varianza agrupada	2939.99	
Grados de libertad	78.00	
Estadístico t	-1.90	
P(T<=t) una cola	0.03	
Valor crítico de t (una cola)	1.66	
P(T<=t) dos colas	0.06	
Valor crítico de t (dos colas)	1.99	



*Figura 24.* Comprobación de Hipótesis Ruta 5

**Decisión:**

Ho se acepta, por lo que los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta: Camal - Andalucía, son similares a los tiempos estimados.

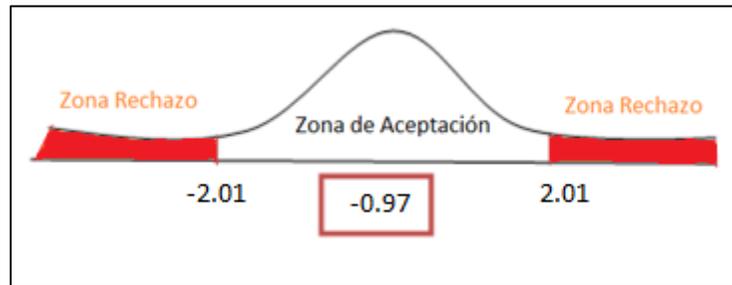
- **RUTA: PUEBLO BLANCO - CIUDADELA ALEGRIA - PARLAMENTO**  
**COOPERATIVA: Transportes Guadalajara S.A.**

**Fecha: 33-10-2017**

**Hora: 11:25 am**

**Hipótesis:** Los tiempos de viaje estimados son iguales a los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta: “Pueblo Blanco – Ciudadela Alegría - Parlamento”.

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	73.52	86.59
Varianza	1812.86	2174.63
Observaciones	22.00	22.00
Varianza agrupada	1993.75	
Grados de libertad	42.00	
Estadístico t	-0.97	
P(T<=t) una cola	0.16	
Valor crítico de t (una cola)	1.6	
P(T<=t) dos colas	0.33	
Valor crítico de t (dos colas)	2.01	



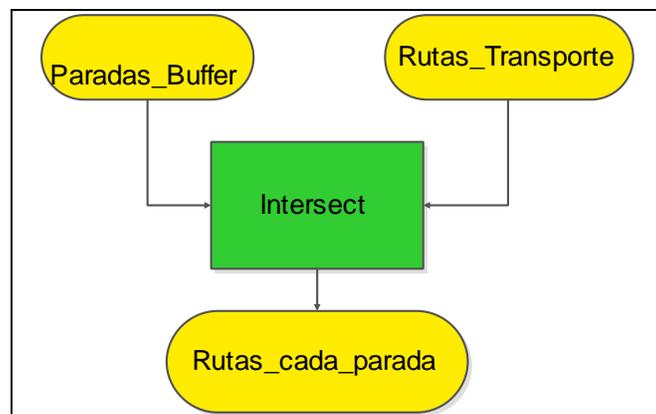
**Figura 25.** Comprobación de Hipótesis Ruta 6

**Decisión:**

Ho se acepta, por lo que los tiempos de viaje tomados en campo de la ruta: Pueblo Blanco – Ciudadela Alegría - Parlamento, son similares a los tiempos estimados.

**3.1.8. Identificación de Rutas que circulan por cada parada.**

La información de la ruta que circula en cada parada (nodo), es importante para realizar posteriormente el algoritmo. Mediante la herramienta de procesamiento en el software ArcGIS, se realizó un *intersect* (intersección) entre la capa de RUTAS\_TRANSPORTE\_PUBLICICO y el BUFFER\_PARADAS\_2m. En la *Figura 26*, se visualiza el flujograma del procedimiento para la determinación de que rutas pasan por cada parada.



**Figura 26.** Flujograma para rutas en cada parada.

## 3.2. Generación de Algoritmo mediante la aplicación de Algoritmo A\*

### 3.2.1. Matriz de Adyacencia

#### 3.2.1.1. Lista de Adyacencia

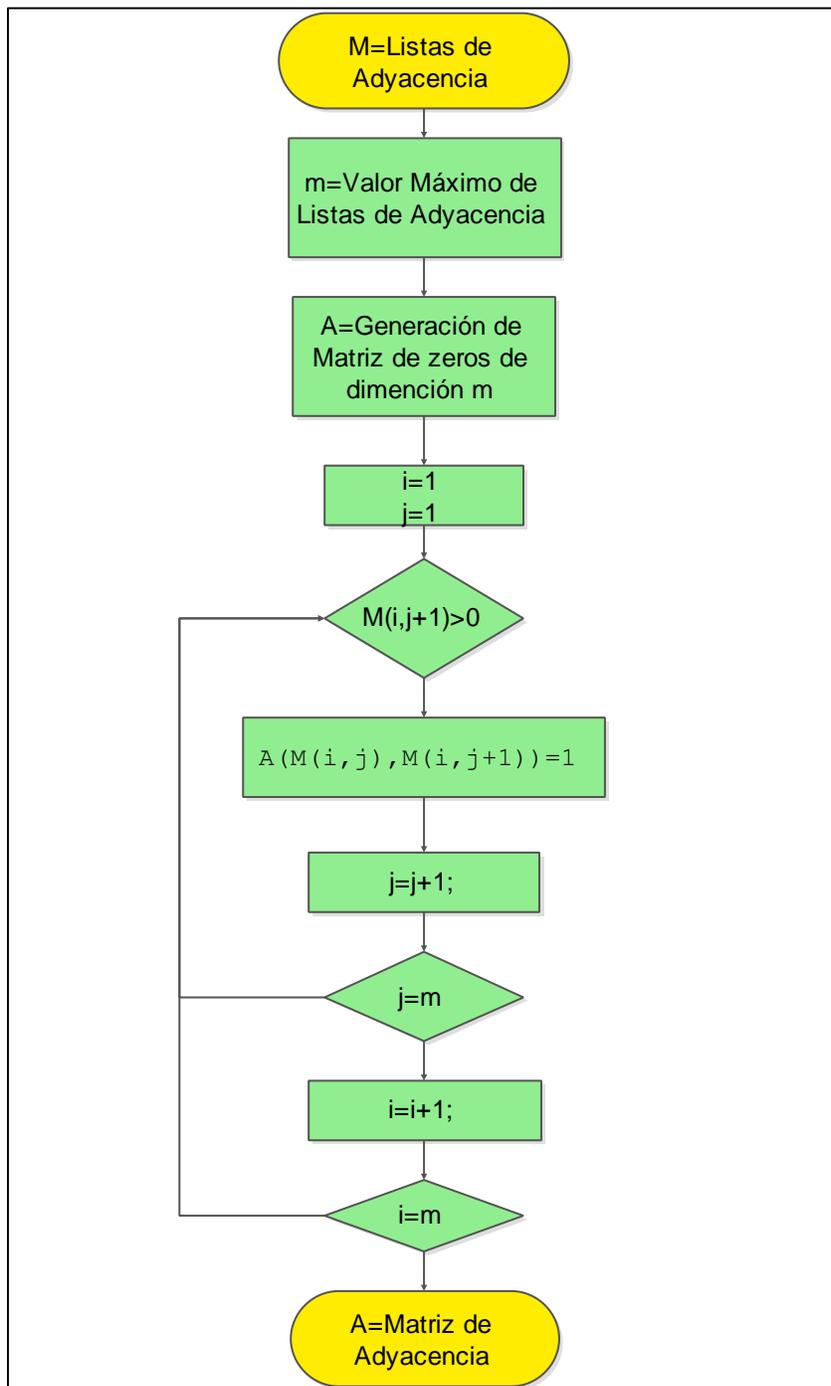
Cada ruta de transporte público contiene un conjunto de paradas por las que circula, y apiladas conjuntamente generan las listas de adyacencia, de esta forma se representa el grafo sobre el Hipercentro de Quito (*Figura 27*).

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	
1	1	131	34	132	36	37	38																									
2	2	32	134	33	34	133	13	35	135	12																						
3	3	12	5	39	40	41	42	43	44	45																						
4	4	46	47	48	49	50	13	35	135	12																						
5	5	13	34	33	51	52	53	54																								
6	6	46	47	48	49	50	13																									
7	7	57	56	18	17	14	19	55	388	24	27	25	28																			
8	8	9	10	29	61	26	23	22	60	59	15	16	58																			
9	9	1	193	199	73	72	71	70	21	69	68	67	66	350	20	65	64	63	62	343	3	30	6	31								
10	10	339	340	342	344	347	348	349	351	352	353	354	359	360	361	362	197	1														
11	11	439	437	450	444	443	328	338	322	319	316	318																				
12	12	317	274	442	440	441	449	438	435	436	369																					
13	13	9	10	29	61	26	23	22	60	59	15	16	434	379	390	389	393	395	421	419	416	414	412	206	208	211	212	214				
14	14	215	213	210	209	204	202	1	411	413	415	417	418	420	394	392	422	423	424	425	18	17	14	19	55	388	24	27	25	28	38	
15	15	317	274	442	440	441	449	438	435	436	369	445	446	139	203	208	211	212	214													
16	16	242	114	125	126	127	128	129	130	49	50	13	35	135	12	248	439	437	356	355	380	57	56	430								
17	17	431	428	426	379	373	371	370	368	253	249	246	447	139	203	13	34	132	36	124	122	121	119	120	11	501						
18	18	242	114	125	126	127	128	129	130	49	50	13	35	135	12	248	439	437	356	355	380	57	56	18	17	14	19	55	388	24	45	
19	19	459	22	60	59	15	16	434	379	373	371	370	368	253	249	246	447	139	203	13	34	132	36	124	122	121	119					
20	20	242																														
21	21	123	122	121	119	120	11	501																								
22	22	154	149	152	148	170	171	172	174	220	216	215	213	210	209	204	202	200	201	141	366	363	364	365	372	358	374	376	377	397	40	
23	23	399	400	398	396	378	375	373	371	370	368	253	249	246	447	139	203	208	211	212	214	217	219	222	147	151	150	153				
24	24	105	106	107	108	109	110	111	112	113	125	126	127	128	129	130	49	50	13	35	137	136	138	39	40	43	44	45				
25	25	45	44	43	40	39	138	136	137	34	132	36	124	118	114	113	112	111	110	109	108	107	106	105								
26	26	339																														
27	27	320	319	316	318																											

*Figura 27.* Lista de Adyacencia del Hipercentro de Quito.

#### 3.2.1.2. Construcción de Matriz de Adyacencia

Se generó una matriz, donde en las columnas y las filas eran representación de los nodos (paradas), mediante la listas de adyacencia, se determinaron las conexiones pertinentes a cada nodo, colocando el valor de 1 si existía dicha conexión o caso contrario el valor de 0, para el cual se generó un script en Matlab para automatizar el procedimiento (*Figura 28*). Finalmente se obtuvo una matriz cuadrada de 583 x 583 ya que el número total de paradas dentro de la zona de estudio fue de 583.

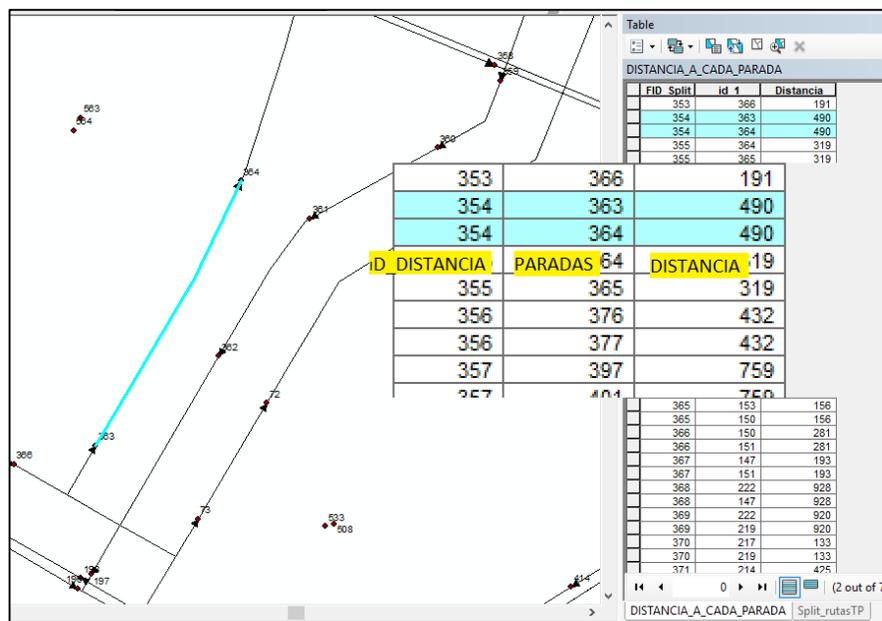


**Figura 28.** Flujograma para Generación de Matriz de Adyacencia.

### 3.2.2. Matriz de Distancia

#### 3.2.2.1. Listas de distancia

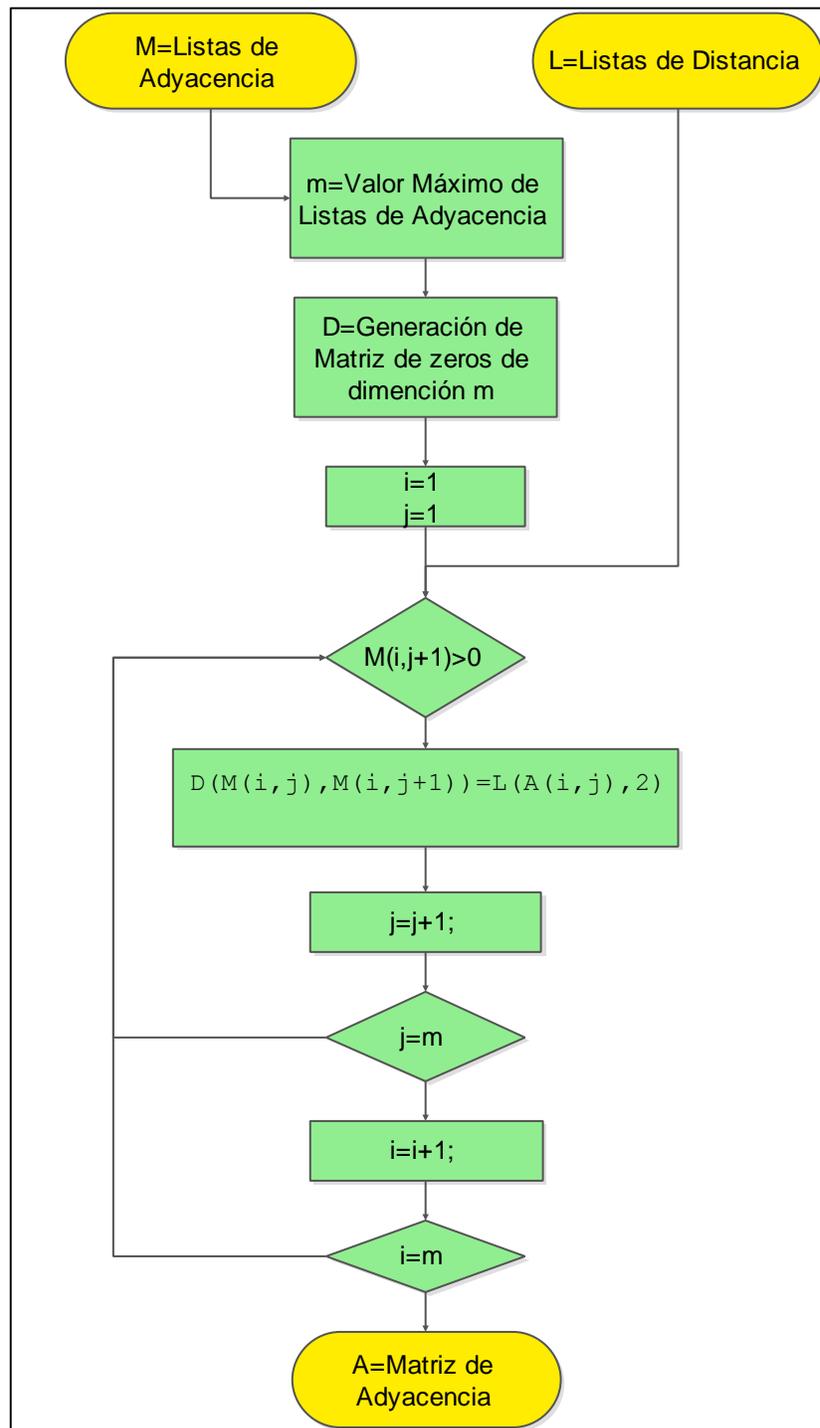
Las listas de distancia se generan a partir de la operación del shapefile descritas en el apartado 3.1.3. de la cual se obtiene de la tabla de atributos de la misma, el Id de la sección de ruta (ID\_DISTANCIA) las parada que se encuentra en esta sección (PARADAS), y la distancia entre las paradas (DISTANCIA) que se pueden visualizar en la Figura 29.



**Figura 29.** Identificador de distancia entre paradas

#### 3.2.2.2. Construcción de Matriz de Distancia

De igual forma, que la generación de la matriz de adyacencia se generó una matriz cuadrada de 583 x 583, pero los valores de 1 fueron reemplazados por la distancia que existe entre los nodos de conexión, obtenidos de la listas de distancia en la columna 3 ( Figura 29). Finalmente se generó un script en Matlab para automatizar el procedimiento (Figura 30).



**Figura 30.** Flujograma para la Matriz de Distancia.

### 3.2.3. Algoritmo

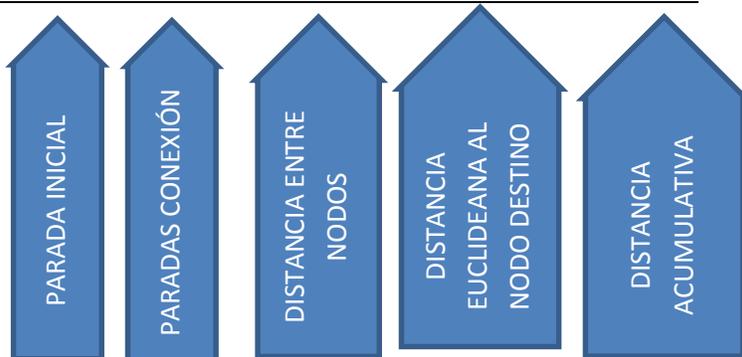
#### 3.2.3.1. Función Algoritmo A\*

Esta función genera una matriz o tabla de nombre Lp (Lista de paradas); donde se visualiza la información de la parada inicial a paradas que tenga conexión, adquiridas de la matriz de adyacencia, al igual que la distancia entre estos nodos buscándola en la matriz de distancia, la distancia euclidiana (función heurística), y la distancia acumulativa que en este caso es la suma de las dos anteriores (Tabla 2).

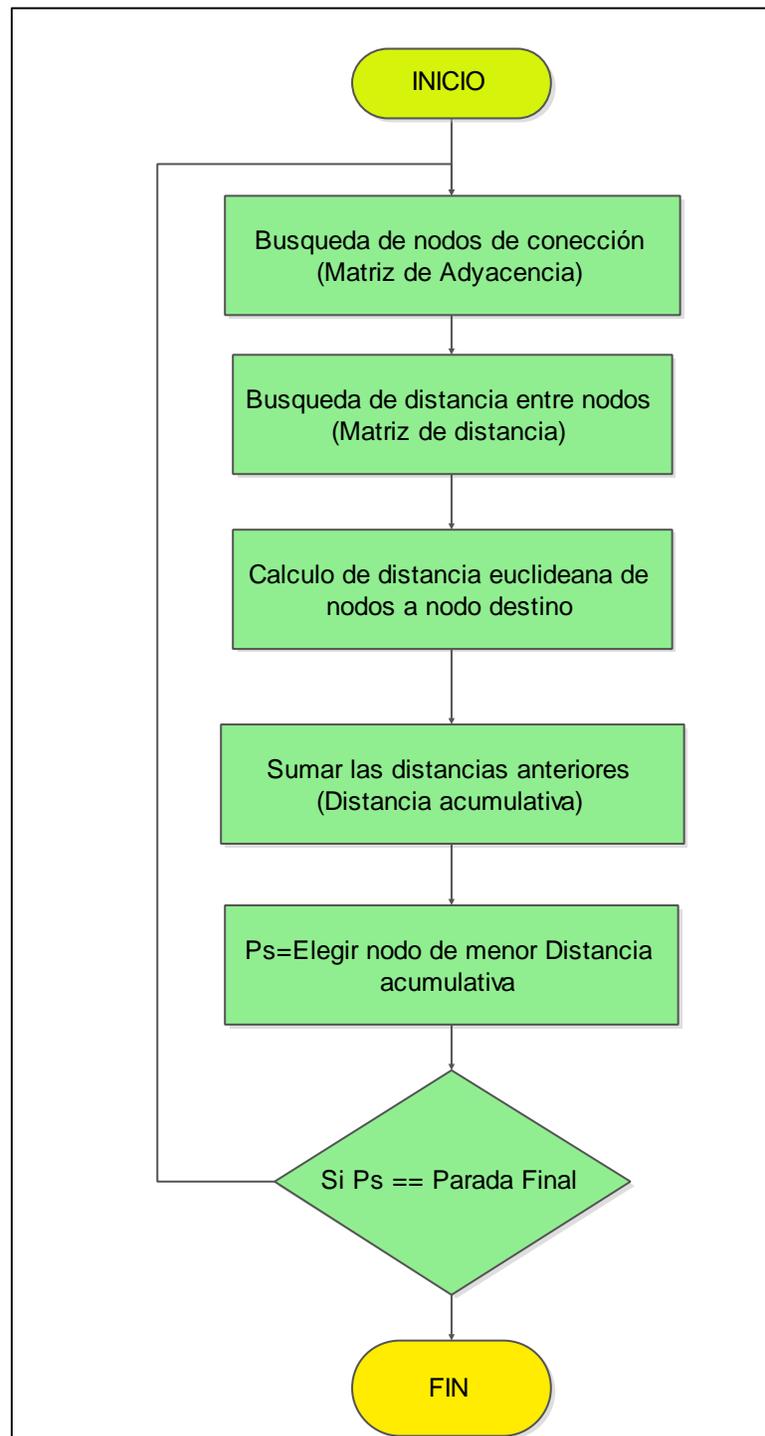
**Tabla 2.**

*Lista de paradas.*

431	428	412	1867.07	2279.07
431	433	571	1687.05	2258.05



Finalmente, el Algoritmo A\* escogerá el nodo de menor distancia acumulativa, para el ejemplo de la Tabla 2, el siguiente nodo para la ruta será el 433 ya que su distancia acumulativa es menor a la del nodo 428, y se repetirá el mismo procedimiento hasta que el nodo de conexión sea la parada final (*Figura 31*).



**Figura 31.** Flujograma Función A\*.

### 3.2.3.2. Función Ruta Nueva

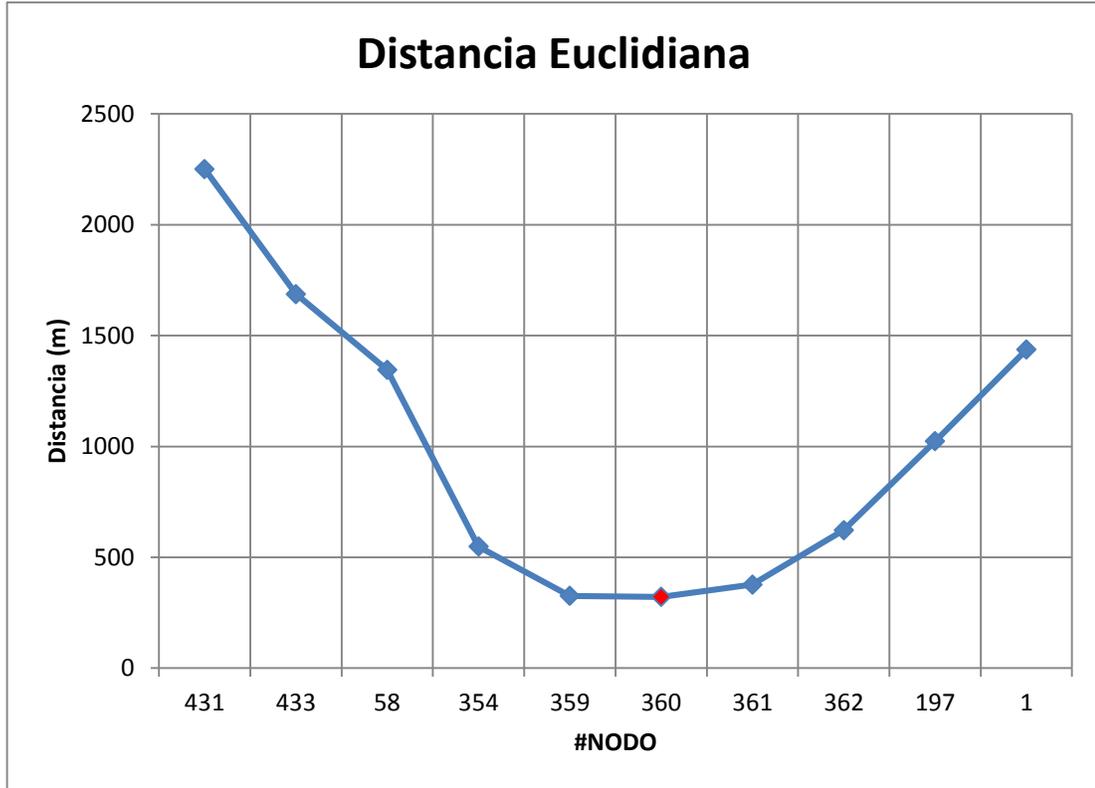
Como se explicó en el punto anterior la función A\* no detendrá su procedimiento hasta que encuentre la parada final o destino, sin embargo se evidenciaron casos donde no se llegaba al nodo destino, por lo que la función entraba en un bucle infinito. Para eliminar este problema se programó la función de ruta nueva, con el fin de detectar otro nodo destino.

La función Ruta Nueva identificará si la ruta se ha alejado más de 4 nodos, esto se lo realizará mediante la identificación de la incrementación de la distancia euclidiana. En la Tabla 3, se puede visualizar la obtención de la ruta 431-1, se evidencia que no llega a nodo destino (371), de hecho en la *Figura 32*, la distancia euclidiana disminuye hasta el nodo 360, e incrementa hasta el nodo 1, esto significa que los nodos se empiezan a alejar, y no se llegará a una solución integral de estos casos.

**Tabla 3.**

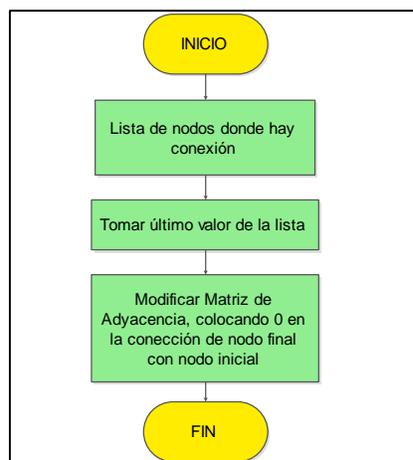
*Lista de nodos de Ruta 431-1*

NODOS	Distancia Euclidiana	Distancia entre nodos	Distancia Acumulativa
431	2251	0.00	0
433	1687	571	2822
58	1345	921	4859
354	548	1846	7129
359	325	2312	8144
360	321	2471	8629
361	376	2708	9187
362	622	2977	9833
197	1023	3387	10865
1	1436	3972	12473



**Figura 32.** Distancia Euclidiana Ruta 431-1

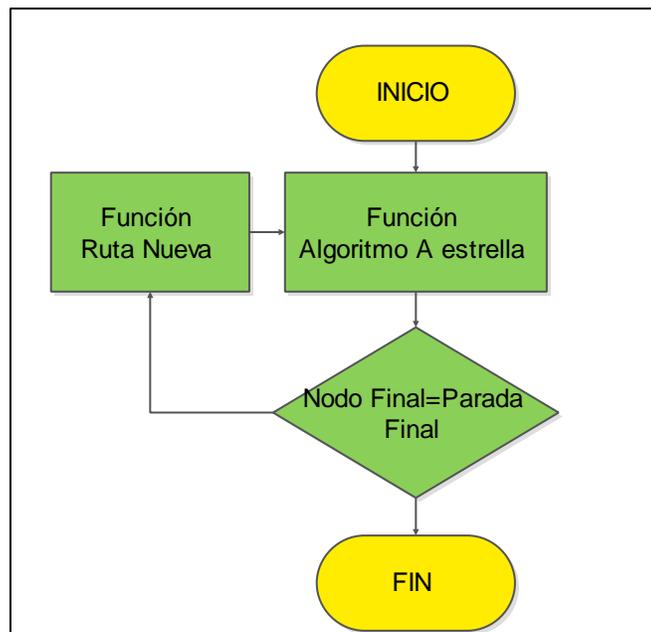
La función de Ruta Nueva, toma una lista de nodos donde han encontrado más de una conexión, y a partir del último nodo con bifurcación, elimina su conexión en la matriz de adyacencia colocando el valor de 0 en vez de 1 ( Figura 33).



**Figura 33.** Flujograma de Ruta Nueva.

### 3.2.3.3. Función de Algoritmo de Búsqueda

La Función de Algoritmo de Búsqueda integra las funciones de Algoritmo A\* y Ruta Nueva, explicados con anterioridad, encerrándolo en un bucle hasta que el nodo final de la Función A\* sea igual al parada final (Nodo destino). Esta función permitirá regresar nuevamente al Algoritmo A\*, es decir permite la iteración de las rutas hasta encontrar la solución (Figura 34).



**Figura 34.** Flujograma Algoritmo de Búsqueda

Tomando el ejemplo de la ruta 431-371, en la Tabla 4, se puede visualizar que a través de esta función se llega a la solución. En la columna 2, la distancia euclidiana llega a 0 debido a que es el nodo destino, y finalmente al final de la columna 3, se obtendrá la distancia total de la ruta.

**Tabla 4.***Ruta 431-371*

NODOS	Distancia Euclidiana	Distancia entre Nodos	Distancia Acumulativa
431	2251	0	0
428	1867	412	2663
426	1714	577	4695
379	1151	1257	7089
373	520	2234	9217
371	0	2754	10258

**3.2.3.4.Función Sincronización de Buses**

Al obtener el conjunto de nodos de la ruta, se realizó una búsqueda de que rutas de transporte público pasan en cada nodo, para ello se utiliza las listas de adyacencia, dentro de las mismas se buscará el código de las rutas que pasan en cada nodo. Por ejemplo de la Ruta 431-371 al generar esta búsqueda se obtiene la Tabla 5, los 0 no se consideran rutas.

**Tabla 5.***Código de rutas que pasan en 431-371.*

NODOS	Código de rutas que pasan en cada Nodo											
	17	36	71	220	221	0	0	0	0	0	0	0
431	17	36	71	220	221	0	0	0	0	0	0	0
428	17	71	220	221	0	0	0	0	0	0	0	0
426	17	71	220	221	0	0	0	0	0	0	0	0
379	13	17	19	42	47	71	100	113	115	132	220	221
373	17	19	23	174	176	178	184	220	221	0	0	0
371	17	19	23	174	176	178	184	220	221	0	0	0

A partir de esta tabla se obtiene una lista de todas las rutas de transporte público que pasan en la sección 431-371, apiladas en una fila. Luego se incorpora los nodos dentro de esta sección que pasan en cada ruta ordenándolos de forma descendente, para que una ruta de transporte público abarque la mayoría de los nodos y así evitar las transferencias innecesarias. En la Tabla 6, se puede visualizar que la ruta 221, 220, y 17 completan la ruta (431-371), señalada de la columna 1 de la Tabla 4.

**Tabla 6.**  
*Nodos por los que pasa cada Ruta de TP.*

<b>Cod. De Ruta de TP</b>	<b>Nodos por los que pasa la ruta</b>					
<b>221</b>	431	428	426	379	373	371
<b>220</b>	431	428	426	379	373	371
<b>17</b>	431	428	426	379	373	371
<b>71</b>	431	428	426	379	0	0
<b>19</b>	379	373	371	0	0	0
<b>184</b>	373	371	0	0	0	0
<b>178</b>	373	371	0	0	0	0
<b>176</b>	373	371	0	0	0	0
<b>174</b>	373	371	0	0	0	0
<b>23</b>	373	371	0	0	0	0
<b>132</b>	379	0	0	0	0	0
<b>115</b>	379	0	0	0	0	0
<b>113</b>	379	0	0	0	0	0
<b>100</b>	379	0	0	0	0	0
<b>47</b>	379	0	0	0	0	0
<b>42</b>	379	0	0	0	0	0
<b>36</b>	431	0	0	0	0	0
<b>13</b>	379	0	0	0	0	0

Finalmente para obtener la información final de la ruta completa se generaron arreglos de caracteres en matrices en las siguientes categorías:

- Matriz de Nombre de Rutas
- Matriz de Nombre de Operadoras
- Matriz de Nombre de paradas

Para la sincronización de tiempos de viajes se partieron de los datos, calculando la velocidad promedio de la ruta de transporte público, por ejemplo la ruta 221, obtenida como solución en el caso anterior, con nombre “BELLAVISTA - JESUS DEL GRAN PODER - MAGDALENA ALTA”, en la *Figura 35*, se puede visualizar que la distancia total es de 31,59 km y tiene un tiempo de recorrido de 2 horas lo que da como resultado una velocidad promedio de 263.3 metros en cada minuto, y así se lo realizó para cada ruta obteniendo una



**Tabla 7.**  
*Horario de la ruta 221*

Horario	#Bus
9:00	1
9:08	2
9:16	3
9:24	4
9:32	5
9:40	6
9:48	7
9:56	8

Para estimar el tiempo de espera del bus, se toma los minutos de la hora ingresada por el usuario, se divide para intervalo de tiempo de cada bus en minutos, tomando la parte decimal, volvemos a multiplicar por el intervalo de tiempo y volvemos a sustraer ese valor, tomando el ejemplo anterior la hora de viaje es de 9:30 y se realizan los cálculos ya explicados en la Figura 36.

Hora y minutos de viaje	9:30
Dividir: minuto de viaje intervalo de buses	$\frac{30}{8} = 3.75$
Tomando la parte decimal	$0.75 \times 8 = 6$
Sustraemos nuevamente el intervalo de buses	$8-6=2$
Tiempo de espera:	2 minutos

**Figura 36.** Cálculo de tiempo de espera de embarque.

Después se calcula el tiempo que tomaría esta ruta en llegar al nodo destino, en la última fila de la columna 3 de la Tabla 4, se obtiene el valor de la distancia total que abarca la ruta 221, y al obtener la velocidad promedio de la misma, se calcula el tiempo estimado, para este ejemplo el tiempo estimado es de 10 minutos. Lo cual se suma la hora de embarque 9:32 a 9:42, dando un tiempo total de viaje de 12 minutos, considerados el tiempo de espera para el embarque.

### 3.2.3.5. Función Gráfica de Mapa

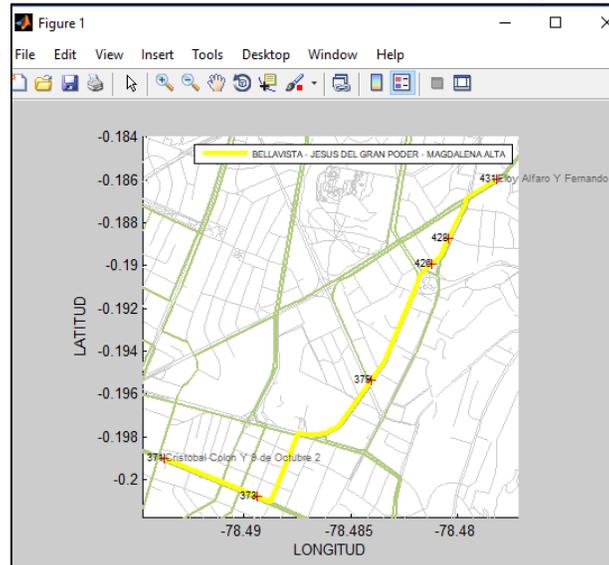
Al obtener la Lista de Nodos y las rutas que abarcan en esta sección se procedió a generar un algoritmo que permita graficar en Matlab el Mapa de la ruta generada. Para lo cual se obtuvo el ID de la distancia generada en el punto 3.2.2.1 generando una matriz de ID de distancia que permita graficar la sección de los nodos calculados.

En la Tabla 8, se evidencia en la columna 3 los ID\_distancia que se encuentran en el shapefile, como se puede ver en la *Figura 37*, se graficó la ruta pertinente, seleccionando solamente parte del shapefile con los códigos de la ID\_distancia.

**Tabla 8.**

*ID de distancia*

Nodos	Ruta	ID_distancia
431	221	0
428	221	3963
426	221	3961
379	221	3962
373	221	3960
371	221	3956

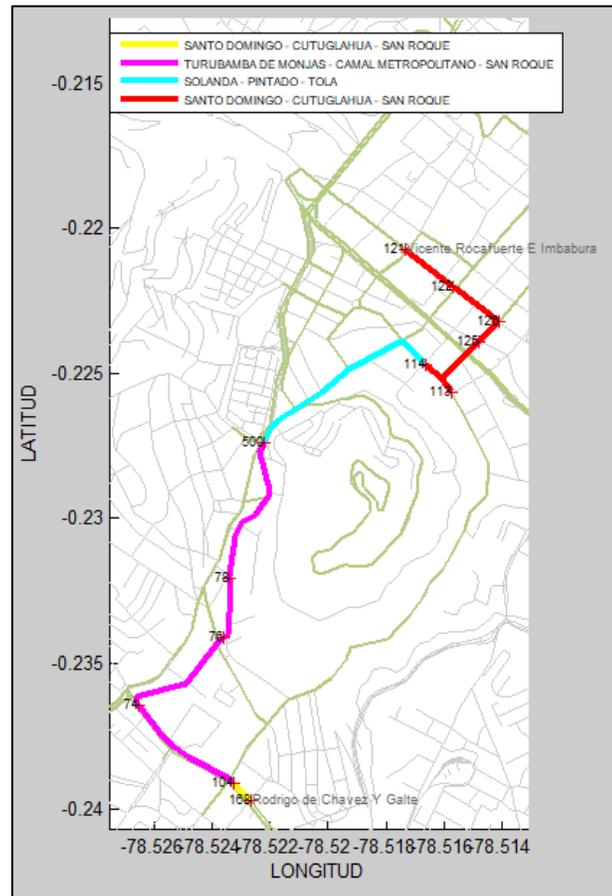


**Figura 37.** Gráfico de la ruta 431-371.

### 3.2.3.6. Función Minimización de Transferencia

En muchos de los casos la ruta calculada es la mínima en distancia (impedancia), pero el usuario de transporte público no desearía realizar muchos transbordos, por lo que se realizó una función de Minimización de Transferencias (ANEXO 2).

Tomaremos un ejemplo al generar la ruta del nodo 168 a 121, en la *Figura 38* se puede visualizar que toma inicialmente la Ruta: SANTO DOMINGO - CUTUGLAHUA - SAN ROQUE, luego TURUBAMBA DE MONJAS - CAMAL METROPOLITANO - SAN ROQUE, después SOLANDA - PINTADO - TOLA, y nuevamente la Ruta SANTO DOMINGO - CUTUGLAHUA - SAN ROQUE.



**Figura 38.** Rutas de TP sección (168-121)

Al minimizar las transferencias en la ruta (168-121), se toma de la matriz generada en la generación de Nodos por los que pasa cada ruta de transporte público del apartado 3.2.3.4 para este caso se representa en la Tabla 9 que la ruta 192 parte del nodo inicial 168 y de igual forma por el nodo final 121, pero el conjunto de nodos señalados no son todos los calculados en el algoritmo de búsqueda. En la Tabla 10 se compara los dos vectores de nodos ya mencionados.

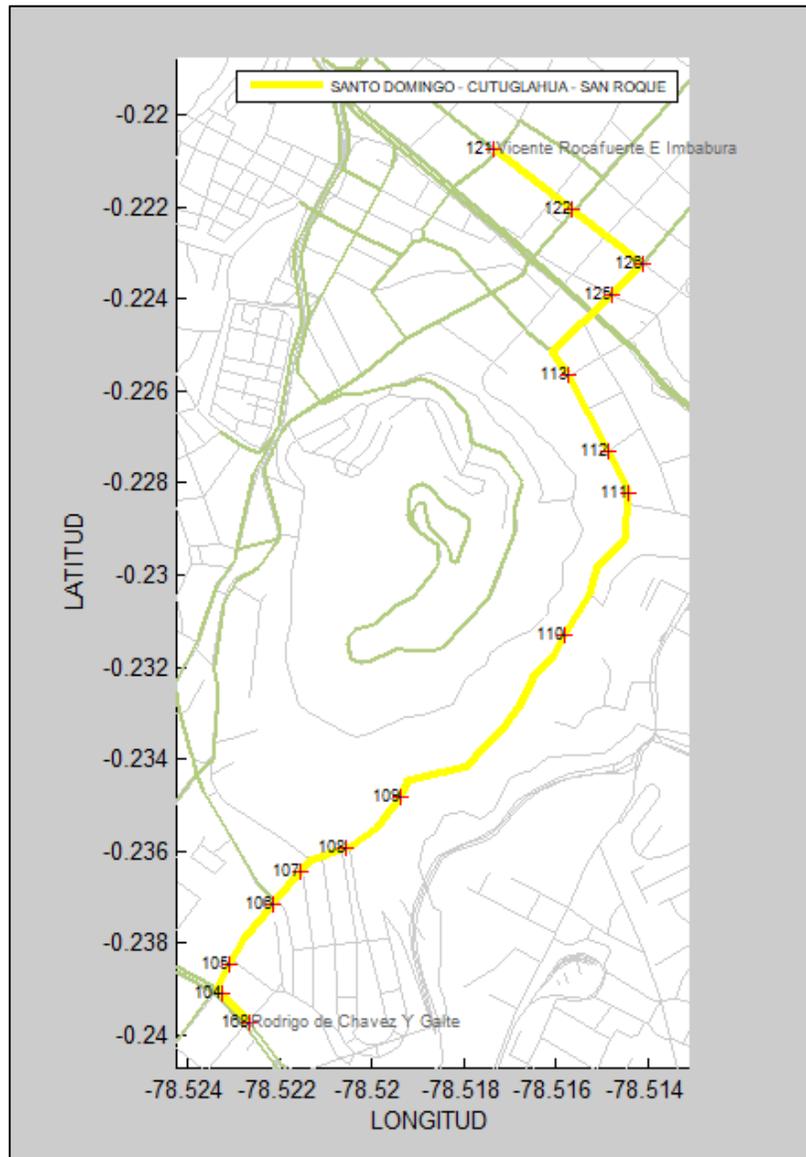
**Tabla 9.***Nodos por los que pasa cada ruta de TP en la sección (168-121)*

<b>Nodos</b>	<b>Nodos que pasan en cada Ruta</b>						
<b>192</b>	168	104	113	125	126	122	121
<b>72</b>	168	104	113	125	126	122	121
<b>68</b>	168	104	74	76	78	500	121
<b>62</b>	168	104	74	76	78	500	121
<b>127</b>	76	78	500	114	125	126	0
<b>119</b>	76	78	500	114	125	126	0
<b>204</b>	168	104	113	125	126	0	0
<b>145</b>	113	125	126	122	0	0	0
<b>56</b>	76	78	500	121	0	0	0
<b>50</b>	76	78	500	121	0	0	0
<b>226</b>	168	104	74	0	0	0	0
<b>222</b>	114	125	126	0	0	0	0
<b>219</b>	114	125	126	0	0	0	0
<b>209</b>	168	104	74	0	0	0	0
<b>167</b>	76	78	500	0	0	0	0
<b>165</b>	76	78	500	0	0	0	0
<b>153</b>	76	78	500	0	0	0	0
<b>151</b>	76	78	500	0	0	0	0

**Tabla 10.***Comparación de nodos generados por Minimización de Transferencias*

Minimización	168	104	113	125	126	122	121					
de												
Transferencias												
Algoritmo de	168	104	105	106	107	108	109	110	111	112	122	121
Búsqueda												

Finalmente en la *Figura 39*, se puede visualizar el gráfico generado nuevamente a través de la función de minimización de transferencias, minimizando a tomar solamente una ruta de transporte público: “SANTO DOMINGO – CUTULAGUA – SAN ROQUE”

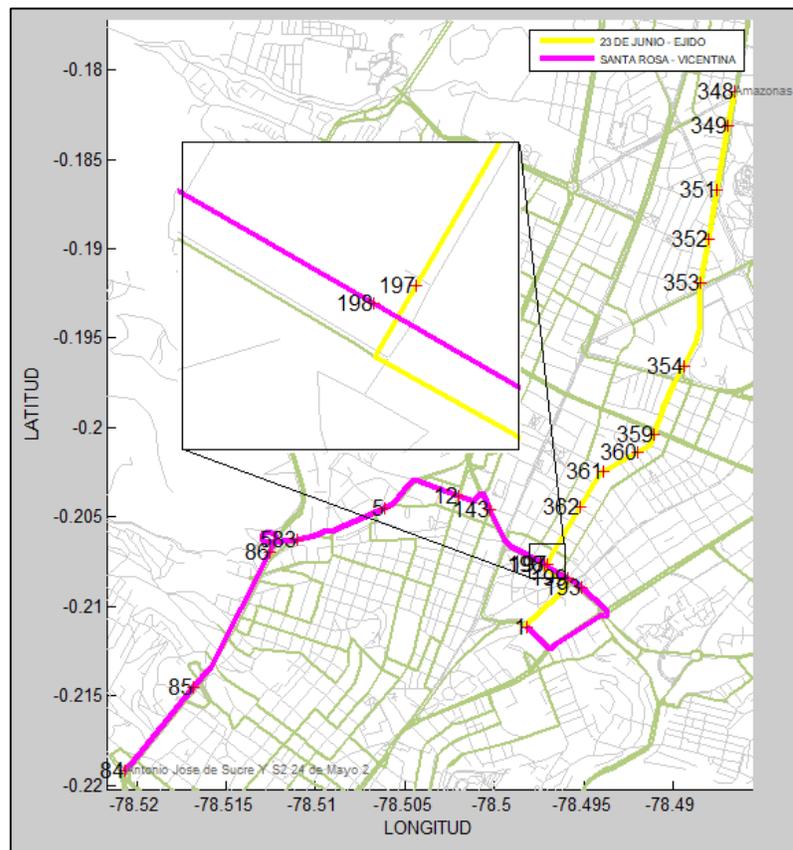


**Figura 39.** Minimización de Transferencias sección 168-121

### 3.2.3.7. Función de minimización de distancia.

Existen otros casos, que al igual que en la minimización de transferencias, se puede llegar a minimizar la distancia de cierta ruta calculada, para ello se implementó la programación (ANEXO 3) de la función de minimización de distancias, que resulta en generar un transbordo de caminata para el usuario de transporte público.

En la Figura 40, al calcular la planificación de rutas de transporte público en la sección de nodos 348-84, se puede visualizar que la ruta “23 de Junio-Ejido”, debe llegar hasta el nodo 1 para realizar el transbordo a la ruta “Santa Rosa-Vicentina”, sin embargo en la parada 197 y 198 se realizaría un transbordo de caminata por parte del usuario, por lo que se minimizaría todo el recorrido hasta llegar al nodo 1.



**Figura 40.** Planificación de Rutas en la sección 348-84.

Para generar esta función se calculó una matriz de distancias entre paradas, con el ejemplo de la sección 348-84 (Tabla 11), para seleccionar las paradas posibles a realizar un transbordo caminata deben cumplir 3 indispensables requisitos; la distancia entre paradas debe ser menor a 300 metros, en cada parada deben pasar distintas rutas de transporte público y finalmente no ser contiguas o adyacentes. Con el ejemplo de la sección 348-84, en la Tabla 12, columna 1 se puede visualizar que los nodos candidatos son los 197 y 198, en la columna 2 se evidencia que pertenecen a distintas rutas y la última columna la posición en la que se encuentran o contigüidad.

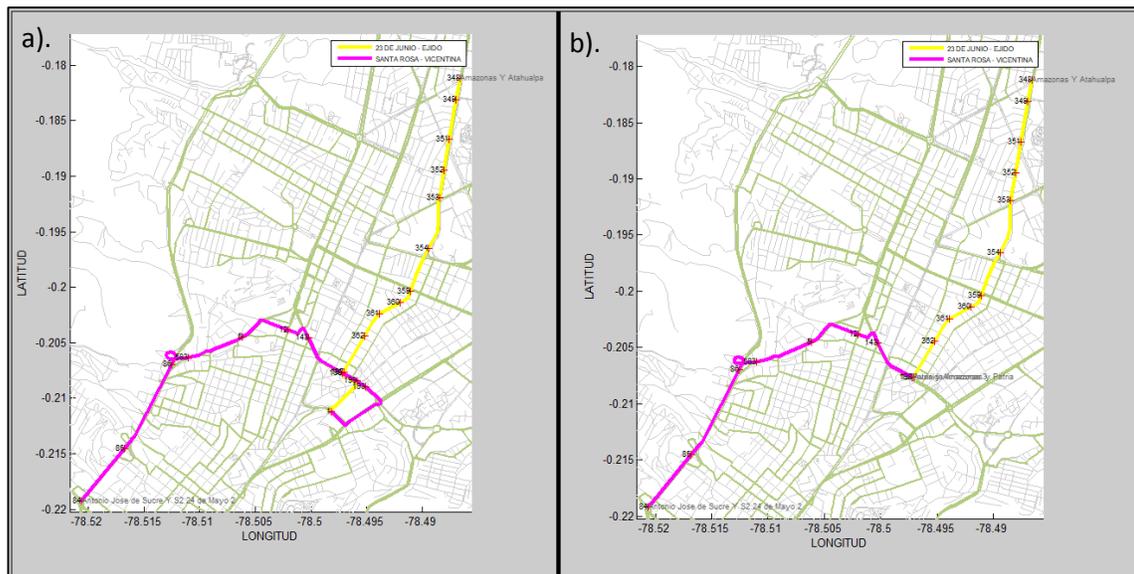
**Tabla 11.***Matriz de correlación de distancias sección 348-84.*

0	348	349	351	352	353	354	359	360	361	362	197	1	193	199	198
348	0	216	620	928	1203	1726	2182	2312	2484	2743	3147	3560	3217	3188	3160
349	216	0	404	712	987	1510	1966	2098	2271	2531	2936	3349	3003	2975	2949
351	620	404	0	309	583	1106	1564	1696	1874	2137	2544	2955	2604	2578	2557
352	928	712	309	0	275	798	1256	1391	1574	1838	2247	2657	2300	2276	2261
353	1203	987	583	275	0	523	983	1120	1310	1576	1985	2393	2030	2008	1999
354	1726	1510	1106	798	523	0	465	608	818	1084	1492	1893	1516	1502	1508
359	2182	1966	1564	1256	983	465	0	149	382	639	1040	1433	1051	1039	1056
360	2312	2098	1696	1391	1120	608	149	0	237	490	891	1286	910	894	907
361	2484	2271	1874	1574	1310	818	382	237	0	267	676	1083	739	704	691
362	2743	2531	2137	1838	1576	1084	639	490	267	0	410	819	503	451	424
197	3147	2936	2544	2247	1985	1492	1040	891	676	410	0	414	262	158	18

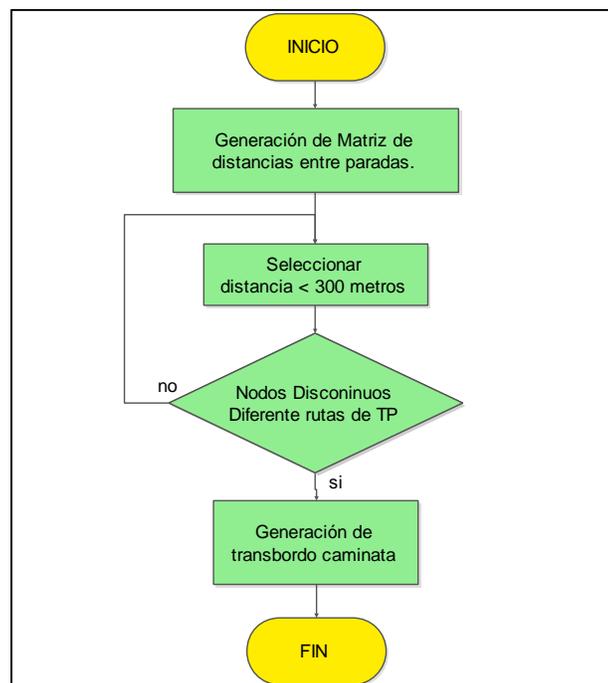
**Tabla 12.***Selección Nodos.*

ID NODO	ID RUTAS	CONTIGUIDAD
197	107	11
198	154	15

Finalmente al generar el código obtiene la siguiente ruta que se visualiza en la Figura 41, siguiendo el procedimiento ya explicado y resumido en el flujograma de la Figura 42.



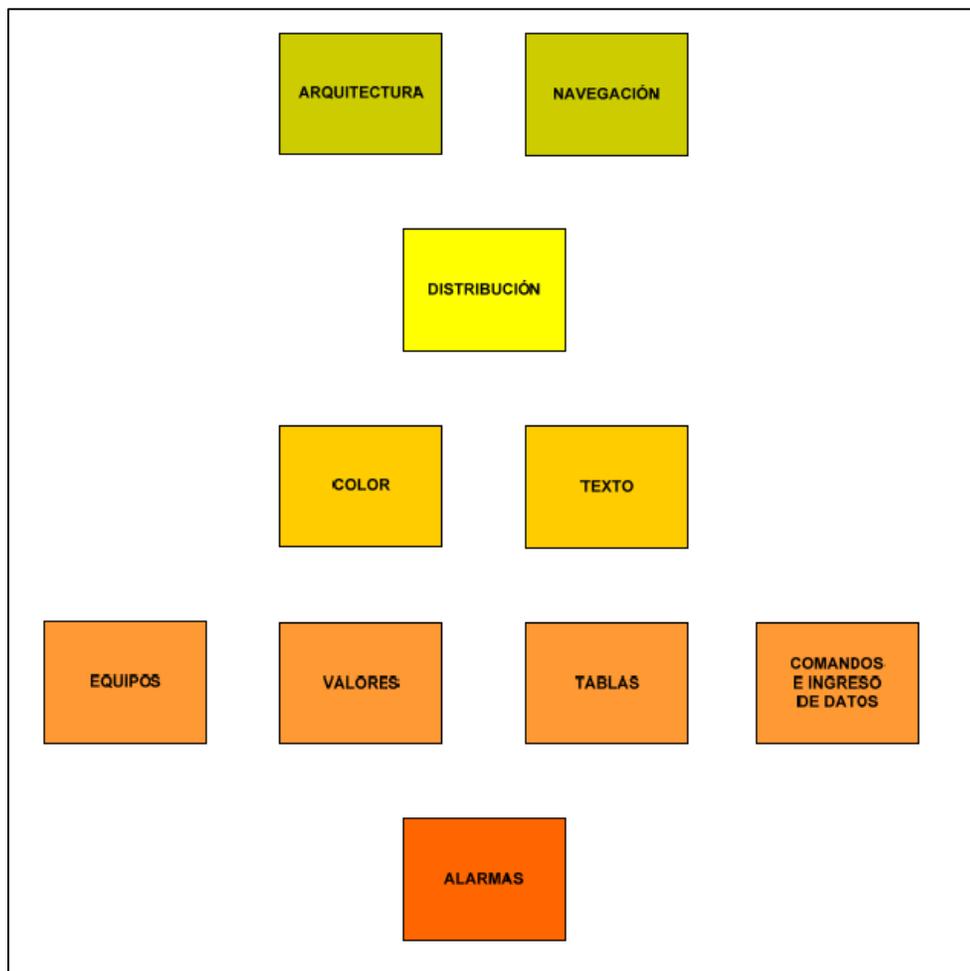
**Figura 41.** Minimización de distancia sección 348-84 **a).** Ruta calculada con algoritmo A\* **b).** Ruta minimizada distancia.



***Figura 42.*** Flujograma Minimización de Distancia.

### 3.3. Diseño de la Interfaz de Usuario

En la Figura 43, se explica lo que según la guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión (GEDIS), que consiste en la especificación de los principales elementos de la interfaz tales como la arquitectura, la navegación los estándares de colores, fuentes, simbología (Ponsa & Granollers, 2000).



*Figura 43.*Esquema general de la metodología de desarrollo de la interfaz.

*Fuente:* Ponsa & Granollers, 2000

### 3.3.1. Distribución de Pantalla

Dentro del diseño de la plantilla de la pantalla de interfaz de usuario, se generó una distribución de elementos mediante el diagrama de Gutenberg, es decir de arriba abajo y de izquierda a derecha; en la Figura 44, se puede visualizar la colocación del título de la pantalla, en la parte superior derecha, en la parte inferior la zona de ingreso de datos por parte del usuario, a la derecha del mismo se colocaron los botones de navegación, en la parte inferior, la información sobre el cálculo de la ruta, es decir las rutas que el usuario debe tomar, tiempos de viaje y finalmente a la derecha y tomando gran importancia en el área de la pantalla el mapa de presentación en cuanto a la información geográfica de las rutas de planificación.

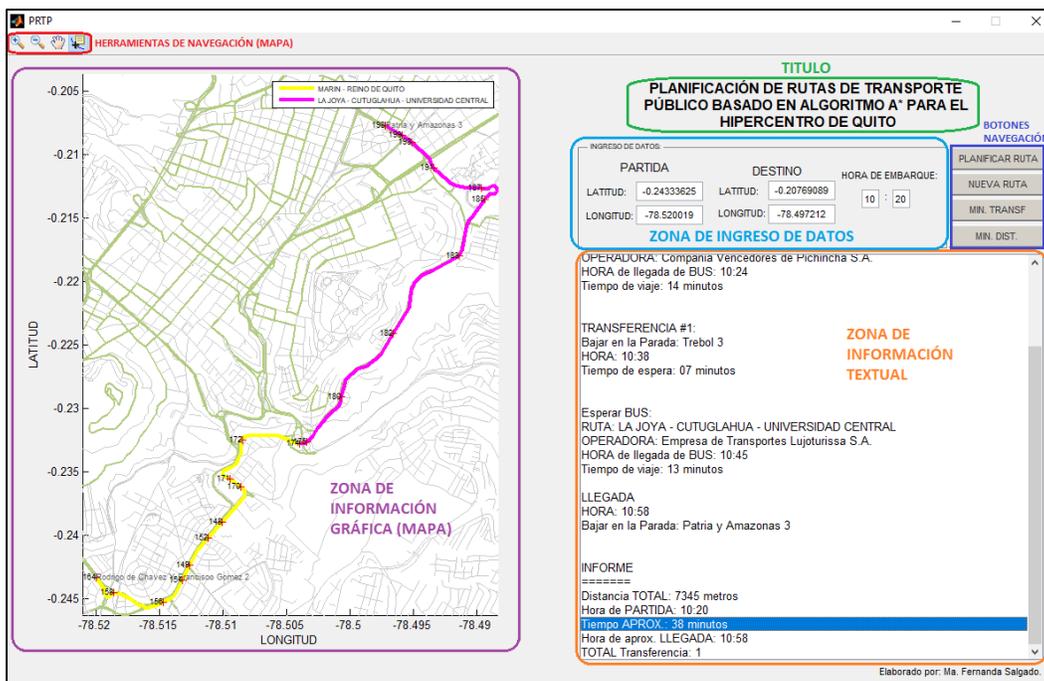


Figura 44. Distribución de elementos en la pantalla.

### 3.3.2. Navegación

En la parte superior derecha se encontrará la barra de navegación sobre el mapa mostrado en la Figura 45, que contiene de 4 iconos:

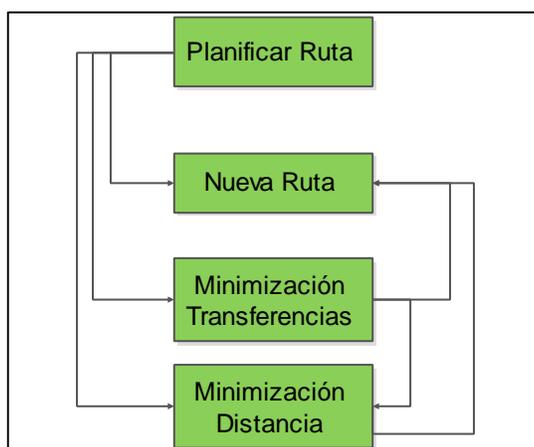


**Figura 45.** Botones de navegación de mapa.

- Zoom In: permite acercar dentro del mapa de navegación.
- Zoom Out: permite alejar al mapa de navegación.
- Pam: permite la movilización del mapa de navegación.
- Data Cursor: permite tomar información coordenadas dentro del mapa (latitud, Longitud).

### 3.3.2.1. Botones de Navegación

Los botones de navegación, son las opciones que tendrá el usuario de la interfaz, para planificar la ruta, después de ingresar los datos como son los puntos de partida y destino en coordenadas geográficas, así como también la hora de embarque, y que pueden seguir la navegación descrita en la Figura 46.



**Figura 46.** Navegación de Botones.

- **Planificar Ruta:** permite planificar la ruta de transporte público de menor distancia mediante la aplicación de algoritmo A\*.
- **Nueva Ruta:** permite planificar una nueva ruta, después de haber calculado otra con anterioridad.
- **Minimización de Transferencias:** una vez calculada la ruta de transporte público mediante el botón de planificar ruta, el usuario de transporte público puede visualizar menos transbordos generados a partir de esta opción.

- **Minimización de Distancia:** una vez calculada la ruta ya sea con el primer botón o minimizado las transferencias, esta opción puede calcular una nueva ruta mediante transbordos de caminata.

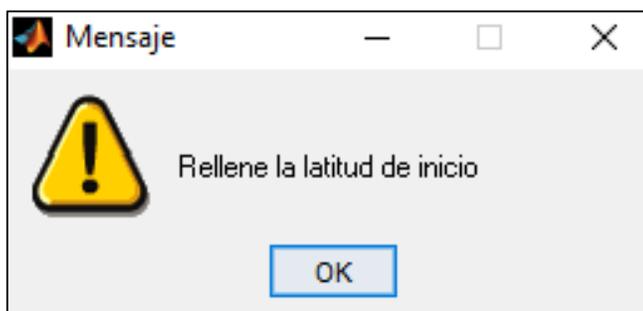
### 3.3.3. Ingreso de datos

Los datos ingresados por parte del usuario son tomados mediante la herramienta de data cursor, donde se ingresarán las coordenadas geográficas de los puntos de partida y destino, posteriormente la hora de embarque en formato de 24h, en la *Figura 47*, se puede visualizar la distribución de estos datos dentro la interfaz de usuario.

*Figura 47.* Distribución de Ingreso de datos.

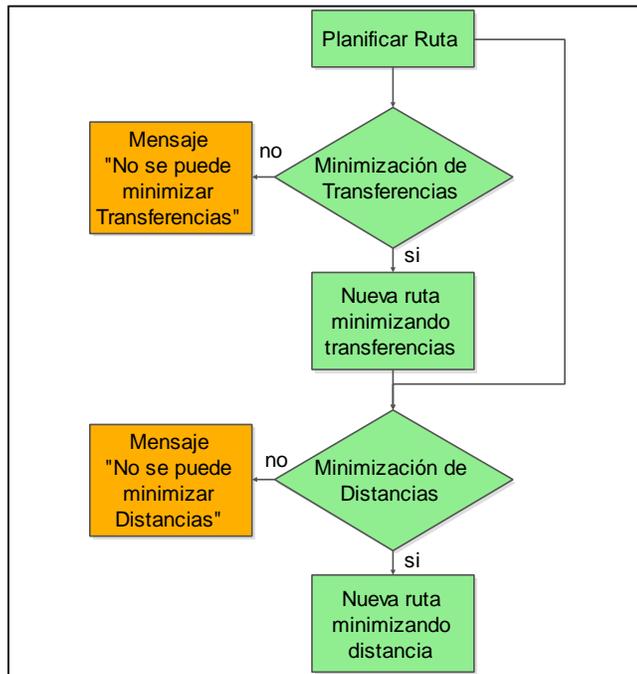
### 3.3.4. Alarmas

Las alarmas o mensajes de advertencias se generan del ingreso de datos, donde se despliegan cuadros de mensajes indicando errores comunes como es el de llenar campos faltantes. En la *Figura 48*, se puede visualizar un ejemplo en el cual no se llenó el campo de latitud de inicio, de igual forma se generarán cuadros de advertencia en cualquier campo que falte llenar la información requerida por la interfaz.



*Figura 48.* Mensaje de Advertencia en ingreso de datos.

En cuanto a los botones de navegación, en el ejemplo de navegación descrito en la *Figura 49*, se puede visualizar los mensajes de advertencias importantes para el usuario, y aportando con mayor asistencia.



**Figura 49.** Ejemplo de mensajes de advertencia.

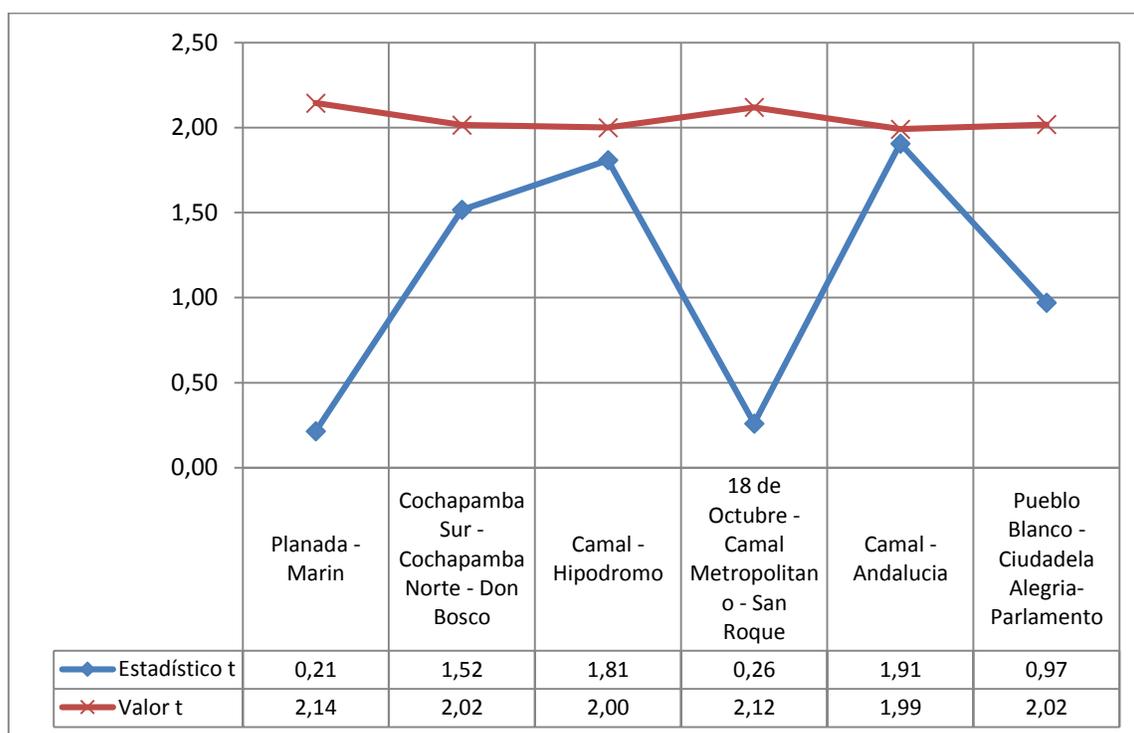
## CAPITULO IV

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Análisis de Resultados

##### 4.1.1. Validación de rutas de transporte público

Durante la validación de los tiempos de viaje en las 6 líneas de transporte público, todos los análisis estadísticos mediante  $t$  de Student, llegaron a afirmar la hipótesis que “los tiempos de viaje estimados son similares a los tiempos de viaje tomados en campo”. En la Figura 50, se puede visualizar que los valores  $t$  estadísticos (color azul) están por debajo de los valores  $t$  de tabla (color rojo), sin embargo existieron rutas que se asemejan mucho en estos dos valores como es el caso de la ruta Camal –Hipódromo y Camal – Andalucía, debido a que estos tiempos de viaje fueron tomados en hora pico.



**Figura 50.** Valores estadísticos  $t$  de Student de las rutas muestreadas.

#### 4.1.2. Validación del Algoritmo A\*

##### 4.1.2.1. Prueba a usuarios de transporte público

Se realizó la validación del algoritmo y programa mediante la prueba realizada a 5 usuarios de transporte público.

- **Primera Prueba**

Los datos de la primera prueba del uso del programa se visualizan en la Tabla 13, detallando el punto de partida, destino y hora de embarque.

**Tabla 13.**

*Primera prueba de usuario.*

Partida:	Venezuela y Chile
Destino:	Río Coca
Hora de Embarque:	10:23 am

La ruta calculada se visualiza en la **Figura 51**, que dio la siguiente información total de la ruta planificada, como resultado de la ejecución del programa:

```

INFORME
=====
Distancia TOTAL: 12234 metros
Hora de PARTIDA: 10:23
Tiempo APROX.: 65 minutos
Hora de aprox. LLEGADA: 11:28
TOTAL Transferencia: 5

```



INFORME

=====

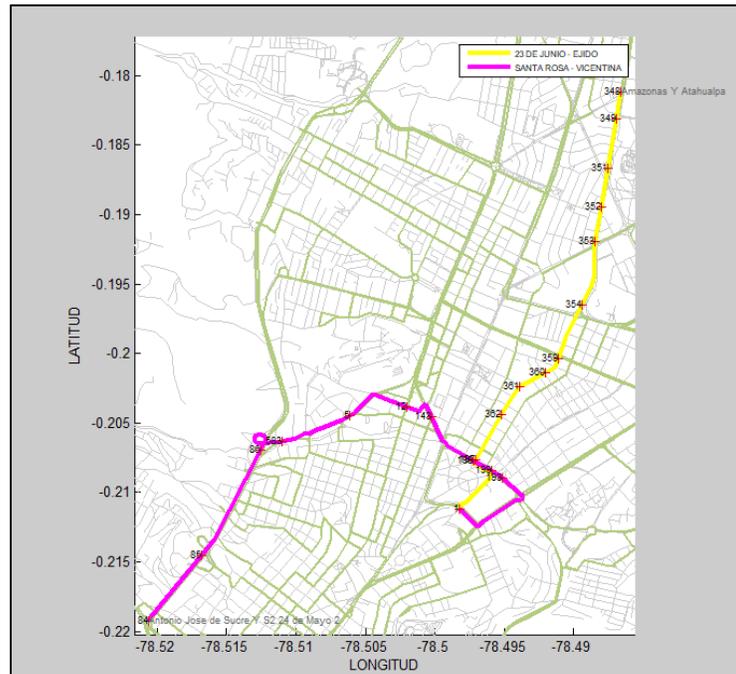
Distancia TOTAL: 9032 metros

Hora de PARTIDA: 09:00

Tiempo APROX.: 49 minutos

Hora de aprox. LLEGADA: 09:49

TOTAL Transferencia: 1



**Figura 52.** Segunda prueba de usuario.

- **Tercera prueba**

Los datos de la tercera prueba del uso del programa se visualizan en la Tabla 15, detallando el punto de partida, destino y hora de embarque.

**Tabla 15.**

*Datos de la tercera prueba a usuario.*

Partida:	Quicentro Norte
Destino:	San Roque
Hora de Embarque:	13:00

La ruta calculada se visualiza en la **Figura 53**, que dio la siguiente información total de la ruta planificada, como resultado de la ejecución del programa:

INFORME

=====

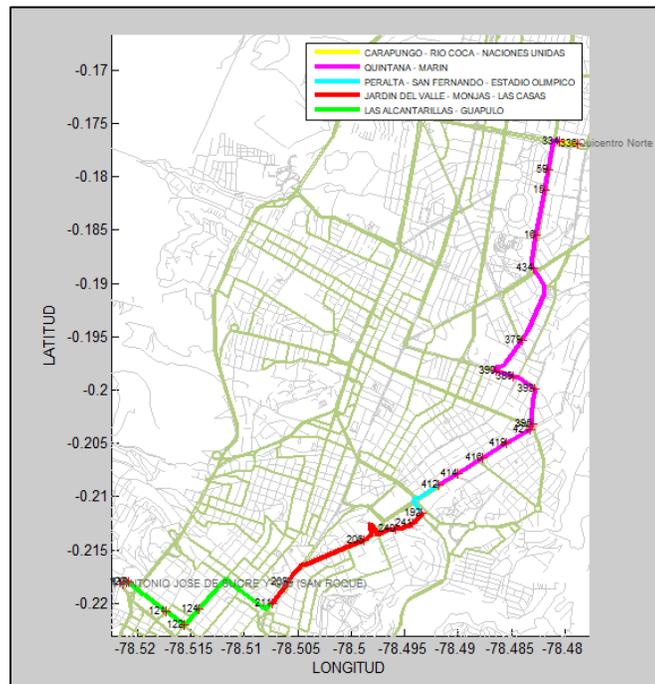
Distancia TOTAL: 9554 metros

Hora de PARTIDA: 10:23

Tiempo APROX.: 58 minutos

Hora de aprox. LLEGADA: 11:21

TOTAL Transferencia: 4



**Figura 53.** Tercera prueba de usuario

- **Cuarta Prueba**

Los datos de la cuarta prueba del uso del programa se visualizan en la Tabla 16, detallando el punto de partida, destino y hora de embarque.

**Tabla 16.***Datos de la cuarta prueba de usuario.*

Partida:	Mariscal Sucre y Gral. Miller
Destino:	Río de Janeiro y Canada
Hora de Embarque:	13:00

La ruta calculada se visualiza en la **Figura 54**, que dio la siguiente información total de la ruta planificada, como resultado de la ejecución del programa:

## INFORME

=====

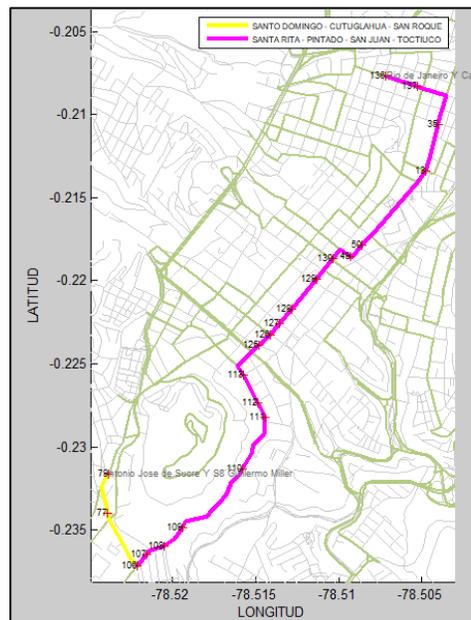
Distancia TOTAL: 5320 metros

Hora de PARTIDA: 03:00

Tiempo APROX.: 24 minutos

Hora de aprox. LLEGADA: 03:24

TOTAL Transferencia: 1

**Figura 54.** Datos de la cuarta prueba de usuario.

- **Quinta Prueba**

Los datos de la quinta prueba del uso del programa se visualizan en la Tabla 17, detallando el punto de partida, destino y hora de embarque.

**Tabla 17.***Datos de la quinta prueba de usuario.*

Partida:	Av. Napo
Destino:	10 de Agosto y Av. Inca
Hora de Embarque:	11:45

La ruta calculada se visualiza en la **Figura 55**, que dio la siguiente información total de la ruta planificada, como resultado de la ejecución del programa:

## INFORME

=====

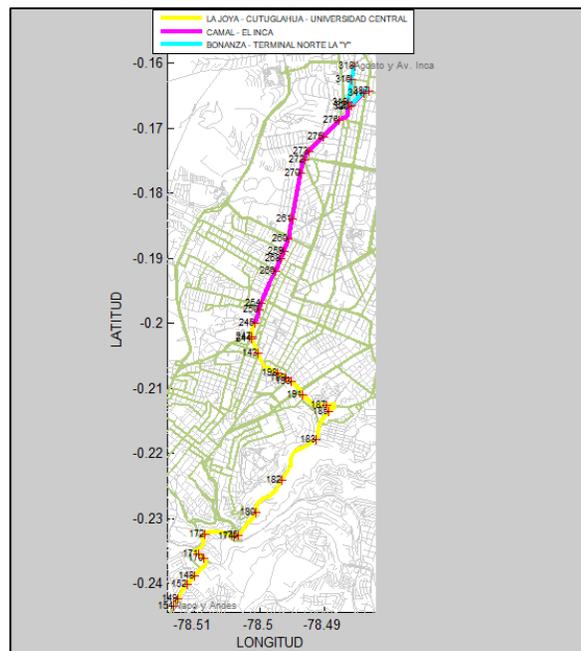
Distancia TOTAL: 13175 metros

Hora de PARTIDA: 11:45

Tiempo APROX.: 58 minutos

Hora de aprox. LLEGADA: 12:43

TOTAL Transferencia: 2

**Figura 55.** Datos de la quinta prueba de usuario

#### 4.1.2.2. Función Ruta Nueva

Como se explicó en el apartado 3.2.3.2 para la función de ruta nueva se elimina la última bifurcación, de nodo, en la Tabla 18, se puede visualizar que los casos resaltados influyen en el aumento de su distancia, afectando el tiempo de viaje o el número de transbordos que debería realizar el usuario de transporte público.

**Tabla 18.**

*Afectación de parámetros al aplicar función de ruta nueva.*

# de prueba	Primera Bifurcación	Ultima Bifurcación	Primera Bifurcación	Ultima Bifurcación	Primera Bifurcación	Ultima Bifurcación
	Distancia (metros)		Tiempo (min)		# Transbordos	
1	12234	13423	65	66	5	5
2	9032	9032	49	49	1	1
3	9554	9554	58	58	4	4
4	5320	5320	24	24	1	1
5	13175	13973	58	80	2	8

#### 4.1.2.3. Función de minimización de transferencias.

La función de minimización de transferencias busca minimizar los posibles transbordos que puede realizar el usuario, durante la prueba de ésta función, en las 5 pruebas realizadas al usuario se pudo minimizar los casos resaltados en la Tabla 19.

**Tabla 19.***Minimización de transferencia en las 5 pruebas realizadas a usuarios*

# de prueba	A *	Min. Transf	A *	Min. Transf	A *	Min. Transf
	Distancia (metros)		Tiempo (min)		# Transbordos	
1	12234	12196	65	64	5	4
2	9032	9032	49	49	1	1
3	9554	9554	58	39	4	3
4	5320	5320	24	24	1	1
5	13175	13175	58	58	2	2

**4.1.2.4. Función de minimización de distancia**

Mediante la función de minimización de distancia aplicada a las 5 pruebas de usuario, se obtuvo que la primera y segunda de las mismas, se logró minimizar la distancia y tiempo (Tabla 20).

**Tabla 20.***Minimización de distancia a prueba de usuarios.*

# de prueba	A *	Min. Dist	A *	Min. Dist	A *	Min. Dist
	Distancia (metros)		Tiempo (min)		# Transbordos	
1	12234	11331	65	63	5	4
2	9032	7706	49	42	1	1
3	9554	9554	58	58	4	4
4	5320	5320	24	24	1	1
5	13175	13175	58	58	2	2

**4.2. Discusión de Resultados**

Las variables utilizadas en este proyecto de investigación fueron la de distancia y tiempo también llamadas impedancia o costos de viaje, pero las rutas de transporte público se pueden encontrar vinculadas a multivariantes, que se pueden ajustar al algoritmo A\* (Bast, Car or Public Transport—Two Worlds, 2009 ).

Además, la impedancia de cada segmento de una red es un factor clave de cualquier algoritmo de planificación de rutas en SIG. La impedancia es una medida de la cantidad de coste, o resistencia, que se espera que pase a través de un enlace desde su nodo de origen hasta su nodo de destino. Además, una impedancia más alta denota mayor resistencia al movimiento. La determinación apropiada de un modelo de impedancia de segmento de carretera conduce a resultados de planificación de rutas más precisos (Grotenhuis, Wiegmans, & Rietveld, 2007).

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

Mediante la validación de los tiempos de viaje de las rutas de transporte público, por parte de los datos descargados en la Secretaría de Movilidad de Quito, se obtuvo que los tiempos de viaje estimados son similares a los tiempos tomados en campo, sin embargo estos pueden llegar al margen de los tiempos estimados dependiendo de la hora en la que se tomaron los datos, ya que la hora pico u hora valle pueden incrementar o disminuir los mismos.

El desempeño con el algoritmo aplicado en este proyecto, se mejora en respuesta al uso de la función heurística. Por lo tanto se analizó e implementó las funciones de distancia total y distancia euclidiana. Reflejando que es adecuado combinar estas funciones y considerar la distancia recorrida junto con la distancia euclidiana.

Al existir bifurcaciones en todo el recorrido, y el caso de no llegar al nodo de destino, se debe eliminar la ruta donde se encontró la última bifurcación y no la primera, debido a que en la última se asevera el recorrido de una ruta mínima, y eliminando paulatinamente, hasta llegar a un nodo cercano al nodo destino.

La función de minimización de distancia permite al usuario de transporte público minimizar la distancia de recorrido de la ruta mediante un transbordo de caminata, por lo que también minimizará el tiempo de viaje.

La función de minimización de transferencias en los casos que se apliquen, minimizarán los transbordos posibles del usuario de transporte público, pero incrementaría su distancia, ya que el algoritmo A\* calcula la ruta mínima, y en el caso de minimizar las transferencias, la línea de transporte público no siempre recorre la ruta mínima en distancia.

## 5.2. RECOMENDACIONES

En una modelación de rutas de transporte público influyen más variables, sobre todo en los tiempos de viaje, como son las horas pico y valle, semáforos, parámetros de flujo vehicular (tráfico) por lo que las rutas de transporte público son multivariable, y si se llegan a incluir, pueden aportar más precisión a este tipo de información en el programa generado.

Al realizar un posible transbordo se debería considerar más información como es la capacidad de carga de la unidad, y en que paradas existe más posibilidad de un transbordo, por lo que se debería escoger estos puntos mediante una matriz de pesos con el número de usuarios que esperan una cierta unidad en cierta parada.

En la actualidad, todas las unidades de transporte público se encuentran monitoreadas de forma satelital, y toda esta información es receptada en tiempo real, por lo que se recomienda que se tome estos datos, y se genere un sistema de búsqueda informada dinámica, así como también la implementación en una plataforma que el usuario pueda acceder de forma fácil ya sea mediante internet o una aplicación móvil, aportando en una proyección a ciudades inteligentes.

La heurística aplicada en este proyecto fue la de distancia euclidiana, sin embargo se podría aplicar o implementar otras heurísticas para este problema de planificación de rutas de transporte público, como por ejemplo la dirección de búsqueda, mediante un el azimut, es decir el azimut del el nodo posible candidato y nodo destino integrándolo junto con la distancia euclidiana.

Se pueden implementar otros algoritmos de búsqueda como lo son Dijkstra, Bellman Ford, Floyd Warshall, Johnson's , entre otros, que apliquen la teoría de grafos, donde se podrían comparar sus diferentes iteraciones hasta llegar al nodo destino y evaluar su desempeño.

**BIBLIOGRAFÍA:**

- Alcaldía Metropolitana de Quito. (2015). Plan Metropolitano de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. *Propuesta: componente estratégico*.
- Allen-Monge, J. (2011). Planificación de Transporte.
- Bast, H. (2009 ). Car or Public Transport—Two Worlds. *Efficient Algorithms. Springer Berlin Heidelberg*, 355-367.
- Beardwood, J. ..., Halton, J., & Hammersley, J. (1959). The shortest path through many points. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 299-327.
- Biggs, N., Lloyd, E. K., & Wilson, R. J. (1976). *Graph Theory*,. Oxford University Press.
- Bregón, A., & A, A. (2005). n sistema de razonamiento basado en casos para la clasificación de fallos en sistemas dinámicos. *Universidad de Valladolid*.
- Caicedo, A., Wagner, G., & Méndez, R. (2010). *Introducción a la Teoría de Grafos*. Armedia (Quindio): Elizcom.
- Canca, D., De-Los-Santos, A., Laporte, G., & Mesa, J. A. (2016). A general rapid network design, line planning and fleet investment integrated model. . *Annals of Operations Research*, 127-144.

- Duchoň, F., Babinec, A., Kajan, M., Beňo, P., Florek, M., & Fico, T. (2014). Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot. . *Procedia Engineering*, 59-69.
- Erdős, P., Rényi, A., & Sós, V. T. (1996). On a problem of graph theory. *Studia Sci. Math. Hungar*, 235.
- Gallego, F. (2004). *Matronas Profesión*. vol. 5, n.º 18.
- Grotenhuis, J. W., Wiegmans, B. W., & Rietveld, P. (2007). The desired quality of integrated multimodal travel information in public transport: Customer needs for time and effort savings. *Transport Policy*, 14(1), 27-38.
- Hernández, G. (2003). *Teoría de Grafos*.
- Johnsonbaugh, R. (2005). *Matemáticas Discretas*. Mexico: Pearson Educación.
- López, C. A., & Ardila Urueña, W. (2008). *Design of application for graph's handling with heuristic algorithms of analysis*.
- Mendenhall, W. (2010). *Introducción a la probabilidad y estadística*. Australia: CENGAGE.
- Meyer, U., & Sanders, P. (2003).  $\Delta$ -stepping: a parallelizable shortest path algorithm. *Journal of Algorithms*, 114-152.

- Mnasser, H., Oliveira, K., Khemaja, M., & Abed, M. (2010). A public transportation ontology to support user travel planning. *Research Challenges in Information Science (RCIS), 2010 Fourth International Conference*, 127-136.
- Molina, J. L. (2004). La ciencia de las redes. *Apuntes de Ciencia y Tecnología*, 36-42.
- Newell, G. F. (1980). Traffic flow on transportation networks.
- Nosrati, M., Karimi, R., & Hasanvand, H. A. (2012). Investigation of the\*(star) search algorithms: Characteristics, methods and approaches. *World Applied Programming*, 2(4), 251-256.
- Osvaldo, D., Gómez, L., & Parras, M. (2009). Teoría de Grafos y Sistemas de Información Geográfica aplicados al Transporte Público de Pasajeros en Resistencia (Argentina). *Revista Transporte y Territorio*, 89-111.
- Pardo, C. E., & Del Campo, P. C. (2007). Combinación de métodos factoriales y de análisis de conglomerados en R: el paquete FactoClass. . *Revista colombiana de estadística*, 30(2).
- Ponsa, P. E., & Granollers, A. N. (2000). Diseño de pantalla. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Prieto, J., Ramos, O., & Delgado, A. (2007). Diseño de un gene digital en FPGA y MATLAB con aplicaciones en robótica móvil. *Taller Iberchip IWS-2007*, 14.
- Reddy, H. (2015). Path finding-Dijkstra's and A\* Algorithm's. *International Journal in IT and Engineering* , 1-15.

- Secretaría de Movilidad. (30 de 10 de 2014). *Diagnóstico de la movilidad en el distrito metropolitano de quito para el plan metropolitano de desarrollo territorial (PMOT)*. Quito.
- SENPLADES. (2013). Plan Nacional Del Buen Vivir. 135-151.
- Szczerba, R. J., Galkowski, P., Glicktein, I. S., & Ternullo, N. (2000). Robust algorithm for real-time route planning. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 869-878.
- Tapia, J., & Veizaga, R. (2006). Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de ingeniería de tráfico. Cochabamba-Bolivia.
- Yao, J., Lin, C., Xie, X., Wang, A. J., & Hung, C. C. (2010). Path planning for virtual human motion using improved A\* star algorithm. *echnology: New Generations (ITNG)*, 1154-1158.
- Zambrano, D., & Semprún, V. (s.f.). Teoría de grafos.

**ANEXOS:**