

# **EL TREN DE CERCANIAS PARA EL AREA METROPOLITANA DE CALI. PROPUESTA DE UN MODELO OPERACIONAL**

**Luis Alberto Pinzón**  
**Ciro Jaramillo Molina**  
Escuela de Ingenieria Civil y Geomática  
Universidad del Valle. Colombia

## **RESUMEN**

Este trabajo busca aportar elementos para determinar la viabilidad técnica de la utilización de un sistema de tren de cercanías para la ciudad de Cali. Se recolecto la información necesaria para plantear el modelo operacional, esto se llevo a cabo con ayuda de las empresas prestadoras del servicio de pasajeros entre Cali y Yumbo y con el levantamiento de datos en campo. Así, se plantea el modelo de acuerdo a las características y a la demanda del corredor, determinando la frecuencia de despachos de vehículos y la flota necesaria para la prestación del servicio.

## **ABSTRACT**

This work looks for to contribute elements to determine the technical viability of the use of a system of train of neighbourhoods for the city of Cali. It collects the information necessary to raise the operational model, this it carries out with the help of the lending companies of the service of passengers between Cali and Yumbo and with the rise of data in field. Thus, the model according to the characteristics and to the demand of the runner considers, determining the frequency of offices of vehicles and the necessary fleet for the benefit of the service

## **1. INTRODUCCION**

A pesar del crecimiento que ha experimentado Cali sigue siendo una ciudad monocéntrica, esto indica que en la zona centro se localizan las actividades urbanas más importantes como son el comercio, servicios e industria (Hernández *et al.*, 1999). Con base en esto, analiza la viabilidad técnica de un sistema de tren de cercanías para la ciudad de Cali, en el marco de la integración entre este sistema y el Sistema de Transporte Masivo-MIO, en proceso de implementación..

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

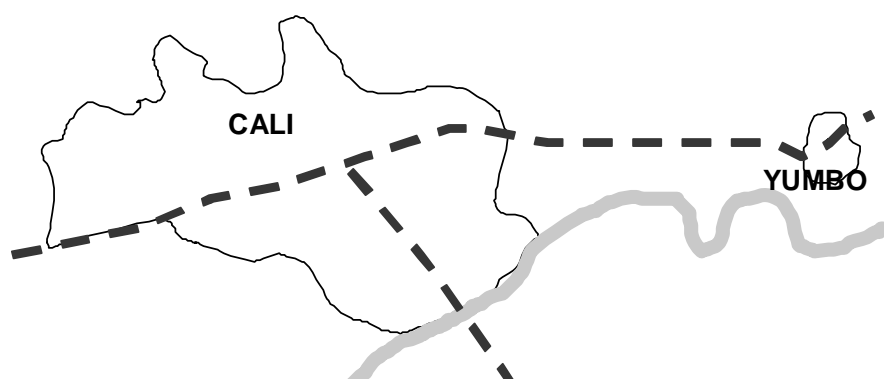
Actualmente la ciudad de Cali cuenta con 2'423.381 hab. y Yumbo con 79.977 hab. Estas serian las poblaciones potencialmente beneficiadas con esta línea de transporte. En la Figura 1 se muestra el corredor mencionado, que tiene una longitud de 16 km. Al área metropolitana de Cali se suman además los municipios de Jamundí y Palmira

Con información tomada en campo se determinó la demanda actual de pasajeros entre las ciudades de Cali y Yumbo. El resumen de los datos y lo esperado a corto, mediano y largo plazo se aprecia en la Tabla 1. Con la información de campo se obtuvo también que la velocidad media de marcha (Box y Oppenlander, 1985) por carretera es de 40 Km. /h, con un tiempo de marcha promedio 22 min.

## **3. MODELO OPERACIONAL PROPUESTO**

Para la elaboración del modelo operacional de este proyecto adaptó la metodología utilizada para proyectos de rutas de autobuses del “Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte” (Cal y Mayor, 1998)

En ella hay dos tipos de datos: el diseño de la oferta y el análisis de las condiciones ofrecidas. Un factor que se tiene en ambos es el nivel de servicio de operación. Este parámetro se considera dos variables; comodidad y accesibilidad temporal.



**Figura 1:** Esquema del corredor férreo Cali-Yumbo (Ferrovias, 2000)

### 3.1. Comodidad

Este índice se obtiene al considerar una densidad de ocupación del área útil para transporte de pasajeros de pie, resultando en la capacidad del proyecto de acuerdo con el respectivo nivel de servicio. Para la selección del nivel de servicio se tienen en cuenta indicadores (Bovy, 1974) como: de densidad de ocupación del vehículo y tiempo de viaje. Ver Tabla 2

**Tabla 1:** Información de demanda

| Aspectos considerados                           | Años      |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   | 2005      | 2007      | 2010      | 2015      |
| Promedio de pasajeros movilizados en hora pico  | 1.637     | 1.681     | 1.748     | 1.859     |
| Promedio de pasajeros movilizados en hora valle | 141       | 144       | 150       | 160       |
| Total pasajeros movilizados en las horas pico   | 14.733    | 15.133    | 15.733    | 16.732    |
| Total pasajeros movilizados en las horas valle  | 1.265     | 1.299     | 1.350     | 1.436     |
| Total pasajeros movilizados en un día           | 15.998    | 16.432    | 17.083    | 18.168    |
| Total pasajeros transportados en un año         | 5'839.088 | 5'997.560 | 6'235.270 | 6'631.452 |

De acuerdo a las características de las unidades (TT; 2005), las cuales pueden transitar con un coche remolque en el medio y dos coches motor en los extremos, se utiliza una densidad de ocupación para pasajeros que es la mitad del valor crítico de las unidades. Ver Tabla 3. Luego, para la selección del nivel de servicio se tuvo una densidad de 3.0 pas/m<sup>2</sup> y una duración de viaje menor a 40 min. lo que sugiere una calidad de servicio regular, D.

**Tabla 2:** Clasificación de la calidad del servicio (Bovy, 1974)

| Calidad del Servicio | Densidad de Ocupación (pas/m <sup>2</sup> ) | Duración del Viaje (min.) |
|----------------------|---|---------------------------|
| Excelente (A)        | Todos Sentados                              | -                         |
| Optimo (B)           | 0 a 1,5                                     | <90                       |
| Bueno (C)            | 1,5 a 3,0                                   | <60                       |
| Regular (D)          | 3,0 a 4,5                                   | <40                       |
| Malo (E)             | 4,5 a 6,0                                   | <10                       |
| Pésimo (F)           | > 6,0                                       | <2                        |

Una vez definido el nivel de servicio, se fija la capacidad del proyecto, que es el volumen de pasajeros posible de ser transportados por el vehículo seleccionado, dentro

de las condiciones consideradas para la prestación del transporte con el nivel de servicio fijado. Por medio de la ecuación (1) se estima la capacidad del proyecto.

(1)

Donde:

- Ls: capacidad de proyecto para el nivel de servicio seleccionado
- A: número de asientos ofrecidos (pasajeros sentados)
- B: área útil (pasajeros de pie)
- ds: densidad de ocupación para los pasajeros de pie adoptados para el nivel de servicio seleccionado.

**Tabla 3:** Disponibilidad de plazas unidades (TT; 2005)

| Plazas           | Coche | Unidad (dos coches) |
|------------------|-------|---------------------|
| Sentados         | 48    | 96                  |
| De Pie (6pas/m2) | 78    | 156                 |
| Total            | 126   | 252                 |

Desarrollando la ecuación (1) con los datos que corresponden a la Tabla 3 y con el área útil, que se obtiene de dividir la capacidad máxima de pasajeros de pie entre la densidad de ocupación máxima, se obtiene:

$$Ls = 48 \text{ pas} + \frac{78}{6} \text{ m}^2 \times 3 \frac{\text{pas}}{\text{m}^2} = 87 \frac{\text{pas}}{\text{coche}}$$

#### 4.2 Accesibilidad temporal

Este parámetro considera la frecuencia de viajes y la disposición del usuario cuyo indicador representa el tiempo medio de espera del vehículo.

En la Tabla 4 aparecen los indicadores de accesibilidad temporal (Colin, 1976) de los servicios de transporte público. Con base en esta tabla, con un nivel de servicio regular y la densidad de población de la ciudad de Cali; 4297 hab./km<sup>2</sup> (AC, 2005), se selecciona un intervalo entre unidades de 12 min. en horas pico y 20 min. en hora valle.

**Tabla 4:** Indicador de accesibilidad temporal en transporte público (Colin, 1976)

| Densidad Población<br>(hab./Km <sup>2</sup> ) | > 4000  |         | 3000 a 4000 |         | 2000 a 3000 |         | 750 a 2000 |         |
|---|---------|---------|-------------|---------|-------------|---------|------------|---------|
| Intervalo Unidades<br>(min.)                  | pico    | valle   | pico        | valle   | pico        | valle   | pico       | valle   |
| Excelente                                     | < 2     | < 5     | < 4         | < 9     | < 9         | < 14    | < 9        | < 14    |
| Optimo  | 2 a 4   | 5 a 9   | 5 a 9       | 10 a 14 | 10 a 14     | 15 a 19 | 10 a 14    | 15 a 29 |
| Bueno   | 5 a 9   | 10 a 14 | 10 a 14     | 15 a 19 | 15 a 24     | 20 a 30 | 15 a 24    | 30 a 44 |
| Regular                                       | 10 a 14 | 15 a 20 | 15 a 19     | 20 a 29 | 25 a 39     | 31 a 45 | 25 a 39    | 45 a 59 |
| Malo  | 15 a 20 | 21 a 30 | 20 a 30     | 30 a 60 | 40 a 60     | 46 a 60 | 40 a 60    | 60 a 90 |
| Pésimo  | > 20    | > 30    | > 30        | > 60    | > 60        | > 60    | > 60       | > 90    |

#### 4.3 Análisis de frecuencias

El proceso utilizado para el cálculo de las frecuencias es a partir del total de pasajeros transportados. En este método, no se necesita de una delimitación precisa del tramo crítico de la ruta, ya que será considerado en términos de sus efectos cuantitativos con relación a la demanda total del viaje a través del índice de rotación (Cal y Mayor, 1998).

La base para este método es el total de pasajeros transportados en el periodo de análisis, de acuerdo a la ecuación (2).

$$\varphi = \frac{VP}{H} \quad (2)$$

Donde:

$\varphi$  : flujo medio de pasajeros en el periodo  
 VP: total de pasajeros en el periodo  
 H: duración del periodo.

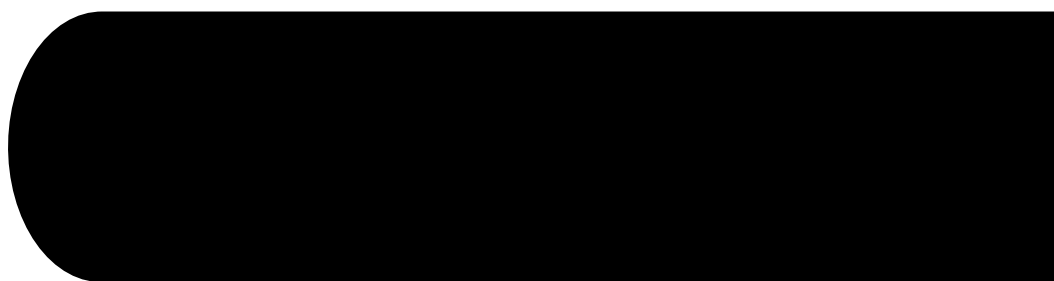
Para el cálculo del intervalo entre vehículos se utiliza la ecuación (3), cuando se trabaja con la ocupación media en el tramo crítico:

$$I = \frac{\bar{k} * \overline{OTc}}{\varphi} \quad (3)$$

Donde:

$I$  : intervalo entre vehículos  
 $\bar{k}$  : índice de rotación medio en el periodo.  
 $\overline{OTc}$  : ocupación media en el tramo crítico en el periodo.  
 $m$  : número de viajes en el periodo.

Fijando como condición que la ocupación crítica media



no debe superar la capacidad de proyecto,  $L_s$ , definida a partir del correspondiente nivel de servicio seleccionado para el periodo,



, la expresión queda como se muestra en la ecuación (4).

$$I \leq \frac{L_s * \bar{k}}{\varphi} \quad (4)$$

Habiendo seleccionado un nivel de servicio D, el intervalo entre unidades en minutos, trabajando con el total de la demanda en horas pico y horas valle y la duración del periodo que es de 60 min., se encuentra el flujo medio de pasajeros en el periodo de acuerdo a la ecuación (2). Teniendo el flujo medio de pasajeros se puede hallar el índice de rotación medio en el periodo por medio de la ecuación (5).

$$\bar{k} \geq \frac{I \times \varphi}{L_s} \quad (5)$$

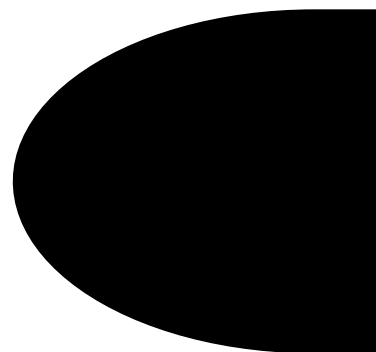
Este

índice

de

rotación

medio



da como resultado que se estuviese trabajando al límite de capacidad del proyecto, para esta condición se halla la frecuencia mínima de despachos que es el inverso del intervalo entre vehículos y se obtiene con la ecuación (6).

$$F = \frac{60 * \varphi}{L_s * k} \quad (6)$$

Donde:

F: frecuencia en vehículos por hora.

Aplicando este procedimiento para los diferentes periodos del día y para cada uno de los sentidos del viaje, se calculan las frecuencias, un ejemplo de estos resultados se aprecian en la Tabla 5.

Esta frecuencia daría como resultado que la ocupación crítica estaría en un 50% de la carga del proyecto. Con esta distribución de frecuencias y utilizando unidades completas, la capacidad de transporte de pasajeros sería la siguiente:

$$L_{S1} = (87 \text{ pas/coche}) \times (2 \text{ coche/unidad}) = 174 \text{ pas/unidad}$$

Con esta cantidad de pasajeros transportados por vehículo y teniendo un despacho de 5 vehículos en la hora, el total de pasajeros transportados sería:

$$\text{Total pasajeros transportados hora pico} = (174 \text{ pas/unidad}) \times (5 \text{ coches/hr}) = 870 \text{ pas/hr}$$

Para continuar con el diseño operacional del sistema se considera que este tiene un grado de aceptación del 90% de la demanda (Ferrovias, 2000). Teniendo en cuenta la cantidad de pasajeros movilizados al final del periodo de diseño en el año 2015 solo sería necesaria la compra de vehículos remolque sin tener que aumentar la frecuencia de despachos para seguir manteniendo el mismo nivel de servicio.

**Tabla 5:** Cálculo de la frecuencia de despacho de vehículos, Cali-Yumbo

| Periodo          | Total Pasajeros Movilizados | Flujo Medio de Pasajeros | Intervalo entre Vehículos | Índice de Rotación Medio | Frecuencia (Coche/hr) |
|------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 06:30 a 07:30 AM | 804                         | 13,40                    | 12                        | 1,85                     | 5                     |
| 10:00 a 11:00 AM | 71                          | 1,18                     | 20                        | 0,27                     | 3                     |
| 03:00 a 04:00 PM | 68                          | 1,13                     | 20                        | 0,26                     | 3                     |
| 05:30 a 06:30 PM | 846                         | 14,10                    | 12                        | 1,94                     | 5                     |

#### 4.4 Dimensionamiento de la flota

La operación de una ruta de transporte público exige que, en la situación de máxima solicitud haya disponibilidad de vehículos en número suficiente, a esto se le conoce como flota efectiva para garantizar el intervalo calculado para el respectivo nivel de servicio. Además debe existir una flota de reserva para suplir eventuales fallas en la operación y para permitir la rotación de vehículos en escala de mantenimiento preventivo, esta flota por lo regular es el 10% de la flota efectiva.

Por lo tanto la flota total necesaria para la operación de una ruta se describe en la ecuación (6).

$$(6)$$

Donde:

FT : flota total.

FE : flota efectiva para la operación en los periodos pico.



Dentro de las rutas de transporte público existe un movimiento cíclico de los vehículos de forma que, después de iniciado el viaje y transcurrido un determinado intervalo de tiempo, el vehículo retorna a la posición original para iniciar un nuevo viaje, a este periodo de tiempo se le conoce como tiempo de ciclo  $T_c$  y comprende los tiempos de viaje y los tiempos en las terminales de los extremos de la ruta.

Como la demanda varia con el tiempo esto implica que se debe hacer un ajuste constante de las flotas en operación en los diferentes periodos del día, a estas flotas se les denomina flota operacional  $FO$  del periodo.

Para determinar la flota operacional del sistema se deben comparar los tiempos de ciclo con las duraciones de los periodos típicos  $H$ , de los cuales pueden resultar dos situaciones, el caso en que  $H$  es mayor o igual al  $T_c$  y el caso en que  $H$  es menor que el  $T_c$ .

Para el periodo de ciclo se tiene en cuenta tanto el viaje de ida como el viaje de regreso, así como las paradas y las demoras en las terminales. De acuerdo a las características de las unidades que alcanzan una velocidad máxima de 100 km/h y que el concesionario de la vía, recomienda que la velocidad máxima sea de 80 km/h, se supone una velocidad de 50 km/h, el recorrido entre Cali y Yumbo se podría realizar en 20 min. de tiempo de recorrido, para que sea competitivo con el autobús.

Con el estudio de ascensos y descensos se determinó que los mayores porcentajes de ascensos y descensos se concentran en la Terminal de Cali y en Yumbo, esto indicaría que bastaría con hacer estas paradas y que el total de pasajeros sea absorbido por el Sistema de Transporte Masivo-MIO en Cali y por rutas locales en la ciudad de Yumbo

Siendo consecuentes con metodología para autobuses y adaptándola al sistema férreo, se calculan las demoras por paradas y se encuentra la velocidad y el tiempo de marcha. Para calcular el tiempo de paradas por ascenso y descenso de pasajeros se utiliza la Tabla 6.

**Tabla 6:** Demora por ascensos y descensos (Sedesol, 2000)

| Vehículo                | segundos por pasajero |          |
|-------------------------|-----------------------|----------|
|                         | ascenso               | descenso |
| Autobús (puerta 1.0 mt) | 2,0                   | 1,3      |
| Autobús (puerta 0.5 mt) | 3,0                   | 2,0      |
| Microbús                | 3,0                   | 2,0      |
| Combi                   | 2,0                   | 2,0      |

De acuerdo a estos datos se puede trabajar con una demora por ascenso de pasajero de 2 segundos y descenso de pasajero de 1.3 segundos.

Al realizar la parada en las terminales la demora por descenso y ascenso de pasajeros. En hora pico sería la siguiente:

$$\text{Demora por Ascenso de Pasajeros} = 2 \frac{\text{seg}}{\text{pas}} * 174 \text{ pas} = 348 \text{ seg} = 5.8 \text{ min}$$

$$\text{Demora por Descenso de Pasajeros} = 1.3 \frac{\text{seg}}{\text{pas}} * 174 \text{ pas} = 226.2 \text{ seg} = 3.77 \text{ min}$$

El tren estaría detenido por un periodo de 10 min., como los despachos son cada 12 minutos y un vehículo se demora en hacer el trayecto 20 min. se considero en demorar cada vehículo el tiempo necesario hasta el siguiente despacho, aumentado así el tiempo detenido en la estación a 16 min, así se determina que el  $T_c$  es:

$$T_c = \text{Tiempo Ida} + \text{Tiempo Regreso} + \text{Paradas} = 20 \text{ min} + 20 \text{ min} + (16 \times 2) \text{ min} = 72 \text{ min}$$

Con este  $T_c$  y sabiendo que,  $H = 3 \text{ hr}$ , que equivale tanto a hora pico como a hora valle, se trabaja con el caso de,  $H$  mayor o igual a  $T_c$ . Así, la determinación de la flota es suficiente para sustentar el periodo equivalente al tiempo de ciclo, pues a partir del instante de retorno del primer vehículo, no hay necesidad de nuevos vehículos para la operación. De esta forma la determinación de la flota operacional del periodo en estudio se realiza a través de la ecuación (7).

$$FO = \frac{T_c}{I} \quad (7)$$

Reemplazando los valores correspondientes se tiene:

Con la determinación de la  $FO$ , se puede determinar la  $FE$  destinada a la operación de una ruta para la situación de mayor solicitud. De esta manera la  $FE$  es igual a:

$$FE = 6 \text{ unidades de 2coches c/u}$$

Ahora la  $FT$  es igual a:

$$FT = FE + FR = 6 + (FE \times 0.10) = 6.6 \text{ unidades} = 7 \text{ unidades de 2coches c/u}$$

Despachando en las horas pico un tren cada 12 min. se requeriría mover 3 trenes en cada sentido en el lapso de 30 minutos, por lo tanto la flota para esta demanda será de 3 unidades de dos coches cada uno en cada sentido, teniendo un vehículo más en cada estación para garantizar que la operación sea continua.

De acuerdo a estos despachos sería necesario hacer cambiavías automatizados en tres puntos del recorrido, en la mitad y en las cuartas partes de la vía. Si la demanda lo justifica se podría construir doble línea en todo el trayecto y suprimir los cruces.

Por otra parte, para el modelo operacional en hora valle, sería necesario la utilización de 2 unidades de dos coches cada uno, en cada sentido, con despachos cada 20 minutos.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un sistema de tren de cercanías es un alimentador para cualquier sistema de transporte urbano y sería un gran complemento para el proyecto de transporte; Masivo Integrado Occidente-MIO, logrando así la articulación de dos tecnologías en función del desarrollo del transporte en Santiago de Cali y su área metropolitana.

Los principales sitios de ascenso y descenso de pasajeros están ubicados en las cabeceras del recorrido. Por esta razón no se plantean por el momento estaciones intermedias.

Se recomienda que se realice un estudio de origen y destino estratificado para conocer la demanda potencial de los posibles usuarios y de la aceptación del sistema, ya que en el proyecto se trabajó con la demanda satisfecha y no se tuvo en cuenta esta población.

Con base en el modelo operacional propuesto se recomienda profundizar en el tema de cambiavías automatizados para la operación del sistema, esto con el fin de poder tener trenes circulando al mismo tiempo en los dos sentidos.

El sistema es viable técnicamente, pues se cuenta con todas las necesidades de infraestructura, como son estaciones, vías, etc. Solo se necesita una rehabilitación mínima de las estaciones terminales y rehabilitar un tramo de vía que se encuentra en rieles de 75 libras por yarda y en traviesas de madera. Además de la implementación de los cambiavías mencionados anteriormente.

Se recomienda hacer un estudio económico con base en el modelo operacional aquí planteado para conocer la viabilidad económica del proyecto.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AC – Alcaldía de Santiago de Cali. (2005). *Página electrónica*: [www.cali.gov.co](http://www.cali.gov.co). Cali, Colombia
- Bovy, H. (1976). *Les transports en commun*. Apostila do curso “*Amenagement du territoire et transports II*”. ITEP. Institut. De Technique des transports, Lausana, France.
- Box, C y Oppenlander, J. (1985). *Manual de Ingeniería de Tránsito*. Cuarta edición. Mexico DF, Mexico.
- Cal y Mayor, (1998). *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte*. Instituto de Desarrollo Urbano-IDU. Bogota., Colombia.
- Colin, A. (1976). *Transportation Research board – 606*. TRB. Estados Unidos.
- Ferrovias. (2000). *Fundamentos para el estudio de viabilidad del tren de cercanías Cali – Valle del Cauca*. Instituto Colombiano de Vías Férreas. Cali. Colombia.
- Hernández et al. (1999). *Sistema de Transporte Masivo*. Tesis. Universidad del Valle. Cali. Colombia.
- Sedesol-Secretaría de Desarrollo social. (2000). *Manual de operación del transporte público. Programa de Asistencia Técnica en Transporte Urbano para las Ciudades Medias Mexicanas*. Dirección General de Ordenación del territorio. México DF. México.
- TT-*Todo trenes*. (2005). *Página electrónica*: [www.todotrenes.com](http://www.todotrenes.com). España.