

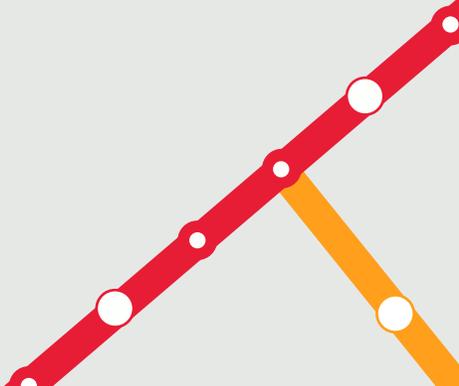
Proyecto de Tesis

# Diseño eficiente de servicios expresos en redes BRT

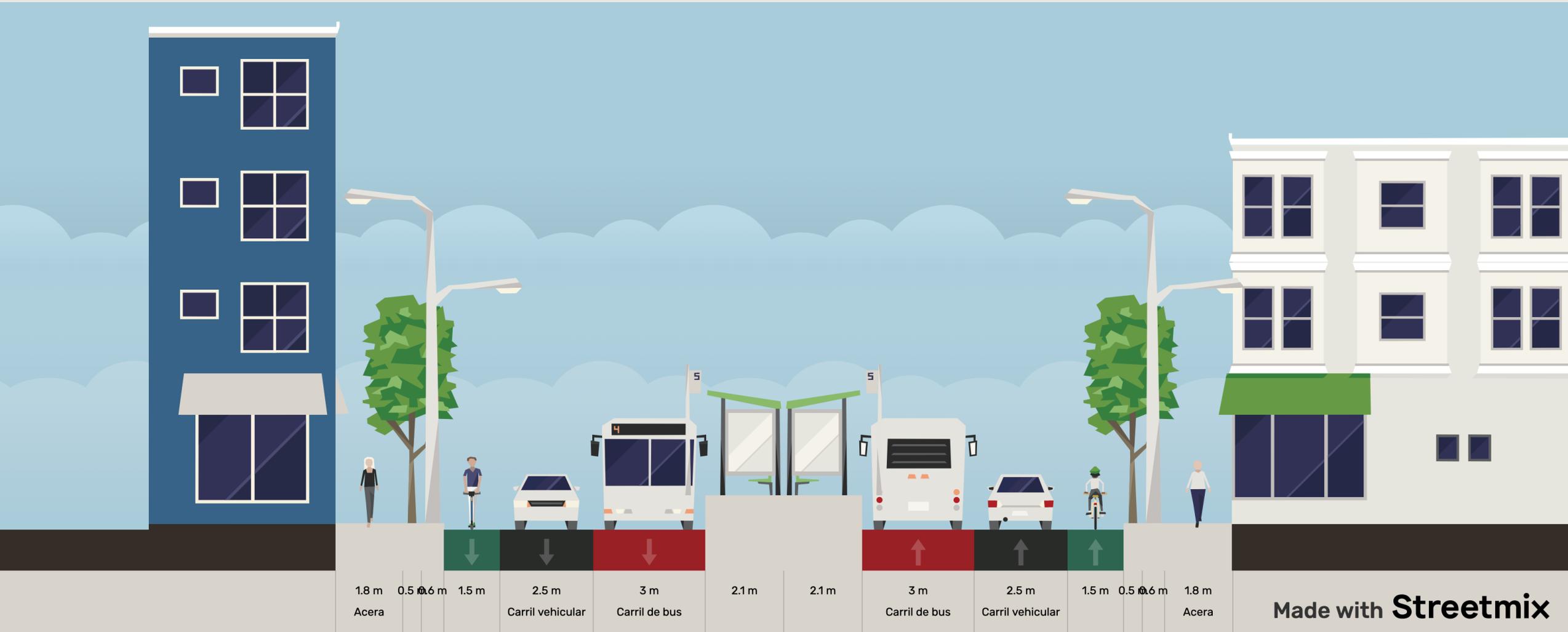
Iván Daniel Moreno Díaz

Profesores Homero Larrain y Juan Carlos Muñoz

Abril de 2020



# El BRT como solución de transporte



# El BRT como no-solución de transporte



# Servicios expresos en BRT



Tiempo de viaje	●	●	●	○
Transbordos	●	●	●	○
Tiempo de ciclo	●	●	●	○
Capacidad	●	●	●	○
Costo de operación	●	●	●	○

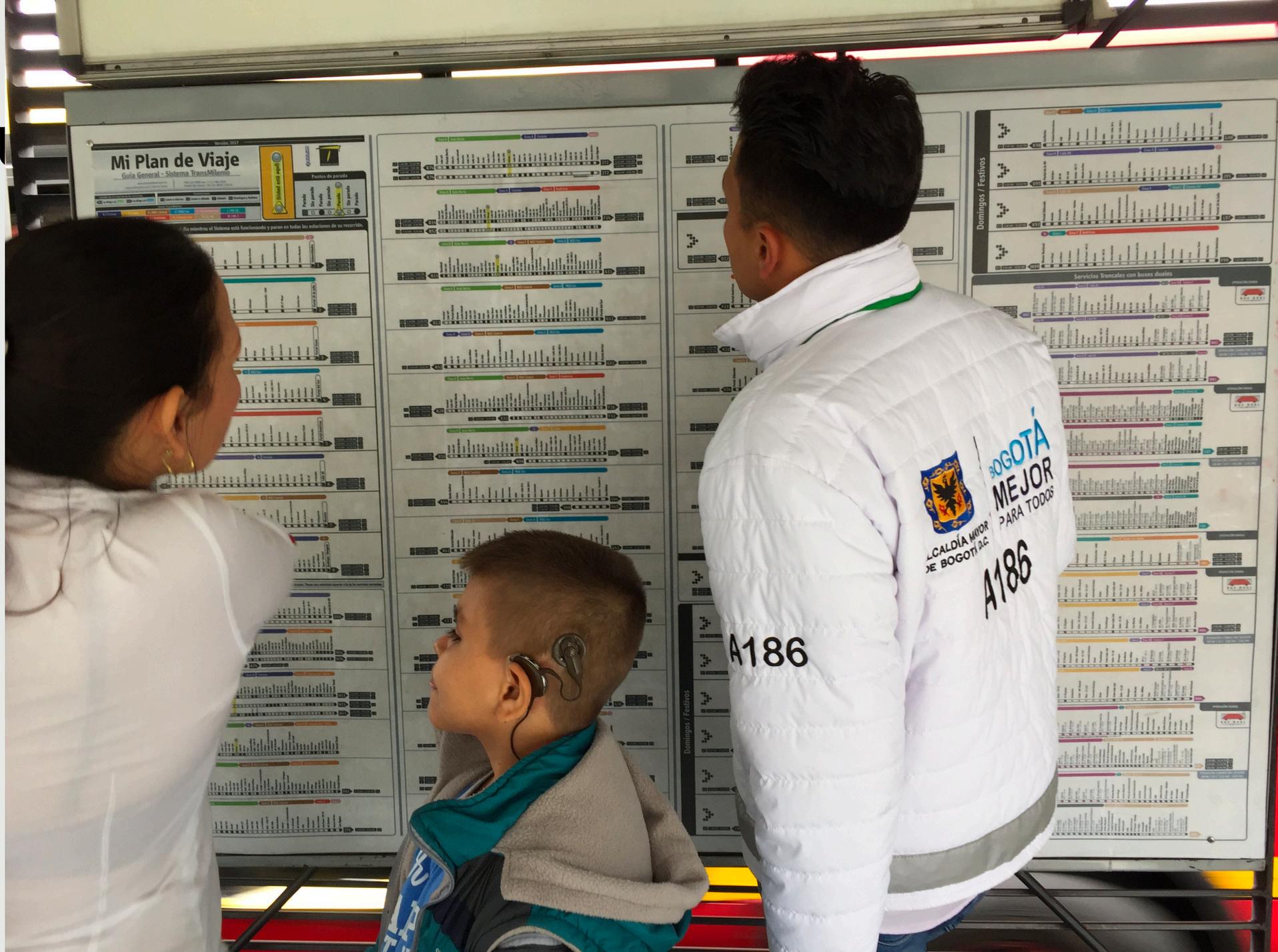
# Servicios expresos en BRT



## ***¿Cuándo y dónde? Larrain y Muñoz (2016)***

- Cuando el tiempo de parada es *alto*
- Cuando hay *más* viajes y están *más* concentrados
- Cuando el arco crítico está relativamente *más* cargado
- Cuando los viajes son *más largos*
- Cuando los buses tienen *menos* capacidad
- Cuando los VST son *más* atractivos

¿C?



r Inc.

¿Cuál es el estado del arte?

NP-  
hard

**Complejidad  
computacional**



# ¿Cuál es el estado del arte?

Autor	Año	Aporte
Wang et al	2018	Encontrar servicios expresos para un corredor a través de un modelo mixto entero no lineal
Soto et al	2017	Considerar capacidad de los buses, transbordos, y dos modelos de comportamiento de los usuarios (determinístico y estocástico)
Chen et al	2015	Considerar tiempo de viaje estocástico, y capacidad de los vehículos. Utiliza Etrategia de Colonia de Hormigas y un Método de Monte-carlo.
Chiraphadhanakul y Barnhart	2013	Esquema de dos servicios paralelos, uno corriente y uno expreso
Larrain	2013	<b>Heurísticas de diseño de trazados, configuración de red. Mejora en las heurísticas de ajuste de capacidad.</b>
Leiva et al	2010	<b>Considerar frecuencias, transbordos, y tipo de vehículo para los diseños, minimizando los costos de los usuarios y del operador. La restricción de capacidad se añade iterativamente.</b>
Ulusoy et al	2010	Modelo de comportamiento estocástico para un único servicio expreso

# Diseño en periodos consecutivos

- Existen matrices de demanda distintas para cada periodo.
- Los modelos propuestos hasta ahora en la literatura solo consideran la matriz de la hora punta del sistema.
- Si diseñamos servicios eficientes solo para la hora punta, la efectividad global del esquema será menor.



Proponemos diseñar **los recorridos** a partir de la matriz de demanda de la hora punta, y optimizar **las frecuencias** para cada periodo homogéneo de demanda.

**Eficiente:** que sea capaz de resolver una red de tamaño real.

**Útil:** que encuentre soluciones *mejores* que las actuales.

**Herramienta de diseño de servicios expresos**

**Aplicable:** que requiera información básica de entrada.

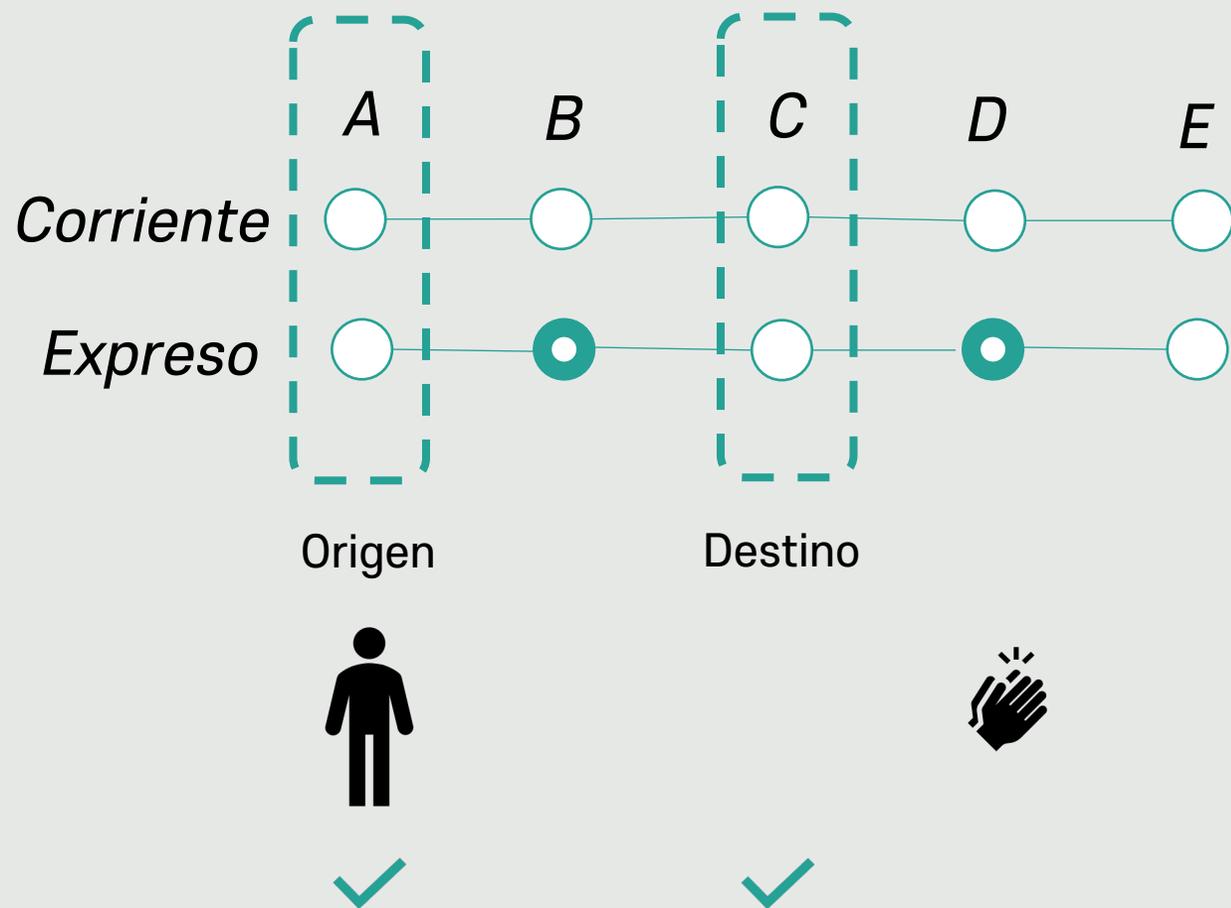
**Realista:** que considere la congestión, la flota, y los tiempos de viaje.

Objetivo General



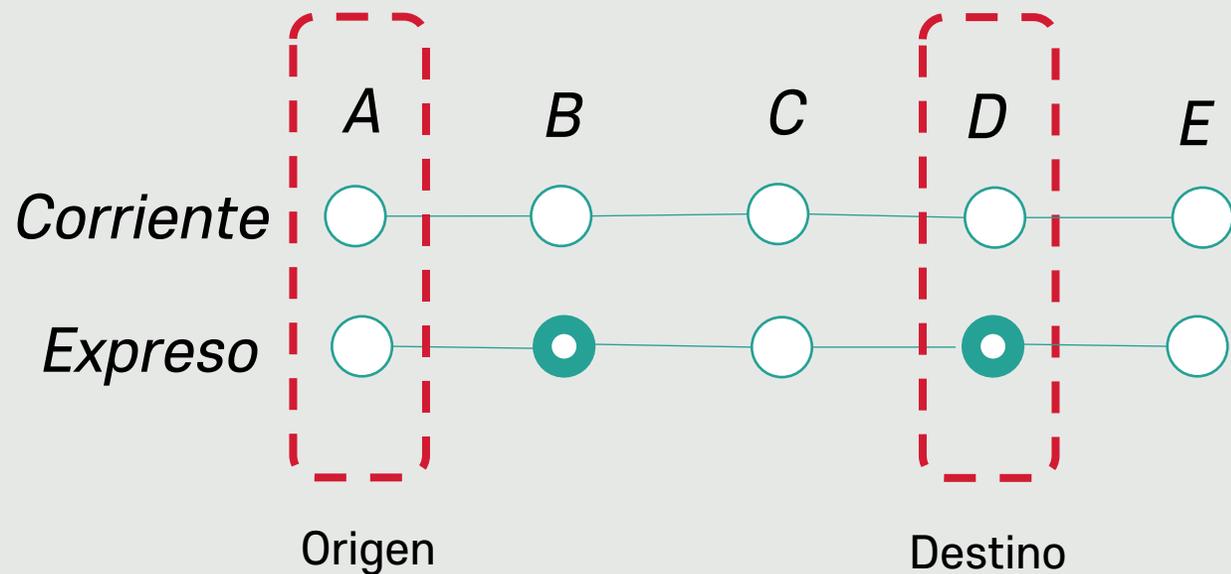


# Análisis de involucrados



Definición del problema

# Análisis de involucrados



Definición del problema

# Análisis de actores

	<b>Operador</b>	<b>Pasajero beneficiado</b>	<b>Pasajero afectado</b>
	✓ Reducción en el tiempo de ciclo	✓ Reducción en el tiempo de viaje	✗ Aumento en el tiempo de viaje
Variables relacionadas	Tiempos de parada, costo de operación, y frecuencia ofrecida	VST de viaje, tiempo de detención, frecuencia, y demanda	VST de espera, regularidad, frecuencia, y demanda.

Definición del problema



# Restricciones

Este esquema debe ser tal que minimice los costos sociales, sujeto a:

- La capacidad de los buses
- Que debe existir una coherencia temporal entre los distintos periodos
- Un modelo de comportamiento. En nuestro caso, consideraremos que los pasajeros conocen y utilizan un conjunto de líneas atractivas.

# El problema de la capacidad

**Iteración i**

Cap=80 pax/bus

Línea	Frecuencia asignada (bus/h)	Capacidad (pax/h)	Demanda (pax/h)
1	4	320	300
2	3	240	<b>272</b> ← $\check{f}_2 = 4$
3	6	480	413
4	7	560	323

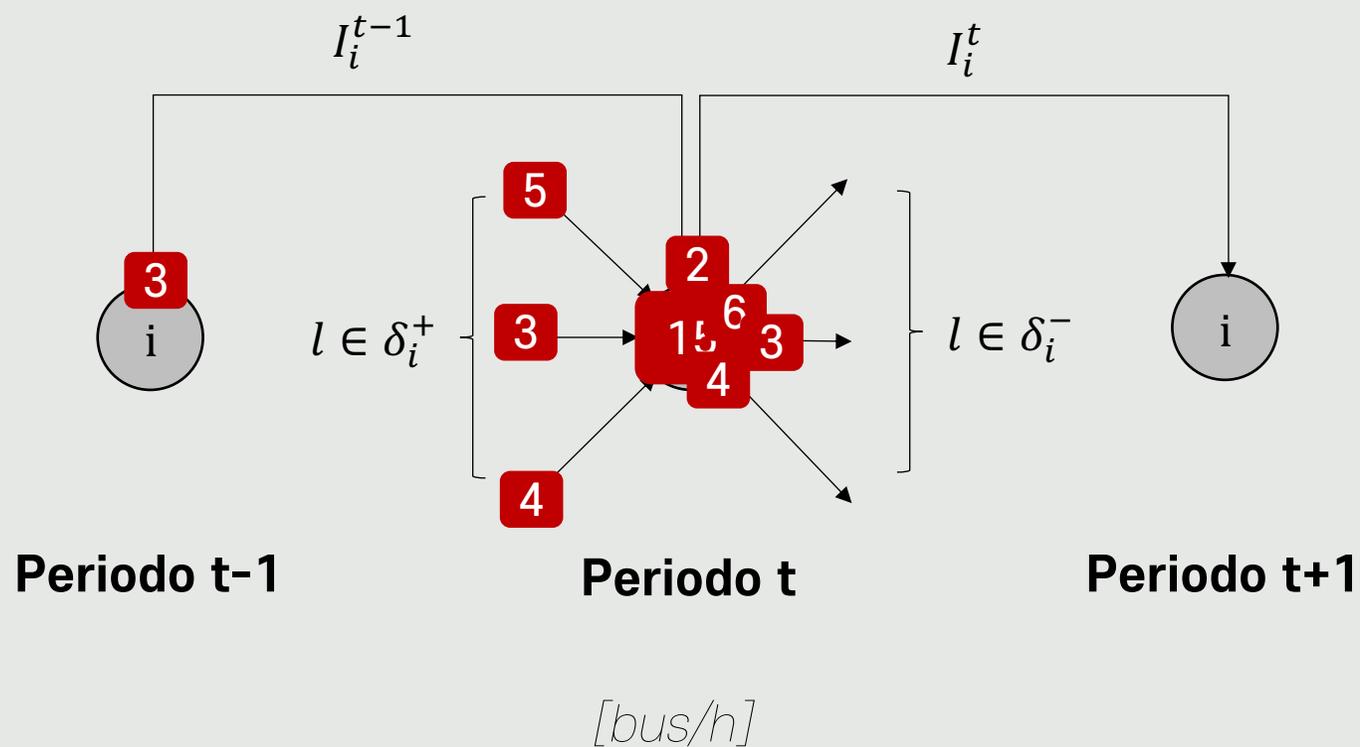
Definición del problema: Restricciones

# El problema de la capacidad

- En cada iteración del problema, ajustamos la frecuencia mínima que puede tener una ruta a partir de la demanda que está asignada.
- Esta heurística fue planteada primero en Leiva et al (2010), y está incluida en nuestro modelo de optimización.

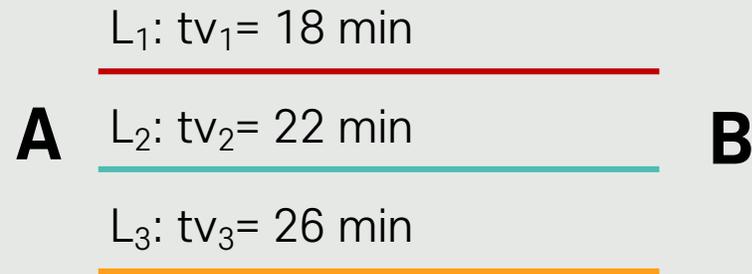
$$\check{f}_l \leq f_l^t \quad \forall l \in L, \forall t \in T$$

# Dimensión temporal del problema



Definición del problema: Restricciones

# Modelo de comportamiento de los usuarios



$$f_1 = f_2 = f_3 = 5 \text{ bus/h}$$
$$\lambda = 0.5$$

## Concepto de líneas atractivas (Chriqui, 1975)

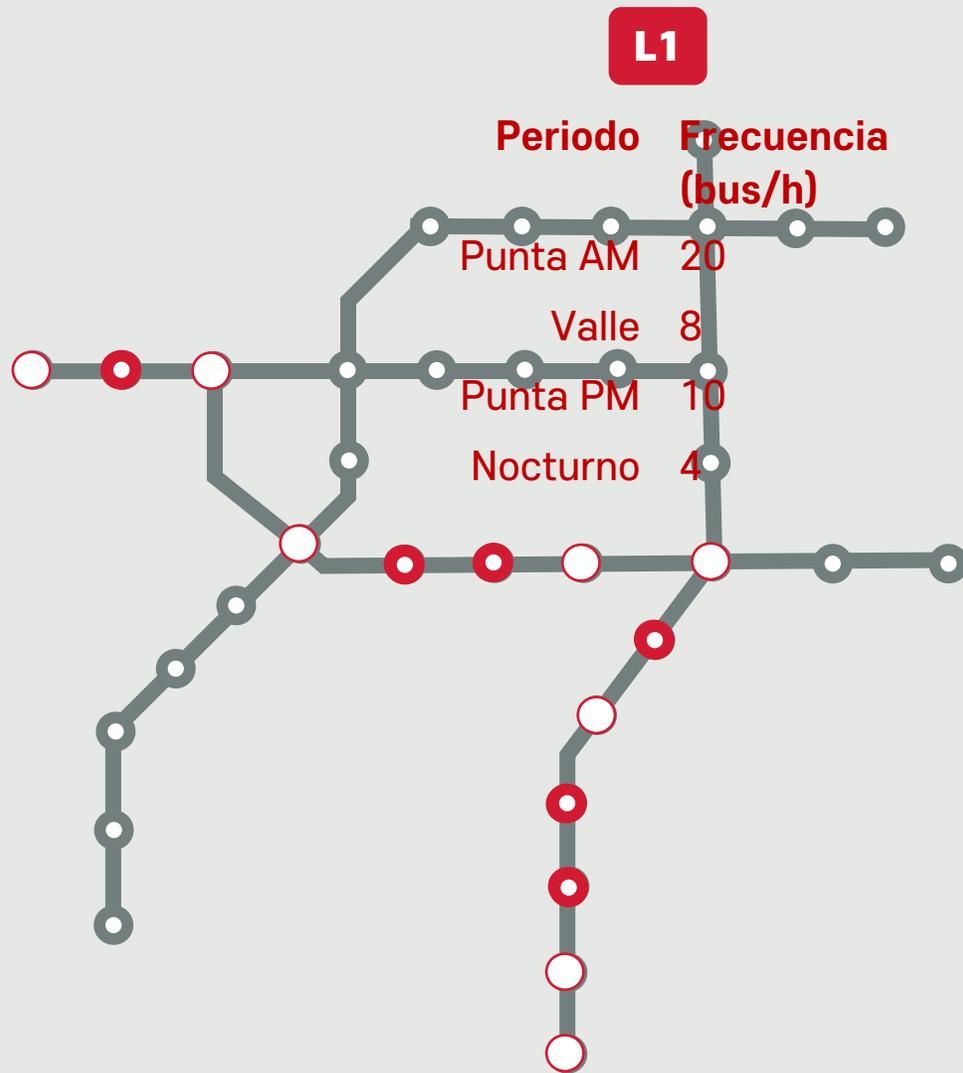
Si incluimos a  $L_1$ , el Tiempo Esperado de Viaje (TEV) es 24 min

Si incluimos a  $L_1$  y  $L_2$ , el TEV es 23 min

Si incluimos a  $L_1$ ,  $L_2$ , y  $L_3$ , el TEV es 26 min

En este caso, el conjunto de líneas atractivas es  $\{L_1, L_2\}$

Adaptado del curso de Equilibrio en Redes de Transporte



Heurística de diseño de trazado de servicios

Heurística de diseño de paradas de servicios expresos

Modelo de optimización de frecuencias de servicios expresos en periodos consecutivos





# Idea de heurística de solución

*Recorrido  $r$*

● *No omisible*

●  $Ah_i^r$

● ...

● *No omisible*

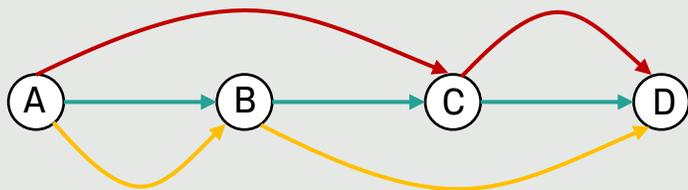
●

**¿Cómo saber si es productivo omitir una parada?**

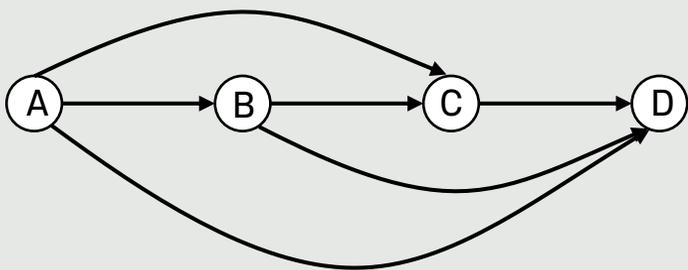
Podemos encontrar indicadores de ahorro potencial para cada estación, que nos indiquen si el impacto global de omitir una parada en ella es positivo o no. Este enfoque de solución fue propuesto en el trabajo doctoral de Larrain (2013).

Heurística de selección de paradas en servicios expresos

# Asignación a rutas mínimas



Grafo de segmentos de línea



Grafo de secciones de ruta  $G(N,S)$

## Adaptado de de Cea y Fernández (1988)

1. Encontrar el conjunto de líneas atractivas para cada arco en  $G(N,S)$
2. Para cada par origen-destino, encontrar la ruta mínima sobre  $G(N,S)$
3. Asignar la demanda correspondiente proporcional a la frecuencia ofrecida
4. Esto me permitirá conocer los tiempos esperados de viaje de toda la red.

<b>Input</b>	Conjunto de rutas expresas
<b>Output</b>	Conjunto de servicios expresos
<b>Herramientas</b>	Modelo lineal de optimización
<b>Restricciones</b>	Conjunto de líneas atractivas, equilibrio espacial y temporal, flota fija, y capacidad en buses

**Modelo de optimización de frecuencias de servicios en periodos consecutivos**



# Restricciones

$$f_l^{s,t} \leq f_l^t \quad (1)$$

Modelo de comportamiento

$$\forall s \in S, \forall l \in L, \forall t \in T$$

$$f_l^{s,t} \geq 0$$

$$\frac{I_i^{t-1}}{D_t} + \sum_{l \in \delta_i^+} f_l^t = \frac{I_i^t}{D_t} + \sum_{l \in \delta_i^-} f_l^t \quad (2)$$

Balance espacial y temporal de buses

$$\forall t \in T, \forall i \in N$$

$$I_i^t = 0 \quad (3)$$

Propiedad de Inventario

$$\forall t \in T, \forall i \in R$$

$$f_l^t = \frac{x_l^t}{tc_l} \quad (4)$$

Relación frecuencia-buses asignados

$$\forall l \in L, \forall t \in T$$

Modelo de optimización de frecuencias de servicios en periodos consecutivos

# Restricciones

$$\sum_{l \in L} x_l^t + I_i^t \leq B \quad (5) \quad \text{Restricción de flota}$$

$\forall t \in T$

$$\check{f}_l \leq f_l^t \quad (6) \quad \text{Restricción de capacidad}$$

$\forall l \in L, \forall t \in T$

$$x_l^t \in \mathbb{N} \quad (7) \quad \text{Naturaleza de las variables}$$

$\forall l \in L, \forall t \in T$

# Heurística de ajuste de capacidad

- Es necesario considerar la restricción de capacidad

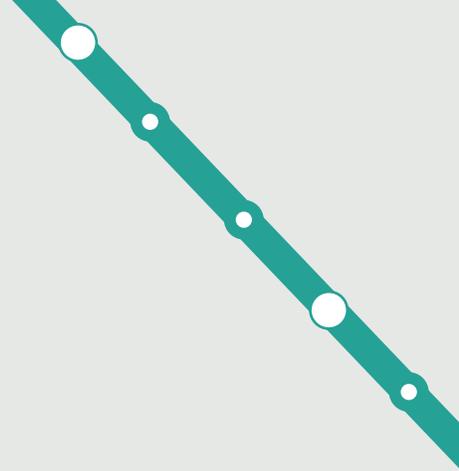
$$\check{f}_l \leq f_l^t, \forall l \in L, \forall t \in T$$

- Inicialmente,  $\check{f}_l = 0 \forall l \in L$ . Cada vez que resolvemos el modelo, verificamos qué líneas tienen una capacidad menor a la demanda:

$$d_l^i = cap_b f_l - \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} V_s^w \zeta_l^i \frac{f_l^s}{\sum_{m \in L} f_m^s}, \quad \forall l, m \in L, \forall i \in A$$

Para verificar la eficiencia de nuestra herramienta, proponemos generar un esquema de servicios expresos para **Transmilenio**, y comparar el costo total de la solución encontrada con algunos *benchmarks*:

1. El costo actual de la operación de Transmilenio
2. El costo de operar con servicios corrientes únicamente
3. El costo de operar un esquema donde la restricción de capacidad se añade directamente al modelo de optimización.



Proyecto de Tesis

# Diseño eficiente de servicios expresos en redes BRT

Iván Daniel Moreno Díaz

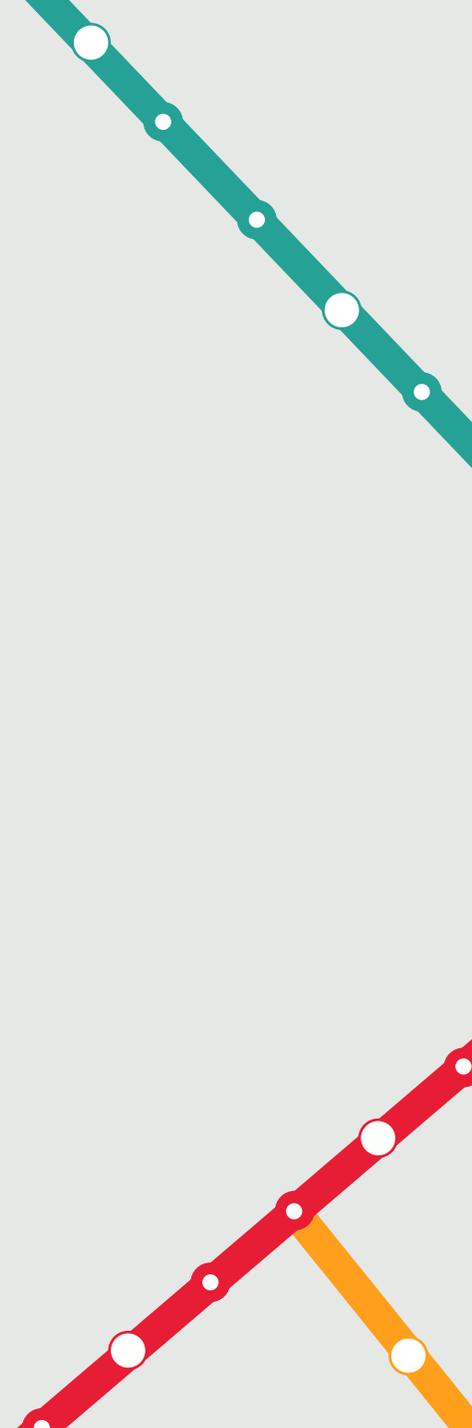
Profesores Homero Larrain y Juan Carlos Muñoz

Abril de 2020



# Diseño eficiente de servicios expresos en redes BRT

Anexos

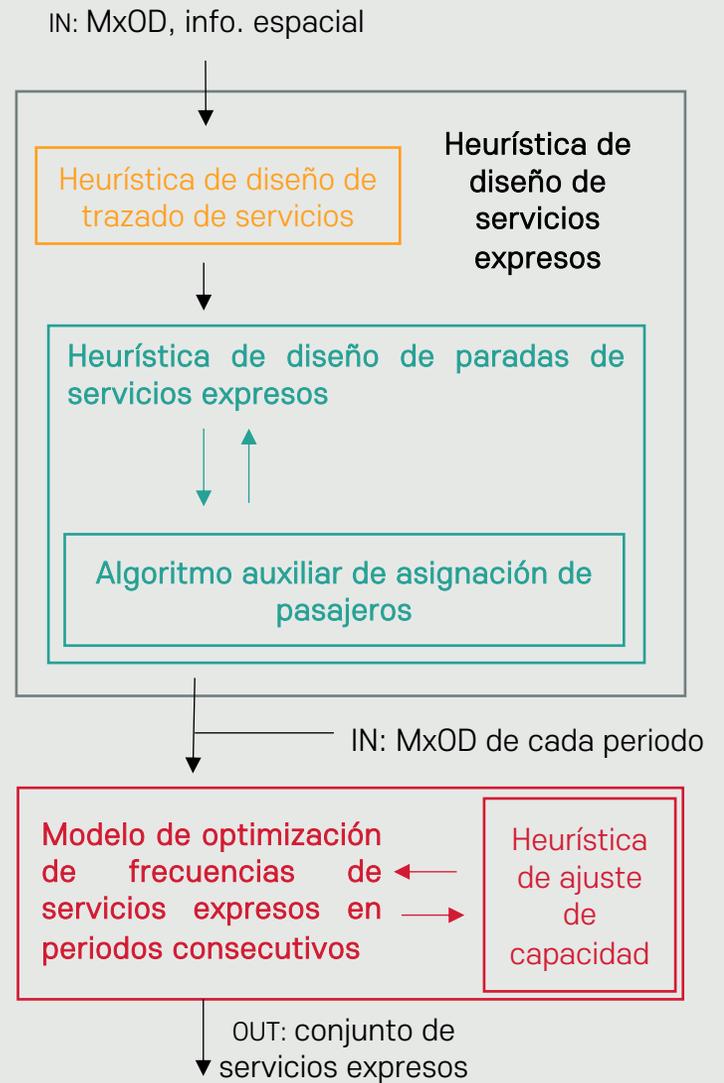


# Hipótesis de trabajo

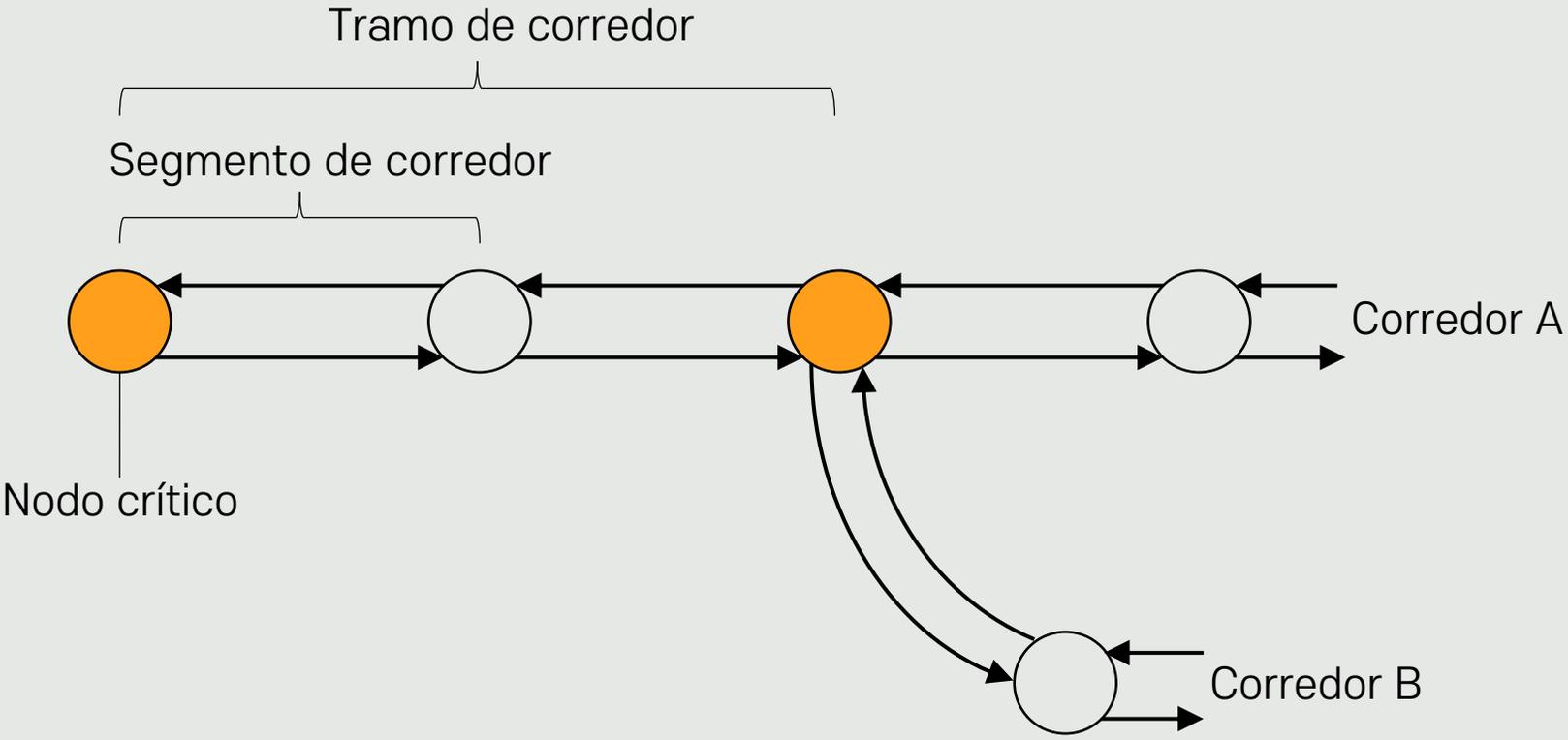
Es posible aumentar la eficiencia de los sistemas BRT usando una estrategia de diseño cuyo énfasis está en los siguientes elementos:

1. Garantizar la aplicabilidad de la herramienta en sistemas reales
2. Considerar que la operación con servicios expresos es una herramienta clave para mejorar la calidad del servicio y aumentar la capacidad del sistema
3. Es necesario considerar la dimensión temporal del problema.

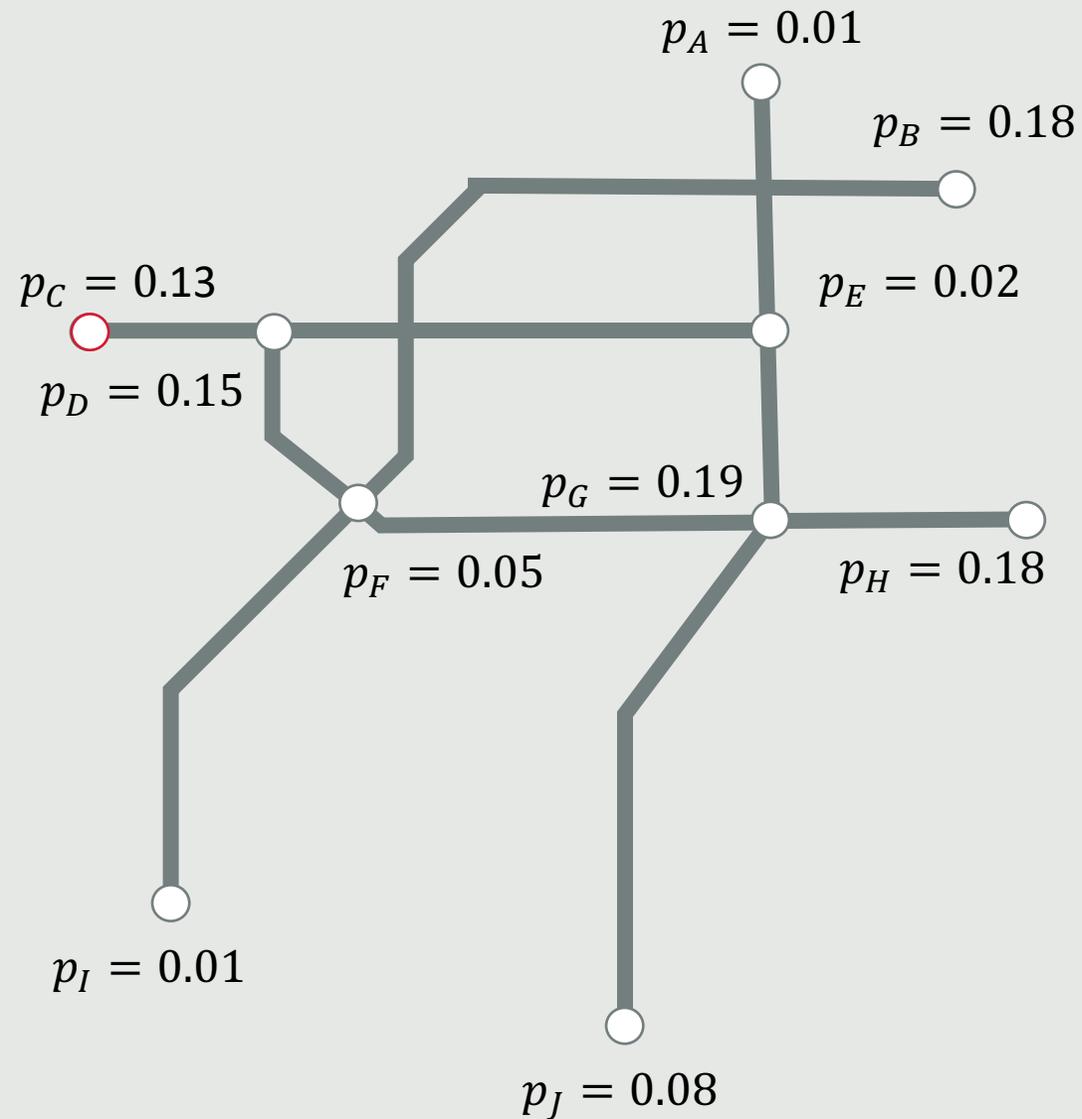
# Metodología de solución



# Anexo 1: Nomenclatura



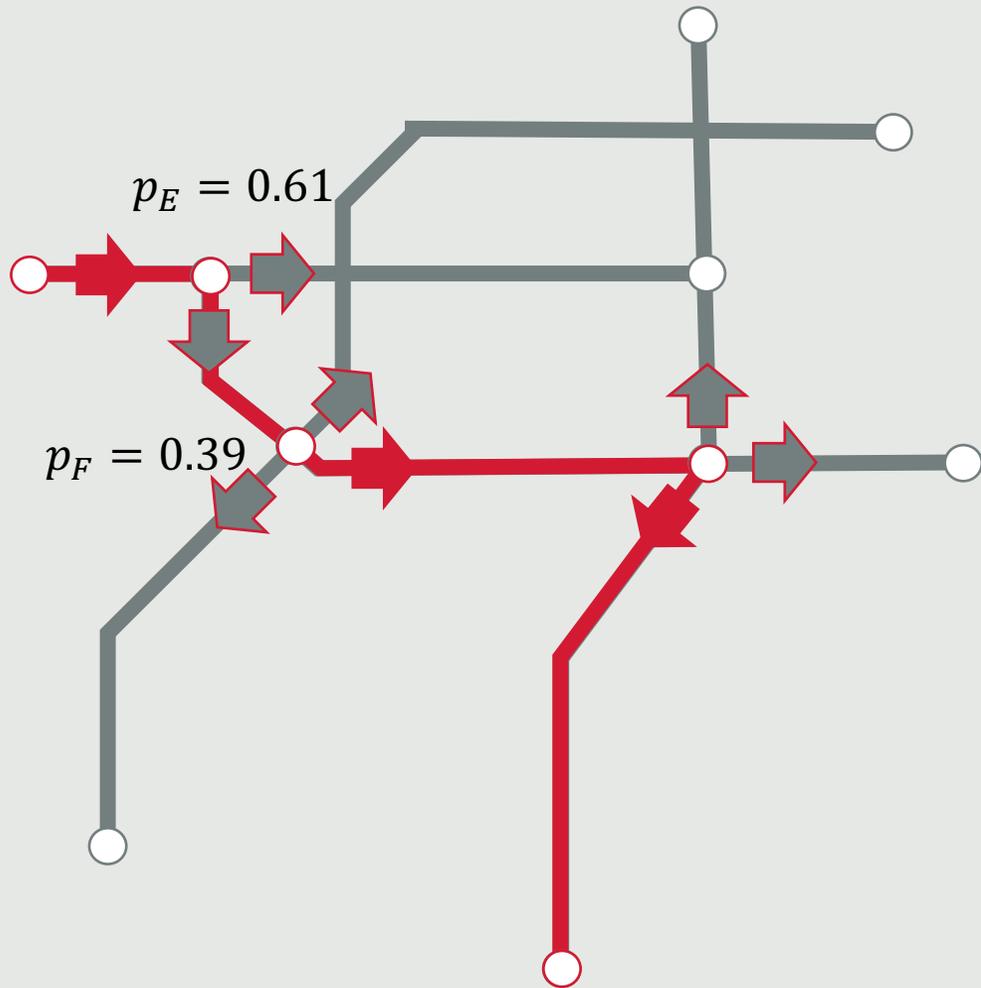




## Idea de solución:

1. Para cada nodo crítico  $c \in C$ , **asignar** una probabilidad  $p_t$  de ser elegido como el nodo inicial de un trazado, dada por algún criterio de atractividad a partir de la matriz de demanda. Por ejemplo, la suma de los viajes que comienzan y los viajes que terminan en  $c$ .
2. **Elegir** aleatoriamente un nodo inicial  $i \in C$  a partir de las probabilidades  $p_t$  y **añadirlo** al conjunto de nodos del trazado.

Trazado<sub>1</sub> = {C}



3. **Explorar** los nodos críticos vecinos de  $i$ . Asignar a cada nodo vecino  $v \in C$  una probabilidad de ser elegido en función de un nuevo criterio de atractividad. **Elegir** aleatoriamente uno de ellos como el siguiente nodo crítico del trazado, y **asignarlo** como nodo actual  $i$ .

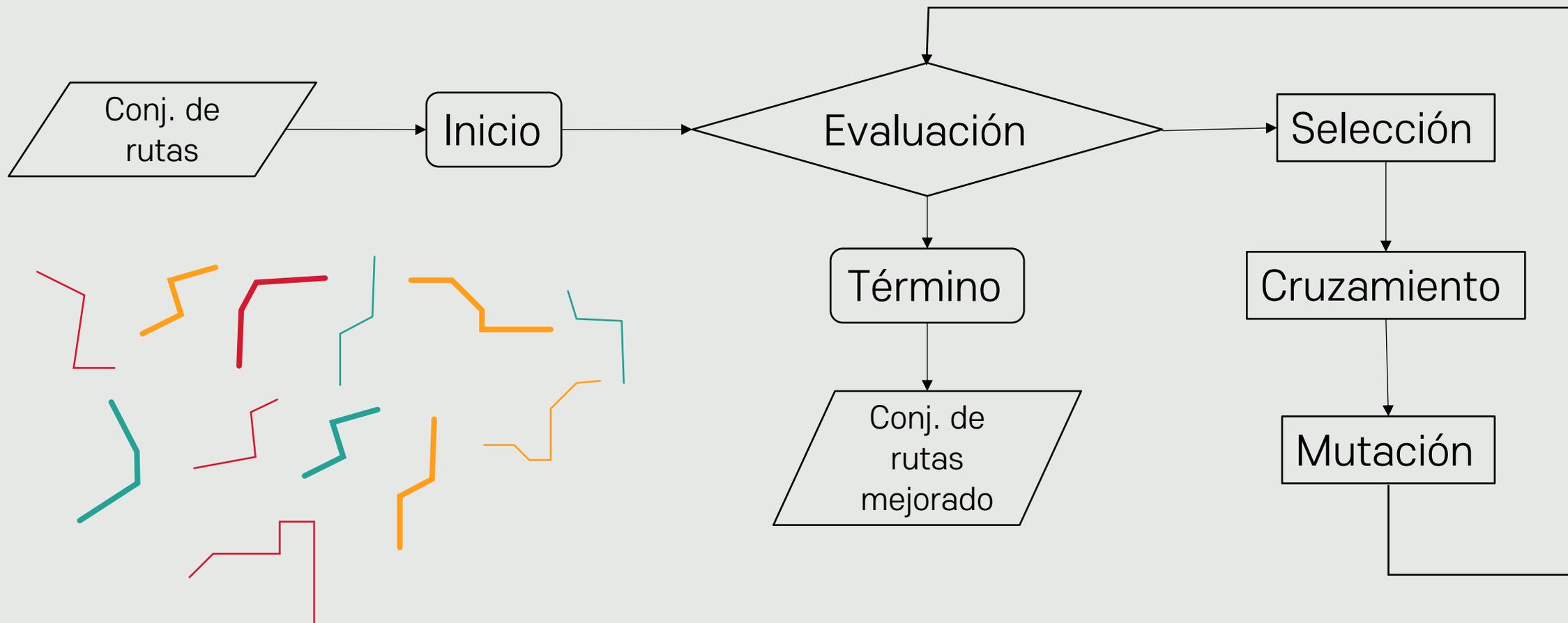
4. Si el último nodo añadido tiene un solo vecino o se ha excedido el largo de la ruta, se ha llegado a un nodo crítico que además es terminal, y se ha terminado un trazado. **Añadir** este trazado al conjunto de trazados CT. En caso contrario, **repetir** 3.

$$\text{Trazado}_1 = \{C, D, F, G, J\}$$

# Algoritmo Genético

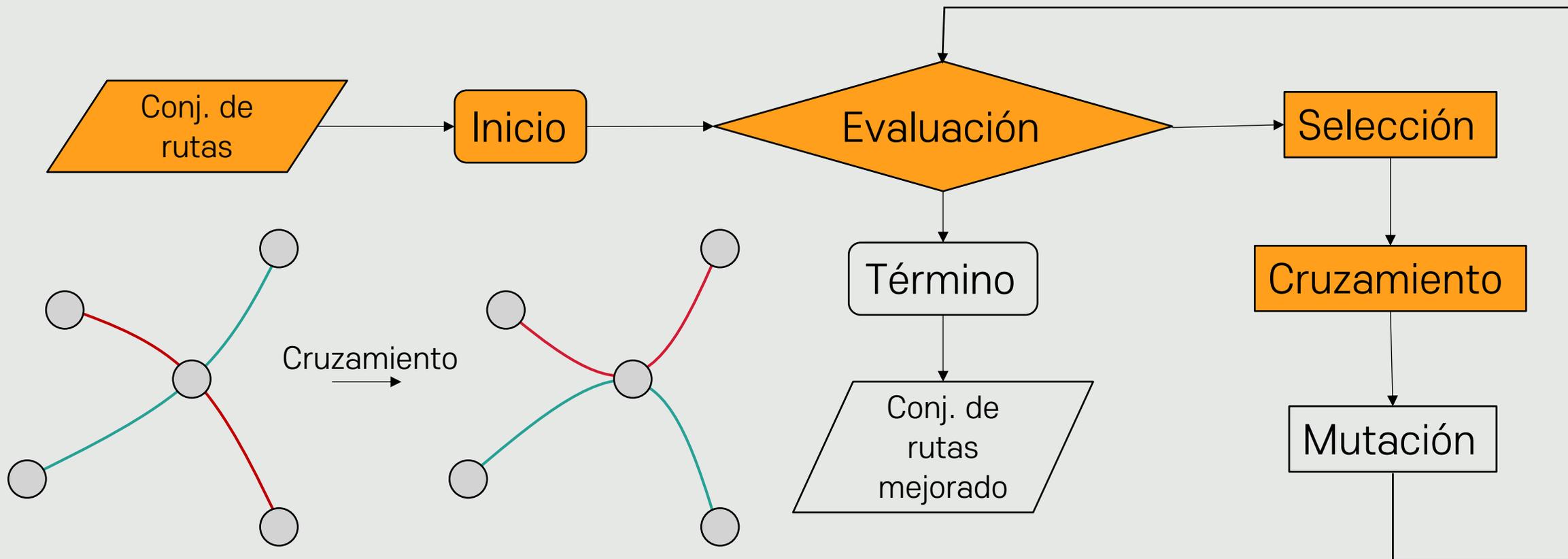
- Una vez encontrado un conjunto inicial de trazados, proponemos aplicar un algoritmo genético para mejorar las soluciones.
- Estos algoritmos imitan la evolución biológica siguiendo algunos pasos clave
- En la literatura reciente de diseño de servicios, es una de las herramientas con mejores resultados

# Algoritmo Genético



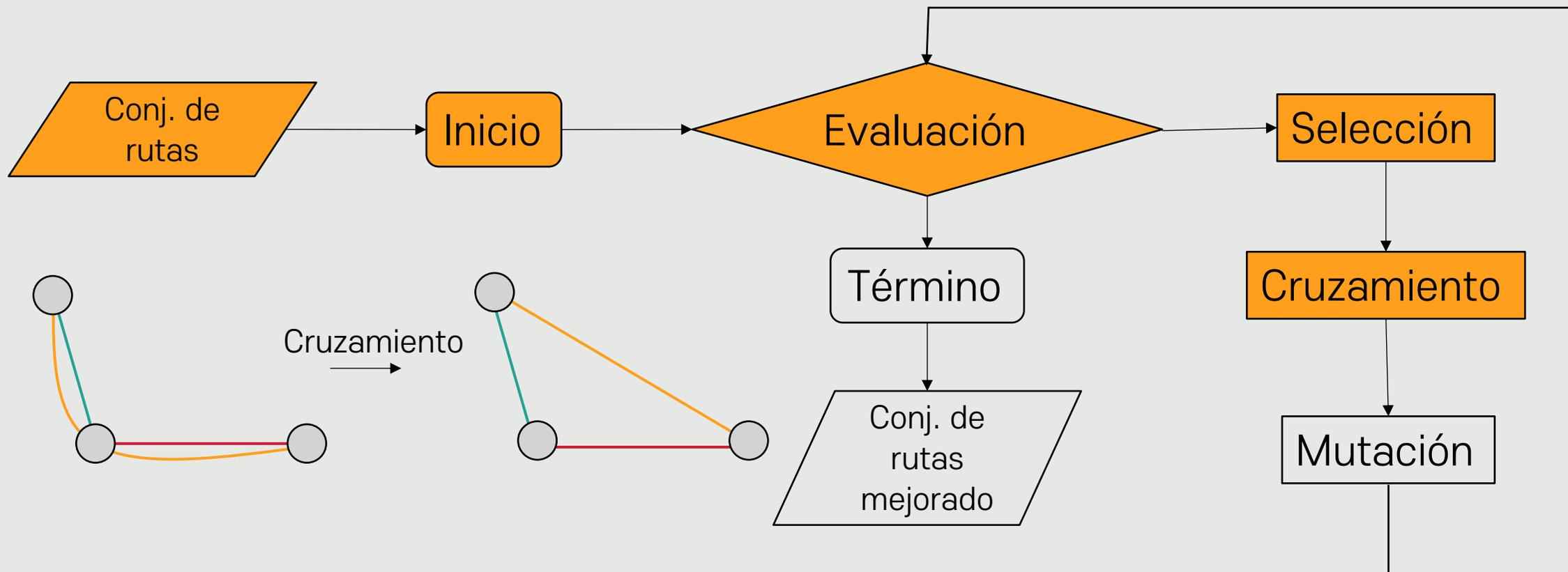
Heurística de diseño de trazado de servicios sobre la red

# Algoritmo Genético



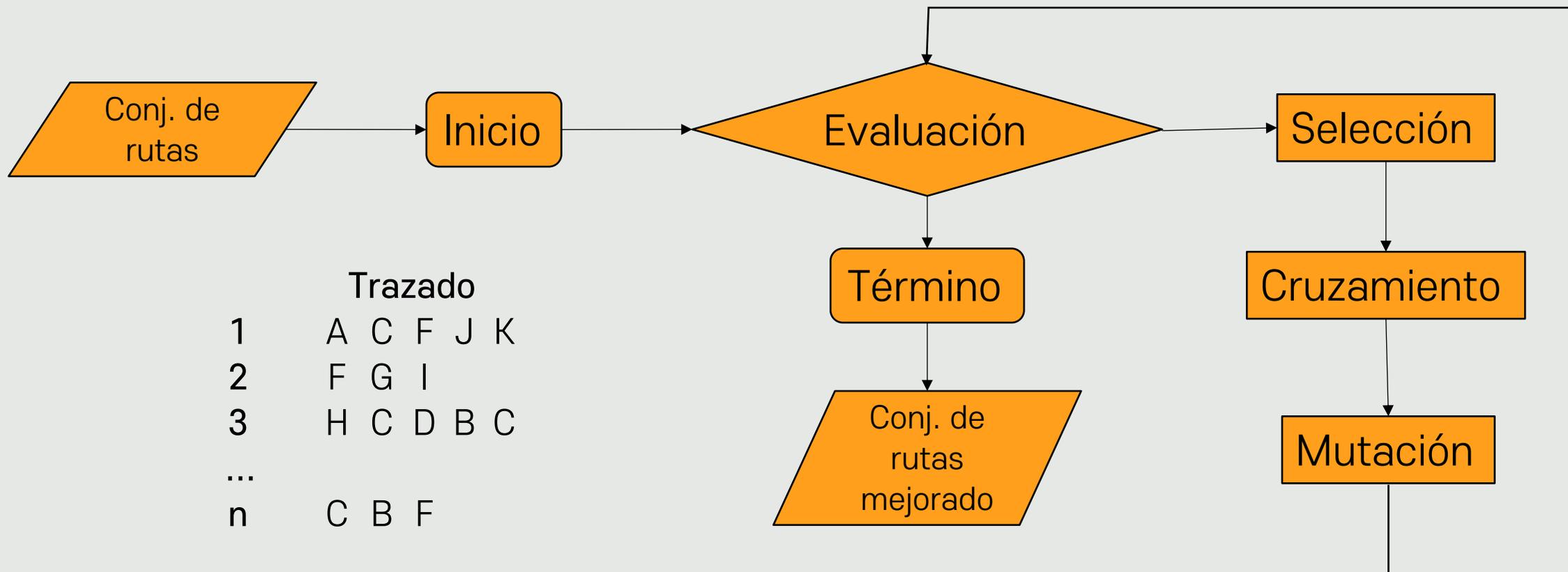
Heurística de diseño de trazado de servicios sobre la red

# Algoritmo Genético



Heurística de diseño de trazado de servicios sobre la red

# Algoritmo Genético



Heurística de diseño de trazado de servicios sobre la red

# Introducción

...	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	...
$L1$	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
$L2$	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	
$L3$	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	
$L4$	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	

Input Conjunto de rutas

Output Conjunto de rutas  
expresas

Herramientas  
tentativas Heurística propia que  
evalúa el ahorro potencial  
de eliminar cada parada

# Heurística de solución

*Ruta r*

○ *No omisible*

○  $Ah_i^r$

○ ...

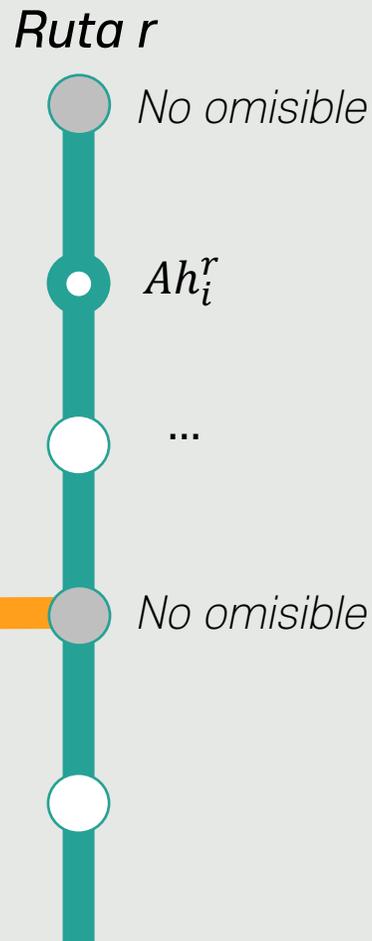
○ *No omisible*

○

Para cada ruta  $r \in R$ , y para cada nodo  $i \in Nr$ :

1. **Determinar** qué nodos no son susceptibles de ser omitidos en la ruta. Estos incluyen los nodos terminales, y los nodos de intersección con otros recorridos.
2. **Añadir** dichos nodos al conjunto de nodos no omisibles  $NO_r \subset Nr$ .
3. Para cada nodo del conjunto de nodos omisibles  $i \in Nr \setminus NO_r$ , **calcular** su indicador de ahorro  $Ah_i^r$ .

# Heurística de solución



Una vez encontrados los indicadores de ahorro para todos los nodos de todos los recorridos:

1. **Encontrar** la parada con mayor indicador de ahorro del sistema,  $e = i: \max_{i \in N_r, r \in R} \{Ah_i^r\}$ .
2. **Eliminar** la parada  $e \in N_r$  de la ruta  $r \in R$ . Es decir, hacer  $N_r \leftarrow N_r \setminus \{e\}$ .
3. **Asignar** los pasajeros a la red usando el *Algoritmo auxiliar de pasajeros*, y encontrar, para esta iteración  $i$ , el tiempo total de viaje de los usuarios  $TTV_i$ .
4. Si el costo descendió respecto a la asignación previa, es decir, si  $TTV_{i-1} < TTV_i$ , volver al paso 2.

# Anexo 2: Fórmula de la raíz de Mohring

$$f_l^* = \sqrt{\frac{\theta_{WT} \lambda T}{C_o}}$$

Donde:

- $f_l^*$  es la frecuencia óptima de un servicio sin congestión
- $\theta_{WT}$  es la valoración social del tiempo de espera
- $\lambda$  es el parámetro de regularidad de los buses
- $T$  es la demanda de la línea
- $C_o$  es el costo de operación de un servicio

# Anexo 7: Glosario

- Corredor: vía con una calzada segregada para buses, y con estaciones o nodos a lo largo de ella. Sus nodos extremos son nodos críticos.
- Nodo crítico: Son aquellos nodos que no tienen dos vecinos. Es decir, los nodos terminales (que tienen solo un vecino), y aquellos nodos donde se conectan varios corredores (es decir, que tienen más de dos vecinos). Los nodos críticos pueden ser el primer o último nodo de un servicio.
- Segmento de corredor: abstracción de un segmento de infraestructura física, conformada por dos nodos extremos y dos arcos paralelos entre estos arcos, en direcciones contrarias.
- Tramo de corredor: una porción de corredor formada por varios segmentos, y limitada en sus extremos por dos nodos críticos.
- Estación: el espacio físico donde los buses se detienen para que los pasajeros suban o bajen de ellos. En el caso de sistemas BRT, la estación está delimitada por las zonas pagas. Ejemplo: Calle 63, en el sistema Transmilenio.
- Estación terminal: primera o última estación de una ruta. Tienen la capacidad de guardar inventario entre periodos consecutivos.
- Parada: concepto de detención operacional de un bus. Debe hacerse en una estación, y en ella ocurren las subidas y bajadas de los pasajeros.
- Periodo: franja de tiempo determinada por una matriz de demanda,...
- Recorrido (de un servicio): conjunto de estaciones de la red que son visitadas por un servicio. Cada par consecutivo de un recorrido está formado por estaciones vecinas.
- Ruta: subconjunto de estaciones del recorrido donde los buses se detienen.
- Red: subconjunto de corredores conformados por estaciones que son conexas entre sí.
- Servicio: concepto integral de recorrido, ruta, frecuencia, e identidad.
- Sistema: concepto integral de una red BRT, su imagen, operación, y administración.
- Trazado: subconjunto de corredores de una red que son visitados por un recorrido.