

# DISTRIBUCIÓN DE VIAJES EN SAN CARLOS DE APOQUINDO

**Bernardo Caprile Canala-Echevarría y Pedro Tomás Valenzuela Bejares**  
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes, Santiago de Chile  
e-mail: [bcaprile@miuandes.cl](mailto:bcaprile@miuandes.cl), [ptvalenzuela@miuandes.cl](mailto:ptvalenzuela@miuandes.cl)

## RESUMEN

*Palabras clave:*

# 1. Introducción

El flujo de vehículos en hora punta de la mañana en San Carlos de Apoquindo es un problema significativo, ya que esta zona, además de ser un barrio residencial, se caracteriza por tener una alta concentración de colegios y universidades. Por lo tanto, el tráfico matutino afecta tanto a los residentes como a los estudiantes que ingresan a esta área. Para poder tomar decisiones respecto al flujo vehicular, no solo en San Carlos de Apoquindo, sino en todo Santiago, se realiza periódicamente la encuesta origen-destino, la cual permite conocer la cantidad de viajes que se realizan en la ciudad y su distribución.

Con esta información, se pueden generar modelos y tomar decisiones, las cuales optimicen las rutas de las personas, disminuyendo el tráfico y el tiempo de viaje. Por esta razón, es importante contar con una matriz origen-destino actualizada y precisa, la cual permita realizar análisis y proyecciones de la distribución de viajes en la ciudad. A continuación, se presenta la figura 1, la cual muestra la zonificación de una parte de Las Condes enfocada en San Carlos de Apoquindo.

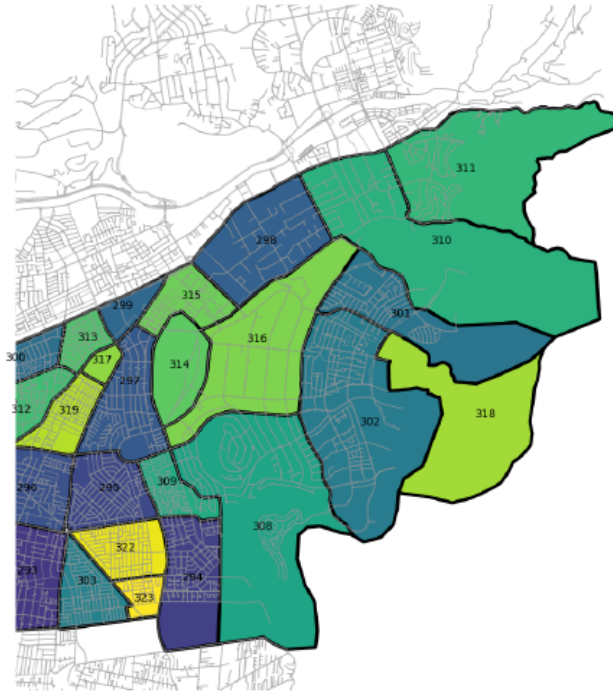


Figura 1: Mapa de San Carlos de Apoquindo.

Para esta tarea, se generarán 3 matrices origen-destino en base a esta zonificación mediante un código Python: una utilizando el método Furness o biproporcional, con datos de los vectores origen-destino de 2024, otra a partir de una matriz de costos, como la distancia promedio de viaje, y el modelo gravitacional. Posteriormente, se calibrará la matriz con el modelo gravitacional y se compararán los resultados obtenidos con un error cuadrático medio respecto a la matriz original. Finalmente, a la matriz calibrada se le aplicará el método de Furness para obtener una matriz de viajes.

## 2. Resultados y Discusiones

Los cálculos se realizaron en Python, utilizando las librerías Pandas y Numpy. El código se encuentra en el repositorio de GitHub [Código](#)

### 2.1. Matriz Origen-Destino con el Modelo Gravitacional

Primero, se generó una Matriz Origen-Destino utilizando el modelo gravitacional, aplicando la ecuación 1 proporcionada junto con la matriz de costos entre zonas (Tabla 7) y los vectores de origen y destino de 2012 (Tabla 5).

$$T_{ij} = \alpha \cdot O_{i,2012} \cdot D_{j,2012} \cdot C_{ij}^k \cdot e^{-\beta \cdot C_{ij}} \quad (1)$$

Donde:

- $T_{ij}$  es la cantidad de viajes entre la zona  $i$  y la zona  $j$ .
- $O_{i,2012}$  es la cantidad de viajes de origen en la zona  $i$ .
- $D_{j,2012}$  es la cantidad de viajes de destino en la zona  $j$ .
- $C_{ij}$  es el costo entre la zona  $i$  y la zona  $j$ .
- $\alpha$  y  $k$  son parámetros a calibrar.
- $\beta$  es un parámetro equivalente a 0.2176.

Con todos los valores se procede a calcular el parámetro  $\alpha$  con un  $k$  igual a 1. Para ello, se ocupó la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\sum_i O_{i,2012}}{\sum_i \sum_j O_{i,2012} \cdot D_{j,2012} \cdot C_{ij}^k \cdot e^{-\beta \cdot C_{ij}}} \quad (2)$$

Luego de aplicar la ecuación 2, se obtuvo un  $\alpha$  igual a  $3,249 \cdot 10^{-5}$ , con el cual se procedió a calcular la matriz de viajes que se muestra a continuación:

Zona O\D	301	302	308	314	316	318	E1	E2	E3	E4	Oi,2024
301	64.1	849.2	243.6	232.3	120.1	57.9	196.3	102.6	266.5	191.7	2324.3
302	556.4	2127.7	1047.0	633.0	306.5	276.8	651.7	310.3	961.7	727.7	7598.8
308	412.0	2702.6	555.9	471.3	281.3	326.2	556.8	249.5	880.2	727.1	7163.1
314	2.9	12.0	3.5	1.1	1.1	1.8	3.2	1.3	4.1	3.8	34.6
316	236.9	922.7	328.1	169.3	84.7	145.8	290.6	124.0	368.6	312.2	2982.8
318	0.0	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	1.1
E1	118.8	601.8	199.2	158.2	89.1	73.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1240.3
E2	124.5	574.8	179.1	126.3	76.3	75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1155.9
E3	767.0	4225.4	1498.2	946.0	538.0	468.6	0.0	0.0	0.0	0.0	8443.1
E4	298.3	1728.2	669.0	471.1	246.3	190.9	0.0	0.0	0.0	0.0	3603.9
Dj, 2024	2580.9	13744.7	4723.6	3208.8	1743.5	1616.2	1698.8	787.8	2481.1	1962.6	34548.0

Tabla 1: Matriz Origen-Destino con método global

Como se puede apreciar, la matriz obtenida no es precisa respecto a la original, ya que los vectores de origen-destino no concuerdan con los obtenidos en la encuesta.

## 2.2. Implementación del Método Furness

Para poder mejorar la precisión de la matriz obtenida (Tabla 1), se implementó el método Furness, este método es un algoritmo iterativo que equilibra la matriz de viajes para que las sumas de sus columnas y filas coincidan con los totales proyectados, manteniendo la distribución proporcional de los viajes según una matriz base. A continuación se muestra la matriz obtenida:

Zona O\D	301	302	308	314	316	318	E1	E2	E3	E4	Oi,2024
301	31.4	147.7	51.5	25.1	45.4	16.4	314.3	128.9	361.2	622.1	1744.0
302	251.1	341.0	204.0	63.0	106.8	72.1	961.5	359.3	1201.4	2175.7	5736.0
308	173.9	405.0	101.3	43.8	91.7	79.5	768.2	270.2	1028.3	2033.1	4995.0
314	0.9	1.4	0.5	0.1	0.3	0.3	3.5	1.1	3.7	8.2	20.0
316	103.8	143.6	62.1	16.4	28.7	36.9	416.4	139.4	447.2	906.6	2301.0
318	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.2	0.4	1.0
E1	671.5	1208.0	486.2	197.1	389.2	238.9	0.0	0.0	0.0	0.0	3191.0
E2	542.8	889.9	337.2	121.4	256.9	188.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2337.0
E3	3069.2	6003.3	2588.5	834.4	1662.1	1082.5	0.0	0.0	0.0	0.0	15240.0
E4	2892.2	5949.0	2800.6	1006.7	1844.0	1068.5	0.0	0.0	0.0	0.0	15561.0
Dj, 2024	7737.0	15089.0	6632.0	2308.0	4425.0	2784.0	2464.0	899.0	3042.0	5746.0	51126.0

Tabla 2: Matriz Origen-Destino con método Furness

Como se puede observar, los vectores son más precisos respecto a los obtenidos en la encuesta.

### 2.2.1. Error Cuadrático Medio

Luego, se calculó el error cuadrático medio respecto a la original con el siguiente código:

```
1 mse = np.mean((Tij_df - df1_1) ** 2)
```

Donde:

- $Tij\_df$  es la matriz de viajes obtenida. (Tabla 2)
- $df1\_1$  es la matriz original. (Tabla 4)

El error que se obtuvo fue de 350710.81, por lo que, para minimizar el error, se tiene que modificar el  $k$ .

## 2.3. Calibración de la Matriz Origen-Destino con el Modelo Gravitacional

Para determinar el valor óptimo de  $k$ , se realizaron iteraciones sobre diferentes valores de  $k$ , desde 0.001 hasta 10, con incrementos de 0.001, para luego aplicar el error cuadrático 2.2.1

hasta encontrar el mínimo. El error mínimo se obtuvo con un  $k$  de 0.001 y un  $\alpha$  de 0.00011, resultando en un error de 345361.66. A continuación, se presenta la matriz resultante:

<b>Zona O\D</b>	<b>301</b>	<b>302</b>	<b>308</b>	<b>314</b>	<b>316</b>	<b>318</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>	<b>Oi,2024</b>
<b>301</b>	121.5	142.5	53.6	13.0	34.7	41.8	301.6	155.0	298.9	581.6	1744.0
<b>302</b>	257.9	455.7	118.5	44.7	114.0	105.5	952.5	356.4	1168.2	2162.6	5736.0
<b>308</b>	205.8	251.4	120.6	36.4	80.4	63.3	742.1	232.3	1163.7	2099.0	4995.0
<b>314</b>	0.5	1.0	0.4	0.2	0.3	0.2	4.2	1.1	3.6	8.5	20.0
<b>316</b>	83.8	151.9	50.5	19.4	45.4	30.8	463.5	154.2	407.5	894.0	2301.0
<b>318</b>	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.2	0.3	1.0
<b>E1</b>	676.5	1180.1	433.5	227.2	430.8	242.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3191.0
<b>E2</b>	658.3	836.0	257.0	113.4	271.4	200.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2337.0
<b>E3</b>	2830.9	6111.3	2870.6	831.0	1599.7	996.5	0.0	0.0	0.0	0.0	15240.0
<b>E4</b>	2901.7	5958.9	2727.2	1022.6	1848.3	1102.3	0.0	0.0	0.0	0.0	15561.0
<b>Dj, 2024</b>	7737.0	15089.0	6632.0	2308.0	4425.0	2784.0	2464.0	899.0	3042.0	5746.0	51126.0

Tabla 3: Matriz Origen-Destino calibrada con método Furness

### 3. Anexos

Zona O\D	301	302	308	314	316	318	E1	E2	E3	E4
<b>301</b>	0	0	0	0	0	0	709	0	714	821
<b>302</b>	284	845	0	0	1202	0	369	894	3514	3671
<b>308</b>	0	0	107	0	0	0	39	0	1457	1886
<b>314</b>	0	0	0	0	0	0	126	25	1208	949
<b>316</b>	0	171	0	0	0	0	37	97	728	344
<b>318</b>	0	0	0	0	108	0	107	0	529	650
<b>E1</b>	811	1622	0	0	193	0	0	0	0	0
<b>E2</b>	98	836	0	25	0	0	0	0	0	0
<b>E3</b>	121	1029	1563	0	529	0	0	0	0	0
<b>E4</b>	645	1663	3480	0	338	0	0	0	0	0

Tabla 4: Matriz Origen-Destino de 2012

Zona	301	302	308	314	316	318	E1	E2	E3	E4
<b>Oi,2012</b>	1960	6166	5150	25	2371	1	1387	1016	8150	8322
<b>Dj,2012</b>	2245	10780	3488	2307	1377	1395	2626	959	3243	6126

Tabla 5: Vectores de Oi,2012 y Dj,2012 por zona

Zona	301	302	308	314	316	318	E1	E2	E3	E4
<b>Oi,2024</b>	7737	15089	6632	2308	4425	2784	2464	899	3042	5746
<b>Dj,2024</b>	1744	5736	4995	20	2301	1	3191	2337	15240	15561

Tabla 6: Vectores  $O_{i2024}$  y  $D_{j2024}$  por zona

Zona O\D	301	302	308	314	316	318	E1	E2	E3	E4
<b>301</b>	0.50	1.85	1.53	3.11	2.22	0.77	9.71	5.15	8.85	16.01
<b>302</b>	1.85	1.31	2.69	2.22	1.56	1.32	9.23	6.13	7.39	14.78
<b>308</b>	1.53	2.69	1.25	1.81	1.81	2.31	9.02	6.74	6.05	13.56
<b>314</b>	3.11	2.22	1.81	0.65	1.25	2.95	7.04	5.55	6.80	13.12
<b>316</b>	2.22	1.56	1.81	1.25	0.99	2.18	7.74	5.18	7.43	14.04
<b>318</b>	0.77	1.32	2.31	2.95	2.18	0.50	9.78	5.97	9.01	15.82
<b>E1</b>	9.71	9.23	9.02	7.04	7.74	9.78	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
<b>E2</b>	5.15	6.13	6.74	5.55	5.18	5.97	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
<b>E3</b>	8.85	7.39	6.05	6.80	7.43	9.01	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
<b>E4</b>	16.01	14.78	13.56	13.12	14.04	15.82	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$

Tabla 7: Tabla de costos entre zonas