

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, ptvalenzuela@miuandes.cl

RESUMEN

El flujo vehicular durante la hora punta matutina en San Carlos de Apoquindo es un problema crítico debido a la alta concentración de colegios y universidades en esta área residencial. Para abordar esta problemática, se utiliza la encuesta origen-destino, que permite analizar y modelar la distribución de viajes en Santiago. Este trabajo generó tres matrices origen-destino mediante un modelo gravitacional, utilizando una matriz de costos basada en la distancia de viaje promedio y aplicando el método Furness con proyecciones para 2024. El modelo gravitacional se calibró minimizando el error cuadrático medio, logrando un k óptimo de 0.001 y un α de 0.00011, con un error resultante de 345361.66. Los resultados muestran que el método Furness ajusta la matriz para reflejar mejor los patrones de viaje proyectados, destacando la importancia de contar con matrices actualizadas y precisas para la planificación urbana. Aunque estos modelos son útiles, presentan limitaciones al no considerar todos los factores influyentes, lo que puede generar discrepancias con la realidad.

Palabras clave: Matriz origen-destino, método de Furness, modelo gravitacional, distribución de viajes, San Carlos de Apoquindo.

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 que salen 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.

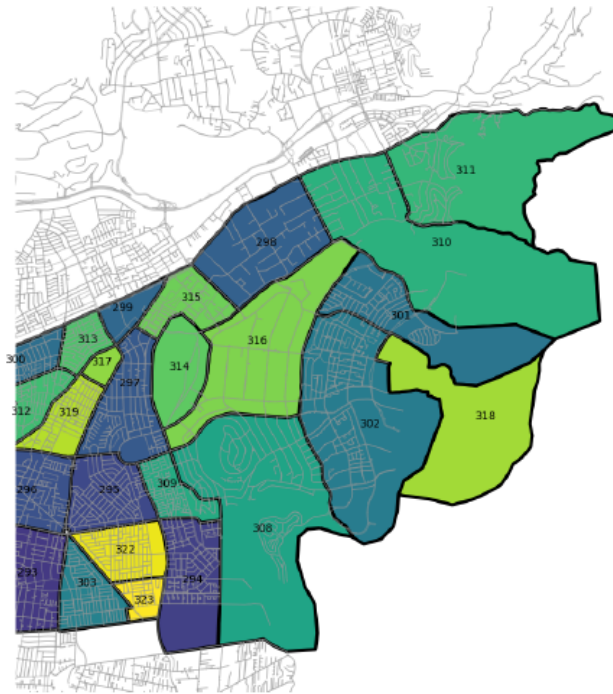


Figura 1: Mapa de San Carlos de Apoquindo.

Para esta tarea, se generarán 3 matrices origen-destino en base a esta zonificación mediante un código Python: La primera ocupando un modelo gravitacional con una matriz de costos, como distancia de viaje promedio, luego se le aplicará el método de Furness con vectores del 2024. Finalmente, se calibrará la matriz minimizando el error cuadrático medio y se compararán los resultados obtenidos.

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 8) y los vectores de origen y destino de 2012 (Tabla 6).

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

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 .
- α y k son parámetros a calibrar.
- β es un parámetro equivalente a 0.2176.

Con todos los valores se procede a calcular el parámetro α 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 α 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

La Tabla 1 presenta la distribución inicial de viajes entre zonas utilizando el modelo gravitacional. Esta distribución ofrece una primera aproximación de los flujos de viajes, pero aún requiere ajustes adicionales para que refleje con precisión los totales proyectados para el año 2024.

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

La Tabla 2 muestra la distribución de viajes ajustada utilizando el método de Furness. Este ajuste garantiza que los totales de viajes coincidan con las proyecciones para el año 2024, proporcionando una estimación más precisa de la movilidad entre zonas.

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 5)

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 α de 0.00011, resultando en un error de 345361.66. A continuación, se presenta las matrices resultantes:

| Zona O\D | 301 | 302 | 308 | 314 | 316 | 318 | E1 | E2 | E3 | E4 | Oi,2024 |
|-----------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|---------|
| 301 | 443.1 | 1588.3 | 550.9 | 258.5 | 187.2 | 259.8 | 70.1 | 69.0 | 104.3 | 41.5 | 3572.7 |
| 302 | 1040.6 | 5617.8 | 1347.2 | 986.8 | 679.7 | 725.4 | 244.7 | 175.4 | 450.9 | 170.7 | 11439.1 |
| 308 | 931.6 | 3477.5 | 1538.1 | 900.9 | 537.7 | 488.7 | 213.9 | 128.3 | 504.0 | 185.9 | 8906.6 |
| 314 | 3.2 | 18.7 | 6.6 | 5.6 | 2.9 | 2.1 | 1.6 | 0.8 | 2.1 | 1.0 | 44.6 |
| 316 | 369.2 | 2046.2 | 627.1 | 468.3 | 295.8 | 231.4 | 130.1 | 82.9 | 171.9 | 77.1 | 4500.0 |
| 318 | 0.2 | 0.9 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 1.9 |
| E1 | 42.4 | 226.0 | 76.5 | 77.9 | 39.9 | 25.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 488.6 |
| E2 | 83.7 | 324.8 | 92.0 | 78.9 | 51.0 | 43.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 673.9 |
| E3 | 300.3 | 1981.0 | 857.8 | 482.0 | 250.9 | 180.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 4052.3 |
| E4 | 64.6 | 405.4 | 171.0 | 124.5 | 60.8 | 41.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 868.2 |
| Dj, 2024 | 3279.1 | 15686.5 | 5267.5 | 3383.5 | 2106.1 | 1999.1 | 660.4 | 456.3 | 1233.2 | 476.2 | 34548.0 |

Tabla 3: Matriz Origen-Destino con método gravitacional

| Zona O\D | 301 | 302 | 308 | 314 | 316 | 318 | E1 | E2 | E3 | E4 | Oi,2024 |
|-----------------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|---------|
| 301 | 121.5 | 142.5 | 53.6 | 13.0 | 34.7 | 41.8 | 301.6 | 155.0 | 298.9 | 581.6 | 1744.0 |
| 302 | 257.9 | 455.7 | 118.5 | 44.7 | 114.0 | 105.5 | 952.5 | 356.4 | 1168.2 | 2162.6 | 5736.0 |
| 308 | 205.8 | 251.4 | 120.6 | 36.4 | 80.4 | 63.3 | 742.1 | 232.3 | 1163.7 | 2099.0 | 4995.0 |
| 314 | 0.5 | 1.0 | 0.4 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 4.2 | 1.1 | 3.6 | 8.5 | 20.0 |
| 316 | 83.8 | 151.9 | 50.5 | 19.4 | 45.4 | 30.8 | 463.5 | 154.2 | 407.5 | 894.0 | 2301.0 |
| 318 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 1.0 |
| E1 | 676.5 | 1180.1 | 433.5 | 227.2 | 430.8 | 242.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3191.0 |
| E2 | 658.3 | 836.0 | 257.0 | 113.4 | 271.4 | 200.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2337.0 |
| E3 | 2830.9 | 6111.3 | 2870.6 | 831.0 | 1599.7 | 996.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 15240.0 |
| E4 | 2901.7 | 5958.9 | 2727.2 | 1022.6 | 1848.3 | 1102.3 | 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 4: Matriz Origen-Destino calibrada con método Furness

Las Tablas 3 y 4 presentan los resultados de la calibración utilizando el modelo gravitacional y la distribución ajustada, respectivamente. Mientras que la primera refleja la estimación de viajes basada en la interacción entre zonas en función de su atractivo y distancia, la segunda incluye ajustes adicionales que se acercan más a los valores observados para 2024. Comparando ambas tablas, se observa que el ajuste introduce correcciones significativas, reduciendo las discrepancias y ofreciendo una proyección más precisa del flujo de viajes.

2.4. Discusiones

Luego de aplicar el método de Furness, la matriz se ajusta para que las sumas de las filas y columnas coincidan con los totales proyectados. Esto genera cambios en la matriz, y se

observa en las Tablas 3 y 4 que los viajes entre zonas internas bajan de forma significativa, mientras que los viajes de zonas externas a internas o viceversa aumentan hasta 10 ordenes de magnitud. Esto se debe a que, en la matriz con el método gravitacional tiene asociado la función de costos, lo que hace esta función es ponderar los valores de los vectores de origen y destino con un costo determinado. En esta matriz de costos un valor de k bajo 1 genera mayor atracción hacia las zonas más cercanas o con un menor costo, esto se puede notar en la tabla 3, ya que la cantidad de viajes entre zonas internas son significativamente mayores a los viajes de zonas externas a internas. Por ello, al aplicar Furness esto cambia aumentando los viajes entre zonas externas a internas, cosa que hace sentido, ya que existe una gran cantidad de gente que ingresa a San Carlos de Apoquindo para ir a la Universidad o al trabajo, generando una matriz más coherente. Al comparar la matriz original con la final (Tablas 5 y 4 respectivamente), se observa que las zonas E1, E2, E3 y E4 siguen siendo las que más difieren respecto a las otras zonas. Esto puede deberse a que, como se mencionó antes, el método de Furness y el modelo gravitacional son ajustes para lograr una representación coherente, pero pueden existir diferencias con la realidad debido a factores que no captura este tipo de modelos.

Con respecto a las limitaciones que tiene el método de Furness y el modelo gravitacional se puede mencionar que este modelo solo considera ciertos impulsos sobre los viajes como lo son el costo y el tamaño de la zona de origen y destino, lo cual puede no captar otros factores importantes como la congestión, cambios de transporte público o privado, entre otros. Además, el método de Furness ajusta de manera proporcional, lo que puede significar que no se refleje con precisión los patrones de viaje o los cambios en este. Luego agregar que los parámetros como k , pueden variar en la zona, por lo que no son del todo correctas en cada ocasión.

Finalmente, la matriz modelada para 2024 podría diferir de la realidad debido a que no se consideran factores como la pandemia, cambios en la infraestructura, cambios en la densidad poblacional, conflictos sociales, teletrabajo, entre otros. Por lo que se debe tener en cuenta que estos modelos son una aproximación y no una representación exacta de la realidad.

3. Conclusion

En este trabajo se generaron matrices origen-destino para la zona de San Carlos de Apoquindo, utilizando el método gravitacional y el método Furness. Se obtuvo una matriz calibrada con el método gravitacional a la que luego se le aplicó el método Furness y se comparó con la matriz original, obteniendo un error cuadrático medio de 345361.66. Se concluye que el método Furness es una herramienta útil para ajustar matrices origen-destino y que el modelo gravitacional es una buena aproximación para la distribución de viajes en una ciudad si no se tienen vectores de origen-destino actualizados. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estos modelos no consideran todos los factores que influyen en la distribución de viajes, por lo que pueden existir diferencias respecto a la realidad.

4. Anexos

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

Tabla 5: Matriz Origen-Destino de 2012

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

Tabla 6: Vectores de Oi,2012 y Dj,2012 por zona

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

Tabla 7: Vectores O_{i2024} y D_{j2024} por zona

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

Tabla 8: Tabla de costos entre zonas