

CICLO-P: UNA HERRAMIENTA PARA LA SIMULACIÓN DE LA DEMANDA Y LA PLANIFICACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA CICLISTA

Ricardo Hurtubia^{abc1}, Samuel Billikopf^a, Ignacio Abé^b, Juan Schuwirth^a,
Homero Larraín^a y Sebastián Raveau^a

^a Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile

^b Escuela de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica de Chile

^c Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS)

RESUMEN

Presentamos un modelo para la predicción de viajes en bicicleta, capaz de modelar diversos escenarios de distribución espacial de la población, el uso del suelo y la implementación de infraestructura ciclista. El modelo está basado en el modelo clásico de cuatro etapas y se estima y calibra para la ciudad de Santiago en el año 2019. Los resultados son verosímiles y son validados comparando los flujos predichos con conteos realizados en la ciclovía de Av. Eliodoro Yáñez en Providencia, que no existía al momento de hacer los conteos utilizados para la calibración del modelo, pero que fue implementada posteriormente. La herramienta se ha empaquetado en una aplicación con interfaz web que permitirá a futuros usuarios evaluar proyectos de infraestructura ciclista de manera sencilla y a bajo costo.

Palabras claves: ciclismo urbano, infraestructura ciclista, modelación de la demanda, planificación

¹ Autor correspondiente: rhurtubia@uc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La bicicleta es un modo de transporte con bajos costos de adquisición y mantención en comparación a alternativas privadas menos sustentables como el auto. Su uso habitual como modo de transporte (no necesariamente deportivo) implica además beneficios para la salud, como la disminución de la probabilidad de padecer problemas cardíacos, obesidad y sobrepeso (Celis-Morales et al., 2017; Patterson et al., 2020). Diversos estudios muestran que existe una relación inversa entre viajar en bicicleta al trabajo/estudio y la mortalidad por cualquier causa (Oja et al., 2011), y que los beneficios de cambiar de modo de transporte desde el auto a la bicicleta son superiores a los riesgos relacionados con la exposición a gases contaminantes y probabilidad de siniestros viales (de Hartog et al., 2010). La bicicleta es un modo de transporte sustentable que no genera emisiones contaminantes y, al reemplazar viajes en automóvil, puede contribuir a disminuir la congestión (Ton et al., 2019). Es debido a estos y otros beneficios que globalmente diversas ciudades están intentando promover el uso de la bicicleta, buscando que reemplace a los modos de transporte motorizados y así promoviendo una movilidad más sustentable (World Health Organization, 2022).

Recientemente el ciclismo en Latinoamérica ha mostrado un importante aumento como modo de transporte (Useche et al., 2019). En 2015 se efectuó una investigación del BID que abarcó 56 ciudades de la región, las que acumulaban una infraestructura construida de ciclovías de 2.513 km. Los resultados arrojaron que el porcentaje de viajes realizados en bicicleta en relación con todos los viajes por todos los modos de transporte (partición modal) se concentraba principalmente en las ciudades de Rosario, Bogotá, Río de Janeiro, Buenos Aires, Cochabamba, Santiago y Pereira. Todas representaban más del 3% y Rosario y Bogotá llegaron al 5% (Ríos Flores et al., 2015).

Dentro de Latinoamérica, Santiago de Chile ha mostrado un crecimiento particularmente elevado. La bicicleta ha aumentado su partición modal de manera considerable en los últimos 20 años. En 2001, según la Encuesta Origen Destino (EOD, 2001), la partición modal de la bicicleta representaba un 2,1%. En 2012, esta proporción aumentó a un 3,9% (EOD, 2012) y a un 8% en 2018 (Encuesta Nacional de Medio Ambiente, 2018), aunque con una manera distinta de medir los viajes. Entre el 2017 y 2018, Chile se posicionó dentro de los países con mayor crecimiento en los viajes en bicicleta detectados en medidores instalados en ciclovías, con un aumento de un 10%.

A lo anterior se suma un crecimiento importante de la red de ciclovías en varias ciudades chilenas, en particular Santiago que ha más que duplicado el total de kilómetros de ciclovías en la última década (ver Figura 1). Sin embargo, esta infraestructura no siempre se localiza en los lugares donde es más necesaria ni tiene una calidad distribuida de forma equitativa en el territorio (Mora et al., 2021; Tiznado et al., 2022)

A pesar de este fuerte crecimiento de los viajes en bicicleta y número de ciclovías de los últimos años, actualmente la planificación urbana de ciclovías en Chile no considera la demanda potencial de forma explícita, en parte por la inexistencia de softwares especializados o herramientas computacionales para este fin.

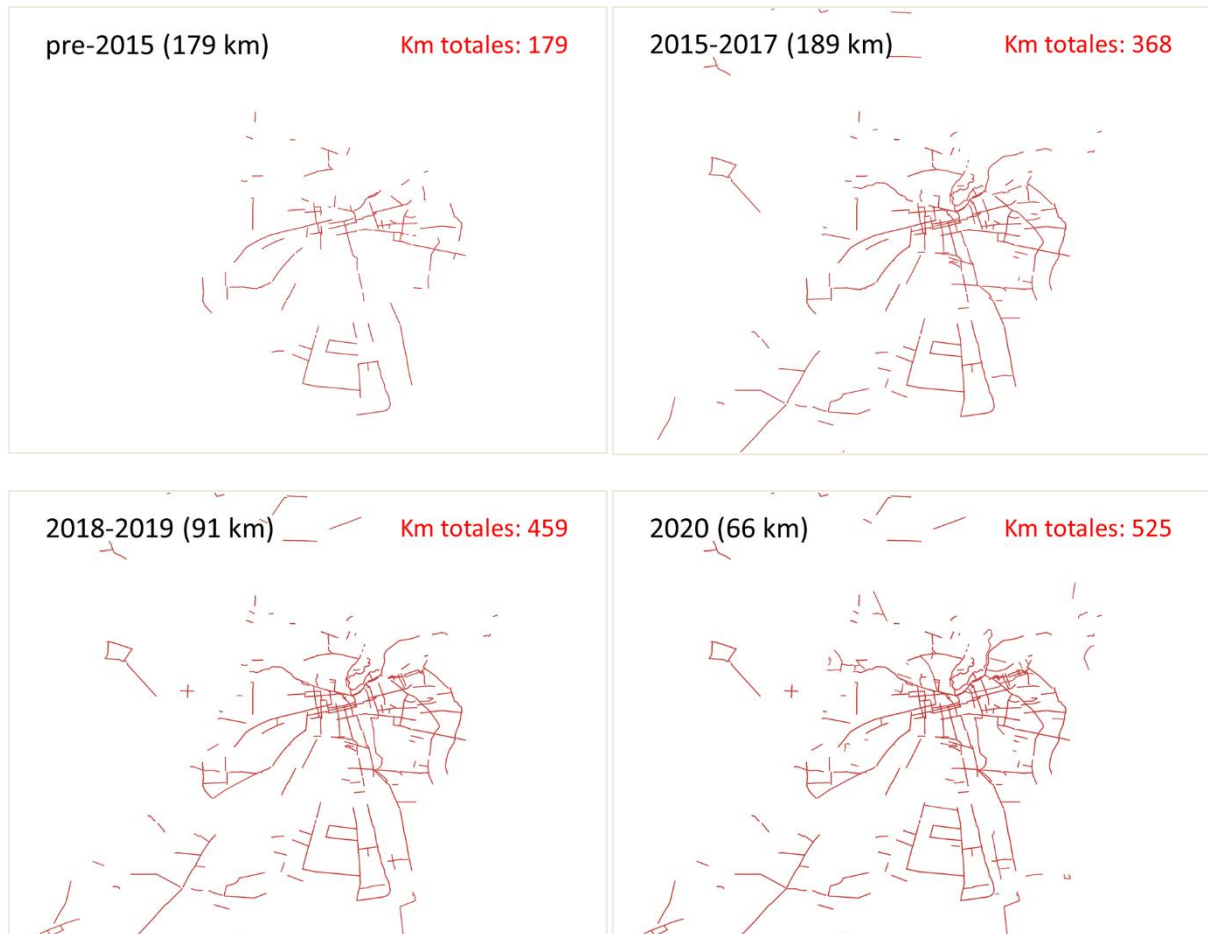


Figura 1: Kilómetros construidos de ciclovías por año en la Región Metropolitana.

Fuente: Elaboración Propia en base a <https://ciclovias.visorterritorial.cl/>

El principal modelo utilizado para la planificación estratégica del sistema de transporte es ESTR AUS (para Santiago) y VIVALDI para ciudades de tamaño intermedio. Estas herramientas no consideran a la bicicleta de forma explícita como un modo disponible, o lo hacen de manera extremadamente simplificada en la partición modal de algunas actualizaciones, sin asignar viajes en bicicleta a rutas, por lo que no pueden utilizarse para estimar flujos o evaluar el impacto de la construcción de nueva infraestructura. Otros modelos de transporte comerciales, como EMME o TRANSCAD, vienen preparados para incorporar a la bicicleta como modo de transporte, pero su implementación es costosa y requiere de capital humano avanzado para la calibración de los modelos y simulación de escenarios. Lo anterior sugiere la necesidad de disponer de una herramienta sencilla para la modelación de la demanda por viajar en bicicleta, enfocada en este modo y aprovechando ciertas características del mismo que simplifican su modelación: no está sujeto a congestión, su costo generalizado se reduce al tiempo/distancia y variables del entorno construido, como la presencia de ciclovías, afectan directamente tanto la probabilidad de realizar viajes en bicicleta (Oliva et al., 2018; Gutierrez et al., 2020; Echiburu et al., 2021) como la elección de ruta (Rossetti et al., 2018, 2019).

En este artículo se describe a la herramienta Ciclo-P, cuyo desarrollo es financiado por ANID (FONDEF IDEA I+D ID22I10067) y que viene a llenar el vacío antes descrito. La metodología de predicción de demanda y flujos de Ciclo-P se basa en una adaptación de un modelo clásico de cuatro etapas en el que la partición modal se incluye directamente a la etapa de generación de viajes. En otras palabras, Ciclo-P modela exclusivamente viajes en bicicleta, no lidia con otros modos en forma directa. Los submodelos de

Ciclo-P fueron estimados a partir de información de la Encuesta Origen Destino de Santiago 2012 (EOD 2012), el catastro de usos de suelo del Servicio de Impuestos Internos (SII 2012) y una red de transporte obtenida de OpenStreetMap (OSM 2019). El modelo fue calibrado para el año 2019 con flujos observados de viajes en bicicleta medidos en las comunas de Providencia, Santiago y Puente Alto en 50 puntos diferentes.

Nuestros resultados presentan estimaciones para la generación/atracción, la distribución y asignación de viajes en bicicleta en la ciudad de Santiago en el año 2019 en la punta mañana (6:00 a 9:00 hrs) de un día laboral normal. Como validación del modelo, analizamos el impacto de la construcción de una ciclovía (Eliodoro Yañez) no existente en el corte temporal de calibración, pero construida posteriormente y para la que se dispone de mediciones de flujo que pueden compararse con los flujos predicho por la herramienta.

El artículo se estructura de la siguiente manera. La sección 2 describe las fuentes de información utilizadas y presenta la metodología de modelación. La sección 3 describe el caso de estudio de Santiago y la estimación de los modelos. La sección 4 describe la calibración del modelo para el año 2019, para el que se disponía de conteos de flujo en calles de Santiago, y describe los resultados de simulación para ese año. La sección 5 presenta una validación del modelo, al simular los flujos de una nueva ciclovía (Eliodoro Yañez), que no existía para el período de simulación, y compararlos con los observados una vez que la ciclovía fue implementada. Finalmente, la sección 6 describe las funcionalidades de la plataforma web de Ciclo-P y la sección 7 concluye el artículo.

2. ENFOQUE DE MODELACIÓN

La metodología general que proponemos para predecir la demanda de viajes en bicicleta consiste en realizar un modelo de tres etapas: (a) la generación y atracción específica para el modo bicicleta, (b) distribución de viajes entre orígenes y destinos y (c) la asignación de viajes en bicicleta a la red vial (Figura 2). Ciclo-P se diferencia del modelo clásico de cuatro etapas al no realizar la partición modal después de la distribución de viajes e incorporándola en el modelo de generación de viajes, como se menciona antes. Esto nos permite caracterizar los viajes en bicicleta con más detalle y profundidad en los modelos de generación y atracción y distribución de viajes, pero se pierde la opción de realizar análisis multimodales.

Para poder construir, calibrar y hacer predicciones con el modelo de tres etapas detrás de Ciclo-P, es necesario contar con información de viajes, usos de suelo, elementos del entorno construido, características demográficas y socioeconómicas de las personas y la red de calles de la ciudad. Para identificar el efecto del entorno construido en las personas calculamos accesibilidades de diferentes variables que son testeadas y ocupadas en los modelos de generación y atracción de viajes en conjunto con otras variables que son significativas para los viajes en bicicleta. Como resultado de este proceso obtenemos la cantidad de viajes generados y atraídos en cada zona. A partir de esta información se obtiene después la distribución de viajes, usando un modelo gravitacional. El modelo de distribución entrega una matriz de viajes a nivel de orígenes y destinos, que finalmente asignamos a la red a través de modelo de asignación a rutas mínimas que considera impedancias en los arcos para reflejar su verdadera atraktividad para los ciclistas. En la Figura 2 se entrega un esquema de la modelación implementada, que detallamos en lo que sigue.

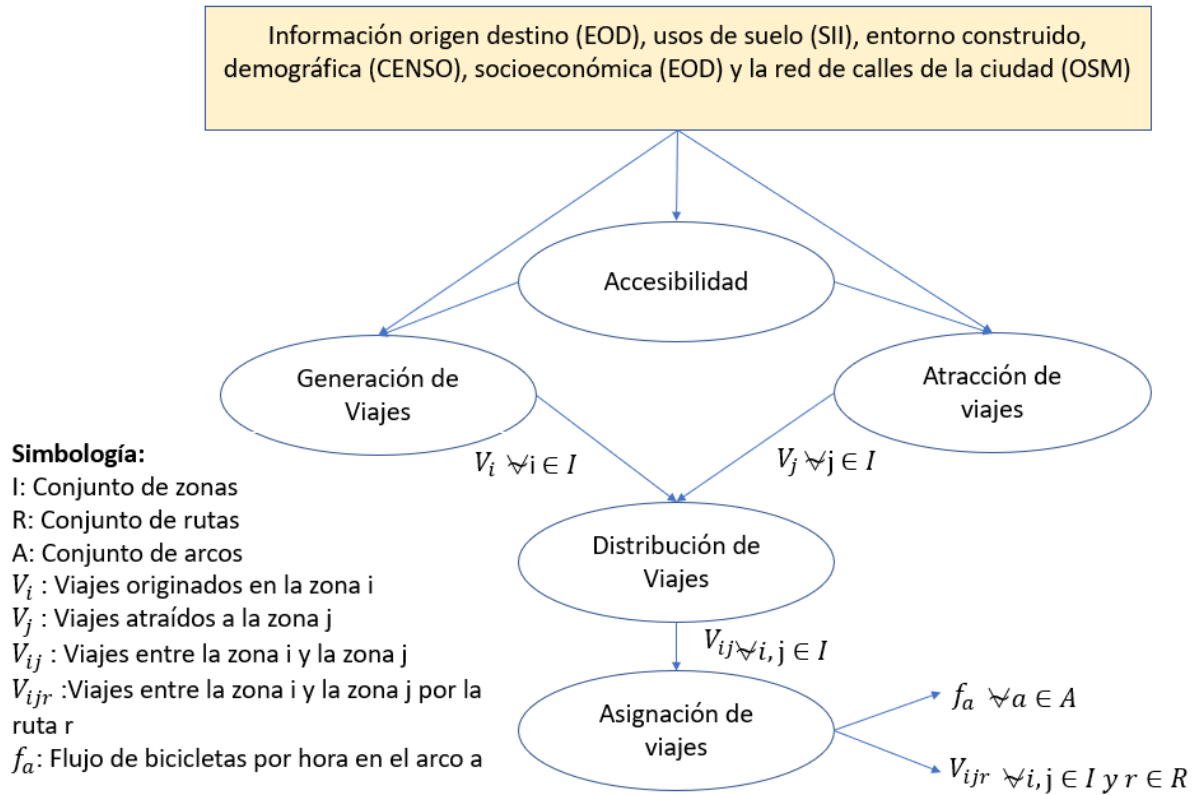


Figura 2: Estructura general de modelación. Fuente: Elaboración propia

2.1 Datos de entrada

El primer paso es recopilar información del origen y destino de viajes (incluyendo el modo utilizado y las características sociodemográficas de los usuarios), de usos de suelos, socioeconómica y la red de calles de la ciudad. La información debe estar georreferenciada y agregada al nivel de zonas (TAZ, bloques censales o similar) para utilizarla en los modelos de generación, atracción y distribución de viajes. El tamaño de las zonas puede estar dado por zonas administrativas preexistentes en la información recopilada o pueden ser creadas por el modelador. Entre mayor número de zonas utilizamos para dividir la ciudad, más detallados serán los resultados, pero se necesitará mejor información para estimar los modelos y aumentará el tiempo computacional para resolver el problema.

2.2 Accesibilidad

A partir de la información recopilada, calculamos la accesibilidad a usos de suelo y variables del entorno construido, como los metros cuadrados construidos de oficina y metros lineales de ciclovías en cada zona. Entendemos accesibilidad como “una medida de la facilidad o dificultad de realizar desplazamientos desde o hacia cada zona” (Ortúzar & Willumsen, 2011). Esto permite medir el acceso a infraestructura, diferentes usos de suelo o cualquier característica numérica que exista en una zona geográfica. Dentro de los múltiples indicadores de accesibilidad existentes en la literatura (ver Geurs & van Wee, 2004), elegimos una medida potencial dada su vasta aplicación. Así, la fórmula matemática para calcular la accesibilidad es la siguiente:

$$A_i^k = \sum_j M_j^k \cdot \exp(-\phi \cdot d_{ij}) \quad (1)$$

Aquí A_i^k es la accesibilidad de la zona i a las oportunidades de tipo k , con M_j^k siendo una variable que describe la magnitud de dicha oportunidad en cada zona j (por ejemplo, la superficie construida de un tipo de uso de suelo o un indicador de la presencia de infraestructura ciclista) y d_{ij} la distancia entre la zona i y la zona j . El parámetro ϕ es un factor de impedancia que hace más o menos relevante la ponderación de la distancia en la accesibilidad total, el que debe ser calibrado para encontrar la función que mejor represente el efecto de la accesibilidad a la oportunidad. Este parámetro se estima empíricamente junto con los parámetros del modelo de elección descrito en la siguiente subsección.

2.3 Generación y partición modal de viajes en bicicleta

Para modelar la generación de viajes en bicicleta utilizamos un modelo Logit binomial que calcula la probabilidad de que una persona de la categoría n que viaja desde la zona i realice ese viaje en bicicleta:

$$P_{ni} = \frac{1}{1 + e^{-(ASC + \beta \cdot x_{ni})}} \quad (2)$$

Donde β es un vector de parámetros por estimar y x_{ni} es un vector de variables explicativas que incluyen características del tomador de decisión tipo n y atributos de la zona en que reside, incluyendo accesibilidades a oportunidades.

Finalmente, el número de viajes en bicicleta generados en cada zona i , es:

$$O_i = \sum_n N_{ni} \cdot \rho \cdot P_{ni} \quad (3)$$

Donde N_{ni} es el número de personas de categoría n que viven en la zona i y ρ_n es la tasa de generación de viajes para el usuario tipo n , y P_{ni} es la probabilidad de la ecuación (2).

2.4 Atracción de viajes

El número de viajes en bicicleta atraídos por cada zona j se estima asumiendo una relación lineal entre el número de viajes D_j y un vector de atributos de la zona z_j , que incluye medidas de accesibilidad.

$$D_j = (ASC_j + \alpha \cdot z_j) \cdot \varphi \quad (4)$$

El factor φ se calcula para asegurar que el total de viajes atraídos se ajuste al total de viajes generados.

2.5 Distribución

Utilizamos un modelo gravitacional doblemente acotado a orígenes y destinos. Entonces, para estimar la cantidad de viajes entre las zonas i y j , V_{ij} , debemos resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$V_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(d_{ij}) \quad (5)$$

$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j D_j f(d_{ij})}, \quad B_j = \frac{1}{\sum_i A_i O_i f(d_{ij})} \quad (6)$$

En las expresiones anteriores la notación utilizada es la siguiente:

- V_{ij} : Viajes entre la zona de origen i y la zona de destino j .
- O_i : Total de viajes generados en la zona i .
- D_j : Total de viajes atraídos a la zona j .
- A_i, B_j : Factores de balance.

La función de impedancia para realizar un viaje desde la zona i a la zona j , $f(d_{ij})$, está descrita por:

$$f(d_{ij}) = \exp(\chi \cdot (d_{ij} + \delta \cdot h_{ij})) \quad (7)$$

donde

- d_{ij} : distancia mínima sobre la red entre el centroide de la zona i a la zona j (en metros).
- h_{ij} : Diferencia de altura (en metros) entre el centroide zona i y el centroide zona j .
- δ : penalización por diferencia de altura.
- χ : Factor de impedancia.

Los parámetros de δ y χ de la función de impedancia se calibran para lograr una distribución simulada de largo de viajes en bicicleta lo más cercana posible a la distribución agregada observada.

2.6 Asignación

Dado que los viajes V_{ij} son calculados a nivel zonal y, en principio, se realizan entre los centroides de las respectivas zonas. Para evitar una sobrecarga de los arcos cercanos a estos centroides, las coordenadas de los orígenes y destinos de cada par OD son distribuidos aleatoriamente al interior de las respectivas zonas. Los viajes se asignan a la red mediante el algoritmo de rutas mínimas A* (Hart et al., 1968). El costo de cada arco en esta asignación depende de múltiples variables relevantes en la elección de la ruta, incluyendo la existencia o no de ciclovías en el arco. La función de costo generalizado definida se entrega a continuación.

$$C_a = l_a \cdot (v_{1a} \cdot \dots \cdot v_{Ga}) \quad (8)$$

En estas expresiones C_a es el costo generalizado del arco a , l_a es el largo del arco a , y los parámetros v son factores que reducen o aumentan la impedancia del arco en función de sus atributos (cómo por ejemplo la presencia de buses, ciclovías, tráfico motorizado, pendiente, etc.). El costo generalizado C_a se puede interpretar como un “largo equivalente” del arco, tomando en cuenta estos factores que lo vuelven más o menos atractivo para utilizarlo. El algoritmo de ruta mínima asigna los viajes por los arcos que sumen el menor costo, asumiendo que existe un *trade-off* entre el largo del arco y elementos como la presencia de infraestructura (un ciclista podría estar dispuesto a desviarse de la ruta estrictamente mínima en cuanto a distancia para tomar otra más larga pero más confortable o segura). Los parámetros v son calibrados para reproducir conteos de flujos observados.

3. CASO DE ESTUDIO: SANTIAGO DE CHILE

A continuación, utilizamos la metodología general detallada en la sección 2 para modelar los viajes en bicicleta de la ciudad de Santiago, presentando los procesos de estimación, calibración y simulación realizados en cada etapa (Figura 3). Primero, recopilamos información de orígenes y destinos (EOD), usos de suelo (SII), demografía (CENSO), del entorno construido y la red vial de OpenStreetMap. A partir de estos datos, calculamos la accesibilidad a diferentes usos de suelo e infraestructura vial. Luego estimamos los modelos de generación y atracción de viajes con información del año 2012, correspondiente a la más reciente encuesta origen destino de la ciudad de Santiago.

Por último, realizamos un proceso iterativo de simulación y calibración de los modelos de generación, atracción, distribución y asignación de viajes para el año 2019. La calibración se realiza exclusivamente con flujos observados de bicicletas. En las siguientes secciones detallamos el proceso de preparación de datos, estimación, calibración y simulación.

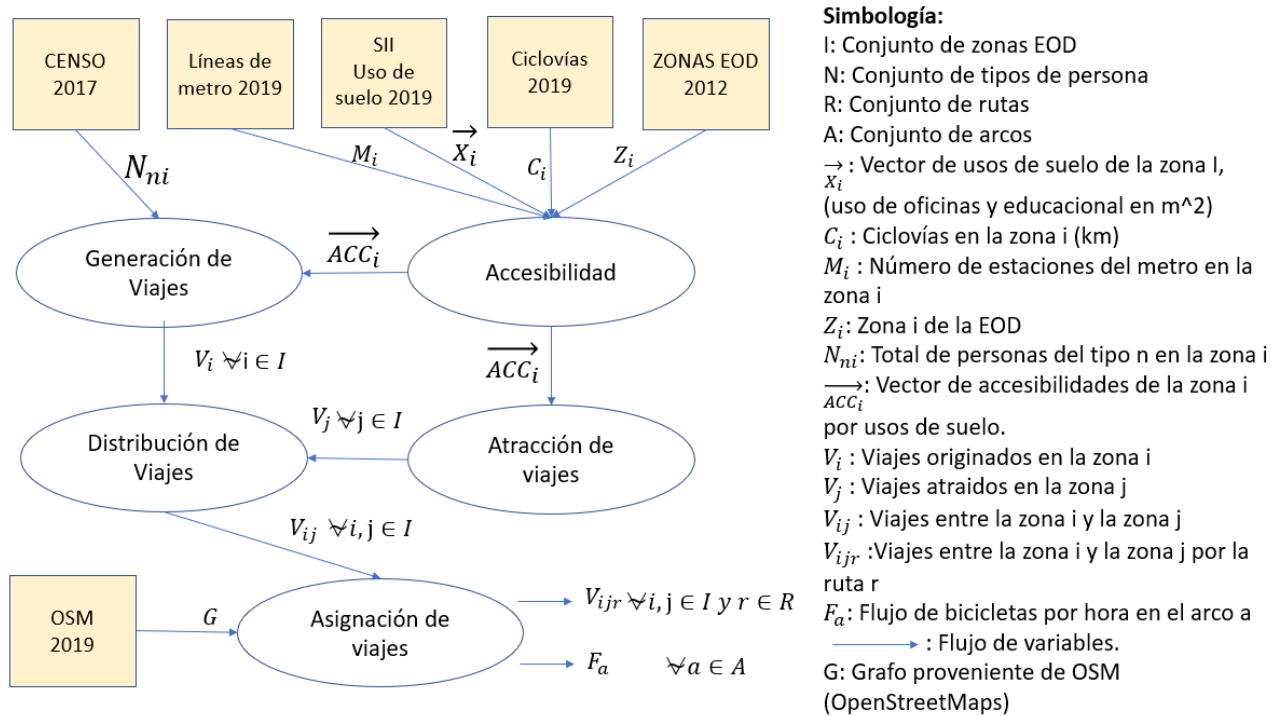


Figura 3: Mapa conceptual de simulación. Fuente: Elaboración propia.

3.1 Preparación de datos

Para la estimación de los modelos utilizamos la Encuesta Origen Destino (EOD, 2012; Universidad Alberto Hurtado, 2014), información del entorno construido del Metro (2012) y ciclovías (2012), el catastro de usos de suelo (SII, 2012) y la red de calles de OSM (2012). Para la simulación de 2019, se utilizó la proyección de población del INE (INE, 2017) para el año 2019, archivos con información de las líneas del Metro (2019) y ciclovías (2019) de la ciudad, el catastro de usos de suelo (SII, 2019) y la red de calles de OSM (2019). Con estas bases de datos estimamos los modelos con información de 2012 y simulamos y calibramos con información de 2019.

La especificación geoespacial o zonificación conocida en la literatura como TAZ es el nivel de detalle con el que se divide un área de estudio. En esta investigación optamos por utilizar la zonificación administrativa de la Encuesta Origen Destino (EOD) de 2012 de la ciudad de Santiago por la simplicidad de combinar diferentes bases de datos dentro de una misma agregación espacial. El área geográfica utilizada considera 740 TAZs, de la EOD (Figura 4), la que agrupa toda la información georreferenciada. Trabajamos a nivel zonal en los modelos de generación, atracción y distribución de viajes, pero en el modelo de asignación trabajamos a nivel de calles. En la Figura 4, todo lo que aparece en azul es la zona de análisis considerada en la investigación. Hay algunas zonas en blanco rodeadas de zonas azules, esas zonas corresponden a áreas agrícolas, parques de gran tamaño o zonas sin datos en la EOD 2012.

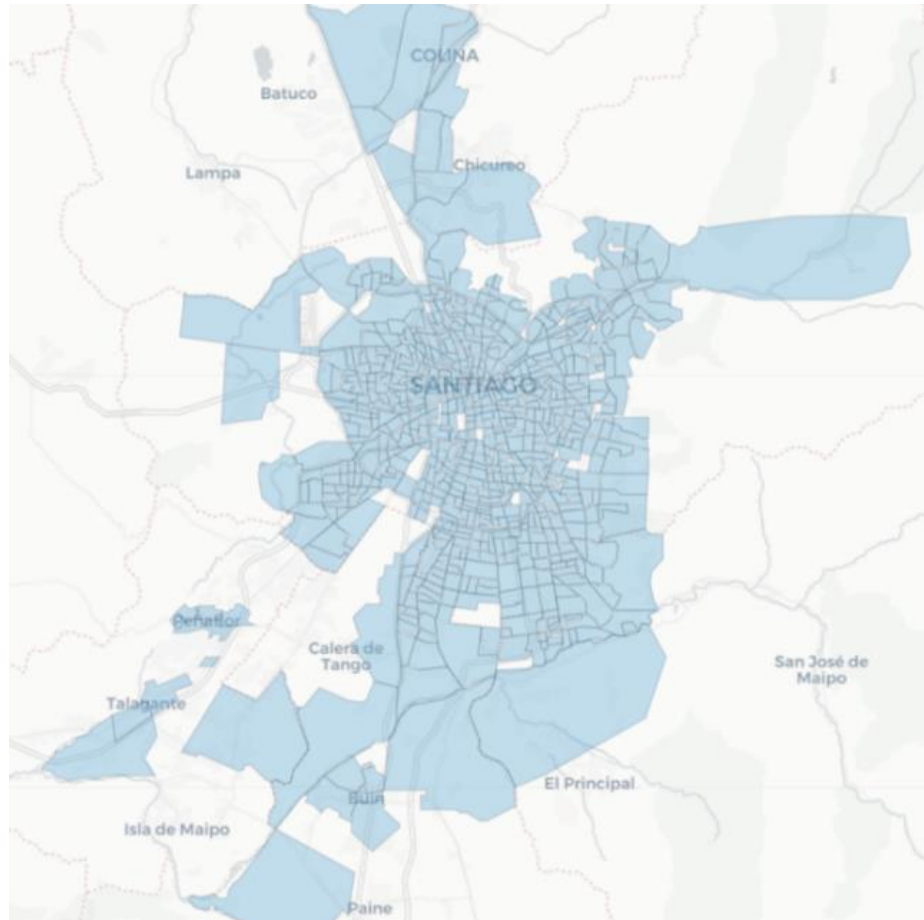


Figura 4: Zonificación de la ciudad de Santiago.
Fuente: elaboración propia a partir de EOD 2012.

Con esto, estimamos las funciones de accesibilidad a oficinas, ciclovías y estaciones de metro (Figura 5). Para ello se utilizaron los metros cuadrados construidos de oficina ($\phi = -1.5$), los metros lineales de ciclovías ($\phi = -0.25$) y las estaciones del Metro construidas ($\phi = -0.5$ y $\phi = -4$), respectivamente. Los parámetros de impedancia (ϕ) los estimamos buscando el mejor ajuste para cada variable independiente para los modelos de generación y atracción de viajes.

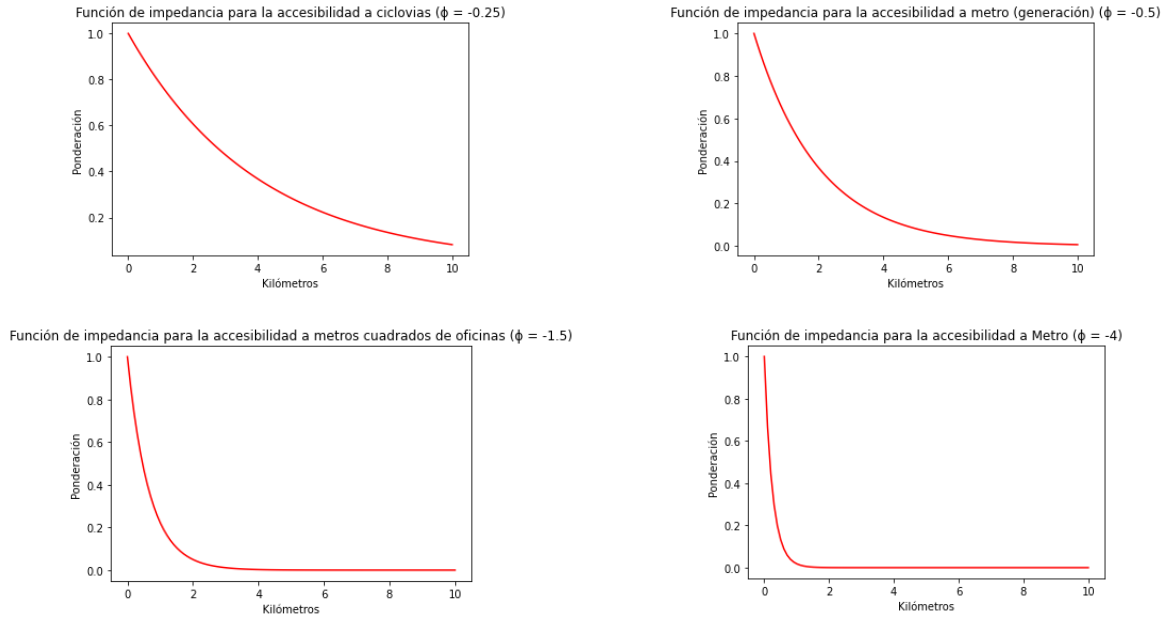


Figura 5: Funciones de impedancia para la accesibilidad a ciclovías ($\phi = -0.25$), Metro ($\phi = -0.5$), oficinas ($\phi = -1.5$) y Metro (para el modelo de atracción; $\phi = -4$).

Fuente: elaboración propia.

3.2 Generación de viajes en bicicleta

De las variables del entorno construido encontramos que fue significativo solo el uso de suelo de oficina y educacional, las ciclovías y estaciones del Metro. Del entorno natural solo utilizamos la altura, calculada como la elevación del centroide de cada zona menos la altura del centro de Santiago que corresponde a aproximadamente 512 msnm, para captar el efecto de la pendiente, el que mostró ser negativo y significativo.

De las variables sociodemográficas testearon el ingreso del hogar, la densidad poblacional, el sexo, la tenencia de vehículo y la edad. Nos quedamos con la tenencia de vehículo, la edad y la altura dejando el ingreso por hogar fuera del análisis por falta de significancia estadística.

Encontramos que el sexo era una variable relevante a nivel individual, pero la descartamos porque asumimos que las zonas poseen una cantidad similar de hombres y mujeres. Por lo tanto, al agregar el total de viajes por zona el sexo no genera diferencia a nivel zonal.

| Variable | Nombre | Tipo | Valor (α_i) | t-test |
|-------------|---------------------------|--------------------|----------------------|--------|
| ASC | constante Bicicleta | - | -4.61 | -28.1 |
| Vehículo | vehículo en el hogar | sociodemográfica | -0.63 | -7.2 |
| ACC_ciclo | accesibilidad a ciclovías | entorno construido | $2 \cdot 10^{-5}$ | 2.5 |
| ACC_metro | accesibilidad al Metro | entorno construido | -0.03 | -1.7 |
| ACC_oficina | accesibilidad a oficina | entorno construido | $8 \cdot 10^{-7}$ | 2.5 |
| Altura | altura | entorno natural | $2 \cdot 10^{-3}$ | -4.1 |
| Edad | edad (17 a 68 años) | sociodemográfica | 1.44 | 9.9 |

Tabla 1: Resultados de la estimación del modelo de generación de viajes. Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, es importante notar que todos los parámetros tienen los signos esperados de acuerdo con la literatura, una significancia estadística mayor al 92% y un estadístico R^2 igual a 81%.

Para representar la edad y la tenencia de vehículo utilizamos dos variables “dummy”. Si una persona tiene entre 17 a 60 años, la variable edad toma el valor 1, en caso contrario toma el valor 0. Para el caso de la tenencia de vehículo, si el hogar donde vive la persona tiene uno o más vehículos, la variable toma el valor 1, en caso contrario, toma el valor 0. En el tramo de edad, entre 17 y 60 años, la probabilidad de realizar un viaje en bicicleta es mayor a edades fuera de ese tramo. La tenencia de vehículo en el hogar disminuye la probabilidad de realizar un viaje en bicicleta.

La diferencia de altura con respecto al centro de la ciudad tiene un valor negativo para las zonas que se encuentran a mayor altitud y positivo para las que se encuentran a menor altitud. Esto puede explicarse porque las zonas de menor altitud tienen una menor pendiente con respecto al centro de la ciudad.

La accesibilidad a oficinas y ciclovías aumenta la probabilidad de realizar un viaje en bicicleta, pero bajo distintos rangos de influencia. En el caso de las oficinas, la probabilidad de uso de la bicicleta aumenta si está en un rango de hasta dos kilómetros. En el caso de las ciclovías el rango es de hasta ocho kilómetros de distancia. Por último, la accesibilidad a estaciones del Metro disminuye la probabilidad de realizar viajes en bicicleta hasta un rango de dos kilómetros.

3.3 Atracción de viajes

Para calcular la atracción de viajes utilizamos la regresión lineal cuyos parámetros estimados se presentan en la Tabla 2.

| Variables | Tipo | Coefficientes (β) | Valor P |
|--------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------|
| Intercepto | - | 106 | no aplica |
| m ² Oficina | Uso de suelo | 0,001 | $1,6 \cdot 10^{-11}$ |
| Ciclovías | Entorno construido | 0,019 | $6,15 \cdot 10^{-3}$ |
| m ² Educación | Uso de suelo | 0,002 | $1 \cdot 10^{-5}$ |
| ACCmetro | Entorno construido | -1.54 | 0.09 |
| Altitud | Entorno Natural | -0.15 | 0.08 |

Tabla 2: Resultados de la estimación del modelo de atracción de viajes. Fuente: elaboración propia

Todas las variables son significativas con un 91% de confianza o más, los coeficientes calibrados tienen los signos esperados y el R^2 es igual a 10%, relativamente bajo en comparación con los demás modelos lo que se debe principalmente al alto número de ceros muestrales de la base de datos. La accesibilidad al Metro actúa como un detractor de viajes en bicicleta junto a la altura, mientras que los metros cuadrados construidos de Educación, Oficina y metros lineales de ciclovías dentro de la zona actúan como atractores de viajes. Por último, el intercepto es de 106 viajes atraídos el cual establece la base de atracción de viajes para cada zona.

4. CALIBRACIÓN Y SIMULACIÓN PARA 2019 (PUNTA MAÑANA)

Se dispone de conteos de flujos para la punta mañana (6:00 a 9:00 hrs) realizados 50 puntos durante el año 2019, razón por la que se decidió calibrar el modelo para este período. Dado que el CENSO 2017 no preguntó por tenencia de vehículo, la población por zona se obtiene multiplicando los valores de la EOD

2012 por el factor de crecimiento (15%) indicado por el INE para el año 2019 (15%). La tasa de generación de viajes de la punta mañana (0.6 viajes/persona) también se calcula a partir de la EOD de 2012.

El modelo se calibra para reproducir conteos realizados el año 2019 en las comunas de Providencia, Santiago y Puente Alto en 50 puntos diferentes. Inicialmente se calibran los factores ν de la ecuación (8), obteniendo los valores descritos en la tabla 3

| Elemento | ν | interpretación |
|--------------------|-------|--|
| <i>ciclovía</i> | 0.9 | Los arcos con ciclovías tienen un largo equivalente al 90% del largo real del arco |
| <i>buses</i> | 1.1 | Arcos con presencia de buses son percibidos por los usuarios como si fueran un 10% más largos |
| <i>eje troncal</i> | 1.2 | Ejes troncales (e.g. Alameda, Santa Rosa, Gran Avenida, etc), habitualmente complejos y con gran número de pistas para motorizados son percibidos como si fueran un 20% más largos |

Tabla 3: Factores de reducción o aumento de la impedancia por arco. Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se calibran los parámetros del modelo de distribución (ecuación 8), obteniendo $\chi = -0.00065$ y $\delta = 3$. Finalmente se ajusta la constante modal del modelo descrito en la ecuación (2) y reportada en la tabla 1, obteniendo $ASC = -4.31$.

Con los parámetros anteriores se logra reproducir los conteos con un buen ajuste ($R^2 = 0.73$), como se observa en la Figura 6.

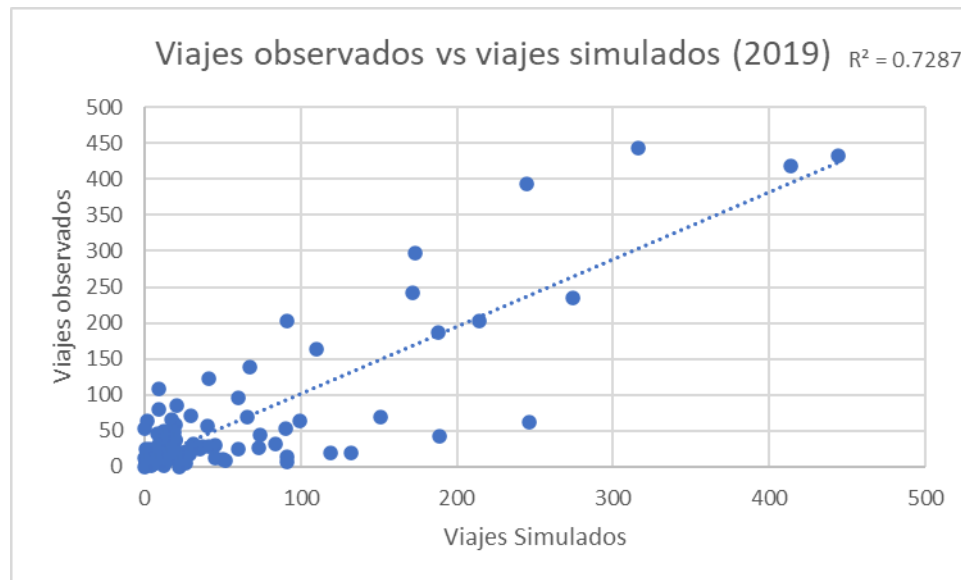


Figura 6: flujos simulados v/s observados. Fuente: elaboración propia.

El total de viajes generados en el año 2019 resulta ser de 206.000, lo que implica un aumento del 34% respecto al total de viajes observados para el mismo período en la EOD 2012. Las figuras 7 y 8 muestran los resultados de generación/atracción y de distribución de viajes en bicicleta, respectivamente:

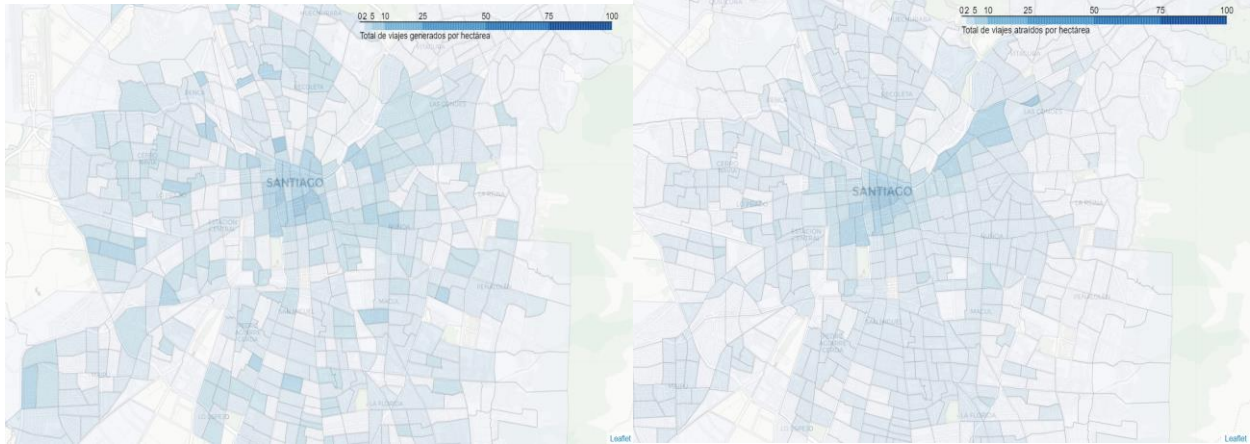


Figura 7: Viajes por hectárea generados (izq) y atraídos (der) por zona. Fuente: Elaboración propia

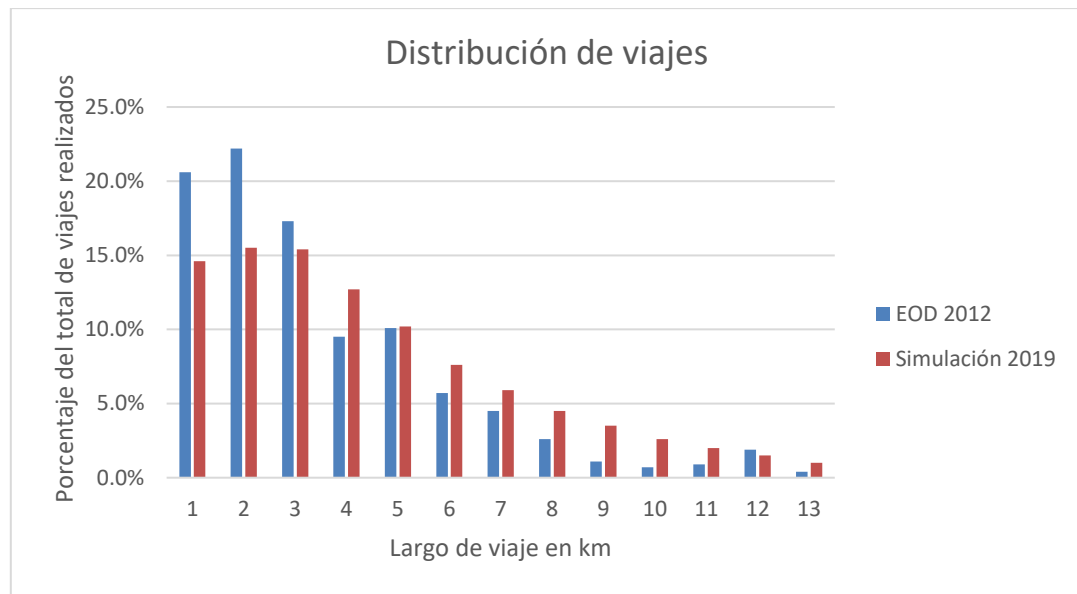


Figura 8: Distribución de viajes en bicicleta según la distancia de viaje para la EOD 2012 y la simulación de 2019. Fuente: elaboración propia

Los resultados de asignación de viajes a la red se presentan en la Figura 9. Para facilitar la lectura del mapa, se marcan sólo los arcos con un flujo superior a 100 bicicletas por hora. Se puede apreciar una gran concentración de flujos en el centro de la ciudad donde convergen muchos pares OD. Se registra un flujo máximo de bicicletas por hora de 857, y se puede corroborar que las ciclovías captan mayor cantidad de viajes en comparación con las calles sin infraestructura dedicada. Destacan los ejes de la Alameda al poniente de la Autopista Central y la avenida Andrés Bello, donde se ubica la ciclovía del Mapocho 42k, una de las más utilizadas de Santiago.

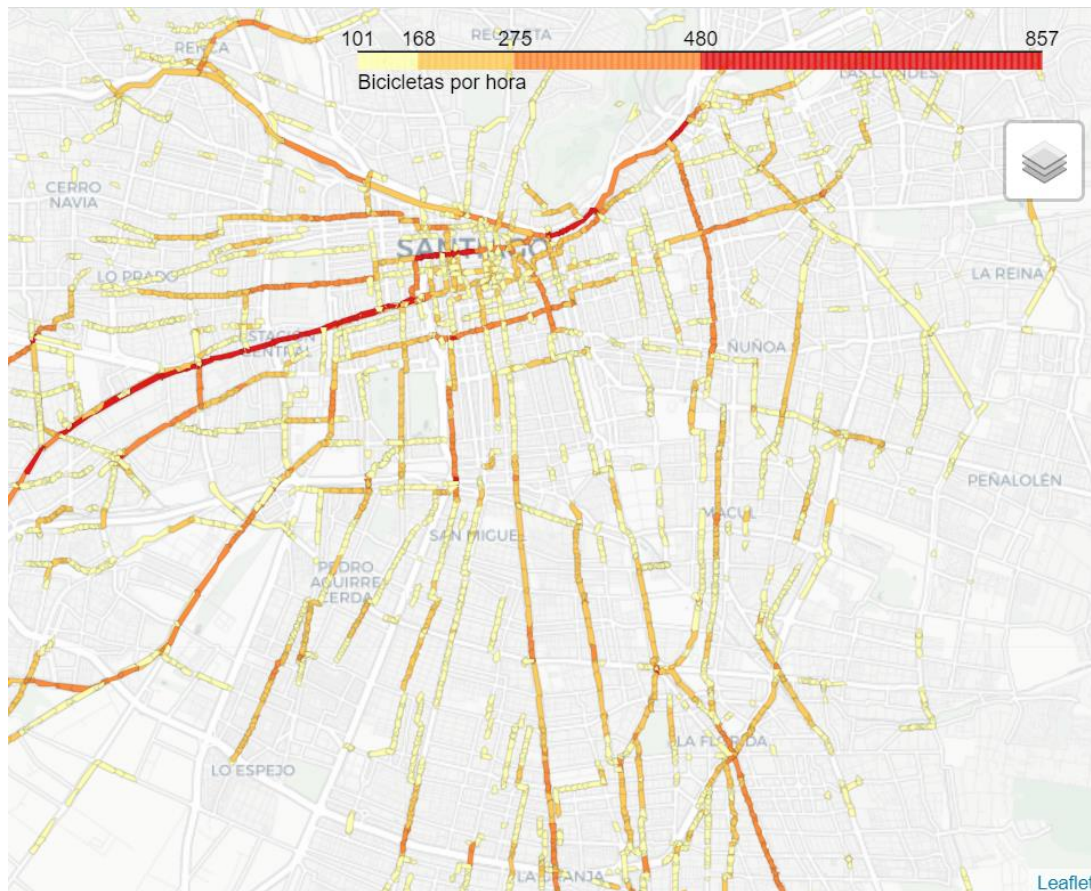


Figura 9: Mapa de calor, bicicletas por hora durante punta mañana, simuladas para 2019. Fuente: elaboración propia.

5. VALIDACIÓN

Se simula la construcción de una ciclovía unidireccional en la calle Eliodoro Yañez (Providencia), que no existía en el período de calibración, pero que fue implementada posteriormente. El proyecto, inaugurado en el año 2020, involucró la construcción de cuatro nuevos kilómetros de ciclovía y ofrece una excelente oportunidad para comparar los flujos predichos por el modelo ante este cambio en la red con los flujos efectivamente observados posterior a su inauguración.

Un primer resultado indica que la construcción de esta ciclovía tiene un impacto en el total de viajes generados y atraídos en bicicleta, produciendo nuevos viajes que concentran sus orígenes y destinos en zonas cercanas a la nueva infraestructura (Figura 10). El efecto más local en la atracción de viajes se explica por que el modelo de atracción solo es sensible a la presencia de ciclovías en la zona, mientras que el de generación/partición tiene como variable explicativa la accesibilidad a ciclovías, que tiene un alcance espacial mayor (ver figura 5). En términos absolutos, la construcción de la ciclovía implica 1743 nuevos viajes en la punta mañana (en promedio 581 viajes por hora), lo que representa un aumento de 1% del total de viajes y de 2.17% del total de kilómetros recorridos en bicicleta respecto a la situación base (Tabla 4).

Con el supuesto conservador de que el 20% de los nuevos viajes en bicicleta antes eran realizados en auto, y basándonos en la estimación de 0.42 USD de costos externos por pax-km para el auto de Rizzi y de la Maza (2017), los 7033 nuevos kilómetros recorridos en bicicleta se traducen en una reducción de externalidades negativas equivalentes a USD 590 por día laboral normal o, aproximadamente, 122 millones de pesos al año (solo por la punta mañana).

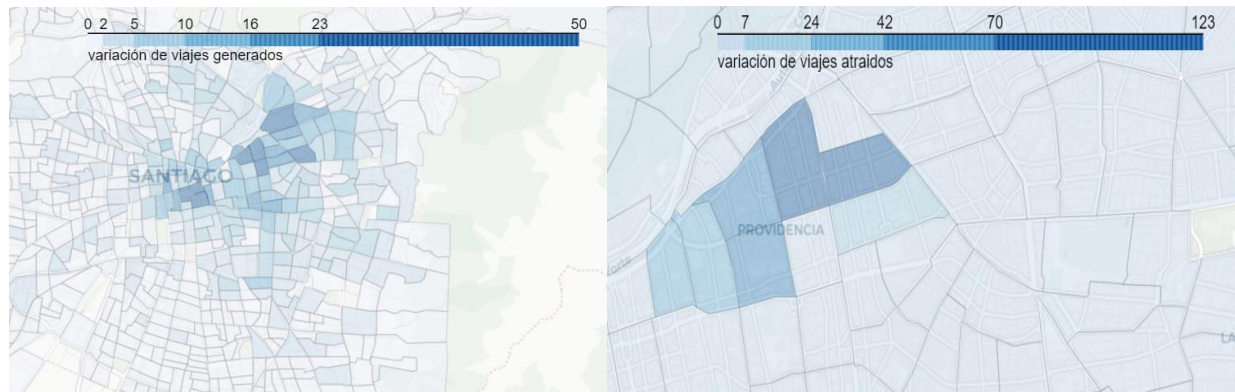


Figura 10: Nuevos viajes en bicicleta según zona de origen (izq) y destino (der). Fuente: elaboración propia.

| | Sin proyecto | Con proyecto | Variación porcentual |
|--|--------------|--------------|----------------------|
| Viajes generados por hora promedio | 68.534 | 69.115 | 0.85% |
| Kilómetros recorridos en bicicleta por hora | 323.638 | 330.671 | 2.17% |

Tabla 4: Viajes generados y kilómetros pedaleados con y sin proyecto. Fuente: Elaboración propia

Se dispone de mediciones realizadas por la empresa Eco-Counter (2022) en la ciclovía efectivamente construida, aguas arriba de su intersección con Av. Ricardo Lyon. Para el período punta mañana, en la dirección oriente-poniente, los flujos promedio observados son de 56, 85 y 104 bicicletas por hora para los años 2020, 2021 y 2022, respectivamente. El flujo relativamente bajo en los primeros años se explica en parte por la pandemia y por el cambio de localización de ciclovía del costado izquierdo al derecho de la calzada, lo que vino acompañado de trabajos de reasfaltado durante fines de 2021 y principios de 2022. Para el arco correspondiente a las mediciones, el modelo predice un flujo de 166 bicicletas por hora, lo que es superior a lo observado, aunque es razonable esperar que la tendencia de flujos continúe al alza. De todas maneras, este tipo de resultados dan luces de revisar el proceso de calibración del modelo, el que podría beneficiarse de observaciones de flujos en un número mayor de puntos.

6. FUNCIONALIDADES DE LA HERRAMIENTA / INTERFAZ

Para permitir el uso de la plataforma Ciclo-P por parte de los usuarios, se creó una interfaz web. Esta permite visualizar en mapas interactivos toda la información involucrada en el modelo, tanto los datos de entrada como los resultados de la simulación.

Todas las secciones de la interfaz tienen el mismo principio de diseño, a la izquierda se encuentra el menú de navegación y de sesión, en la parte central hay un mapa que permite visualizar y seleccionar objetos, y a la derecha se despliegan la información detallada sobre la sección y/o el objeto seleccionado.

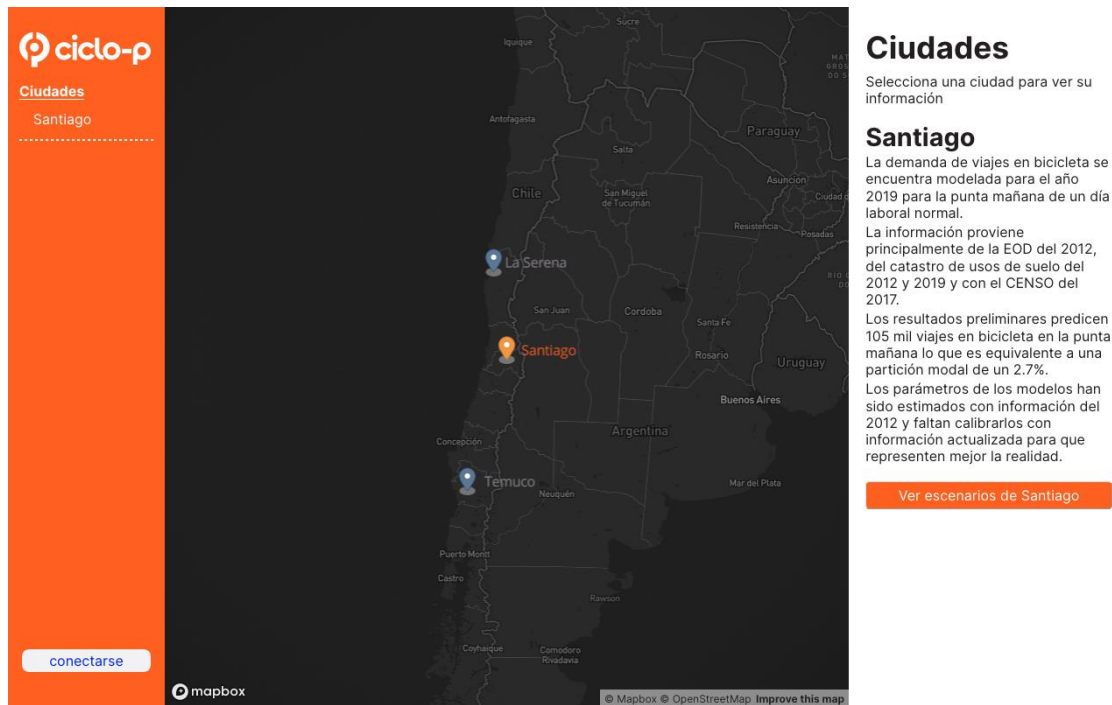


Figura 11: Página principal de Ciclo-P. Fuente: www.ciclo-p.cl

Al acceder a la plataforma se despliega un mapa que permite seleccionar una de las distintas ciudades de Chile donde está (o estará prontamente) habilitado el uso de Ciclo-P. Al seleccionar una de las ciudades se muestra una breve explicación de los datos de entrada utilizados para cada caso y se accede a la vista de escenarios.



Figura 12: Elección de escenarios. Fuente: www.ciclo-p.cl

La vista de escenarios se organiza en tres secciones. En primer lugar, se muestra el escenario base, que contiene los datos de entrada sin modificaciones que se utilizaron para crear el modelo. En segundo lugar, se muestran los escenarios creados por el usuario (en el caso de que haya iniciado sesión). Y en último lugar se muestran los escenarios creados por los autores de Ciclo-P, que ejemplifican distintos tipos de intervenciones en la ciudad y sus consecuencias en los viajes en bicicleta.

Al seleccionar uno de los escenarios, se accede a la sección que lo muestra en detalle. Cada escenario está compuesto por los datos de entrada, donde se pueden ver y modificar la población, los metros cuadrados construidos para distintos usos de suelo y la red de ciclovías. Y los resultados de la simulación, organizados a partir de las decisiones de movilidad modeladas. A futuro se espera modelar la elección de modo, por lo que la interfaz considera una sección relacionada con la partición modal (la restante cuarta etapa del modelo clásico de transporte).

Para cada una de las secciones recién descritas, se puede visualizar un mapa que muestra la distribución de las variables en el territorio de estudio, tanto en términos absolutos o normalizadas por la superficie de cada zona de modelación. Al seleccionar una zona, se pueden ver los datos detallados de esta.

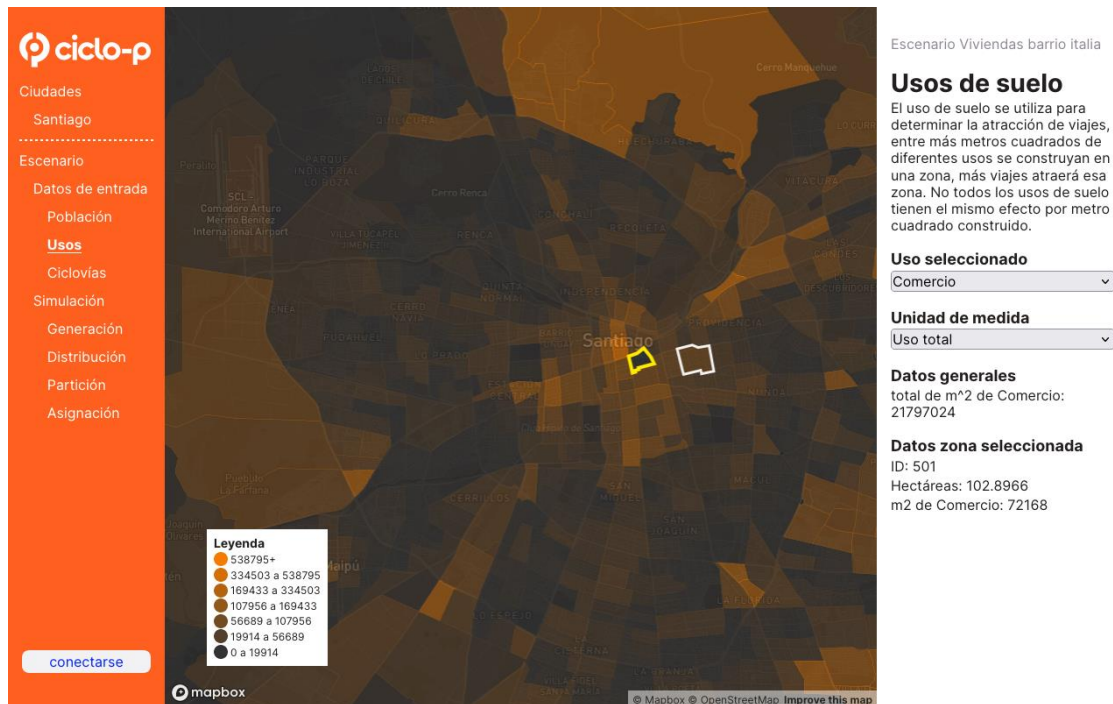


Figura 13: Uso de suelo comercial en la ciudad de Santiago. Fuente: www.ciclo-p.cl.

Una vez que el usuario realizó todas las modificaciones en los datos de entrada de su escenario, este puede ser guardado y enviado a la cola de simulación. Ambos procesos ocurren en los servidores de Ciclo-P. Una vez que la interfaz recibe los resultados de la simulación, estos pueden ser explorados en detalle. Al navegar por las distintas secciones el mapa conserva su encuadre, para facilitar una lectura entre las distintas capas y permitir la comprensión espacial del modo en que los cambios en la ciudad conllevan cambios en el patrón de viajes.

En la sección de simulación, además de mostrarse los resultados del escenario elegido, es posible definir un escenario de referencia, que por defecto es el escenario base. Las secciones que componen la simulación

permiten ir alternando entre el escenario creado, el escenario de referencia o incluso la diferencia entre ambos para cada parámetro simulado.

Las secciones de simulación están organizadas en base a las etapas del modelo, pero los datos desplegados en cada una pueden estar combinados con información de etapas anteriores o posteriores para facilitar la lectura de los resultados. Las secciones de simulación y sus funcionalidades son las siguientes.

- **Generación:** En la sección de generación (de viajes), es posible revisar el total de viajes en bicicleta generados o atraídos en cada zona, como se ilustra en la Figura 6.



Figura 14: Resultado de la simulación de la generación y atracción de viajes en bicicleta de un escenario en la ciudad de Santiago. Fuente: www.ciclo-p.cl.

- **Distribución:** En la sección de distribución (de viajes) es posible ver un histograma que muestra distribución agregada de viajes según la distancia, además se puede elegir una zona específica para visualizar los orígenes o destinos de los viajes que atrae o genera, respectivamente
- **Partición:** En la sección de partición se puede revisar qué porcentaje de los viajes en bicicleta se realizan desde o hacia cada zona.
- **Asignación:** Por último, en la sección de asignación se muestra el número de viajes que el modelo asigna a cada arco de la red vial, asociando esta variable al grosor y color de cada arco. Esto se ilustra en la Figura 14.



Figura 14: Resultado de la simulación de la asignación de viajes en bicicleta de un escenario en la ciudad de Santiago. Fuente: www.ciclo-p.cl

7. CONCLUSIONES

A nivel internacional existen herramientas que permiten calcular la generación y atracción, distribución y asignación de viajes en bicicleta, con diferentes niveles de complejidad y especialización. En esta investigación proponemos un enfoque sencillo, de bajo costo, fácilmente exportable a otras ciudades chilenas y potencialmente implementable en otras ciudades del mundo.

Los modelos estimados presentan resultados razonables y permiten capturar el impacto de la construcción de infraestructura ciclista en la generación/atracción y en la asignación a la red de viajes en bicicleta. Los resultados obtenidos por el modelo para el año base de simulación (2019) y para el caso de estudio de validación son verosímiles, aunque una calibración más robusta es necesaria.

El modelo ha sido empaquetado en una herramienta computacional web de fácil uso y que permite explorar escenarios de cambios en la población o el uso de suelo y/o de construcción de ciclovías de manera sencilla. Se espera que esta herramienta, una vez hecha pública, permita a municipios y gobiernos regionales explorar alternativas de diseño de su red vial, generando además visualizaciones que pueden ser útiles para los procesos de difusión y participación ciudadana asociados a la implementación de proyectos de infraestructura cicloinclusiva.

El trabajo a futuro considera una calibración del modelo utilizando un número mayor de conteos de flujo (con una mejor representación espacial del área de estudio) para Santiago y la implementación completa de la herramienta para la conurbación de La Serena y Coquimbo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS, FONDAP 1522A002) y el financiamiento de ANID mediante su programa FONDEF (IDEA I+D ID22I10067)

REFERENCIAS

- Celis-Morales, C. A., Lyall, D. M., Welsh, P., Anderson, J., Steell, L., Guo, Y., ... & Gill, J. M. (2017). Association between active commuting and incident cardiovascular disease, cancer, and mortality: prospective cohort study. *bmj*, 357, j1456.
- de Hartog, J. J., Boogaard, H., Nijland, H., & Hoek, G. (2010). Do the health benefits of cycling outweigh the risks?. *Environmental health perspectives*, 118(8), 1109-1116.
- Echiburu, T., Hurtubia, R., and Muñoz, J. C. (2021). The role of perceived satisfaction and the built environment on the frequency of cycle-commuting. *Journal of Transport and Land Use*, 14(1), 171–196.
- Eco-Counter. (2022). Bike count dashboard. Retrieved from <https://www.eco-visio.net/>
- Gutierrez, M., Hurtubia, R. and Ortúzar, J. de D. (2020) The role of habit and the built environment in the willingness to commute by bicycle. *Travel Behaviour and Society*, 20, 62-73.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107.
- Mora, R., Truffello, R., Oyarzún, G. (2021). Equity and accessibility of cycling infrastructure: An analysis of Santiago de Chile. *Journal of Transport Geography* 91. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.102964>
- Oja, P., Titze, S., Bauman, A., De Geus, B., Krenn, P., Reger-Nash, B., & Kohlberger, T. (2011). Health benefits of cycling: a systematic review. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 21(4), 496-509.
- Oliva, I., Galilea, P. and Hurtubia, R. (2018). Identifying cycling-inducing neighborhoods: A latent class approach, *International Journal of Sustainable Transportation*, 12:10, 701-713.
- Ortúzar, J. de D. and Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport*. John Wiley & Sons.
- Patterson, R., Panter, J., Vamos, E. P., Cummins, S., Millett, C., & Lavery, A. A. (2020). Associations between commute mode and cardiovascular disease, cancer, and all-cause mortality, and cancer incidence, using linked Census data over 25 years in England and Wales: a cohort study. *The Lancet Planetary Health*, 4(5), e186-e194.
- Ríos Flores, R. A., Taddia, A. P., Pardo, C., & Lleras, N. (2015). *Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: Guía para impulsar el uso de la bicicleta*. BID.
- Rizzi, L. I. and De La Maza, C. (2017) ‘The external costs of private versus public road transport in the Metropolitan Area of Santiago, Chile’, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 98, pp. 123–140. doi: 10.1016/J.TRA.2017.02.002.

- Rossetti, T., Guevara, C. A., Galilea, P. and Hurtubia, R. (2018). Modeling safety as a perceptual latent variable to assess cycling infrastructure. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 111, 252–265.
- Rossetti, T., Saud, V. and Hurtubia, R. (2019) I want to ride it where I like: Measuring design preferences in cycling infrastructure. *Transportation*, 46(3), 697–718.
- Tiznado-Aitken, I., Mora, R., Oyarzún, G., Vergara, J., Vecchio, G. (2022). A bumpy ride: quality standards, institutional limitations and inequalities affecting cycling infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, N°110, 103434, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103434>
- Ton, D., Duives, D. C., Cats, O., Hoogendoorn-Lanser, S., & Hoogendoorn, S. P. (2019). Cycling or walking? Determinants of mode choice in the Netherlands, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 123(1), 7-23.
- Universidad Alberto Hurtado (2014) Encuesta Origen Destino Santiago 2012. Available at: <http://www.sectra.gob.cl/biblioteca/detalle1.asp?mfn=3253> (Accessed: 14 March 2021).
- Useche, S. A., Alonso, F., Sanmartin, J., Montoro, L. V., & Cendales, B. (2019). Well-being, behavioral patterns and cycling crashes of different age groups in Latin America: Are aging adults the safest cyclists?. *PLoS One*, 14(8), e0221864.
- Geurs, K. T., & Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport geography*, 12(2), 127-140.
- World Health Organization. (2022). Walking and cycling: latest evidence to support policy-making and practice.