



Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil



ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS IMPACTOS EN LA DEMANDA DE TRANSPORTE PÚBLICO PRODUCTO DE UNA NUEVA LÍNEA DE METRO UTILIZANDO DATOS MASIVOS

Álvaro Toledo ^a

Juan Antonio Carrasco ^a

Antonio Páez ^b

^a Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción

^b School of Geography and Geology, McMaster University

Motivación

¿Fue acertada la decisión?

¿Por qué hacer un análisis espacial?

Sistema de transporte público en constante cambio

Dispersión social,
Goetzke (2003)

Competencia entre zonas.
Kerkman et al. (2017)

¿Cuáles son las variables más relevantes?

¿Cuáles fueron los sectores más beneficiados?

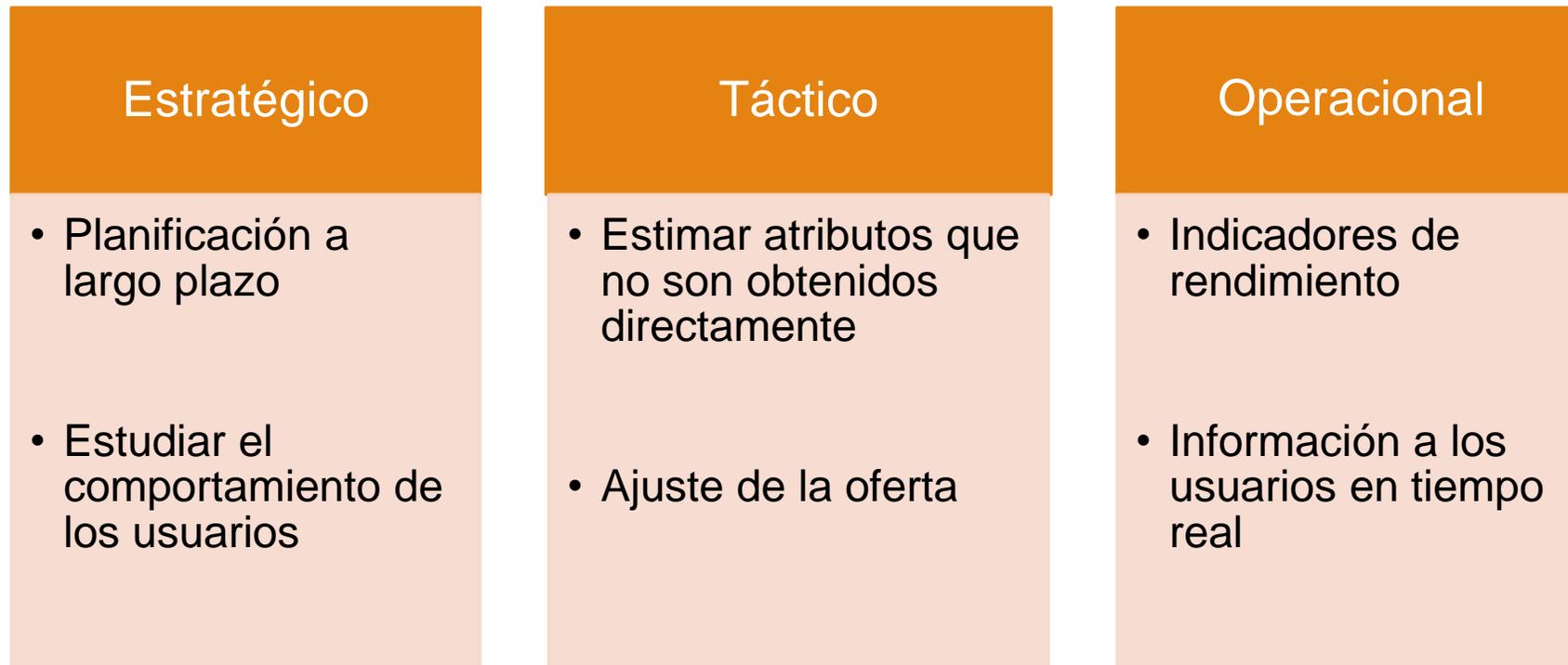
Buen nivel de servicio puede generar familiaridad con el uso del transporte público Kerkman et al. (2017)

Objetivo

Analizar el impacto sobre los usuarios al realizarse una intervención en el transporte público utilizando información masiva proveniente de tarjetas inteligentes e incorporando una componente espacial en la modelación.

¿Cómo se han utilizado las tarjetas inteligentes?

Pelletier et al. (2011) clasifican las investigaciones en tres niveles.



Modelos econométricos espaciales

Modelo espacial autoregresivo (SAR)

$$y = \rho * W * y + \alpha * i_n + X * \beta + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n)$$

Modelo espacial de Durbin (SDM)

$$y = \rho * W * y + \alpha * i_n + X * \beta + W * X * \gamma + \varepsilon$$

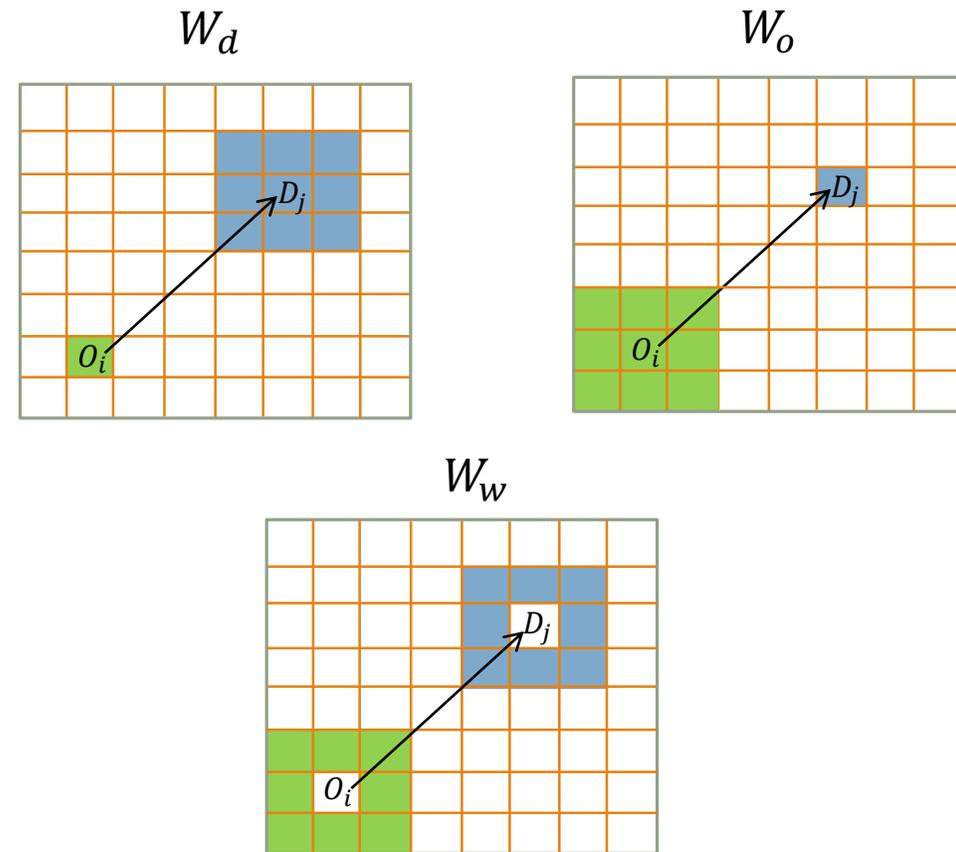
$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n)$$

Modelo de error espacial (SEM)

$$y = \alpha * i_n + X * \beta + \mu$$

$$\mu = \lambda * W * \mu + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2 I_n)$$



Aplicación modelos econométricos espaciales: Distribución

Transporte urbano

Ni et al.
(2018)

Factores que influyen en la demanda de transporte urbano.
Datos de celulares.

Kerkman et al.
(2017)

Modelo de interacción multinivel de flujo de transporte público. Datos de tarjetas inteligentes

Kerkman et al.
(2018)

Mejora a su anterior modelo.
Modelo predictivo de demanda de transporte público

Caso de estudio: Línea 6



10 Estaciones

15 km de trazado



Fecha implementación línea 6		02-11-2017				
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	
Periodo anterior	17-04-2017	18-04-2017	12-04-2017	06-04-2017	07-04-2017	
Periodo posterior	09-04-2018	10-04-2018	11-04-2018	12-04-2018	13-04-2018	

Resumen metodología

Evaluación

Efecto de atributos sobre la demanda

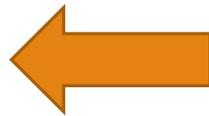
Impacto de la L6 sobre la demanda

Modelo econométrico espacial de distribución

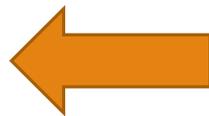
Cálculo de impactos directos e indirectos

Diferencia de viajes entre caso real y caso contraste de no construcción de L6

➤ Zonificación 777



➤ Coeficientes modelo
➤ Matriz de contigüidad



Modelos de distribución: 5 propuestas

Regresión lineal

$$y_{ij} = \sum_m (\alpha_m + \sum_k X_{ikm} \beta_{km} + \sum_k X_{jkm} \gamma_{km} + \sum_l g_{ijlm} \delta_{lm}) + \varepsilon_{ij}$$



Base de los modelos

Los datos se separan en 3 modos

- Metro directo
- Metro indirecto
- Bus

Modelo	Componente espacial incluida		
	Autoregresivo	Atributos origen y destino	Conexión
RL			
SAR	✓		
SDM WX	✓	✓	
SDM WG	✓		✓
SDM WX WG	✓	✓	✓

Autoregresivo

Atributos origen y destino

Atributos conexión

$$\rho_o W_o y_{ij} + \rho_d W_d y_{ij} + \rho_w W_w y_{ij}$$

$$\sum_m \left(\sum_k X_{ikm} \theta_{km} W_o + \sum_k X_{jkm} \varphi_{km} W_d \right)$$

$$\sum_m \left(\sum_l g_{ijlm} \theta_{km} W_o + \sum_l g_{ijlm} \varphi_{km} W_d \right)$$

VARIABLES ELEGIDAS

Viajes en periodo 6:00 – 9:00 hrs
Días laborales

Origen

- Personas
- Edad
- Pase escolar
- Ingreso
- Habitacional
- Div. Uso de suelo

Destino

- Ingreso
- Comercio
- Deporte
- Educación
- Industria
- Adm. Pública
- Salud
- Div. Uso de suelo

Conexión

- Tiempo de viaje
- N° de rutas
- N° de etapas
- Capacidad

Agregados
zonificación 777

Evaluación de impactos: Efectos de atributos sobre demanda

- Comparación de modelos y elección del que presente mejor ajuste.
- No es posible analizar los coeficientes de forma directa. Se requiere cálculo de impactos directos e indirectos, ya que en:

$$y = \rho * W * y + \alpha * i_n + x * \beta + W * x * \theta + \varepsilon$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_{ir}} = \beta_r \quad \wedge \quad \frac{\partial y_i}{\partial x_{jr}} = 0 \quad \longrightarrow \quad \text{NO SE CUMPLE}$$

$$S_r(W) = (I_n - \rho * W)^{-1} * (I_n * \beta_r + W * \theta_r)$$

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_{ir}} = S_r(W)_{ii}$$

Impacto directo

$$\frac{\partial y_i}{\partial x_{jr}} = S_r(W)_{ij}$$

Impacto indirecto

Evaluación de impactos: Impacto de L6 sobre la demanda

Diferencia de demanda de
pares OD conectados por L6

Caso Real vs Caso de contraste

↓
Datos
transacciones

↓
Estimación
modelo

Después
(2018)

Con L6



Oferta 2018

Antes
(2017)



Oferta 2017

VS

Sin L6



Oferta 2017



Oferta 2017

Caso real

Caso de contraste

Comparación modelos

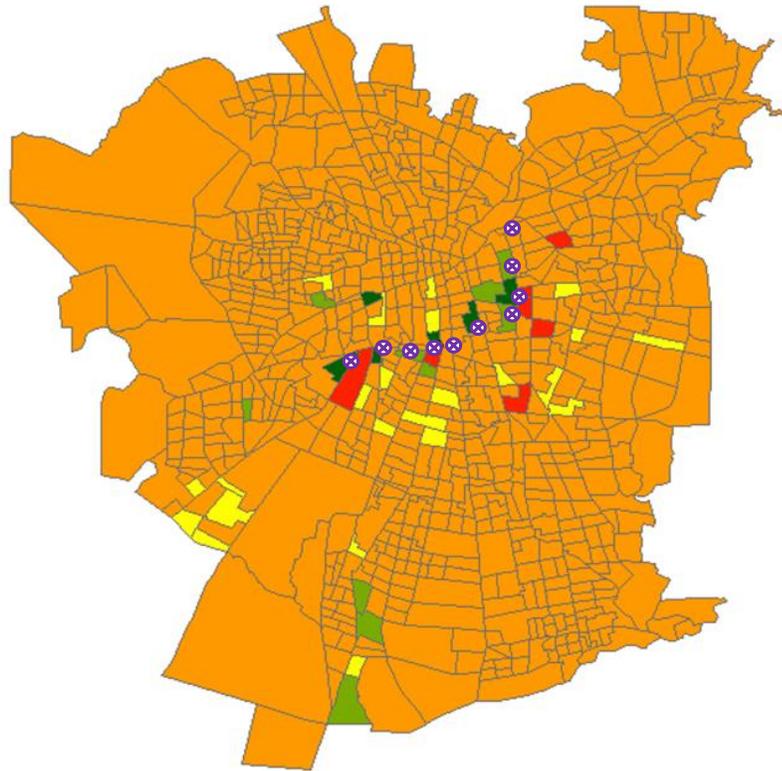
	RL	SAR	SDM WX	SDM WG	SDM WX WG
Log like	-135,030	-93,584	-92,325	-86,054	-85,212
R ²	0.67	0.69	0.70	0.73	0.73
N° variables	48	51	87	75	111
N° observaciones	110,643	110,643	110,643	110,643	110,643
Rho1 (D)		0.14 (60.6)	0.14 (58.6)	0.07 (27.5)	0.07 (27.0)
Rho2 (O)		0.11 (46.1)	0.11 (43.5)	0.07 (25.8)	0.07 (25.8)
Rho3 (w)		0.04 (7.2)	0.02 (4.4)	-0.14 (-26.2)	-0.12 (-21.7)

Impactos de atributos sobre el uso del transporte público

Atributos		Impacto directo			Impacto indirecto		
		Bus	Metro Indirecto	Metro Directo	Bus	Metro Indirecto	Metro Directo
Destino	Ingreso	0.002	0.021	-0.013	0.000	0.000	0.001
	Comercio	0.014	0.005	0.011	0.000	0.000	-0.001
	Industria	0.003	0.009	0.009	0.000	0.000	0.000
	Adm. Pública	0.010	0.012	-0.005	0.000	0.000	0.000
	Salud	-0.001	0.001	-0.030	0.000	0.000	0.000
	Div. Uso de suelo	-0.177	-0.413	0.451	0.001	0.003	0.007
Origen	Personas	0.001	0.003	0.002	0.000	0.000	0.000
	Edad	-0.004	0.000	-0.008	0.000	0.000	0.000
	Pase escolar	0.037	0.060	-0.386	-0.001	-0.001	-0.002
	Ingreso	-0.029	-0.031	0.135	0.000	0.000	0.000
	Habitacional	0.021	0.032	0.039	0.000	0.000	-0.001
	Div. Uso de suelo	0.407	0.344	0.802	-0.002	-0.001	0.001
Oferta	Tiempo de viaje	0.231	0.260	0.157	0.002	0.001	-0.002
	N° rutas	0.823	0.648	0.139	0.001	0.001	0.008
	N° etapas	-0.482	-0.548	0.055	0.000	0.002	0.008
	Capacidad	-0.008	0.045	0.015	0.000	0.000	0.000

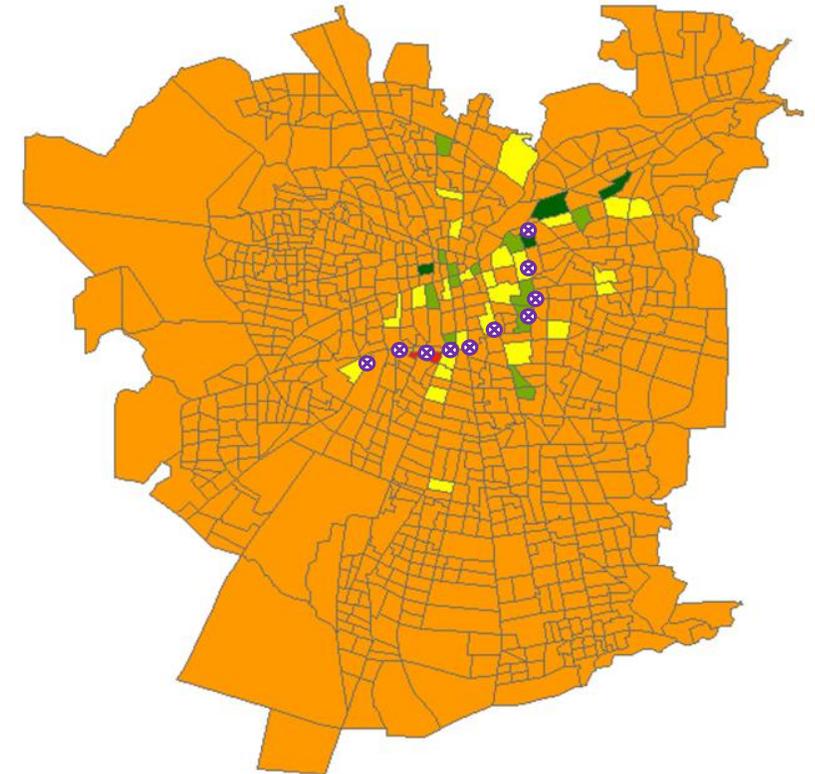
Impactos de la L6 sobre el uso del transporte público

Viajes	Frecuencia
[-500, -50]	15
] -50, 50]	732
]50, 500]	41
]500, 1500]	10
]1500, 4000]	6



Efecto L6 agregado por origen

Viajes	Frecuencia
[-500, -50]	1
] -50, 50]	743
]50, 500]	43
]500, 1500]	13
]1500, 4000]	4



Efecto L6 agregado por destino.

Conclusiones y comentarios

- Importancia de variables autoregresivas → En todos los modelos fueron significativas, afecta la estimación del resto de coeficientes.
- La demanda presenta autocorrelación espacial positiva en el caso de origen y el de destino.
- Los modos bus y metro indirecto tienen relaciones similares con los atributos.
- Impactos indirectos de los atributos sobre la demanda son bajos.
- Sectores periféricos en la zona sur se ven beneficiados por L6 en la generación de viajes. Mientras que el sector oriente presenta aumento en la atracción de viajes.

Conclusiones y comentarios

- No se controló la evasión.
- Resultado contraintuitivo: efecto negativo de la capacidad sobre la demanda de bus requiere más estudio.
- Algunas zonas cercanas a las nuevas estaciones presentan disminución en la generación de viajes y otras aumentan su generación. Se requiere mayor estudio para entender las dinámicas existentes

Muchas gracias!



Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil



ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS IMPACTOS EN LA DEMANDA DE TRANSPORTE PÚBLICO PRODUCTO DE UNA NUEVA LÍNEA DE METRO UTILIZANDO DATOS MASIVOS

Álvaro Toledo ^a

Juan Antonio Carrasco ^a

Antonio Páez ^b

^a Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción

^b School of Geography and Geology, McMaster University

Motivación y objetivo

Fue acertada la decisión?

Cuáles son las variables más relevantes?

Cuáles fueron los sectores más beneficiados?

Por qué utilizar un modelo espacial?

Dispersión social,
Goetzke (2003)

Competencia entre zonas.
Kerkman et al. (2017)

Buen nivel de servicio puede generar familiaridad con el uso del transporte público Kerkman et al. (2017)

Sistema de transporte público en constante cambio

Objetivo general

Analizar el impacto sobre los usuarios al realizarse una intervención en el transporte público utilizando información masiva proveniente de tarjetas inteligentes e incorporando una componente espacial en la modelación.

Distribución de viajes

Modelos gravitacionales



Modelos de oportunidades intervinientes



Modelos desagregados → teoría de utilidad aleatoria



Modelos mixtos: mezcla de modelos agregados y desagregados

Caso de estudio



Bus



≈ 11 mil paraderos



Metro



Estaciones

Metro: 118

Tren Suburbano: 10

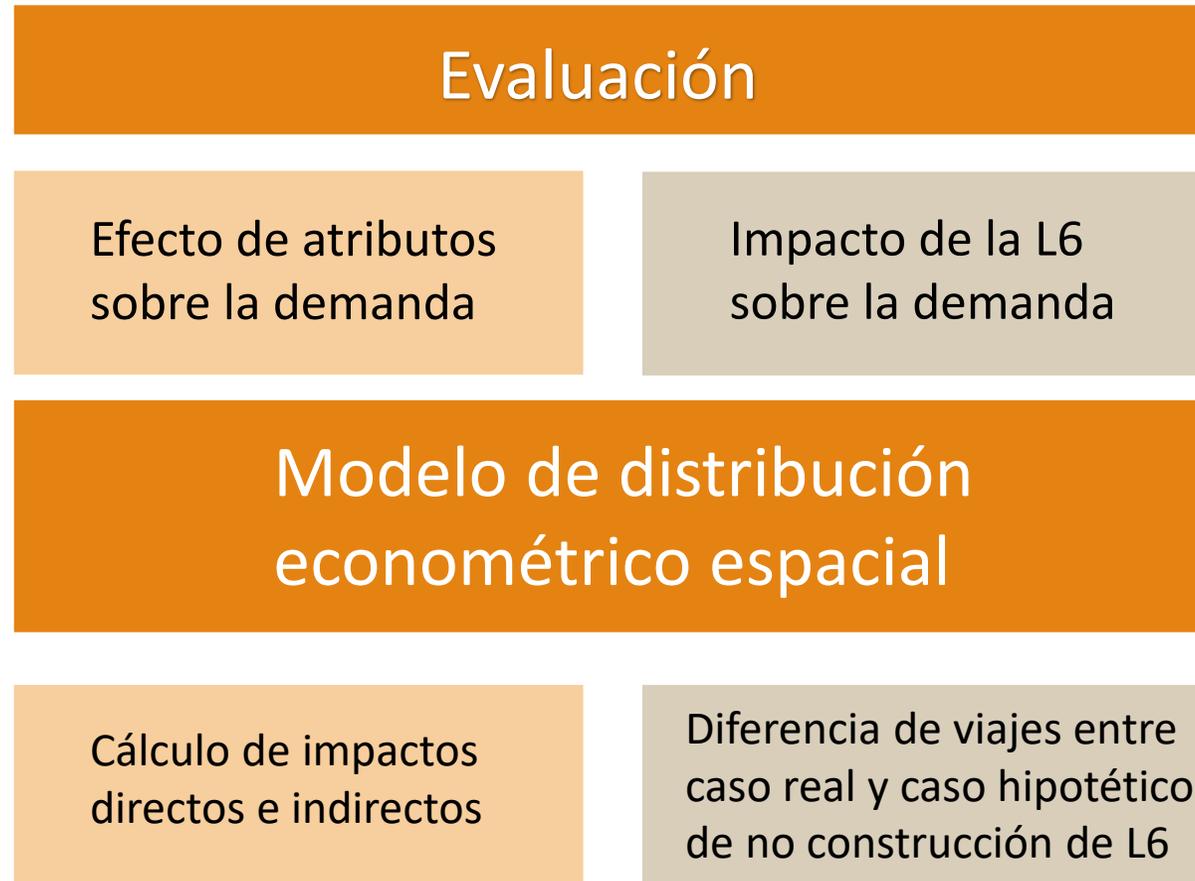


Tren Suburbano



5.3 millones de transacciones día laboral (2017)

Resumen metodología



➤ Zonificación 777

- Coeficientes modelo
- Matriz de contigüidad

Log verosimilitud	-				
	85,212				
R ²	0.73		N° observaciones	110643	
R ² ajustado	0.73		N° atributos	111	
Bus					
Atributos	Coef.	Test t	Atributos espaciales	Coef.	Test t
Ingreso destino	0.002	0.45**	Wd Ingreso destino	-0.017	-1.61**
Comercio destino	0.014	4.05	Wd Comercio destino	-0.043	-7.47
Industria destino	0.003	1.84*	Wd Industria destino	-0.001	-0.49**
Adm. Pública destino	0.010	7.27	Wd Adm. Pública destino	0.003	1.20**
Salud destino	-0.001	-0.59**	Wd Salud destino	-0.026	-9.40
Div. Uso de suelo destino	-0.177	-5.22	Wd Div. Uso de suelo destino	0.176	2.73
Personas origen	0.001	0.79**	Wo Personas origen	-0.021	-13.38
Edad origen	-0.004	-6.59	Wo Edad origen	-0.010	-9.45
Pase escolar origen	0.037	0.81**	Wo Pase escolar origen	-0.242	-2.40
Ingreso origen	-0.029	-4.41	Wo Ingreso origen	0.080	6.16
Habitacional origen	0.021	3.41	Wo Habitacional origen	0.006	0.48**
Div. Uso de suelo origen	0.407	14.23	Wo Div. Uso de suelo origen	-0.479	-12.06
Tiempo de viaje	0.231	44.64	Wd Tiempo de viaje	0.114	11.78
N° rutas	0.823	108.52	Wd N° rutas	0.153	9.13
N° etapas	-0.482	-73.46	Wd N° etapas	0.052	2.84
Capacidad por ruta	-0.009	-4.74	Wd Capacidad por ruta	0.022	5.74
			Wo Tiempo de viaje	0.191	19.03
			Wo N° rutas	0.012	0.76**
			Wo N° etapas	-0.065	-3.40
			Wo Capacidad por ruta	-0.001	-0.14**
Constante	0.502	4.92			

constant	0.1063	0.5811	0.5612	I_D_ingreso_promedio	-0.0083	-1.4967	0.1345
B_D_ingreso_promedio	-0.0185	-3.6102	0.0003	I_D_comercio	-0.0238	-8.2351	0.0000
B_D_comercio	-0.0086	-2.7509	0.0059	I_D_industria	0.0190	14.1354	0.0000
B_D_industria	0.0029	1.9801	0.0477	I_D_admpublica	0.0039	3.0568	0.0022
B_D_admpublica	0.0113	7.9890	0.0000	I_D_salud	-0.0074	-6.0703	0.0000
B_D_salud	-0.0028	-2.1183	0.0342	I_D_diversidad_US	-0.5135	-16.6738	0.0000
B_D_diversidad_US	-0.3200	-9.3793	0.0000	I_O_personas	0.0030	4.1260	0.0000
B_O_personas	-0.0010	-1.2063	0.2277	I_O_Edad_promedio	-0.0030	-6.2526	0.0000
B_O_Edad_promedio	-0.0098	-17.3198	0.0000	I_O_pase_escolar	-0.1190	-2.7481	0.0060
B_O_pase_escolar	-0.0945	-1.9597	0.0500	I_O_ingreso_promedio	0.0268	3.9256	0.0001
B_O_ingreso_promedio	0.0692	10.2655	0.0000	I_O_habitacional	0.1042	18.4226	0.0000
B_O_habitacional	0.0936	15.4002	0.0000	I_O_diversidad_US	0.8517	41.4041	0.0000
B_O_diversidad_US	0.6989	32.3459	0.0000	I_travel_time	0.2916	41.9412	0.0000
B_travel_time	0.2602	53.0132	0.0000	I_N°_rutas	0.8944	122.6371	0.0000
B_N°_rutas	1.0962	158.2919	0.0000	I_N°_etapas	-0.6541	-83.0573	0.0000
B_N°_etapas	-0.6126	-94.8318	0.0000	I_Capacidad_x_ruta	0.0515	23.5393	0.0000
B_Capacidad_x_ruta	-0.0149	-8.7766	0.0000	Cte_metro_indirecto	0.4753	2.9990	0.0027
Cte_bus	0.6021	3.7655	0.0002				

Metro Indirecto					
Atributos	Coef.	Test t	Atributos espaciales	Coef.	Test t
Ingreso destino	0.021	3.82	Wd Ingreso destino	-0.020	-1.99
Comercio destino	0.006	1.81*	Wd Comercio destino	-0.064	-11.33
Industria destino	0.009	5.72	Wd Industria destino	0.000	-0.17**
Adm. Pública destino	0.012	8.79	Wd Adm. Pública destino	-0.002	-0.73**
Salud destino	0.001	0.61**	Wd Salud destino	-0.023	-8.81
Div. Uso de suelo destino	-0.413	-13.62	Wd Div. Uso de suelo destino	0.483	8.02
Personas origen	0.003	4.04	Wo Personas origen	-0.026	-17.20
Edad origen	0.000	-0.86**	Wo Edad origen	-0.008	-9.21
Pase escolar origen	0.060	1.46**	Wo Pase escolar origen	-0.150	-1.74*
Ingreso origen	-0.031	-4.63	Wo Ingreso origen	-0.039	-3.06
Habitacional origen	0.032	5.58	Wo Habitacional origen	0.096	8.17
Div. Uso de suelo origen	0.345	12.64	Wo Div. Uso de suelo origen	-0.138	-3.80
Tiempo de viaje	0.260	37.09	Wd Tiempo de viaje	0.031	2.66
N° rutas	0.648	83.36	Wd N° rutas	0.131	9.09
N° etapas	-0.548	-70.67	Wd N° etapas	0.321	18.22
Capacidad por ruta	0.045	21.09	Wd Capacidad por ruta	-0.013	-3.31
			Wo Tiempo de viaje	0.070	5.63
			Wo N° rutas	0.093	5.26
			Wo N° etapas	0.087	4.72
			Wo Capacidad por ruta	0.008	1.78*
Constante	0.583	2.48			

I_D_ingreso_promedio	-0.0083	-1.4967	0.1345
I_D_comercio	-0.0238	-8.2351	0.0000
I_D_industria	0.0190	14.1354	0.0000
I_D_admpublica	0.0039	3.0568	0.0022
I_D_salud	-0.0074	-6.0703	0.0000
I_D_diversidad_US	-0.5135	-16.6738	0.0000
I_O_personas	0.0030	4.1260	0.0000
I_O_Edad_promedio	-0.0030	-6.2526	0.0000
I_O_pase_escolar	-0.1190	-2.7481	0.0060
I_O_ingreso_promedio	0.0268	3.9256	0.0001
I_O_habitacional	0.1042	18.4226	0.0000
I_O_diversidad_US	0.8517	41.4041	0.0000
I_travel_time	0.2916	41.9412	0.0000
I_N°_rutas	0.8944	122.6371	0.0000
I_N°_etapas	-0.6541	-83.0573	0.0000
I_Capacidad_x_ruta	0.0515	23.5393	0.0000
Cte_metro_indirecto	0.4753	2.9990	0.0027

Metro Directo					
Atributos	Coef.	Test t	Atributos espaciales	Coef.	Test t
Ingreso destino	-0.013	-0.53**	Wd Ingreso destino	0.095	2.42
Comercio destino	0.011	1.20**	Wd Comercio destino	-0.237	-10.05
Industria destino	0.009	1.88*	Wd Industria destino	-0.026	-3.68
Adm. Pública destino	-0.005	-1.79*	Wd Adm. Pública destino	0.038	5.36
Salud destino	-0.030	-8.27	Wd Salud destino	0.040	3.79
Div. Uso de suelo destino	0.451	5.70	Wd Div. Uso de suelo destino	1.179	6.18
Personas origen	0.002	0.81**	Wo Personas origen	-0.007	-1.52**
Edad origen	-0.008	-4.93	Wo Edad origen	-0.025	-7.57
Pase escolar origen	-0.386	-3.48	Wo Pase escolar origen	-0.363	-1.52**
Ingreso origen	0.135	4.49	Wo Ingreso origen	0.074	1.63**
Habitacional origen	0.039	1.87*	Wo Habitacional origen	-0.153	-3.98
Div. Uso de suelo origen	0.802	10.68	Wo Div. Uso de suelo origen	0.133	1.31**
Tiempo de viaje	0.157	10.90	Wd Tiempo de viaje	-0.384	-13.07
N° rutas	0.139	6.63	Wd N° rutas	1.064	28.66
N° etapas	0.055	2.38	Wd N° etapas	0.947	18.99
Capacidad por ruta	0.015	3.56	Wd Capacidad por ruta	0.064	6.43
			Wo Tiempo de viaje	0.108	3.35
			Wo N° rutas	0.283	6.61
			Wo N° etapas	0.447	8.70
			Wo Capacidad por ruta	-0.059	-5.54
Constante	1.563	2.85			
Coeficientes autoregresivos					
rho1	0.073	27.01			
rho2	0.071	25.79			
rho3	0.121	21.69			

Atributos	Impacto directo			Impacto indirecto		
	Min	Max	Metro Directo	Bus	Metro Indirecto	Metro Directo
Ingreso			-0.013	0.000	0.000	0.001
Comercio			0.011	0.000	0.000	-0.001
Industria			0.009	0.000	0.000	0.000
Adm. Pública			-0.005	0.000	0.000	0.000
Salud			-0.030	0.000	0.000	0.000
Div. Uso de suelo			0.451	0.001	0.003	0.007
Personas			0.002	0.000	0.000	0.000
Edad			-0.008	0.000	0.000	0.000
Pase escolar			-0.386	-0.001	-0.001	-0.002
Ingreso			0.135	0.000	0.000	0.000
Habitacional			0.039	0.000	0.000	-0.001
Div. Uso de suelo			0.802	-0.002	-0.001	0.001
Tiempo de viaje	-1.66	5.83			0.001	-0.002
N° rutas	-0.20	3.61			0.001	0.008
N° etapas	-0.67	3.33			0.002	0.008
Capacidad por ruta	-3.01	6.11			0.000	0.000

Atributo	Descripción (fuente)
Variable explicada	
Viajes	Log. cantidad de viajes generados entre cada par OD (transacción tarjeta bip).
Variables explicativas	
Uso de suelo	
Comercio	Log. área (m^2) destinada al uso comercial de cada zona 777 (SII).
Deporte	Log. área (m^2) destinada al uso de deporte de cada zona 777 (SII).
Educación	Log. área (m^2) destinada al uso educacional de cada zona 777 (SII).
Industria	Log. área (m^2) destinada al uso industrial de cada zona 777 (SII).
Adm. pública	Log. área (m^2) destinada al uso administración pública de cada zona 777 (SII).
Salud	Log. área (m^2) destinada al uso de salud de cada zona 777 (SII).
Div. uso de suelo	Variedad de uso de suelo de cada zona 777. Valor 0 cuando la zona tiene un solo tipo de suelo. Valor 1 cuando cada tipo de suelo tiene la misma área.

Atributo	Descripción (fuente)
Variables explicativas	
Sociodemografía	
Personas	Cantidad de personas, en miles, en cada zona 777 (EOD 2012).
Edad	Edad promedio de cada zona (EOD 2012).
Pase escolar	Proporción de personas que tienen pase escolar por zona (EOD 2012).
Ingreso	Log. ingreso promedio de cada zona (EOD 2012).
Oferta	
Tiempo de viaje	Log. tiempo de viaje promedio en minutos entre cada par de zonas 777 (transacción tarjetas bip).
N° de rutas	Log. cantidad de rutas que conecta cada par de zonas 777 (transacción tarjetas bip).
N° de etapas	Cantidad de etapas que conecta cada par de zonas 777 (transacción tarjetas bip).
Capacidad por ruta	Log. cantidad de plazas disponibles de cada par OD dividido por el número rutas que conecta ese par OD (transacción tarjetas bip, DTPM y Metro).