

## **Propuesta para ingreso escalonado al trabajo en la Región Metropolitana**

Franco Basso (Ingeniería Industrial, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso)

Nicolás Figueroa (Instituto de Economía, Universidad Católica)

Nicolás Garrido (Departamento de Economía, Universidad Diego Portales)

Raúl Pezoa (Ingeniería Industrial, Universidad Diego Portales)

Julio Covarrubia (Facultad de Economía y Negocios, Universidad de Chile)

Matías Durán (Ingeniero Civil en Geografía, Universidad de Santiago)

Javiera Azócar (Ingeniería Industrial, Universidad de Chile)

### **Introducción**

En un contexto de pandemia global como el que vivimos hoy en día, el transporte público podría representar un foco relevante de potenciales contagios, en particular cuando no se toman las medidas necesarias. Todos los epidemiólogos coinciden en que la distancia social de al menos 1 metro es necesaria para disminuir el riesgo de contagio de Covid-19, sin embargo, en el transporte público, sin las medidas adecuadas, esto se torna imposible de cumplir.

A medida que continúen levantándose las restricciones, se irá generando un aumento en la carga de pasajeros. Durante los meses en que rigió la cuarentena obligatoria en el Gran Santiago se produjo una disminución de pasajeros en el transporte público de hasta 86,1% en comparación al 9 de marzo (último lunes antes que comenzaran las diversas medidas sanitarias), y a medida que se fueron desconfinando las diferentes comunas el nivel de utilización llegó hasta un -44% versus la misma fecha. Esto requerirá adoptar acciones que resguarden la seguridad de los pasajeros y a su vez que se intensifique la confianza en el uso de medios de transporte masivos, como forma más eficiente de viajar. En este sentido, un gran desafío será la generación de nuevos espacios seguros de movilidad, que cumplan con los estándares definidos por la autoridad sanitaria.

De esta forma, medidas claves para garantizar viajes más seguros son aumentar la flota, generar control de capacidad y lo más importante, extender los horarios punta para evitar que toda la demanda se concentre en franjas horarias cortas. Este último punto es el que se desarrolla en este documento, a través de un propuesta de ingresos escalonados al trabajo, asignando el flujo de trabajadores de los sectores económicos a tres diferentes franjas horarias, esto con el fin de reducir la cantidad de personas que se aglomeran en un único horario en el transporte público de la Región Metropolitana, en particular para la provincia de Santiago y las comunas de San Bernardo y Puente Alto. Los horarios de salida se escalonarían del mismo modo.

## Metodología

En primer lugar, se creó una base con datos de origen y destino, para las diferentes comunas de la región metropolitana y para los diferentes sectores económicos. Para esto se utilizaron los datos de la encuesta CASEN sobre empleo según rama de actividad y quintil, con ello se realizó una simulación en la que para cada persona empleada según su rama de la actividad se le asignaba una comuna de origen y una comuna de destino. Con esto se obtuvo una matriz con los movimientos origen y destino de personas que van en transporte público ( $mFtp$ ). Estas matrices corresponden a arreglos tridimensionales de  $19 \times 52 \times 19$ , por ejemplo,  $mFtp[1, i, j]$  es el número de personas que trabaja en el sector económico 1, que vive en la comuna  $i$  y trabaja en la comuna  $j$ , y se mueve de  $i$  a  $j$  usando el transporte público. Adicionalmente, se calculó la cantidad de trabajadores del sector económico  $r$  ( $S_r$ ) de la siguiente forma  $S_r = \sum_{i \in I, j \in I} mFtp[r, i, j]$ .

Por otra parte, para obtener la ruta más corta en transporte público que siguen las personas que van de la comuna  $i$  a la comuna  $j$ , se utilizó la *API Directions*, la cual entrega la ruta más eficiente en coordenadas de  $(Lat, Lon)$ , tomando en consideración el tiempo de viaje como factor primario para la optimización, pero también puede tener en cuenta otros factores como la distancia, el número de transbordos y muchos más. Luego se utilizó la *API Reverse Geocoding*, que realiza un proceso de conversión de las coordenadas geográficas de  $(Lat, Lon)$  a comunas. Con esto se obtuvo la ruta óptima y el conjunto de comunas por las cuales se transita para seguir esta ruta óptima.

Finalmente, con los datos de la matriz origen-destino ( $mFtp$ ) y los resultados de las APIs de Google sobre las rutas óptimas, se calculó la matriz  $K_{ri}$ , que contiene la cantidad de personas del sector económico  $r$  que transitan por la comuna  $i$  en transporte público. Es decir, la carga de personas que genera cada sector de la economía en cada una de las comunas de la región metropolitana. Con estos mismos datos se obtuvo también la cantidad de viajes totales que se realizan en una comuna  $i$  ( $D_i$ ), que se calcula como la suma sobre todos los sectores económicos para una misma comuna,  $D_i = \sum_{r \in R} K_{ri}$ .

A continuación, se plantean tres problemas de optimización. El objetivo de los modelos es que cada sector económico  $r \in R$ , sea asignado a una franja horaria  $t \in T$  y que además la cantidad de personas que se asignen en dicha franja horaria no sea superior al parámetro predefinido  $H_t$ . Para los resultados de este reporte la cantidad de franjas horarias utilizadas fue  $T = \{1, 2, 3\}$ , el parámetro  $H_t$  es igual para todas las franjas horarias y equivalente al 40% del total de trabajadores. De esta manera, la finalidad es que exista una distribución similar en la asignación de personas en las tres franjas horarias, siendo el óptimo que la

distribución fuera igual al 33,3% del total de personas para cada comuna, para todas las franjas horarias.

Los modelos de optimización utilizados fueron los siguientes:

- Mín-Max

$$\sum_{t \in T} f_t$$

s. t.

$$\sum_{t \in T} x_{rt} = 1 \quad \forall r \in R$$

$$\sum_{r \in R} S_r x_{rt} \leq H_t \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{r \in R} K_{ri} x_{rt} \leq f_t \quad \forall i \in I, t \in T$$

$$x_{rt} \in \{0,1\} \quad \forall r \in R, t \in T$$

- Entropía

$$\max - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \frac{y_{it}}{D_i} \ln \frac{y_{it}}{D_i}$$

s. t.

$$\sum_{t \in T} x_{rt} = 1 \quad \forall r \in R$$

$$\sum_{r \in R} S_r x_{rt} \leq H_t \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{r \in R} K_{ri} x_{rt} = y_{it} \quad \forall i \in I, t \in T$$

$$x_{rt} \in \{0,1\} \quad \forall r \in R, t \in T$$

$$y_{it} \in N \quad \forall i \in I, t \in T$$

- Entropía ponderada

$$\max - \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} y_{it} \ln \frac{y_{it}}{D_i}$$

s. t.

$$\sum_{t \in T} x_{rt} = 1 \quad \forall r \in R$$

$$\sum_{r \in R} S_r x_{rt} \leq H_t \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{r \in R} K_{ri} x_{rt} = y_{it} \quad \forall i \in I, t \in T$$

$$x_{rt} \in \{0,1\} \quad \forall r \in R, t \in T$$

$$y_{it} \in N \quad \forall i \in I, t \in T$$

**Resultados**

Luego de calcular los diferentes modelos de optimización, se obtuvieron los siguientes resultados para cada caso:

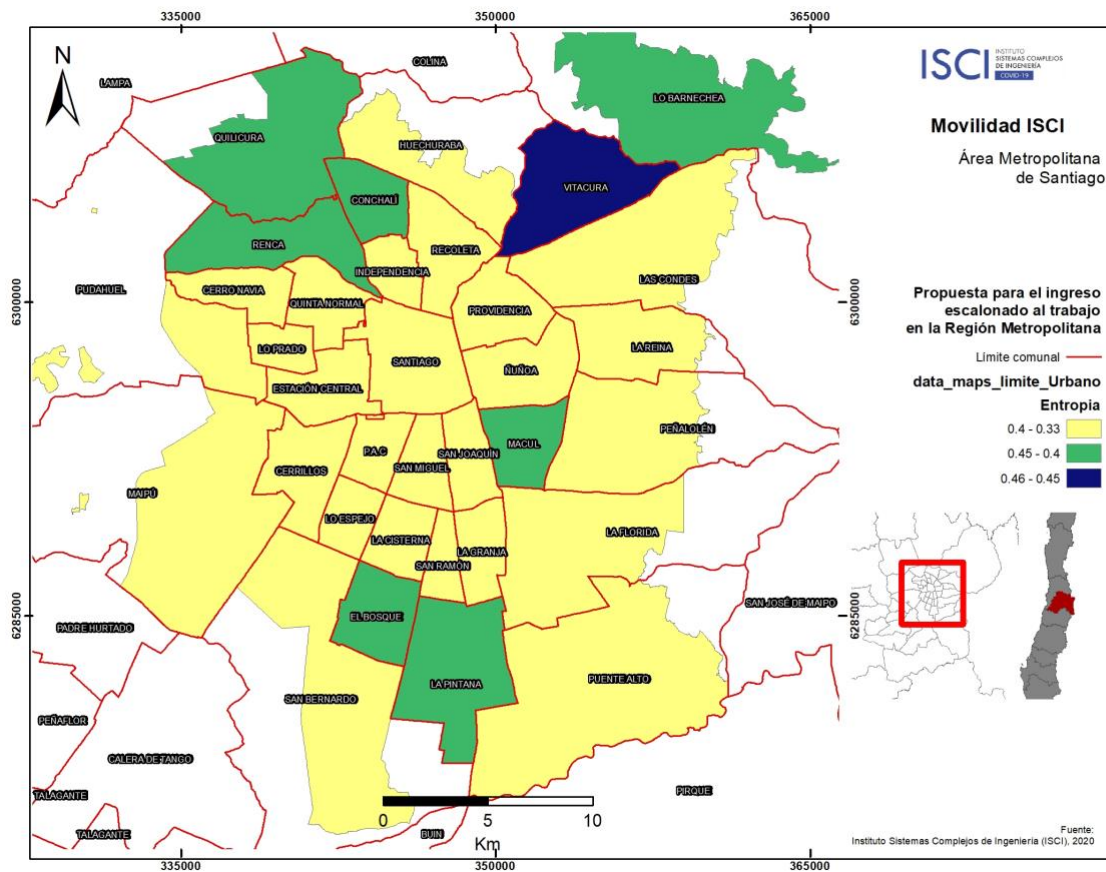


Figura 1: Mapa distribución máxima por comuna en modelo Entropía

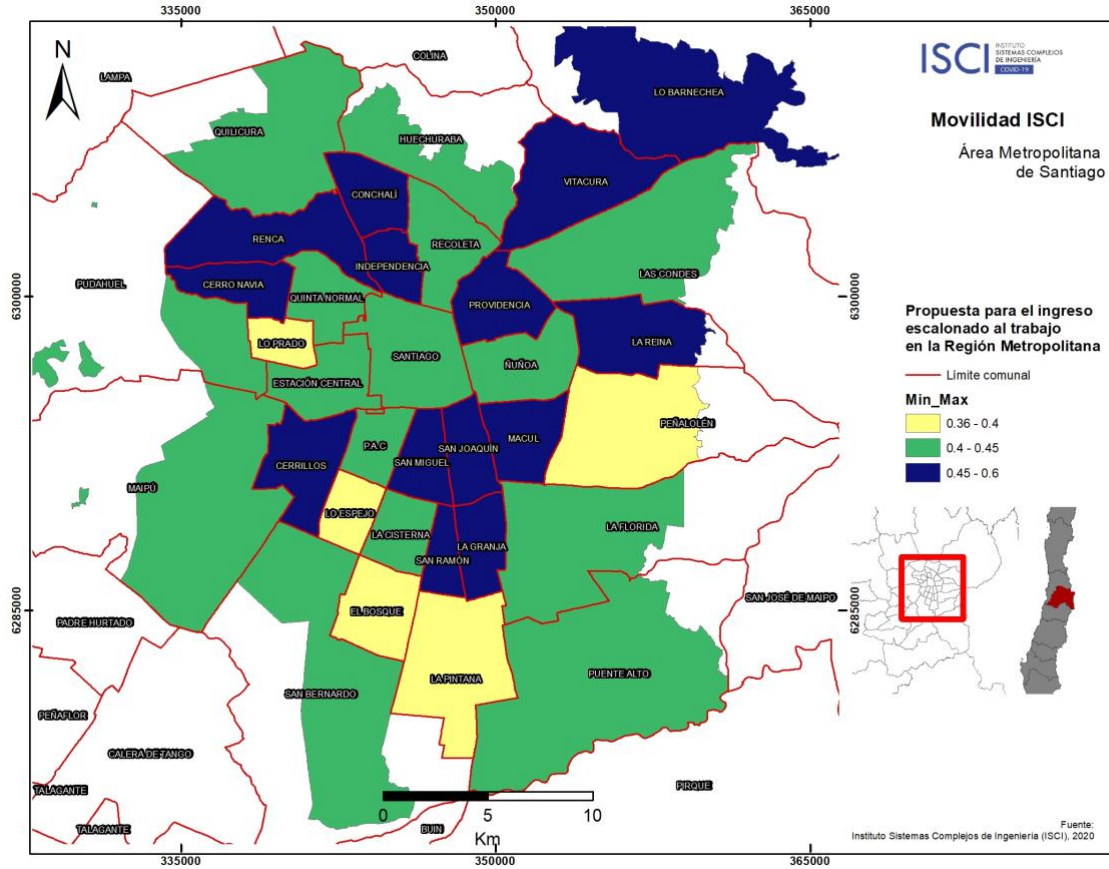


Figura 2: Mapa distribución máxima por comuna en modelo Entropía

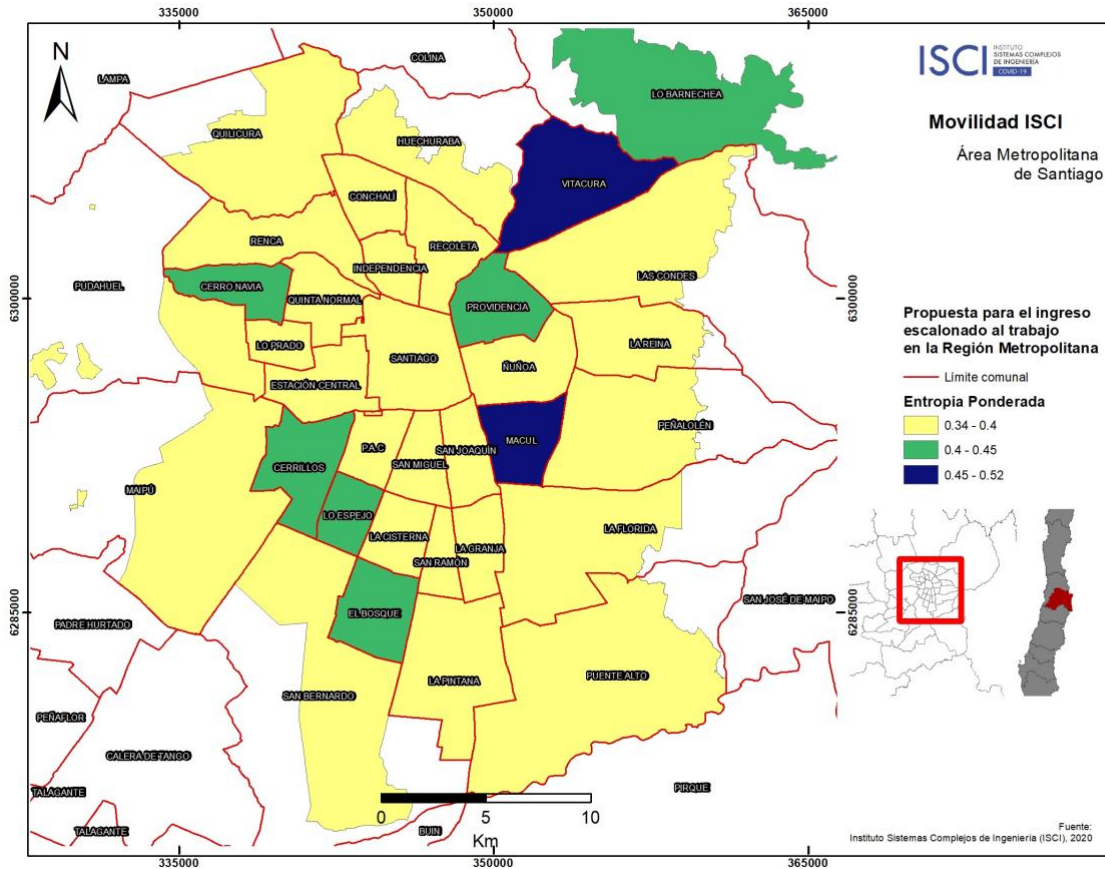


Figura 3: Mapa distribución máxima por comuna en modelo Entropía Ponderada

En estos mapas se observa la máxima distribución como porcentaje del total (en cualquiera de las tres franjas horarias) para cada comuna, recordando que el óptimo teórico es que la distribución sea el 33,3% del total de personas para cada comuna.

Para el caso de la optimización “Mín-Max” el promedio de las distribuciones máximas por comuna es de 44,92% y el promedio ponderado por el número de viajes de cada comuna  $D_i$ , es igual a 43,82%. Por otra parte, si calculamos el benchmark para cada comuna como:  $benchmark_i = \frac{D_i}{3}$ , se obtiene la cantidad de viajes óptimos por comuna para todas las franjas horarias. De esta manera se puede calcular el exceso de viajes sobre el óptimo en cualquiera de las tres franjas horarias y en el caso de esta optimización el número de viajes sobre el benchmark es de 394.780.

Para el caso de la entropía, el promedio de distribuciones máximas es de 38,31% y el promedio ponderado igual a 37,14%. El exceso de viajes en este caso se reduce significativamente y es de 119.054.



Finalmente, para el caso de la entropía ponderada, el promedio de distribuciones máximas por comuna es 38,59% y el promedio ponderado de 36,91%. El número de viajes sobre el óptimo es de 108.006.

	Mín-Max	Entropía	Entropía Ponderada
$\underline{x}$	44,92%	38,31%	38,59%
$x_{pond}$	43,82%	37,14%	36,91%
N° viajes sobre el benchmark	394.780	119.054	108.006

Tabla 1: Resumen de las métricas de resultados

### Conclusiones

De esta manera y analizando los resultados de los tres modelos de optimización aquí planteados, se llegó a la conclusión de que aquel que entrega mejores resultados y por ende la mejor asignación de los sectores económicos es el de entropía ponderada. Como puede observarse en los resultados, este modelo entrega los mejores niveles de ocupación en el peak, en promedio para la provincia de Santiago y las comunas de San Bernardo y Puente Alto. Si bien se observa en las figuras 1, 2 y 3 que algunas zonas siguen teniendo una distribución desigual de la carga durante el peak, intentar minimizar esta sobrecarga (como lo hace el modelo de Min-Max) lleva a sobrecargas mucho más altas para el resto de las comunas y por ende para el resto de la región. La aplicación del ingreso diferido que se plantea en este reporte sería de enorme utilidad para descongestionar el transporte público en los horarios punta y así estar más cerca de lograr el distanciamiento físico, que ha sido reiteradamente en el mundo como una parte fundamental de un desconfiamiento seguro.

Esta propuesta permite repartir la carga en proporciones casi idénticas entre los tres horarios. En comparación con las validaciones de la semana del 14 al 18 de diciembre en donde las cargas se repartieron en un 38% entre las 7:00 y las 7:59, un 35% entre las 8:00 y las 8:59 y un 27% entre las 9:00 y las 9:59. De este modo, esta propuesta permitiría disminuir hasta en 70.000 la cantidad de validaciones que se realizan entre las 7:00 y 7:59. En términos promedio, esto significa 6 personas menos por bus en ese horario, equivalente a un 13% de disminución del hacinamiento. Al ser dicho valor un promedio, el impacto será mucho mayor en ciertos recorridos, aumentando la probabilidad de mantener el distanciamiento físico recomendado por los especialistas médicos.



Los resultados del modelo elegido se muestran en la Tabla 2.

Sector económico	Horario 1	Horario 2	Horario 3
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca		X	
Explotación de minas y canteras		X	
Industrias manufactureras		X	
Suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado		X	
Suministro de agua, evacuación de aguas residuales, gestión de desechos y descontaminación		X	
Construcción	X		
Comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas			X
Transporte y almacenamiento	X		
Actividades de alojamiento y de servicios de comidas		X	
Información y comunicaciones	X		
Actividades financieras y de seguros	X		
Actividades inmobiliarias	X		
Actividades profesionales, científicas y técnicas		X	
Actividades de servicios administrativos y de apoyo		X	
Administración pública y defensa; planes de seguridad social de afiliación obligatoria		X	
Enseñanza	X		
Actividades de atención de la salud humana y de asistencia social			X
Actividades artísticas, de entretenimiento y recreativas	X		
Otras actividades de servicios		X	
<b>Número total de personas que se movilizan</b>	<b>406.269</b>	<b>425.733</b>	<b>402.585</b>

Tabla 2: Resumen de asignación