



# EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN COSTOS DE TRANSPORTE Y COMPOSICIÓN DE FLOTA VEHÍCULAR EN CIUDADES CON PENDIENTES SIGNIFICATIVAS

---

**Propuesta de tesis**

**Luz Ángela Flórez Calderón**

**Supervisores:**

Ricardo Giesen

Mathias Klapp

Departamento de transporte y logística  
Pontificia Universidad Católica de Chile

2020

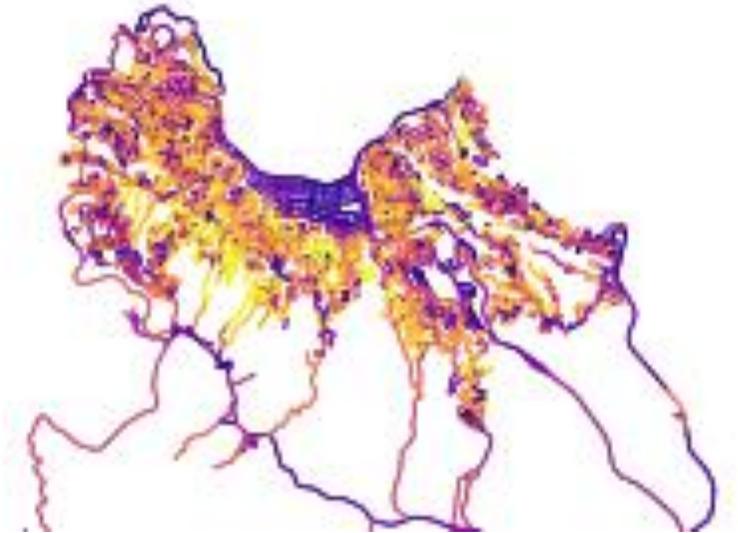
# Contenido

- Motivación
- Estado del arte
- Hipótesis
- Objetivos
- Delimitación del problema
- Metodología
- Resultados esperados

# Motivación 1/3



# Motivación 2/3



Average street grade in City is 6.6%  
Median street grade in City is 5.0%  
deviation street grade in City is 5.8%  
min street grade in City is 0.0%  
max street grade in City is 36.2%  
Street length avg.: 107.88 m

Boeing, G. (2017). "OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks." *Computers, Environment and Urban Systems* 65, 126-139. doi:10.1016/j.compenurbsys.2017.05.004

# Motivación 3/3

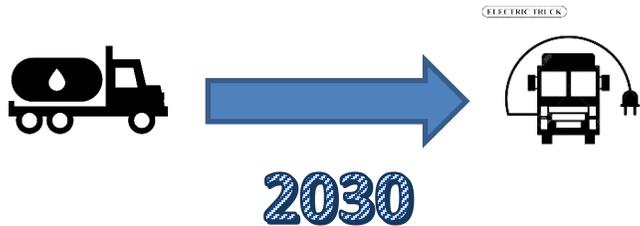
1. Contribuciones teóricas y empíricas han extendido la comprensión de los factores que inciden en el consumo de combustible o energía de los vehículos

3. Estas contribuciones han sido estudiadas en decisiones operativas

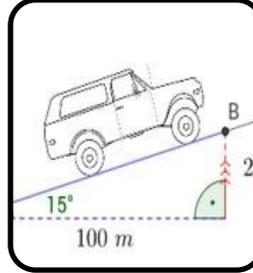
4. Existe el desafío de incorporar estas contribuciones en decisiones estratégicas

Ahorros en costos de transporte en Distribución urbana de Mercancías

2. Actuales regulaciones y estrategias de movilidad sostenible, promueven la adopción de vehículos eléctricos para el transporte comercial



# Estado del arte



## Características de la red vial

- Tipo de carretera
- Inclinación de la carretera



## Condiciones de tráfico vehicular

- Velocidad-aceleración
- Tiempo de viaje
- Niveles de congestión

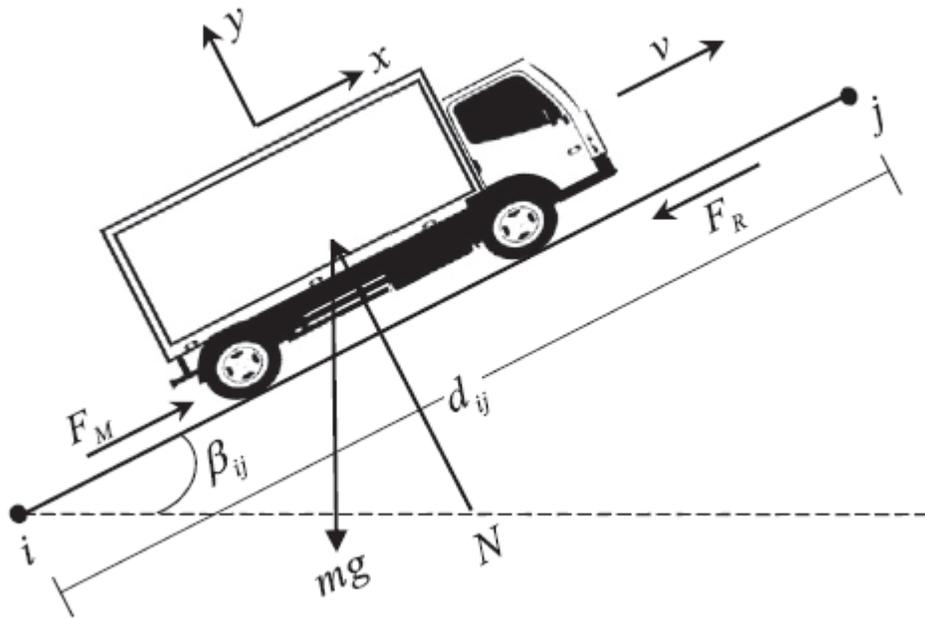


## Características del vehículo

- Tipo de vehículo
- Peso transportado

# Estado del arte

## Modelos instantáneos de consumo de combustible



Fuerzas actuando en el vehículo

Toro et al., (2017)

$\beta_{ij}$ : inclinación promedio de la ruta entre  $(i, j)$

$F_R$ : fuerzas opuestas al movimiento del vehículo

$F_M$ : fuerzas generadas por el motor transmitidas a las llantas del vehículo

$mg$ : peso del vehículo (masa \* constante gravitacional)

$N$ : fuerza normal del plano inclinado actuando

$d_{ij}$ : distancia de viaje entre  $(i, j)$

$v$ : velocidad del vehículo

# Estado del arte

## Modelos instantáneos de consumo de combustible

$$F_h = \lambda(K_h N_h V_h^{d/v} + Q_h \gamma_h \alpha d + \beta_h \gamma_h d v^2) \quad (1)$$

Donde:

$$\lambda = \xi / K \psi, \gamma_h = \frac{1}{1000} \eta_{tf} \eta,$$

$$\alpha = \tau + g \sin \theta + g C_r \cos \theta$$

$$\beta_h = 0.5 C_h \rho A_h$$

$F_h$ : Consumo de combustible del tipo de vehículo  $h$  (litros)

$d$ : distancia

$v$ : velocidad

$\theta$ : pendiente

$Q$ : peso del vehículo

Koc et al., (2014), Boriboonsomsin y Barth (2009)

# Estado del arte

## Modelos instantáneos de consumo de combustible

$$F_h = \lambda(K_h N_h V_h^{d/v} + Q_h \gamma_h \alpha d + \beta_h \gamma_h d v^2) \quad (1)$$

$$\lambda = \xi / K \psi, \gamma_h = \frac{1}{1000} \eta_{tf} \eta,$$

$$\alpha = \tau + g \sin \theta + g C_r \cos \theta$$

$$\beta_h = 0.5 C_h \rho A_h$$



Koc et al (2014)

Notación	Descripción	Valores Típicos
$\xi$	Fuel to air mass ratio	1
$\theta$	Road angle	0
$g$	Gravitational constant (m/s <sup>2</sup> )	9.81
$\rho$	Air density (kg/m <sup>2</sup> )	1.2041
$C_r$	Coefficient of rolling resistance	0.01
$\eta$	Efficiency parameter for diesel engines	0.45
$K$	Heating value of a typical diesel fuel (kj /g)	44
$\psi$	Conversion factor (g/s to L/s)	737
$n_t$	Vehicle drive train efficiency	0.45
$\tau$	acceleration (m/s <sup>2</sup> )	0

Notation	Description	Light duty (L)	Medium duty (M)	Heavy duty (H)
$W_h$	Curb weight (Kg)	3500	5500	14000
$Q_h$	maximum payload (Kg)	4000	12500	26000
$K_h$	Engine friction factor (kj/rev/liter)	0.25	0.20	0.15
$N_h$	Engine speed (rev/s)	38.34	36.67	30.0
$V_h$	Engine displacement (liter)	4.5	6.9	10.5
$C_h$	Coefficient of aerodynamics drag	0.6	0.7	0.9
$A_h$	Frontal surface area (m <sup>2</sup> )	7.0	8.0	10.0

# Estado del arte

## Modelos instantáneos de consumo de energía

$$F = mg \sin \alpha + C_r mg \cos \alpha + 0.5 C_d \rho A v^2 + f m a \quad (2)$$

$m$ : peso del vehículo

$a$ : aceleración

$v$ : velocidad

$g$ : constante gravitacional

$f$ : fuerza de inercia de las partes giratorias del vehículo

$\alpha$ : pendiente de la carretera

$C_r$ : coeficiente de fricción de rodadura

$C_d$ : coeficiente de arrastre de aire

$\rho$ : densidad del aire

$A$ : superficie del aire frontal del vehículo.

$$P_b = \left\{ \begin{array}{l} \mu_e (\mu_m F v + P_0), \\ \left\{ \begin{array}{l} 0, \\ \mu_g F v + P_0, \end{array} \right. \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \text{si } F \geq 0 \\ \text{si } v \leq v_{min} \\ \text{else,} \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{ si } F < 0 \quad (3)$$

Asamer et al., (2016)

# Estado del arte

**Tabla 1. Resumen de investigaciones que consideran el impacto de la pendiente en el consumo de combustible o energía en un Par O-D.**

Autor (año)	Metodología		Resultados <sup>a</sup>			Vehículo		Red vial		Tráfico		Area estudio	
	Modelo de Optimización	Simulación	% diferencia consumo combustible o energía	% diferencia emisiones	% diferencia en costos	Motor combustion interna	Motor Eléctrico	Pendiente a nivel de arco	Pendiente a nivel de ruta	Flujo libre	Congestión	Par OD	Varios Par OD
Nivel de informacion desagregada													
Boriboonsomsin y Barth (2009)			15% a 20%.		5% a 20%	*		*		*		*	
Kamal et al. (2011)			5% a 7.04%			*		*		*		*	
Wyatt et al. (2013)				23% a 30%		*		*		*		*	
Levin et al. (2014)		*	3.6% a 10.5%				*		*		*		*
Boroujeni and Frey (2014)			1% a 14%	1% a 42%		*		*		*		*	
Sentoff et al. (2015)		*	10% a 16%	10% a 48%		*		*	*		*		*
Zhou et al. (2017)	*	*	6.89% a 24.78%			*		*		*		*	
Liu et al. (2019)		*	12% a 30%	10% a 30%		*		*		*	*	*	

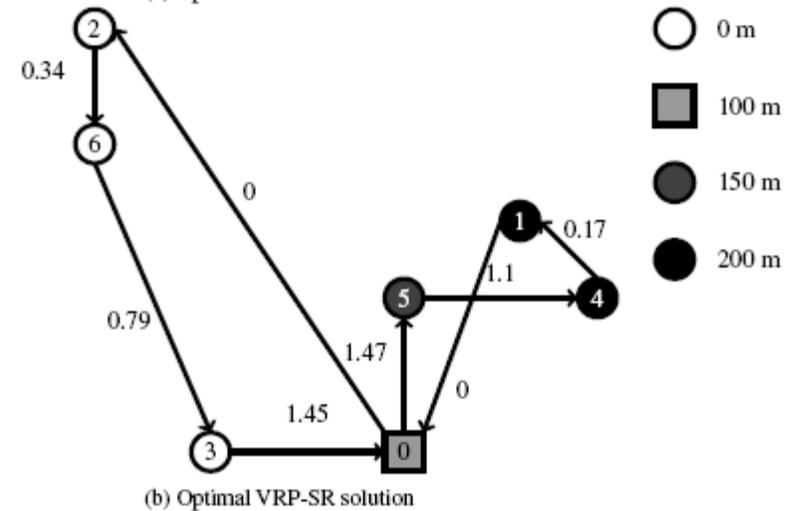
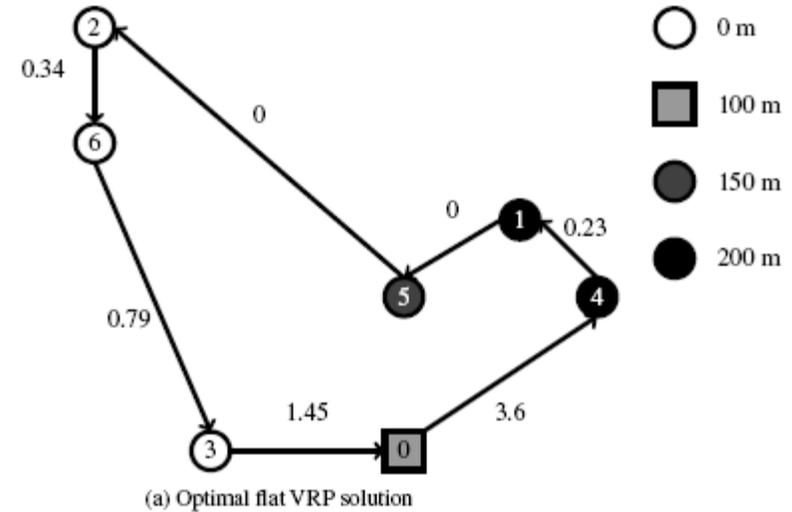
Modelos analíticos validados con datos empíricos

# Estado del arte

Modelos de ruteo de vehículos que consideran la pendiente de la red vial

	flat VRP	VRP-SR	Percentage difference (%)
fuel consumption (liters)	6.4	5.3	-17
distance (km)	11	14	28
total operating cost (\$)	4,493	4,121	-8

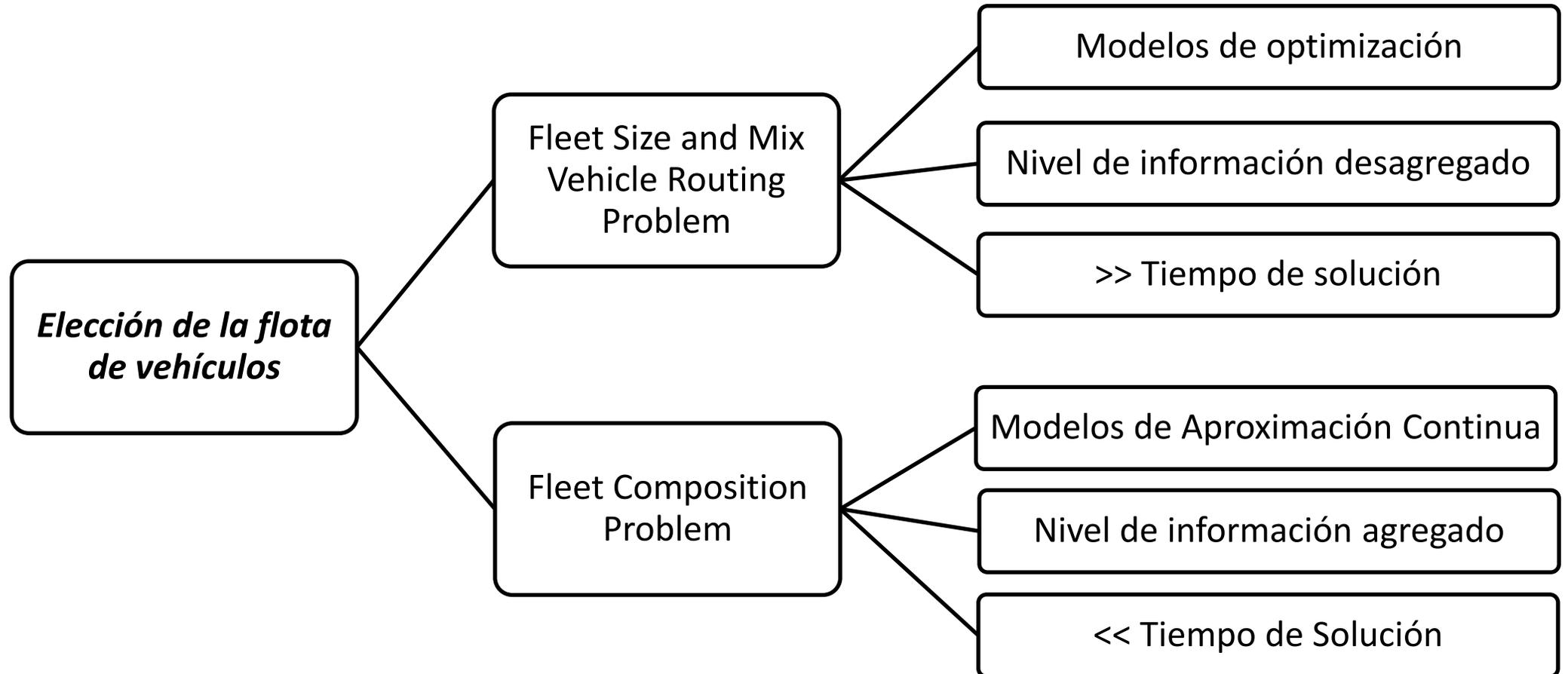
➤ (Brunner et al. 2018)



# Estado del arte

¿Qué ha pasado con las decisiones estratégicas?

# Estado del arte



# Estado del arte

## *Modelos de aproximación continua (AC)*

Los modelos de AC han resultado muy útiles en la solución de problemas estratégicos.

Un modelo de Aproximación continua es una **fórmula simple** para predecir la distancia o tiempo viajado por una flota de vehículos en problemas de distribución física que involucran un deposito y su área de influencia (Daganzo, 1984)

$$E[L] = k\sqrt{nA}$$

Beardwood et al. (1959)

$$V^* = 2rm + 0.57\sqrt{nA}$$

$$m = n/C$$

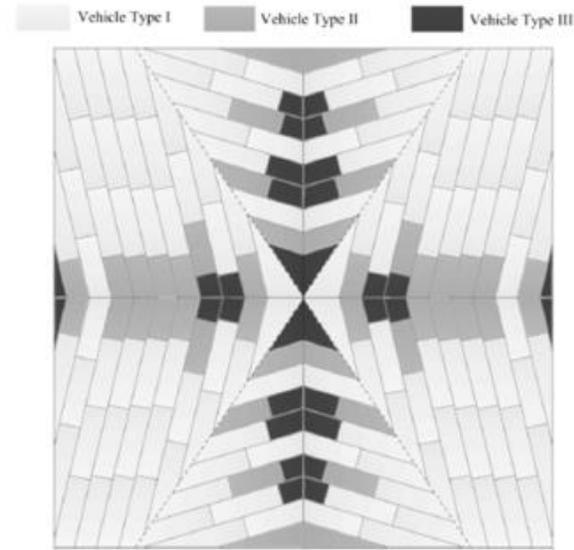
C : máximo numero de clientes por ruta

Daganzo (1984)

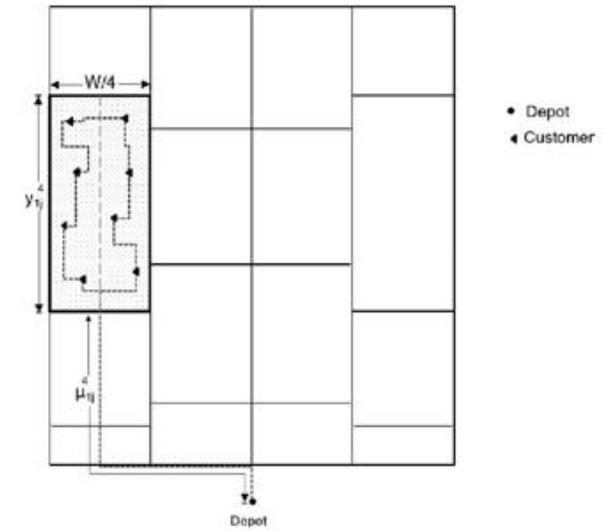
# Estado del arte

Fig. 2. Ejemplos de diseño de distritos de entrega y composición de flota

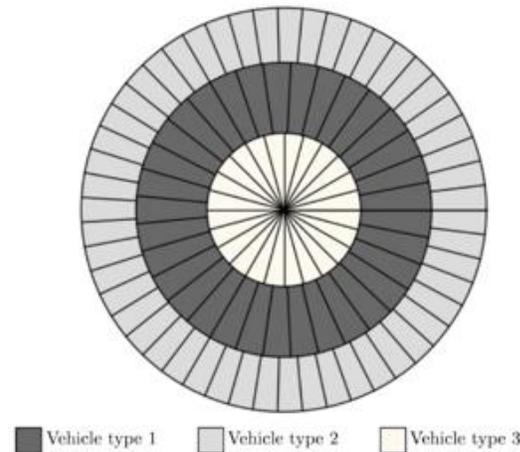
Fuente: Jabalí et al., (2012); Nourinejad and Roorda, (2017); Franceschetti et al., (2017b); Kalcsics (2015).



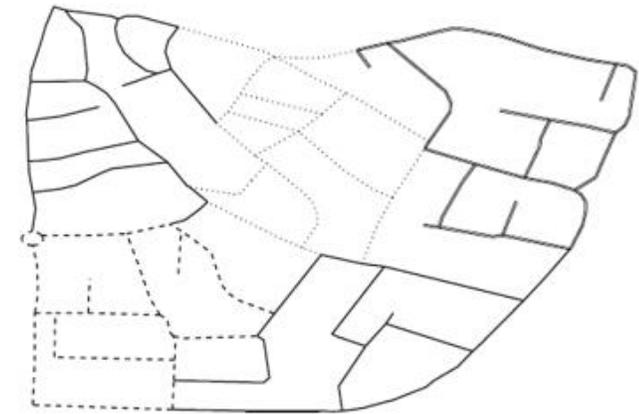
a) Equi-travel time contours



c) Rectangular network



b) Ring radial network



d) Arc routing

# Estado del arte

Tabla 2. Resumen de publicaciones en el problema de composición de flota

Autor (año)	Metodología		Viaje			Flota de vehículos						Red vial		Tráfico		
	Modelo de AC <sup>a</sup>	Modelo de PM <sup>b</sup>	Distancia a nivel de arco	Distancia agregada	Tiempo de viaje	Motor combustion interna	Motor Eléctrico o mixto	Peso de la carga a nivel de arco	Peso de la carga agregado	Velocidad	Consumo de combustible o energía	Emisiones	Pendiente a nivel de arco	Pendiente agregada	Flujo libre	Congestión
Nivel de informacion desagregada																
Loxton et al (2012)		*	*			*										
koc et al (2014)		*	*			*		*		*			*			
Koc et al (2016)		*	*			*		*					*			
Hiermann et al (2016)		*	*				*									
Alinaghian and Zamani (2019)		*	*			*										
Nivel de informacion agregada																
Sankaran and Wood (2007)	*			*	*	*										*
Fligliozi (2010)	*			*	*	*				*					*	*
Saberi and Verbas (2012)	*			*		*				*		*			*	*
Jabali et al. (2012)	*	*		*		*										
Davis and Figliozi (2013)	*	*		*		*	*		*		*		*			
Jabali & Erdoğan (2015)	*	*		*		*										
Franceschetti et al (2017)	*	*		*	*	*	*		*							
Nourinejad and Roorda (2017)	*	*		*	*	*			*							
Florez et al	*	*		*		*	*	*	*	*	*		*		*	*

a : Modelo de Aproximacion Continua, b: Modelo de Programacion Matematica

# Contribuciones

- Este proyecto aporta al estudio del problema de composición de flota a nivel estratégico, en redes urbanas con pendientes.
- Aporta un nuevo modelo de AC para la estimación aproximada de los costos de transporte, considerando además de la distancia, otros factores que inciden en el consumo de combustible o energía.
- Aporta una nueva metodología para encontrar una composición de flota mixta (Vehículos de combustión interna y eléctricos).

# Hipótesis de investigación

**Hipótesis 1:** Existe un **ahorro en los costos** de transporte y un **impacto en la composición de la flota de vehículos**, al planificar estratégicamente una operación de distribución urbana considerando **las pendientes de la red vial, el peso transportado, las velocidades típicas de operación en diferentes periodos del día y las características técnicas de la flota de vehículos**, con respecto a una planificación estratégica que solo considera la distancia o tiempo de viaje.

**Hipótesis 2:** **Localizar** estratégicamente un centro de distribución urbana de mercancía, en diferentes alturas de la región del área de servicio, genera un **impacto en los costos** de transporte y en la **composición de la flota de vehículos**

# Objetivos de investigación

## General:

**Evaluar el potencial ahorro** en **costos de transporte** y **el impacto en la composición de flota vehicular**, al planificar estratégicamente una operación de distribución urbana considerando los siguientes elementos:

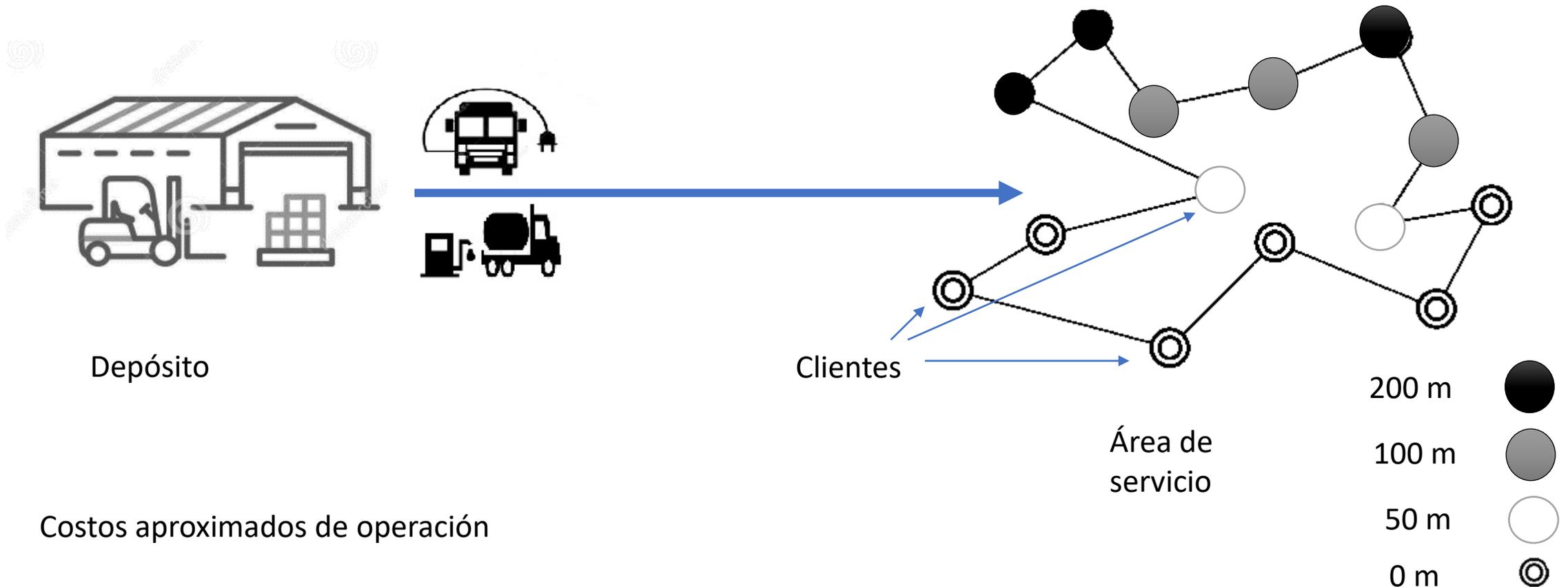
(i) pendientes de la red vial, (ii) peso transportado, (iii) velocidades típicas de operación en diferentes periodos del día, (iv) características técnicas de la flota de vehículos y (v) localización del depósito.

## Específicos:

- **Formular un modelo de AC** que estime el **costo de transporte** en función del **consumo de combustible o energía**, incorporando además de la distancia, la pendiente de la red vial, el peso transportado, velocidades típicas de operación en diferentes periodos del día y características técnicas de la flota de vehículos.
- **Formular y resolver un modelo de optimización** que permita encontrar una **composición de flota de vehículos mixta costo eficiente** e integre el modelo de AC propuesto.
- Realizar **una extensión del modelo** de optimización para **incluir la localización del depósito** como una variable de decisión, considerando alternativas de localización en diferentes alturas del área de servicio.

# Delimitación del problema

- **Problema1:** encontrar el costo aproximado de transporte en función del consumo de combustible o energía de cada tipo de vehículo



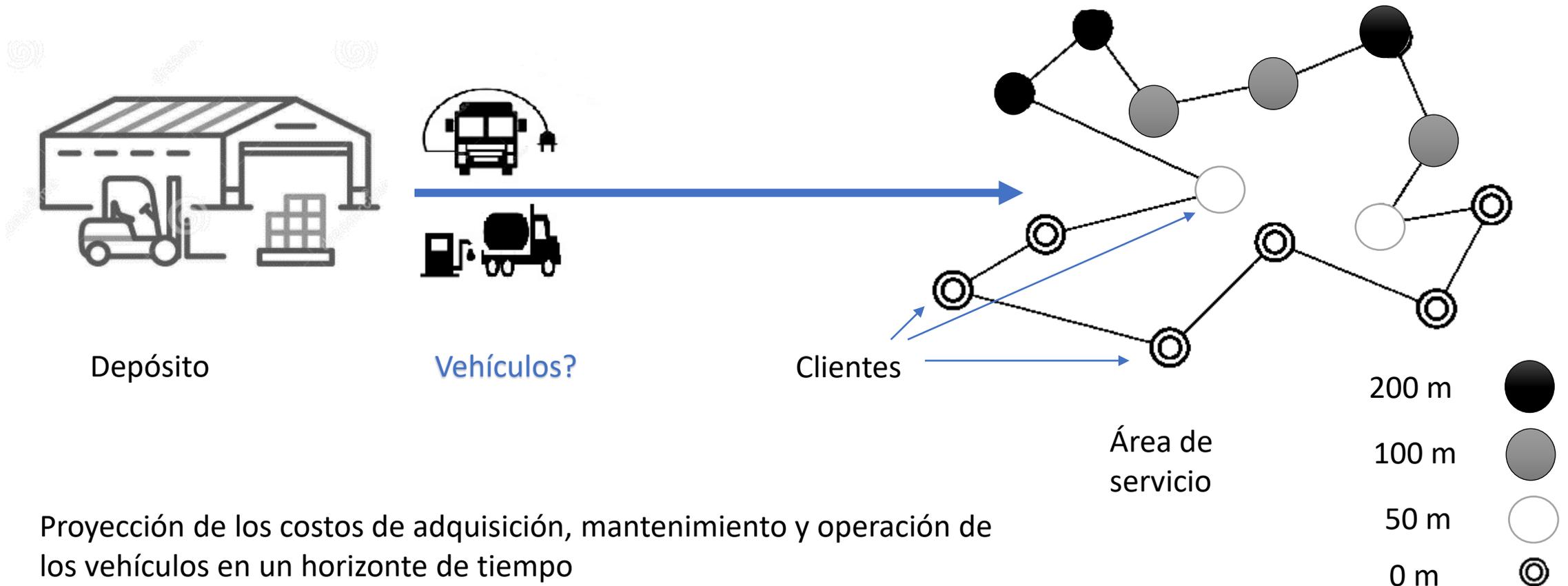
# Delimitación del problema

## Supuestos:

- Inicialmente se considerarán dos casos para la localización del deposito:  
(i) localizado dentro del área de servicio (ii) localizado fuera del área de servicio.
- Se tendrá  $n$  clientes localizados aleatoriamente en el área de servicio (La densidad de clientes y su demanda se puede considerar constante en toda el área de servicio o por macro-zonas)
- Cada cliente es visitado solo una vez
- Los vehículos tienen una capacidad de peso a transportar

# Delimitación del problema

- **Problema 2:** encontrar el tipo y número de vehículos que minimiza el costo total en un horizonte de tiempo dado, para una empresa de transporte urbano de mercancía.



# Delimitación del problema

## Supuestos adicionales:

- El problema consiste en encontrar una manera de clusterizar los clientes localizados en el área de servicio.
- Cada clúster tendrá un solo vehículo asignado de combustión interna o eléctrico.
- La demanda total de cada clúster no excede la capacidad del tipo de vehículo asignado.
- Cada clúster deberá cumplir con restricciones de conexidad entre clientes
- Cada vehículo comienza su recorrido desde el depósito, viaja a un clúster de clientes designado, visita a todos los clientes y regresa al depósito.

# Delimitación del problema

## Supuestos adicionales:

- El consumo de energía estimado de cada vehículo eléctrico no excede el 80% de la capacidad de la batería o el rango de autonomía del vehículo.
- El consumo de combustible o energía de los vehículos será estimado de manera aproximada mediante un modelo de AC que incorpora información agregada de las pendientes de la red vial, el peso transportado, la distancia, la velocidad dependiente del tiempo de partida y las características del vehículo.
- Existe un horizonte de planeación de un día dividido en  $x$  intervalos consecutivos de tiempo de partida de los vehículos.
- Cada día existe un periodo de congestión después de  $x$  unidades de tiempo, seguido por un periodo de flujo libre.
- Cada clúster deberá ser asignado a un solo periodo del día para ser atendido.
- La velocidad depende del tiempo de partida del vehículo.

# Delimitación del problema

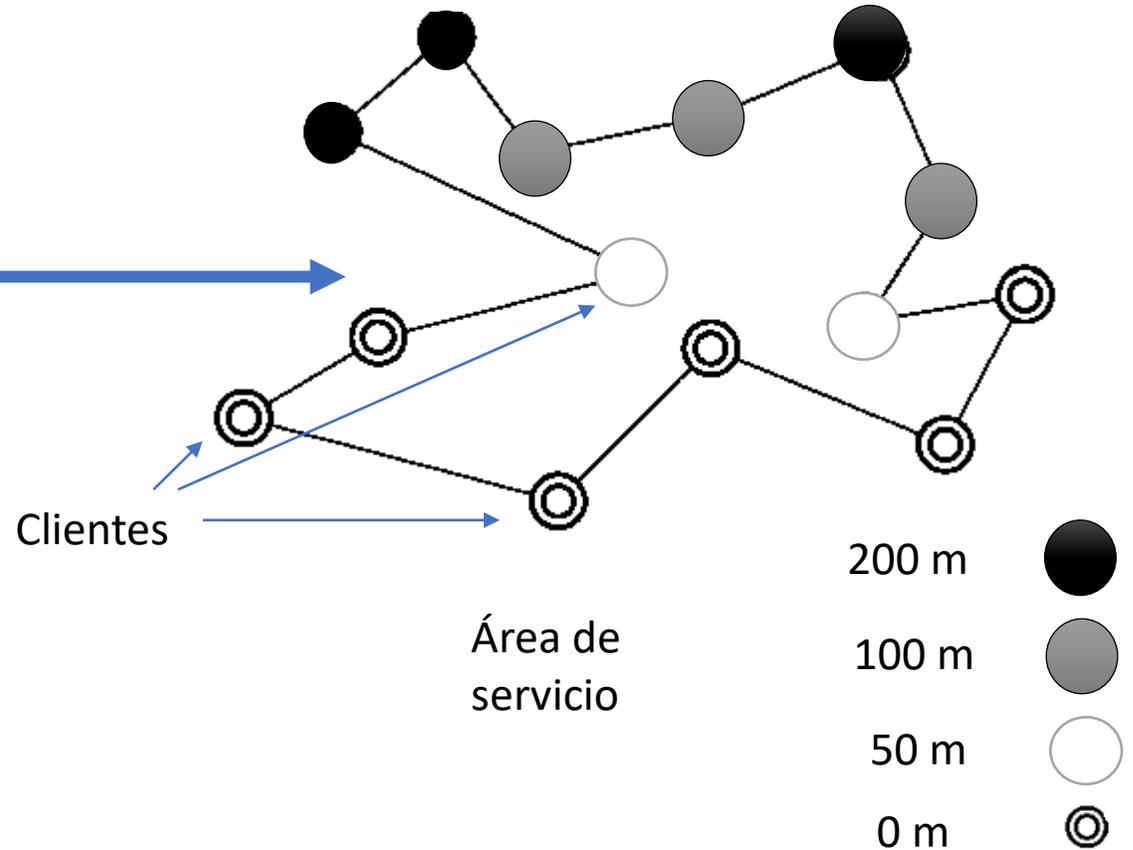
- **Problema 3:** encontrar la localización del depósito



Depósito



Vehículos?

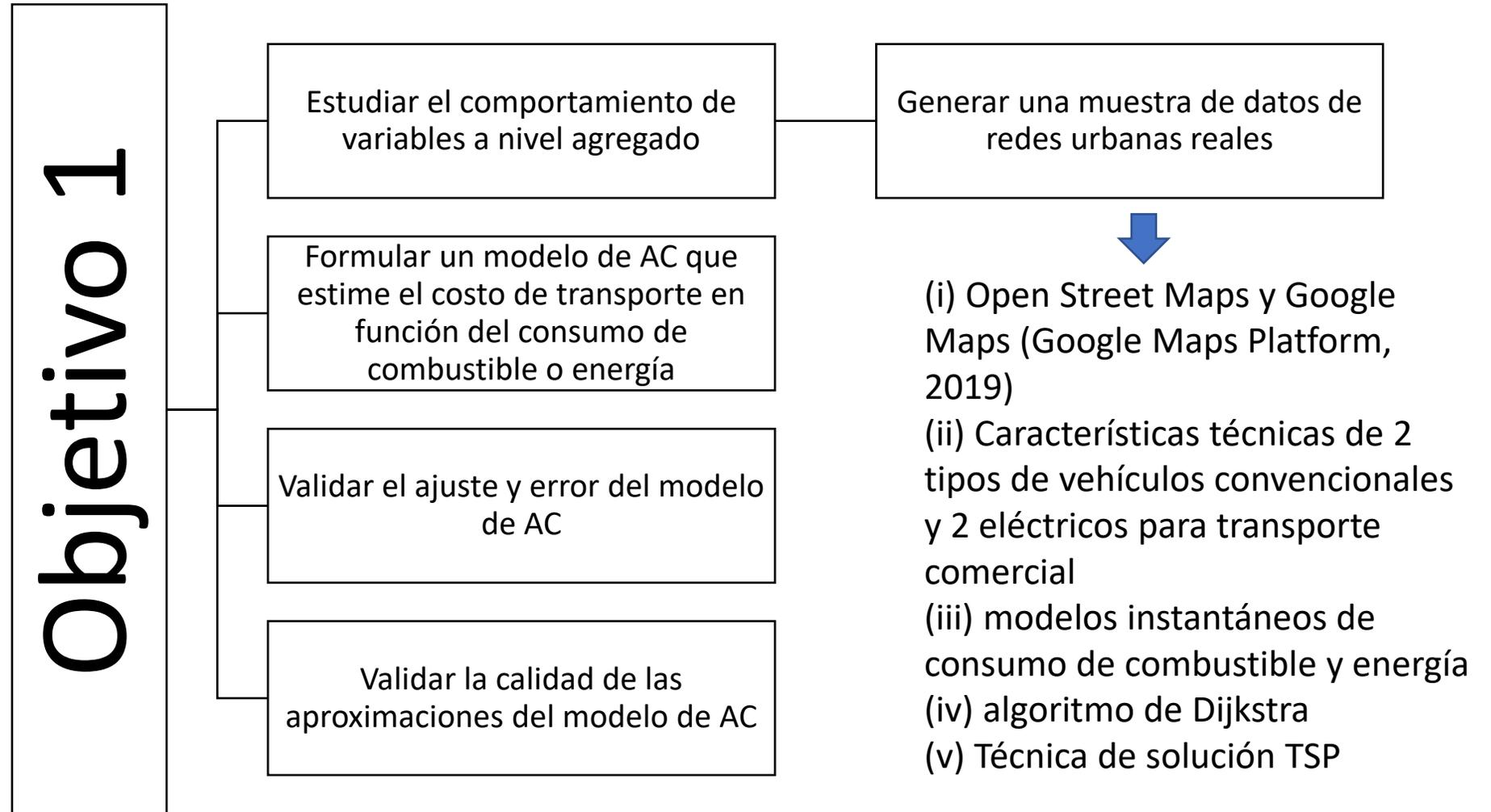


# Delimitación del problema

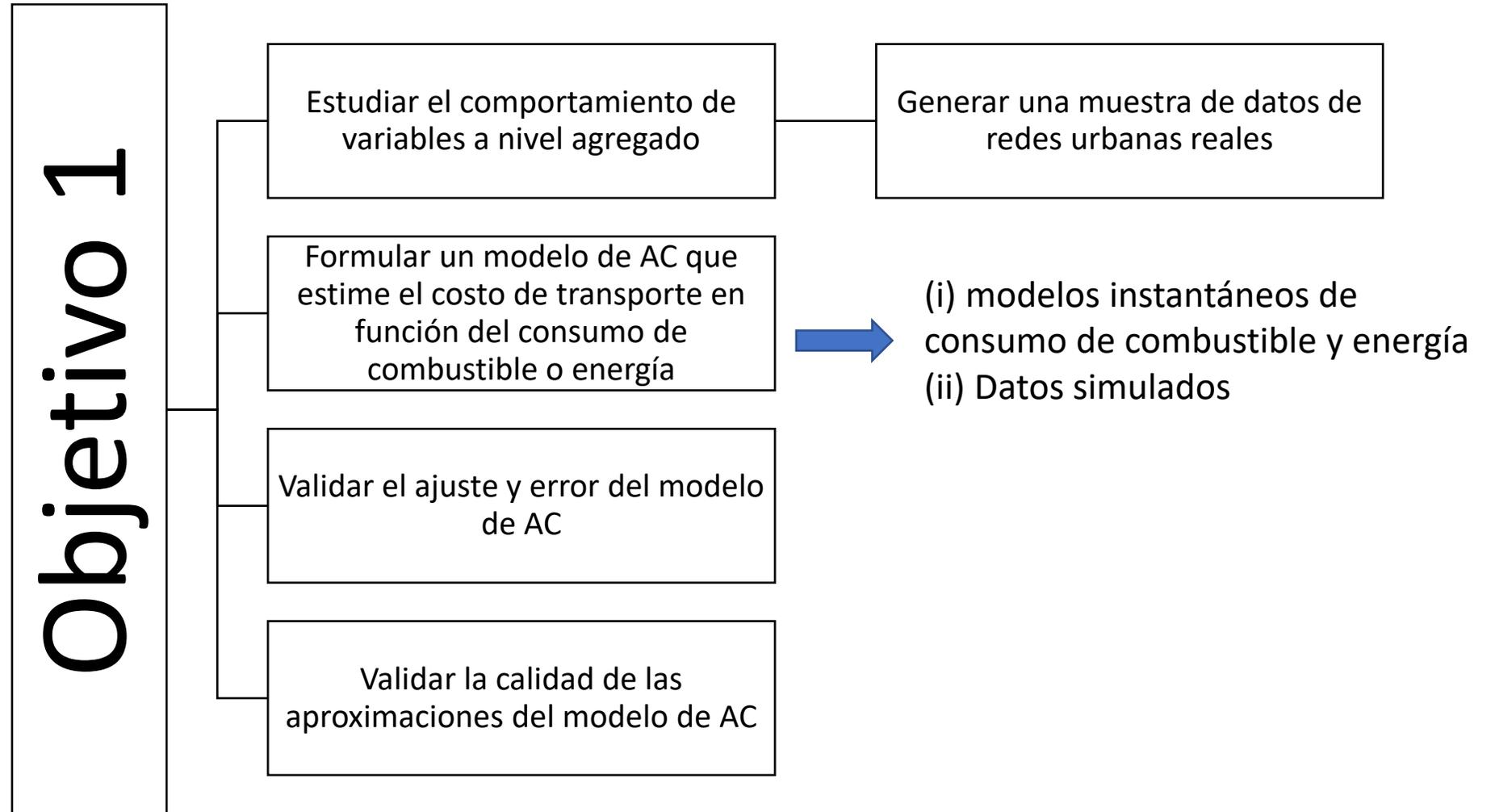
## Supuestos adicionales:

- Existe un conjunto de localizaciones candidatas para el depósito, ubicadas en diferentes alturas del área de servicio.
- La localización del depósito es una nueva variable de decisión en el modelo.
- El objetivo es determinar el impacto de la localización del depósito en los costos de transporte y la composición de la flota en ciudades con diferencias de altitud significativas.

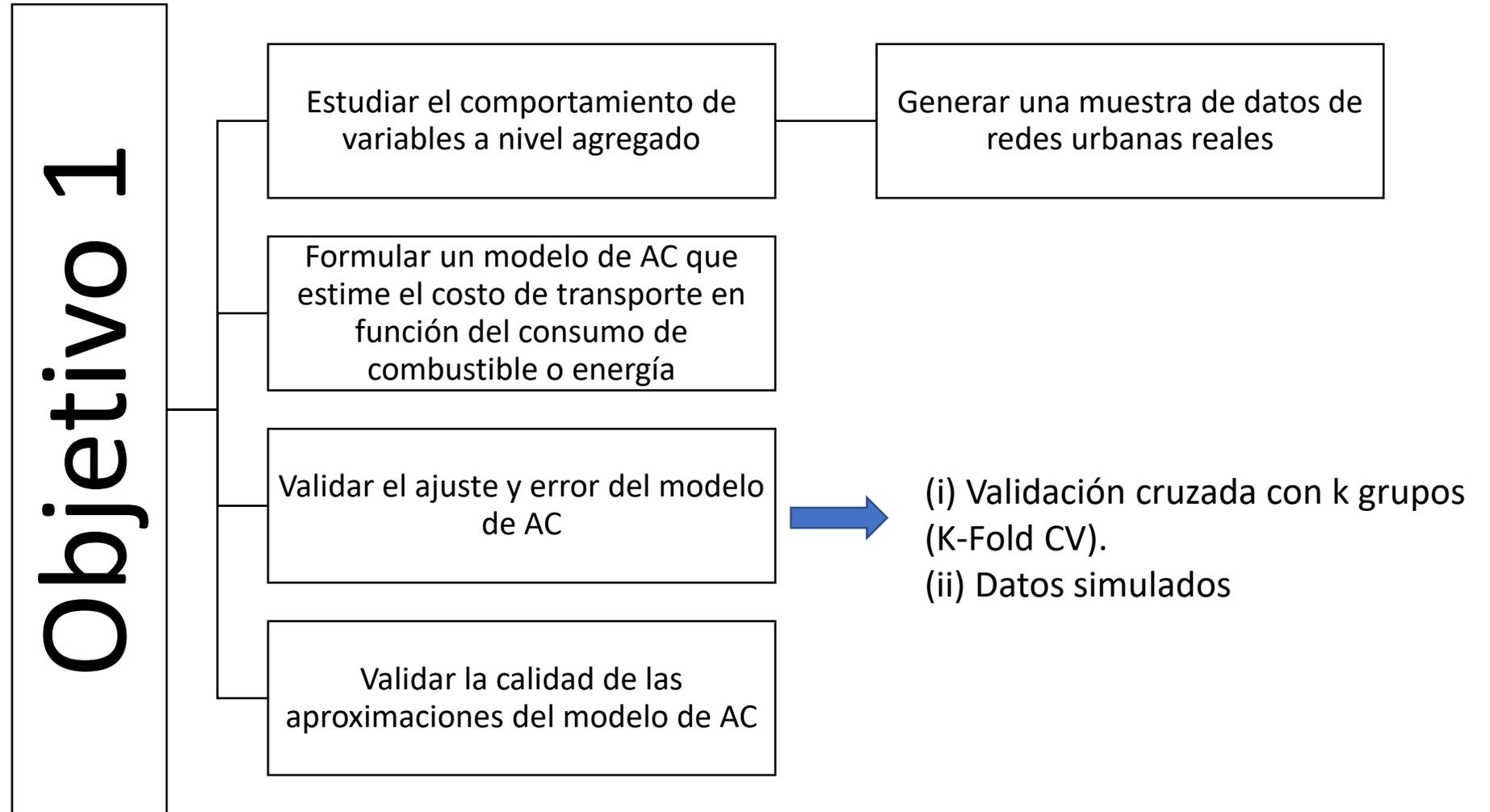
# Metodología



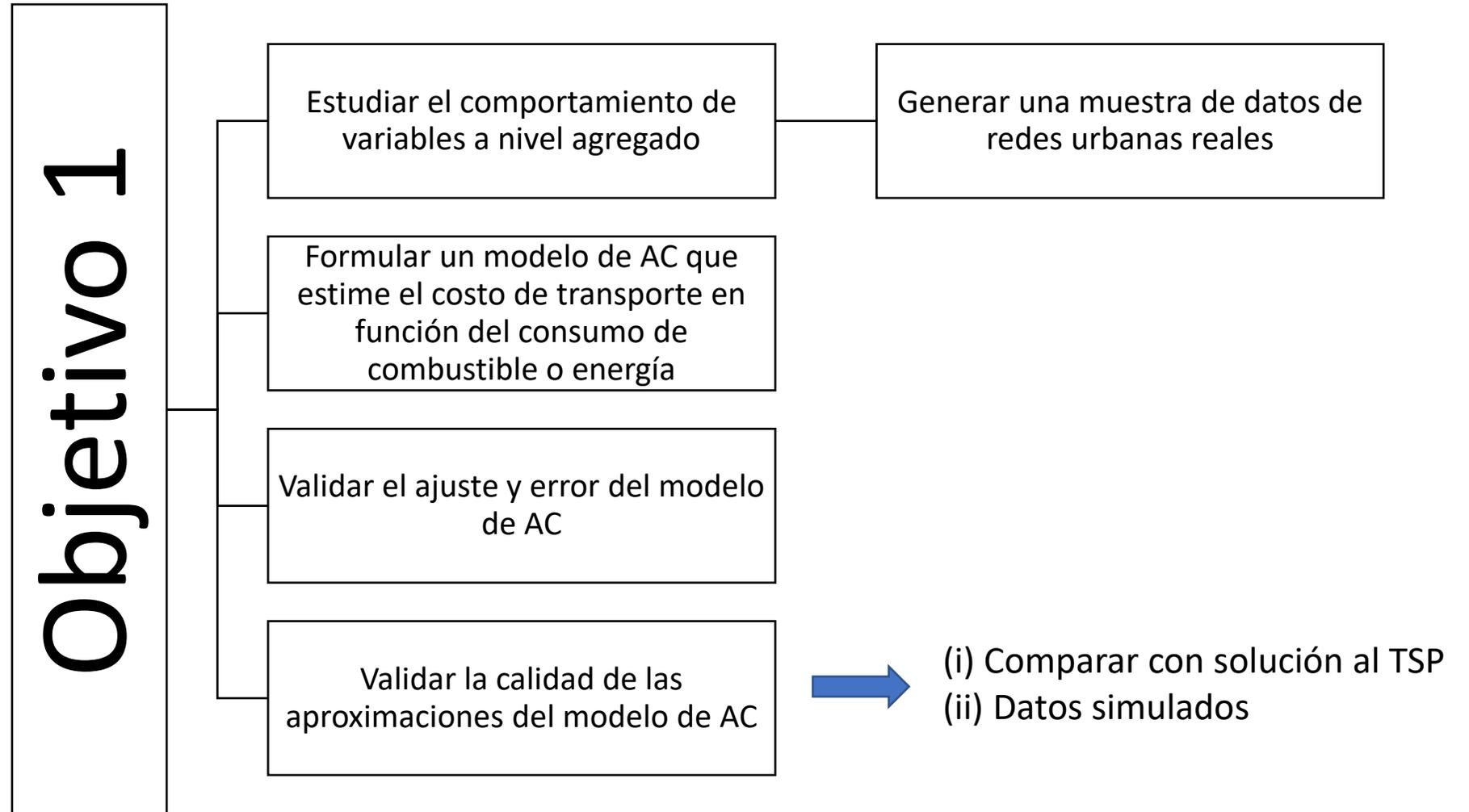
# Metodología



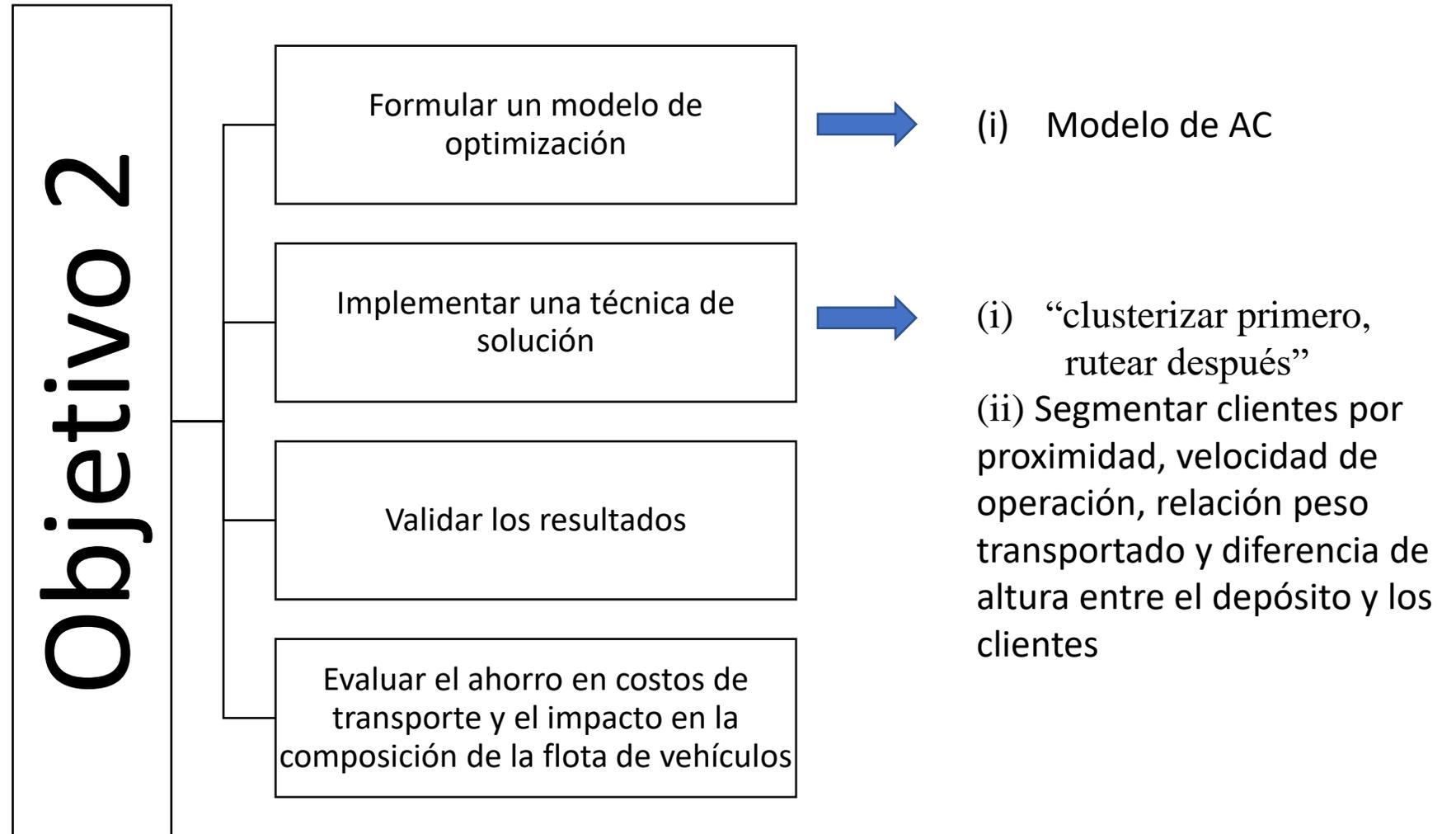
# Metodología



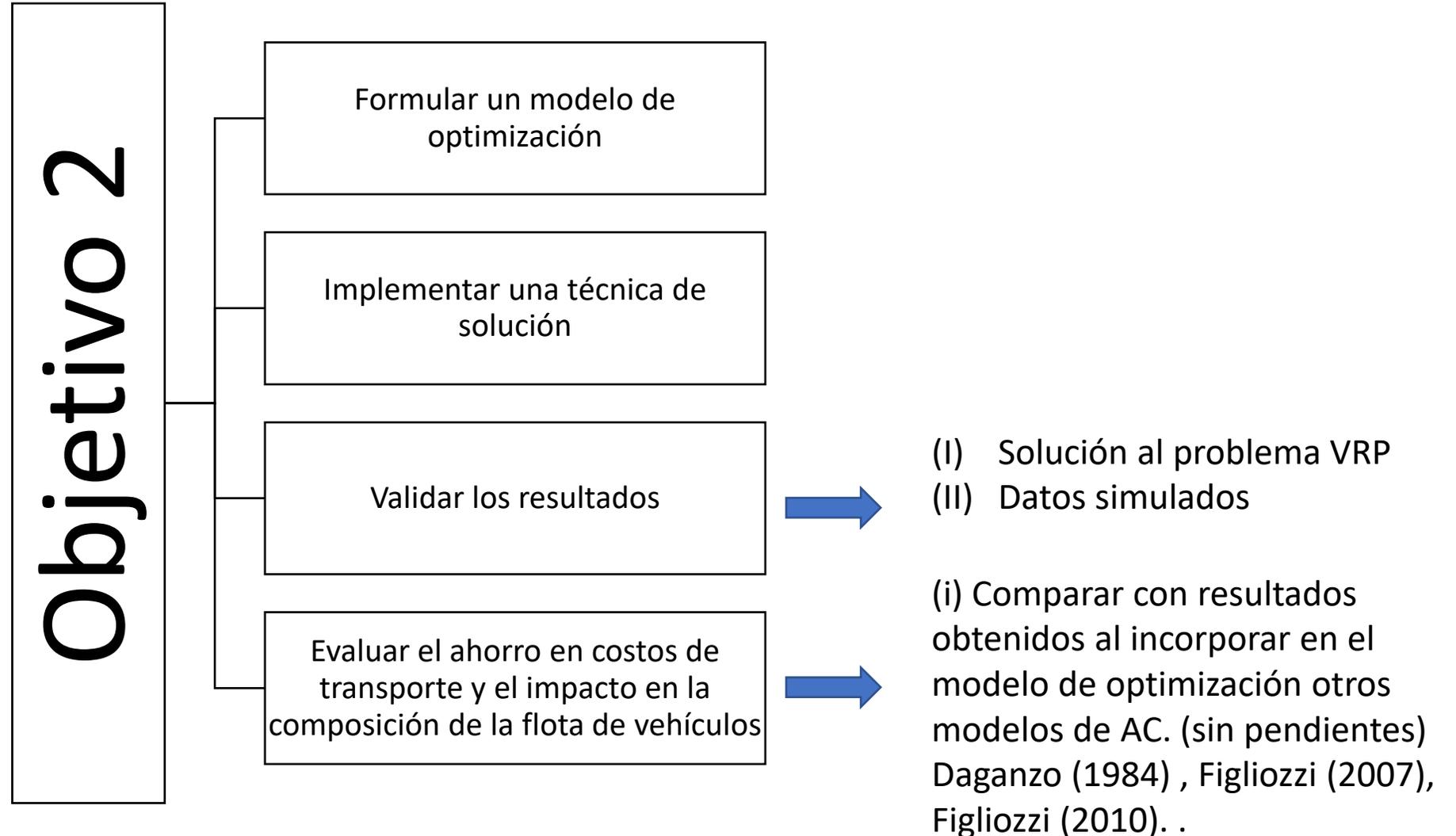
# Metodología



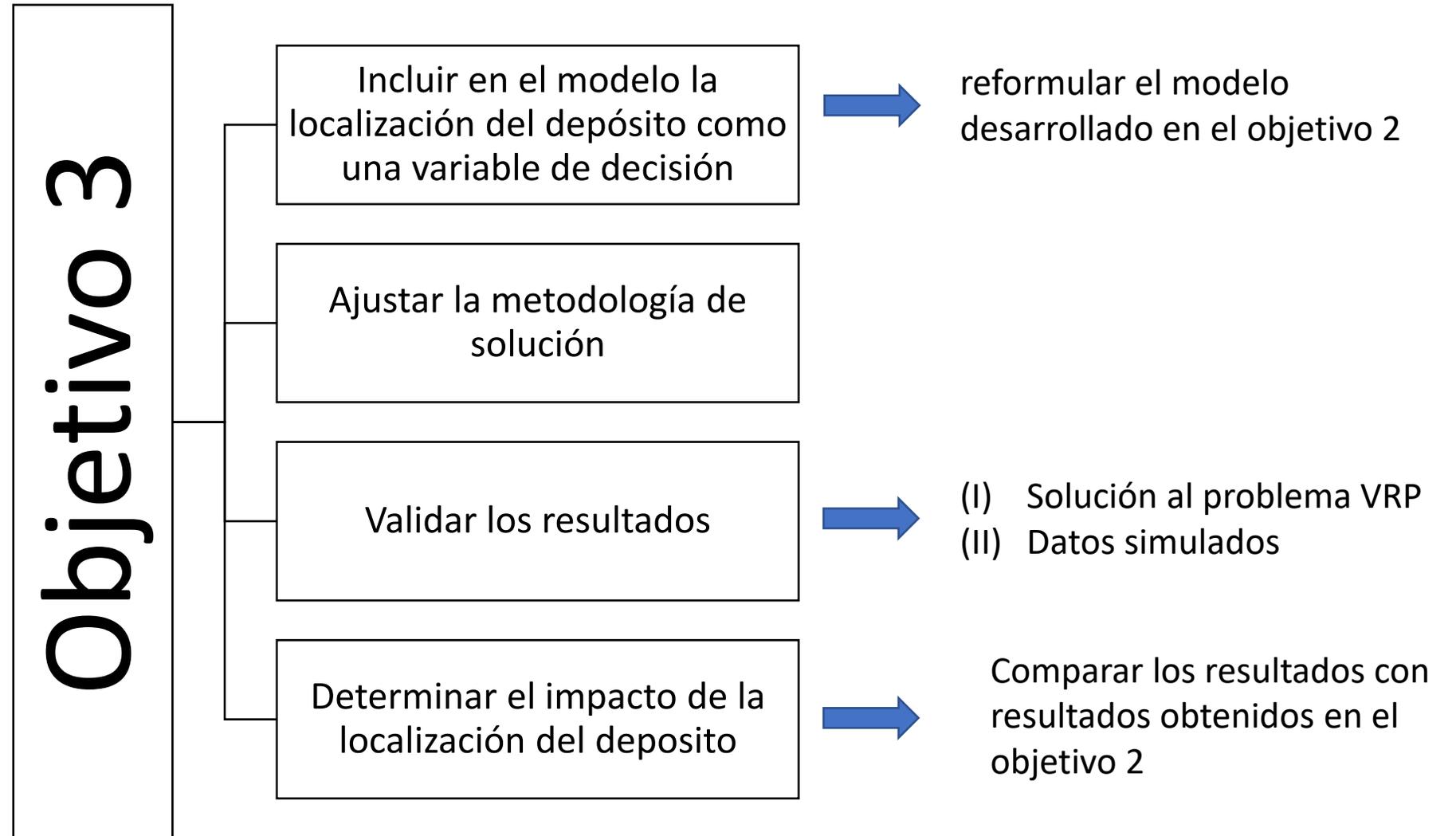
# Metodología



# Metodología



# Metodología



# Resultados esperados

## Propuesta de publicaciones

- *“Un modelo de aproximación continua para estimar el costo de transporte incorporando pendientes de la red vial, peso transportado, velocidad y flota mixta”*
- *“Composición de flota mixta en ciudades con pendientes”*
- *“Impacto de la localización del depósito en ciudades con diferencias de altitud significativas”*

# Plan de trabajo propuesto

ID	Actividades	Meses																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	EVALUACION DEL IMPACTO EN COSTOS DE TRANSPORTE Y COMPOSICION DE FLOTA VEHICULAR EN CIUDADES CON PENDIENTES																								
2	Formular un modelo de AC que estime el costo de transporte en función del consumo de combustible o energía																								
3	Estudiar el comportamiento de variables a nivel agregado																								
4	Formular un modelo de AC																								
5	Validar el ajuste y error del modelo de AC																								
6	Validar la calidad de las aproximaciones del modelo de AC																								
7	Formular y resolver un modelo de optimización que permita encontrar una composición de flota de vehículos mixta																								
8	Formular un modelo de optimización																								
9	Implementar una técnica de solución																								
10	Validar los resultados																								
11	Evaluar el impacto en el costo de transporte y en la composición de la flota																								
12	Realizar un análisis estratégico de la localización de uno o varios depósitos																								
13	Incluir en el modelo la localización de uno o varios depósitos																								
14	Ajustar la técnica de solución																								
15	Validar resultados																								
16	Determinar los impactos en costos de transporte y composición de flota																								
17	Escritura de publicaciones																								
18	Reporte Final																								

# Referencias

- Asamer, J., Graser, A., Heilmann, B., & Ruthmair, M. (2016). Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 182-199.
- Boeing, G. (2017). "OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks." *Computers, Environment and Urban Systems* 65, 126-139. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004
- Boriboonsomsin, K., & Barth, M. (2009). Impacts of road grade on fuel consumption and carbon dioxide emissions evidenced by use of advanced navigation systems. *Transportation Research Record*, 2139(1), 21-30.
- Brunner, C., Giesen, R., Klapp, M. A., Coeymans, J.E., Figliozzi, M., & Vicuña, S. (2018). Impacto en el consumo de combustible al planificar rutas vehiculares considerando las pendientes del camino. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. 84 pág.
- Daganzo, C. F. (1984a). The distance traveled to visit N points with a maximum of C stops per vehicle: An analytic model and an application. *Transportation science*, 18(4), 331-350.
- Daganzo, C. F. (1984b). The length of tours in zones of different shapes. *Transportation Research Part B: Methodological*, 18(2), 135-145.
- Figliozzi, M. A. (2007). Analysis of the efficiency of urban commercial vehicle tours: Data collection, methodology, and policy implications. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(9), 1014-1032.
- Figliozzi, M. A. (2010a). The impacts of congestion on commercial vehicle tour characteristics and costs. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 46(4), 496-506.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2014). The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239-254.
- Toro, E. M., Franco, J. F., Echeverri, M. G., & Guimarães, F. G. (2017). A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 114-125.