

# Metodología de estudio de ciclo de vida de buses con asistencia de algoritmos de inteligencia artificial

Autor: Juan Pablo Romero Campos

# Contexto país

---

- En Chile, el transporte es responsable de aproximadamente una cuarta parte de todas las emisiones de gases de efecto invernadero y casi un tercio de la generación de material particulado fino porque más del 90% del combustible utilizado para el transporte se basa en el petróleo.
- Para 2040 Chile desea tener un 100% Buses eléctricos para transporte público.

## Chile anuncia la electrificación total del transporte público para 2040

Con un total de 1.035 vehículos vendidos a la fecha en América Latina, el fabricante chino BYD logra abarcar el 71% del mercado de flota sustentable en la región, donde otros países además de Chile están replicando la iniciativa.

DICIEMBRE 16, 2019 PILAR SÁNCHEZ MOLINA

EV MERCADOS POLÍTICA AMERICA LATINA

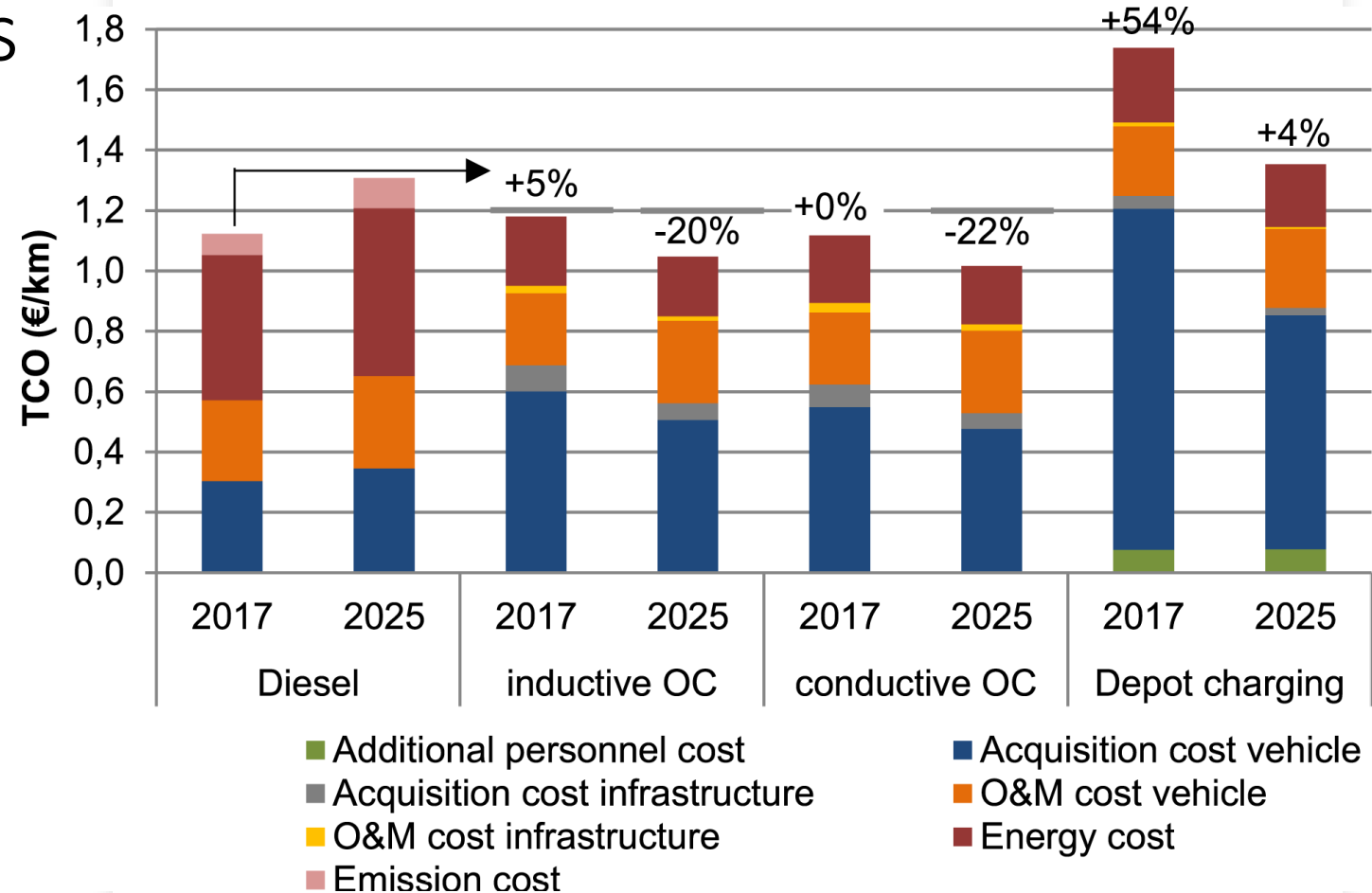


# Motivación específica del estudio: Ambiental y económica

- La paulatina inclusión de flotas eléctricas como una opción tecnológica al Euro VI.
  - Empresas de transporte motivadas principalmente por mejorar la calidad del aire y el medio ambiente
- El contexto actual de electromovilidad en Chile nos hace preguntarnos
  - ¿Implica una disminución en la contaminación?
  - ¿Es más rentable un bus eléctrico o un bus diésel?
  - ¿Qué aspectos hay que potenciar en la electromovilidad?
  - ¿Es más eficiente energéticamente la tecnología EV que la ICE? \*\*

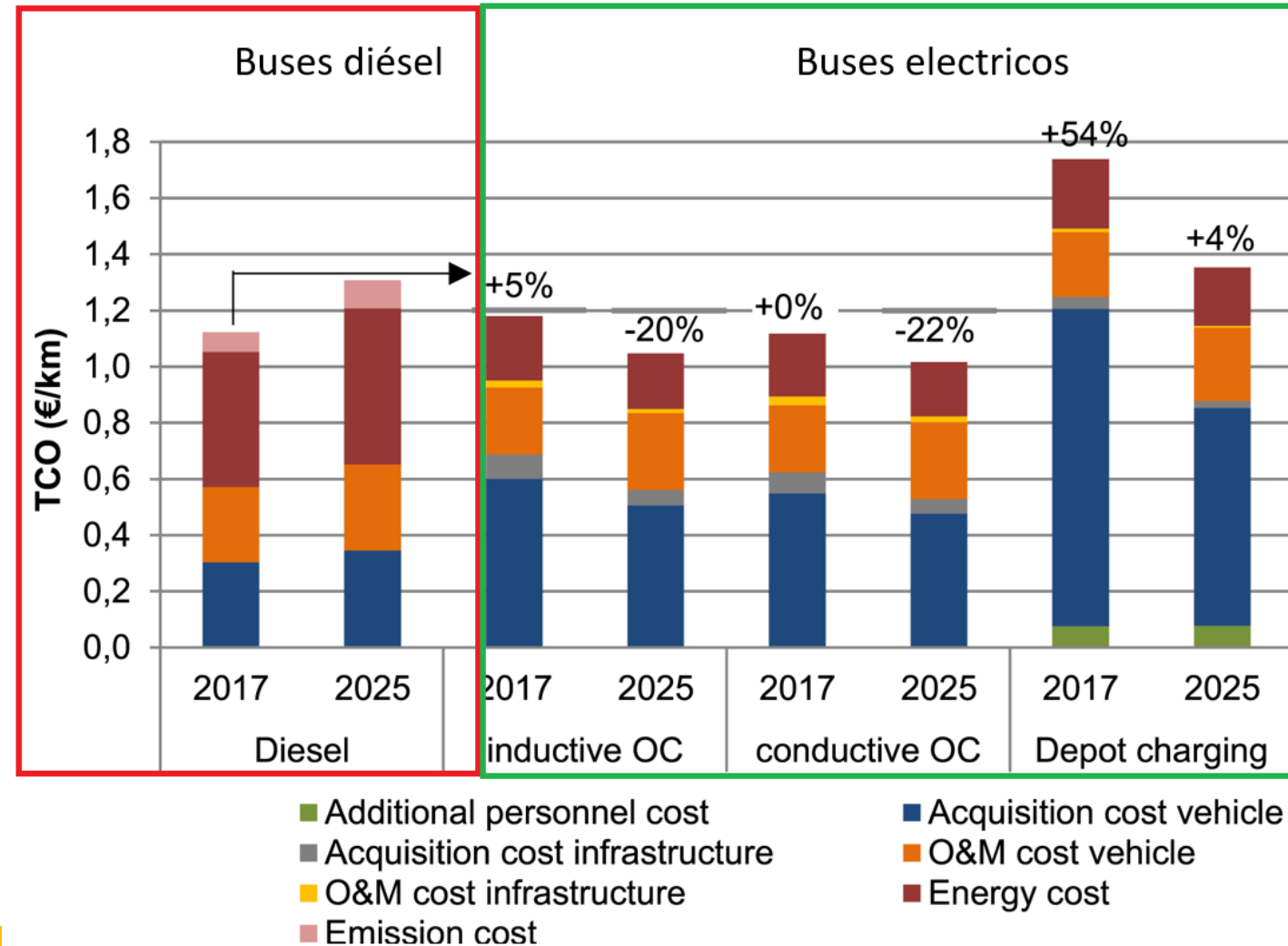
# ¿Cómo podemos comparar entre distintas tecnologías?

- Curva TCO → Costos totales de la propiedad.
- Comparar tecnologías
- Diversidad de fuentes. Información propia en base de datos reales.



# ¿Cómo podemos comparar entre distintas tecnologías?

- Curva TCO → Costos totales de la propiedad.
- Comparar tecnologías
- Diversidad de fuentes. Información propia en base de datos reales.

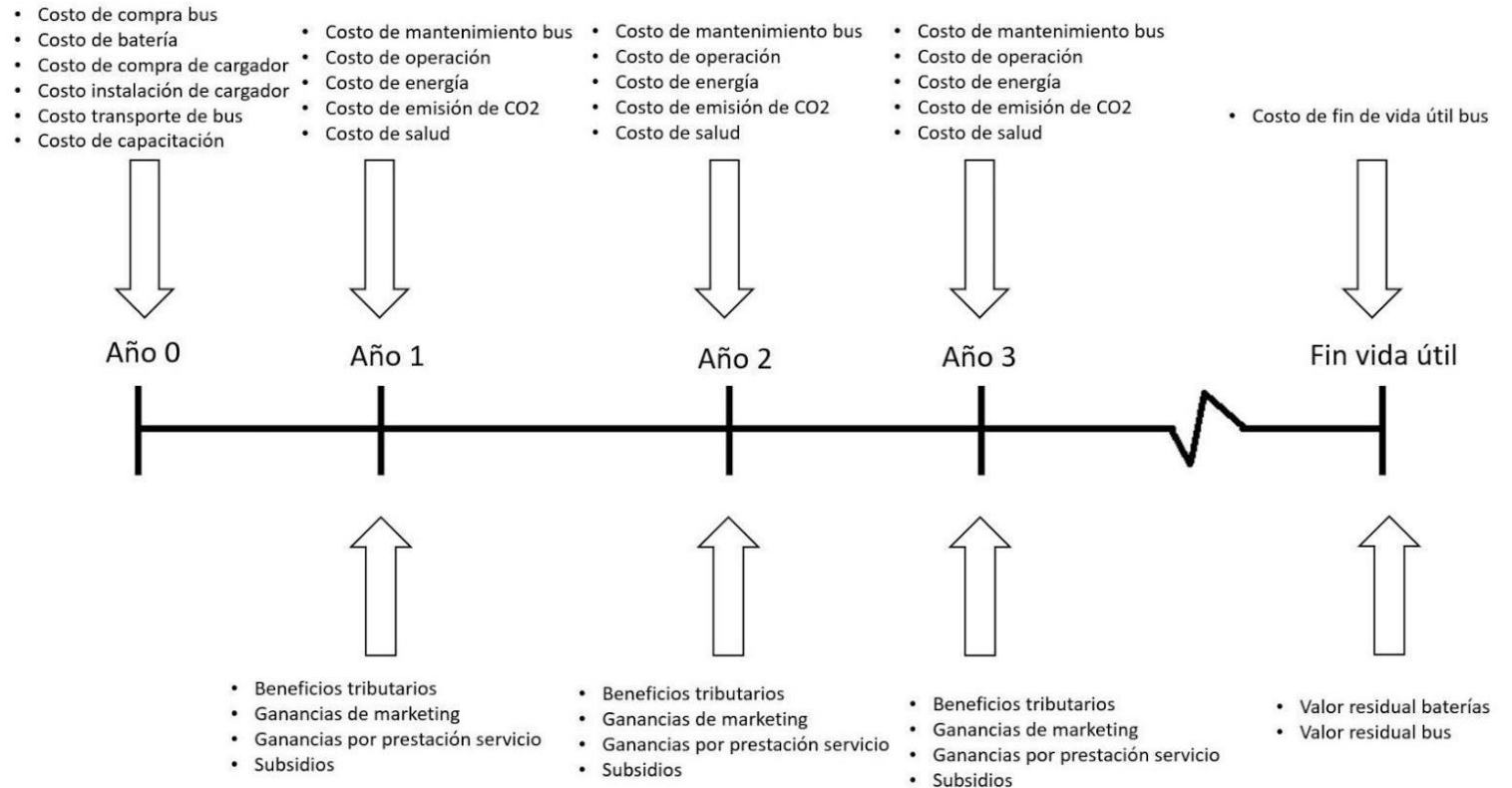


# Alcances

- Estudio realizado solo para buses urbanos de la Región Metropolitana
- Modelado con Eco invent e Idemat

# Metodología

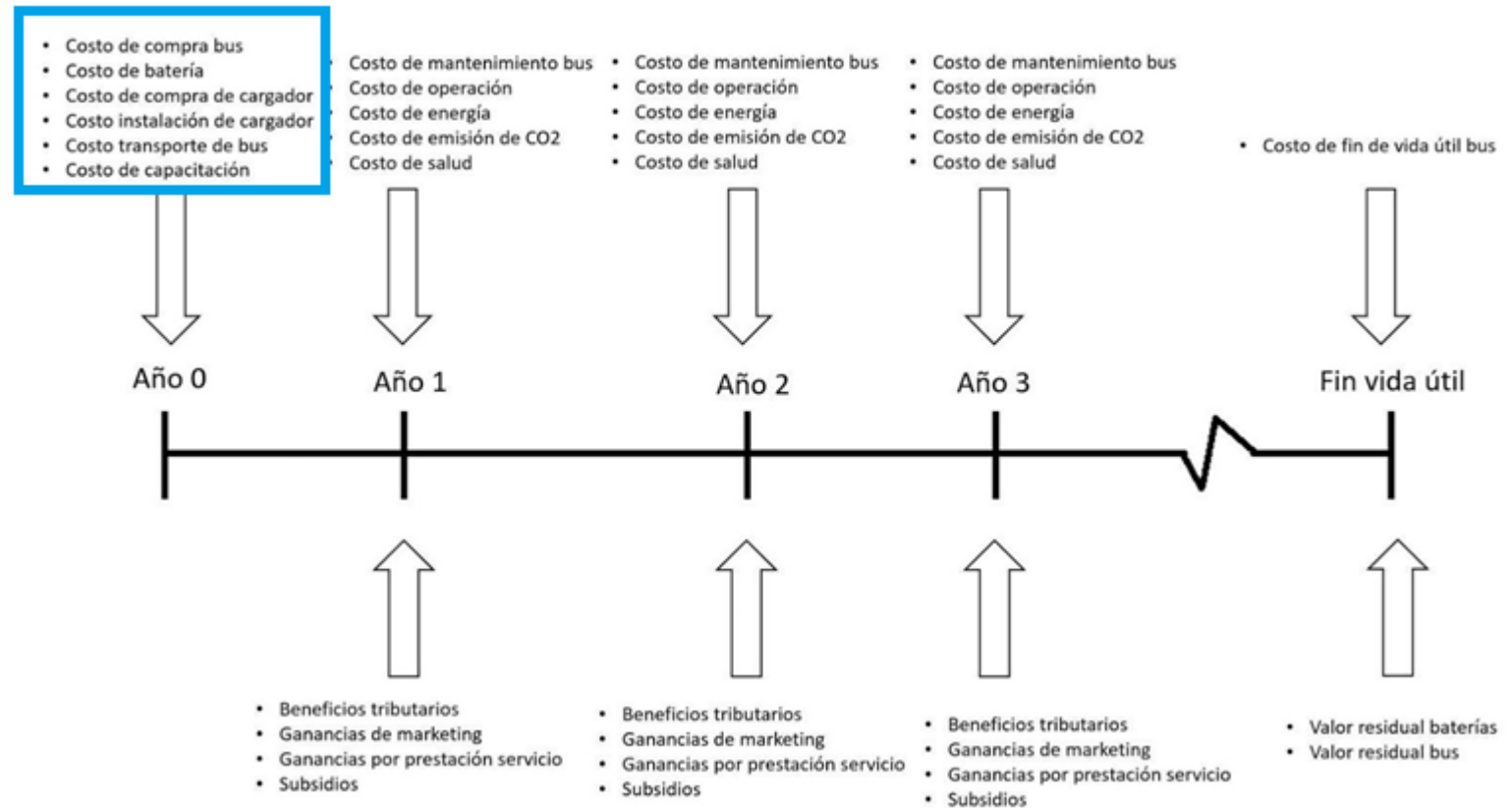
- Mediante el costo total del ciclo de vida.
- ¿Qué es el ciclo de vida?
- Modelo económico.



$$TCO = C_{Pu} + C_{Int} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{Op}}{(1+r)^i} + \frac{C_M}{(1+r)^i} + \frac{C_{CO2}}{(1+r)^i} + \frac{C_H}{(1+r)^i} + C_{EoL}$$

# Metodología

- Mediante el costo total del ciclo de vida.
- ¿Qué es el ciclo de vida?
- Modelo económico.



$$TCO = C_{Pu} + C_{Int} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{Op}}{(1+r)^i} + \frac{C_M}{(1+r)^i} + \frac{C_{CO2}}{(1+r)^i} + \frac{C_H}{(1+r)^i} + C_{EoL}$$





# Metodología

- ¿Cómo estimar los parámetros del modelo?
- Distinguimos 2 tipos de parámetros.
  - Simples.
    - Se pueden obtener por medio de entrevistas con operadores, y por medio de bibliografía
  - Complejos.
    - Se deben obtener mediante modelamiento de las flotas eléctricas.

# Metodología

- Los datos operacionales se deben modelar.



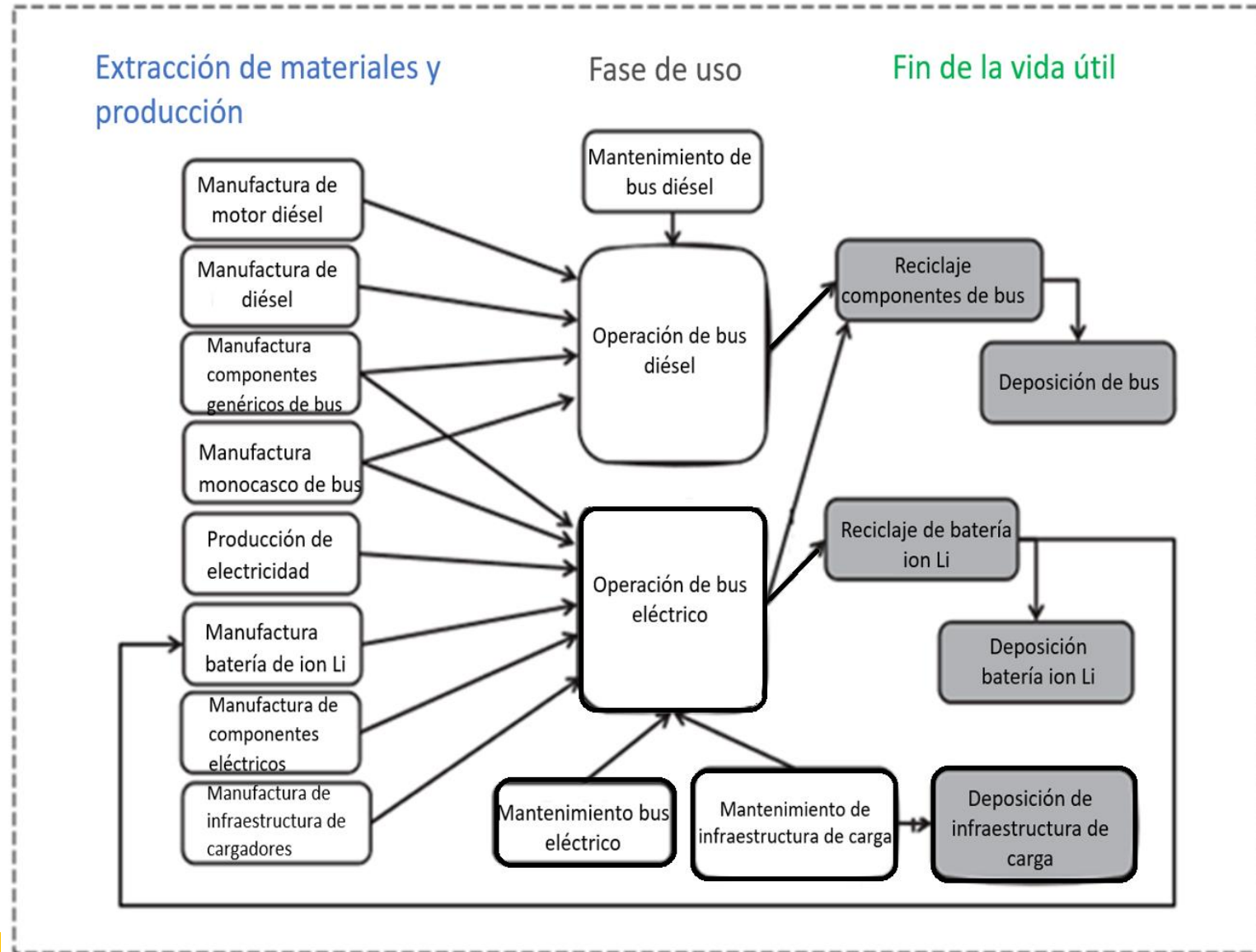
# LCA: Análisis de ciclo de vida

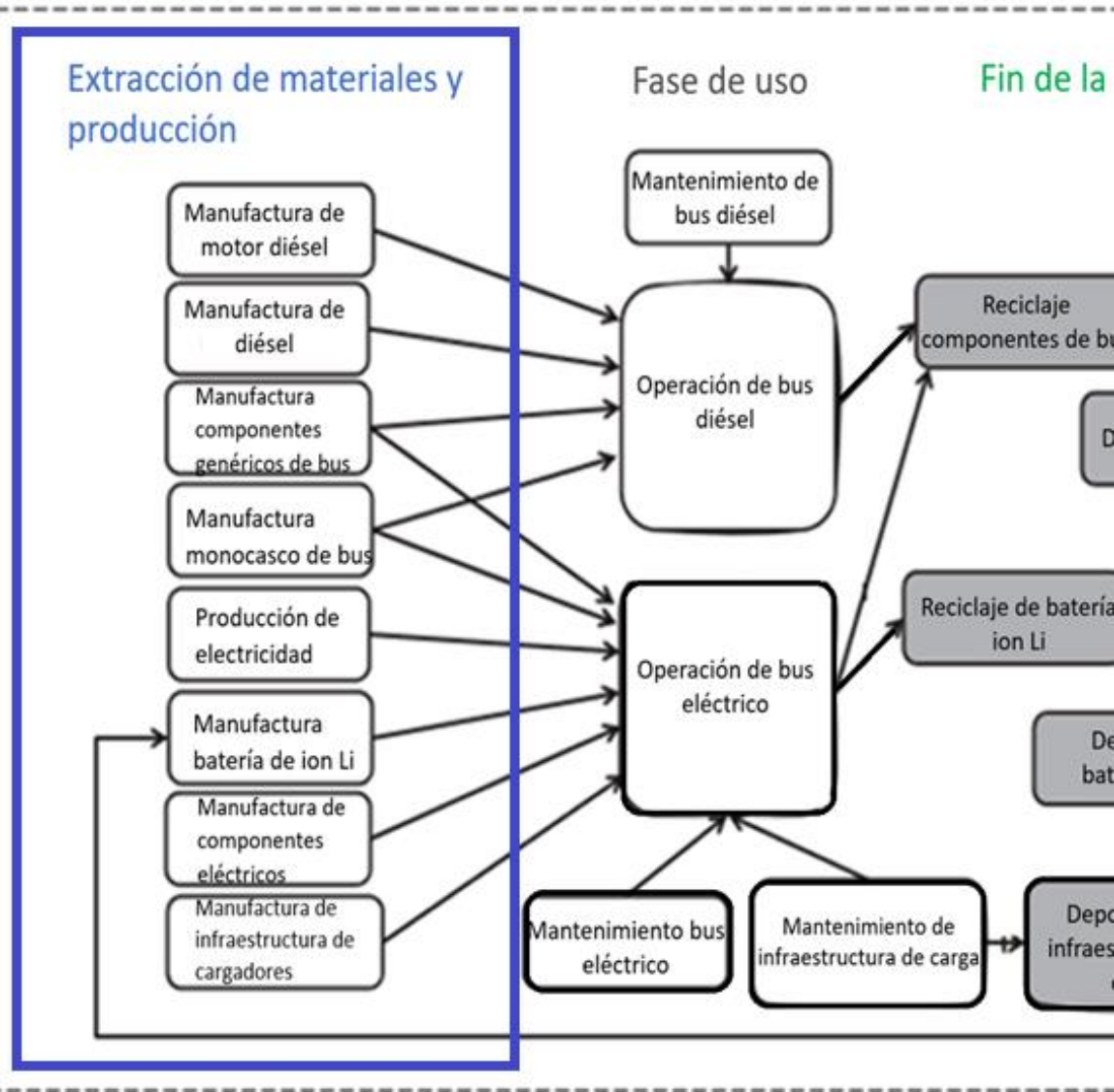
- Para determinar y comparar el impacto medio ambiental de flotas eléctricas se requiere utilizar el análisis de ciclo de vida.
- El análisis de ciclo de vida cuantifica los impactos ambientales de un activo a lo largo de todo su ciclo de vida.



# LCA Para buses

- Conceptualmente distinguimos 3 fases en el ciclo de vida de flotas eléctricas y diésel:
  - Extracción de materiales y producción (manufactura)
  - Fase de Uso
  - Fin de vida útil



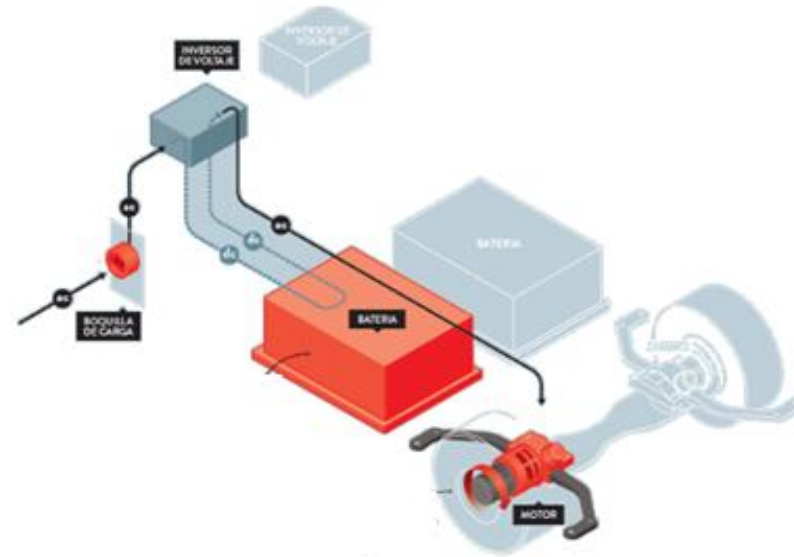
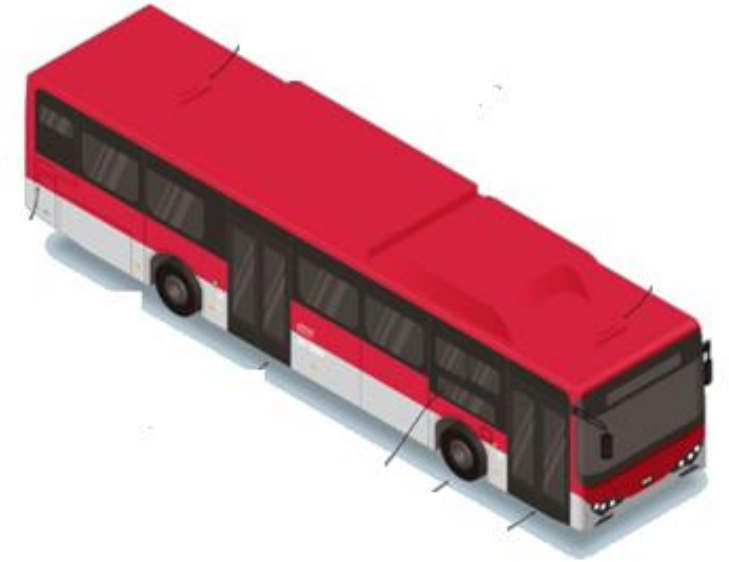


Fase de Manufactura

# Fase de Manufactura

---

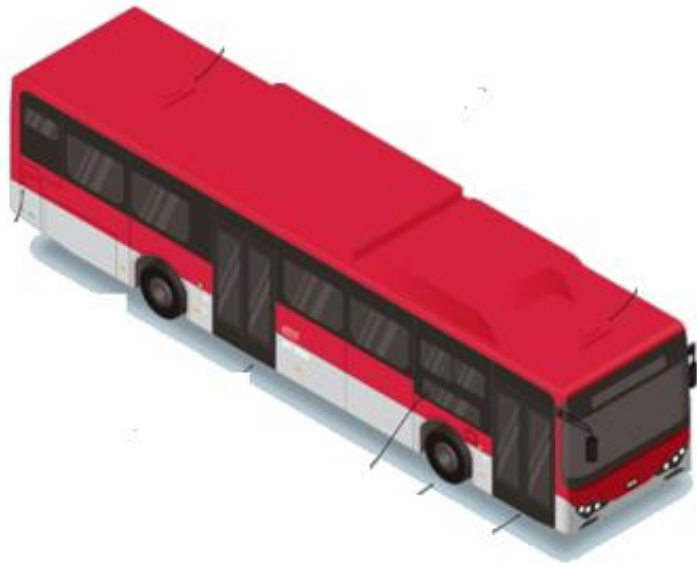
- Para calcular esta fase tenemos que primero definir que es un bus diésel y eléctrico desde el punto de vista másico.
- La literatura separa los componentes de un bus en dos grupos principales.
  - → El habitáculo.
  - → El tren de poder.



# Fase de Manufactura

## Ejemplo

---

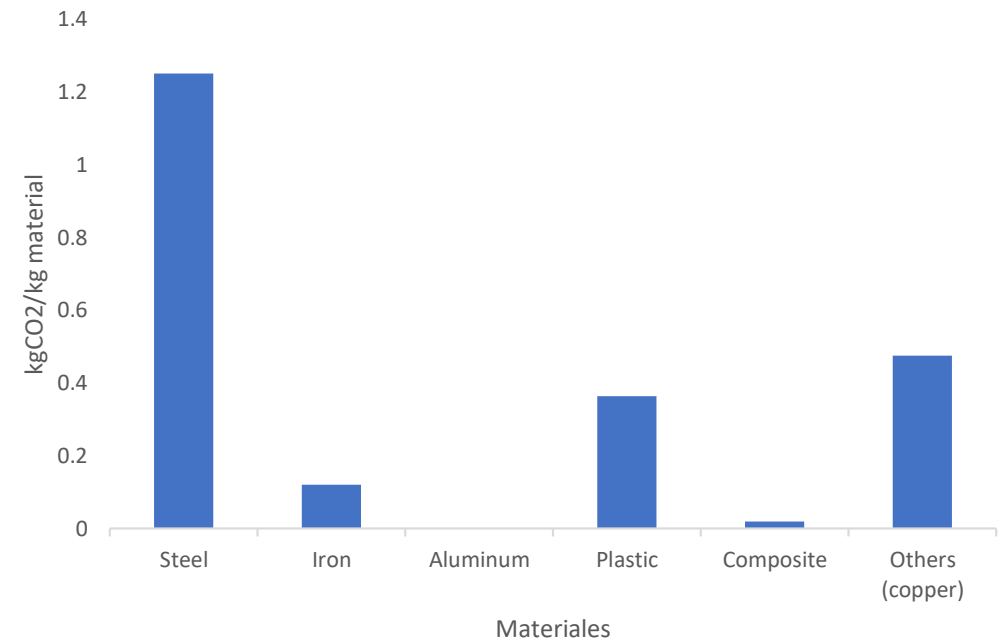


Material	Percentage
Steel	54.2
Iron	7.9
Aluminum	11.9
Plastic	9.2
Composite	1
Others	15.8

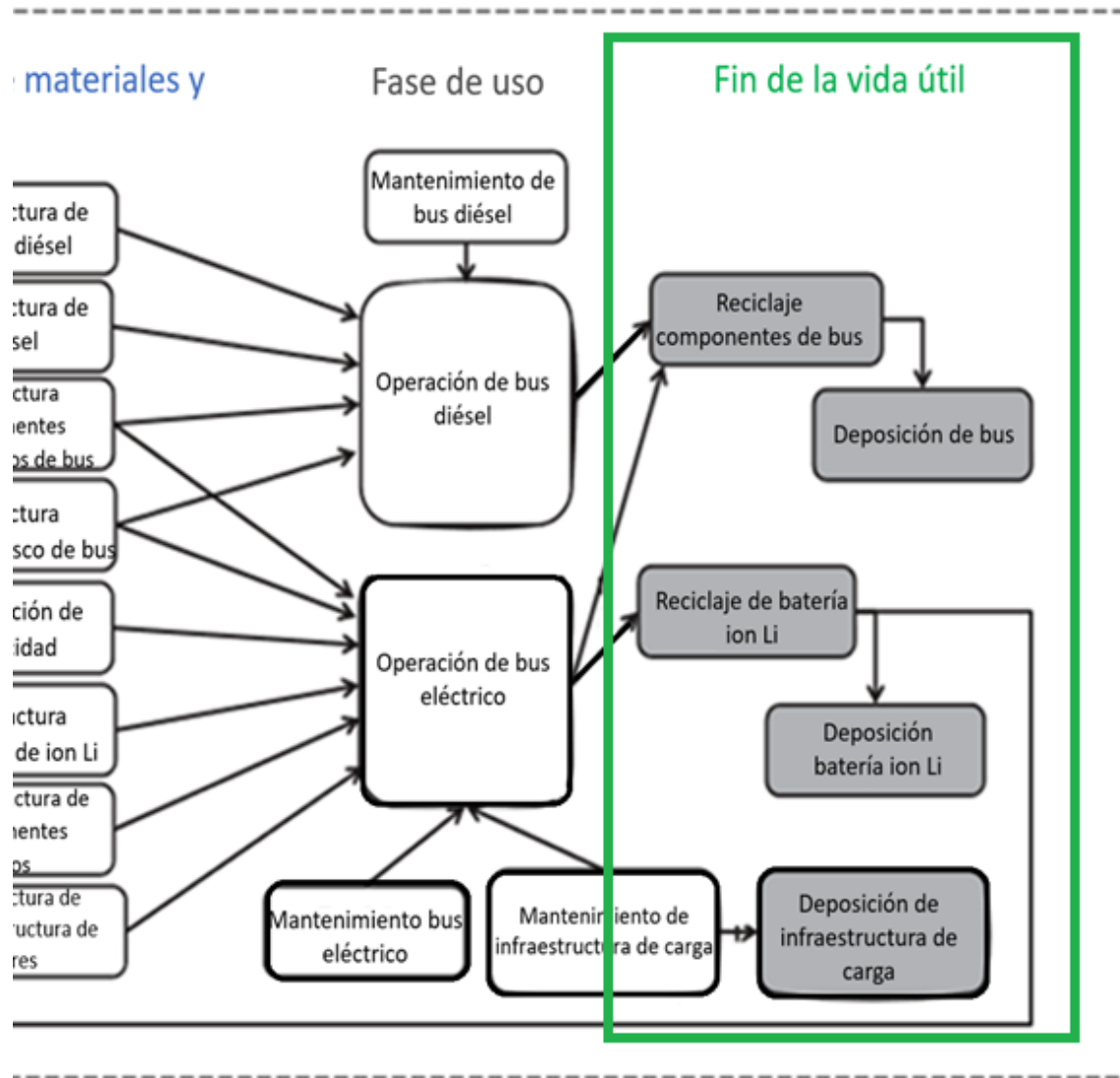
# Fase de Manufactura

## Ejemplo

Material	Percentage
Steel	54.2
Iron	7.9
Aluminum	11.9
Plastic	9.2
Composite	1
Others	15.8



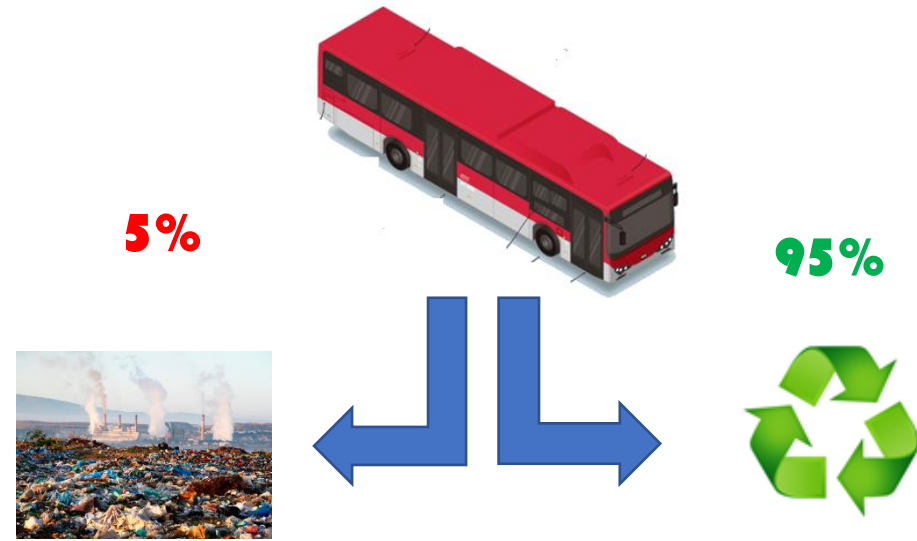




Fase de Fin de vida útil

# Fase de Fin de la vida útil

- Para calcular esta fase tenemos que primero definir las estrategias de reciclaje y fin de la vida útil.
- Distinguimos dos fases de manejo de residuos.
  - Reciclaje de los componentes. Poseen una tasa de recuperación cercana al 95%.
  - Segunda vida útil de las baterías.

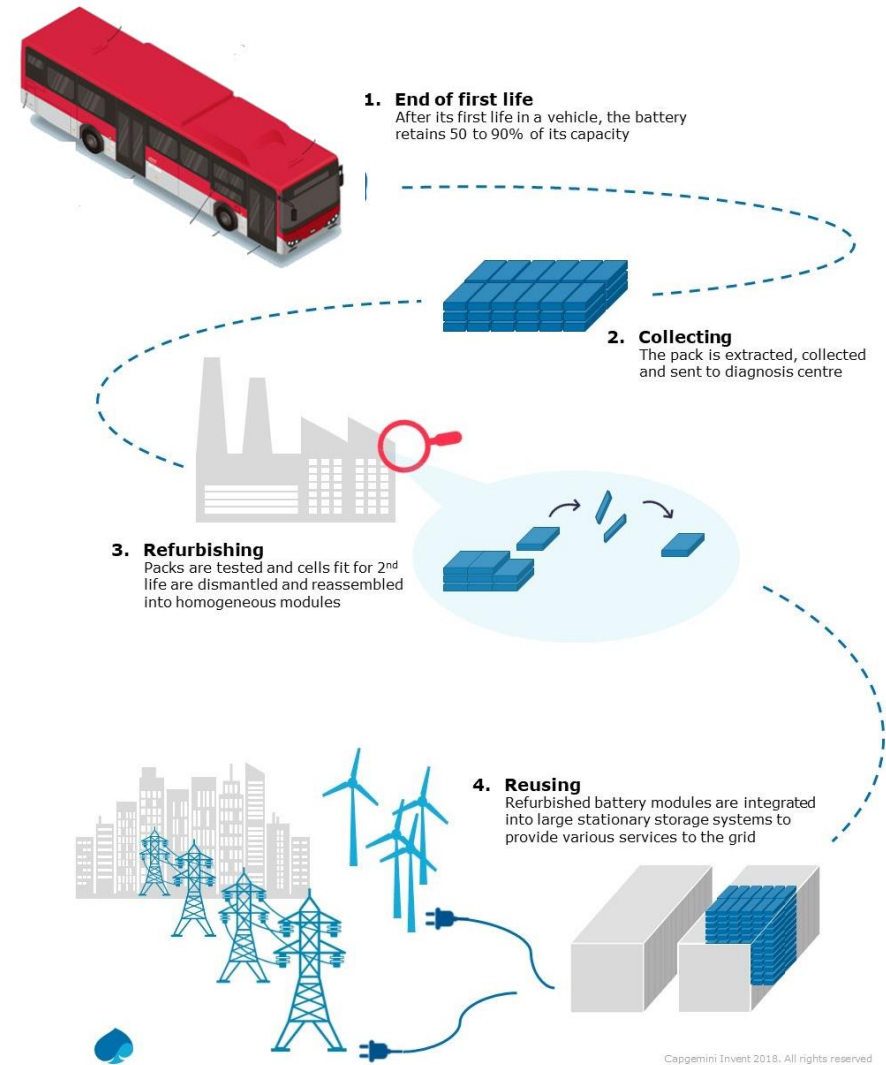


metal recovery percentages (recycling)	
aluminium	95.0%
brass	99.0%
copper	99.0%
ferrous materials	95.0%
lead	95.0%
magnesium	95.0%
zinc	95.0%
other metals	99.0%

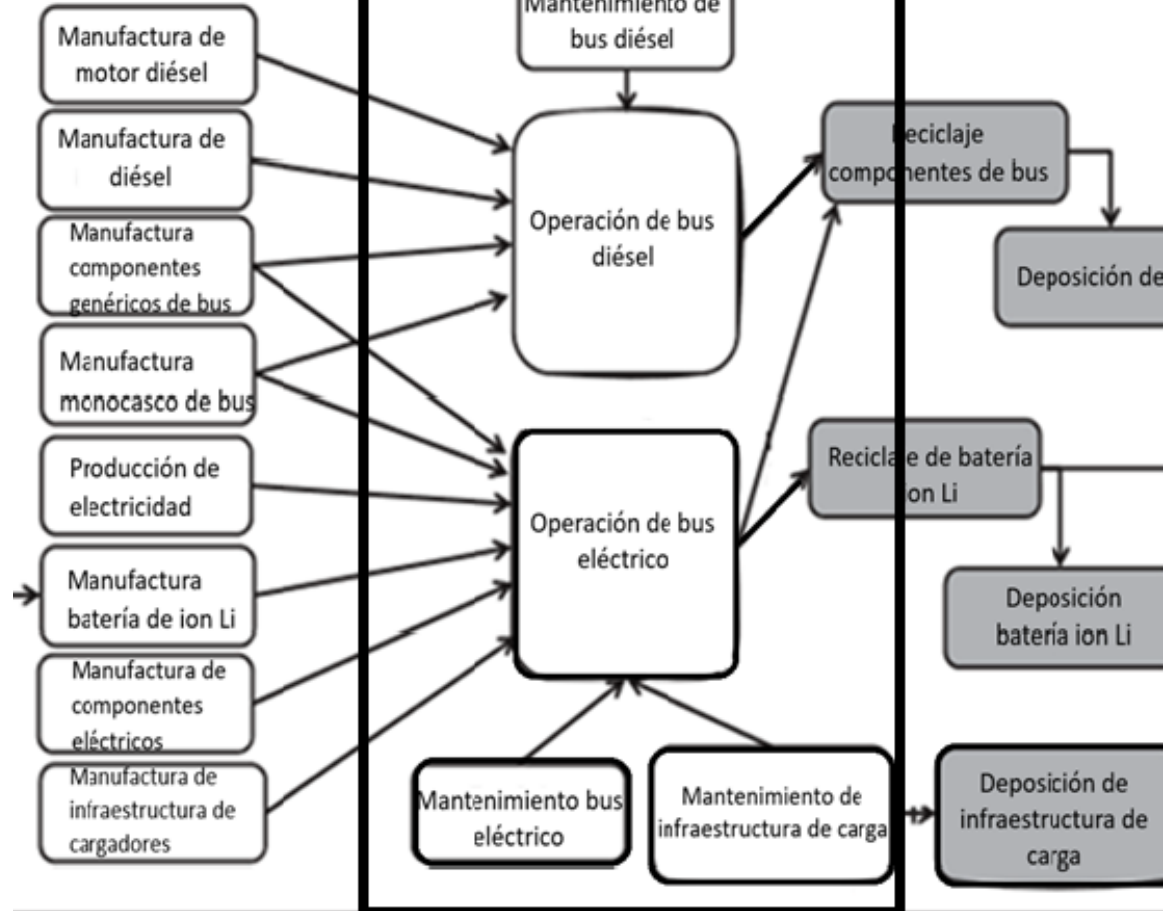
# Fase de Fin de la vida útil: Segunda vida de baterías

Table S10. balance of the Li-ion batteries (percentages).

Li-ion batteries	Percentages	
	share	
Material	LiFePO <sub>4</sub>	LiFeMnPO <sub>4</sub>
Al	28.7%	5.0%
Cu	10.1%	7.5%
graphite	9.2%	11.3%
carbon	1.5%	1.3%
polyethylene (PE)	2.0%	1.5%
polypropylene (PP)	2.0%	1.5%
polytetrafluorethylene (PTFE)	2.9%	2.6%
N-methyl-2-pyrrolidone (NMP)	11.2%	-
lithiumhydroxide	3.9%	10.1%
phosphoric acid	5.5%	14.2%
ferrous sulphate	8.5%	8.8%
lithiumhexafluorophosphate	1.8%	1.6%
ethylene carbonate	12.8%	11.8%
manganese concentrate	-	14.4%
sulfuric acid	-	8.5%
Sum	100%	100%



Producción de materiales y  
Operación

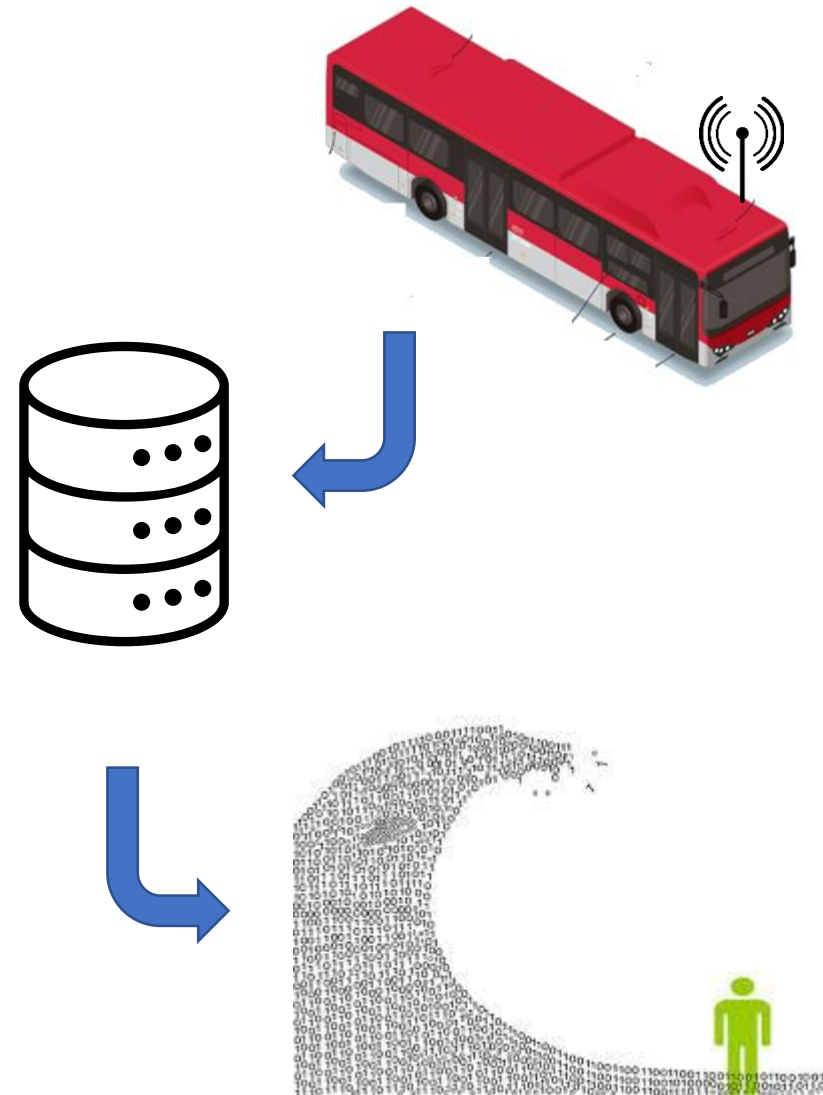


Fase de Fin de uso

# Fase de Uso

---

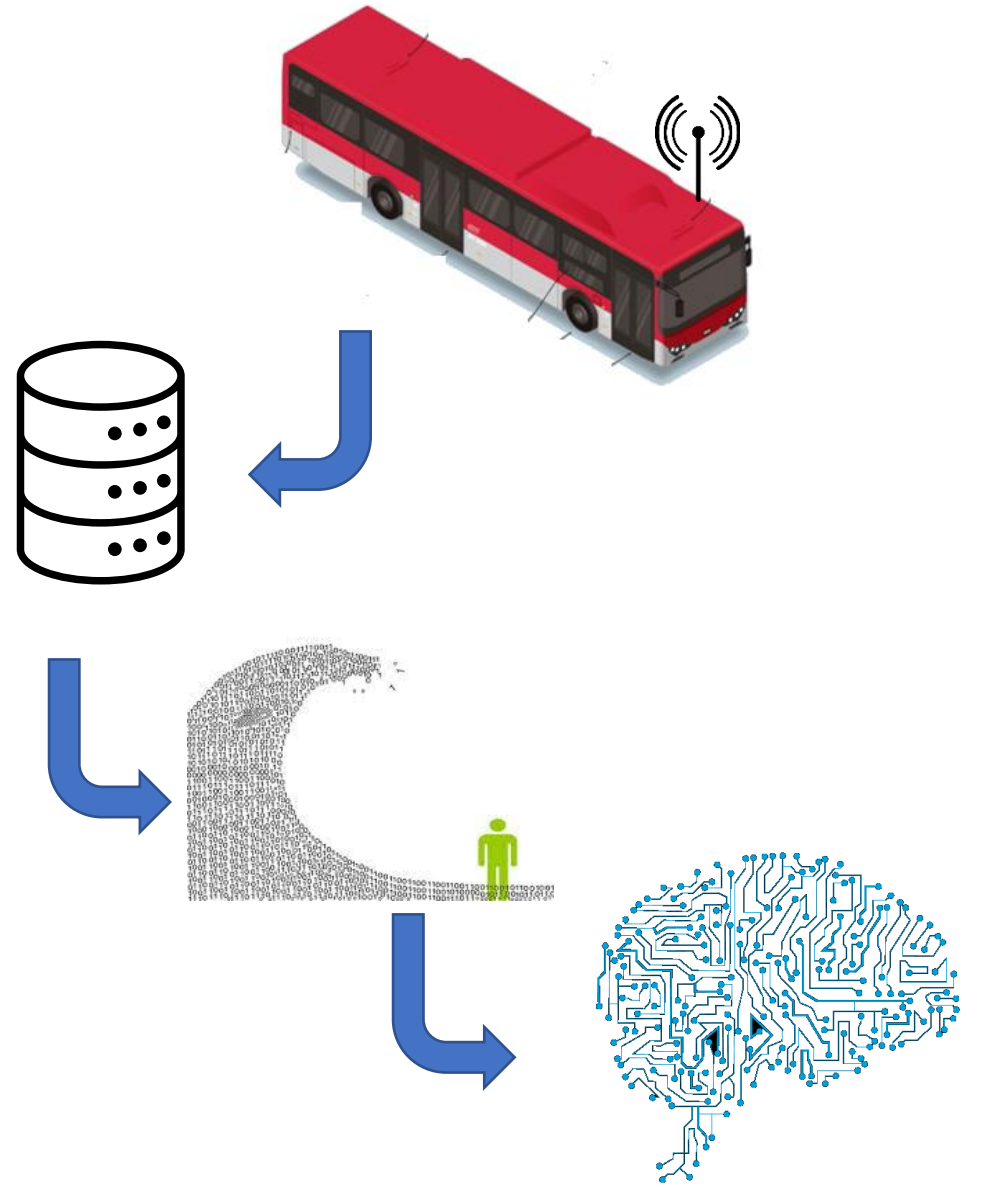
- ¿Cómo podemos comparar flotas?
  - Las flotas eléctricas tienen recorridos diferentes a los de los buses diésel.
- Tenemos muchos datos operacionales
  - Cerca de 50 Gb de datos. → No son computables por un ser humano.
- ¿Cómo podemos extraer información de los datos y crear un modelo robusto que nos permita entender y comparar flotas eléctricas y diésel a lo largo de su vida útil?



# Algoritmos de inteligencia artificial

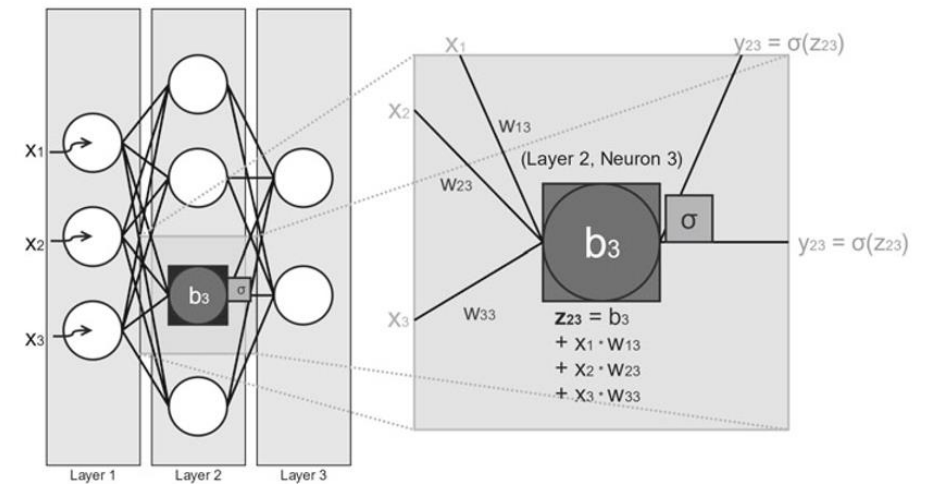
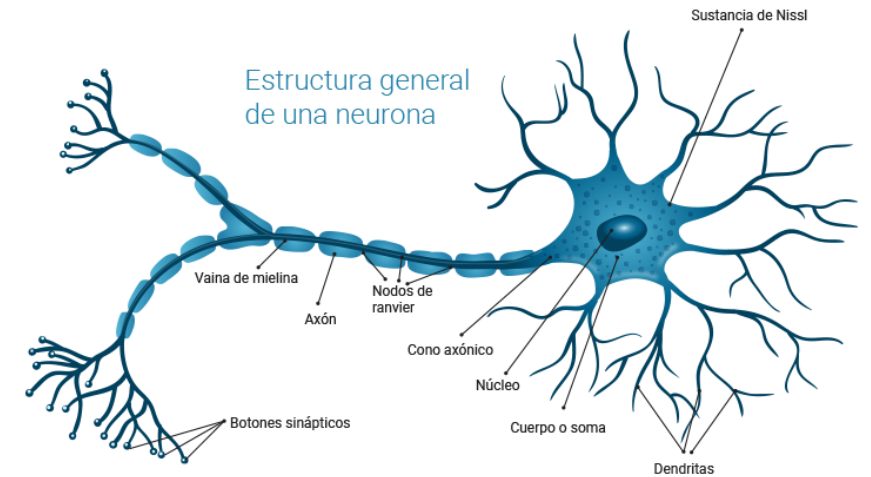
---

- Ventajas sobre otros métodos
  - Permite trabajar sobre un gran volumen de datos.
  - No hace supuestos a priori del comportamiento de las flotas.
  - Permite el desarrollo tecnológico más allá del estudio.



# Implementación de la IA

- Algoritmos que buscan imitar el proceso de aprendizaje humano.
- Al agrupar en redes cientos de estas neuronas es posible modelar el comportamiento de sistemas altamente no lineales, como lo es el estado de carga (SOC) en EV.






# Implementación de la IA: Teoría de los 3 tiempos

- Teoría de los tres tiempos
  - Estimación del SOC de forma instantánea.  
→ Corto plazo  
¿Cómo se comporta el bus eléctrico en este momento?
  - Estimación de la conducción para rutas.  
→ Mediano plazo  
¿Cómo se comportará un bus eléctrico en nuevas rutas?
  - Estimación de la degradación.  
→ Largo plazo  
¿Cómo se degrada el bus?





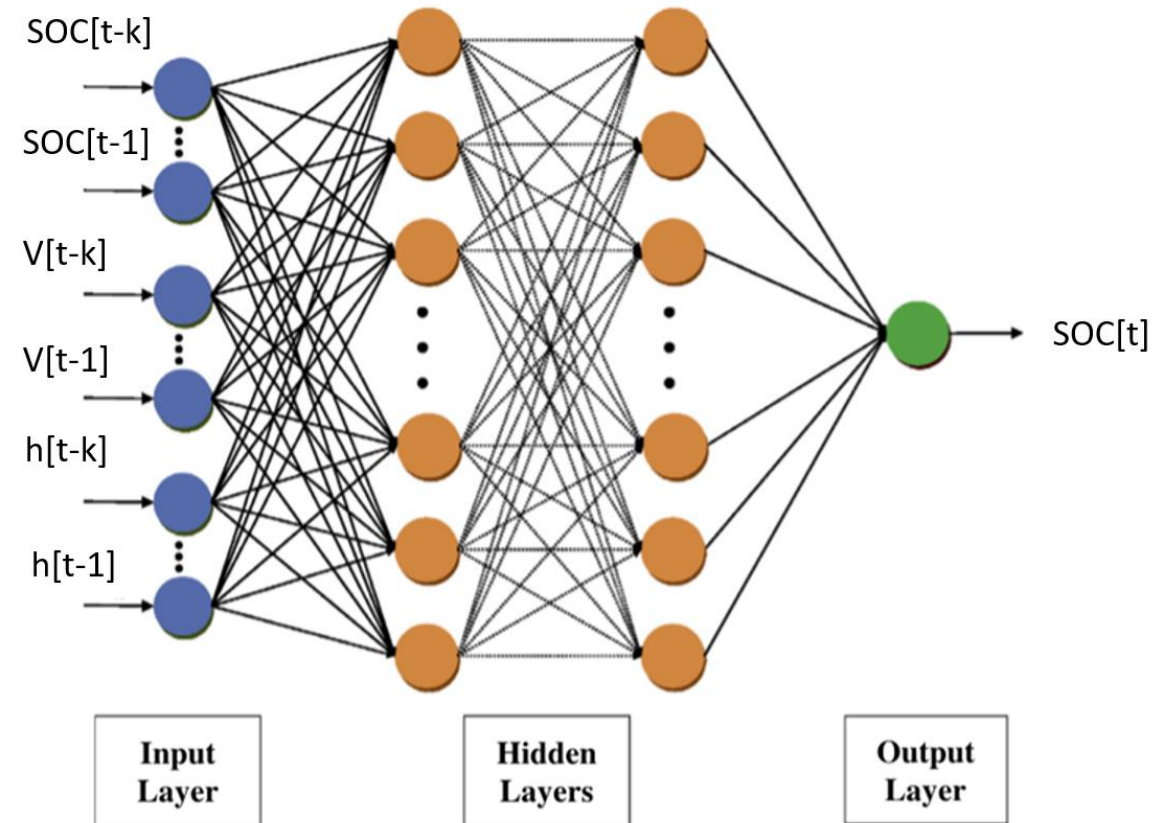
## Implementación de la IA: Teoría de los 3 tiempos

- Teoría de los tres tiempos
  - Estimación del SOC de forma instantánea.  
→ Corto plazo

## Fase de uso. Estimación del SOC.

---

- Se estima el SOC mediante
  - Series temporales pasadas del SOC
  - Series temporales de la velocidad
  - Series temporales de la altura



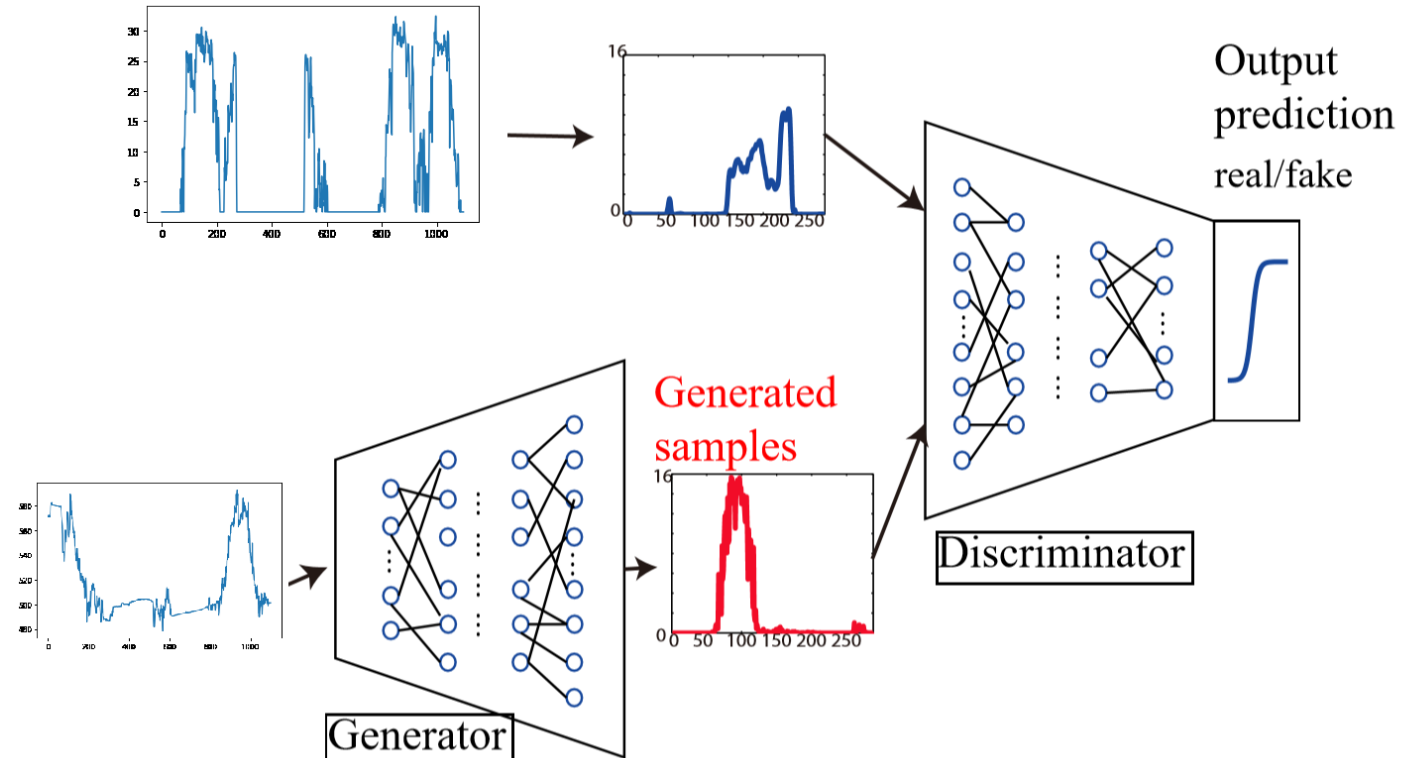



# Implementación de la IA: Teoría de los 3 tiempos

- Teoría de los tres tiempos
  - Estimación de la conducción para rutas.  
→ Mediano plazo

# Fase de uso. Estimación del SOC a mediano plazo.

- Redes generativas adversarias: GANS
  - Red generadora
    - Ruido aleatorio
    - Tipo de ruta
  - Red discriminadora





## Implementación de la IA: Teoría de los 3 tiempos

- Estimación de la degradación.  
→ Largo plazo

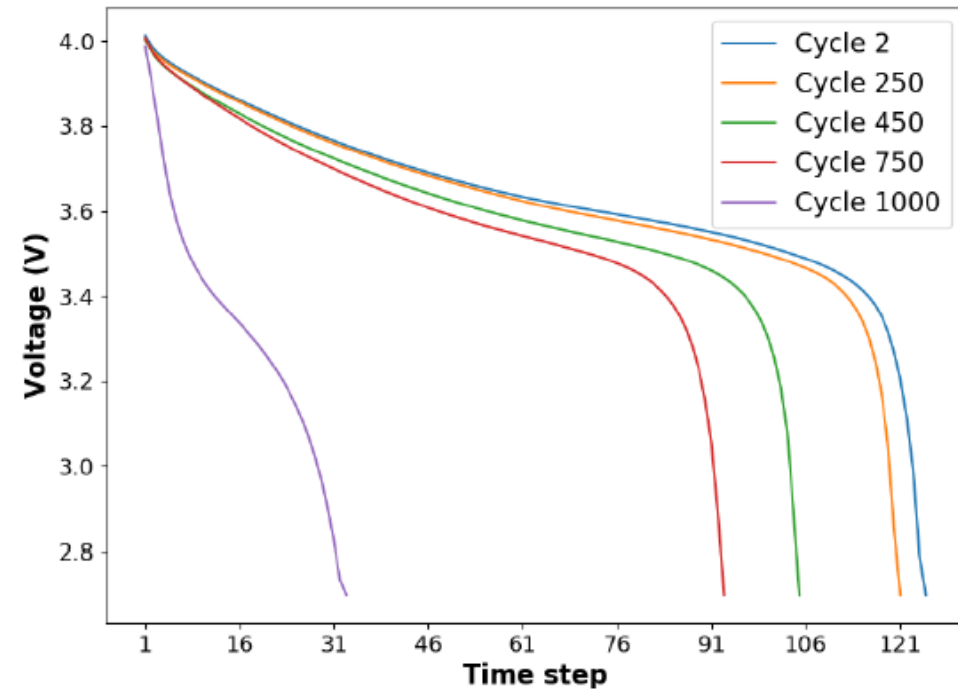
# Fase de uso. Estimación de la degradación. Largo plazo

- ¿Por qué tenemos que modelar la degradación?
  - EL SOC depende de la degradación a lo largo del tiempo

nature energy

Article | Published: 25 March 2019

## Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation



¿Cómo acoplamos estos desarrollos con el LCA?

# Algoritmos de inteligencia artificial

- Análisis ambiental de la matriz energética de Chile.

CAPACIDAD TOTAL SEN - MW

<b>RENOVABLE</b>	<b>11.676,7</b>
HIDRO EMBALSE	3.383,3
HIDRO PASADA	3.380,0
BIOMASA	446,0
EÓLICO	1.928,7
SOLAR	2.493,8
GEOTÉRMICA	44,9
<b>NO RENOVABLE</b>	<b>13.179,7</b>
GAS NATURAL	4.875,6
CARBÓN	5.546,5
DERIV. DEL PETRÓLEO	2.757,6
<b>TOTAL</b>	<b>24.856,4</b>





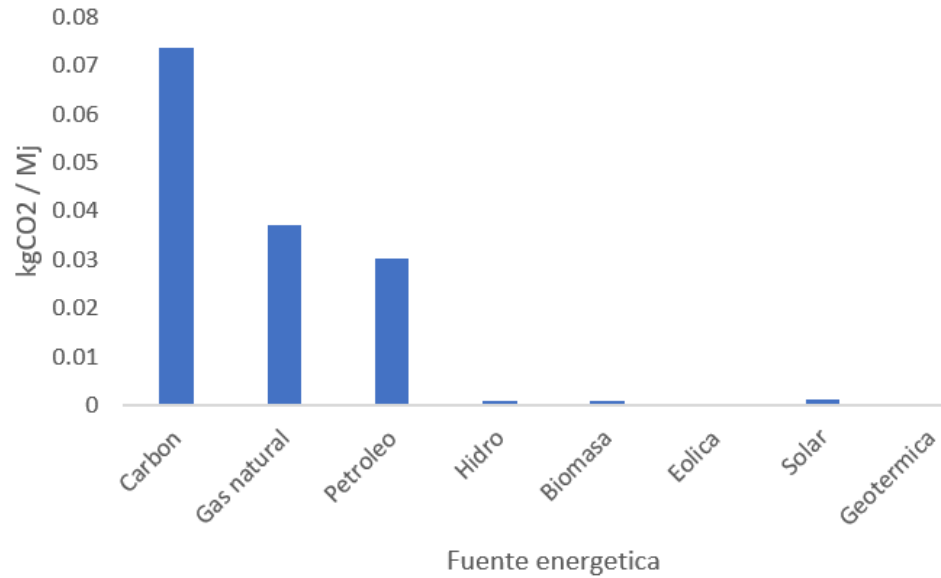
Recurso	Modulo-Ecoinvent e Idemant	Porcentaje	Sox Kg/Mj	Fosfato Kg/Mj	Cu Kg/Mj	Benzo Kg/Mj	Nox Kg/Mj	PM2.5 Kg/Mj	CO2 Kg/Mj
Carbon	Electricity, hard coal, at power plant	22.3	0.01566349	0.000289696	4.89929E-05	0.001504985	0.00023407	0.000511887	0.04462073
Gas natural	Electricity, natural gas, at power plant	19.6	0.01376098	1.71914E-05	0.000182558	0.000863254	0.00048421	0.000076257	0.02564753
Petroleo	Idematapp2020 Electricity oil	11.1	0.00648727	1.20857E-05	0.005154207	0.000197257	0.00476849	0.001038572	0.03665362
Hidro	Electricity, hydropower, at power plant	27.2	3.675E-05	8.28728E-07	1.69331E-06	0.000104784	5.2981E-06	3.10341E-05	0.00038311
Biomasa	Electricity, biowaste, at waste incineration plant	1.8	0.00320233	4.41449E-05	0.004229191	0.000108865	0.00071685	0.000503574	0.00549448
Eolica	Electricity, at wind power plant	7.8	0.00012978	6.604E-06	1.24003E-05	0.000713307	1.7499E-05	8.1604E-05	0.00053448
Solar	Electricity, production mix photovoltaic, at plant	10	0.0004721	3.86399E-05	3.8419E-05	0.000403668	9.8252E-05	0.000120491	0.00177584
Geotermica	None	0.2	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>		<b>100</b>	<b>0.00069146</b>	<b>1.54083E-05</b>	<b>1.77114E-06</b>	<b>1.49634E-07</b>	<b>0.00010061</b>	<b>6.88733E-06</b>	<b>0.14433375</b>

# Simulación de ciclo de fase de uso

Recurso	Modulo-Ecoinvent e Idemant	Porcentaje	Sox Kg/Mj	Fosfato Kg/Mj	Cu Kg/Mj	Benzo Kg/Mj	Nox Kg/Mj	PM2.5 Kg/Mj	CO2 Kg/Mj
Carbon	Electricity, hard coal, at power plant	22.3	0.01566349	0.000289696	4.89929E-05	0.001504985	0.00023407	0.000511887	0.04462073
Gas natural	Electricity, natural gas, at power plant	19.6	0.01376098	1.71914E-05	0.000182558	0.000863254	0.00048421	0.000076257	0.02564753
Petroleo	Idematapp2020 Electricity oil	11.1	0.00648727	1.20857E-05	0.005154207	0.000197257	0.00476849	0.001038572	0.03665362
Hidro	Electricity, hydropower, at power plant	27.2	3.675E-05	8.28728E-07	1.69331E-06	0.000104784	5.2981E-06	3.10341E-05	0.00038311
Biomasa	Electricity, biowaste, at waste incineration plant	1.8	0.00320233	4.41449E-05	0.004229191	0.000108865	0.00071685	0.000503574	0.00549448
Eolica	Electricity, at wind power plant	7.8	0.00012978	6.604E-06	1.24003E-05	0.000713307	1.7499E-05	8.1604E-05	0.00053448
Solar	Electricity, production mix photovoltaic, at plant	10	0.0004721	3.86399E-05	3.8419E-05	0.000403668	9.8252E-05	0.000120491	0.00177584
Geotermica	None	0.2	0	0	0	0	0	0	0
Total		100	0.00069146	1.54083E-05	1.77114E-06	1.49634E-07	0.00010061	6.88733E-05	0.14433375

Simulación de ciclo de fase de uso

Recurso	Modul Idema
Carbon	Electri power
Gas natural	Electri power
Petroleo	Idema oil
Hidro	Electri power
Biomasa	Electri waste
Eolica	Electri plant
Solar	Electri photo
Geotermica	None
Total	



x Kg/Mj	PM2.5 Kg/Mj	CO2 Kg/Mj
0023407	0.000511887	0.04462073
0048421	0.000076257	0.02564753
0476849	0.001038572	0.03665362
981E-06	3.10341E-05	0.00038311
0071685	0.000503574	0.00549448
499E-05	8.1604E-05	0.00053448
252E-05	0.000120491	0.00177584
	0	0
0010061	6.88733E-0	<b>0.14433375</b>

Simulación de ciclo de fase de uso

# ¿Cómo se acopla todo en el marco del análisis económico?

---

- Construir modelo de LCA a valores económicos → Costo ambiental

## category

eco-costs of acidification	8.75 €/kg SOx equivalent
eco-costs of eutrophication	4.17 €/kg phosphate equivalent
eco-costs of ecotoxicity	340.0 €/kg Cu equivalent
eco-costs of human toxicity	3754 €/kg Benzo(a)pyrene equivalent
eco-costs of summer smog (respiratory diseases)	6.0 €/kg NOx equivalent
eco-costs of fine dust	35.0 €/kg fine dust PM2.5 equivalent
eco-costs of global warming	0.116 €/kg CO2 equivalent

# ¿Cómo se acopla todo en el marco del análisis económico?

- Construir modelo de LCA a valores económicos → Costo ambiental

## category

eco-costs of acidification

eco-costs of eutrophication

eco-costs of ecotoxicity

eco-costs of human toxicity

eco-costs of summer smog (respiratory diseases)

eco-costs of fine dust

eco-costs of global warming

## multiplier (marginal prevention costs

8.75 €/kg SOx equivalent

4.17 €/kg phosphate equivalent

340.0 €/kg Cu equivalent

3754 €/kg Benzo(a)pyrene equivalent

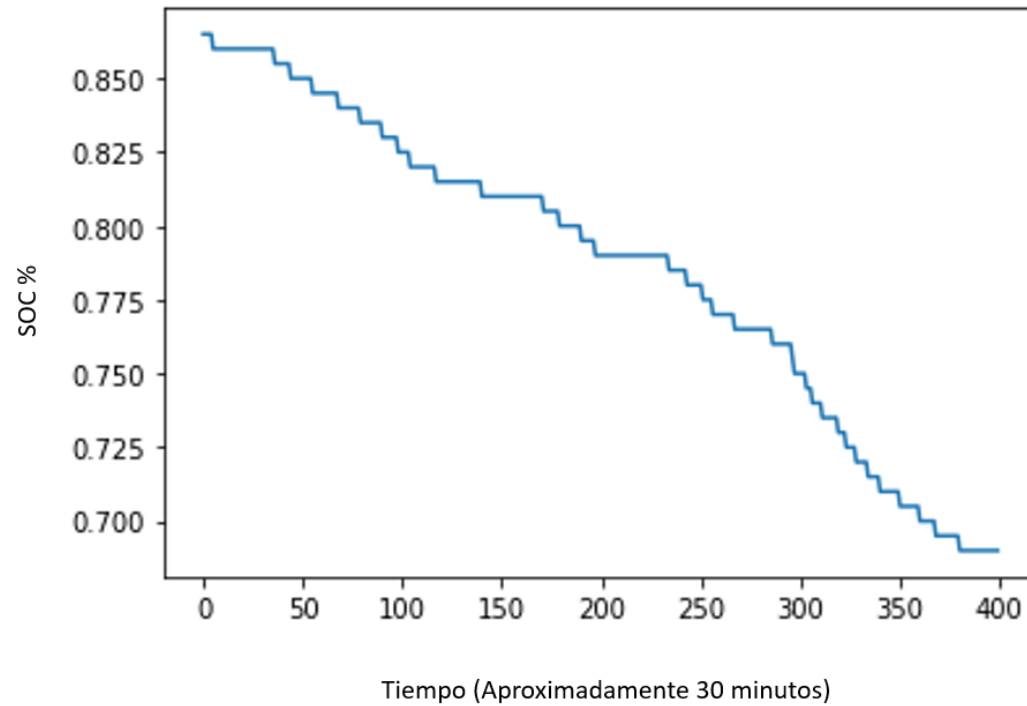
6.0 €/kg NOx equivalent

35.0 €/kg fine dust PM2.5 equivalent

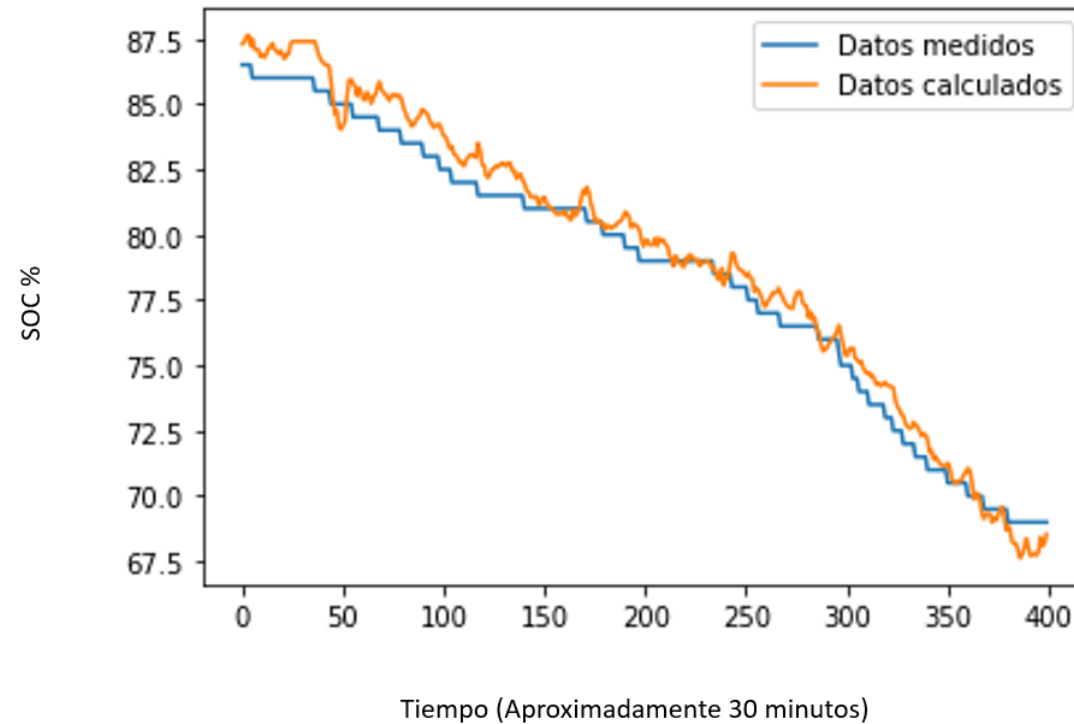
0.116 €/kg CO2 equivalent

$$TCO = C_{Pu} + C_{Int} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{Op}}{(1+r)^i} + \frac{C_M}{(1+r)^i} + \frac{C_{CO2}}{(1+r)^i} + \frac{C_H}{(1+r)^i} + C_{EoL}$$

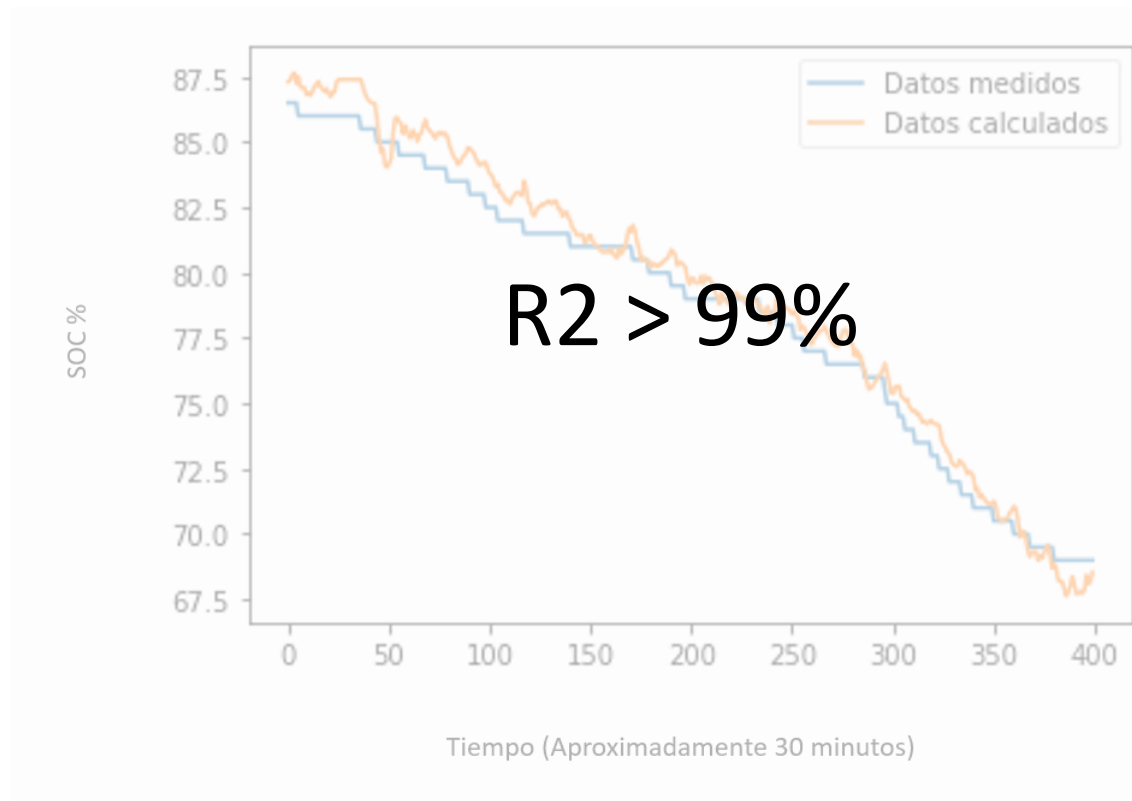
# Resultados parciales: IA



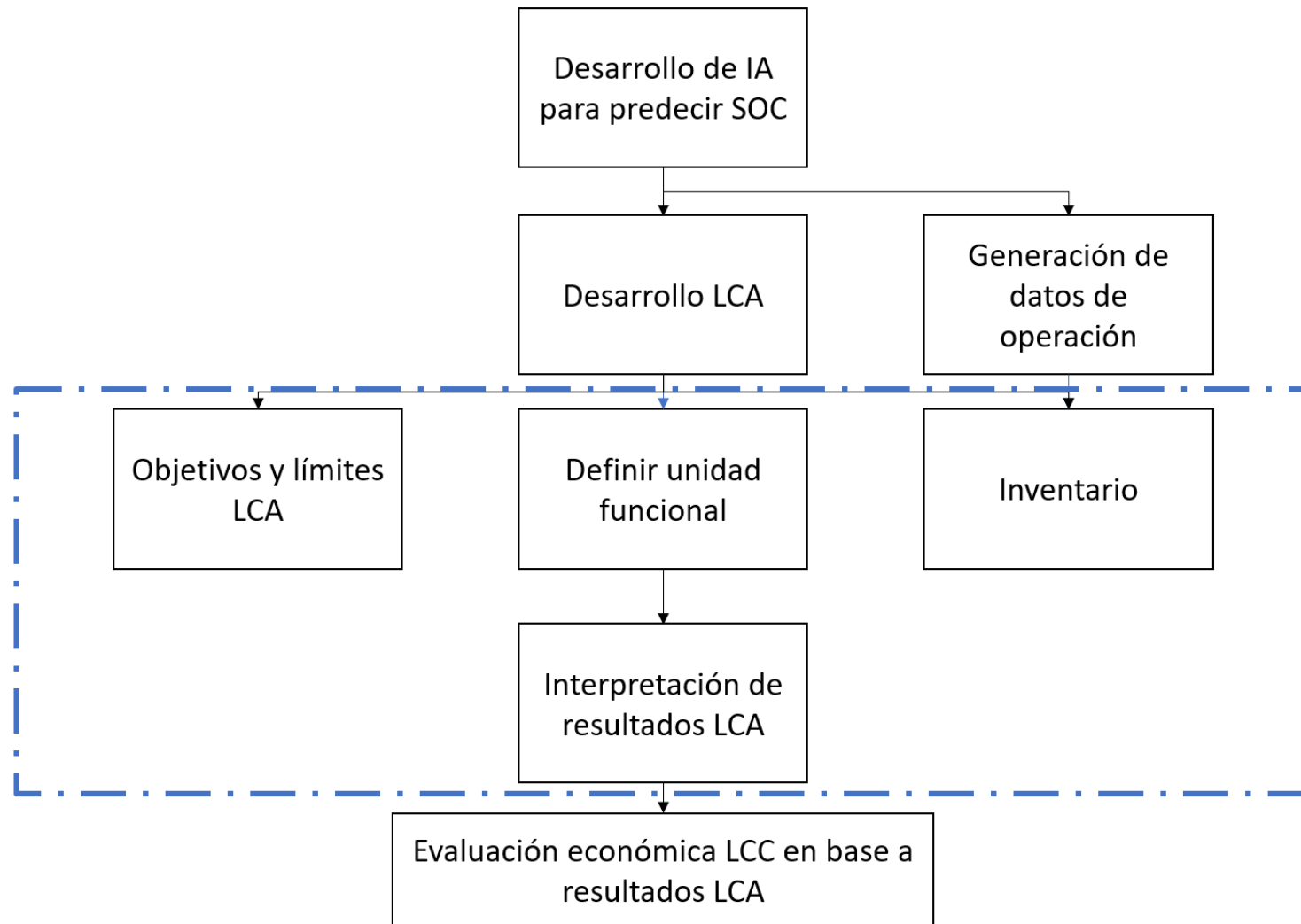
# Resultados parciales: IA



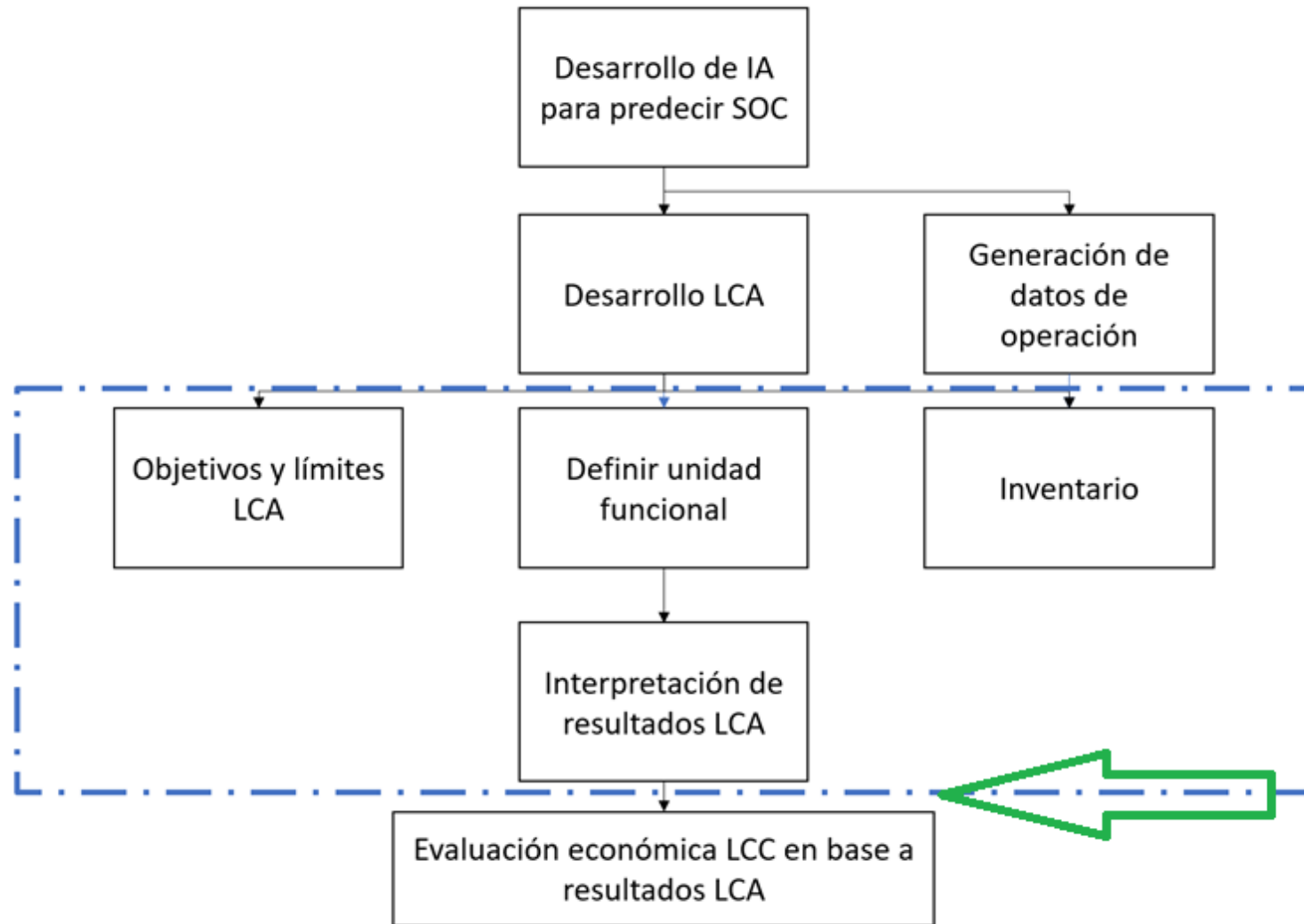
# Resultados parciales: IA







Esquema  
resumen de la  
metodología



Esquema  
resumen de la  
metodología

# Mejoras futuras y repercusiones

- Mejorar el modelo manufactura y reciclaje con datos de primera fuente.
- Usar más datos en la medida en que estén disponibles.
- Apoyo en la toma de decisiones en el ámbito político y empresarial.
- Análisis de flotas.

# Citas

- [1] Göhlich, D., Fay, T. A., Jefferies, D., Lauth, E., Kunitz, A., & Zhang, X. (2018). Design of urban electric bus systems. *Design Science*, 4.
- [2] Marques, P., Garcia, R., & Freire, F. (2013). Life cycle assessment of electric and conventional cars in Portugal. *Energy for Sustainability*.
- [3] Singh, M. K. (1980). *Environmental assessment of the US Department of Energy electric and hybrid vehicle program*. The Laboratory.
- [4] Helmers, E., Dietz, J., & Weiss, M. (2020). Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions. *Sustainability*, 12(3), 1241.
- [5] Skansi, S. (2018). *Introduction to Deep Learning: from logical calculus to artificial intelligence*. Springer.

# Citas

- [6] Chen, Y., Wang, Y., Kirschen, D., & Zhang, B. (2018). Model-free renewable scenario generation using generative adversarial networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(3), 3265-3275.
- [7] Severson, K. A., Attia, P. M., Jin, N., Perkins, N., Jiang, B., Yang, Z., ... & Bazant, M. Z. (2019). Data-driven prediction of battery cycle life before capacity degradation. *Nature Energy*, 4(5), 383-391.
- [8] Asociación de generadoras de Chile. Boletín del mercado eléctrico sector generación, May 2019. <http://generadoras.cl/media/page-files/817/Boletin>.
- [9] DELFT, T. (2017). The Model of the Eco-costs/Value Ratio.



Programa Clima y Aire limpio  
en Ciudades de América Latina



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Agencia Suiza para el Desarrollo  
y la Cooperación COSUDE