

## EVALUACIÓN DE LAS ECONOMÍAS DE ESCALA EN EL COSTO NIVELADO DE TRANSPORTE CARRETERO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO EN LATINOAMÉRICA

Ernesto Coutsiers<sup>1,2</sup>, Marcelo Gea<sup>3</sup>, Ramiro Rodríguez<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Calden Consultoría SRL

Av. Padre Mariani 478, Villa Allende (5105), Provincia de Córdoba

[www.caldenconsultoria.com](http://www.caldenconsultoria.com) +54 351 7000717, [ecoutsiers@caldenconsultoria.com](mailto:ecoutsiers@caldenconsultoria.com)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta

Av. Bolivia 5150, Salta (4408), Provincia de Salta

[www.exactas.unsa.edu.ar](http://www.exactas.unsa.edu.ar) +54 387 4255408, [ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar](mailto:ecoutsiers@exa.unsa.edu.ar)

<sup>3</sup> Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de Salta

Av. Bolivia 5150, Salta (4408), Provincia de Salta

[www.inenco.unsa.edu.ar](http://www.inenco.unsa.edu.ar) +54 387-4255424, [geam@unsa.edu.ar](mailto:geam@unsa.edu.ar)

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba,

Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba (5000), Provincia de Córdoba

[www.fcefyn.unc.edu.ar](http://www.fcefyn.unc.edu.ar) +54 351 5353800

[ramiro.rodriguez@unc.edu.ar](mailto:ramiro.rodriguez@unc.edu.ar)

**RESUMEN:** El presente trabajo analiza el costo nivelado de transporte de hidrógeno LCHT para Argentina, Brasil, Chile, Colombia, México y Perú, considerando diferentes capacidades y distancias de transporte. El objetivo es determinar y estimar la economía de escala para dos tecnologías de almacenamiento: recipientes de acero y de epoxi T300. Los resultados muestran que el LCHT varía significativamente con la distancia. Para 100 km, el costo oscila entre 0,68 y 3,44 USD/kg; para 300 km, entre 1,43 y 8 USD/kg; y para 1.000 km, entre 3,99 y 24,01 USD/kg. La principal componente del LCHT, representando aproximadamente la mitad del costo, es el recurso humano (salario de los conductores). Le siguen los costos de combustible y la inversión en el tráiler y los recipientes de presión. Se encontró una fuerte economía de escala con los recipientes de acero y una economía moderada a alta con los de epoxi. Sin embargo, estas economías se limitan al peso máximo permitido del conjunto camión-tráiler. Para distancias cortas (100 y 300 km), el LCHT parece viable. No obstante, para distancias de 1.000 km, el LCHT es alto, lo que sugiere la necesidad de explorar otros métodos de transporte más económicos como hidrógeno líquido, ductos o derivados.

**Palabras clave:** Hidrógeno, hidrógeno verde, transporte de hidrógeno, economía del hidrógeno, hidrógeno en Latinoamérica.

### INTRODUCCIÓN

La conveniencia de las metodologías de transporte para hidrógeno depende del caudal (tH<sub>2</sub>/día) y la distancia (km). Según fue analizado por (Yang y Ogden, 2007), el costo de entrega (USD/kg) puede variar ampliamente, desde aproximadamente 0,10 USD/kg hasta casi 4 USD/kg. La opción de menor costo se logra con un caudal muy alto y una distancia corta. Se distinguen tres modos de transporte: **G** (gas comprimido en camiones), **L** (líquido criogénico en camiones) y **P** (gas por ductos).

Para el modo **G** los costos son relativamente independientes del caudal. La distancia de transporte tiene un gran efecto, ya que afecta el número de camiones, la mano de obra, el combustible y los costos de operación y mantenimiento, que es el componente más significativo del costo total. Para el modo **L**, la



mayor parte del costo (80-95%) se debe a la licuefacción y en gran medida del flujo de hidrógeno debido a las economías de escala del equipo de licuefacción, pero son menos sensibles a la distancia de transporte que los de **G**. En el modo **P**, los costos dependen en gran medida del caudal y la distancia, siendo el costo de capital del ducto el principal factor.

En este trabajo se busca dar foco en el transporte carretero con camiones que poseen tráilers con recipientes de presión, este tipo de transporte suele llamarse “Transporte virtual de hidrógeno” (en analogía con el transporte virtual de gas natural, que es llamado así para diferenciarlo del transporte por ductos). Acorde a lo presentado anteriormente, esta metodología de transporte se utiliza en los casos donde las distancias a transportar son cortas y las cantidades son bajas. La elección de este tipo de transporte es basada en que, por las características de la demanda y geografía latinoamericana, puede ser el que primero requiere desarrollarse.

Se presenta entonces la metodología para el cálculo del costo nivelado considerando diferentes distancias y modelos de tráilers para los países referenciales ya mencionados. Se analizan luego la importancia de los componentes que forman parte de este costo nivelado. Sobre el final se analiza el comportamiento en escala, la existencia y cuantificación de economías de esta naturaleza.

## METODOLOGÍA

De manera general, el modelo de cálculo del costo nivelado tiene la lógica presentada en el flujograma de la Figura 1. Se relevan las variantes de tráilers, compuestos en conjunto con los recipientes, de acuerdo con (Reddi et al., 2018). Cada modelo implica un costo de inversión, opera a cierta presión y permite el transporte de una capacidad determinada. Al costo del tráiler se le adiciona el costo del tracto (el término “tracto” en Argentina es conocido como camión) y los costos de inversión (en su proporción de uso) de la compresión. La suma de estos costos de inversión conforma el costo de capital.

A partir de la presión y la capacidad de transporte de cada tráiler se estiman la energía requerida para la compresión y el costo de energía eléctrica.

El costo de combustible se calcula según la distancia, el precio del combustible y la eficiencia del tracto. Los costos de recursos humanos (RR. HH.) dependen de cada país. Los costos operativos incluyen ambos y otros costos fijos y variables: los fijos, no relacionados con la mano de obra, se modelan como 5 % del CAPEX anual, y los variables, excluido el combustible, como 1 % (Yang y Ogden, 2007). La suma de costos de capital y operativos da el costo total, que se descuenta según la tasa de costo de capital y la vida útil de la instalación para obtener el costo nivelado de almacenamiento de hidrógeno. En la Figura 1, las variables independientes del país se muestran en azul y las específicas de cada país, en naranja.

### Costo del recurso humano

Se calcula como el producto del tiempo de recorrido por costo unitario de RR. HH., según la Ec. 1:

$$C_{HR} = CU_{HR} t_r \quad (1)$$

donde:

$CU_{HR}$ : es el costo unitario horario del piloto

$t_r$ : es el tiempo del recorrido

Para el  $CU_{HR}$  se utiliza el valor de origen (Yang y Ogden, 2007), a partir de este valor se ajusta la moneda a dólares de diciembre de 2022 con el *Producer Price Index* de acuerdo con (Federal Reserve Bank of St. Louis, 2023), generando un valor base para EE. UU. Posteriormente, para cada país se ajusta de acuerdo con la paridad de poder de compra con el índice BigMac de la revista *The Economist* tal cual lo presenta (The Economist, 2024) cuyo valor a diciembre de 2002 se obtiene de (Stadista, 2024) para los seis países de análisis. Esto se presenta en la Ec. 2:

$$CU_{HR,c} = CU_{HR,0} \frac{PPI_{dic\ 2022}}{PPI_0} PPC_c \quad (2)$$

donde:

$CU_{HR,c}$ : Costo unitario de RR. HH. en el país  $c$

$CU_{HR,0}$ : Costo unitario de acuerdo con (Yang y Ogden, 2007)

$PPI_0$ : Producer Price Index serie WPSFD4131 a la fecha de acuerdo con (Yang y Ogden, 2007)

$PPI_{dic\ 2022}$ : Producer Price Index serie WPSFD4131 a diciembre de 2022

$PPC_c$ : Paridad de poder de compra del país  $c$  a diciembre 2022 tomado de (Stadista, 2024)

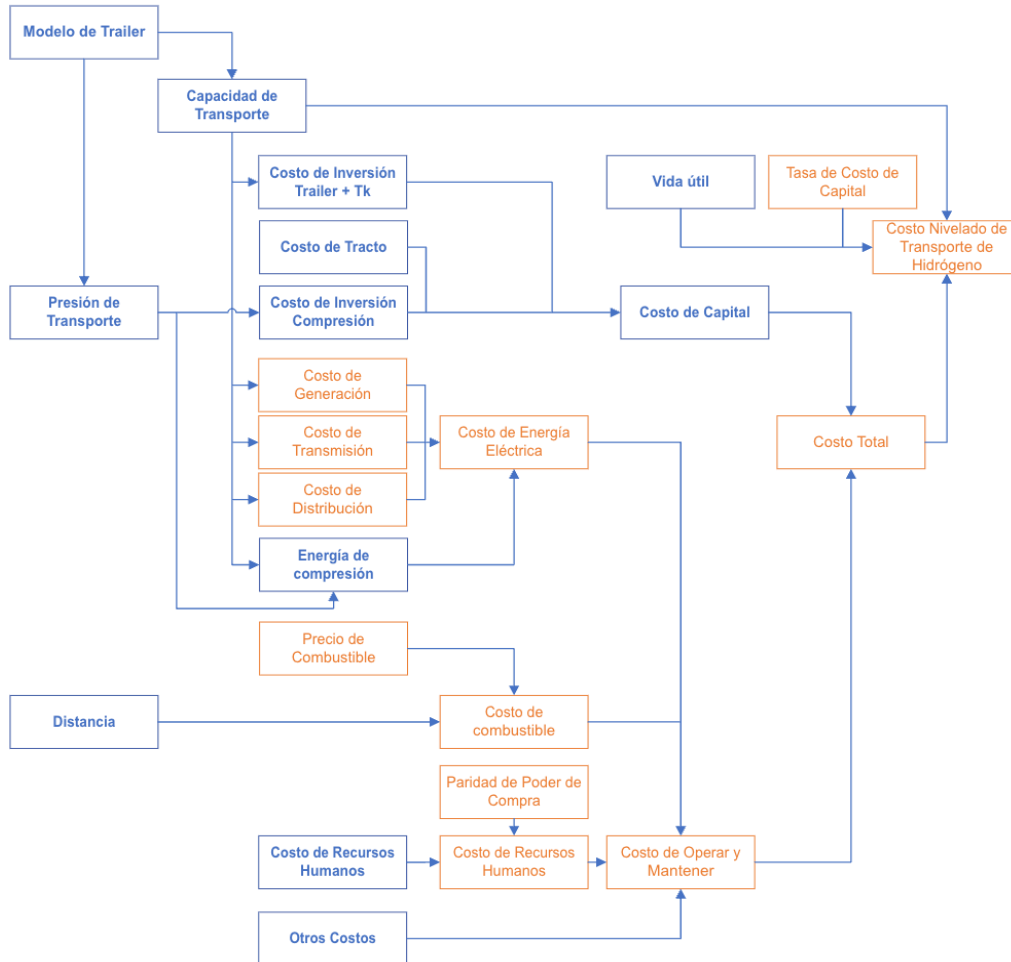


Figura 1: Flujograma de cálculo del costo nivelado de transporte virtual de hidrógeno comprimido.

Fuente: Elaboración propia.

Conocido el flujograma del cálculo, se profundiza en los siguientes apartados en los detalles metodológicos. Los resultados parciales y estimación del costo horario de RR. HH. Para los países de Latinoamérica analizados en este trabajo y Estados Unidos (EE. UU.) se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Estimación del costo horario de recurso humano.

	EE. UU.	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	México	Perú
Big Mac Index [USD diciembre 2022] PPC (Stadista, 2024)	5,15	4,57	4,25	3,66	3,48	3,43	3,57
Corrección PPC	1,000	0,887	0,825	0,711	0,676	0,666	0,693
Costo RH [USD mayo 2006/h] (Yang y Ogden, 2007)	28,75						
Costo RH [USD dic 2022/h]	43,93	38,98	36,25	31,22	29,68	29,26	30,45

### Costo nivelado de transporte

De acuerdo con (Yang y Ogden, 2007), el LCHT de H<sub>2</sub> se calcula como la suma de los costos anuales del equipamiento (CA equipamiento: capital anualizado del modo y sus unidades auxiliares) y los costos anuales de operación (CA operación), dividida por la cantidad de H<sub>2</sub> efectivamente entregado durante la vida útil (expresado en USD/kg). Esta formulación es análoga al enfoque de *levelized cost* usado en almacenamiento por (Abdin et al., 2022), pero aquí aplicada explícitamente al transporte/entrega. De este modo, el costo nivelado de transporte (LCHT) se define con la Ec. 3.

$$LCHT = \frac{C_{CapEx} + \sum_{i=1}^n \frac{C_{OpEx}}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{M_{H_2}}{(1+r)^i}} \quad (3)$$

donde:

- $C_{CapEx}$ : Costos de inversión (conocido como CapEx, del inglés *Capital Expenditures*)
- $C_{OpEx}$ : Costos de operar y mantener (conocido como OpEx, del inglés *Operational Expenditures*)
- $M_{H_2}$ : Masa de hidrógeno transportada
- $r$ : Tasa de costo de capital
- $i$ : Año del flujo
- $n$ : Horizonte del proyecto

### Tasa de costo de capital

La tasa de costo de capital  $r$  utilizada se desarrolla análogamente siguiendo a (Coutsiers et al., 2022) y se adopta la Tasa de Capital Medio Ponderado -WACC- por sus siglas en inglés (Weighted Average Cost of Capital) en términos reales y antes de impuestos para considerar el impuesto a la renta de manera implícito, que se muestran en la Tabla 2 para cada país analizado.

Tabla 2: Tasa de costo de capital utilizada en la estimación de LCHT. Fuente: Elaboración propia de acuerdo con la metodología de (Coutsiers et al., 2022).

País	WACC <sub>bt</sub>
Argentina	25,15%
Brasil	12,28%
Chile	8,25%
Colombia	10,33%
México	10,10%
Perú	9,59%

### Costos de Inversión

Este costo se desagrega en tres componentes, de acuerdo con lo presentado en la Ec. 4.

$$C_{CapEx} = C_{CapEx,Trailer} + C_{CapEx,Tracto} + C_{CapEx,Compresión} \quad (4)$$

donde:

- $C_{CapEx,Trailer}$ : Costos de inversión de la totalidad de conjunto de tráiler que se encuentra compuesto por el tráiler propiamente dicho y el arreglo de recipientes de presión
- $C_{CapEx,Tracto}$ : Costos de inversión del tracto (también denominado camión)
- $C_{CapEx,Compresión}$ : Costos de inversión de compresión, en su componente proporcional al uso

En esta línea, se analizan las variantes presentadas en acuerdo con Reddi et al. (2018), donde se realiza un análisis técnico-económico de configuraciones de tráilers de alta presión para el transporte y reabastecimiento de hidrógeno comprimido, comparando unidades convencionales de acero (Tipo I) con diseños avanzados de material compuesto (Tipo IV). El estudio identificó las alternativas que maximizan la carga útil y minimizan el costo por kg de H<sub>2</sub> entregado, considerando las restricciones de tamaño y peso del Departamento de Transporte de los EE. UU. (DOT, por sus siglas en inglés), así como diversas distancias de transporte y capacidades de las estaciones de servicio.

Los resultados indican que los tráilers Tipo IV transportan hasta 1.100 kg H<sub>2</sub> a 7.300 psi (500 bar), superando a los Tipo I, limitados a 270 kg por normativa. En los Tipo IV, la carga útil entregable y el costo de capital guardan una relación lineal, con un promedio de 1.100 USD/kg H<sub>2</sub>; la configuración más rentable usa recipientes de 30 pulgadas en matriz 3 × 3. Más recipientes de menor tamaño aumentan la carga útil y reducen el costo de entrega en trayectos largos y estaciones de gran capacidad, pese a mayores costos de fabricación. Así, elegir bien la configuración del tráiler y la carga útil puede reducir el costo de distribución de hidrógeno hasta 16 %. La Tabla 3 resume seis casos representativos de tráilers Tipo IV con su carga útil, costos de recipientes y remolque, y uso de peso y volumen.

Tabla 3: Valores aproximados a partir de las Figuras 5 y 6 de Reddi et al. (2018).

Presión de trabajo [PSI/bar]	Diámetro del recipiente [pulgadas]	Número de recipientes	Carga útil de hidrógeno [kg]	Costo del remolque y los recipientes [10 <sup>3</sup> USD]	Utilización de peso [%]	Utilización de volumen [%]
7.300 (500)	24	16	1146	1.100	97	59
7.300 (500)	30	9	1080	900	85	55
6.600 (450)	24	15	1078	1.100	90	50
6.600 (450)	30	9	969	800	79	45
5.100 (350)	30	9	848	700	69	41
3.700 (250)	30	9	694	600	58	38
2.900 (200)	30	9	584	500	48	35

El costo de inversión de tracto es adoptado de acuerdo con (Yang y Ogden, 2007) y llevado a la moneda de cálculo del modelo. Para los costos de compresión se utiliza lo presentado por (Coutsiers et al., 2023a, 2023b) considerando un proporcional de acuerdo con el uso anual de compresión de cada tráiler.

### Costos Operativos

Los costos de operar y mantener se desagregan de acuerdo con la Ec. 5:

$$C_{OpEx} = C_{Comb} + C_{El} + C_{HR} + C_o \quad (5)$$

donde:

$C_{Comb}$ : Costo de combustible

$C_{El}$ : Costo de energía eléctrica, que incluye la generación, la transmisión y distribución en los casos que aplique

$C_{HR}$ : Costo de los recursos humanos

$C_o$ : Otros costos

El costo de combustible responde a la Ec. 6.

$$C_{Comb} = \eta P_{Diesel} d \quad (6)$$

donde:

$\eta$ : Rendimiento en volumen del combustible por unidad de distancia para un tracto promedio del mercado con carga completa de acuerdo con (NovaTrans, 2025)

$P_{Diesel}$ : Precio de diésel relevado de acuerdo con (CEPALSTAT, 2023)

$d$ : Distancia km.

El producto de estas dos variables con la distancia  $d$  analizada resulta en el costo del combustible. La estimación del precio de la energía eléctrica se encuentra detallada en los trabajos (Coutsiers et al., 2023a, 2023b) desagregando las componentes de generación, transporte y distribución. En este trabajo se adoptan los componentes del precio eléctrico correspondientes a 2022 reportados por las referencias citadas; no se realiza una actualización regional/temporal adicional, por lo que los resultados deben interpretarse como orden de magnitud y podrán actualizarse en trabajos posteriores. De esta manera, el costo de energía eléctrica  $C_{El}$  se presenta en la Ec. 7.

$$C_{El} = E(P_G + M_T + M_D) \quad (7)$$

donde:

- $E$ : Energía consumida
- $P_G$ : Precio de la generación renovable
- $M_T$ : Margen de transmisión
- $M_D$ : Margen de distribución

El nivel de conexión del sistema considerado para estas estimaciones es de distribución en alta tensión y el precio de energía renovable corresponde con la generación Eólica Onshore de cada país, salvo el caso de Colombia donde se utilizaron los resultados de la Ronda 2019 Complementaria.

Los costos de recursos humanos fueron estimados de acuerdo con (Yang y Ogden, 2007) y corregidos con la  $PPC_c$  análogamente a lo presentado en los trabajos (Coutsiers et al., 2023a, 2023b).

Otros costos de menor impacto fijos y variables son adoptados en acuerdo con (Yang y Ogden, 2007).

### ***Economía de escala***

Para capturar la economía de escala se propuso ajustar el LCHT con la forma funcional de acuerdo con (Berthouex, 1972) y se ajustaron los parámetros  $a$  y  $b$  de la Ec. 8, presentada a continuación.

$$\text{Log}(LCHT) = a - b \text{Log}(M_{H_2}); \text{ con } b = M - 1 \quad (8)$$

donde:

$a$ : Es el parámetro de escala de costos. Representa el costo de una planta de referencia con una capacidad de 1 unidad. Este valor encapsula todos los costos fijos, como materiales, mano de obra, equipos, etc., que son independientes de la capacidad.

$b$ : Es el factor de economía de escala. Cuando  $b < 1$  indica que existe una economía de escala. Esto significa que a medida que la capacidad de la planta aumenta, el costo por unidad de capacidad disminuye. Si  $b = 1$ , no existiría economía de escala (el costo aumentaría linealmente con la capacidad), y si  $b > 1$ , habría una deseconomía de escala.

$M$ : Es el factor de economía de escala, es decir, el mismo parámetro que  $b$ . El trabajo de Berthouex usa la notación  $M$  (del inglés Multiplicative factor) o  $b$  de manera intercambiable para referirse al exponente en la relación de costos. Los parámetros  $a, b$  se obtienen mediante regresión lineal de las variables analizadas en la Ec. 8.

### ***Otros aspectos del modelado***

Deben desatacarse también otros aspectos del modelado adoptados de acuerdo con (Yang & Ogden, 2007), como lo son:

- i. Tiempos de carga y descarga: se considera 1 hora de tiempo tanto para la carga como la descarga
- ii. Disponibilidad de tracto: se considera en 80% del tiempo
- iii. Disponibilidad del sistema de carga y descarga: se considera 90% del tiempo

Estas consideraciones impactan directamente en el cálculo del LCHT de hidrógeno.

Si bien el modelo se ha programado para cualquier distancia, el análisis de este trabajo se basa en tres distancias típicas, 100, 300 y 1.000 km, que corresponden a rangos de alta competitividad, cuasi indiferencia y baja competitividad para esta tecnología de acuerdo con (Yang y Ogden, 2007).

## **RESULTADOS**

En este apartado se presentan los resultados de LCHT, sus desagregaciones, la evaluación de existencia de economía de escala y la cuantificación en el caso que aplique.

### Costo nivelado de transporte

En esta primera serie de resultados se presentan los costos nivelados de transporte de hidrógeno en promedios para diferentes rangos de capacidades, desagregados y los rangos de resultados de la muestra. Esto se realiza para cada uno de los países de la muestra y para 100, 300 y 1.000 km de distancia, tal cual se menciona anteriormente y se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Costo nivelado promedio de transporte de hidrógeno comparado por país, por distancia y por rango de capacidad. Fuente: Elaboración propia.

LCHT [USD/kg]		Rango de Capacidad [kg]									
Distancia	País	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1.000	> 1.000
100 km	Argentina	3,44	2,40	1,69	1,49	1,31	1,24	1,15	1,14	1,05	1,00
	Brasil	3,12	2,15	1,45	1,26	1,08	0,99	0,90	0,87	0,79	0,74
	Chile	2,75	1,89	1,28	1,11	0,96	0,89	0,81	0,78	0,72	0,68
	Colombia	2,48	1,73	1,20	1,05	0,93	0,87	0,80	0,79	0,73	0,70
	México	2,73	1,89	1,30	1,13	0,99	0,92	0,84	0,83	0,76	0,73
	Perú	2,77	1,91	1,30	1,13	0,98	0,90	0,82	0,80	0,73	0,69
300 km	Argentina	8,00	5,54	3,85	3,36	2,92	2,73	2,51	2,45	2,23	2,11
	Brasil	7,53	5,16	3,46	2,97	2,53	2,30	2,08	1,99	1,79	1,68
	Chile	6,59	4,52	3,03	2,60	2,22	2,02	1,83	1,75	1,58	1,48
	Colombia	5,71	3,94	2,70	2,34	2,02	1,87	1,71	1,66	1,51	1,43
	México	6,49	4,46	3,02	2,61	2,24	2,05	1,87	1,80	1,63	1,53
	Perú	6,67	4,58	3,08	2,65	2,26	2,06	1,87	1,79	1,62	1,52
1.000 km	Argentina	24,01	16,55	11,44	9,92	8,56	7,96	7,30	7,07	6,38	5,99
	Brasil	23,02	15,74	10,52	8,98	7,61	6,92	6,24	5,93	5,31	4,95
	Chile	20,07	13,72	9,15	7,81	6,62	6,01	5,41	5,15	4,61	4,30
	Colombia	17,06	11,72	7,96	6,86	5,87	5,40	4,92	4,73	4,26	3,99
	México	19,71	13,50	9,07	7,77	6,61	6,03	5,46	5,22	4,68	4,37
	Perú	20,35	13,92	9,31	7,96	6,75	6,14	5,54	5,28	4,73	4,41

A modo de ejemplo, para el caso particular de Brasil si se grafican las componentes del LCHT para recorrido de 300 km a diferentes capacidades, se obtiene lo presentado en la Figura 2.

### Componentes del costo nivelado de transporte

En este apartado se presentan para cada país la importancia de los componentes del costo nivelado de transporte en promedio para la totalidad de las variantes de tráilers analizadas. Además, se exhibe el rango de participación de estos componentes. En todos los casos se analizan 100, 300 y 1.000 km de distancia de transporte. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 5.

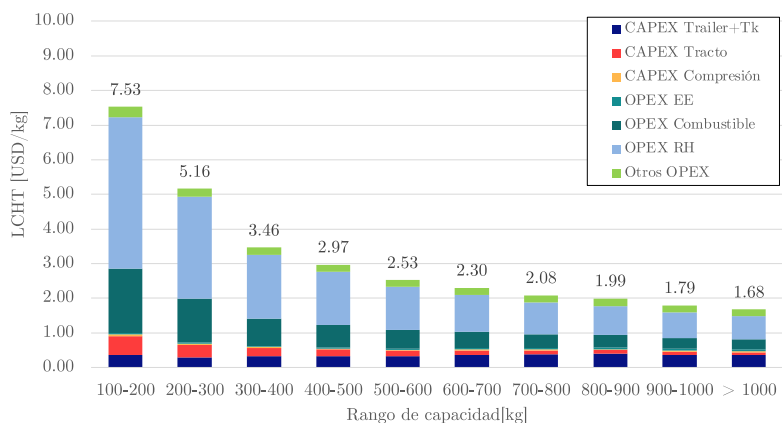


Figura 2: Costo nivelado promedio de transporte de hidrógeno para diferentes rangos de capacidad desagregado por componente. Caso Brasil con una distancia de transporte de 300 km. Fuente: Elaboración propia.

Los rangos de *LCHT* para diferentes rangos de capacidad para el caso particular de Brasil, se presentan en la Figura 3.

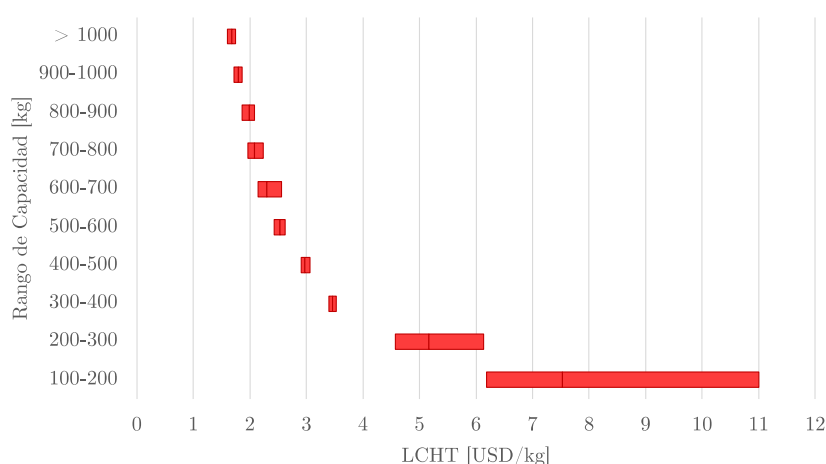


Figura 3: Rangos de costos nivelados de transporte resultantes para diferentes rangos de capacidad transportada. Caso de Brasil con una distancia de transporte de 300 km. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Comparado de los porcentuales promedios de importancia de los diversos componentes del costo nivelado de transporte. Estudio para 100, 300 y 1.000 km de distancia de transporte. Fuente: Elaboración propia.

Distancia	País	CAPEX Trailer+Tk	CAPEX Tracto	CAPEX Compresión	OPEX EE	OPEX Combustible	OPEX RH	Otros OPEX
100 km	Argentina	17,50%	7,16%	3,97%	7,21%	10,80%	47,14%	6,22%
	Brasil	11,65%	6,31%	2,60%	3,08%	17,14%	51,59%	7,63%
	Chile	9,90%	6,41%	2,21%	5,95%	17,02%	49,98%	8,53%
	Colombia	11,75%	7,18%	2,65%	10,03%	9,14%	50,45%	8,81%
	México	10,89%	6,61%	2,45%	8,61%	17,11%	46,08%	8,26%
	Perú	10,70%	6,54%	2,40%	5,86%	18,06%	48,06%	8,38%
300 km	Argentina	18,53%	7,39%	1,79%	3,28%	14,34%	48,69%	5,98%
	Brasil	11,69%	6,23%	1,11%	1,33%	21,75%	50,91%	6,98%
	Chile	10,14%	6,41%	0,97%	2,62%	21,91%	50,02%	7,95%
	Colombia	12,69%	7,53%	1,22%	4,65%	12,33%	52,93%	8,65%
	México	11,38%	6,71%	1,09%	3,86%	22,33%	46,78%	7,85%
	Perú	10,93%	6,53%	1,04%	2,57%	23,18%	47,96%	7,79%
1.000 km	Argentina	19,11%	7,53%	0,61%	1,12%	16,19%	49,57%	5,86%
	Brasil	11,73%	6,19%	0,37%	0,44%	23,98%	50,63%	6,66%
	Chile	10,28%	6,42%	0,33%	0,88%	24,33%	50,11%	7,66%
	Colombia	13,25%	7,73%	0,42%	1,62%	14,04%	54,37%	8,57%
	México	11,67%	6,78%	0,37%	1,32%	25,00%	47,23%	7,64%
	Perú	11,07%	6,53%	0,35%	0,86%	25,71%	47,98%	7,50%

### Economía de escala

Los resultados de la economía de escala se presentan para recipientes de acero y de Epoxi T300 en las Tabla 6 y

Tabla 7, respectivamente.

Tabla 6: Resultados del ajuste de las funciones de costo y del indicador de economía de escala para los tráilers con recipientes de presión de acero. Fuente: Elaboración propia.

Distancia	País	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>M</i>	<i>r</i> <sup>2</sup>
100 km	Argentina	2,53 ± 0,02	0,905 ± 0,009	0,095 ± 0,009	0,995
	Brasil	2,57 ± 0,01	0,941 ± 0,006	0,059 ± 0,006	0,998
	Chile	2,50 ± 0,01	0,936 ± 0,006	0,064 ± 0,006	0,998
	Colombia	2,41 ± 0,02	0,913 ± 0,008	0,087 ± 0,008	0,996

Distancia	País	$a$	$b$	$M$	$r^2$
	México	$2,47 \pm 0,02$	$0,923 \pm 0,007$	$0,077 \pm 0,007$	0,997
	Perú	$2,50 \pm 0,02$	$0,933 \pm 0,007$	$0,067 \pm 0,007$	0,998
300 km	Argentina	$2,94 \pm 0,02$	$0,924 \pm 0,008$	$0,076 \pm 0,008$	0,997
	Brasil	$2,98 \pm 0,01$	$0,952 \pm 0,005$	$0,048 \pm 0,005$	0,999
	Chile	$2,92 \pm 0,01$	$0,951 \pm 0,005$	$0,049 \pm 0,005$	0,999
	Colombia	$2,82 \pm 0,02$	$0,934 \pm 0,007$	$0,066 \pm 0,007$	0,998
	México	$2,89 \pm 0,01$	$0,943 \pm 0,006$	$0,057 \pm 0,006$	0,998
	Perú	$2,92 \pm 0,01$	$0,949 \pm 0,005$	$0,051 \pm 0,005$	0,999
1.000 km	Argentina	$3,44 \pm 0,02$	$0,933 \pm 0,007$	$0,067 \pm 0,007$	0,998
	Brasil	$3,47 \pm 0,01$	$0,957 \pm 0,005$	$0,043 \pm 0,005$	0,999
	Chile	$3,42 \pm 0,01$	$0,958 \pm 0,004$	$0,042 \pm 0,004$	0,999
	Colombia	$3,32 \pm 0,01$	$0,944 \pm 0,006$	$0,056 \pm 0,006$	0,998
	México	$3,40 \pm 0,01$	$0,952 \pm 0,005$	$0,048 \pm 0,005$	0,999
	Perú	$3,42 \pm 0,01$	$0,956 \pm 0,005$	$0,044 \pm 0,005$	0,999

Tabla 7: Resultados del ajuste de las funciones de costo y del indicador de economía de escala para los trailers con recipientes de presión de Epoxi T300. Fuente: Elaboración propia.

Distancia	País	$a$	$b$	$M$	$r^2$
100 km	Argentina	$1,45 \pm 0,06$	$0,480 \pm 0,020$	$0,520 \pm 0,020$	0,924
	Brasil	$1,79 \pm 0,04$	$0,635 \pm 0,015$	$0,365 \pm 0,015$	0,972
	Chile	$1,65 \pm 0,04$	$0,604 \pm 0,015$	$0,396 \pm 0,015$	0,97
	Colombia	$1,35 \pm 0,05$	$0,498 \pm 0,018$	$0,502 \pm 0,018$	0,94
	México	$1,50 \pm 0,05$	$0,543 \pm 0,017$	$0,457 \pm 0,017$	0,956
	Perú	$1,63 \pm 0,05$	$0,593 \pm 0,016$	$0,407 \pm 0,016$	0,967
300 km	Argentina	$2,02 \pm 0,06$	$0,562 \pm 0,020$	$0,438 \pm 0,020$	0,943
	Brasil	$2,32 \pm 0,04$	$0,693 \pm 0,015$	$0,307 \pm 0,015$	0,978
	Chile	$2,23 \pm 0,04$	$0,683 \pm 0,015$	$0,317 \pm 0,015$	0,979
	Colombia	$1,96 \pm 0,05$	$0,598 \pm 0,017$	$0,402 \pm 0,017$	0,962
	México	$2,12 \pm 0,04$	$0,642 \pm 0,016$	$0,358 \pm 0,016$	0,972
	Perú	$2,21 \pm 0,04$	$0,673 \pm 0,015$	$0,327 \pm 0,015$	0,977
1.000 km	Argentina	$2,61 \pm 0,06$	$0,607 \pm 0,020$	$0,393 \pm 0,020$	0,949
	Brasil	$2,88 \pm 0,04$	$0,723 \pm 0,015$	$0,277 \pm 0,015$	0,98
	Chile	$2,82 \pm 0,04$	$0,725 \pm 0,015$	$0,275 \pm 0,015$	0,981
	Colombia	$2,58 \pm 0,05$	$0,655 \pm 0,017$	$0,345 \pm 0,017$	0,967
	México	$2,74 \pm 0,04$	$0,696 \pm 0,016$	$0,304 \pm 0,016$	0,976
	Perú	$2,80 \pm 0,04$	$0,715 \pm 0,015$	$0,285 \pm 0,015$	0,979

A modo de ejemplo, en la Figura 4 se presentan los ajustes de la ecuación de economía de escala para acero y Epoxi T300 en el caso de México con 300 km de distancia transportada.

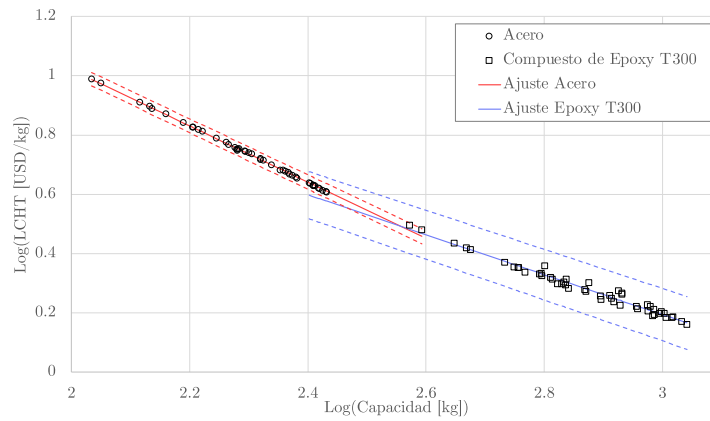


Figura 4: Resultados del LCHT y funciones de costo para el caso de Perú con una distancia de 300 km. Fuente: Elaboración propia.

## DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el LCHT varía según la capacidad: 3,44–0,68 USD/kg para 100 km, 8–1,43 para 300 km y 24,01–3,99 para 1.000 km, en concordancia con las configuraciones de (Reddi et al., 2018). A 1.000 km, los niveles de LCHT son elevados, coincidiendo con lo reportado por (Yang & Ogden, 2007).

Un contraste de los resultados de este trabajo con (Yang y Ogden, 2007) puede observarse en la Tabla 8, donde pueden compararse el valor resultante para EE. UU. de la referencia para 300 kg y 300 km con los resultados de este trabajo para los rangos de 200-300 kg y 300-400 kg y la misma distancia.

Tabla 8: Contraste entre el LCHT obtenido de acuerdo con (Yang y Ogden, 2007) y este trabajo para un transporte de 300 kg. Fuente: Elaboración propia.

LCHT [USD/kg]			
300 kg / 300 km (Yang y Ogden, 2007)	País	200-300 kg / 300 km	300-400 kg / 300 km
4,7	Argentina	5,54	3,85
	Brasil	5,16	3,46
	Chile	4,52	3,03
	Colombia	3,94	2,70
	México	4,46	3,02
	Perú	4,58	3,08

En todos los países, el LCHT muestra alta intensidad de costos operativos, superando ampliamente al costo de capital. El RR. HH. representa cerca de la mitad del LCHT, luego el OPEX de combustible ( $\approx 20\%$ ) y el CAPEX del tráiler, incluidos los recipientes de presión ( $\approx 10\%$ ). Estos valores coinciden con lo reportado por (Yang y Ogden, 2007), que destacan el peso del costo laboral en EE. UU.

En Argentina, la alta tasa de costo de capital eleva el CAPEX al 25–30 % del LCHT. En Colombia, el bajo precio del combustible reduce su impacto y otorga gran competitividad al LCHT.

Las curvas de costo se dividen en dos grupos: recipientes de acero con capacidades  $< 300$  kg H<sub>2</sub> y de epoxi T300 con 360–1.100 kg H<sub>2</sub>. Ambos ajustes presentan alta correlación, con  $r > 0,995$  para acero y  $> 0,92$  para epoxi T300.

Los ajustes muestran fuertes economías de escala en acero ( $M < 0,1$ ) y moderadas-altas en epoxi T300 ( $0,3 < M < 0,5$ ). Estas solo aplican dentro del rango de transporte permitido con (Reddi et al., 2018; U.S. DOT, 1994); superar ese límite exige otro conjunto tracto-tráiler y elimina la economía de escala. Brasil y Chile presentan los mejores valores y Argentina y Colombia, los peores.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con la capacidad, el LCHT se encuentra entre 3,44 y 0,68 USD/kg para el caso de 100 km de transporte, entre 8 y 1,43 para 300 km y entre 24,01 y 3,99 para los 1.000 km.

Los niveles de LCHT resultantes en este trabajo se encuentran en línea con los valores presentados por (Yang y Ogden, 2007) para el caso de EE. UU.

La componente más importante, que explica la mitad del LCHT, en todos los casos es el recurso humano que no es más que el costo empresa de los pilotos. En segundo plano siguen el combustible y la inversión en el tráiler y los recipientes de presión. Los otros componentes tienen menor relevancia. Esta composición es también consistente con lo que se presenta por (Yang y Ogden, 2007).

Se verifican economías de escala en tráileres con recipientes de acero (muy fuertes) y epoxi T300 (moderadas-altas), válidas solo hasta el límite de peso del conjunto tracto-tráiler; superar ese límite exige más conjuntos y elimina la economía de escala.

Para distancias cercanas a 1.000 km, el LCHT es alto frente al LCOH, lo que sugiere métodos de transporte más económicos, como hidrógeno líquido, ductos o derivados, en línea con (Reddi et al., 2018; Yang y Ogden, 2007). En cambio, los niveles de LCHT resultan adecuados para distancias de 100 y 300 km.

Por último, vale mencionar que las cifras económicas están valoradas en USD a diciembre 2022. En caso de requerirse otra referencia deberán revisarse las fuentes y la moneda utilizada.

## REFERENCIAS

- Abdin, Z., Khalilpour, K., & Catchpole, K. (2022). Projecting the levelized cost of large scale hydrogen storage for stationary applications. *Energy Conversion and Management*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116241>
- Berthouex, P. M. (1972). Evaluating Economy of Scale. In *Journal (Water Pollution Control Federation)* (Vol. 44, Issue 11). <http://www.jstor.org>URL:<http://www.jstor.org/stable/25037656>
- CEPALSTAT. (2023). Estadísticas e indicadores - CEPALSTAT Bases de Datos y Publicaciones Estadísticas. [https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?indicator\\_id=1352&area\\_id=429&lang=es](https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?indicator_id=1352&area_id=429&lang=es)
- Coutsiers, E., Gea, M., & Rodríguez, R. (2022). ESTIMACIÓN DE LA TASA DE COSTO DE CAPITAL PARA PROYECTOS DE ENERGÍA RENOVABLE EN LATINOAMÉRICA. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 26, 369–379. [www.caldenconsultoria.com](http://www.caldenconsultoria.com)
- Coutsiers, E., Gea, M., & Rodríguez, R. (2023a). COMPORTAMIENTO EN ESCALA DEL COSTO NIVELADO DEL ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO COMPRIMIDO EN LATINOAMÉRICA. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*. [www.caldenconsultoria.com](http://www.caldenconsultoria.com)
- Coutsiers, E., Gea, M., & Rodríguez, R. (2023b). COSTO NIVELADO DE ALMACENAMIENTO GEOLÓGICO SUBTERRÁNEO DE HIDRÓGENO EN LATINOAMÉRICA. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*. [www.caldenconsultoria.com](http://www.caldenconsultoria.com)
- NovaTrans. (2025). Cuánto Consume un Tráiler Cargado. <https://www.novatrans.es/blog/cuanto-consume-un-trailer-cargado/>
- Reddi, K., Elgowainy, A., Rustagi, N., & Gupta, E. (2018). Techno-economic analysis of conventional and advanced high-pressure tube trailer configurations for compressed hydrogen gas transportation and refueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4428–4438.
- U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. (1994). FEDERAL SIZE REGULATIONS FOR COMMERCIAL MOTOR VEHICLES.
- Yang, C., & Ogden, J. (2007). Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(2), 268–286. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.009>

## ASSESSMENT OF ECONOMIES OF SCALE IN THE LEVELIZED COST OF COMPRESSED HYDROGEN ROAD TRANSPORTATION IN LATIN AMERICA

**ABSTRACT:** This study analyzes the levelized cost of hydrogen transport (LCHT) for Argentina, Brazil, Chile, Colombia, Mexico, and Peru, considering different transport capacities and distances. The

objective is to determine and estimate the economies of scale for two storage technologies: steel and T300 epoxy containers. The results show that the LCHT varies significantly with distance. For 100 km, the cost ranges from 0,68 to 3.44 USD/kg; for 300 km, from 1,43 to 8 USD/kg; and for 1.000 km, from 3,99 to 24,01 USD/kg. The primary component of the LCHT, representing approximately half the cost, is human resources (driver salaries), followed by fuel costs and the investment in the trailer and pressure vessels. Strong economies of scale were found with steel containers and moderate-to-high economies with epoxy containers. However, these economies are limited by the maximum allowed weight of the truck-trailer combination. For short distances (100 and 300 km), the LCHT seems viable. However, for distances of 1.000 km, the LCHT is high, suggesting the need to explore more economical transport methods such as liquid hydrogen, pipelines, or derivatives. Finally, it's worth mentioning that the economic figures are valued in USD as of December 2022. If another reference is required, the sources and currency used should be reviewed.

**Keywords:** Hydrogen, green hydrogen, hydrogen transport, hydrogen economy, hydrogen in Latin America