

Modelo de Deflección Constante para el Cálculo de Presión de Llantas en Ruta y Gravel: Calibración Empírica, Propagación de Incertidumbre y Validación Cruzada

White paper técnico del BikeLab PSI Calculator

Carlos Eduardo Ravello Joo
BikeLab Studio, Trujillo, Perú
ORCID: 0009-0007-5631-7436 · carlosravello.com
Junio 2026 · v1.0 · Licencia CC BY-NC 4.0

Resumen

Presentamos el modelo físico-estadístico del BikeLab PSI Calculator. El núcleo es el criterio de deflección constante de Frank Berto (15% tire drop), ajustado empíricamente como $P = 600 \cdot L / W^2 + 0.75 \cdot W - 25$ (± 2 PSI dentro del dominio medido: 20–220 lbs por rueda). Se introducen cuatro contribuciones: (1) una corrección de ancho real reanclada mediante regresión sobre 321 pares nominal/medido de BicycleRollingResistance, que demuestra que la regla clásica anclada en aros de 13 mm corrige dos veces lo que el etiquetado moderno (ETRTO 2020) ya incorpora; (2) un acople frontal $P_f = 0.93 \cdot P_r$ que sustituye la asignación por carga estática, justificado por transferencia de carga en frenada y calibrado contra SILCA y Rene Herse; (3) propagación de incertidumbre por Latin Hypercube Sampling ($N = 10\,000$) que produce bandas de confianza del 90%; y (4) un análisis de sensibilidad global (índices de Sobol; 81 920 evaluaciones por caso) que refuta la hipótesis de que la carga domina el resultado: en ruta domina el ancho real ($S1 = 0.51\text{--}0.68$) y en gravel el error de manómetro ($S1 = 0.61\text{--}0.73$). La validación cruzada sobre seis configuraciones arroja 9/12 ruedas dentro de $\pm 10\%$ del promedio de ambas referencias; las tres desviaciones restantes tienen causa física identificada y se documentan en lugar de ajustarse.

Palabras clave: presión de neumáticos, deflección 15%, Latin Hypercube Sampling, índices de Sobol, ETRTO hookless, validación cruzada

1. Introducción

Las herramientas de referencia para presión de neumáticos entregan recomendaciones que difieren entre sí hasta en 20 PSI para la misma configuración, sin declarar incertidumbre ni función objetivo. SILCA optimiza impedancia sobre datos de atletas profesionales; Rene Herse optimiza el balance confort-velocidad con carcasas flexibles; las tablas de fabricante optimizan responsabilidad legal. Este trabajo adopta un criterio físico medible y reproducible — deflexión constante del 15% (Berto, 2004) — lo declara, calibra sus correcciones con datos públicos auditables, cuantifica la incertidumbre del resultado y publica las divergencias con las referencias en lugar de ocultarlas.

2. Formulación central

Para carga por rueda L (lbs) y ancho real W (mm), el chart de Berto admite el ajuste empírico:

$$P = 600 \cdot L / W^2 + 0.75 \cdot W - 25 \text{ [PSI]}$$

con precisión ± 2 PSI dentro del dominio empírico (20–220 lbs/rueda; 23–50 mm; 700C). El término dominante L/W^2 implica crecimiento lineal con la carga y caída cuadrática con el ancho — la raíz física del resultado de sensibilidad de la §5. La carga por rueda se deriva del peso total del sistema y la geometría: racing 40/60 (frontal/trasera), endurance 45/55, urbana/touring 35/65; solo la carga trasera entra a la fórmula (§3).

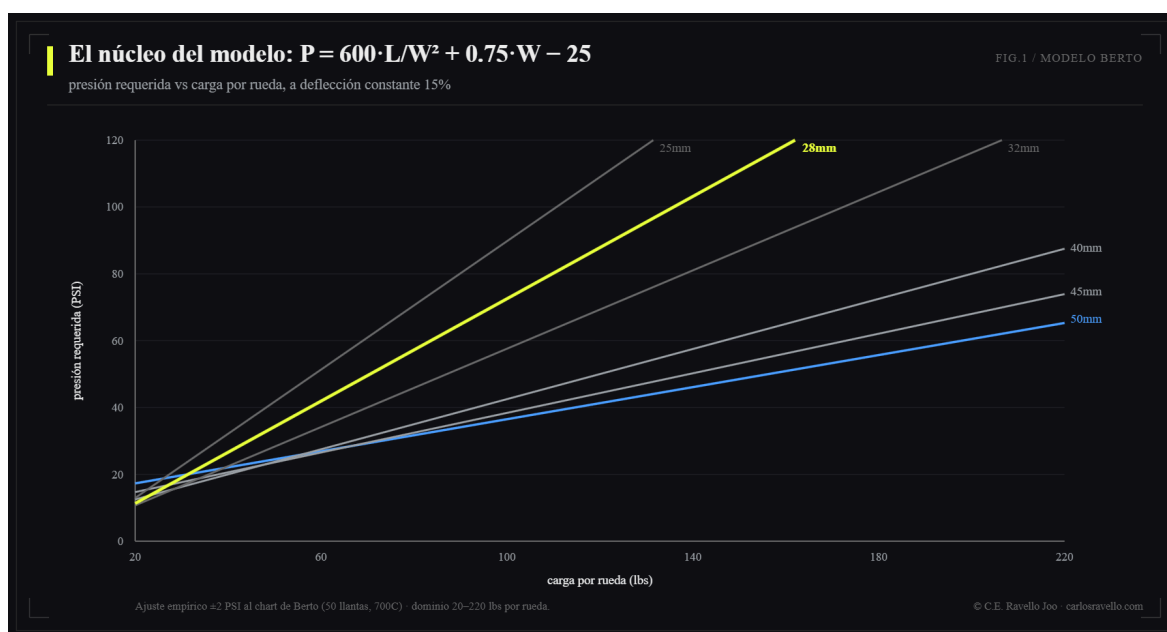


Figura 1. Familia de curvas $P(L)$ por ancho de llanta; dominio empírico de Berto sombreado.

3. Acople frontal

La asignación de carga estática a la rueda delantera produce frontales 24–36% más blandos que ambas referencias: un fallo sistemático. La causa es que bajo frenada la transferencia de masa impone al frontal picos de carga muy superiores a su fracción estática; las referencias lo resuelven sin declararlo (SILCA: diferencias F/R $\sim 2\%$; Rene Herse: valor único). Se adopta $P_{\text{frontal}} = k \cdot P_{\text{trasera}}$ con $k = 0.93$, calibrado por barrido (0.86–1.00) contra ambas referencias: óptimo simultáneo en desviación absoluta media (3.8%) y máxima (8.0%).

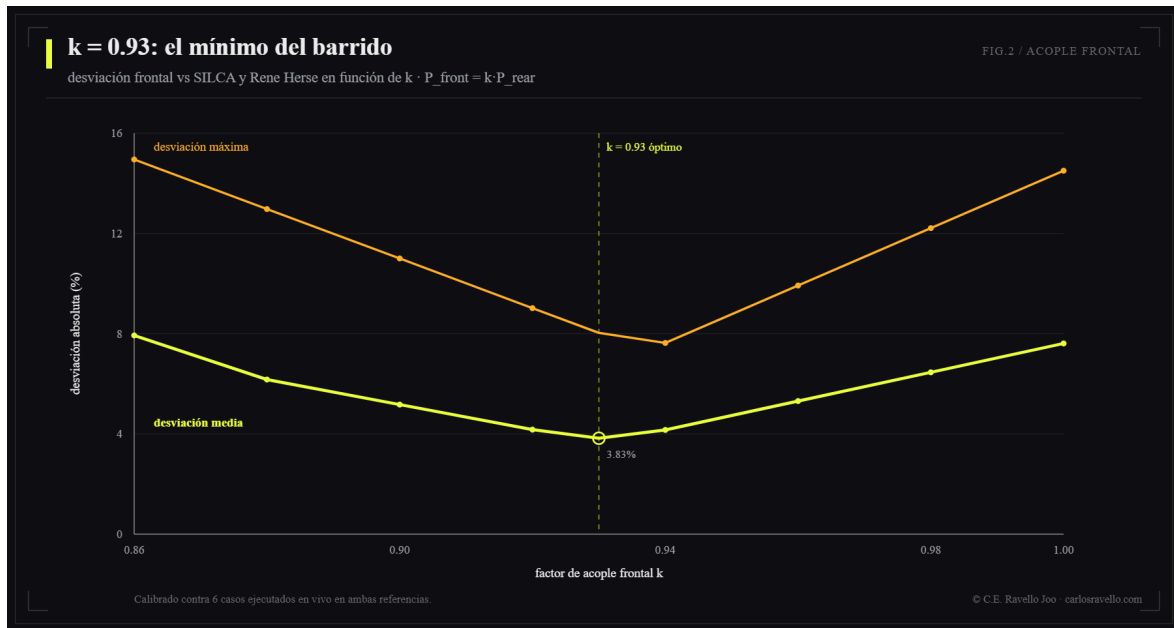


Figura 2. Barrido de calibración de k; mínimo en $k = 0.93$.

4. Corrección de ancho real: censo BRR (n = 321)

La regla clásica ($\Delta W \approx +0.4$ mm por mm de aro interno sobre una base de 13 mm) contiene dos afirmaciones independientes: pendiente y ancla. El censo de BicycleRollingResistance (159 llantas de ruta en aro de 18.0 mm; 162 de gravel en 17.8 mm; 2014–2026) valida la pendiente (medición directa en dos aros: 0.444 mm/mm; +11%) y refuta el ancla: ΔW medido = +0.82 mm en ruta y -1.78 mm en gravel frente a +2.0 mm predichos. ETRTO 2020 especifica los nominales modernos sobre aros de 19–25 mm; la regla clásica corrige dos veces lo que el fabricante ya corrigió. La corrección reanclada es $W = \text{nominal} + \delta(\text{cat}, \text{nominal}) + 0.4 \cdot (\text{aro} - 18)$, con $\delta_{\text{ruta}} = 7.953 - 0.2727 \cdot \text{nominal}$ (23–30 mm) y $\delta_{\text{gravel}} = 1.504 - 0.0827 \cdot \text{nominal}$ (31–50 mm); residuales $\sigma = 0.94$ mm (ruta) y 1.34 mm (gravel). La medición directa con calibre sustituye la cadena completa ($\sigma = 0.5$ mm).

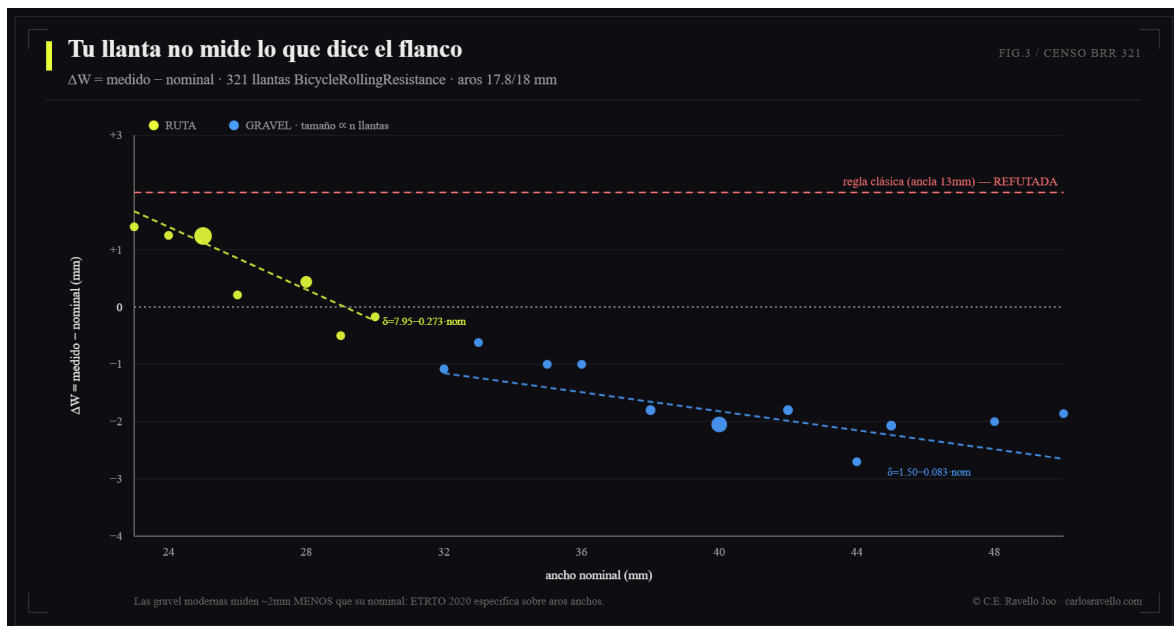


Figura 3. Censo BRR: ΔW por clase de ancho, regresiones por categoría y regla clásica refutada.

Correcciones multiplicativas adicionales: cámara butyl +5% (el +10% clásico produjo +11.9% de desviación en validación); carcasa supple -5% / rígida +5% (Heine, 2020); asfalto rugoso -5%; gravel -12.5%. Techos aplicados al final, sin excepciones: hookless 72.5 PSI (ETRTO); hookless ≥ 30 mm internos, 60 PSI; piso de advertencia 25 PSI.

5. Incertidumbre (LHS) y sensibilidad global (Sobol)

VARIABLES INCIERTAS: peso $\sim N(\mu, 2 \text{ kg})$; ancho real $\sim N(W, 1.5 \text{ mm})$ o 0.5 mm con calibre; fracción trasera $\sim U(\pm 3 \text{ pp})$; manómetro $\sim N(1, 5\%)$ multiplicativo. LHS con $N = 10\,000$ por configuración (scipy.stats.qmc); Sobol por esquema de Saltelli, base 2^{13} (81 920 evaluaciones/caso; SALib). Las bandas publicadas por la herramienta excluyen el error de manómetro: es incertidumbre del instrumento del usuario, no del modelo.

Caso	Configuración	Trasera: media [p5-p95] (PSI)	S1 dominante
1	83 kg · 28 mm · ruta · 21 mm	73 [63–86]	ancho 0.631
2	95 kg · 28 mm · ruta · 21 mm	84 [72–100]	ancho 0.650
3	75 kg · 32 mm · ruta · cámara · 19 mm	63 [54–73]	ancho 0.512
4	85 kg · 40 mm · gravel · 24 mm	38 [35–41]	manómetro 0.605
5	100 kg · 45 mm · gravel · 25 mm	39 [36–41]	manómetro 0.726
6	70 kg · 25 mm · ruta · 21 mm	71 [59–85]	ancho 0.684

Tabla 1. Bandas de incertidumbre 90% (LHS, sin manómetro) e índice de Sobol dominante por caso.

La hipótesis de diseño — la carga domina vía L/W^2 — resulta falsa: peso más distribución explican $<15\%$ de la varianza en todos los casos. En ruta domina el ancho real ($S1 = 0.51\text{--}0.68$; el $\pm 5\%$ de ancho entra al cuadrado) y en gravel el manómetro ($S1 = 0.61\text{--}0.73$). $S1 \approx ST$ en todos los casos: modelo aditivo, sin interacciones relevantes.



Figura 4. Índices de Sobol S1 por variable, ruta vs gravel.

6. Validación cruzada

Seis configuraciones ejecutadas en vivo (junio 2026) en SILCA y Rene Herse, con mapeo documentado de cada parámetro. Criterio: $\leq 10\%$ respecto al promedio de ambas referencias en ruta; tolerancia ampliada en gravel (las referencias divergen entre sí hasta 30%). Resultado: 9/12 ruedas dentro de criterio.

Caso	BLS F/R	SILCA F/R	RH soft-firm	Desv. R
1	68 / 73	70 / 71.5	54–67	+10.2%*
2	78 / 84	71.5 / 73.5	61–76	+17.9%†
3	58 / 62	63.5 / 65	46–57	+7.0%
4	35 / 38	34.5 / 36	34–42	+2.8%
5	36 / 39	29.5 / 30.5	35–43	+16.7%‡
6	65 / 70	80.5 / 83	55–72	-2.6%

Tabla 2. Validación cruzada (PSI). *Artefacto de redondeo (las referencias aceptan solo anchos enteros). †Escalado con peso, §6.1. ‡Las referencias divergen 30% entre sí.

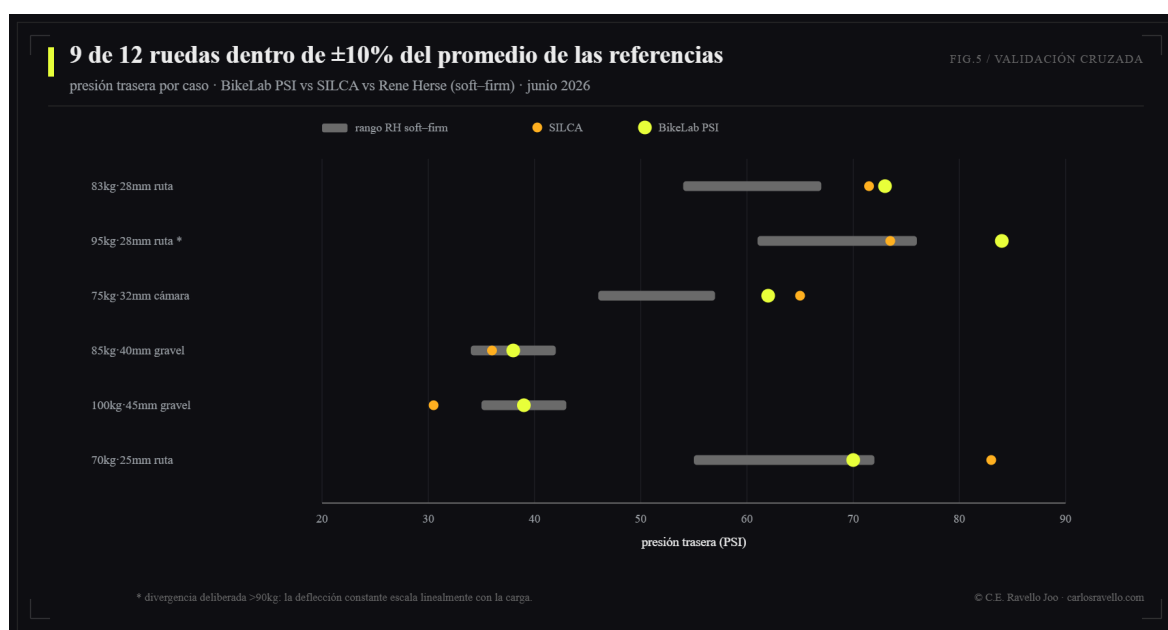


Figura 5. BikeLab PSI vs SILCA vs rango soft-firm de Rene Herse, por caso.

6.1 Divergencia deliberada en riders >90 kg

Para riders >90 kg el modelo recomienda presiones más firmes que SILCA. No es un error: la deflección constante exige escalado lineal con la carga; las calculadoras que optimizan impedancia saturan con el peso, las que optimizan deflección no. El caso 2 carga 125 lbs en la trasera — dentro del dominio medido por Berto (hasta 220 lbs). En la práctica, el techo hookless (72.5 PSI) comprime esta divergencia en la mayoría de ruedas modernas.

7. Alcance y limitaciones

(1) Berto midió con tecnología de los años 90 sobre 700C; el ± 2 PSI es del ajuste al chart, no de cada llanta moderna. (2) La corrección de carcasa discretiza un continuo en 3 niveles. (3) $k = 0.93$ se calibra contra referencias que son, a su vez, modelos. (4) El censo BRR mide a presión estandarizada; el ancho real varía $\sim \pm 0.5$ mm con la presión de uso. (5) MTB queda explícitamente fuera del dominio: Berto declara el criterio 15% inválido para MTB (aros proporcionalmente más angostos, tacos que distorsionan la medición, objetivo de tracción). (6) No existe una presión óptima verdadera contra la cual validar —

solo filosofías empíricas razonables; este modelo elige una, la declara y publica su incertidumbre.

8. Reproducibilidad

Python 3.10; NumPy 2.2.6; SciPy 1.15.3 (qmc.LatinHypercube); SALib (Saltelli/Sobol); semilla 42 + id de caso. Motor JavaScript de la herramienta verificado contra el modelo Python caso por caso (coincidencia exacta pre-redondeo). Censo BRR capturado el 2026-06-12 de las tablas públicas de [bicyclerollingresistance.com](https://www.bicyclerollingresistance.com); datasets crudos disponibles bajo solicitud. Herramienta: bikelabstudio.com/articles/psi-calculator-es.html (ES) y [psi-calculator-en.html](https://bikelabstudio.com/articles/psi-calculator-en.html) (EN).

Referencias

- Berto, F. J. (2004). *All about tire inflation*. Bicycling Magazine technical series.
- Bierman, J. (2014–2026). *Road bike and CX/gravel tire test database*. BicycleRollingResistance. <https://www.bicyclerollingresistance.com>
- ETRTO. (2020). *Standards manual*. European Tyre and Rim Technical Organisation.
- Heine, J. (2020). *The science behind the Rene Herse tire pressure calculator*. Rene Herse Cycles. <https://www.renehersecycles.com/the-science-behind-the-tire-pressure-calculator/>
- Herman, J., & Usher, W. (2017). SALib: An open-source Python library for sensitivity analysis. *Journal of Open Source Software*, 2(9), 97. <https://doi.org/10.21105/joss.00097>
- McKay, M. D., Beckman, R. J., & Conover, W. J. (1979). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 21(2), 239–245. <https://doi.org/10.2307/1268522>
- Ravello Joo, C. E. (2026). *Modelo de Coherencia Dinámica*. <https://carlosravello.com>
- Rene Herse Cycles. (2026). *Tire pressure calculator*. <https://www.renehersecycles.com/tire-pressure-calculator/>
- SILCA. (2026). *Professional tire pressure calculator*. <https://silca.cc/pages/pro-tire-pressure-calculator>
- Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1–3), 271–280. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6)