

**INVESTIGACIÓN
EN MARCHA Evaluación de la actividad
investigadora
TESIS DOCTORAL
CURSO 2025-26**

**DOCTORADO EN
MEDIO AMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD**

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE



**PROGRAMA DE DOCTORADO EN
MEDIO AMBIENTE Y SOSTENIBILIDAD**



Título provisional:

ECONOMÍA CIRCULAR EN CALZADO MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Doctorando: Borja Mateu Romero

Directora: Maria Belen Almendro Candel

Codirector: Ignacio Meléndez Pastor

Tutora: Jose Navarro Pedreño

Directora Industrial: Francisca Arán Ais (INESCOP)

Validar tecnológicamente el reciclaje mecánico industrial del calzado post-consumo y establecer las bases metodológicas de ACV para su evaluación circular

DESARROLLO EXPERIMENTAL

- Planta piloto INESCOP · TRL 7
- 300 kg/h en continuo
- 500 kg calzado post-consumo
- Separación multietapa (seco + húmedo)

REVISIÓN SISTEMÁTICA

- Protocolo PRISMA 2020
- 624 registros → 34 estudios incluidos
- Marco PEFCR A&F v3.1 / ESPR
- Madurez TRL de vías circulares

Dos líneas de trabajo complementarias

A

Validación experimental (TRL 7)

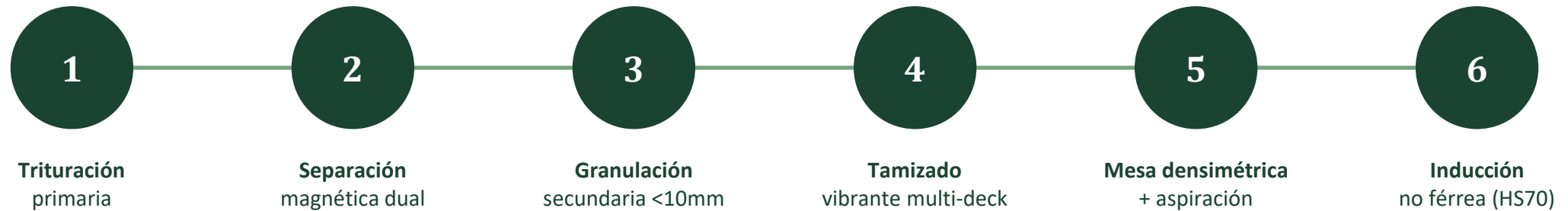
- Planta piloto INESCOP, 300 kg/h continuo
- 500 kg calzado post-consumo (Proyecto Lázaro)
- 2 tipologías: deportivo (67.2%) y vestir/piel (32.8%)
- Trituración → separación magnética → granulación → tamizado → mesa densimétrica → flotación-sedimentación

B

Revisión sistemática (PRISMA 2020)

- Scopus + ScienceDirect, periodo 2013–2025
- 624 registros identificados → 34 estudios incluidos
- 3 categorías: calzado terminado (11) · componentes (14) · revisiones metodológicas (9)
- Foco: consistencia de asignación en ACV + madurez TRL de vías circulares

Línea de proceso: planta piloto INESCOP (300 kg/h)



Control centralizado por PLC · recetas específicas por tipología: vibración 35–48 Hz, inclinación 6°–8°, aspiración 40–60 Hz (hasta 75 m³/min)

RESULTADOS

Artículo 1 — Sistema piloto de reciclaje mecánico de calzado post-consumo

Development and Performance Evaluation of a Pilot-Scale Mechanical Recycling System for Heterogeneous Footwear Waste — borrador en preparación

Validación a TRL 7: balance global del proceso

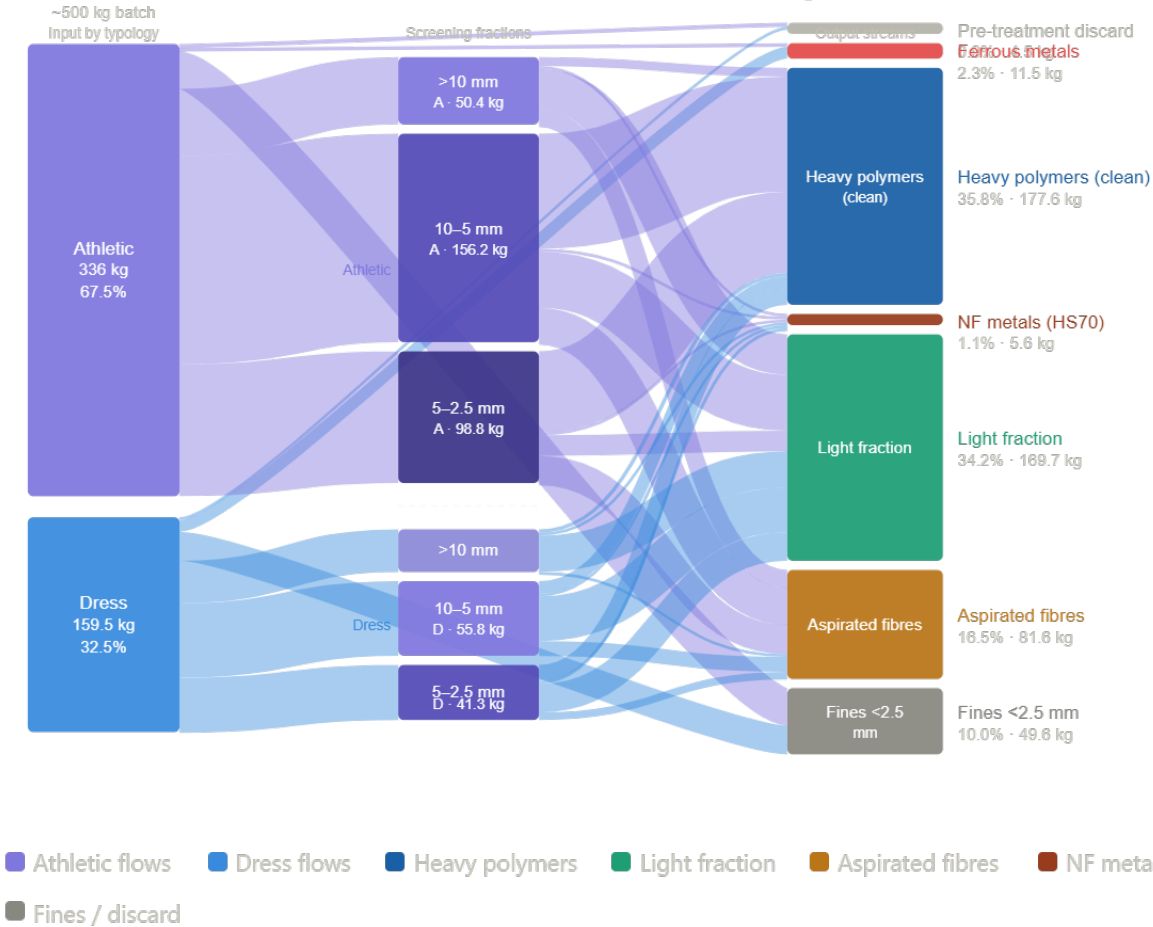


Fig. 2. Sankey mass flow diagram for the complete ~500 kg post-consumer footwear batch. Purple: athletic typology (336 kg, 67.5%). Blue: leather/dress typology (159.5 kg, 32.5%). Flow width proportional to mass ($0.72 \text{ px} \cdot \text{kg}^{-1}$). NF: non-ferrous metals extracted by HS70 induction separator from heavy fraction.

TRL 7

madurez tecnológica

500 kg

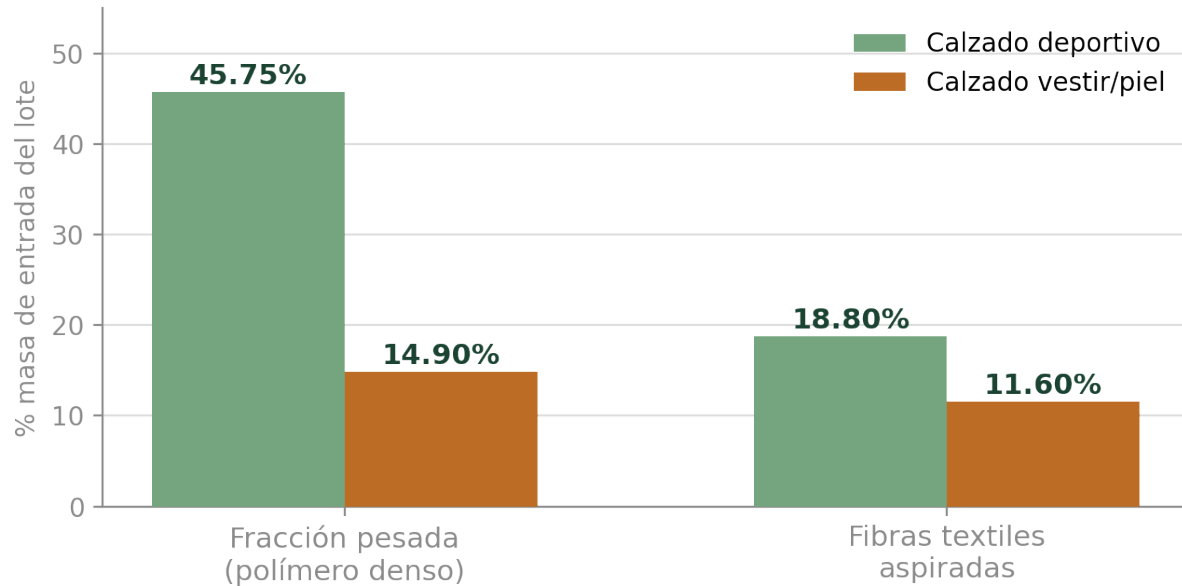
lote procesado

300 kg/h

caudal continuo

Diagrama de flujo de masa (Sankey) del lote completo de 500 kg, por tipología y fracción de salida.

Balance de masas por tipología de calzado



Resultados clave

- Deportivo: mayor fracción pesada — elastómeros EVA/SBR más compactos
- Vestir/piel: 5.5% metales férreos, casi 7× más que deportivo (herrajes, punteras)
- Fibras aspiradas más altas en deportivo (mallas técnicas)
- → efecto de encapsulación textil observado como cuello de botella debido a que los materiales no se quedan liberados para su posterior separación

Consumo energético específico (SEC) del proceso de reciclaje y benchmarking

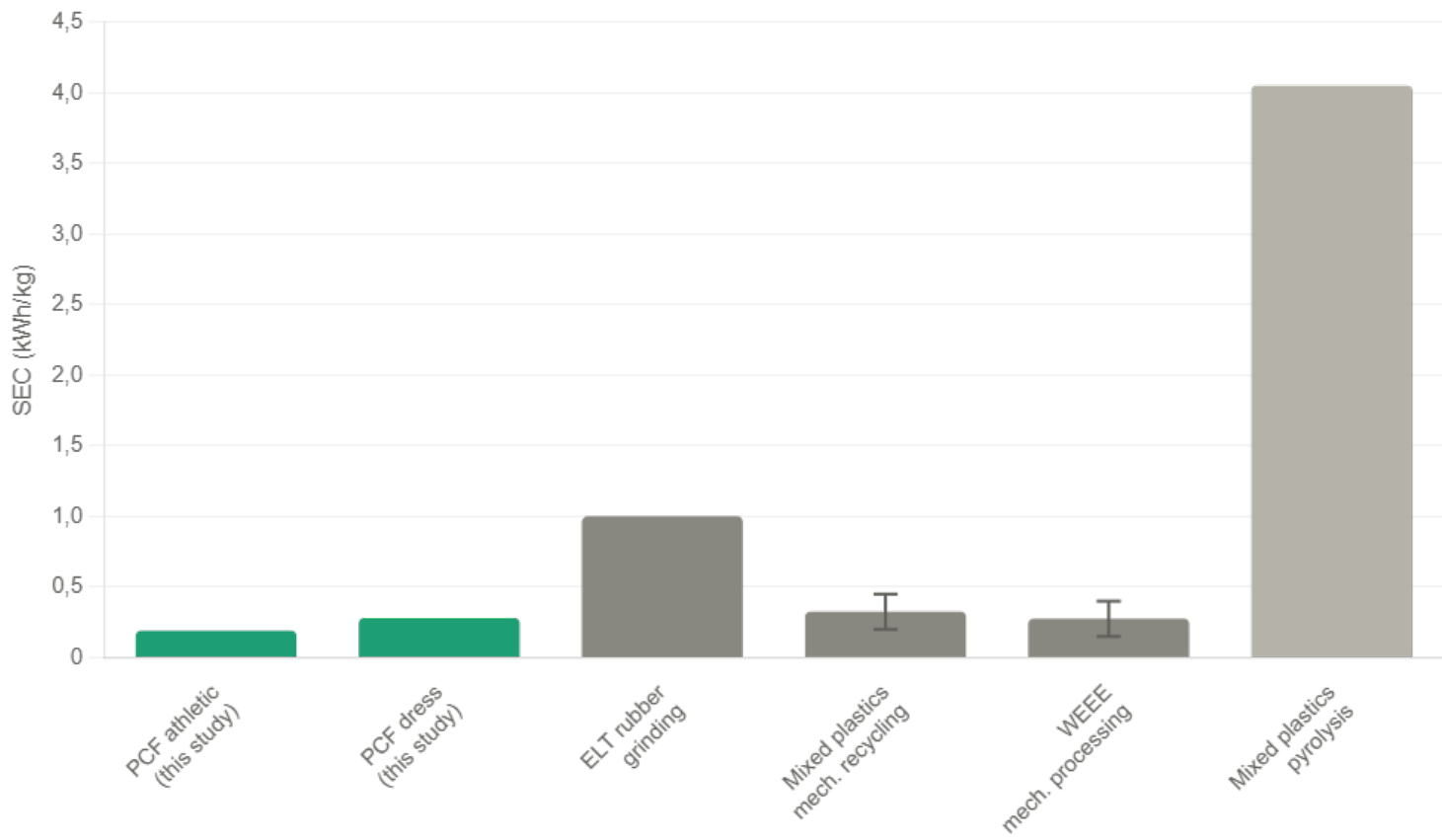
0.193

kWh/kg · deportivo

0.284

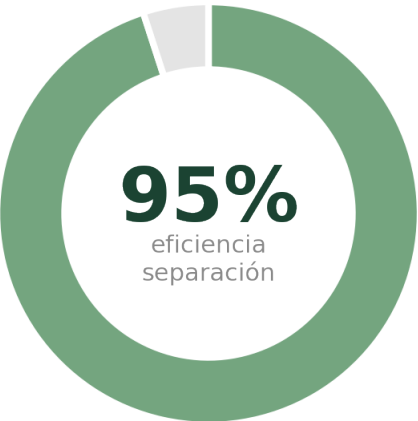
kWh/kg · vestir/piel

≈ 5× menor que la trituración industrial de NFU
(≈1.0 kWh/kg)



Benchmarking del SEC: planta piloto INESCOP vs. procesos análogos de la literatura.

Flotación-sedimentación y cuellos de botella operativos



Separación cuero–espuma (fracción ligera)

Desgaste abrasivo de cuchillas

Grava y piedras embebidas en las suelas aceleran el desgaste de las cuchillas del triturador primario.

Mitigación:

Recubrimientos de carburo de tungsteno · pre-limpieza en seco · detección magnética previa a la entrada

Encapsulación por fibras textiles (screen blinding)

Mallas de fibra atrapan partículas densas y metálicas, impidiendo su estratificación en la mesa densimétrica. Hallazgo no descrito previamente en la literatura.

Mitigación:

+15% amplitud de vibración vía PLC (coste: +8% SEC en el lote deportivo)

Matriz de viabilidad de recuperación de materiales (MRVM)



- Fracción pesada → suelas recicladas / superficies deportivas
- Cuero-espuma → paneles aislantes acústicos y térmicos
- Fibras aspiradas → relleno textil / combustible derivado de residuos

RESULTADOS

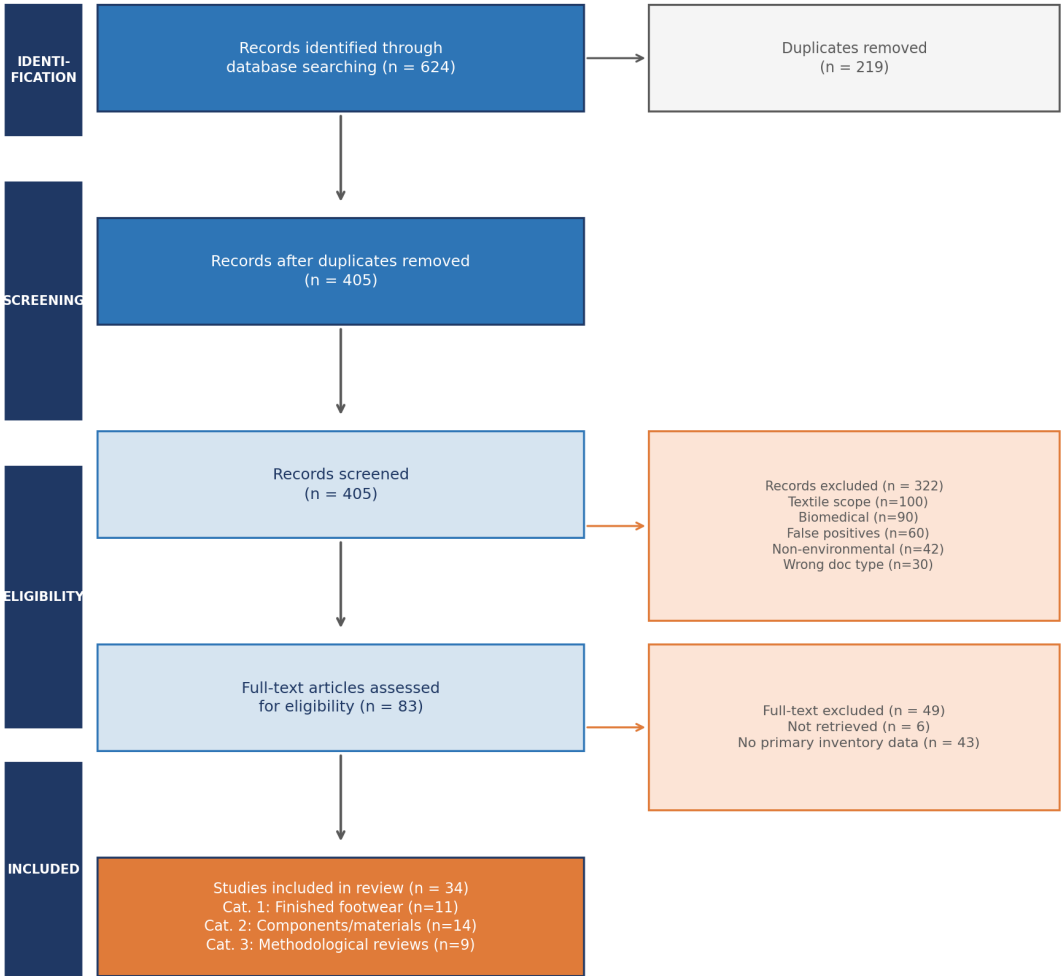
Artículo 2 — Revisión sistemática: ACV y madurez de la economía circular en calzado

LCA methodology and circular economy maturity in the footwear sector — borrador en preparación

Selección sistemática de literatura (PRISMA 2020)



Figure 1. PRISMA 2020 flow diagram



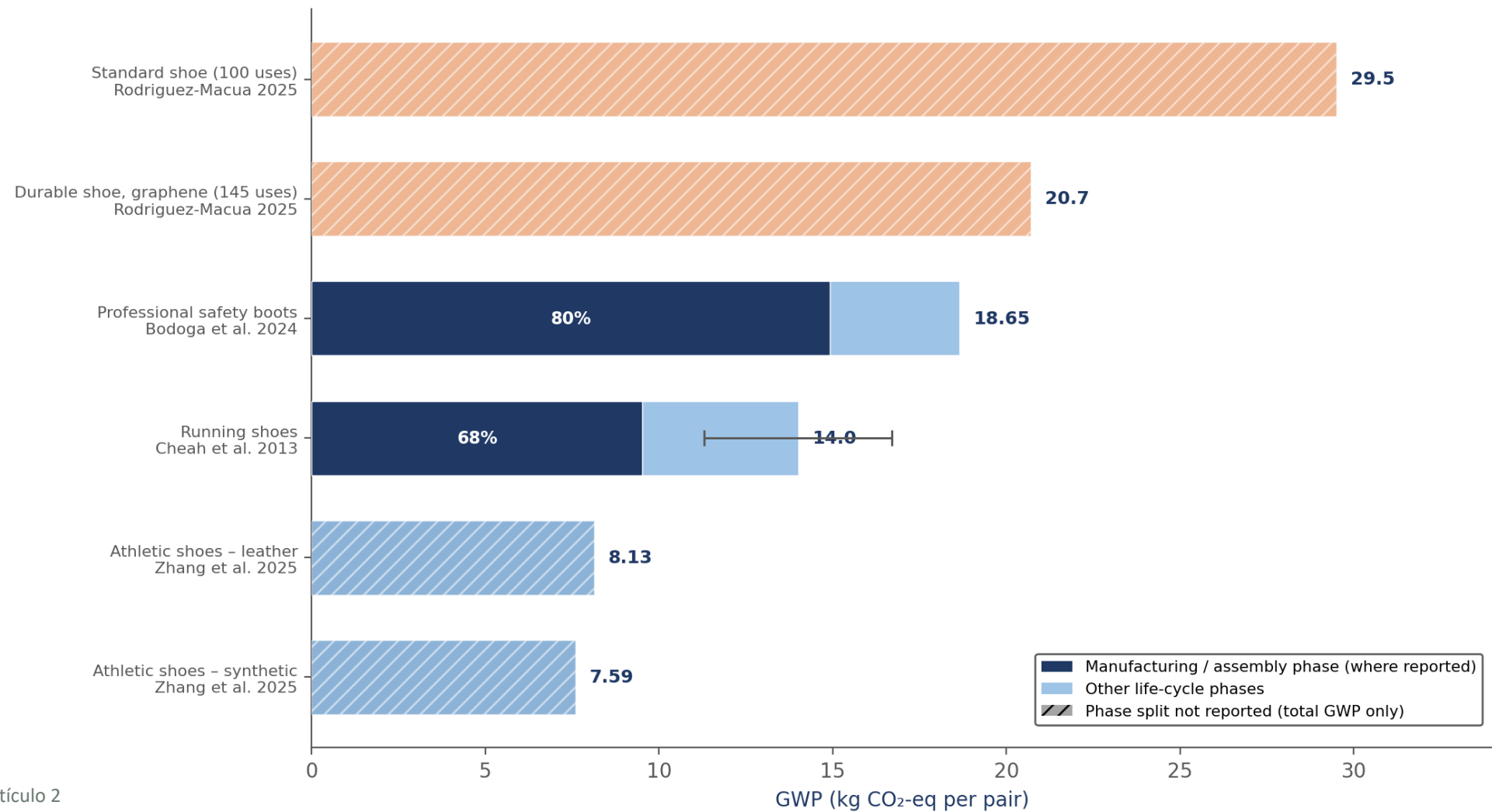
Inconsistencia metodológica en la asignación de impactos



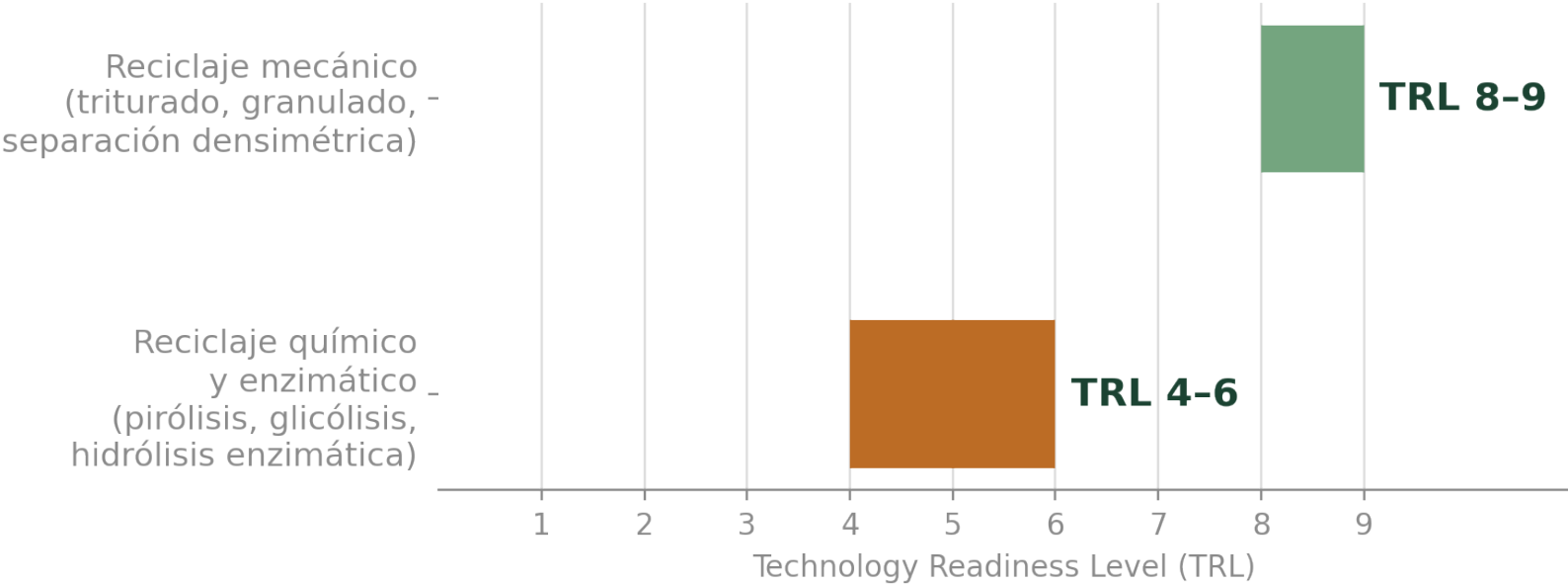
- 60% de los estudios (20 de 34) no reportan la regla de asignación empleada
- La elección económica vs. másica puede variar la huella del cuero en un orden de magnitud
- El curtido al cromo convencional genera >95% de la toxicidad humana carcinógena del cuero
- Los adhesivos PU de base disolvente son la fuente principal de COV, pese a <1% del peso del producto

Huella de carbono (GWP) del calzado terminado

Figure 2. Global warming potential by footwear type, showing the dominance of the manufacturing phase where life-cycle stage data are reported



Madurez tecnológica de las vías circulares y conclusiones



Armonización obligatoria del marco PEFCR A&F (asignación + Circular Footprint Formula)

Ecodiseño para desmontaje: adhesivos termoplásticos, mono-materialidad

Reciclaje mecánico como criterio ESPR a corto plazo; vías químicas/enzimáticas como complemento a medio plazo

TRABAJO PENDIENTE Y PRÓXIMOS PASOS

Desarrollo del Artículo 3: parametrización empírica de la Circular Footprint Formula (Q_{sout}/Q_p) con datos de la planta piloto

La CFF no mide, reparte. Coge el impacto ambiental de reciclar un material y decide qué parte de ese impacto le corresponde a tu producto y qué parte al siguiente producto que use ese material reciclado. El resultado es un número de impacto ajustado que ya incorpora tres cosas: cuánto se ahorra por reciclar en vez de usar virgen, cómo se reparte ese ahorro entre las dos vidas del material, y una penalización si el material reciclado sale de peor calidad que el virgen.

El objetivo del artículo no es calcular el CFF en sí; es medir los parámetros que hoy faltan para poder aplicarlo bien al calzado: cuánto sale aprovechable del proceso de reciclaje de calzado y con qué calidad sale frente al virgen