

Redefiniendo el Diseño de Puentes: Optimización Sostenible y Eficiente mediante Metamodelos

Una síntesis de la investigación doctoral
de Lorena Yepes Bellver

Universitat Politècnica de València

El diseño tradicional de puentes: un desafío de alta complejidad, coste e impacto



Complejidad Inherente

El diseño estructural presenta una alta dimensionalidad y complejidad combinatoria. La dependencia de la experiencia del ingeniero no garantiza soluciones óptimas a nivel global.



Coste Computacional y Económico

Los métodos tradicionales, como el Análisis por Elementos Finitos (FEA), son computacionalmente intensivos. Los puentes losa representan entre el 5% y el 15% del coste total de los proyectos de transporte terrestre.



Impacto Ambiental

El sector de la construcción es responsable del 37% de las emisiones de CO_2 relacionadas con la energía y del 50% de los materiales extraídos globalmente.

Nuestra propuesta: Una metodología sistemática para un diseño óptimo y sostenible

Esta tesis desarrolla una metodología para reducir costes, emisiones de CO₂ y energía incorporada, sin comprometer la viabilidad estructural o económica del puente.



1. Modelos Sustitutivos

(Metamodelos): Uso de técnicas como Kriging y Redes Neuronales Artificiales (RNA) para aproximar respuestas complejas, reduciendo drásticamente el tiempo de cálculo.

2. Optimización Heurística en Dos Fases

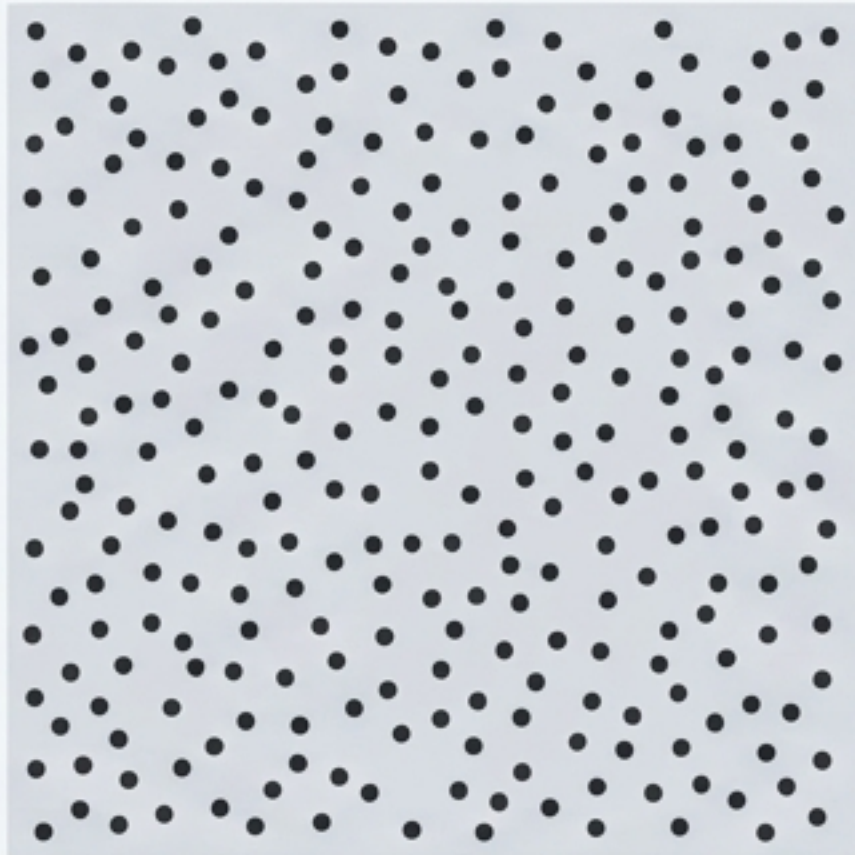
Fases: Un marco robusto que primero explora ampliamente el espacio de diseño (Diversificación) y luego refina la búsqueda de soluciones óptimas (Intensificación).

3. Enfoque Multicriterio:

Integración de objetivos económicos, ambientales y estructurales para encontrar soluciones de compromiso equilibradas.

Cómo funciona: De la exploración amplia a la optimización precisa

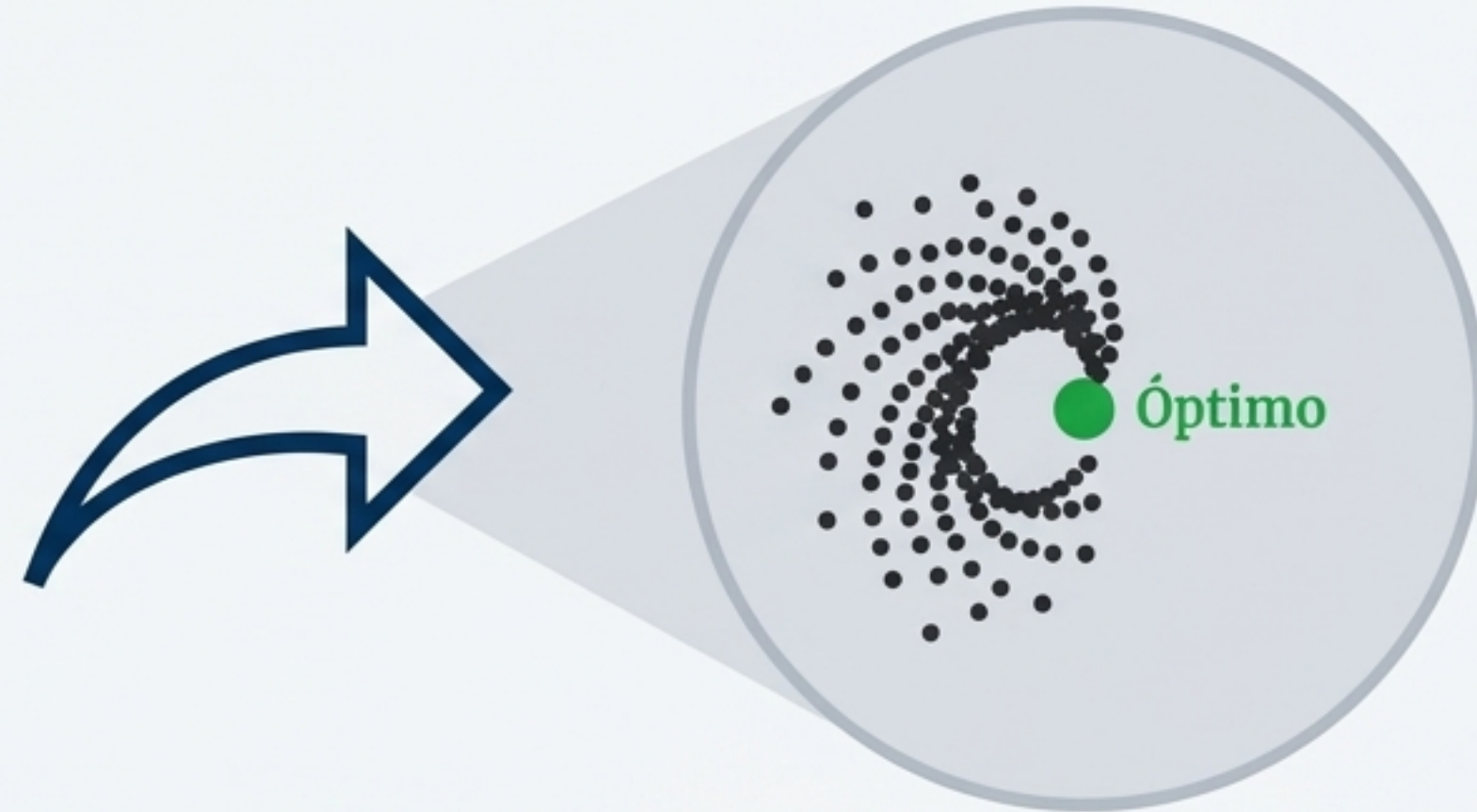
Fase 1: Diversificación (Exploración Global)



Objetivo: Realizar una exploración amplia del espacio de diseño para identificar regiones de interés y capturar tendencias globales.

Método: Muestreo por Hipercubo Latino (LHS) para generar un conjunto diverso de diseños iniciales.

Fase 2: Intensificación (Explotación Local)



Objetivo: Refinar la búsqueda en las regiones prometedoras para converger en una solución óptima.

Método: Algoritmos heurísticos (Simulated Annealing, TAMO) operando sobre la superficie de respuesta del metamodelo.

Dato de Eficiencia: Esta metodología reduce el tiempo de cómputo hasta en un **99.06%** en comparación con la optimización heurística tradicional, obteniendo resultados con una desviación de solo el **2.54%**.

Impacto en Coste: La optimización reduce el gasto un 6.54% minimizando el uso de materiales

El método de optimización basado en Kriging conduce a una reducción de costes del 6.54%, principalmente mediante la minimización del uso de materiales clave.



-14.8%
Hormigón

6.54%

Reducción de Coste

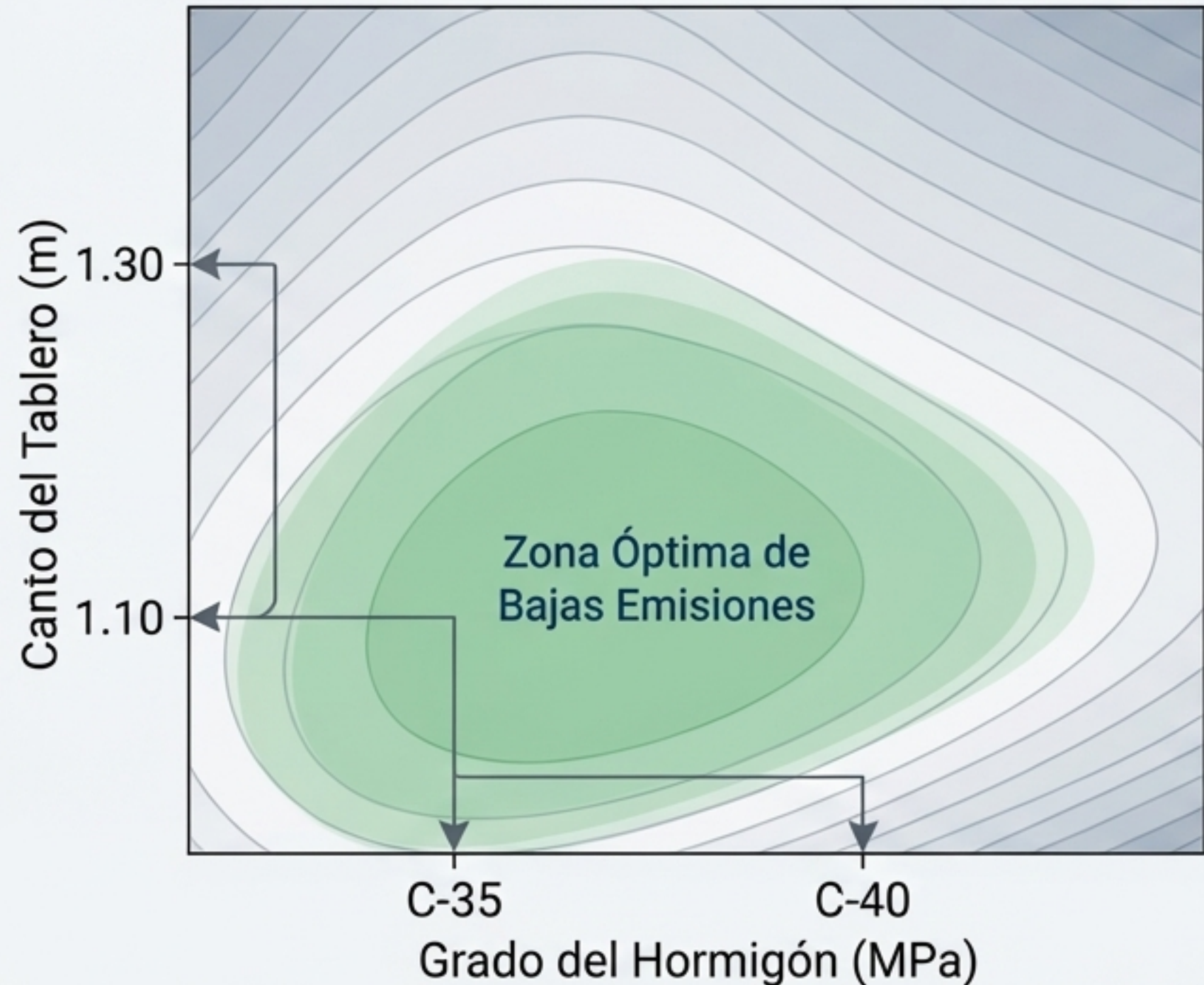


-11.25%
Acero Activo
(postesado)

Estas reducciones en el consumo de material se consiguen manteniendo la integridad estructural y la capacidad de servicio del puente.

Impacto en CO₂: Diseñando puentes con una menor huella de carbono

La metodología identifica parámetros de diseño óptimos que minimizan las emisiones de CO₂ durante la construcción.



Parámetros de Diseño Óptimos para Bajas Emisiones:

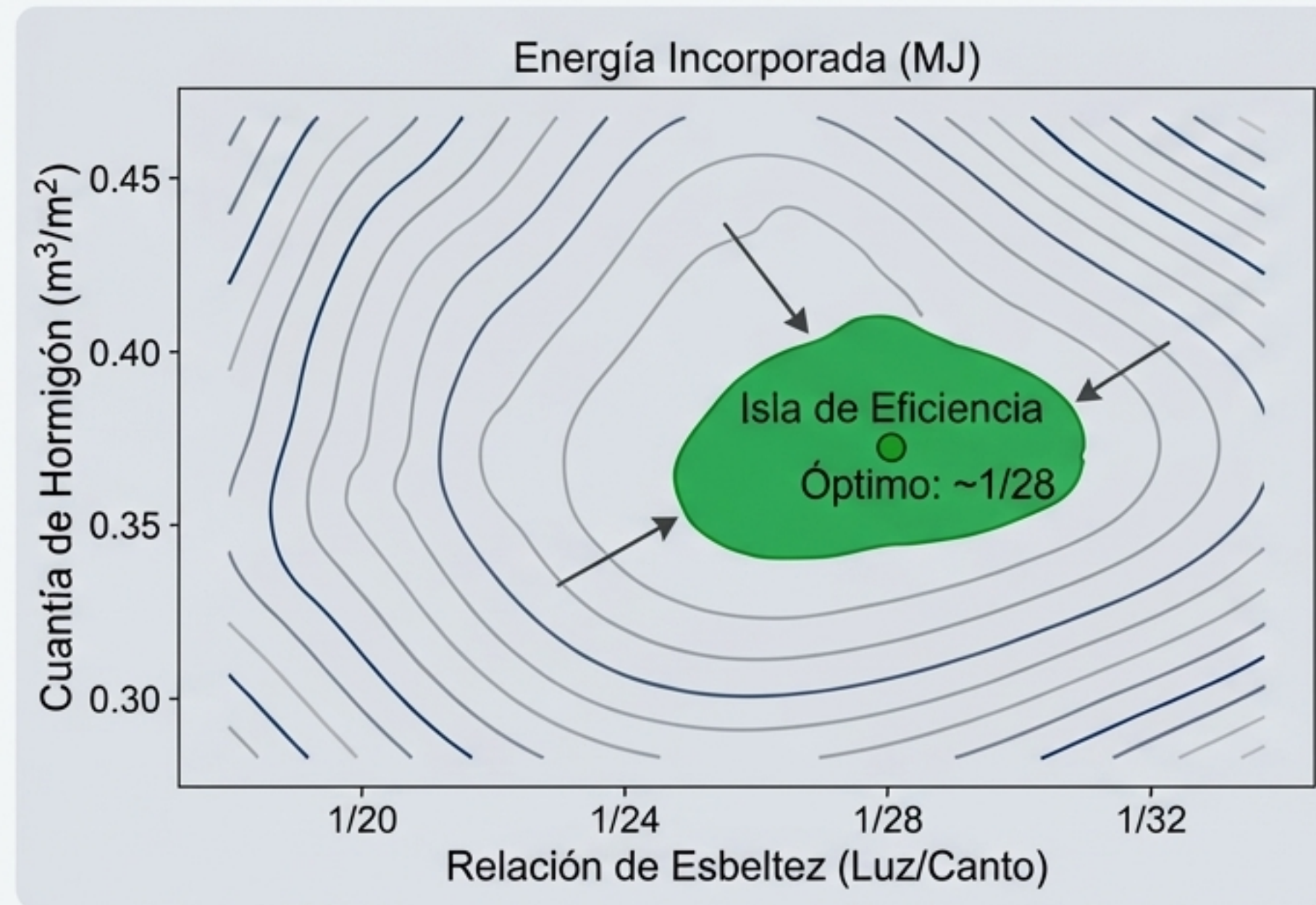
- **Resistencia del Hormigón:** Entre C-35 y C-40 MPa.
- **Canto del Tablero:** Entre 1.10 y 1.30 metros.
- **Ancho de Base:** Entre 3.20 y 3.80 metros.

La Clave del 'Trade-Off'

Un modesto aumento de los costes de construcción (menos del 1%) puede reducir sustancialmente las emisiones de CO₂ (más del 2%), demostrando que el diseño sostenible es económicamente viable.

Impacto en Energía: Una mayor esbeltez y un uso eficiente de materiales reducen la energía incorporada

La optimización identifica configuraciones que mejoran drásticamente la eficiencia energética del diseño.







Parámetros Críticos para la Eficiencia Energética:

- **Alta Relación de Esbeltez:** Óptima en torno a $1/28$.
- **Uso Mínimo de Hormigón y Armadura Activa:** Reducir el consumo de los materiales más intensivos en energía.
- **Aumento de la Armadura Pasiva:** Para compensar las reducciones anteriores y mantener la integridad estructural.

Comparativa de Modelos Predictivos: Kriging y Redes Neuronales (RNA) son herramientas complementarias

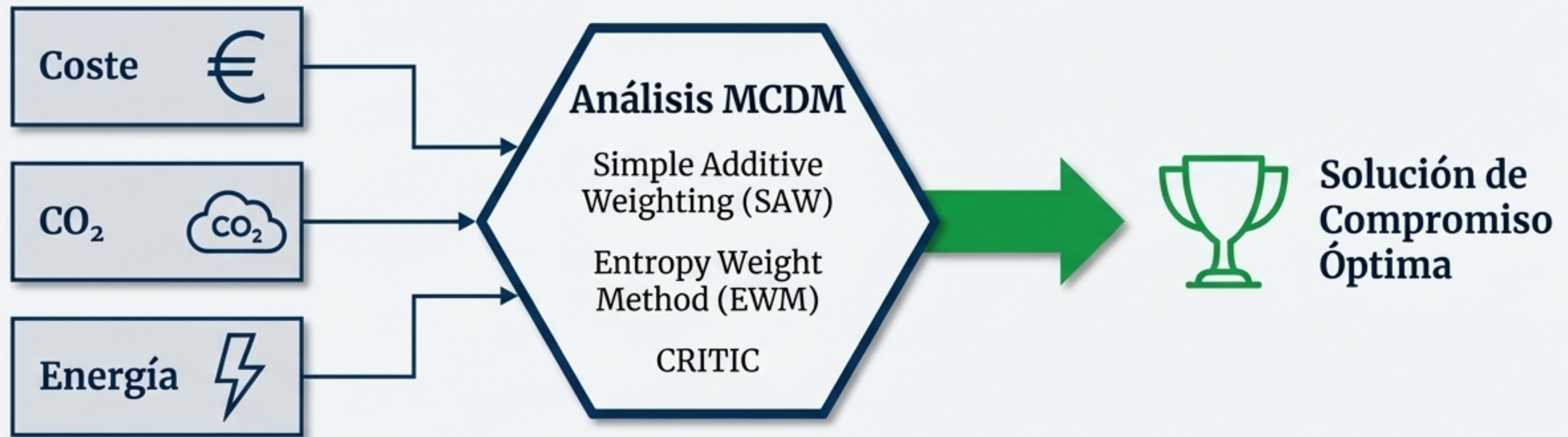
Ambos modelos son eficaces, pero destacan en diferentes aspectos del proceso de optimización.

Kriging		Redes Neuronales (RNA)	
	Más eficaz para identificar óptimos locales de forma precisa. Ideal para la fase de intensificación.		Mayor precisión en las predicciones absolutas (menor error MAE y RMSE). Ideal para una evaluación general del rendimiento.
	Puede presentar un mayor error en predicciones absolutas en comparación con las RNA.		Puede requerir múltiples ejecuciones para estabilizar los resultados debido a su naturaleza estocástica.

La elección del modelo depende del objetivo. Kriging es superior para la optimización intensiva, mientras que las RNA son preferibles para la predicción precisa.

El Panorama Completo: Encontrando el equilibrio con la Toma de Decisiones Multicriterio (MCDM)

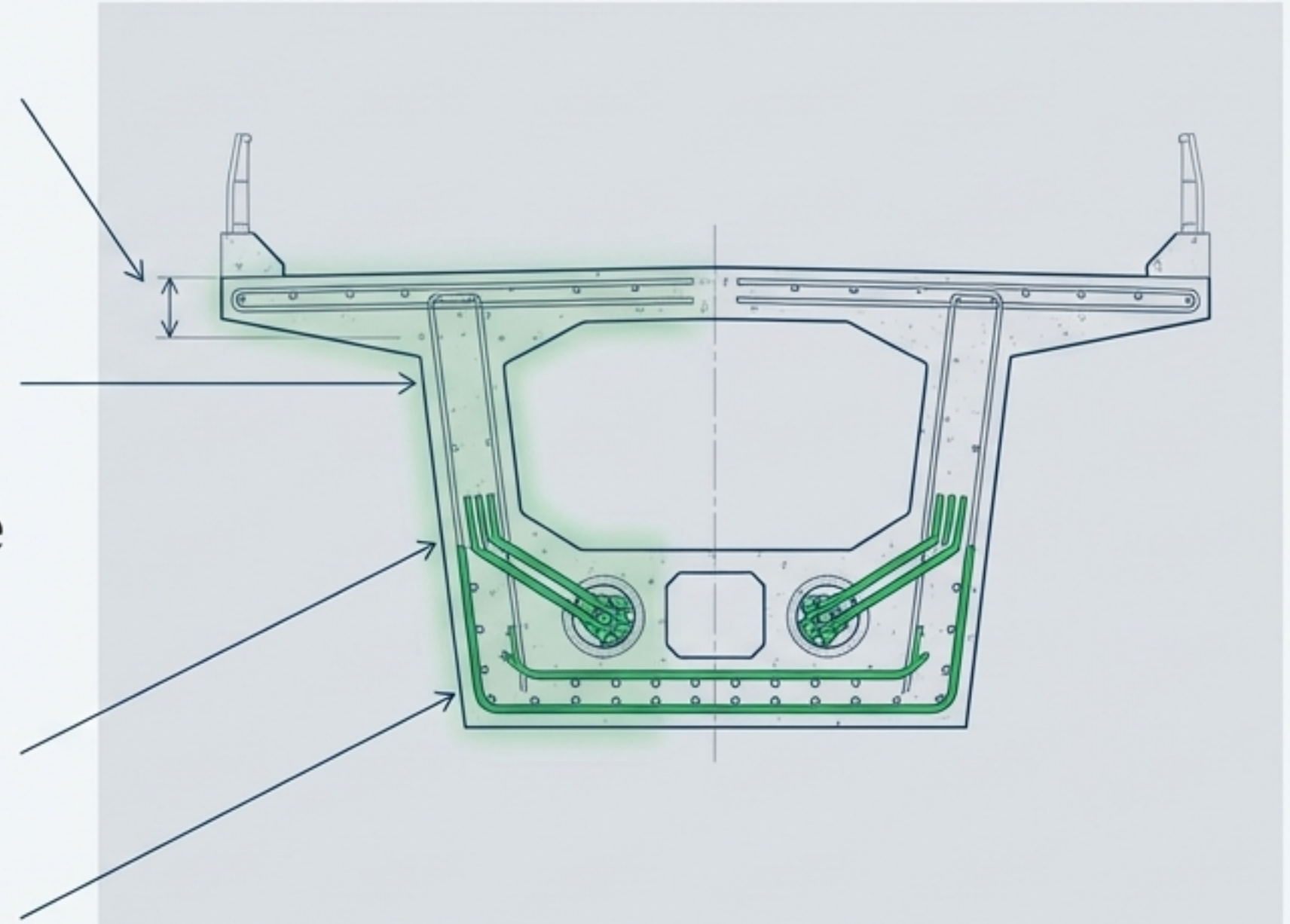
La investigación integra la optimización basada en Kriging con técnicas MCDM para evaluar y clasificar diseños considerando simultáneamente objetivos económicos, ambientales y estructurales.



Este enfoque permite una evaluación exhaustiva de las alternativas, gestionando los trade-offs entre coste, impacto ambiental y rendimiento estructural para facilitar la selección de diseños óptimos que se ajusten a los objetivos de sostenibilidad.

Directrices prácticas para el diseño de puentes losa más sostenibles y eficientes

- **Esbeltez (Canto/Luz):** Buscar relaciones altas, en el rango de **$1/28$ a $1/30$** , para minimizar el consumo de material.
- **Hormigón:**
 - **Cantidad:** Reducir el volumen a valores inferiores a **$0.60 \text{ m}^3/\text{m}^2$** .
 - **Resistencia:** Utilizar grados **C-35 a C-40 MPa**, que ofrecen el mejor equilibrio entre rendimiento y sostenibilidad.
- **Armaduras:**
 - **Activa (Postesado):** Disminuir la cuantía por debajo de **17 kg/m^2** .
 - **Pasiva:** Aumentar la cuantía por encima de **120 kg/m^3** para compensar las reducciones anteriores.



Un marco computacionalmente eficiente para el diseño de puentes sostenibles

Contribución Principal

- ✓ Esta tesis demuestra que el modelado sustitutivo (Kriging y RNA) es un enfoque práctico y potente para la optimización multicriterio en el diseño de puentes.
- ✓ El marco de optimización en dos fases es una metodología robusta, eficiente y directamente aplicable a proyectos de infraestructura a gran escala.
- ✓ Se proporcionan directrices de diseño cuantificadas que equilibran coste, sostenibilidad y rendimiento estructural.

Futuras Líneas de Investigación

- ➔ **Análisis de Ciclo de Vida (ACV) Completo:** Integrar el mantenimiento, la deconstrucción y el reciclaje.
- ➔ **Nuevas Tipologías y Materiales:** Aplicar la metodología a otros tipos de puentes y explorar materiales de baja huella de carbono (hormigones verdes, etc.).
- ➔ **Herramientas en Tiempo Real:** Desarrollar herramientas que integren estos modelos de optimización directamente en el software de diseño de ingeniería.