

**La Frontera de Pareto en la Logística Global de Alto Rendimiento: Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo como Palanca Dual para la Rentabilidad y la Huella de Carbono**

**Autor: Jaime José Arias**

## **Contenido**

La Frontera de Pareto en la Logística Global de Alto Rendimiento: Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo como Palanca Dual para la Rentabilidad y la Huella de Carbono .....	1
Resumen .....	3
I. Introducción: El Imperativo Dual de la Logística Global.....	4
I.A. La Paradoja de la Velocidad Global y la Sostenibilidad .....	4
I.B. La Tesis Central: Sostenibilidad como Rentabilidad .....	5
II. Fundamentos Teóricos y la Formulación del Problema.....	5
II.A. Del Problema del Viajante (TSP) al Enrutamiento Altamente Restringido (TSPTW)5	
II.B. La Necesidad de las Metaheurísticas .....	6
III. Modelado Multiobjetivo: Cuantificando la Huella de Carbono y el Costo .....	8
III.A. Definición de las Funciones Objetivo Duales.....	8
III.B. El Rigor del Modelado de Carbono: GLEC y ISO 14083 .....	9
IV. Solución Algorítmica Multi-Objetivo: La Frontera de Pareto .....	11
IV.A. El Concepto de Dominancia y la Necesidad de NSGA-II .....	11
IV.B. Interpretación Estratégica de la Frontera de Pareto .....	11
V. Resultados y Análisis Estratégico: Optimizando los Nodos y los Modos de Transporte .....	13
V.A. El Clúster Logístico como Factor de Ahorro.....	13
V.B. Análisis de la Elección Modal (Modal Shift).....	13
V.C. El Valor Estratégico del Reporte ESG Asistido por IA.....	15
VI. Desafíos Técnicos y Direcciones Futuras .....	16
VI.A. Robustez y Escalabilidad de las Heurísticas .....	16
VI.B. Integración de Datos Dinámicos .....	16
VII. Conclusión: La Inteligencia Biológica al Servicio de la Logística del Mañana .....	17

## Resumen

Optimización Heurística en Logística Global: Reducción de la Huella de Carbono y el Costo Operacional mediante Algoritmos Genéticos Multi-Objetivo.

### 1. El Problema Base: De la Teoría a la Realidad Compleja

El reto logístico abordado trasciende el clásico Problema del Viajante (TSP). Se modela como un **Problema del Viajante con Ventanas de Tiempo (TSPTW) y Restricciones de Precedencia y Anclaje**. Esta formulación, que incorpora restricciones duras (como evitar zonas climáticas adversas o cumplir plazos comerciales fijos), eleva la complejidad del problema a la categoría NP-hard, volviendo ineficaces los métodos de optimización tradicionales.

### 2. La Solución Algorítmica: Inteligencia Biológica

Para manejar esta complejidad y los objetivos en conflicto, la investigación propone la aplicación de **Algoritmos Genéticos de Clasificación No Dominada (NSGA-II)**, una metaheurística inspirada en la evolución biológica. Este algoritmo es capaz de explorar eficientemente el vasto espacio de soluciones, garantizando que todas las rutas propuestas:

- Cumplan con todas las restricciones de tiempo y clima.
- Minimicen simultáneamente el Costo Operacional y la Huella de Carbono.

### 3. Resultados y el Impacto Dual (Frontera de Pareto)

El algoritmo no encuentra una única ruta "perfecta", sino un conjunto de soluciones óptimas de compromiso conocido como la **Frontera de Pareto**. Esto permite a los gestores logísticos seleccionar estratégicamente el punto de equilibrio entre el costo y el impacto ambiental.

La ventaja principal se basa en dos pilares:

1. **Reducción de Distancia y Clustering:** La optimización de la secuencia de nodos minimiza los saltos transcontinentales innecesarios, lo que reduce la distancia recorrida y genera ahorros directos en combustible.<sup>1</sup>
2. **Facilitación del Cambio Modal (Modal Shift):** El ahorro de tiempo obtenido permite que la carga sea transferida de modos de alto costo y alto carbono (como el aéreo, que emite hasta 500 gramos de  $\text{CO}_2$  por tonelada-kilómetro) a modos de bajo costo y bajo carbono (como el marítimo, que emite entre 10 y 40 gramos de  $\text{CO}_2$  por tonelada-kilómetro<sup>2</sup>).

La eficiencia generada por el algoritmo se traduce directamente en rentabilidad. Estudios en problemas de enrutamiento multimodal similares sugieren un

## I. Introducción: El Imperativo Dual de la Logística Global

### I.A. La Paradoja de la Velocidad Global y la Sostenibilidad

La logística de alto rendimiento en cadenas de suministro globales, especialmente en operaciones internacionales sensibles al tiempo, constituye un caso de estudio paradigmático en la gestión de la cadena de suministro. Este entorno exige una velocidad innegociable y una precisión extrema en el movimiento de equipos y productos a través de múltiples continentes, frecuentemente bajo calendarios de entrega altamente restrictivos. Históricamente, esta necesidad de rapidez se ha satisfecho principalmente mediante el transporte aéreo, lo que ha generado una huella de carbono sustancial y elevados costos operativos.<sup>1</sup>

Sin embargo, en la última década, la presión por la responsabilidad ambiental, social y de gobernanza (ESG) ha llevado a grandes organizaciones logísticas a reconocer la necesidad de transformar sus modelos operativos.<sup>2</sup> Los compromisos empresariales globales implican ahora una reducción absoluta de las emisiones de carbono antes de considerar mecanismos de compensación creíbles.

El progreso en esta área, impulsado por la optimización logística avanzada, ya es cuantificable en la industria. Muchos operadores han demostrado que, a pesar del crecimiento en la demanda y la expansión de sus redes, la reestructuración estratégica de los flujos de carga es el motor principal para el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad, demostrando que la eficiencia ambiental no es incompatible con la expansión de la actividad económica.



## I.B. La Tesis Central: Sostenibilidad como Rentabilidad

El enfoque tradicional ve la sostenibilidad como un costo o una restricción operativa impuesta por regulaciones ambientales. No obstante, el análisis de la optimización heurística en la logística global revela una poderosa sinergia: la sostenibilidad es, en sí misma, un motor de rentabilidad.

La meta de reducir la huella de carbono en el transporte se logra principalmente minimizando la distancia recorrida y optimizando el consumo de combustible.<sup>3</sup> Al abordar estos factores, se genera un ahorro directo y significativo en los costos operativos (OPEX), particularmente en combustible y tarifas de transporte.<sup>3</sup> En la práctica, las empresas que adoptan prácticas eficientes, como la optimización de rutas, experimentan menores costos de consumo de combustible, reducción de costos laborales y minimización del uso vehicular, lo que se traduce en ahorros sustanciales a largo plazo.<sup>3</sup>

Por lo tanto, el desafío logístico debe formularse como un problema de optimización multiobjetivo (MOO). El objetivo ya no es solo encontrar la ruta más rápida o más barata, sino resolver una doble minimización simultánea: Minimizar el Costo Operacional (\$C\$) y Minimizar la Huella de Carbono (\$E\$). Este enfoque asegura que cada decisión logística contribuya de manera efectiva a los resultados financieros y ambientales.

## II. Fundamentos Teóricos y la Formulación del Problema

### II.A. Del Problema del Viajante (TSP) al Enrutamiento Altamente Restringido (TSPTW)

El diseño de rutas logísticas internacionales, que exige el movimiento secuencial de carga y equipos entre múltiples nodos (terminales, almacenes, destinos finales), se basa conceptualmente en una extensión del Problema del Viajante (Traveling Salesman Problem, TSP). En su forma más pura, el TSP busca la ruta más corta que visita un conjunto de "ciudades" (puntos de demanda) y regresa al punto de partida.

Sin embargo, la gestión de la cadena de suministro global raramente se limita a la minimización de la distancia. El problema real al que se enfrentan las organizaciones es un **Problema del Viajante con Restricciones**, donde el objetivo de **Minimizar la distancia total de viaje** (para ahorro de costos y combustible) está subordinado a un conjunto de restricciones operacionales estrictas:

- **Restricciones de Ventana de Tiempo (TSPTW):** Cada nodo (destino o punto de transbordo) debe ser visitado dentro de un intervalo de tiempo específico. Esto incluye la necesidad de respetar ventanas de disponibilidad de recursos o **evitar condiciones climáticas estrictas** (como monzones o nieve) que hacen una ruta inviable o peligrosamente costosa. El Problema del Viajante con Ventanas de Tiempo (TSPTW) fusiona el TSP con un problema de programación (*scheduling*), elevando drásticamente su complejidad.
- **Restricciones de Precedencia y Anclaje:** Existen reglas comerciales y operativas innegociables que dictan un orden parcial de las visitas (por ejemplo, la ruta debe comenzar

en el nodo A y terminar en el nodo Z, o el envío de la carga 1 debe preceder al envío de la carga 2).

La coexistencia de estos requisitos—múltiples objetivos (costo y emisiones) y múltiples restricciones duras (tiempo, clima y anclaje)—lo convierte en un problema de optimización de una complejidad exponencial. En el contexto más amplio, este problema se asemeja a una variante compleja del Problema de Enrutamiento de Vehículos (Vehicle Routing Problem, VRP)<sup>1</sup>, específicamente un Multi-depot Multi-Travelling Salesman Problem (M-mTSP) con modos de transporte y restricciones temporales variables. Esta formulación altamente restringida es la que justifica la necesidad de utilizar metaheurísticas avanzadas como los Algoritmos Genéticos.

## **II.B. La Necesidad de las Metaheurísticas**

Los problemas de VRP, especialmente aquellos con múltiples objetivos y restricciones complejas (como ventanas de tiempo flexibles y modos de transporte variables), son intrínsecamente difíciles de resolver y se clasifican como NP-hard. Esto significa que, a medida que el número de nodos o la complejidad del problema aumenta, los métodos de optimización exactos se vuelven computacionalmente inviables, incapaces de encontrar una solución en un tiempo razonable.

Aquí es donde las metaheurísticas, como los Algoritmos Genéticos (GA), demuestran su valor. Inspirados en los procesos de la evolución biológica, los GA ofrecen un enfoque robusto y práctico para explorar eficientemente grandes espacios de soluciones.<sup>7</sup>

## **La Arquitectura y Eficiencia del Algoritmo Genético**

En el contexto del problema de enrutamiento, la solución (el "cromosoma") representa la secuencia de la ruta logística. Mediante operadores fundamentales como el *crossover* (cruce, que combina segmentos de rutas de dos soluciones parentales) y la *mutation* (mutación, que introduce pequeñas variaciones aleatorias), el algoritmo evoluciona poblaciones de soluciones a lo largo de sucesivas iteraciones.

Históricamente, los Algoritmos Genéticos han sido valorados por su velocidad, su relativa facilidad de implementación y su eficiencia computacional para abordar el TSP. No obstante, el rendimiento puede variar: estudios que comparan GA con otras metaheurísticas como la Optimización por Colonia de Hormigas (ACO) han observado que, si bien el GA es rápido, el ACO puede ofrecer un mejor rendimiento de convergencia y a menudo encuentra distancias más cortas para el TSP, aunque a costa de un tiempo de ejecución potencialmente mayor.

Para problemas de alta complejidad y múltiples objetivos, la solución óptima a menudo reside en el uso de enfoques híbridos o algoritmos genéticos avanzados. El hecho de que la problemática de la logística global requiera minimizar tanto el costo como el impacto ambiental implica que la metaheurística debe ser capaz de gestionar esta complejidad. Por esta razón, la migración desde un GA simple hacia un Algoritmo Genético de Clasificación No Dominada (Non-

dominated Sorting Genetic Algorithm II o NSGA-II) se establece como una recomendación técnica crítica para garantizar la optimización simultánea de los múltiples objetivos. El NSGA-II no solo busca soluciones rápidas, sino que se enfoca en la calidad de la solución y la diversidad de la "Frontera de Pareto", es decir, el conjunto de mejores compromisos entre los objetivos de costo y emisiones.

### **III. Modelado Multiobjetivo: Cuantificando la Huella de Carbono y el Costo**

La transición de un problema de ruta simple al de una optimización dual exige una cuantificación precisa tanto del costo financiero como del impacto ambiental asociado a cada segmento de transporte.

#### **III.A. Definición de las Funciones Objetivo Duales**

Para que el algoritmo genético avanzado pueda operar, requiere funciones de evaluación explícitas para ambos objetivos.

1. Función Objetivo de Costo (C): Minimización del Gasto Operacional.

La minimización del costo total de la operación logística se modela considerando los costos variables y fijos a lo largo de la cadena de suministro global.

$$C = \sum_{i,j,m} (\text{Costo de Transporte}_{ijm}) + \sum_i (\text{Costo de Transbordo}_i) + \text{Costos Fijos}$$

El Costo de Transporte ( $C_{ijm}$ ) es la variable más crítica, ya que cambia drásticamente dependiendo del modo de transporte  $m$  (aéreo, marítimo o terrestre) utilizado para moverse del punto de origen  $i$  al destino  $j$ . Además, debe penalizarse el cambio de modalidad logística o de vehículo en un punto intermedio, representado por el Costo de Transbordo ( $h_i$ ).

2. Función Objetivo de Emisiones (E): Minimización de la Huella de Carbono.

La minimización de la huella de carbono se centra en el total de gases de efecto invernadero emitidos, medidos en tCO<sub>2</sub>e.

$$E = \sum_{i,j,m} (\text{Distancia}_{ijm} \times \text{Factor de Emisión}_m \times \text{Carga})$$

El Factor de Emisión es un parámetro que cuantifica las emisiones de tCO<sub>2</sub>e generadas por unidad de distancia y peso de carga para un modo de transporte específico  $m$ . Minimizar la distancia es fundamental, pero la selección del modo  $m$  tiene el impacto más profundo en esta función.

La siguiente tabla resume los parámetros críticos para la formulación del problema de optimización multi-objetivo, subrayando la interconexión entre las variables de costo y tiempo.

## Parámetros Clave de la Optimización Multi-Objetivo

Parámetro	Definición Técnica	Relevancia en Logística Global
Costo de Transporte ( $C_{ijm}$ )	Costo del viaje $i \rightarrow j$ por modo $m$ .	Determina la viabilidad financiera de cada segmento de ruta.
Tiempo de Transporte ( $t_{ijm}$ )	Horas requeridas para el viaje $i \rightarrow j$ por modo $m$ .	Restricción dura esencial para cumplir con los <i>deadlines</i> de entrega.
Factor de Emisión	$\text{CO}_2\text{e}$ por unidad de distancia y peso por modo $m$ .	Permite la cuantificación de $E$ , crítica para el reporte de sostenibilidad.
Costo de Transbordo ( $h_i$ )	Costo de cambio modal en terminal $i$ .	Penaliza la complejidad operativa de los cambios entre modos (ej. camión a barco).

### III.B. El Rigor del Modelado de Carbono: GLEC y ISO 14083

Para que los resultados de la simulación algorítmica sean válidos, auditables y aptos para el reporte ESG (Ambiental, Social y de Gobernanza), deben basarse en metodologías de cuantificación de carbono reconocidas globalmente.<sup>2</sup>

El estándar de facto en la industria logística es el Marco del Consejo Global de Emisiones Logísticas (Global Logistics Emissions Council, GLEC Framework), que proporciona una metodología armonizada para calcular y reportar emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo de cadenas de suministro multimodales.<sup>11</sup> A partir de 2023, el Marco GLEC se ha alineado completamente con la nueva norma ISO 14083, la cual establece los requisitos para la cuantificación y reporte de emisiones de GEI en el transporte.<sup>11</sup>

La adopción de esta metodología es fundamental porque descompone el movimiento de carga en Elementos de la Cadena de Transporte (TCEs), que son segmentos donde la carga se mueve por un único vehículo o se procesa en un solo centro (hub).<sup>12</sup> Este enfoque estructurado permite a los planificadores logísticos de la cadena de suministro global:

1. **Localizar Puntos Calientes (Hotspots):** Identificar qué segmentos de la cadena (por ejemplo, el transporte aéreo transcontinental o la distribución terrestre local) son los mayores contribuyentes a las emisiones.<sup>12</sup>
2. **Modelar Cambios Modales (Modal Shifts):** Realizar comparaciones precisas entre diferentes opciones de transporte.

### El Costo Oculto de la Modalidad: Air vs. Sea

El GLEC Framework pone de relieve la disparidad masiva en los factores de emisión entre los diferentes modos de transporte. Esta disparidad no es solo ambiental, sino económica.

El transporte aéreo de carga, si bien es el más rápido, es el más intensivo en carbono, produciendo aproximadamente 500 gramos de CO<sub>2</sub> por tonelada-kilómetro de transporte. En marcado contraste, el transporte marítimo (*sea shipping*) es drásticamente más limpio, emitiendo solo entre 10 y 40 gramos de CO<sub>2</sub> por kilómetro de carga.

Esta diferencia en emisiones refleja una disparidad similar en el costo. La carga aérea es sustancialmente más costosa que la marítima, a menudo por un factor de 10 a 20 veces, dependiendo de la ruta. Por lo tanto, cualquier optimización del *scheduling* o de la secuencia de rutas que permita un *Modal Shift* (un cambio de Aire a Mar) automáticamente genera dos beneficios:

1. Una reducción drástica y exponencial de las emisiones de carbono.
2. Una reducción directa y significativa de los costos operativos.

La optimización heurística aplicada a la secuencia de nodos de la red logística, al agrupar geográficamente las entregas o los movimientos de inventario, maximiza el tiempo disponible para el tránsito. Esta elasticidad temporal es la que permite el uso de modos de transporte más lentos y más baratos, como el marítimo, transformando así la estructura de costos operativos de toda la temporada de entregas.

## **IV. Solución Algorítmica Multi-Objetivo: La Frontera de Pareto**

### **IV.A. El Concepto de Dominancia y la Necesidad de NSGA-II**

En el ámbito de la Optimización Multi-Objetivo (MOO), el objetivo no es hallar una única solución perfecta, sino un conjunto de soluciones que representan el mejor compromiso posible entre objetivos en conflicto (en este caso, costo vs. emisiones). Una solución es considerada "óptima de Pareto" o "no dominada" si no se puede mejorar en una función objetivo (por ejemplo, reducir el costo) sin deteriorar al menos otra función objetivo (por ejemplo, aumentar las emisiones).<sup>14</sup>

Para descubrir este conjunto de soluciones de compromiso, los investigadores recurren a algoritmos avanzados como el Algoritmo Genético de Clasificación No Dominada II (NSGA-II), que se ha convertido en la herramienta estándar para resolver los desafíos de optimización multi-objetivo inherentes al VRP.<sup>15</sup>

#### **Mecanismo del NSGA-II**

El NSGA-II opera sobre la población de soluciones candidatas utilizando un mecanismo de clasificación por frentes de Pareto. En lugar de una simple puntuación de aptitud, el algoritmo evalúa la dominancia de cada ruta (cromosoma) en relación con las demás.

1. **Clasificación No Dominada:** Las soluciones que no son dominadas por ninguna otra solución en la población se colocan en el "Primer Frente" (Frontera de Pareto). Las soluciones dominadas se clasifican en frentes sucesivos.<sup>16</sup>
2. **Distancia de Hacinamiento (Crowding Distance):** Para asegurar que las soluciones no se agrupen en un solo punto y que la Frontera de Pareto capturada sea lo más diversa posible, el NSGA-II utiliza un operador llamado Distancia de Hacinamiento. Este operador prioriza la selección de soluciones que están aisladas, lo que garantiza que se mantenga una amplia representación de los *trade-offs* disponibles a lo largo de la curva.<sup>16</sup>

Este proceso iterativo dota al NSGA-II de la capacidad de equilibrar la exploración (búsqueda de nuevas áreas) y la explotación (refinamiento de soluciones existentes) dentro del espacio de búsqueda, resultando en un frente de soluciones que es representativo y de alta calidad.<sup>15</sup> El NSGA-II es reconocido por su rápida velocidad de ejecución y buena convergencia en la determinación de este conjunto de compromisos óptimos.<sup>16</sup>

### **IV.B. Interpretación Estratégica de la Frontera de Pareto**

La Frontera de Pareto es una herramienta estratégica invaluable para la toma de decisiones. Es una representación gráfica que traza el límite de la eficiencia logística, permitiendo a los líderes de la cadena de suministro visualizar la relación de intercambio directa entre los costos operativos y las emisiones de carbono.

La elección de una solución a lo largo de esta frontera dependerá de la política de riesgo y

sostenibilidad de la organización:

1. **Estrategia Dominante en Costo:** Un punto en un extremo de la frontera representará la ruta más económica posible, que probablemente maximice la distancia marítima (lenta y barata), pero podría tener una huella de carbono residual considerable debido a las distancias o ineficiencias de transbordo.
2. **Estrategia Dominante en Carbono:** El otro extremo representaría la ruta más ecológica, quizás utilizando modos de transporte innovadores o rutas terrestres de baja emisión, pero que podrían implicar costos operativos significativamente mayores debido a la infraestructura o los tiempos.
3. **Solución de Compromiso (*Trade-Off*):** El punto más crucial a menudo se encuentra en la "rodilla" de la curva. Este es el punto de inflexión donde un pequeño incremento marginal en el costo (por ejemplo, un 1%) desbloquea una ganancia desproporcionadamente grande en sostenibilidad (por ejemplo, una reducción del 10% en emisiones), o viceversa.<sup>14</sup> Es en este punto de eficiencia donde se maximiza el retorno de la inversión para la sostenibilidad.

La implementación de modelos de optimización avanzados ya ha demostrado su potencial cuantificable. Un análisis en problemas de enrutamiento de vehículos (VRP) multimodales similares encontró que las soluciones obtenidas con NSGA-III (una evolución de NSGA-II) pueden ofrecer una reducción de costos de aproximadamente el 8% en comparación con la planificación basada en la lógica convencional (que se centra solo en la ruta más corta sin análisis costo-tiempo).<sup>5</sup> Este dato valida la tesis de que la optimización algorítmica produce ahorros financieros tangibles y no solo mejoras ambientales.

## V. Resultados y Análisis Estratégico: Optimizando los Nodos y los Modos de Transporte

### V.A. El Clúster Logístico como Factor de Ahorro

La estrategia más efectiva para minimizar los costos y la huella de carbono en la logística global es la reducción de los saltos transcontinentales innecesarios.<sup>1</sup> El algoritmo genético, al optimizar la secuencia de entregas o movimientos de inventario (el orden de los nodos a visitar), impone un reordenamiento geográfico o "clustering regional."

#### Impacto Dual de la Distancia

La minimización de la distancia total recorrida por la red logística tiene un efecto multiplicador en la dualidad Costo-Carbono:

1. **Reducción de Costos:** Menor distancia implica directamente una menor necesidad de combustible y menores tarifas asociadas al transporte, especialmente en modos caros como el aéreo o el marítimo.<sup>1</sup>
2. **Reducción de Carbono:** La minimización de la distancia es un pilar fundamental para reducir el total de CO<sub>2</sub>e emitidas.

Al agrupar geográficamente los destinos (por ejemplo, consolidando rutas en regiones continentales antes de realizar el salto transcontinental), se evita el movimiento repetitivo de grandes volúmenes de carga a través de océanos, lo que se traduce inmediatamente en una secuencia de ruta más eficiente y menos contaminante.

### V.B. Análisis de la Elección Modal (Modal Shift)

Si bien la minimización de la distancia es clave, la elección del modo de transporte es el factor más determinante en la reducción de la huella de carbono y, consecuentemente, en el ahorro de costos.

#### Los Hotspots de Carbono y la Estrategia Aérea

El transporte aéreo de carga, si bien necesario para ciertos productos críticos y sensibles al tiempo (los *hotspots* de carbono), es el modo de transporte con mayor impacto ambiental por unidad de carga.<sup>9</sup> La estrategia algorítmica más eficaz para alcanzar los objetivos duales de costo y sostenibilidad es la de **minimizar la dependencia de la carga aérea** mediante la optimización del tiempo de tránsito disponible.

La optimización heurística no solo sugiere una secuencia de rutas, sino que, crucialmente, asigna el modo de transporte más eficiente a cada segmento de la ruta. Esto se traduce en una política clara: reservar el transporte aéreo solo para el equipamiento más crítico que opera bajo restricciones de tiempo muy estrechas. Para el resto de la carga, la planificación algorítmica debe facilitar el cambio modal.

La siguiente tabla ilustra el impacto dual que informa las decisiones algorítmicas de enrutamiento:

Impacto Dual de la Modalidad de Transporte en Logística Global

Modo de Transporte	Emisión CO2e (g/ton-km)	Costo Relativo (Índice)	Implicación Logística
Carga Aérea	≈500	Alto (Índice 100)	Solo para movimientos urgentes; debe ser minimizado.
Transporte por Carretera	Medio	Medio	Esencial para la "última milla"; optimización de ruta crucial para ahorrar combustible. <sup>3</sup>
Carga Marítima	10 - 40	Bajo (Índice ≈5)	Modo ideal para movimientos de largo plazo entre clústeres regionales; debe ser maximizado.

La modelización del problema de optimización, al considerar el tiempo de transporte ( $t_{ijm}$ ) como una restricción dura, permite al algoritmo revelar la flexibilidad oculta en el sistema. Una solución no dominada en la Frontera de Pareto puede demostrar que optar por una ruta marítima, aunque solo sea unos pocos días más lenta que una ruta aérea, es diez a veinte veces más barata y limpia. Esto convierte la elasticidad temporal en un recurso estratégico.

### Clarificación de los Factores Específicos

Es importante notar que estos factores siempre se presentan como **rangos o promedios ponderados**, ya que dependen del tamaño del vehículo, el factor de carga (load factor) y el tipo de combustible.

Modo de Transporte	Valor Típico (g CO <sub>2</sub> e/t-km)	Comentario y Rango Real
Marítimo (Contenedor)	10 - 40 g CO <sub>2</sub> e/t-km	Este rango es preciso y refleja la alta eficiencia del transporte marítimo a gran escala. Es por ello que se considera la opción más sostenible.
Aéreo (Carga)	~50 g CO <sub>2</sub> e/t-km (Valor mencionado)	ATENCIÓN: El factor real para el transporte aéreo suele ser mucho más alto, típicamente entre 450 y 700 g CO <sub>2</sub> e/t-km. El valor de 50 g/t-km mencionado estaría en el rango de transporte ferroviario o un caso de muy alta eficiencia en transporte marítimo de corta distancia. Es fundamental utilizar los datos actualizados del GLEC para el cálculo, ya que el impacto del transporte aéreo es 10 a 20 veces superior al marítimo, lo cual es la base de la complejidad de la optimización multimodal.

**Conclusión:** Para la sección de metodológica de este informe, debes citar el **GLEC Framework** y utilizar los valores exactos (o rangos) proporcionados en la última versión de sus anexos o en los **DEFRA conversion factors**, que también son una fuente muy utilizada para cálculos de emisiones.

## **De la Eficiencia Operacional a la Resiliencia Estratégica**

La ventaja de utilizar metaheurísticas multi-objetivo no se limita a la mera reducción de costos y carbono. Al generar un frente completo de soluciones óptimas de Pareto, la organización obtiene una visión integral de los compromisos logísticos.

Si surgen imprevistos (como huelgas portuarias, retrasos aéreos o cierres de rutas), la gerencia logística puede seleccionar una ruta alternativa que ya se encuentra en el Frente de Pareto (una solución "cercana"), sabiendo de antemano el impacto preciso que tendrá esa elección en el costo y en las emisiones. Esta capacidad de elegir entre soluciones pre-optimizadas mitiga el riesgo y fortalece la resiliencia de la cadena de suministro, lo que se traduce en una ventaja competitiva significativa más allá del ahorro inmediato.<sup>3</sup>

## **V.C. El Valor Estratégico del Reporte ESG Asistido por IA**

La optimización algorítmica proporciona la base analítica necesaria para transformar los compromisos de sostenibilidad en acciones medibles y transparentes.

Al basar la cuantificación de las emisiones en estándares rigurosos y reconocidos globalmente como el GLEC Framework y la norma ISO 14083, los resultados del modelo NSGA-II son completamente auditables.<sup>11</sup> Esta transparencia y rigor analítico son esenciales para el reporte ESG, permitiendo a las organizaciones comunicar sus avances hacia las metas de descarbonización con credibilidad.

Para las organizaciones que optan por tratar el desempeño ESG no como una obligación, sino como una fuente de ventaja competitiva, la oportunidad para la creación de valor es inmensa.<sup>3</sup> Al demostrar un liderazgo tangible en la reducción de costos mediante la eficiencia impulsada por la IA, las empresas mejoran su imagen de marca, atraen a consumidores y capitales de inversión conscientes del medio ambiente, y se posicionan como líderes en un sector que enfrenta un escrutinio creciente sobre su impacto ambiental.<sup>3</sup>

## **VI. Desafíos Técnicos y Direcciones Futuras**

### **VI.A. Robustez y Escalabilidad de las Heurísticas**

Aunque el Algoritmo Genético es una herramienta poderosa y rápida para el TSP<sup>7</sup>, su aplicación a la logística global de alto rendimiento presenta desafíos técnicos inherentes, especialmente en problemas de enrutamiento a gran escala con un número elevado de variables y restricciones (como la coordinación simultánea de múltiples flujos de carga y entregas).

#### **Limitaciones de los GA Estándar**

Los GA simples, cuando se enfrentan a problemas de enrutamiento masivos, pueden experimentar el problema de la "catástrofe dimensional" o una convergencia insatisfactoria. Aunque un algoritmo de clasificación no dominada como el NSGA-II mejora la calidad de la solución y la diversidad, la búsqueda de soluciones sigue siendo susceptible de estancarse en óptimos locales.

#### **El Futuro Híbrido: Algoritmos Meméticos**

La investigación en optimización está migrando hacia soluciones híbridas para mitigar estas limitaciones. Los Algoritmos Meméticos (*Memetic Algorithms*, MA) combinan la capacidad de exploración global del GA con técnicas de optimización local. Por ejemplo, la aplicación de operadores de búsqueda local (como el operador 2-opt) puede utilizarse para refinar rápidamente las secuencias de rutas generadas por el GA, mejorando significativamente la calidad de la solución final y su estabilidad.

### **VI.B. Integración de Datos Dinámicos**

Los modelos TSP/VRP implementados con Algoritmos Genéticos generalmente operan bajo un marco de planificación estática, basándose en distancias y costos promedio.

No obstante, la realidad operativa está sujeta a una incertidumbre constante: tráfico variable, condiciones climáticas que afectan el transporte marítimo, y retrasos inesperados en los hubs de transbordo. La solución de Pareto calculada estáticamente puede perder su optimalidad ante estas variaciones.

La próxima generación de optimización logística exige la integración de metaheurísticas con el análisis de datos en tiempo real (*Real-time Data Analytics*). La tendencia es utilizar modelos de Inteligencia Artificial (IA) y Aprendizaje Automático (ML) para adaptar las rutas, los modos y los tiempos de transporte dinámicamente, asegurando que el plan logístico se ajuste continuamente a medida que las condiciones del entorno real evolucionan.<sup>4</sup> Esta integración robusta con el entorno operacional es esencial para el despliegue y el éxito continuo de los algoritmos de optimización en la logística global.<sup>18</sup>

## VII. Conclusión: La Inteligencia Biológica al Servicio de la Logística del Mañana

El análisis técnico y estratégico de la logística global de alto rendimiento confirma que la optimización heurística es una tecnología habilitadora para un futuro empresarial sostenible y rentable.

La optimización multi-objetivo, ejemplificada por la aplicación de algoritmos avanzados como el NSGA-II a una variante del Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP) multimodal, demuestra de manera concluyente que la eficiencia operativa y la responsabilidad ambiental no son metas mutuamente excluyentes, sino objetivos sinérgicos.

Al centrar el esfuerzo algorítmico en la doble minimización del Costo (C) y las Emisiones (E), el sistema descubre rutas que:

1. **Reducen Distancia:** La reorganización de la secuencia de nodos en clústeres geográficos minimiza los saltos transcontinentales, generando ahorros directos en costos de combustible y transporte.
2. **Facilitan el Cambio Modal Estratégico:** La elasticidad temporal generada por la optimización permite un cambio crucial de modos de transporte de alto impacto (carga aérea) a modos de bajo costo y bajo carbono (transporte marítimo), multiplicando los ahorros y las reducciones de emisiones (utilizando datos verificables del GLEC/ISO 14083).

Los resultados de esta estrategia de eficiencia dual son cuantificables y han sido demostrados por operadores líderes en la industria logística. Más allá de los resultados ambientales, el potencial de ahorro de costos operacionales se estima en cifras significativas, respaldado por estudios que muestran una posible reducción de costos de hasta el 8% en comparación con la planificación convencional.<sup>5</sup>

El uso continuo y la evolución hacia algoritmos híbridos y dinámicos, junto con el compromiso con estándares de reporte rigurosos (GLEC/ISO), posicionan a las organizaciones de logística global a la vanguardia. La inteligencia algorítmica, inspirada en procesos biológicos como los Algoritmos Genéticos, se convierte así en la palanca dual que impulsa la rentabilidad económica y el cumplimiento de los ambiciosos objetivos de descarbonización.

## Obras citadas

1. An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges - PubMed Central, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://PMC10103682/>
2. Multiobjective Optimization for Vehicle Routing Optimization ..., fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9851642/>
3. A Comparison of Metaheuristic Optimization Algorithms for Scale Short-Form Development, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://PMC7425332/>
4. A Comparison of ACO, GA and SA for Solving the TSP Problem - ResearchGate, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/337479986 A Comparison of ACO GA and SA for Solving the TSP Problem](https://www.researchgate.net/publication/337479986_A_Comparison_of_ACO_GA_and_SA_for_Solving_the_TSP_Problem)
5. Decarbonizing logistics: Charting the path ahead - McKinsey, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/decarbonizing-logistics-charting-the-path-ahead>
6. Multi-Objective Optimization of the Multimodal Routing Problem Using the Adaptive  $\epsilon$ -Constraint Method and Modified TOPSIS with the D-CRITIC Method - MDPI, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/15/12066>
7. Performance Comparison of Simulated Annealing, GA and ACO Applied to TSP, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/299446858 Performance Comparison of Simulated Annealing GA and ACO Applied to TSP](https://www.researchgate.net/publication/299446858_Performance_Comparison_of_Simulated_Annealing_GA_and_ACO_Applied_to_TSP)
8. How AI Is Turning ESG Into a Business Opportunity - C3 AI, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://c3.ai/blog/how-ai-is-turning-esg-into-a-business-opportunity/>
9. GLEC Framework 2025: The Ultimate Guide to ISO 14083 & Sustainable Logistics, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://searoutes.com/2025/09/11/glec-framework-2025-the-ultimate-guide-to-iso-14083-sustainable-logistics/>

10. Full article: Multi-objective Optimization for Green Delivery Routing Problems with Flexible Time Windows - Taylor & Francis Online, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08839514.2024.2325302>
11. A hybrid genetic algorithm for the min–max Multiple Traveling Salesman Problem - arXiv, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2307.07120>
12. CO2 Calculator: Carbon Emissions Calculator for Freight Shipping - SeaRates, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://www.searates.com/carbon-emissions-calculator/>
13. FreightosCO2 Emissions Sea & Air Freight Calculator, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://www.freightos.com/freight-resources/air-sea-freight-co2-emissions-calculator/>
14. Calculate & Report: GLEC Framework - Smart Freight Centre, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://www.smartfreightcentre.org/en/our-programs/emissions-accounting/global-logistics-emissions-council/calculate-report-glec-framework/>
15. A multi-objective optimization framework for reducing the impact of ship noise on marine mammals - arXiv, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://arxiv.org/html/2402.02647v2>
16. Applying NSGA-II to Vehicle Routing Problem with Drones Considering Makespan and Carbon Emission | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/369026209\\_Applying\\_NSGA-II\\_to\\_Vehicle\\_Routing\\_Problem\\_with\\_Drones\\_Considering\\_Makespan\\_and\\_Carbon\\_Emission](https://www.researchgate.net/publication/369026209_Applying_NSGA-II_to_Vehicle_Routing_Problem_with_Drones_Considering_Makespan_and_Carbon_Emission)
17. A Tutorial on the Design, Experimentation and Application of Metaheuristic Algorithms to Real-World Optimization Problems - arXiv, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://arxiv.org/html/2410.03205v1>
18. Artificial Intelligence in Logistics Optimization with Sustainable Criteria: A Review - MDPI, fecha de acceso: noviembre 28, 2025, <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/21/9145>