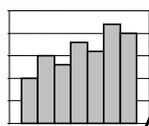




Universidad de Buenos Aires
Facultad de Ciencias Económicas



C E S P A

Centro de Estudios de la Situación
y Perspectivas de la Argentina

ISSN 1853-7073

Un Modelo de Costos para el Transporte Terrestre de Cargas en Argentina

Alberto Müller y Agustín Benassi

CESPA – FCE – UBA

Documento de Trabajo Nro. 41

Febrero 2015

Av. Córdoba 2122
2do. Piso, Departamentos Pedagógicos
(C 1120 AAQ) Ciudad de Buenos Aires
Tel.: 54-11-4370-6183 – E-mail: dircespa@econ.uba.ar

<http://www.econ.uba.ar/cespa>
www.blogdelcespa.blogspot.com



Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	3
ÍNDICE DE TABLAS	3
PRÓLOGO	3
RESUMEN	3
PARTE 1: ESTRUCTURA DEL MODELO	5
A. EL MODELO DE RED.....	5
1. <i>Red de tramos</i>	6
2. <i>Recorridos</i>	7
3. <i>Matriz OD</i>	7
4. <i>Parámetros</i>	8
B. CÁLCULO DE RECORRIDOS MÍNIMOS	9
PARTE 2: COSTOS DEL MODELO FERROVIARIO	11
A. COSTOS DE MOVILIDAD.....	11
1. <i>Personal</i>	14
2. <i>Combustible y lubricantes</i>	15
3. <i>Locomotoras y vagones</i>	15
4. <i>Mantenimiento</i>	16
B. COSTOS DE INFRAESTRUCTURA	16
1. <i>Vía</i>	16
2. <i>Desvíos de cruce</i>	19
3. <i>Mantenimiento</i>	19
C. COSTOS DEL TIEMPO Y OTROS	20
1. <i>Valor de la carga inmovilizada</i>	20
2. <i>Depósito</i>	22
3. <i>Flete corto</i>	23
PARTE 3: COSTOS DEL MODELO VIAL	24
I. COSTOS DE MOVILIDAD.....	24
II. COSTOS DE INFRAESTRUCTURA	27
PARTE 4: ESCENARIOS DE DERIVACIÓN	30
A. SITUACIÓN BASE (2010).....	30
B. MÁXIMA DERIVACIÓN POSIBLE AL MODO FERROVIARIO	31
C. DERIVACIÓN AL MODO FERROVIARIO CON MINIMIZACIÓN DE COSTOS.....	34
D. ANULACIÓN DEL MODO FERROVIARIO	37
PARTE 5: RESULTADOS OBTENIDOS	39
BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES	44
ANEXOS	45
A. PARÁMETROS DE LA RED FERROVIARIA	45
<i>Movilidad</i>	45
<i>Infraestructura</i>	46
<i>Tiempo y otros</i>	47
<i>Derivación</i>	47



<i>Categorías de productos</i>	48
B. PARÁMETROS DE LA RED VIAL.....	49
<i>Movilidad</i>	49
<i>Infraestructura</i>	49

Índice de figuras

Figura 1: Esquema del modelo de transporte terrestre de cargas, por modo de transporte	5
Figura 2: Esquema del modelo bimodal de transporte terrestre de cargas	6

Índice de tablas

Cuadro 1: Pseudocódigo del algoritmo de caminos mínimos de Dijkstra.....	9
Cuadro 2: Pseudocódigo para el cálculo de requerimientos de parque tractivo y rodante.....	12
Cuadro 3: Pseudocódigo del cálculo de costos de movilidad con reagrupamiento de trenes en los tramos.....	13
Cuadro 4: Pseudocódigo para el reagrupamiento de vagones en un tramo	14
Cuadro 5: Pseudocódigo para la búsqueda de la partición modal de menor costo total.....	35

Prólogo

El rol que debe o que puede tener el ferrocarril como modo alternativo al transporte vial se encuentra entre los debates menos saldados del sector en Argentina. Muchos argumentos se entrecruzan en la discusión entre defensores de un rol más activo del modo ferroviario y quienes aducen que no se encuentra económicamente justificado.

Algunos destacan el rol que puede haber tenido el ferrocarril en la integración territorial más allá del aspecto económico, aunque en este caso se refieren más frecuentemente a los servicios de pasajeros.

Este trabajo busca aportar elementos para la discusión acerca de la conveniencia económica que puede tener una eventual derivación de tráficos del modo vial al ferroviario para el transporte de cargas en Argentina.

Palabras clave: modelo de costos, cargas, red de transporte, ferrocarril, camión, Argentina

Resumen

El propósito de este trabajo es proponer un modelo para estimar el costo económico de operar una red bimodal de transporte terrestre de cargas (vial y ferroviaria) calibrado para el caso de

Argentina con datos de 2010. El objetivo principal de este modelo es analizar las variaciones del costo total de operar la red de transporte terrestre ante distintos escenarios de derivación de tráfico entre el modo vial y el ferroviario.

A lo largo del documento se describe la estructura del modelo, los algoritmos más relevantes utilizados y las fórmulas de cada uno de los rubros de costos calculados. La implementación de este modelo se programó en Python¹ y el código se encuentra disponible para su descarga².

Para el lector interesado en replicar el cálculo de costos mediante otras herramientas, este documento debería ser suficiente para encarar una implementación del modelo en cualquier otro lenguaje. A lo largo del trabajo se describe el modelo en forma genérica pero haciendo referencia a los nombres que adoptan las variables en la implementación desarrollada en Python, para aquellos que quieran explorarla.

En primer lugar se describe la estructura del modelo de simulación de la red bimodal de transporte terrestre: cuáles son sus componentes, qué tipos de datos utiliza y cómo se calculan los recorridos para cada par Origen-Destino.

En segundo lugar se describen los distintos rubros de costos para el caso del ferrocarril y las fórmulas utilizadas para costear cada uno de ellos. Se comentan las debilidades y puntos críticos de cada una, así como los supuestos adoptados para considerarlas como aproximaciones válidas. Se explican los algoritmos utilizados para el armado y rearmado de los trenes a lo largo de su recorrido y para el cálculo del costo de la red ferroviaria completa.

En tercer lugar se describen los distintos rubros de costos y las fórmulas utilizadas para el caso del modo vial, que reviste considerablemente menor complejidad que el caso ferroviario.

En cuarto lugar se describen los distintos escenarios simulados (situación base, derivación máxima de cargas al ferrocarril, derivación completa al modo vial y derivación al ferrocarril con minimización de costo total) y los algoritmos utilizados para su costeo.

Por último, se presentan los resultados comparados entre cada uno de los escenarios propuestos.

¹ Lenguaje de programación orientado a objetos

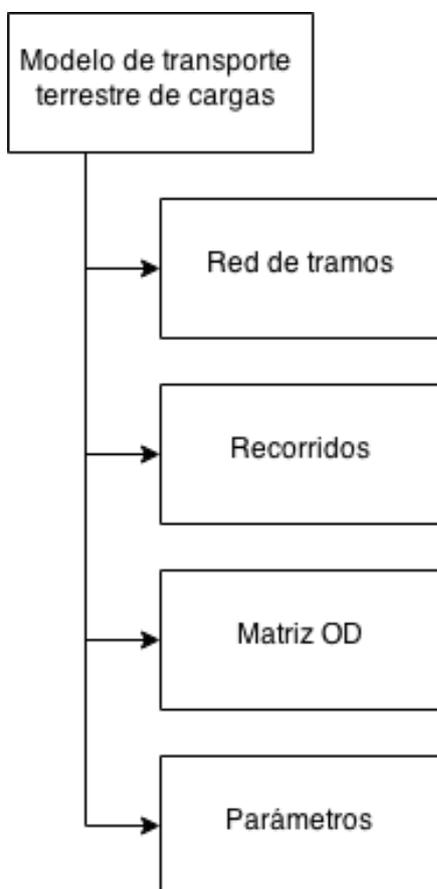
² www.github.com/abenassi/freight_transport_network

Parte 1: Estructura del modelo

A. El modelo de red

Para calcular los costos de operar la red bimodal de transporte, primero se construye una representación de cada una de las redes (vial y ferroviaria) sobre la cual se aplican las fórmulas y algoritmos de costeo.

Figura 1: Esquema del modelo de transporte terrestre de cargas, por modo de transporte



El modelo de red utilizado para cada modo de transporte consiste en una lista de “tramos” habilitados que conectan “nodos”. El origen y el destino de los pares OD (origen-destino) deben ser nodos de la red, conectados por al menos un tramo.

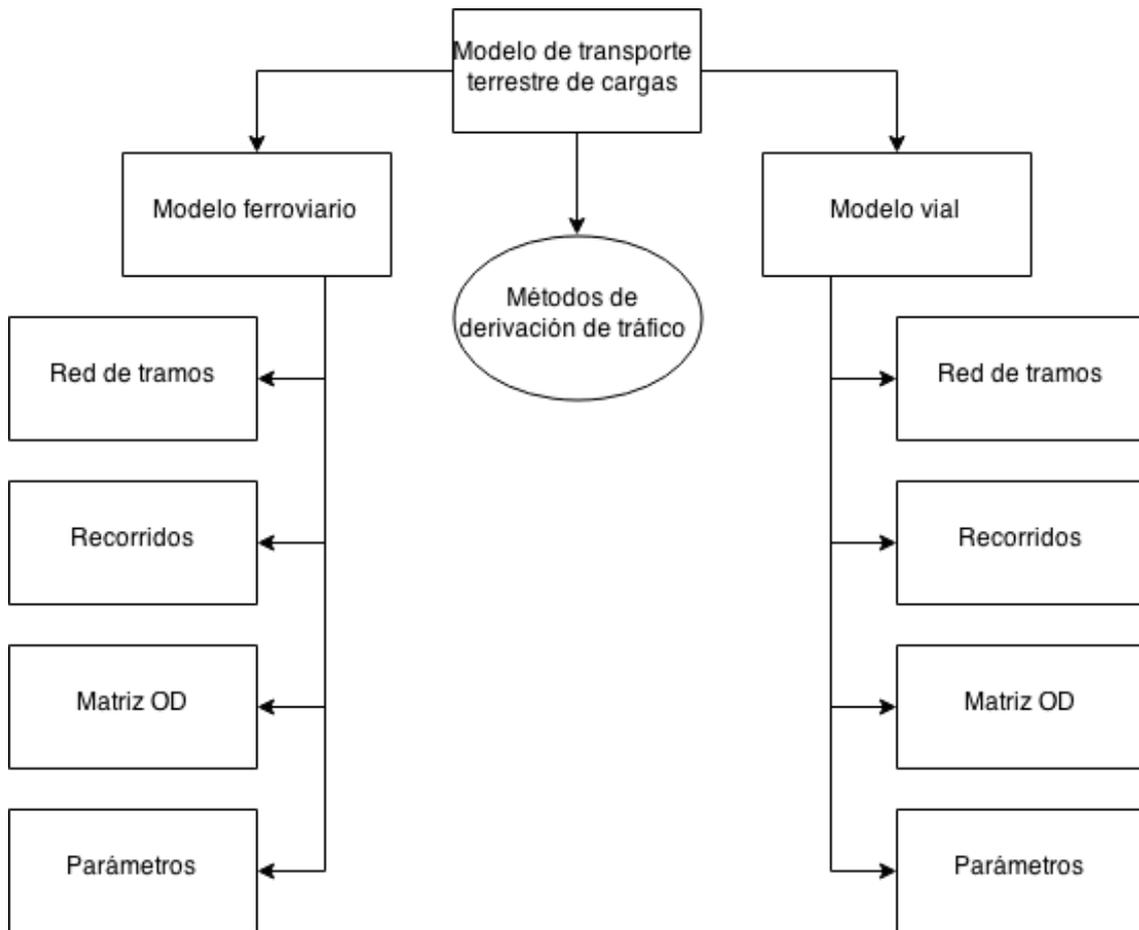
Para distribuir la carga de cada par origen-destino dentro de la red se le debe asignar un recorrido (conjunto de tramos sucesivos que conectan nodos adyacentes). En la mayoría de los casos se asignó a cada par el recorrido de distancia mínima; otros recorridos fueron provistos manualmente cuando la alternativa de distancia mínima no reflejaba adecuadamente la opción mayormente utilizada por los transportistas. Esto puede deberse a varios factores como la existencia de autopistas, peajes, el estado de la ruta, la cantidad de paradores, los servicios auxiliares disponibles, la pendiente, la dificultad del recorrido, etc.

Si bien el modelo utiliza mayormente el criterio de distancia mínima, se añadió la posibilidad de suministrar recorridos alternativos para corregir los casos más evidentes.

Por último el modelo incorpora una serie de parámetros suministrados por el usuario, necesarios para realizar los distintos cálculos de costos.

El modelo de la red terrestre de transporte de cargas podría representarse como la vinculación de la red ferroviaria y la red vial modelizadas bajo el esquema anterior, junto con los métodos que permiten derivar carga entre ambas redes.

Figura 2: Esquema del modelo bimodal de transporte terrestre de cargas



A continuación se describen las características y los campos de los elementos del modelo de red utilizado en ambos modos, mientras que los campos y métodos de costeo, así como los de derivación entre ambas redes, se explicarán más adelante.

1. Red de tramos

Los tramos de la red se introducen al modelo en un Excel llamado “railway_links” o “roadway_links” (dependiendo del modo de transporte) con tres campos:

- **Id (id_link):** El identificador de un tramo tiene la misma forma que el de un par OD “1-3” donde el primer nodo es siempre el de menor valor numérico.
- **Distancia (dist):** La distancia en km del tramo.
- **Trocha (gauge):** La trocha a la que pertenece el tramo. En el caso del modo vial se considera que la trocha es única.

Los tramos así caracterizados configuran una red que soporta las cargas pasantes de cada par OD. Al construir la representación de la red, el modelo asigna sucesivamente a cada uno de los tramos pertenecientes a un par OD su carga en toneladas. Esta operación se repite para cada par OD.

Una vez construida la representación de la red, cada tramo tendrá entonces un nuevo campo: **Toneladas (tons)** que reúne la información de las toneladas pasantes por el tramo, para cada categoría de producto.

2. Recorridos

Los recorridos manualmente calculados se introducen al modelo en un Excel llamado “railway_paths” o “roadway_paths” con tres campos:

- **Id (id_od)**³: El identificador de un par OD. Tiene las mismas características que las comentadas anteriormente para los pares OD.
- **Recorrido (path)**: Lista de nodos unidos por guión medio que representan la sucesión de nodos recorrida para llegar del origen al destino de la forma “010-001-003-002-022-021-057-014”.
- **Trocha (gauge)**: Cada recorrido corresponde a una sucesión de tramos de una misma trocha. En el caso del ferrocarril hay recorridos de trocha “ancha”, “media” y “angosta”. En el caso del modo vial sólo existe una “única” trocha.

Al momento de construir la representación de la red, se le asigna un recorrido a cada par OD tomado de la lista provista por el usuario o uno calculado por el algoritmo de recorridos mínimos (Ver el apartado “B. Cálculo de recorridos mínimos) en caso de que el usuario no haya proveído ninguno.

3. Matriz OD

Los pares origen-destino se introducen al modelo en un Excel llamado “railway_od_pairs” o “roadway_od_pairs” (dependiendo del modo de transporte) con tres campos:

- **Id (id_od)**⁴: El identificador de un par OD tiene la forma “1-3” donde el primer nodo es siempre el de menor valor numérico. El modelo trata indiferentemente el tráfico que va en un sentido o en otro, de manera tal que “1-3” hace referencia al mismo par OD que “3-1”, pero la convención adoptada es nombrar todos los pares OD con el nodo de menor numeración en primer lugar.
- **Toneladas (tons)**: Las toneladas transportadas por el par origen-destino. Recordemos que estas son la suma de las toneladas transportadas en ambos sentidos.
- **Categoría de producto (category)**: Los productos transportados se dividen en 5 categorías generales:
 1. Graneles
 2. Productos primarios no granarios
 3. Productos semi-manufacturados
 4. Productos manufacturados
 5. Productos desconocidos

³ Cuando se explique el contenido de una variable utilizada en el modelo se pondrá entre paréntesis el nombre utilizado en la implementación realizada en Python, inmediatamente después del nombre en español.

⁴ Cuando se explique el contenido de una variable utilizada en el modelo se pondrá entre paréntesis el nombre utilizado en la implementación realizada en Python, inmediatamente después del nombre en español.

Los pares OD así caracterizados son en realidad registros O-D-P (origen-destino-producto). En el modelo se tratarán como entidades autónomas los pares OD que transporten distintas categorías de producto.

Al construir la representación de la red, el modelo asignará nuevos campos a cada par OD:

- **Recorrido (path):** Es el recorrido por el que circula la carga del par OD. Puede ser proporcionado por el usuario o calculado por el modelo.
- **Tramos (links):** Lista de tramos que componen el recorrido.
- **Trocha (gauge):** Corresponde a la trocha del recorrido asignado.
- **Distancia (dist):** Corresponde al cálculo de la distancia del recorrido asignado (la suma de las distancias de los tramos que componen un recorrido)

4. Parámetros

Los parámetros son tomados de “railway_parameters” o “roadway_parameters” y componen una lista de datos exógenos al modelo, utilizados por este en distintas etapas del cálculo de costos y de otras tareas.

Los parámetros se componen de tres campos:

- **Nombre (id):** El nombre en inglés del parámetro utilizado dentro del modelo.
- **Valor (value):** El valor del parámetro.
- **Descripción (desc):** La descripción del parámetro.

A su vez, podemos dividir al total de los parámetros utilizados en distintos grupos. Los parámetros de la red ferroviaria se pueden dividir en 5 grupos⁵:

- **Movilidad (mobility):** Reúne a todos los parámetros necesarios para calcular los requerimientos de parque rodante y todos los costos relacionados con la movilidad.
- **Infraestructura (infrastructure):** Reúne a los parámetros necesarios para calcular los costos de infraestructura.
- **Tiempo (time):** Reúne a los parámetros relacionados con el tiempo y los costos relacionados.
- **Derivación (derivation):** Reúne a los parámetros utilizados en los criterios de derivación de tráfico al modo ferroviario.
- **Categorías (categories):** Reúne a los parámetros relativos a las categorías de productos utilizadas en el modelo.

Los parámetros de la red vial son considerablemente menores, ya que se han tomado funciones de costos muy agregadas para este caso y el modelo de costos subyacente es más sencillo. Se pueden dividir en 2 grupos de características similares al caso de la red ferroviaria⁶:

- **Movilidad (mobility)**
- **Infraestructura (infrastructure)**

⁵ Ver el anexo A para la lista completa de parámetros de la red ferroviaria

⁶ Ver el anexo B para la lista completa de parámetros de la red vial

B. Cálculo de recorridos mínimos

Para el cálculo de recorridos mínimos se utilizó una implementación en lenguaje Python del conocido algoritmo de recorridos mínimos de Edsger Dijkstra. Este consiste en recorrer sucesivamente los nodos vecinos de un nodo de partida recordando el recorrido más corto disponible entre el nodo inicial y el nodo que se está visitando.

A continuación se presenta un pseudocódigo aproximado de la implementación utilizada para encontrar el camino del nodo “a” al nodo “z” por el recorrido más corto posible dentro de un grafo.

Cuadro 1: Pseudocódigo del algoritmo de caminos mínimos de Dijkstra

```
dijkstra(grafo, nodo_a, nodo_z):  
  
    para todo nodo en el grafo:  
        distancia de nodo_a a nodo = infinito  
  
    distancia de nodo_a a nodo_a = 0  
  
    mientras haya nodos sin visitar:  
        visita el nodo de menor distancia al nodo_a  
  
        para todo nodo_vecino al nodo:  
            si el nodo_vecino fue visitado:  
  
                si la distancia del nodo al nodo_a más la distancia del nodo al  
                nodo_vecino es menor que la distancia del nodo_vecino al  
                nodo_a:  
  
                    actualiza la distancia y el recorrido del nodo_vecino al nodo_a,  
                    que ahora es a través del nodo  
  
    devuelve distancia_a_z, recorrido_a_z
```

En el caso de la red ferroviaria, cada trocha fue tratada como una subred aislada de las otras trochas. En este modelo no hay posibilidad de trasbordos entre trenes que circulan por distintas trochas, de manera que se abren 3 posibilidades de conexión entre nodos ferroviarios:

1. Los nodos ferroviarios se conectan a través de una sola trocha (tienen conexiones ferroviarias a una sola trocha en común). El recorrido mínimo es único en este caso.
2. Los nodos ferroviarios se conectan a través de más de una trocha (tienen conexiones ferroviarias a dos o más trochas en común). Existe un recorrido mínimo por cada trocha. En estos casos fue elegido el recorrido de la trocha más ancha posible (el orden de preferencias es: ancha > media > angosta).



3. Los nodos ferroviarios se conectan a trochas diferentes, no teniendo un recorrido ferroviario que pueda unirlos sin un trasbordo entre trenes de diferentes trochas. No existe recorrido alguno entre los nodos.

Parte 2: Costos del modo ferroviario

Una vez construida la representación de la red ferroviaria, deben implementarse métodos para calcular cada uno de los costos de operar las formaciones ferroviarias necesarias para todos los pares origen-destino, cuya carga circula por el conjunto de tramos ferroviarios habilitados.

Los costos de operar la red ferroviaria se dividen en tres grandes rubros:

- **Costos de movilidad:** Son aquellos que dependen esencialmente de las formaciones ferroviarias (el parque rodante) como el personal necesario para operarlos, el combustible, el costo de oportunidad de la inversión en material rodante y el mantenimiento.
- **Costos de infraestructura:** Son aquellos que dependen del uso de la infraestructura fija como el costo de oportunidad de la inversión en la vía, en los desvíos de cruce y el mantenimiento necesario.
- **Costos del tiempo y otros:** Esta categoría reúne costos de segundo orden de importancia como son los relacionados con el tiempo (el valor de la carga inmovilizada durante el trayecto y el costo de depósito de la carga en origen y en destino) y el flete corto.

A. Costos de movilidad

Los costos de movilidad dependen fundamentalmente de las características de la operación de formaciones ferroviarias, como se dijo anteriormente.

Trenes más largos ahorrarán en el uso total de locomotoras, combustible y personal de conducción, mientras que trenes más cortos ofrecerán una mayor frecuencia de servicios y disponibilidad de horarios al cargador.

La cantidad óptima de vagones por tren (sin tener en cuenta los volúmenes de carga relevantes y la frecuencia del servicio) es de 38 (parámetro “*wagons_per_locomotive*”). Se asume que cada “tren” estará arrastrado por una única locomotora; por simplicidad, no se tratará el caso de trenes de mayor tamaño arrastrado por dos (o más) locomotoras. Pero el modelo establece una frecuencia semanal mínima para cualquier registro origen-destino-producto (donde “producto” refiere a la “categoría de producto”, campo de los pares OD explicado anteriormente) de 2 trenes semanales.

Dependiendo del volumen de carga anual del par OD⁷ y del factor de carga aplicado (0.56 en este caso) quedará determinado el largo de los trenes a operar para servir al par OD. Esto significa que por debajo de cierto umbral (130.000 toneladas anuales, aproximadamente) se operarán trenes subóptimos (con menos de 38 vagones por locomotora).

Además, siempre que las cantidades a transportar por un par OD no coincidan con un múltiplo de la capacidad total de un tren óptimo (un tren con 38 vagones cargados al 56%) el último tren deberá cargar menos que el volumen óptimo y por lo tanto tendrá menos vagones.

⁷ En adelante se hablará indistintamente de “pares OD” o “registros origen-destino-producto”

Esta forma de calcular las formaciones ferroviarias (para cada O-D-P) generaría una buena cantidad de trenes cortos circulando por la red, implicando un sobredimensionamiento del parque de locomotoras necesario para operar el sistema.

En realidad, es frecuente que los trenes se rearmen varias veces antes de llegar a destino, uniendo trenes cortos para formar trenes más largos y así reducir la necesidad de locomotoras. Un vagón con carga que va de A a B puede llegar a destino habiendo integrado varios trenes distintos.

El algoritmo que calcula los costos de movilidad para operar una red ferroviaria determinada opera en dos etapas sucesivas:

- 1. Cálculo simple (sin rearmado de trenes).** Se arman las formaciones ferroviarias necesarias para servir a cada origen-destino-producto, como si estos fueran totalmente independientes entre sí, y se calcula el costo total de operar la red ferroviaria según las fórmulas que se verán más adelante para cada uno de los rubros de costos.

Cuadro 2: Pseudocódigo para el cálculo de requerimientos de parque tractivo y rodante

```

calculo_requerimientos_de_movilidad():

para todo par_od del modelo ferroviario:
    incrementar el parque tractivo y remolcado total necesario
    calcular la capacidad ociosa de tracción

para todo tramo del recorrido del par_od:
    si el par_od es reagrupable:
        incrementar la capacidad ociosa reagrupable del tramo

    si el par_od no es reagrupable:
        incrementar la capacidad ociosa no reagrupable del tramo
    
```

El cálculo del nuevo parque rodante requerido para cubrir los servicios necesarios de un par Origen-Destino (tanto vagones como locomotoras) se realiza según la siguiente fórmula:

$$\text{RedondearArriba} \frac{\text{ToneladasParOD}}{\text{CapacidadUnitaria}} * \text{HorasRequeridas}$$

- **RedondearArriba:** Devuelve el primer número entero mayor que el número decimal que se le entrega como parámetro.
- **ToneladasParOD:** Toneladas transportadas por el par OD.
- **CapacidadUnitaria:** Cantidad de toneladas que puede transportar una unidad de parque rodante (vagones o locomotoras).
- **HorasRequeridas:** Las horas requeridas se componen de:
 - **Horas de marcha**
 - **Horas de detención en cabeceras**
 - **Horas de detención en desvíos de cruce**



Debe destacarse que el parque rodante (tanto locomotoras como vagones) se expresa en forma de horas-unidades (horas-locomotora, horas-vagón). Estas horas de servicios de parque rodante requeridas por el sistema luego serán convertidas a unidades de parque rodante según las horas de disponibilidad anual que se estima que tiene una unidad de parque rodante.

El cálculo de la capacidad ociosa de tracción disponible se efectúa bajo la siguiente fórmula:

$$\text{NuevoParqueTractivo} * \text{CapacidadUnitaria} - \text{ToneladasParOD}$$

- **NuevoParqueTractivo:** Las locomotoras necesarias para operar el par OD.
- **CapacidadUnitaria:** La cantidad de toneladas que puede llevar una locomotora.
- **ToneladasParOD:** Las toneladas transportadas en el par Origen-Destino

La capacidad ociosa se expresa en toneladas y debe leerse como “toneladas que podrían transportarse sin incrementar el parque tractivo”. Una vez calculada, la capacidad ociosa pasa a ser un atributo de los tramos de la red utilizados por el nuevo par Origen-Destino. Este atributo es el que permite luego reagrupar trenes en cada tramo para eliminar la capacidad ociosa y por lo tanto reducir el requerimiento de parque tractivo.

Sin embargo, no todos los productos se consideran reagrupables. Aquellos productos de mayor valor agregado o, más precisamente, de mayor valor por tonelada, no es probable que pierdan tiempo a lo largo del recorrido buscando ocasiones donde poder formar trenes más grandes. La prioridad en este caso es unir Origen y Destino lo antes posible. Es por esto que la capacidad ociosa generada por los cálculos de un nuevo par OD se asigna a los tramos de su recorrido como capacidad “reagrupable” o “no reagrupable” dependiendo del tipo de producto transportado en el par OD y su clasificación.

2. **Cálculo optimizado (con rearmado de trenes).** Se recorren los tramos de la red testeando si reagrupar los trenes que pasan por ese tramo reduciría el costo total de operar la red o lo aumentaría (rearmar los trenes implica un costo en términos de tiempos adicionales de maniobra y un ahorro en términos de menor requerimiento de locomotoras). Si el costo total disminuye, los trenes pasantes por el tramo se reagrupan reduciendo el uso de locomotoras.

Cuadro 3: Pseudocódigo del cálculo de costos de movilidad con reagrupamiento de trenes en los tramos

```
calculo_optimizado_costos_movilidad():
```

```
  para todo tramo del modelo ferroviario:
```

```
    calcular costo de movilidad actual
```

```
    reagrupar tramo
```

```
    calcular nuevo costo de movilidad
```

```
  si el nuevo costo es mayor o igual que el costo actual:
```

```
    revertir reagrupamiento del tramo
```

Cuadro 4: Pseudocódigo para el reagrupamiento de vagones en un tramo

reagrupar(tramo):

calcular locomotoras eliminables por reagrupamiento de vagones
calcular vagones que serán reagrupados

eliminar capacidad ociosa del tramo

reducir los requerimientos de locomotoras eliminadas

aumentar los requerimientos de locomotoras por tiempo de reagrupamiento

aumentar los requerimientos de vagones por tiempo de reagrupamiento

Como dijimos, no todos los trenes son susceptibles de reagrupamiento. El modelo permite establecer cuáles categorías de producto son reagrupables y cuáles no a través del parámetro “**regroup_[número de categoría]**”. Sólo las categorías 1 y 2 (graneles y productos primarios no granarios) fueron establecidas como reagrupables, mientras que los productos semi-manufacturados, manufacturados y desconocidos sólo viajan en trenes especializados para esos registros origen-destino-producto.

A continuación se explicará el cálculo de cada uno de los costos de movilidad. Como se verá, todos ellos dependen (son funciones) del parque rodante, de manera que el cálculo de los requerimientos de movilidad (las horas de parque tractivo y remolcado requeridas para cubrir todos los servicios necesarios) es el paso más importante para luego calcular los costos.

1. Personal

El costo del personal dentro del modelo se calcula según la siguiente fórmula:

$$\text{PersonalPorLocomotora} * \text{CostoHoraPersonal} * \text{HorasOperaciónLocomotoras} * \text{RPC}$$

- **PersonalPorLocomotora (manpower_by_loc):** Parámetro. Consiste en la cantidad de personal de conducción que requiere un tren. En el modelo los trenes llevan siempre una única locomotora, por lo que se considera al personal como una variable asociada directamente a los requerimientos operativos del parque de locomotoras.
- **CostoHoraPersonal (manpower_cost_by_hour):** Parámetro. Es el costo de mercado promedio en dólares de una hora efectiva de trabajo (hora sobre el tren) de personal de conducción.
- **HorasOperaciónLocomotoras (operation_time):** Cálculo. Se calcula sumando tres categorías de horas de utilización de locomotoras.
 - **Horas de marcha (running)**
 - **Horas de detención en desvíos de cruce (idle_turnout)**
 - **Horas de detención por maniobras de reagrupamiento de trenes (idle_regroup)**

- **RPC (mobility_cost_rpc):** Parámetro. La Relación de Precio de Cuenta es un coeficiente utilizado para convertir un precio de mercado en precio de cuenta. Se trata de un parámetro que asume valores específicos para rubro de costo...

2. Combustible y lubricantes

El costo de combustible se calcula según la siguiente ecuación:

$$\text{CostoCombustiblePorKm} * \text{HorasMarchaLocomotoras} * \text{VelocidadMarcha} * \text{RPC}$$

- **CostoCombustiblePorKm (fuel_cost_by_km):** Parámetro. Proviene de la multiplicación entre los litros de combustible utilizados por km por una locomotora y el costo del litro en dólares. Se proporciona el resultado del cálculo al modelo directamente como un parámetro.
- **HorasMarchaLocomotoras (running):** Cálculo. El modelo lleva la cuenta de las horas de marcha de locomotoras requeridas para operar los servicios necesarios.
- **VelocidadMarcha (speed):** Parámetro. La velocidad de marcha de una locomotora.
- **RPC (mobility_cost_rpc):** Ver apartado anterior.

El costo del lubricante se calcula simplemente como una proporción del costo del combustible:

$$\text{RatioCostoLubricantes} * \text{CostoCombustible} * \text{RPC}$$

- **RatioCostoLubricantes (lubricants_fuel_ratio):** Parámetro. Es un coeficiente que determina que proporción del costo de combustible aproxima el costo de lubricantes.
- **CostoCombustible:** Cálculo explicado en la fórmula anterior.
- **RPC (mobility_cost_rpc):** Ver apartado anterior.

3. Locomotoras y vagones

La fórmula para calcular el costo anual equivalente de locomotoras y vagones es la misma:

$$\text{PrecioUnitario} * \text{FRC} * \text{CantidadUnidades} * \text{RPC}$$

- **PrecioUnitario (wagon_price o locomotive_price):** Parámetro. Es el precio de mercado de una unidad de parque rodante o tractivo.
- **FRC (crf):** Cálculo. Es el Factor de Recuperación de Capital que convierte un monto referido a un período de tiempo en un conjunto de pagos anuales; formalmente, su valor es igual al utilizado para el cálculo de la cuota de un préstamo en el denominado sistema francés (repago por cuota constante). El valor obtenido se denomina Costo Anual Equivalente, y comprende tanto la amortización del activo como el reconocimiento del costo de oportunidad por adelanto de recursos (Tasa de interés). Su cálculo depende de dos variables: la vida útil del equipo (**useful_life_wagon o useful_life_locom**) y la tasa de interés (**interest_rate**). Tanto la vida útil como la tasa de interés se proporcionan al modelo como parámetros.

$$\frac{\text{TasaInterés} * (1 + \text{TasaInterés})^{\text{VidaÚtil}}}{(1 + \text{TasaInterés})^{\text{VidaÚtil}} - 1}$$

- **CantidadUnidades (units_needed):** Cálculo. El modelo calcula las unidades de parque rodante o tractivo necesarias para cubrir los requerimientos de movilidad del modelo bajo la siguiente fórmula.

$$\frac{\text{HorasTotalesDeUso}}{\text{Disponibilidad}}$$

- **HorasTotalesDeUso (total_time):** Cálculo. Las horas totales de uso del parque rodante (tanto de locomotoras como de vagones) se componen de la suma de cuatro categorías de horas de requerimiento de material rodante o tractivo.
 - **Horas de marcha (running)**
 - **Horas de detención en desvíos de cruce (idle_turnout)**
 - **Horas de detención por maniobras de reagrupamiento de trenes (idle_regroup)**
 - **Horas de detención por maniobras en cabeceras (idle_heads)**
- **Disponibilidad (wagon_availability o locomotive_availability):** Parámetro. La disponibilidad de una unidad de parque rodante es la cantidad de horas que se prevé pueda prestar servicio en un año.
- **RPC (mobility_cost_rpc):** Ver apartado anterior.

4. Mantenimiento

El cálculo de los costos de mantenimiento del parque rodante viene dado por un parámetro de costo de mantenimiento unitario anual proporcionado al modelo.

$$\text{CostoUnitarioMantenimiento} * \text{CcantidadUnidades}$$

- **CostoUnitarioMantenimiento (maintenance_by_locomotive o maintenance_by_wagon):** Parámetro. El costo de mantenimiento de una locomotora o un vagón se calcula en forma externa al modelo y se adopta como parámetro.
 - **Costo de mantenimiento vagón:** El costo de mantenimiento de un vagón se compone de (a) un costo de materiales estimado por vagón-año y (b) un costo de mano de obra de mantenimiento estimado por vagón-año. En este trabajo se estimaron USD 743 de costo por materiales y 0,0797 unidades de personal afectadas a operaciones de mantenimiento por vagón.
 - **Costo de mantenimiento locomotora:** El costo de mantenimiento de una locomotora se calcula de la misma manera (un componente de materiales y otro de personal). En este caso se estima que el 2,28% del valor de una locomotora es el costo de los materiales y que cada una de ellas tiene 2,7 unidades de personal asignadas a su mantenimiento.

B. Costos de infraestructura

1. Vía

El costo anual equivalente de la vía es más complejo de calcular que los costos de movilidad vistos hasta este punto. En el modelo de costos se utilizan dos funciones de costeo de la vía distintas dependiendo de la densidad de tráfico que circule por la misma.

La función se aplica para cada uno de los tramos de la red. En primer lugar se chequea si la densidad de tráfico supera el umbral que determina si la vía se considera “principal” (**main_track**) o “secundaria”. A continuación se aplica la función de costos correspondiente. La suma del costo anual equivalente de cada tramo activo de la red (tramos sin tráfico se consideran inactivos y por lo tanto no suman costo alguno) compone el costo total de toda la red.

Los parámetros que deben proporcionarse al modelo para chequear si la vía es “principal” o “secundaria” son:

- **Factor de conversión de toneladas netas a brutas (net_to_gross_factor):** El factor de conversión se multiplica por la densidad neta de tráfico para devolver la densidad bruta estimada correspondiente al material rodante necesario para transportar la carga. Las toneladas brutas se componen de:
 - Peso de la carga
 - Tara de los vagones vacíos
 - Tara de las locomotoras
- **Densidad de tráfico neta mínima (main_min_density):** Densidad neta de tráfico a partir de la cual se considera que la vía es “principal”.

Costo anual equivalente de la vía primaria

El costo anual equivalente de la vía primaria es una función que depende de las toneladas brutas pasantes por un determinado tramo de vía; consiste de la periodización del costo de inversión en vía. A mayor densidad de tráfico, se considera que el costo del kilómetro de vía crece ya que deben adoptarse soluciones de mayor complejidad tecnológica; pero este crecimiento es menos que proporcional. Una vez calculado el costo de inversión de la vía, al igual que en los casos anteriores, se multiplica por el FRC para calcular el costo anual equivalente.

Sin embargo, el precio del km de vía llega a un máximo a partir del cual un incremento adicional de la densidad bruta de tráfico comenzará a provocar una caída en la vida útil del activo. Se considera que al superar las toneladas de diseño de la vía más cara disponible se estará restando vida útil en forma proporcional.

La función general tiene la siguiente forma:

$$CAE = PrecioKmVía * FRC * Distancia\ km * RPC$$

- **PrecioKmVía:** Cálculo. Mientras que la densidad bruta del tráfico que recorre el tramo multiplicada por la vida útil de la vía sea inferior al máximo proporcionado al modelo como un parámetro (**gross_tk_in_hq_track_lifetime**) la función del precio de la vía adopta la siguiente forma:

$$A + B * DensidadBruta * VidaÚtil$$

- **A (coef_a_track_cost):** Parámetro.
- **B (coef_b_track_cost):** Parámetro.
- **DensidadBruta:** Cálculo. El modelo lleva la cuenta de cuántas toneladas pasantes hay en cada tramo de la red y las convierte a toneladas brutas mediante el factor de conversión de toneladas netas a brutas (**net_to_gross_factor**).
- **VidaÚtil (useful_life_track):** Parámetro.

En caso de que la densidad bruta multiplicada por la vida útil supere el máximo, el precio de la vía será el correspondiente a una vía de alta calidad (**high_quality_track_price**).

- **FRC (crf):** Cálculo. La fórmula de cálculo del Factor de Recuperación de Capital se detalla en el apartado A.3 de esta sección. En el caso de la vía, a diferencia del cálculo del FRC para material rodante, la vida útil puede ser fija o variable. En el caso de que la densidad bruta multiplicada por la vida útil no supere el máximo, la vida útil utilizada para el cálculo es la proporcionada al modelo como parámetro (**useful_life_track**).

En el caso de que la densidad bruta supere el máximo, la vida útil comienza a descender proporcionalmente según la siguiente fórmula:

$$\frac{MaxTonKmBrutasTotales}{DensidadBruta}$$

- **MaxTonKmBrutasTotales (gross_tk_in_hq_track_lifetime):** Parámetro. Son las toneladas de diseño de un kilómetro de vía de alta calidad, es decir, las toneladas que dicha vía debería soportar a lo largo de toda su vida útil.
- **DensidadBruta:** Cálculo.
- **Distancia(km):** Dato. La distancia de cada uno de los tramos de la red es un dato proporcionado por el usuario al especificar la lista de tramos de la red.
- **RPC (infrastructure_cost_rpc):** Ver apartado A.1 de esta sección. En este caso el parámetro utilizado es la Relación de Precio de Cuenta para costos de infraestructura.

Costo anual equivalente de la vía secundaria

La función general de costeo de la vía secundaria es similar a la anterior, con un término de ajuste adicional y un precio fijo del km de vía.

$$CAE = PrecioKmVía * FRC * Distancia \text{ km} * \frac{DensidadBruta}{DensidadBrutaMínima} * RPC$$

- **PrecioKmVía (low_quality_track_price):** Parámetro. El precio de una vía de baja calidad se proporciona al modelo directamente como un parámetro.
- **FRC (crf):** Cálculo. El FRC se calcula tomando la vida útil (**useful_life_track**) y la tasa de interés (**interest_rate**) como parámetros fijos.
- **Distancia(km):** Dato.
- **DensidadBruta:** Cálculo.
- **DensidadBrutaMínima (gross_main_min_density):** Parámetro. La densidad bruta mínima para que una vía sea principal.
- **RPC (infrastructure_cost_rpc):** Ver apartado anterior.

El cociente entre la densidad bruta de un tramo de vía secundaria y la densidad bruta mínima para que una vía sea principal (o lo que es lo mismo, la densidad bruta máxima que puede soportar una vía para ser considerada secundaria) puede tomar, entonces, valores entre 0 y 1.

El costo de una vía secundaria se calcula, de esta manera, como una proporción del costo de la vía más barata disponible que depende de la densidad bruta que circula por la vía.

2. Desvíos de cruce

El costo de los desvíos de cruce se compone del CAE de la vía necesaria para construirlos y del costo salarial del personal afectado a su operación. La función de costeo se aplica sobre cada uno de los tramos de la red ferroviaria por separado y debe primero calcular cuántos desvíos de cruce son necesarios en ese tramo. El número de desvíos necesario depende de la longitud del tramo y de la densidad de tráfico (a mayor tráfico, la distancia entre cada desvío de cruce necesario disminuye).

Número de desvíos de cruce necesario

El usuario debe especificar dos parámetros para el cálculo de los desvíos de cruce: la máxima distancia entre desvíos (**turnout_freq**) y la máxima densidad que esa frecuencia de desvíos puede acomodar en la vía (**turnout_freq_max_density**).

Si la densidad de un tramo cae por debajo del máximo adoptado, la distancia entre desvíos será la predeterminada. En los casos donde la densidad exceda este parámetro, aumentará la frecuencia de los desvíos en la vía (disminuye la distancia entre ellos). La cantidad de desvíos se calculará entonces de manera tal que el tramo contenga un desvío cada cierta cantidad de kilómetros (la frecuencia de los desvíos).

$$\frac{Distancia(km)}{DistanciaMáximaDesvíos * \frac{DensidadBrutaMáximaDesvíos}{DensidadBruta}}$$

- **Distancia(km):** Dato.
- **DistanciaMáximaDesvíos (turnout_freq_max_density):** Parámetro. La distancia máxima a la que puede estar un desvío de cruce del siguiente.
- **DensidadBrutaMáximaDesvíos (turnout_freq_max_density):** Parámetro. La densidad bruta máxima que soporta una vía con desvíos de cruce colocados a la máxima distancia establecida.
- **DensidadBruta:** Cálculo.

Costo de los desvíos de cruce

Se considera que un desvío de cruce tiene el costo de un 1 km de vía “principal”, de manera tal que el CAE se calcula utilizando la fórmula correspondiente vista en el apartado anterior.

$$NúmeroDesvíos * CostoSalarialUnitario + CostoVíaPrincipalUnKm * RPC$$

- **NúmeroDesvíos:** Cálculo de cantidad necesaria de desvíos de cruce explicado en el punto anterior.
- **CostoSalarialUnitario (yearly_wages_by_turnout):** Parámetro. Costo anual del personal afectado a la operación de un desvío de cruce.
- **CostoVíaPrincipalUnKm:** Cálculo. Se calcula el costo de un 1 km de vía “principal” de la forma explicada en el apartado anterior (B.1).
- **RPC (infrastructure_cost_rpc):** Ver apartado anterior.

3. Mantenimiento

El cálculo de los costos de mantenimiento de la infraestructura proviene de ecuaciones de ajuste cuyos parámetros fueron estimados en base a datos disponibles. Se calculan por separado los

costos de mantenimiento de la vía y los de la infraestructura restante, pero la ecuación utilizada es la misma. Cada rubro, sin embargo, utiliza parámetros distintos.

$$\text{DensidadBruta}^a * b * \text{TonKmBrutas}$$

- **DensidadBruta:** Cálculo.
- **a (coef_a_track_maint_cost o coef_b_notrack_maint_cost):** Parámetro.
- **b (coef_b_track_maint_cost o coef_b_notrack_maint_cost):** Parámetro.
- **TonKmBrutas:** Cálculo. Las toneladas kilómetro brutas transportadas en el tramo ferroviario.

Finalmente, el costo de mantenimiento de la infraestructura se calcula aplicando la siguiente ecuación a cada tramo de la red ferroviaria.

$$\text{CostoMantenimientoVía} + \text{CostoMantenimientoNoVía} * \text{RPC}$$

- **CostoMantenimientoVía:** Cálculo explicado en la ecuación anterior.
- **CostoMantenimientoNoVía:** Cálculo explicado en la ecuación anterior.
- **RPC (infrastructure_cost_rpc):** Ver apartado anterior.

C. Costos del tiempo y otros

Esta tercera categoría de costos reúne rubros ajenos a la propia operatoria ferroviaria, que recaen sobre los usuarios del ferrocarril. Aquéllos relacionados con el valor del tiempo (“valor de la carga inmovilizada” y “depósito”) no deben entenderse como costos en forma absoluta sino como costos incrementales respecto de aquellos que también se generan en el modo de transporte vial. Así, el modelo terrestre de costos de transporte no computa este tipo de costos para el camión.

Los servicios ferroviarios, generalmente, no transportan la carga “puerta a puerta” ni ofrecen un cronograma perfectamente ajustado a la demanda de transporte de cargas. En buena medida esto es una desventaja del modo ferroviario respecto del vial. Consecuentemente existen al menos tres costos adicionales que el transporte por ferrocarril tiene respecto del camión:

- aquél que hace al valor de la carga inmovilizada mientras se encuentra en proceso de ser transportada
- el costo de depósito de cargas a la espera de un servicio ferroviario
- el costo del flete corto entre el punto de origen (o de destino) y la estación del ferrocarril.

A continuación se trata cada rubro por separado.

1. Valor de la carga inmovilizada

Este rubro computa el costo de oportunidad de tener el valor de la carga inmovilizado durante todo el tiempo que dura el proceso de transporte desde el depósito en origen, pasando por el tiempo de viaje y el depósito en destino.

El modelo realiza sus cálculos a partir de un parámetro proporcionado por el usuario que ya establece cuál es el valor de una tonelada de carga promedio inmovilizada durante un día

(**cost_of_immobilized_ton**). Antes de proceder con el cálculo del costo total, veremos cómo es que se llega a calcular este parámetro.

Valor diario inmovilizado de una tonelada de carga

El valor diario inmovilizado de una tonelada de carga es el costo de oportunidad que significa no disponer de ese valor invertido o colocado a la tasa de interés pertinente. Se calcula entonces como la multiplicación entre la tasa de interés diaria y el valor de mercado medio asignado a la carga.

$$TasaInterésDiaria * ValorMedioTonelada$$

Cabe destacar que este cálculo podría mejorarse sustancialmente si en lugar de aplicar un valor medio a la tonelada de carga, se hiciera una apertura por productos o categorías de productos.

Cálculo de tiempo de carga inmovilizada

Una vez que disponemos de este parámetro, sólo resta calcular cuántos días el valor de la carga permanece inmovilizado. Para esto deben calcularse los días de depósito necesarios tanto en origen como en destino y los días de viaje propiamente. La siguiente función de costos se aplica para cada uno de los pares Origen-Destino del modelo.

$$CostoTonDíaInmovilizada * Toneladas * DíasDepósito + DíasViaje * RPC$$

- **CostoTonDíaInmovilizada (cost_of_immobilized_ton):** Parámetro. El cálculo de este parámetro fue explicado en el punto anterior.
- **Toneladas:** Dato. Este dato es proporcionado por el usuario en la lista de los pares OD que configuran la matriz Origen-Destino.
- **DíasDepósito:** Cálculo. En primera aproximación, los días de depósito son una función de la frecuencia semanal de trenes disponible en Origen que parte *con la misma dirección* que la que debe seguirse para ir al Destino. Sin embargo, puede suceder que en el primer tramo de un recorrido haya altas frecuencias (debido a una fuerte densidad de carga que parte desde el Origen y toma ese tramo) pero luego algunos servicios siguen por recorridos diferentes, disminuyendo la densidad de los tramos por los que continúa el recorrido del par OD de referencia.

En este caso, la frecuencia de los servicios disponibles para cubrir ese par OD estará finalmente determinada por la densidad del tramo *menos denso* de todo el recorrido.

La frecuencia semanal de servicios se calcula entonces como una función de la densidad del tramo menos denso del recorrido de un par OD de la siguiente manera:

$$\frac{EscalaTramoMenosDenso}{\frac{CapacidadLocomotora}{RatioNivelCargaPromedio}} * \frac{1}{\frac{365}{7}}$$

- **EscalaTramoMenosDenso (lowest_link_scale):** Cálculo. El modelo chequea, para cada par OD, cuál es la densidad del tramo menos denso por el que pasa el recorrido del par OD.
- **CapacidadLocomotora (locomotive_capacity):** Parámetro. La capacidad de la locomotora provista por el usuario ya incorpora el ratio del nivel de carga promedio. Es decir, el parámetro no dice cuál es la máxima capacidad de carga

normal de una locomotora sino cuál es la capacidad media de una locomotora siendo que, de partir llena (llevando toda la carga que puede remolcar), la difícil existencia de carga de retorno haría que de media se observaran locomotoras con un cierto ratio de carga menor al 100%.

- **RatioNivelCargaPromedio (loading_ratio):** Parámetro. Indica el nivel de carga media que lleva una locomotora respecto de la máxima capacidad de carga posible. En este trabajo se utilizó un ratio de 0.56 lo que implica una muy baja tasa de cargas de retorno (un ratio de 0.50 indicaría la ausencia de cargas de retorno). El cociente entre la capacidad de una locomotora y el ratio de carga devuelve la capacidad máxima de una locomotora.
- **DíasViaje:** Cálculo. Los días de viaje consisten en la suma de los días de marcha, los días de paradas en desvíos de cruce y los días de reagrupamiento de trenes.
- **RPC (time_cost_rpc):** Ver apartado anterior.

2. Depósito

Para el cálculo de los costos de depósito ya se ha explicado en el apartado anterior cómo se calculan los días necesarios de depósito. El modelo toma el costo de la tonelada depositada por día como un parámetro a proporcionar por el usuario. La siguiente función se aplica a cada par Origen-Destino para calcular los costos totales de depósito:

$$\text{Toneladas} * \text{DíasDepósito} * \text{CostoUnitarioDepósito} * \text{RPC}$$

- **Toneladas:** Dato.
- **DíasDepósito:** Cálculo. Ver apartado anterior.
- **CostoUnitarioDepósito (deposit_cost_per_day_ton):** Parámetro. Es el costo en dólares de un día de depósito, para una tonelada. El cálculo de este parámetro se basa en el costo de oportunidad del empleo de la superficie necesaria para el depósito, según la siguiente fórmula:

$$\text{SuperficiePorTonelada} * \text{ValorUnitarioSuperficie} * \text{TasaInterésDiaria} * \text{RPC}$$

- **SuperficiePorTonelada:** La superficie de almacenamiento requerida por tonelada se puede aproximar dividiendo las toneladas que puede cargar un contenedor (21,6 ton) por los metros cuadrados de superficie que este ocupa (28,8 m²). Esto nos da aproximadamente 0,75 m² de superficie requerida por tonelada almacenada.
- **ValorUnitarioSuperficie:** El valor unitario de la superficie destinada al almacenamiento de cargas en depósito puede variar mucho dependiendo de la zona donde esté localizado. Para este trabajo se utilizó un valor de USD 300 por metro cuadrado.
- **TasaInterésDiaria:** En este caso se utilizó el equivalente diario de una tasa de interés anual del 10%.

Calculado de esta manera, el costo de depósito de una tonelada durante un día es de aproximadamente 6 centavos de dólar.

- **RPC (time_cost_rpc):** Parámetro.



3. Flete corto

El costo del flete corto se calcula para todas las categorías de producto salvo la número 1 (granos). Muchos cargadores de granos tienen acceso ferroviario directo por lo que, en promedio, el costo del flete corto es menos relevante para este tipo de producto. Esto es una característica específica de la aplicación del modelo de costos al caso relevante para este trabajo, pero debería ser modificado en el caso de utilizar este modelo para otros fines.

Para calcular los costos totales de flete corto de la red ferroviaria se aplica la siguiente función de costos a cada uno de los pares Origen-Destino:

$$\text{CostoFleteCortoPorTon} * \text{Toneladas} * \text{RPC}$$

- **CostoFleteCortoPorTon (short_freight_to_train):** Parámetro. El costo medio en dólares del flete corto por tonelada utilizado en este modelo es de USD 1,5.
- **Toneladas:** Dato.
- **RPC (time_cost_rpc):** Parámetro.

Parte 3: Costos del modelo vial

Los métodos de costeo en el caso vial en este trabajo son dramáticamente más sencillos. El modelo sólo toma unos pocos parámetros calculados por fuera del mismo. A continuación se comentan brevemente los métodos de cálculo de los costos de movilidad e infraestructura.

i. Costos de movilidad

Los costos de movilidad se proporcionan al modelo como un total por tonelada-kilómetro. Este entonces simplemente resuelve la siguiente ecuación:

$$\text{CostoMovilidadTonKm} * \text{TonKmTotales} * \text{RPC}$$

El costo de movilidad por tonelada-kilómetro proviene de un cálculo basado en la metodología del COSTOP⁸ que incluye los siguientes rubros de costos:

- Combustible
- Lubricantes
- Cubiertas
- Lavado
- Engrase
- Mantenimiento
- CAE (Costo Anual Equivalente) del camión
- Salarios
- Seguros
- Impuestos
- Gastos generales

El cálculo realizado por la publicación COSTOP requiere una revisión en profundidad, por cuanto se traduce en un valor de flete muy alejado de la realidad. En Müller (2015, apéndice) se detalla la revisión realizada. Además de corregir algunos parámetros técnicos, la revisión realizada considera la “autoexplotación” del dueño-conductor y la evidencia de exceso de carga, en el caso de los graneles.

A continuación se presenta una tabla sumaria con los valores adoptados para cada ítem, incluyendo una breve indicación de los criterios adoptados para cada ítem

⁸ COSTOP: Manual de Costos de Operación de la Dirección Nacional de Vialidad



Ítem	Medida física	Coefficiente COSTOP	Coefficiente adoptado	Precio de mercado	Valor monetario	Criterio
Combustible	lt/km	0,4532	0,3500	3,229	1,1302	Consultas técnicas (El valor de COSTOP demasiado elevado)
Lubricantes	lt/km	0,0057	0,0057	33	0,1889	Valor COSTOP
Cubiertas	Km vida útil	46.416	46416	n/a	0,9988	Valor COSTOP
Lavado	km/lavado	4.000	4.000	100,5	0,0252	Valor COSTOP
Engrase	km/engrase	2.000	4.000	69	0,0173	Valor COSTOP X 50%, por considerarse más realista
Mantenimiento	n/a	n/a	n/a	n/a	0,2749	Valor COSTOP X 50%, por autoprestación
CAE	Km/año	65.000	65.000	1.871.333	0,7335	Cálculo propio - Precios nuevos y usados por consultas técnicas- Vida útil: 15 años - Valor Residual: 25% - Tasa de interés: 5%
Bonificación	\$/km	0,4	n/a	n/a	0,0000	Suprimida (prevalencia de autoempleo)
Salarios	Km/año	65.000	65.000	13.230	1,4655	Cálculo propio, sobre salario+cargas sociales COSTOP. Descuento de cargas sociales (40%) - 1 conductor
Seguros	n/a	n/a	n/a	n/a	0,4321	Valor COSTOP
Impuestos	n/a	n/a	n/a	n/a	0,1933	Valor COSTOP
Gastos generales	% sobre costo total con impuestos	12%	3%	5,4596	0,1638	Valor aproximado - asume mínimo costo de estructura

TOTAL (precios de mercado)	\$ - precios de mercado			5,6234	
Relación de Precio de Cuenta (RPC)	coeficiente			0,7553	Obtenida de COSTOP - Comparación por ítem entre costo de usuario y costo de comunidad
TOTAL (precios de cuenta)	\$ - precios de cuenta			4,2472	
Carga/camión	ton/camión		18	18	Factor de carga según COSTOP

Costo económico por ton (\$)	\$ - precios de cuenta			0,2360	
Tasa de cambio (2010)	\$/Dólar			3,9100	



**Costo económico
por ton (USD)**

dólar - precios de cuenta

0,0603



ii. Costos de infraestructura

Los costos de infraestructura consisten únicamente en el mantenimiento y CAE del pavimento utilizado por los camiones. Este costo fue calculado utilizando una función de ajuste cuyos parámetros fueron estimados según datos históricos, de manera que el modelo resuelve la siguiente ecuación para cada uno de los tramos de la red vial⁹:

$$\text{CostoInfraestructura} = B * \text{Toneladas}^A * \text{Distancia} * \text{RPC}$$

- **B (coef_b_infrast_cost):** Parámetro.
- **A (coef_a_infrast_cost):** Parámetro.
- **Toneladas:** Cálculo. Son las toneladas pasantes por un tramo de la red vial.
- **Distancia:** Dato. Es la longitud en kilómetros de un tramo de la red vial.
- **RPC (infrast_cost_rpc):** Parámetro.

Los parámetros A y B surgen de una estimación lineal a partir de 3 puntos donde se relacionan las toneladas pasantes con el costo de infraestructura anual en USD a precios de cuenta de 1 km de pavimento.

Toneladas pasantes	Costo de infraestructura (USD - precios de cuenta)
394.200	24.889
3.942.000	31.950
7.686.900	33.464

Para estimar los coeficientes, se realiza un análisis de regresión sobre una especificación log-log en la que la variable dependiente es el costo de infraestructura a precios de cuenta y la variable explicativa son las toneladas pasantes:

$$\ln \text{CostoInfraestructura} = \ln A + B * \ln(\text{Toneladas})$$

Las toneladas pasantes para estos tres puntos se calcularon a partir de datos de TMDA, composición del tránsito, costo de recapado y de los siguientes parámetros:

Parámetro	Valor
Tipo de cambio 2008	3,16
Tasa de interés	0,05
Vida útil recapado	10,00
Factor mantenimiento+Administración	0,20
Toneladas/camión	18,00
Factor precio de cuenta	0,71

⁹ Fuente: Plan Nacional de Inversiones Públicas 2009-2011 – Secretaría de Política Económica Ministerio de Economía y Producción.

La conversión de datos de TMDA a toneladas pasantes se realiza según la siguiente fórmula:

$$\text{Toneladas} = \text{TMDA} * \% \text{pesados} * \text{DíasAño} * \text{ToneladasCamión}$$

- **Toneladas:** Toneladas pasantes por 1 km de pavimento
- **TMDA:** Tránsito Medio Diario Anual total
- **%pesados:** Proporción del TMDA compuesta por camiones pesados
- **DíasAño:** Días que tiene un año (365)
- **ToneladasCamión:** Toneladas que lleva un camión en promedio, teniendo en cuenta un ratio de carga medio del 60% (esto surge de llevar escasas cargas de retorno).

En la tabla siguiente se muestra la conversión de TMDA a toneladas pasantes para los datos utilizados en el cálculo de los coeficientes de la ecuación de costos de infraestructura vial.

TMDA	% pesados	TMDA pesados	Pesados por año	Toneladas
200	30	60	21.900	394.200
2000	30	600	219.000	3.942.000
3900	30	1.170	427.050	7.686.900

Los costos de infraestructura para cada uno de los tres puntos se calculan a partir del dato del costo del recapado del pavimento en cada caso, según la siguiente fórmula:

$$\text{CostoInfraestructura} = \text{CostoRecapadoARS} * \frac{\text{ARS}}{\text{USD}} * \text{FRC} * 1 + \text{FactorMaAdm} * \text{RPC}$$

- **CostoInfraestructura:** Costo de infraestructura compuesto de recapado del pavimento, mantenimiento y administración, en dólares a precios de cuenta.
- **CostoRecapadoARS:** Costo de la restitución de la capacidad estructural del pavimento en pesos.
- **ARS/USD:** Tipo de cambio.
- **FRC:** Factor de Recuperación del Capital.
- **FactorMaAdm:** Factor de costos de mantenimiento y administración como proporción del costo de recapado.
- **RPC:** Relación de Precio de Cuenta.

En la tabla siguiente se muestra el cálculo de los costos de infraestructura del pavimento para los datos utilizados en el cálculo de los coeficientes de la ecuación de costos de infraestructura vial.

TMDA	Costo recapado (ARS)	Costo recapado (USD)	CAE (USD)	Mantenimiento y administración	Costo de infraestructura anual (USD - precios de mercado)	Costo de infraestructura anual (USD - precios de cuenta)
200	712.803	225.571	29.212	5.842	35.055	24.889
2.000	915.036	289.568	37.500	7.500	45.001	31.950
3.900	958.372	303.282	39.276	7.855	47.132	33.464



Parte 4: Escenarios de derivación

El objetivo del modelo de costos de la red de transporte terrestre desarrollado es obtener el costo total del sistema, para distintos escenarios de derivación de tráfico desde el modo vial al modo ferroviario.

En este trabajo se desarrolla la comparación entre 4 escenarios posibles de partición modal entre el camión y el ferrocarril de cargas:

- A. **Situación base (2010).** La partición modal del año 2010 arroja 25,8 millones (5,9%) de toneladas transportadas por ferrocarril y 409,3 (94,1 %) por el camión. Los datos de la matriz Origen-Destino vial provienen de un estudio anterior (Müller y Benassi 2014) mientras que los de la matriz ferroviaria son estimados a partir de guarismos de transporte de cargas y estimaciones de densidad de la red en explotación.
- B. **Máxima derivación posible al modo ferroviario.** El primer caso de derivación es aquél donde se analiza el costo de transporte si todas las cargas definidas como pasibles de ser derivadas al ferrocarril comenzaran a ser transportadas por este medio, siendo distraídas del modo vial. Sin embargo, no todas las cargas son potencialmente derivables. En el apartado B de esta sección se analizarán en mayor detalle los criterios de derivación utilizados. En este escenario el ferrocarril transportaría 86,8 millones de toneladas (19,9%) mientras que el camión retendría unas 348,3 millones (80,1%). Esto implicaría una transferencia de 61 millones de toneladas de un modo a otro.
- C. **Derivación al modo ferroviario con minimización de costos.** En el segundo caso, la derivación de cada par Origen-Destino potencialmente derivable del camión al ferrocarril se realiza en base a su efecto en el costo total. Partiendo de la situación de máxima derivación posible, el algoritmo de minimización de costos prueba la variación en el costo total de operar el sistema bimodal de transporte cuando se restituye al camión un par OD que había sido derivado al ferrocarril en el escenario anterior. Si la restitución del par OD al modo vial genera un incremento de costos totales, ésta es revertida. En caso contrario, este par OD se devuelve a la matriz OD vial de cargas. En este escenario el ferrocarril transporta unas 80,9 millones de toneladas (18,6%) mientras que el modo vial tiene unas 354,2 millones (81,4%). La transferencia del modo vial al ferroviario se reduce así a unos 55,1 millones de toneladas.
- D. **Anulación del modo ferroviario.** Por último, se analiza qué sucedería si toda la carga ferroviaria fuera trasladada al camión. En este caso las 435,1 millones de toneladas se transportarían dentro del modo vial.

A. Situación base (2010)

Como dijimos anteriormente, los datos disponibles para los ejercicios realizados con el modelo de costos de este trabajo provienen de un estudio anterior (Müller y Benassi 2014) donde se realiza una estimación de la matriz Origen-Destino vial de cargas. Para mayores detalles respecto a la metodología seguida para construir la matriz OD se remite al documento original.

A continuación se presenta una tabla con los principales resultados de la matriz bimodal de transporte terrestre para la situación base:

	FFCC	Vial	Total
Costos de movilidad (USD/ton-km)	0,0174	0,0600	
Costos de infraestructura (USD/ton-km)	0,0263	0,0057	
Otros costos relacionados con el tiempo y flete corto (USD/ton-km)	0,0077	0,0000	
Costo total (USD/ton-km)	0,0514	0,0657	0,0644
Toneladas (millones)	25,8	409,3	435,1
Toneladas-kilómetro (millones)	11.647,8	122.079,8	133.727,6
Costo total (USD millones)	599,1	8.019,0	8.618,2
Vagones por locomotora	30,8		
Distancia media (km)	451,0	298,2	307,3
Extensión de la red (km)	15.572	33.132	48.704
Densidad media (toneladas)	747.985	3.684.671	2.745.716

El ferrocarril parte con una participación del 5,9% medido en toneladas y del 8,7% medido en toneladas-kilómetro. Esta diferencia se debe a que el modo ferroviario tiene una distancia media 152 km mayor que el modo vial.

La aplicación de las fórmulas y algoritmos de costeo explicados en las secciones anteriores arroja un costo para el ferrocarril de USD 599,1 millones transportando 11.647,8 millones de ton-km. Esto implica un costo por ton-km de USD 0,0514.

Por otro lado, el costo total de operar ambos modos asciende a USD 8.618,2 millones mientras que el costo unitario por ton-km es de USD 0,0644.

Cabe destacar también la baja densidad media observada en el modo ferroviario (menos de un tercio de la densidad total y menos de un quinto de la densidad del modo vial).

La “extensión de la red” indica cuántos kilómetros de vías de ferrocarril o de caminos viales están activos, es decir, soportan carga pasante sobre ellos. Se recuerda que nos estamos refiriendo a las redes empleadas para modelización.

B. Máxima derivación posible al modo ferroviario

A continuación analizaremos los resultados de derivar todos aquellos pares Origen-Destino identificados como potencialmente derivables al ferrocarril. En primer lugar, se discutirán los criterios de derivación.

Criterios de derivación

Existen dos tipos de criterios de derivación en el modelo de costos desarrollado:

1. Aceptación o rechazo de un par OD como derivable
2. Proporción derivable de la carga de un par OD

Entre los primeros se consideraron los siguientes:

- **Productos no derivables.** Algunos productos entran en una categoría no derivable (categoría número 0). Los combustibles, el metanol, la pesca y el ganado bovino, ovino, caprino y caballar se consideran como productos no derivables. Aquellos pares ODP (Origen-Destino-Producto) que corresponden a alguno de estos bienes no se derivan.
- **Existencia de recorrido ferroviario.** Algunos pares OD viales pueden no tener un recorrido ferroviario habilitado. Este es el caso de pares OD cuyo Origen o Destino no tengan acceso a la red ferroviaria o que tengan acceso a redes ferroviarias de trochas distintas. Aquellos pares OD que no puedan ser conectados por un recorrido ferroviario de la misma trocha no se derivan.
- **Verosimilitud del recorrido ferroviario.** Un recorrido existente en ferrocarril pero excesivamente largo respecto de su alternativa vial, no puede ser considerado una alternativa realista a este último. En el modelo se define un parámetro (**max_path_difference**) que anula la derivación de todos aquellos pares OD donde la longitud del recorrido ferroviario supere un umbral de incremento respecto del recorrido vial de hasta el 50%.
- **Distancia mínima.** El ferrocarril es un medio de transporte cuyo rango de acción ideal suele ser en distancias mayores que las del camión. En el modelo se define un parámetro (**min_dist_to_derive**) que establece el mínimo de kilómetros que un par OD debe recorrer para ser derivable. En este trabajo se utilizó un umbral de 200 km.
- **Escala mínima.** La operatoria ferroviaria también suele estar asociada a mayores volúmenes de carga que el modo vial. Se consideró un mínimo de volumen de carga total necesario para que un par Origen-Destino-Producto pueda ser derivado al ferrocarril (**min_tons_to_derive**) de 7.000 toneladas. Esto es aproximadamente lo que transportaría por año un ramal con dos servicios semanales, con un sólo vagón cargado.

Este primer conjunto de criterios de derivación permite aceptar o rechazar un par Origen-Destino-Producto completo para su derivación. Sin embargo, existen otros factores que pueden hacer que una cierta proporción de un par ODP analizado sea derivable mientras que el resto no. Particularmente el ferrocarril tiende a ser un modo de transporte más competitivo donde hay grandes volúmenes involucrados y mayores distancias.

Los criterios elegidos para determinar la proporción derivada de cada para ODP son entonces la distancia y el volumen de carga. Para cada uno de ellos se adopta un mínimo (correspondiente a la escala y la distancia mínimas comentadas en el conjunto de criterios anteriores) y un máximo, a partir del cual el coeficiente de derivación será el máximo posible.

- Distancia: entre 200 km y 500 km
- Volumen de carga: entre 7.000 toneladas y 120.000 toneladas

Cada producto tiene, además, proporciones máximas y mínimas de derivación establecidas.

0. No derivable. 0% de derivación
1. Graneles. 0% - 80%
2. Productos primarios no granarios. 0% - 70%
3. Productos semi manufacturados. 0% - 70%
4. Productos manufacturados. 0% - 60%
5. Tipo de producto desconocido. 0% - 50%

Esto da lugar a un continuo de coeficientes de derivación entre el mínimo y el máximo establecidos que se interpolan linealmente. Para el caso de la categoría número 1 (graneles), los coeficientes de derivación para distintas combinaciones de escala y distancia se pueden ver en la siguiente tabla.

		Distancia (km)			
		500	400	300	200
Volumen (ton/año)	120.000	80%	67%	53%	40%
	82.333	67%	53%	40%	27%
	44.667	53%	40%	27%	13%
	7.000	40%	27%	13%	0%

La fórmula utilizada para calcular los coeficientes es simplemente la media entre cada uno de los criterios:

$$\frac{(Distancia - DistanciaMín)}{(DistanciaMáx - DistanciaMín)} + \frac{(Toneladas - ToneladasMín)}{(ToneladasMáx - ToneladasMín)}$$

2

Resultados

A continuación se presenta una tabla con los principales resultados de derivar la mayor cantidad de carga posible del camión al ferrocarril según los criterios de derivación expuestos anteriormente.

	FFCC	Vial	Total
Costos de movilidad (USD/ton-km)	0,0167	0,0600	
Costos de infraestructura (USD/ton-km)	0,0167	0,0074	
Otros costos relacionados con el tiempo y flete corto (USD/ton-km)	0,0067	0,0000	
Costo total (USD/ton-km)	0,0401	0,0674	0,0587
Toneladas (millones)	86,8	348,3	435,1
Toneladas-kilómetro (millones)	43.122,2	92.453,5	135.575,8
Costo total (USD millones)	1.730,3	6.227,0	7.957,3
Vagones por locomotora	31,3		
Distancia media (km)	496,8	265,4	311,6
Extensión de la red (km)	17.120	33.132	50.252
Densidad media (toneladas)	2.518.779	2.790.477	2.697.912

La transferencia de 61 millones de toneladas eleva fuertemente la densidad media del ferrocarril al tiempo que impacta también sobre la distancia media. También unos 1.548 km adicionales de vías férreas habilitadas comienzan a ser utilizados según el modelo. Los costos totales de operar

el sistema de transporte descenden aproximadamente unos 660,9 millones de dólares, desde los 8.618,2 millones de la situación base en 2010 hasta 7.957,3 millones.

Red ferroviaria ampliada

A continuación se repitió el ejercicio pero esta vez sobre una red ferroviaria ampliada con tramos actualmente inactivos pero que potencialmente podrían rehabilitarse. El objetivo es observar cuanta más carga podría derivarse de rehabilitar estos tramos y si esto tiene como contrapartida una reducción aún mayor de los costos globales de operación del sistema de transporte.

A continuación se presentan los resultados de esta nueva corrida del modelo de costos sobre una red ampliada con tramos potenciales.

	FFCC	Vial	Total
Costos de movilidad (USD/ton-km)	0,0170	0,0600	
Costos de infraestructura (USD/ton-km)	0,0176	0,0075	
Otros costos relacionados con el tiempo y flete corto (USD/ton-km)	0,0067	0,0000	
Costo total (USD/ton-km)	0,0413	0,0675	0,0587
Toneladas (millones)	92,9	342,2	435,1
Toneladas-kilómetro (millones)	45.270,4	89.826,8	135.097,1
Costo total (USD millones)	1.871,6	6.063,8	7.935,4
Vagones por locomotora	31,1		
Distancia media (km)	487,1	262,5	310,5
Extensión de la red (km)	20.451	32.933	53.384
Densidad media (toneladas)	2.213.569	2.727.578	2.530.663

Efectivamente, la disponibilidad de nuevos recorridos de diferentes trochas y la rehabilitación de algunos nodos ferroviarios hoy inactivos podría generar una derivación de poco más de 6 millones de toneladas adicionales. Sin embargo, lo primero que debe destacarse, es que la reducción en el costo total de operación del sistema de transporte es prácticamente nula (menos de un 0,2%).

La ampliación de la red ferroviaria incide negativamente en la densidad media que desciende casi unas 300 mil toneladas. La distancia media baja ligeramente, indicando que los pares OD atraídos por la expansión tienen en conjunto una distancia media menor que los anteriores.

C. Derivación al modo ferroviario con minimización de costos

Como se señaló anteriormente, los criterios de derivación fijan un umbral máximo de pares ODP que pueden ser derivables. Esto no significa que la efectiva derivación de todos ellos minimice los costos del sistema en su conjunto.

Existen numerosos efectos de red y no-linealidades en los costos que no permiten saber a priori qué pares OD convendría transportar por ferrocarril y cuáles deberían ir por camión. La derivación de algunos pares OD de bajo volumen de cargas, por ejemplo, podría exigir la utilización de tramos de ferrocarril en condiciones de baja densidad de tráfico y por lo tanto incrementar los costos medios totales.

Una exploración exhaustiva de todas las posibilidades podría encontrar la “partición modal óptima” desde el punto de vista de la minimización de costos tal como está planteado su cálculo en este modelo.

En el escenario de máxima derivación al ferrocarril con la red ferroviaria ampliada hay 485 pares Origen-Destino-Producto. Explorar todas las posibilidades implicaría calcular el costo del sistema de transporte para todas las combinaciones posibles de derivación de estos 485 pares ODP donde cada uno de ellos podría ser derivado al modo vial.

Cada par ODP tienen entonces dos estados posibles: pertenecer al modo ferroviario o al modo vial. Rápidamente se ve que la cantidad de cálculos de costos a realizar es exponencial. En este caso de 2^{485} casos.

Existe una extensa literatura de algoritmos de optimización combinatoria que podrían ser adecuados para resolver este problema. Sin embargo la complejidad de la mayoría de los mismos escapa a los alcances de este trabajo y excede con mucho a la precisión del cálculo de costos planteado, de la zonificación adoptada y de los datos disponibles para llevarlo adelante.

En su lugar se optó por una versión más sencilla, a fines más bien ilustrativos, de búsqueda de costo total mínimo para el sistema de transporte (ver Cuadro 5).

Cuadro 5: Pseudocódigo para la búsqueda de la partición modal de menor costo total

```
minimizar_costos_de_la_red():  
  
  para todo tramo de la red ferroviaria:  
    calcular costo total actual del modelo bimodal de transporte  
  
    para todo par_od que utiliza el tramo:  
      derivar el par_od al modo vial  
  
    calcular nuevo costo total del modelo bimodal de transporte  
  
    si el nuevo costo total es mayor que el costo actual:  
      revertir derivaciones realizadas de pares od que utilizan el tramo
```

El algoritmo utilizado en este modelo parte del escenario con máxima derivación posible al ferrocarril y luego calcula el costo de derivar todos los pares ODP que utilizan un tramo ferroviario al modo vial (anulando el tramo en la red ferroviaria y por lo tanto eliminando sus costos de infraestructura por completo). Si el costo conseguido para todo el sistema es menor, los pares ODP derivados no vuelven al ferrocarril. Si el nuevo costo resulta ser mayor que el anterior, los pares ODP derivados al modo vial retornan al ferrocarril.

Este testeo se realiza para todos los tramos ferroviarios, comenzando por el de menor densidad y terminando por el de mayor cantidad de toneladas pasantes. Esto se debe a que, a priori, es esperable que las mayores ineficiencias de costos se registren en pares OD que utilicen tramos de la red de baja densidad (donde los costos de infraestructura ganan peso en el costo medio por ton-km).

Luego de haber chequeado todos los tramos de la red, se repite el algoritmo para todos aquellos pares ODP que aún permanezcan en la red ferroviaria, testeando la conveniencia de derivarlos a la red vial uno por uno. En este caso los pares OD se ordenan por el volumen de carga (de menor a mayor nuevamente), bajo la presunción de que los pares ODP de menor escala podrían ser los que registren mayores ineficiencias de costos en el uso de la red ferroviaria.

Cabe enfatizar que este algoritmo no asegura una minimización de costos ya que es “path dependent”: el resultado es dependiente del orden en el que se chequeen los tramos y luego los pares ODP. El criterio adoptado de ordenarlos por volumen de carga posiblemente acerque el resultado al costo mínimo, pero éste no está garantizado.

A continuación se presentan los resultados del escenario de derivación con minimización de costos:

	FFCC	Vial	Total
Costos de movilidad (USD/ton-km)	0,0160	0,0600	
Costos de infraestructura (USD/ton-km)	0,0166	0,0072	
Otros costos relacionados con el tiempo y flete corto (USD/ton-km)	0,0063	0,0000	
Costo total (USD/ton-km)	0,0389	0,0672	0,0587
Toneladas (millones)	80,9	354,2	435,1
Toneladas-kilómetro (millones)	40.906,7	94.358,8	135.265,5
Costo total (USD millones)	1.592,2	6.342,9	7.935,1
Vagones por locomotora	33,7		
Distancia media (km)	505,4	266,4	310,9
Extensión de la red (km)	16.554	33.132	49.686
Densidad media (toneladas)	2.471.064	2.847.983	2.722.402

Nuevamente, sin embargo, la disminución de costos lograda respecto del caso con derivación máxima no es sustancial: poco más de 16 millones de dólares de ahorro. Un resultado de magnitud similar que el observado al testear la derivación máxima con una red ferroviaria ampliada. Como se ve en la tabla, el algoritmo encuentra sólo unas 3,6 millones de toneladas que deben volver al modo vial para reducir los costos de operación del sistema.

Es notable, sin embargo, cómo se eleva la cantidad de vagones por locomotora: en el escenario de máxima derivación apenas habían aumentado a 31,4 (desde 31,1 en la situación base) mientras que en el de derivación con minimización de costos se utilizan formaciones con 33,7 vagones por locomotora en promedio.

En este escenario la cantidad requerida de locomotoras es de 659 frente al parque tractivo requerido en el caso de máxima derivación que es de 738 locomotoras. Esta reducción tiene como contrapartida un incremento del recorrido medio anual por locomotora desde 56.218 km

por año a 57.034. En cuanto al parque remolcado, los requerimientos de unidades se reducen en más de 2.700 (63.753 a 61.030).

El caso de derivación con minimización de costos con ampliación de la red ferroviaria produce una reducción ulterior del costo total del sistema de magnitud similar (muy baja). En la tabla siguiente se presentan los resultados de esta posibilidad.

	FFCC	Vial	Total
Costos de movilidad (USD/ton-km)	0,0163	0,0600	
Costos de infraestructura (USD/ton-km)	0,0174	0,0074	
Otros costos relacionados con el tiempo y flete corto (USD/ton-km)	0,0063	0,0000	
Costo total (USD/ton-km)	0,0400	0,0674	0,0587
Toneladas (millones)	86,5	348,6	435,1
Toneladas-kilómetro (millones)	42.831,2	91.993,3	134.824,6
Costo total (USD millones)	1.714,8	6.196,1	7.911,0
Vagones por locomotora	33,8		
Distancia media (km)	495,0	263,9	309,8
Extensión de la red (km)	19.372	32.933	52.305
Densidad media (toneladas)	2.210.953	2.793.364	2.577.656

D. Anulación del modo ferroviario

Por último debe probarse qué sucedería con el costo total del sistema de transporte si el ferrocarril dejara de existir (ie, derivación completa del modo ferroviario al modo vial).

Al contrario de lo que sucede al derivar tráfico en sentido contrario, el modo vial tiene virtualmente capacidad para absorber todo el tráfico proveniente del modo ferroviario.

A continuación se presentan los resultados del modelo para el caso de anulación del sistema ferroviario:

	FFCC	Vial	Total
Costos de movilidad (USD/ton-km)		0,0600	
Costos de infraestructura (USD/ton-km)		0,0053	
Otros costos relacionados con el tiempo y flete corto (USD/ton-km)		0,0000	
Costo total (USD/ton-km)		0,0653	0,0653
Toneladas (millones)		435,1	435,1
Toneladas-kilómetro (millones)		132.352,5	132.352,5
Costo total (USD millones)		8.644,0	8.644,0
Vagones por locomotora			
Distancia media (km)		304,2	304,2
Extensión de la red (km)		33.291	33.291
Densidad media (toneladas)		3.975.649	3.975.649



El costo total en este caso es el mayor de todos: USD 8.644 millones. Sin embargo no resulta mucho mayor que el mejor caso con ferrocarril (derivación con minimización de costos y red ferroviaria ampliada). En este último el costo total es de USD 7.920,8 millones (un 9% menor).

Parte 5: Resultados obtenidos

La comparación de los distintos escenarios simulados muestra que los costos totales del sistema terrestre de transporte de cargas se reducirían en cualquier escenario de derivación de carga al ferrocarril desde el modo vial. Esta reducción de costos, sin embargo, es de magnitud moderada (entre el 7% y el 8%).

La derivación de tráfico del camión al ferrocarril triplica la densidad media de la red ferroviaria. La distancia media también crece en unos 50 km. Los trenes se hacen un poco más largos, producto del incremento en la densidad de la red (pasan de tener 30,8 vagones en promedio a tener 31,3 y 33,7).

La derivación con minimización de costos no consigue reducir mucho más los costos que el caso de derivación máxima, pero los casi 6 millones de toneladas menos que se derivan en este caso dejan una red de extensión algo menor (unos 600 km menor). Tal vez lo más notable sea el incremento en la longitud de los trenes, que pasan a tener 2,4 vagones más en promedio.

El caso de anulación del FFCC no tiene casi incremento de costos: apenas un 0,3% más que la situación actual. Esto quiere decir que, en términos de este análisis de costos, da prácticamente lo mismo mantener la red ferroviaria actual con los tráficos que tiene que dismantelarla y derivar todos ellos al camión. Si el ferrocarril ha de cumplir algún rol relevante en el transporte de cargas, tendrá que ser con mucho más tráfico del que lleva ahora.

A continuación se presenta una tabla comparativa entre los 4 escenarios:



Resultados – 1: costos de transporte bajo diversos escenarios – Red ferroviaria actual

	Situación actual		Derivación máxima		Derivación con minimización de costos		Anulación del FFCC	
	FFCC	Vial	FFCC	Vial	FFCC	Vial	FFCC	Vial
Costos de movilidad (USD/ton-km)	0,0174	0,0600	0,0167	0,0600	0,0160	0,0600	0,0000	0,0600
Costos de infraestructura (USD/ton-km)	0,0263	0,0057	0,0167	0,0074	0,0166	0,0072	0,0000	0,0053
Costos de tiempo y otros (USD/ton-km)	0,0077	0,0000	0,0067	0,0000	0,0063	0,0000	0,0000	0,0000
Costo total (USD/ton-km)	0,0514	0,0657	0,0401	0,0674	0,0389	0,0672	0,0000	0,0653
Toneladas	25.824.801	409.321.643	86.798.419	348.348.025	80.941.908	354.204.536	0	435.146.444
Ton-km	11.647.842.883	122.079.790.054	43.122.243.567	92.453.518.721	40.906.735.601	94.358.790.186	0	132.352.538.535
Costo total (USD)	599.147.899	8.019.012.140	1.730.264.159	6.227.034.952	1.592.205.727	6.342.929.947	0	8.643.993.276
Vagones por locomotora	30,8		31,3		33,7		0,0	
Distancia media	451	298	497	265	505	266	0	304
Extensión de la red	15.572	33.132	17.120	33.132	16.554	33.132	0	33.291
Densidad media	747.985	3.684.671	2.518.779	2.790.477	2.471.064	2.847.983	0	3.975.649
	Ambos modos		Ambos modos		Ambos modos		Ambos modos	
Costo total (USD)	8.618.160.040		7.957.299.111		7.935.135.674		8.643.993.276	
Toneladas	435.146.444		435.146.444		435.146.444		435.146.444	
Ton-km	133.727.632.937		135.575.762.288		135.265.525.788		132.352.538.535	
Extensión de la red (km)	48.704		50.252		49.686		33.291	
Distancia media (km)	307		312		311		304	
Densidad media (toneladas)	2.745.716		2.697.912		2.722.402		3.975.649	



Variación del costo total (%)	0,00%	-7,67%	-7,93%	0,30%
-------------------------------	-------	--------	--------	-------



La red de tramos ferroviarios actualmente activos, sin embargo, no refleja adecuadamente la red que potencialmente podría ser habilitada en caso de invertir en un reacondicionamiento integral del ferrocarril de cargas.

Luego del análisis de costos ya presentado, se repitieron las simulaciones para una red de tramos ferroviarios más amplia que incorpora aquellos tramos hoy inactivos que podrían ser potencialmente habilitados. La reducción de costos lograda en los escenarios de derivación se incrementa levemente (en un 0.3% adicional aproximadamente).

El resto de los parámetros no varía demasiado. Se pierde un poco de densidad y algo de distancia media. El ferrocarril atrae unos 4 o 5 millones de toneladas adicionales en este caso y la red ferroviaria utilizada es más extensa.

Un análisis pormenorizado podría revelar tramos específicos que sería conveniente rehabilitar, pero el alcance y la precisión de este trabajo no son suficientes para ese tipo de análisis.

A continuación se presenta la tabla comparativa para los 4 escenarios, con la red ferroviaria potencial:



Resultados – 2: costos de transporte bajo diversos escenarios – Red ferroviaria potencial

	Situación actual		Derivación máxima		Derivación con minimización de costos		Anulación del FFCC	
	FFCC	Vial	FFCC	Vial	FFCC	Vial	FFCC	Vial
Costos de movilidad (USD/ton-km)	0,0174	0,0600	0,0170	0,0600	0,0163	0,0600	0,0000	0,0600
Costos de infraestructura (USD/ton-km)	0,0263	0,0057	0,0176	0,0075	0,0174	0,0074	0,0000	0,0053
Costos de tiempo y otros (USD/ton-km)	0,0077	0,0000	0,0067	0,0000	0,0063	0,0000	0,0000	0,0000
Costo total (USD/ton-km)	0,0514	0,0657	0,0413	0,0675	0,0400	0,0674	0,0000	0,0653
Toneladas	25.824.801	409.321.643	92.932.367	342.214.077	86.520.038	348.626.405	0	435.146.444
Ton-km	11.647.842.883	122.079.790.054	45.270.368.859	89.826.772.187	42.831.241.984	91.993.313.167	0	132.352.538.535
Costo total (USD)	599.147.899	8.019.012.140	1.871.609.461	6.063.825.593	1.714.849.545	6.196.112.550	0	8.643.993.276
Vagones por locomotora	30,8		31,1		33,8		0,0	
Distancia media	451	298	487	262	495	264	0	304
Extensión de la red	15.572	33.132	20.451	32.933	19.372	32.933	0	33.291
Densidad media	747.985	3.684.671	2.213.569	2.727.578	2.210.953	2.793.364	0	3.975.649
	Ambos modos		Ambos modos		Ambos modos		Ambos modos	
Costo total (USD)	8.618.160.040		7.935.435.055		7.910.962.096		8.643.993.276	
Toneladas	435.146.444		435.146.444		435.146.444		435.146.444	
Ton-km	133.727.632.937		135.097.141.046		134.824.555.151		132.352.538.535	
Extensión de la red (km)	48.704		53.384		52.305		33.291	
Distancia media (km)	307		310		310		304	
Densidad media (toneladas)	2.745.716		2.530.663		2.577.656		3.975.649	
Variación del costo total (%)	0,00%		-7,92%		-8,21%		0,30%	



Bibliografía y fuentes

Müller, A. (1994). Tras la privatización: Las perspectivas del medio ferroviario argentino. *Desarrollo Económico*, N° 134, Vol. 34, 243-262.

Müller, A. y Benassi, A. (2014). Transporte Automotor de Cargas en Argentina: una Estimación de Orígenes y Destinos – 2010. CESPAA, Documento de Trabajo N° 37. Consultado en <http://blogdelcespa.blogspot.com.ar/p/documentos-de-trabajo.html>

Dirección Nacional de Vialidad. (Agosto 2010). Costo de operación de vehículos.

Anexos

A. Parámetros de la red ferroviaria

Movilidad

Parámetro	Nombre en el modelo	Valor
Velocidad de marcha (km/h).	speed	40
Tiempo de detención de los trenes en los desvíos de cruce (hr).	turnout_time	4
Tiempo de detención de las locomotoras en las cabeceras (hr).	locom_head_stops_time	15
Tiempo de detención de los vagones en las cabeceras (hr).	wagon_head_stops_time	90
Carga media de un vagón (ton).	wagon_capacity	33,6
Carga media de una locomotora (ton).	locomotive_capacity	1276,8
Horas de disponibilidad de un vagón en el año (hr/año).	wagon_availability	8.672
Horas de disponibilidad de una locomotora en el año (hr/año)	locomotive_availability	6.570
Cantidad mínima de vagones que deben ser usados por un par origen destino en un año (unidades/año).	wagon_min_units	
Cantidad mínima de locomotoras que deben ser usadas por un par origen destino en un año (unidades/año).	locomotive_min_units	104
Máxima cantidad de vagones por locomotora (vagones/locomotora).	wagons_per_locomotive	38
Precio de un vagón (USD).	wagon_price	80.000
Precio de una locomotora (USD).	locomotive_price	1.800.000
Vida útil de un vagón (años).	useful_life_wagon	60
Vida útil de una locomotora (años).	useful_life_locom	35
Costo del combustible necesario para un km de marcha de locomotora (USD/km).	fuel_cost_by_km	2
Ratio de costo de lubricantes por unidad de combustible (ratio).	lubricants_fuel_ratio	0,067
Costo anual de mantenimiento de una locomotora (USD).	maintenance_by_locomotive	100.170
Costo anual de mantenimiento de un vagón (USD).	maintenance_by_wagon	2.488
Costo medio de la hora de personal de conducción y guardas (USD/hr).	manpower_cost_by_hour	15,21
Personal necesario por tren	manpower_by_loc	2
Tiempo necesario para reagrupar los vagones de un tren (hr).	regroup_time	3

Peso de un vagón vacío (ton).	wagon_weight	20
Peso de una locomotora vacía (ton).	locomotive_weight	100
Factor de conversión de toneladas netas a brutas (factor).	net_to_gross_factor	1,67
Densidad neta mínima para considerar un tramo como de "vía principal" (ton).	main_min_density	420.000
Ratio de carga efectiva sobre capacidad total (ratio).	loading_ratio	0,56
Relación de precio de cuenta para costos de movilidad	mobility_cost_rpc	0,82

Infraestructura

Parámetro	Nombre en el modelo	Valor
Coefficiente exponencial "a" para la ecuación de costos de mantenimiento de la vía	coef_a_track_maint_cost	-0,62125
Coefficiente "b" para la ecuación de costos de mantenimiento de la vía	coef_b_track_maint_cost	10,34046
Coefficiente exponencial "a" para la ecuación de costos de mantenimiento de infraestructura que no es vía	coef_a_notrack_maint_cost	-0,93082
Coefficiente "b" para la ecuación de costos de mantenimiento de infraestructura que no es vía	coef_b_notrack_maint_cost	458,461
Coefficiente "a" para la ecuación del precio de la vía	coef_a_track_cost	175000
Coefficiente "b" para la ecuación del precio de la vía	coef_b_track_cost	0,003125
Tasa de interés (coeficiente).	interest_rate	0,08
Vida útil de la vía (años).	useful_life_track	30
Costo anual de personal por desvío de cruce (USD).	yearly_wages_by_turnout	109.500
Ton-km brutas que soporta una vía de alta calidad a lo largo de su vida útil (ton-km).	gross_tk_in_hq_track_lifetime	200.000.000
Precio de 1 km de vía de alta calidad (USD).	high_quality_track_price	800.000
Distancia máxima entre desvíos de cruce (km).	turnout_freq	200
Máxima densidad soportada por desvíos de cruce a distancia máxima (ton).	turnout_freq_max_density	1.200.000
Relación de precio de cuenta para infraestructura ferroviaria (ratio).	infrast_cost_rpc	0,82
Precio de 1 km de vía de baja calidad (USD).	low_quality_track_price	156.251

Densidad bruta mínima para que una vía sea considerada "principal" (ton).	gross_main_min_density	701.400
---	------------------------	---------

Tiempo y otros

Parámetro	Nombre en el modelo	Valor
Costo de depósito por día por tonelada (USD).	deposit_cost_per_day_ton	0,058760522
Proporción del tiempo de viaje ferroviario que tarda un camión en similar recorrido (coeficiente).	ratio_truck_to_train_travel_time	0,5
Valor medio de una tonelada de carga inmovilizada (USD).	cost_of_immobilized_ton	1,175210442
Costo medio de flete corto por tonelada (USD).	short_freight_to_train	1,5
Frecuencia semanal mínima de servicios ferroviarios (trenes).	min_weekly_freq	2
Relación de precio de cuenta para costos relacionados con el tiempo y otros (ratio).	time_cost_rpc	1

Derivación

Parámetro	Nombre en el modelo	Valor
Mínima cantidad de toneladas que deben poder ser derivadas para que un par ODP sea derivable (ton).	min_tons_to_derive	7.000
Mínima distancia que debe tener un par OD para que sea derivable (km).	min_dist_to_derive	200
Máximo coeficiente de derivación posible (%).	max_derivation	80%
Mínimo coeficiente de derivación para pares ODP que sean derivables (%).	min_derivation	25%
Distancia a partir de la cual el coeficiente de derivación es máximo (km).	dist_of_max_derivation	500
Volumen de carga a partir del cual el coeficiente de derivación es máximo (km).	tons_of_max_derivation	120.000
Máxima diferencia de longitud que puede tener un recorrido ferroviario respecto del recorrido vial para ser considerado viable (coeficiente).	max_path_difference	0,5

Categorías de productos

Parámetro	Nombre en el modelo	Valor
Coficiente máximo de derivación para productos de la categoría 1 (%)	max_derivation_1	80,0%
Coficiente máximo de derivación para productos de la categoría 2 (%)	max_derivation_2	70,0%
Coficiente máximo de derivación para productos de la categoría 3 (%)	max_derivation_3	70,0%
Coficiente máximo de derivación para productos de la categoría 4 (%)	max_derivation_4	60,0%
Coficiente máximo de derivación para productos de la categoría 5 (%)	max_derivation_5	50,0%
Posibilidad de reagrupamiento de trenes para productos de la categoría 1 (0 = No ; 1 = Si)	regroup_1	1
Posibilidad de reagrupamiento de trenes para productos de la categoría 2 (0 = No ; 1 = Si)	regroup_2	1
Posibilidad de reagrupamiento de trenes para productos de la categoría 3 (0 = No ; 1 = Si)	regroup_3	0
Posibilidad de reagrupamiento de trenes para productos de la categoría 4 (0 = No ; 1 = Si)	regroup_4	0
Posibilidad de reagrupamiento de trenes para productos de la categoría 5 (0 = No ; 1 = Si)	regroup_5	0

B. Parámetros de la red vial

Movilidad

Parámetro	Nombre en el modelo	Valor
Costo de movilidad vial por ton-km (USD/ton-km).	mobility_cost_tk	0,079441059
Relación precio de cuenta para costos de movilidad vial (ratio).	mobility_cost_rpc	0,755276945
Factor de conversión de toneladas netas a brutas (factor).	net_to_gross_factor	1

Infraestructura

Parámetro	Nombre en el modelo	Valor
Coefficiente exponencial "a" para la ecuación de costos de infraestructura (coeficiente).	coef_a_infrast_cost	0,1019
Coefficiente "b" para la ecuación de costos de infraestructura (coeficiente). El parámetro ya está calculado con la RPC incorporada.	coef_b_infrast_cost	6711,272609
Relación precio de cuenta para costos de infraestructura (ratio).	infrast_cost_rpc	0,707