



Trabajo Fin de Grado

Análisis y simulación de la capacidad de transporte por ferrocarril de la línea Zaragoza-Canfranc

**Analysis and simulation of the transport capacity by rail in the
Zaragoza-Canfranc railway**

Autor

Victor Rubio Quilez

Director

Emilio Larrode Pellicer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

2024

Tabla de contenido

Tabla de contenido	1
1. Resumen Análisis y simulación de la capacidad de transporte por ferrocarril de la línea Zaragoza – Canfranc.....	2
2. Objetivo, justificación y alcance del trabajo	3
2.1 Objetivo del trabajo	3
2.2 Justificación del trabajo.....	3
2.3 Alcance del trabajo.....	3
3. Introducción	5
3.1 Situación actual de la línea	5
3.2 Modo de análisis	7
4. Definición del problema	8
4.1 Descripción de la línea Zaragoza-Canfranc.....	8
4.2 Hipótesis y objetivo	14
5. Metodología del análisis.....	15
5.1 Elección de las condiciones	15
5.2 Modelado de la hoja.....	17
5.3 Optimización.....	24
6. Resultados	26
6.1 Resultados obtenidos	26
6.2 Elaboración de KPIs	32
7. Conclusiones.....	65
8. Índices	66
8.1 Índice de ilustraciones	66
8.2 Índice de tablas	70
9. Bibliografía.....	71

1. Resumen Análisis y simulación de la capacidad de transporte por ferrocarril de la línea Zaragoza – Canfranc

En este trabajo se ha llevado a cabo el análisis y simulación de la capacidad de transporte por ferrocarril de la línea Zaragoza – Canfranc. El primer paso para este análisis ha sido la recopilación del estado actual de la línea e infraestructura, así como los posibles cambios a futuro que pueda sufrir.

El siguiente paso ha sido caracterizar la línea en base a medidas y parámetros obtenidos a través de Google Earth Pro, una herramienta online. Para obtener las velocidades máximas permitidas en cada tramo se ha consultado un estudio del ministerio de transportes y movilidad sostenible. De esta forma la línea queda totalmente caracterizada.

A continuación, se ha consultado el parque ferroviario actual de RENFE para ver que locomotoras y vagones se pueden usar en esta línea teniendo en cuenta que tipo de mercancías se van a transportar.

El siguiente paso ha sido introducir los datos anteriores en una hoja Excel donde se han simulado diferentes casos con distintas locomotoras Diésel, diferentes tipos de tolvas, así como distintas condiciones de longitud de tren, número de locomotoras y dirección en la que los trenes recorren la línea (subida o bajada).

Con los resultados obtenidos a partir de esta hoja Excel se ha procedido a la elaboración de diferentes gráficos y tablas para poder realizar una comparación de todos los casos simulados.

Finalmente, tras comparar los resultados se ha procedido a la optimización del transporte de mercancías en la línea Zaragoza Canfranc

2. Objetivo, justificación y alcance del trabajo

2.1 Objetivo del trabajo

El objetivo de este trabajo es analizar la capacidad de transporte de mercancías en la línea Zaragoza – Canfranc analizando diferentes alternativas tecnológicamente asequibles. Con la composición de trenes de mercancías de diferentes características y utilizando la tecnología de control más avanzada que permita la línea, se tendrá en cuenta la posibilidad de una tracción complementaria que permita superar mayores rampas, y longitudes de composiciones que maximicen la capacidad de transporte de la alineación, analizándose el flujo logístico óptimo.

2.2 Justificación del trabajo

La capacidad de transporte de una línea ferroviaria es un factor clave a la hora de determinar el modo de explotación de la misma, así como el flujo de trenes y mercancías que van a pasar por ella. Por esto un análisis de la capacidad es esencial para poder tomar decisiones sobre la composición de los trenes y el tipo de explotación. Este análisis no solo debe hacerse para nuevas líneas, las que ya están en uso se pueden beneficiar de estos análisis gracias a que permiten una optimización de su uso y explotación respecto a su situación actual.

La importancia de este análisis es evidente para la correcta explotación de una línea ferroviaria. Son muchos los factores que se tienen que tener en cuenta en estos estudios, pero los más importantes son: el consumo de combustible y por consecuencia el coste económico, el tiempo y la cantidad de carga que se puede transportar en la línea. Por eso en este trabajo nos vamos a centrar en estos 3 factores.

2.3 Alcance del trabajo

Este trabajo se divide en cuatro grandes bloques. El primero de ellos es la obtención de datos de la situación actual de la línea ferroviaria, grampas, pendientes y curvaturas. También se han obtenido datos de las locomotoras y vagones que se van a usar para la simulación: peso, longitud, carga máxima y velocidad máxima.

El segundo bloque es la elaboración de una hoja Excel que va a permitir el cálculo de los consumos energéticos, el tiempo que se tarda en hacer el recorrido, la cantidad de material que se puede transportar, las velocidades máximas, longitud y composición del tren. Para ello se ha hecho uso de fórmulas empíricas obtenidas por los diferentes fabricantes y administraciones ferroviarias a nivel global para el cálculo de las resistencias a la rodadura, curva y

aerodinámica. También va a permitir hacer las comprobaciones de la adherencia y de la potencia de la locomotora para cada tramo.

Una vez obtenida esta hoja Excel se han introducido en ella los datos de los tramos pendientes y radios de curvatura del trazado de la línea. A continuación, se han simulado varios casos diferentes: distintos modelos de locomotora Diésel, distintas composiciones de trenes cambiando el tipo de vagón remolcado, distintos requerimientos como velocidad mínima o tiempo máximo del recorrido y cómo de cargados van los vagones.

Finalmente, con los resultados obtenidos de la hoja se ha hecho una comparativa de todos ellos para poder realizar un estudio de optimización sobre el modelo de explotación de la línea. Se han hecho comparativas en función de distintos criterios como el tiempo que se tarda en realizar el recorrido, la cantidad de carga que se puede transportar o el consumo de combustible. A partir de estas comparativas se han extraído las conclusiones sobre cuál es el mejor modelo de explotación de la línea Zaragoza-Canfranc en función del tipo de material a transportar y de diferentes factores.

3. Introducción

3.1 Situación actual de la línea

La línea ferroviaria Zaragoza-Canfranc, también conocida como línea 56 de media distancia, es hoy en día una línea que se puede considerar casi en desuso ya que solo circulan cuatro trenes al día por ella [1] dos de subida, Zaragoza-Delicias a Canfranc, y dos de bajada, de Canfranc a Zaragoza-Delicias. Esto se debe a que la línea no es muy usada por los viajeros y que el transporte de mercancías por ella resulta muy complejo debido a las elevadas pendientes que hay en el recorrido.

A pesar de estas dificultades la su situación geográfica hace que se pueda llamar a esta línea estratégica. Esta línea en el pasado conectaba la ciudad de Zaragoza con la ciudad francesa de Pau a través de un túnel, pero un derrumbe del lado francés en el año 1970 cortó esta conexión hasta la actualidad. Diferentes instituciones gubernamentales de España, Francia, Aragón y Nueva Aquitania llevan varios años estudiando su reapertura [2]. Esto permitiría recuperar un paso fronterizo en la sección central de los Pirineos evitando que mucha mercancía tenga que ser enviada a través de los únicos dos pasos que existen actualmente en los extremos de la cordillera en Irún-Hendaya y Portbou-Cervera [2]. De esta forma se conseguiría ahorrar mucho tiempo y kilómetros que suponen un coste adicional en el transporte de mercancías.

A pesar de haber perdido esta conexión con el país vecino y las elevadas pendientes a superar esta línea se ha seguido usando para el transporte de mercancías por la empresa Silos Aragoneses de Canfranc. El modelo de explotación que han usado durante estos años ha sido el siguiente. Suben trenes vacíos hasta Canfranc, una vez allí se cargan con cereal que ha sido traído desde Francia en camiones.

En este trabajo todos los casos que se van a simular van a seguir el mismo modelo de explotación que ha hecho la empresa Silos Aragoneses de Canfranc hasta ahora.

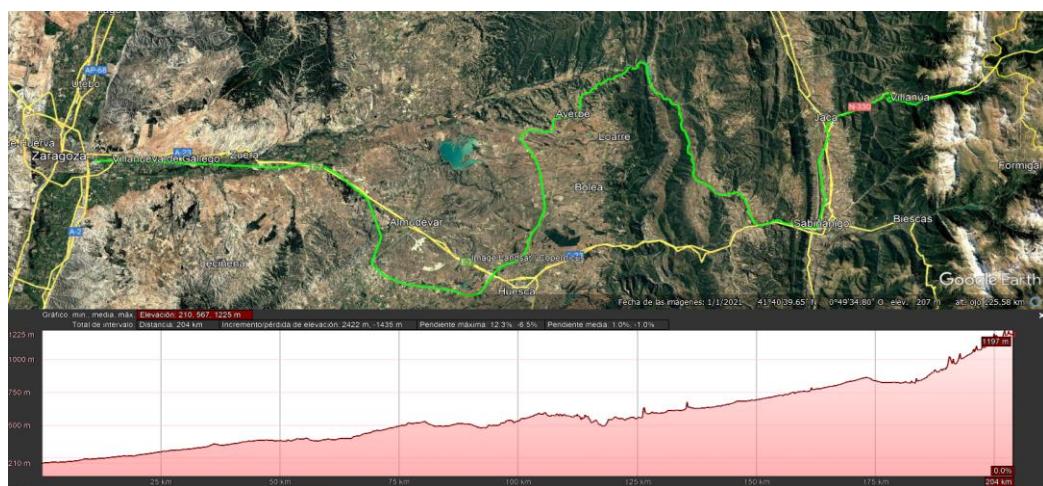


Ilustración 1: Trazado y perfil de altura de la línea 56 de media distancia Zaragoza-Canfranc. Fuente: Google Earth

La línea actualmente se divide en tres tramos diferenciados por el tipo de vía. El primer tramo va desde Zaragoza hasta Tardienta, en la la vía es única de ancho ibérico (1668 mm) y esta

electrificada en corriente continua a 3kV [3]. El segundo tramo está comprendido entre Tardienta y Huesca. Este tramo se caracteriza por hacer uso del tercer carril, el cual permite circular tanto a trenes de ancho ibérico como estándar (1435 mm). Este segundo tramo no está electrificado por lo que es necesario el uso de una locomotora Diesel. El último tramo es el que une Huesca con la estación internacional de Canfranc y se caracteriza por ser de ancho ibérico sin electrificar, lo que hace que solo trenes de tracción Diesel puedan circular por él.

A esto se debe sumar también el hecho de que la velocidad máxima permitida en mucha parte del trazado es de tan solo 65 km/h habiendo incluso un tramo en el que solo pueden circular a 40 km/h. Esto hace que la velocidad media de los trenes que pasan por esta línea se reduzca haciendo que el tiempo en realizar el recorrido aumente considerablemente.



Ilustración 2: Gráfico de velocidades máximas de la línea. Fuente: [4]

Respecto a los sistemas de seguridad implementados en la línea son tres [5]. El primero de ellos cubre el tramo entre Zaragoza y Tardienta, es el sistema BAU (Bloqueo Automático en vía Única) con control desde un centro CTC (Control de Tráfico Centralizado). Esto quiere decir que la distancia entre ambas estaciones se puede dividir en varios cantones permitiendo que circulen más trenes por la vía [6],[7]. Los cantones son bloqueados para una dirección por el responsable de circulación desde el CTC. Una vez bloqueado el sentido de los cantones pueden empezar a circular trenes en ese sentido y no se libera hasta que el tren que estaba circulando por el salga [6],[7]. De esta forma se evita que haya más de un tren en el mismo cantón reduciendo drásticamente el riesgo de colisión entre trenes.

El segundo tramo comprendido entre Tardienta y Ayerbe cuenta con un sistema de seguridad muy parecido al anterior, el BLAU (Bloqueo de Liberación Automática en vía Única). La principal diferencia con el sistema BAU es que ahora solo existe un cantón entre estaciones haciendo que solo pueda circular un tren por la vía [6],[7].

El tramo final entre Ayerbe y Canfranc cuenta con un sistema de seguridad BT (Bloqueo Telefónico). En este caso el bloqueo se produce mediante el envío de telefonemas entre las estaciones entre las que está comprendido el cantón [6],[7]. Al igual que con el sistema BLAU, solo existe un cantón entre estaciones, permitiendo que solo circule un tren entre ellas.

Como se ha visto en los párrafos anteriores las condiciones de la línea Zaragoza-Canfranc no son las ideales. Por ello se están realizando varios estudios para acondicionar la totalidad de la línea. Está previsto que el ancho pase de ser ibérico (1668 mm) a estándar UIC (1435 mm) en

toda la línea, lo que facilitaría una futura conexión con Francia. También se espera que para el año 2040 se haya electrificado toda la vía a 25 kV, permitiendo así que circulen trenes de tracción eléctrica [1].

Marcados estos objetivos de acondicionamiento, las obras se han dividido en varias fases habiendo comenzado la segunda de ellas el 19 de junio de 2023. La finalización de esta fase se espera para febrero del año 2025. Las obras resultan incompatibles con el tráfico ferroviario por lo que todas las operaciones en la línea se han suspendido. Por este motivo, aunque antes de las obras había dos trenes diarios de subida y de bajada entre Zaragoza y Canfranc y un tren de mercancías diario no se han tenido en cuenta restricciones respecto al cruce de trenes en las estaciones o entre ellas en este trabajo.

3.2 Modo de análisis

El análisis de la capacidad se ha llevado a cabo a través de varias hojas Excel en las que se han ido variando los datos de: modelo de locomotora, número de locomotoras, tipo de vagón arrastrado, cantidad de llenado de los vagones y velocidad de los trenes. Los resultados obtenidos de estas hojas han sido: tiempo que se tarda en realizar el recorrido y consumo en litros de Diésel. Además, también se han realizado las comprobaciones de potencia de la locomotora y de adherencia. Estas comprobaciones resultan críticas ya que si no se cumplen resulta imposible que un tren pueda circular por una vía.

La comprobación de la potencia es simplemente comparar la potencia necesaria para superar un tramo de la línea con la potencia que es capaz de suministrar la locomotora, es decir, sirve para asegurar que la locomotora seleccionada es capaz de arrastrar el convoy.

La comprobación de la adherencia sirve para verificar que el tren no va a deslizar. Si el límite calculado es menor que la potencia necesaria para superar un tramo significa que las ruedas ejercen un par mayor al máximo que se puede ejercer en ese tramo por lo que las ruedas deslizan. Si el límite es mayor que la potencia necesaria para superar ese tramo no hay riesgo de que el tren deslice. Esta comprobación resulta crítica para asegurar la seguridad cuando el tren esté circulando.

4. Definición del problema

4.1 Descripción de la línea Zaragoza-Canfranc

Para poder caracterizar la línea Zaragoza-Canfranc se ha partido de datos obtenidos de los mapas publicados en la declaración de red de Adif del año 2021. De ella se pueden obtener datos como la pendiente característica, longitud máxima permitida, tipo de seguridad instalada en la vía, velocidad máxima permitida y tipo de vía. También se ha partido de datos que levantes a la línea como y sus estaciones y puntos kilométricos.

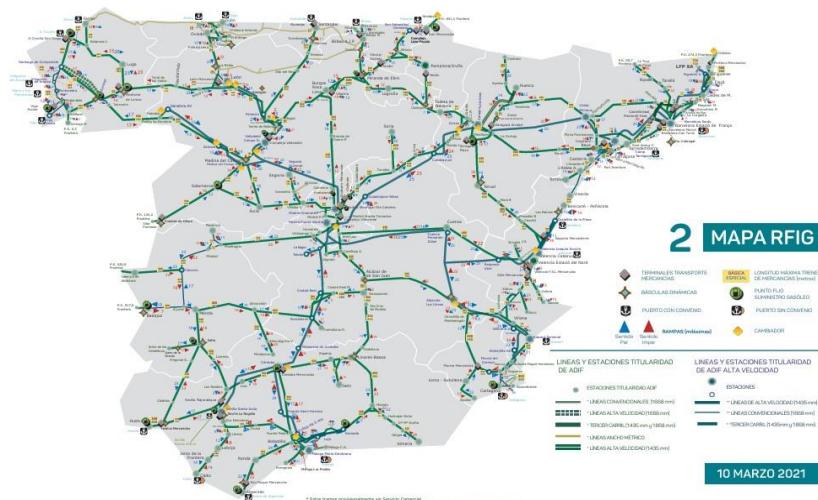


Ilustración 3: Mapa de longitudes máximas y pendientes. Fuente: Declaración de red Adif 2021



Ilustración 4: Detalle de longitudes máximas y pendientes. Fuente: Declaración de red Adif 2021



Ilustración 5: Mapa del tipo de vía y velocidades máximas. Fuente: Declaración de red Adif 2021



Ilustración 6: Detalle del tipo de vía y velocidades máximas. Fuente: Declaración de red Adif 2021

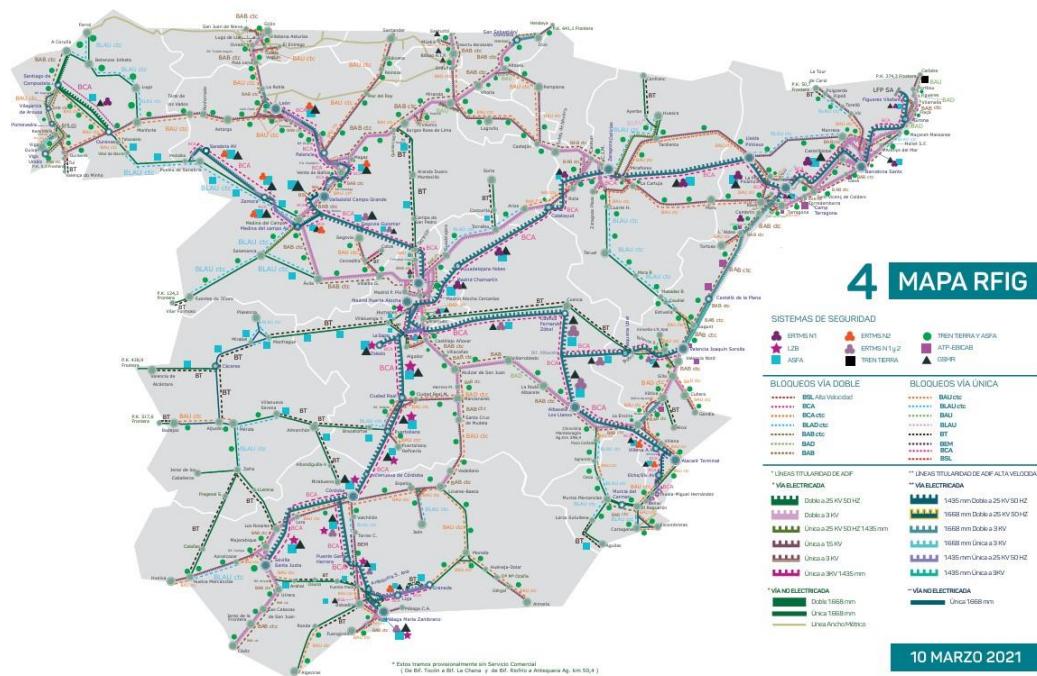


Ilustración 7: Mapa de sistemas de seguridad. Fuente: Declaración de red Adif 2021

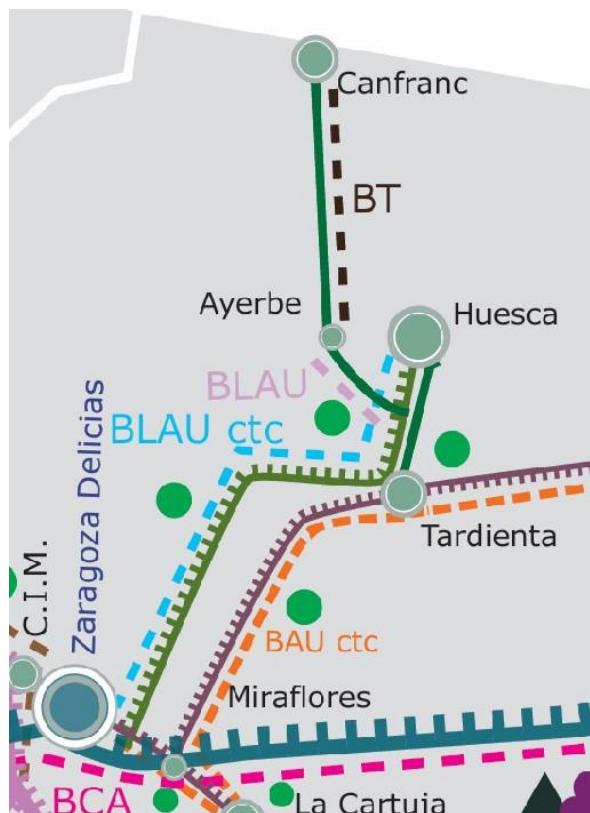


Ilustración 8: Detalle de sistemas de seguridad. Fuente: Declaración de red Adif 2021

Estos datos sirven para hacer un primer análisis del estado de la vía, pero el resultan insuficientes para hacer un análisis exhaustivo de su estado poder crear así un modelo con el que trabajar. Para obtener los datos necesarios para la creación del modelo sea discretizado la totalidad de la línea en tramos de 100 m aproximadamente. Esta discretización permite obtener datos más reales de las pendientes, longitudes y radios de curvatura. Todos estos datos van a permitir realizar un cálculo mucho más preciso.

Se ha decidido que la distancia de discretización sea de unos 100 m porque con esta longitud de tramo se mantienen las características principales de pendiente y curvatura si la hubiese. Para realizar la discretización de la línea se ha utilizado la herramienta Google Earth que permite tomar medidas de distancias, curvas y alturas. También permite sacar el perfil de altura una vez definido el trazado. Con los datos de las alturas tomadas al principio y final de cada tramo sea calculado la pendiente característica de ese tramo.

Para obtener datos en los tramos en los que había túneles Se ha seguido la siguiente metodología. Primero se ha medido la longitud del túnel para después obtener los datos de altura a la entrada y salida de éste. de este modo se ha calculado una pendiente constante en todo el tramo del túnel. Esto ha sido necesario ya que los datos de altura que se obtienen De Google que responden al punto más alto de la superficie, es decir, En un túnel se obtiene la altura de lo que está por encima no del propio túnel.

A continuación, se incluyen capturas de cómo ha sido el proceso de la toma de datos.



Ilustración 9: Discretización del trazado en San Juan de Mozarrifar. Fuente: Google Earth

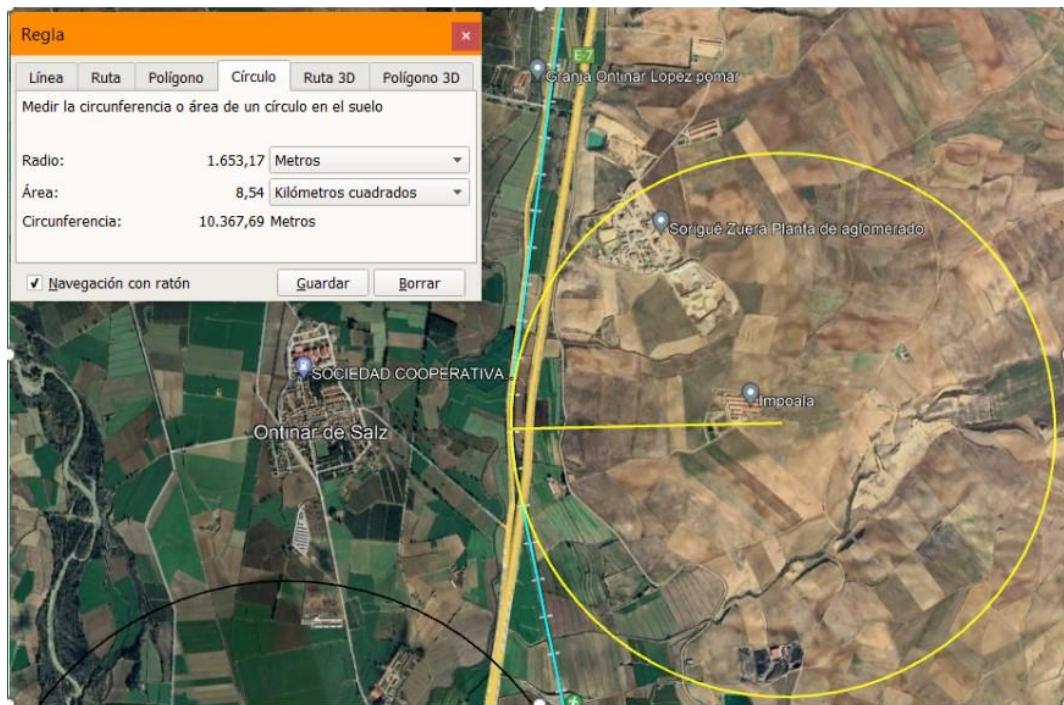


Ilustración 10: Toma de datos de curva – Ontinar de Salz. Fuente: Google Earth



Ilustración 11: Toma de datos entrada a túnel. Fuente: Google Earth



Ilustración 12: Toma de datos salida túnel. Fuente: Google Earth



Ilustración 13: Perfil de elevación del túnel. Fuente: Google Earth

Como se ve en la ilustración 13 el perfil de elevación del tramo del túnel es incorrecto y por eso se ha tomado una pendiente constante entre la entrada y la salida en función de las alturas de ambos puntos.

Para obtener las velocidades máximas a las que está permitido circular en la línea se ha consultado el “Estudio informativo de implantación del ancho estándar en el tramo Huesca-Canfranc” publicado en la página web del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible [4]. Ha hecho falta consultar este documento porque los límites de velocidades proporcionados

por Adif en su declaración de red son insuficientes ya que solo muestra las velocidades máximas entre las principales estaciones sin atender a restricciones más locales por túneles o seguridad. Las velocidades se pueden ver en la ilustración dos.

4.2 Hipótesis y objetivo

Con todos los datos obtenidos en el paso anterior, se pueden consultar en los anexos, ya se pueden lanzar hipótesis sobre cómo debe ser la composición del tren para optimizar el transporte de mercancías en la línea.

La primera hipótesis que se puede lanzar es que para superar las elevadas rampas que hay en algunos tramos del trazado va a ser necesario utilizar dos locomotoras en vez de una para poder arrastrar la mayor cantidad de carga posible.

Otra posible hipótesis que se puede hacer es que al no tratarse de un recorrido excesivamente largo puede resultar interesante componer trenes más pequeños y más rápidos en vez de trenes más grandes y más lentos.

También se puede pensar que resulte más eficaz llevar más vagones con menos carga que pocos vagones con mucha carga.

El siguiente paso es hacer un estudio de todas estas hipótesis buscando maximizar la carga transportada mientras se minimiza el tiempo que se tarda en hacer el recorrido y el combustible consumido.

5. Metodología del análisis

5.1 Elección de las condiciones

En este apartado se va a explicar la metodología utilizada para el análisis de la capacidad ferroviaria en la línea Zaragoza-Canfranc.

El primer paso ha sido seleccionar el diferente material ferroviario que va a ser objeto de estudio en esta simulación. En primer lugar, se han seleccionado los modelos de locomotora que se van a usar. Han sido dos, ambas de tracción diésel ya que la línea no está electrificada en su totalidad y de la operadora Renfe. La primera de ellas ha sido la locomotora serie 333.3 y la segunda ha sido la locomotora serie 319.2. Como una de las hipótesis principales es el uso de 2 locomotoras para hacer frente a las rampas del trazado se van a simular casos en los que se utilicen tanto una como dos locomotoras. Los datos de tara, longitud, potencia, velocidad máxima y ancho de vía se pueden ver en la siguiente tabla.

Locomotoras		
	319.2	333.3
Tara (kg)	110000	120000
Longitud (m)	19,5	22,33
Potencia (CV)	1970	3043
Potencia (KW)	1455	2237
Velocidad máxima (Km/h)	120	120
Ancho vía (mm)	1668/1435	1668

Tabla 1: Datos de locomotora 319.2 y 333.3. Fuente: Elaboración propia

Una vez elegidas las locomotoras Se ha seguido con la elección de los vagones que van a ser remolcados por éstas. Se han seleccionado dos vagones de tipo tolva: el vagón Tgpps-TT5 y el vagón Tagpp-T1. Se han seleccionado estos dos vagones porque ambos están destinados al transporte de materiales como el carbón o cereales que son las mercancías principales que se han transportado históricamente en la línea Zaragoza-Canfranc. Los datos de ambas se pueden ver en la siguiente tabla.

Vagones		
	Tgpps-T1	Tagpp-TT5
Tara (kg)	12300	24000
Carga máxima (kg)	27500	56000
Masa vagón (kg)	39800	80000
Longitud (m)	10,64	14,16
Velocidad máxima (Km/h)	100	100

Tabla 2: Datos de tolvas T1 y TT5. Fuente: Elaboración propia

Respecto a la carga de los vagones se van a simular casos en los que se va a transportar la carga máxima que permiten y también casos en los que, aunque los vagones están llenos el material transportado es mucho menos denso y lo que hace que el peso de la carga transportada sea menor. Durante el resto del trabajo a los casos en los que se hable de material menos denso se les denominará "mitad" o se dirá que los vagones están medio llenos.

Como se puede comprobar la velocidad máxima a la que pueden circular las tolvas es menor que la velocidad máxima de las locomotoras y también es menor que la velocidad máxima permitida en algunos tramos de la línea. Por este motivo se establece una velocidad límite de 100 km/h.

Después de haber seleccionado las locomotoras y vagones se han definido dos condiciones de velocidad. La primera de ellas consiste en asegurar que el tren vaya a la velocidad máxima permitida en todos los tramos del trayecto. La segunda establece una velocidad mínima de 30 km/h para todo el trayecto.

Con el material seleccionado y definidas todas las condiciones y variables que se quieren estudiar quedan definidos 32 casos a simular. En todos ellos lo que se busca es transportar la mayor carga posible respetando los límites de adherencia, potencia de la locomotora y velocidad establecidos.

Caso	Condición Velocidad	Locomotora	Nº Locomotoras	Tipo de Vagón
1	V max y lleno	333.3	1	TT5
2	V max y lleno	319.2	1	TT5
3	V max y lleno	333.3	1	T1
4	V max y lleno	319.2	1	T1
5	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	TT5
6	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	TT5
7	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	T1
8	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	T1
9	V max y lleno	333.3	2	TT5

10	V max y lleno	319.2	2	TT5
11	V max y lleno	333.3	2	T1
12	V max y lleno	319.2	2	T1
13	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	TT5
14	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	TT5
15	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	T1
16	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	T1
17	V max y a mitad	333.3	1	TT5
18	V max y a mitad	319.2	1	TT5
19	V max y a mitad	333.3	1	T1
20	V max y a mitad	319.2	1	T1
21	V min 30 km/h mitad	333.3	1	TT5
22	V min 30 km/h mitad	319.2	1	TT5
23	V min 30 km/h mitad	333.3	1	T1
24	V min 30 km/h mitad	319.2	1	T1
25	V max y a mitad	333.3	2	TT5
26	V max y a mitad	319.2	2	TT5
27	V max y a mitad	333.3	2	T1
28	V max y a mitad	319.2	2	T1
29	V min 30 km/h mitad	333.3	2	TT5
30	V min 30 km/h mitad	319.2	2	TT5
31	V min 30 km/h mitad	333.3	2	T1
32	V min 30 km/h mitad	319.2	2	T1

Tabla 3: Casos a simular. Fuente: Elaboración propia

5.2 Modelado de la hoja

En este punto ya se ha realizado la discretización de la línea y se tiene la información de alturas, radios de curvatura y distancia de los tramos, pero hace falta una herramienta para poder procesar toda esta información y sacar resultados. Para ello se ha creado una hoja Excel en la que introduciendo todos estos datos se van a obtener resultados del consumo de litros de combustible, tiempo que se tarda en realizar el recorrido, resistencia al avance y energía consumida por la locomotora. También se van a realizar las comprobaciones de la potencia de la locomotora y de la adherencia.

Para poder obtener los resultados mencionados hace falta calcular varios datos intermedios como son las pendientes, resistencias o energías. La velocidad en cada tramo también es necesaria para el cálculo de varios datos intermedios, pero como no se sabe a qué velocidad va a poder circular el tren en un tramo en concreto se obtiene un primer resultado utilizando la velocidad máxima permitida en ese tramo.

Las pendientes de cada tramo son muy sencillas de calcular con los datos que ya se tienen con la siguiente formula:

$$p(\%) = \frac{h_2(m) - h_1(m)}{D(m)} \cdot 1000$$

Donde:

- p: Pendiente
- h_2 : Altura fin tramo
- h_1 : Altura inicio tramo
- D: Distancia tramo

La aceleración también es un dato que hace falta calcular con la siguiente fórmula:

$$a \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{v_2^2 \left(\frac{m}{s} \right) - v_1^2 \left(\frac{m}{s} \right)}{D(m)}$$

Donde:

- a: Aceleración
- v_2 : Velocidad fin tramo
- v_1 : Velocidad inicio tramo
- D: Distancia tramo

Otro dato calcular es el tiempo que se tarda en recorrer el tramo, el cual se calcula en función de:

$$\text{Para } v_2 = v_1: t(s) = \frac{v \left(\frac{m}{s} \right)}{D(m)}$$

$$\text{Para } v_2 \neq v_1: t(s) = \frac{v_2 \left(\frac{m}{s} \right) - v_1 \left(\frac{m}{s} \right)}{a \left(\frac{m}{s^2} \right)}$$

Donde:

- t: Tiempo
- a: Aceleración
- v_2 : Velocidad fin tramo
- v_1 : Velocidad inicio tramo
- v: Velocidad tramo
- D: Distancia tramo

La resistencia aerodinámica se calcula como:

$$r_a(N) = \frac{f \cdot S(m^2) \cdot v^2}{16} \cdot g\left(\frac{m}{s^2}\right)$$

Donde:

- r_a : Resistencia aerodinámica
- f : Coeficiente de penetración aerodinámica
- S : Superficie frontal
- v : Velocidad tramo
- g : Aceleración de la gravedad

La que resistencia a las curvas se calcula como:

$$r_c(N) = \frac{M(t)}{1000} \cdot g\left(\frac{m}{s^2}\right) \cdot \frac{800}{R(m)}$$

Donde:

- r_c : Resistencia a la curva
- M : Masa del tren
- g : Aceleración de la gravedad
- R : Radio de la curva

Si no hay curva la resistencia es igual a cero.

La resistencia a la rodadura se calcula como:

$$r_{rod}(N) = \mu \cdot M(t) \cdot g\left(\frac{m}{s^2}\right)$$

Donde:

- r_{rod} : Resistencia a la rodadura
- M : Masa del tren
- g : Aceleración de la gravedad
- μ : Coeficiente de rodadura

La resistencia al avance es la suma de las otras 3 resistencias:

$$r_t(N) = r_a(N) + r_c(N) + r_{rod}(N)$$

Donde:

- r_t : Resistencia al avance
- r_a : Resistencia aerodinámica
- r_c : Resistencia a la curva
- r_{rod} : Resistencia a la rodadura

El trabajo de las fuerzas resistentes es:

$$W_{r_t}(kWh) = \frac{r_t(N) \cdot D(m)}{3600000}$$

Donde:

- W_{r_t} : Trabajo de las fuerzas que resistentes
- r_t : Resistencia al avance
- D: Distancia tramo

La variación de la energía cinética viene dada por:

$$\Delta E_c(kWh) = \frac{0.5 \cdot M(t) \cdot \left(v_2^2 \left(\frac{m}{s} \right) - v_1^2 \left(\frac{m}{s} \right) \right)}{3600000}$$

Donde:

- ΔE_c : Variación de la energía cinética
- M: Masa del tren
- v_2 : Velocidad fin tramo
- v_1 : Velocidad inicio tramo

La variación de la energía potencial viene dada por:

$$\Delta E_{cp}(kWh) = \frac{M(t) \cdot g \left(\frac{m}{s^2} \right) \cdot (h_2(m) - h_1(m))}{3600000}$$

Donde:

- ΔE_p : Variación de la energía potencial
- M: Masa del tren
- g: Aceleración de la gravedad
- h_2 : Altura fin tramo
- h_1 : Altura inicio tramo

La energía total es la suma de:

$$E_t(kWh) = W_{rt}(kWh) + \Delta E_c(kWh) + \Delta E_p(kWh)$$

Donde:

- E_t : Energía total
- W_{rt} : Trabajo de las fuerzas que resistentes
- ΔE_c : Variación de la energía cinética
- ΔE_p : Variación de la energía potencial

La energía efectiva consumida es:

$$\text{Para } E_t(kWh) \leq 0: E_{ef} = 0$$

$$\text{Para } E_t(kWh) > 0: E_{ef} = E_t$$

Donde:

- E_{ef} : Energía efectiva consumida
- E_t : Energía total

Finalmente, la energía consumida por la locomotora es:

$$E_{loc}(kWh) = E_{ef}(kWh) + E_{ralenti}(kWh)$$

Donde:

- E_{loc} : Energía consumida por la locomotora
- $E_{ralenti}$: Energía consumida a ralentí

La energía consumida a ralentí es cero si la velocidad es mayor que cero y si la velocidad del tren es cero su valor viene dado por:

$$E_{ralenti} (kWh) = \frac{\mu}{15} \cdot M(t) \cdot g \left(\frac{m}{s^2} \right) \cdot \frac{t_{paro} (s)}{3600000}$$

Donde:

- $E_{ralenti}$: Energía consumida a ralentí
- μ : Coeficiente de rodadura
- M : Masa del tren
- g : Aceleración de la gravedad
- t_{paro} : Tiempo de parada igual a 300s en este estudio.

Por último, se realizan las comprobaciones de la potencia de la locomotora y del límite de adherencia.

La potencia desarrollada en el tramo se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_{tramo} (CV) = \frac{M(t)}{1000} \cdot (\mu \cdot 1000 + p(\%)) \cdot \frac{v \left(\frac{m}{s} \right)}{75}$$

Donde:

- P_{tramo} : Potencia desarrollada en el tramo
- M : Masa del tren
- μ : Coeficiente de rodadura
- p : Pendiente
- v : Velocidad tramo

Siempre se debe cumplir que la potencia desarrollada en el tramo sea inferior a la potencia de la locomotora, así aseguramos que la locomotora pueda arrastrar todo el convoy.

Para calcular el límite de adherencia primero hace falta calcular el coeficiente de adherencia:

$$\varphi = \frac{0.24}{1 + 0.01 \cdot v \left(\frac{km}{h} \right)}$$

Donde:

- φ : Coeficiente de adherencia
- v : Velocidad tramo

Una vez calculado este coeficiente se puede calcular el límite de adherencia como:

$$L_{adherencia}(CV) = \frac{100}{27} \cdot \varphi \cdot \frac{m(t)}{1000} \cdot v \left(\frac{km}{h} \right)$$

Donde:

- $L_{adherencia}$: Límite de adherencia
- φ : Coeficiente de adherencia
- m : Peso de la locomotora
- v : Velocidad tramo

La locomotora no puede desarrollar una potencia superior al límite de adherencia en ningún tramo ya que si lo hace las ruedas deslizarían suponiendo un gran riesgo para la seguridad.

De este modo quedan definidas las dos condiciones que cualquier composición de tren que se vaya a estudiar debe cumplir para realizar el recorrido sin ningún tipo de riesgo.

El consumo de combustible se ha calculado de 2 maneras distintas. La primera como consumo en litros de diésel por hora y la segunda como consumo de litros de diésel cada 100 km. Las fórmulas para su cálculo son las siguientes:

$$C \left(\frac{L}{100 \text{ km}} \right) = \frac{\left(\frac{\left(\frac{E_{total}(kWh) \cdot 3600}{Q_d \left(\frac{kJ}{kg} \right) \cdot \rho_d \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \right) \cdot 1000}{D_{total}(km)} \right) \cdot 100}{\left(\frac{\eta_{motor} \cdot \eta_{transmisión}}{10000} \right)}$$

Donde:

- C : Consumo en litros cada 100 km
- E_{total} : Energía total consumida en el trayecto
- Q_d : Poder calorífico del diésel (42900 kJ/kg)

- ρ_d : Densidad del diésel (850 kg/m³)
- D_{total} : Distancia total del trayecto, en todos los casos 410,43 km
- η_{motor} : Rendimiento del motor (75%)
- $\eta_{transmisión}$: Rendimiento de la transmisión (60%)

$$C_h \left(\frac{L}{h} \right) = \frac{\left(\frac{\frac{E_{total} (kWh) \cdot 3600}{Q_d \left(\frac{kJ}{kg} \right) \cdot \rho_d \left(\frac{kg}{m^3} \right)} \cdot 1000}{T_{total} (h)} \right)}{\left(\frac{\eta_{motor} \cdot \eta_{transmisión}}{10000} \right)}$$

Donde:

- C_h : Consumo en litros cada hora
- E_{total} : Energía total consumida en el trayecto
- Q_d : Poder calorífico del diésel (42900 kJ/kg)
- ρ_d : Densidad del diésel (850 kg/m³)
- T_{total} : Tiempo total del trayecto.
- η_{motor} : Rendimiento del motor (75%)
- $\eta_{transmisión}$: Rendimiento de la transmisión (60%)

5.3 Optimización

Como se ha comentado con anterioridad, para poder obtener unos primeros resultados sobre los que trabajar las velocidades que se han empleado han sido las máximas permitidas en cada tramo del recorrido.

Los resultados obtenidos con estas velocidades sirven para verificar si se cumplen o no las condiciones de potencia de la locomotora y de adherencia en todos los tramos. En los casos en los que no se cumplen es necesario modificar las velocidades hasta los límites que se han marcado para este proyecto. Si al modificar la velocidad a la que circula el tren por el tramo se sigue sin cumplir alguna de las dos condiciones es necesario modificar la composición del tren, es decir, hay que cambiar el número de vagones arrastrados por la locomotora.

Cuando ya se ha modificado la composición del tren se vuelve a calcular los resultados volviendo a utilizar las velocidades máximas permitidas en cada tramo. De nuevo se ha de comprobar todos aquellos tramos en los que no se cumpla alguna de las condiciones de potencia o adherencia y modificar la velocidad. Se repite este proceso hasta que se cumplen ambas condiciones en todos los tramos modificando únicamente la velocidad buscando siempre llevar el mayor número de vagones posible,

Fijada la velocidad de los tramos críticos respecto a la adherencia o potencia se procede a la corrección del resto de velocidades de los tramos próximos a los críticos y en las tenemos en los que cambie la velocidad máxima permitida. esto se hace para que coma máximo haya una variación de 5 km/h entre cada tramo.

Se procede de igual manera para los 32 casos que son objeto de estudio variando las velocidades y composiciones de los trenes hasta que en cada 1 se encuentre el tren que más carga es capaz de transportar.

Una vez obtenidos los resultados de todos los casos se procede a la evaluación e interpretación de ellos para hacer una comparativa de los diferentes modos de explotación y ver cuál de todos ellos resulta el óptimo.

6. Resultados

6.1 Resultados obtenidos

Una vez simulados los 32 casos de estudio se recogen los resultados obtenidos de: número de vagones que lleva el tren, peso total del tren y de la carga que transporta, tiempo que tarda en realizar el recorrido y los litros de combustible que consume. Hay que recordar que en todos los casos simulados se intenta llevar el tren al límite de su capacidad, es decir, que lleve el mayor número de vagones arrastrados posibles y a la mayor velocidad posible.

Los casos en los que en la columna “Condiciones” pone “mitad” no significa que solo se llene la mitad de los vagones, sino que el material transportado es menos denso que si fuese carbón o cereal.

Caso	Condiciones	Locomotora	Nº Locomotoras	Tipo de Vagón	Nº de vagones
1	V max y lleno	333.3	1	TT5	4
2	V max y lleno	319.2	1	TT5	2
3	V max y lleno	333.3	1	T1	8
4	V max y lleno	319.2	1	T1	4
5	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	TT5	9
6	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	TT5	7
7	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	T1	18
8	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	T1	14
9	V max y lleno	333.3	2	TT5	8
10	V max y lleno	319.2	2	TT5	4
11	V max y lleno	333.3	2	T1	17
12	V max y lleno	319.2	2	T1	9
13	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	TT5	18
14	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	TT5	14
15	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	T1	23
16	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	T1	24
17	V max y a mitad	333.3	1	TT5	6
18	V max y a mitad	319.2	1	TT5	3
19	V max y a mitad	333.3	1	T1	13
20	V max y a mitad	319.2	1	T1	7
21	V min 30 km/h mitad	333.3	1	TT5	14
22	V min 30 km/h mitad	319.2	1	TT5	10
23	V min 30 km/h mitad	333.3	1	T1	26
24	V min 30 km/h mitad	319.2	1	T1	21
25	V max y a mitad	333.3	2	TT5	13
26	V max y a mitad	319.2	2	TT5	7
27	V max y a mitad	333.3	2	T1	23
28	V max y a mitad	319.2	2	T1	15
29	V min 30 km/h mitad	333.3	2	TT5	18

30	V min 30 km/h mitad	319.2	2	TT5	18
31	V min 30 km/h mitad	333.3	2	T1	23
32	V min 30 km/h mitad	319.2	2	T1	24

Tabla 4: Número máximo de vagones que puede llevar el tren con las condiciones descritas. Fuente: Elaboración propia

Caso	Condiciones	Locomotora	Nº Locomotoras	Tipo de Vagon	Nº de vagones
1	V max y lleno	333.3	1	TT5	4
9	V max y lleno	333.3	2	TT5	8
17	V max y a mitad	333.3	1	TT5	6
25	V max y a mitad	333.3	2	TT5	13

Tabla 5: Comparativa del número de vagones arrastrados – Mismo tipo de vagón y locomotora. Fuente: Elaboración propia

Como era de esperarse aumentando el número de locomotoras es posible arrastrar una mayor carga, pero como se ve en la tabla no sigue una relación lineal ya que también depende del material que lleven. Entre los casos 1 y 9 al pasar de 1 a 2 locomotoras también se multiplica por dos el número de vagones que se pueden llevar suponiendo que llevan un material denso. Entre los casos 17 y 25 al doblar el número de locomotoras la cantidad de vagones no se multiplica por dos, que serían 12 vagones, sino que es ligeramente superior pudiendo llevar 13.

También hay que destacar el hecho de que transportar un material la mitad de denso no hace que el número de vagones arrastrados sea el doble como se puede comprobar entre los casos 1 y 17, pasando de 4 a 6 vagones, y entre los casos 9 y 25, donde de 8 vagones se pasa a 13. Esto se debe a que si bien el peso de la carga transportada se reduce a la mitad El peso de los vagones en vacío se mantiene y hay que seguir arrastrando ese peso.

Caso	Condiciones	Locomotora	Nº Locomotoras	Tipo de Vagon	Nº de vagones
1	V max y lleno	333.3	1	TT5	4
2	V max y lleno	319.2	1	TT5	2
9	V max y lleno	333.3	2	TT5	8
10	V max y lleno	319.2	2	TT5	4
17	V max y a mitad	333.3	1	TT5	6
18	V max y a mitad	319.2	1	TT5	3
25	V max y a mitad	333.3	2	TT5	13
26	V max y a mitad	319.2	2	TT5	7

Tabla 6: Comparativa del número de vagones arrastrados – Mismo tipo de vagón y distinta locomotora. Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior podemos comprobar que hacer uso de una locomotora más potente también permite arrastrar un mayor número de vagones. La locomotora 333.3 tiene una potencia de 3040 CV, mientras que la locomotora 319.2 tiene una potencia de 1970 CV. Por esta razón cuando se hace uso de la locomotora 333.3 el número de vagones del convoy es mayor.

Caso	Condiciones	Locomotora	Nº Locomotoras	Tipo de Vagon	Nº de vagones
1	V max y lleno	333.3	1	TT5	4
2	V max y lleno	319.2	1	TT5	2
3	V max y lleno	333.3	1	T1	8
4	V max y lleno	319.2	1	T1	4
17	V max y a mitad	333.3	1	TT5	6
18	V max y a mitad	319.2	1	TT5	3
19	V max y a mitad	333.3	1	T1	13
20	V max y a mitad	319.2	1	T1	7

Tabla 7: Comparativa del número de vagones arrastrados – Distinto tipo de vagón y locomotora. Fuente: Elaboración propia

Con esta tabla podemos comprobar que utilizar vagones más ligeros permite composiciones con un mayor número de vagones.

Caso	Condiciones	Locomotora	Nº Locomotoras	Tipo de Vagon	Nº de vagones
3	V max y lleno	333.3	1	T1	8
4	V max y lleno	319.2	1	T1	4
7	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	T1	18
8	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	T1	14
11	V max y lleno	333.3	2	T1	17
12	V max y lleno	319.2	2	T1	9
15	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	T1	23
16	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	T1	24
19	V max y a mitad	333.3	1	T1	13
20	V max y a mitad	319.2	1	T1	7
23	V min 30 km/h mitad	333.3	1	T1	26
24	V min 30 km/h mitad	319.2	1	T1	21
27	V max y a mitad	333.3	2	T1	23
28	V max y a mitad	319.2	2	T1	15
31	V min 30 km/h mitad	333.3	2	T1	23
32	V min 30 km/h mitad	319.2	2	T1	24

Tabla 8: Comparativa del número de vagones arrastrados – Mismo tipo de vagón y con diferentes condiciones de velocidad.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 se puede ver que hacer circular al tren a menores velocidades permite llevar un mayor número de vagones. Por ejemplo, en el caso 3 la condición es que el tren vaya a la velocidad máxima permitida en cada tramo pudiendo así remolcar 8 vagones T1. En el caso 7 se sigue utilizando la misma locomotora, el mismo número de locomotoras y el mismo tipo de vagón T1, pero ahora la condición es que el tren vaya como mínimo a 30 km/h. Esta velocidad es inferior a la máxima permitida en cualquier tramo de la vía por lo que el tren va a ir más despacio que en el caso anterior haciendo posible que los trenes sean más largos.

Conociendo la cantidad de vagones que se pueden arrastrar en cada caso se calcula la carga útil total transportada en cada uno. El cálculo es sencillo ya que solo hace falta multiplicar el número de vagones por la carga útil que transporta cada vagón, los resultados se recogen en la siguiente tabla.

Caso	Condiciones	Locomotora	Nº Locomotoras	Tipo de Vagon	Carga transportada (T)
1	V max y lleno	333.3	1	TT5	224
2	V max y lleno	319.2	1	TT5	112
3	V max y lleno	333.3	1	T1	220
4	V max y lleno	319.2	1	T1	110
5	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	TT5	504
6	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	TT5	392
7	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	T1	495
8	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	T1	385
9	V max y lleno	333.3	2	TT5	448
10	V max y lleno	319.2	2	TT5	224
11	V max y lleno	333.3	2	T1	467,5
12	V max y lleno	319.2	2	T1	247,5
13	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	TT5	1008
14	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	TT5	784
15	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	T1	632,5
16	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	T1	660
17	V max y a mitad	333.3	1	TT5	168
18	V max y a mitad	319.2	1	TT5	84
19	V max y a mitad	333.3	1	T1	165,75
20	V max y a mitad	319.2	1	T1	89,25
21	V min 30 km/h mitad	333.3	1	TT5	392
22	V min 30 km/h mitad	319.2	1	TT5	280
23	V min 30 km/h mitad	333.3	1	T1	331,5
24	V min 30 km/h mitad	319.2	1	T1	267,75
25	V max y a mitad	333.3	2	TT5	364
26	V max y a mitad	319.2	2	TT5	196
27	V max y a mitad	333.3	2	T1	293,25
28	V max y a mitad	319.2	2	T1	191,25
29	V min 30 km/h mitad	333.3	2	TT5	504
30	V min 30 km/h mitad	319.2	2	TT5	504
31	V min 30 km/h mitad	333.3	2	T1	293,25
32	V min 30 km/h mitad	319.2	2	T1	306

Tabla 9: Carga útil transportada en cada caso según la composición del tren. Fuente: Elaboración propia

Viendo los resultados obtenidos y comparando los casos similares en los que la única condición que cambia es la velocidad por ejemplo el caso 1 con el caso 17. Se puede observar que se transporta una mayor cantidad de carga útil con pocos vagones de material más denso en vez de con muchos vagones con material menos denso.

El siguiente dato obtenido ha sido el tiempo que se tarda en realizar el recorrido, entendiendo como el recorrido la subida desde Zaragoza hasta Canfranc y la bajada desde Canfranc hasta Zaragoza.

Caso	Condiciones	Locomotora	Nº Locomotoras	Tipo de Vagon	Tiempo (h)
1	V max y lleno	333.3	1	TT5	5,647
2	V max y lleno	319.2	1	TT5	5,647
3	V max y lleno	333.3	1	T1	5,647
4	V max y lleno	319.2	1	T1	5,647
5	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	TT5	5,842
6	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	TT5	6,066
7	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	T1	5,857
8	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	T1	6,209
9	V max y lleno	333.3	2	TT5	5,647
10	V max y lleno	319.2	2	TT5	5,647
11	V max y lleno	333.3	2	T1	5,647
12	V max y lleno	319.2	2	T1	5,647
13	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	TT5	5,832
14	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	TT5	6,044
15	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	T1	5,661
16	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	T1	5,893
17	V max y a mitad	333.3	1	TT5	5,647
18	V max y a mitad	319.2	1	TT5	5,647
19	V max y a mitad	333.3	1	T1	5,647
20	V max y a mitad	319.2	1	T1	5,647
21	V min 30 km/h mitad	333.3	1	TT5	5,846
22	V min 30 km/h mitad	319.2	1	TT5	6,071
23	V min 30 km/h mitad	333.3	1	T1	5,857
24	V min 30 km/h mitad	319.2	1	T1	6,217
25	V max y a mitad	333.3	2	TT5	5,647
26	V max y a mitad	319.2	2	TT5	5,647
27	V max y a mitad	333.3	2	T1	5,647
28	V max y a mitad	319.2	2	T1	5,647
29	V min 30 km/h mitad	333.3	2	TT5	5,832
30	V min 30 km/h mitad	319.2	2	TT5	6,045
31	V min 30 km/h mitad	333.3	2	T1	5,647
32	V min 30 km/h mitad	319.2	2	T1	5,663

Tabla 10: Tiempo que cada tren tarda en hacer el recorrido. Fuente: Elaboración propia

Según los resultados de la tabla, el tiempo mínimo para realizar la subida y bajada por la línea es de 5,647 horas. Todos los casos en los que se hace circular el tren a la velocidad máxima tardan este tiempo. Sin embargo, el caso 31 en el que la condición es que la velocidad no sea inferior a 30 km/h tarda lo mismo en realizar el recorrido. En este caso se han utilizado dos locomotoras serie 333.3 arrastrando 23 vagones T1 con material poco denso. Teniendo en cuenta estas condiciones es lógico que el tren puede circular a la misma velocidad que los

trenes definidos para ir a la velocidad máxima pues son dos locomotoras con una potencia elevada arrastrando material no muy pesado.

También se puede apreciar que no hay una gran diferencia entre lo que tardan los casos en los que se busca maximizar la velocidad y los casos en los que se busca maximizar la carga transportada. Como se ha comentado anteriormente el tiempo mínimo para realizar el recorrido son 5,647 horas y el caso que más tarda en realizarlo es el 24 con un tiempo de 6,217 horas. Esto significa que tan solo hay una diferencia de 0,57 horas entre el tren más rápido y el más lento.

Finalmente se han obtenido las letras de combustible que consumen las locomotoras en cada uno de los casos.

Caso	Condiciones	Locomotora	Nº Locomotoras	Tipo de Vagon	Combustible consumido (L)
1	V max y lleno	333.3	1	TT5	284,15
2	V max y lleno	319.2	1	TT5	210,236
3	V max y lleno	333.3	1	T1	286,21
4	V max y lleno	319.2	1	T1	211,29
5	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	TT5	701,622
6	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	TT5	641,807
7	V min 30 km/h y lleno	333.3	1	T1	648,217
8	V min 30 km/h y lleno	319.2	1	T1	582,896
9	V max y lleno	333.3	2	TT5	538,735
10	V max y lleno	319.2	2	TT5	390
11	V max y lleno	333.3	2	T1	558,719
12	V max y lleno	319.2	2	T1	408,236
13	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	TT5	1415,811
14	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	TT5	1351,206
15	V min 30 km/h y lleno	333.3	2	T1	733,906
16	V min 30 km/h y lleno	319.2	2	T1	1158,679
17	V max y a mitad	333.3	1	TT5	328,636
18	V max y a mitad	319.2	1	TT5	232,478
19	V max y a mitad	333.3	1	T1	346,645
20	V max y a mitad	319.2	1	T1	248,784
21	V min 30 km/h mitad	333.3	1	TT5	839,634
22	V min 30 km/h mitad	319.2	1	TT5	702,93
23	V min 30 km/h mitad	333.3	1	T1	727,977
24	V min 30 km/h mitad	319.2	1	T1	683,229
25	V max y a mitad	333.3	2	TT5	542,86
26	V max y a mitad	319.2	2	TT5	463,032
27	V max y a mitad	333.3	2	T1	549,866
28	V max y a mitad	319.2	2	T1	411,96
29	V min 30 km/h mitad	333.3	2	TT5	1189,166
30	V min 30 km/h mitad	319.2	2	TT5	1336,728
31	V min 30 km/h mitad	333.3	2	T1	619,611

32	V min 30 km/h mitad	319.2	2	T1	783,611
----	---------------------	-------	---	----	---------

Tabla 11: Consumo de combustible diésel en litros. Fuente: Elaboración propia

Este resultado es muy importante ya que permite hacerse una idea mucho más clara del coste que va a suponer el transporte de mercancías en cada caso ya que no siempre resulta evidente.

Entre los casos 1 y 3 vemos que consume más el segundo, 286,21 litros frente a 284,15 litros del primero. Antes de obtener esos resultados alguien podría pensar que un tren con la misma locomotora, la misma condición de velocidad y tipo de material arriesgando vagones más ligeros consumirá menos. Viendo los resultados obtenidos se comprueba que esto no es así ya que, si bien los vagones T1 del caso 3 son más ligeros y transportan menos carga útil que los vagones TT5 del caso 1, la locomotora tiene que arrastrar más vagones y aunque tarde en lo mismo el consumo es ligeramente mayor.

Caso	Nº de vagones	Carga transportada (T)	Tiempo (h)	Combustible consumido (L)
1	4	224	5,647	284,15
3	8	220	5,647	286,21

Tabla 12: Comparativa del consumo entre el caso 1 y el caso 3. Fuente: Elaboración propia

Otro factor muy importante a la hora de calcular el consumo total es el tiempo que se tarda en realizar el recorrido. Un tren que circule a velocidades bajas va a consumir menos combustible que uno que circule a mayor velocidad, pero es posible que el consumo total del recorrido sea mayor en el tren más lento porque tarda más tiempo en realizar el recorrido.

En la tabla de abajo podemos ver un ejemplo de esto comparando los casos 8 y 24. En ambos se utiliza una locomotora serie 319.2 arrastrando vagones T1. Lo que varía es la condición de velocidad y número de vagones remolcados.

Caso	Nº de vagones	Carga transportada (T)	Tiempo (h)	Combustible consumido (L)
8	14	385	6,209	582,896
24	21	267,75	6,217	683,229

Tabla 13: Comparativa del consumo entre el caso 8 y el caso 24. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que, aunque se remolquen más toneladas en el caso 8 se tarda menos en realizar el recorrido que en el caso 24. Esto afecta directamente al consumo de combustible que como se ve es mayor en el caso 24.

6.2 Elaboración de KPIs

Los resultados obtenidos permiten comparar los casos similares entre sí en función de una única variable que se busca optimizar. Esta variable puede ser la cantidad de carga útil transportada, el consumo de combustible o el tiempo que se tarda en realizar el recorrido. Si bien es cierto que de esta forma se logra un cierto grado de optimización no es suficiente para poder tomar una decisión final acerca de cuál es el modo de explotación más adecuado para la línea.

Por este motivo es necesario elaborar varios KPI (Key Performance Indicator) que permitan normalizar los resultados obtenidos para así poder hacer una comparación de todos los casos independientemente de sus condiciones sean similares o no.

Caso	Caudal 1 (T/h)	Caudal 2 (T/hL)	Consumo 1 (L/T)	Consumo 2 (L/h)	Consumo 3 (L/Th)	Consumo 4 (L)
1	39,667	0,140	1,269	50,319	0,225	144,658
2	19,834	0,094	1,877	37,230	0,332	87,209
3	38,959	0,136	1,301	50,684	0,230	143,627
4	19,479	0,092	1,921	37,416	0,340	86,337
5	86,272	0,123	1,392	120,100	0,238	420,973
6	64,622	0,101	1,637	105,804	0,270	375,505
7	84,514	0,130	1,310	110,674	0,224	383,629
8	62,007	0,106	1,514	93,879	0,244	336,353
9	79,334	0,147	1,203	95,402	0,213	215,494
10	39,667	0,102	1,741	69,063	0,308	114,947
11	82,787	0,148	1,195	98,941	0,212	225,835
12	43,829	0,107	1,649	72,293	0,292	126,583
13	172,840	0,122	1,405	242,766	0,241	743,301
14	129,715	0,096	1,723	223,562	0,285	679,068
15	111,729	0,152	1,160	129,642	0,205	332,661
16	111,997	0,097	1,756	196,620	0,298	548,114
17	29,750	0,091	1,956	58,197	0,346	127,803
18	14,875	0,064	2,768	41,168	0,490	73,414
19	29,352	0,085	2,091	61,386	0,370	128,927
20	15,805	0,064	2,787	44,056	0,494	77,813
21	67,054	0,080	2,142	143,625	0,366	388,133
22	46,121	0,066	2,510	115,785	0,414	312,413
23	56,599	0,078	2,196	124,292	0,375	312,880
24	43,067	0,063	2,552	109,897	0,410	287,610
25	64,459	0,119	1,491	96,132	0,264	170,935
26	34,709	0,075	2,362	81,996	0,418	112,878
27	51,930	0,094	1,875	97,373	0,332	152,675
28	33,868	0,082	2,154	72,952	0,381	96,583
29	86,420	0,073	2,359	203,904	0,405	423,262
30	83,375	0,062	2,652	221,130	0,439	489,615
31	51,930	0,084	2,113	109,724	0,374	172,041
32	54,035	0,069	2,561	138,374	0,452	230,297

Tabla 14: KPI calculados de caudal y consumo calculados. Fuente: Elaboración propia

El primero de ellos sea ha llamado “Caudal 1” y mide la cantidad de toneladas que se transportan por cada hora.

$$Q_1 \left(\frac{T}{h} \right) = \frac{P_u(T)}{T(h)}$$

Donde:

- Q_1 : Caudal 1
- P_u : Peso de la carga útil
- T_1 : Tiempo que se tarda en hacer el recorrido

Este KPI permite hacer una comparativa de cómo de eficiente es el transporte de mercancías en función del tiempo. Si bien es cierto que con este dato se puede realizar una comparativa de todos los casos aquellos que transporten una mayor cantidad de carga se verán beneficiados por cómo se ha definido este KPI. Para evitar un sesgo se ha definido un nuevo indicador.

El nuevo KPI calculado llamado “Caudal 2” es el resultado de dividir el Caudal 1 entre los litros de combustible que se consumen en cada caso.

$$Q_2 \left(\frac{T}{h \cdot L} \right) = \frac{Q_1 \left(\frac{T}{h} \right)}{C(L)}$$

Donde:

- Q_2 : Caudal 2
- Q_1 : Caudal 1
- C : Consumo de combustible

De esta forma se logra evitar favorecer los trenes más grandes y cargados frente a los más pequeños pues este indicador no solo mide como de eficientes de transporte de mercancía en función del tiempo, sino que también tiene en cuenta la eficiencia en función del consumo de combustible.

Como resulta difícil poder hacer una comparación en una tabla se ha procedido a la elaboración de diferentes gráficos para facilitar su interpretación agrupando los casos en función de varios criterios.

El primer grupo de gráficos agrupa el Caudal 2 en función del número y tipo de locomotora y de la condición de velocidad, permitiendo comparar diferentes tipos de vagones en función del material transportado.

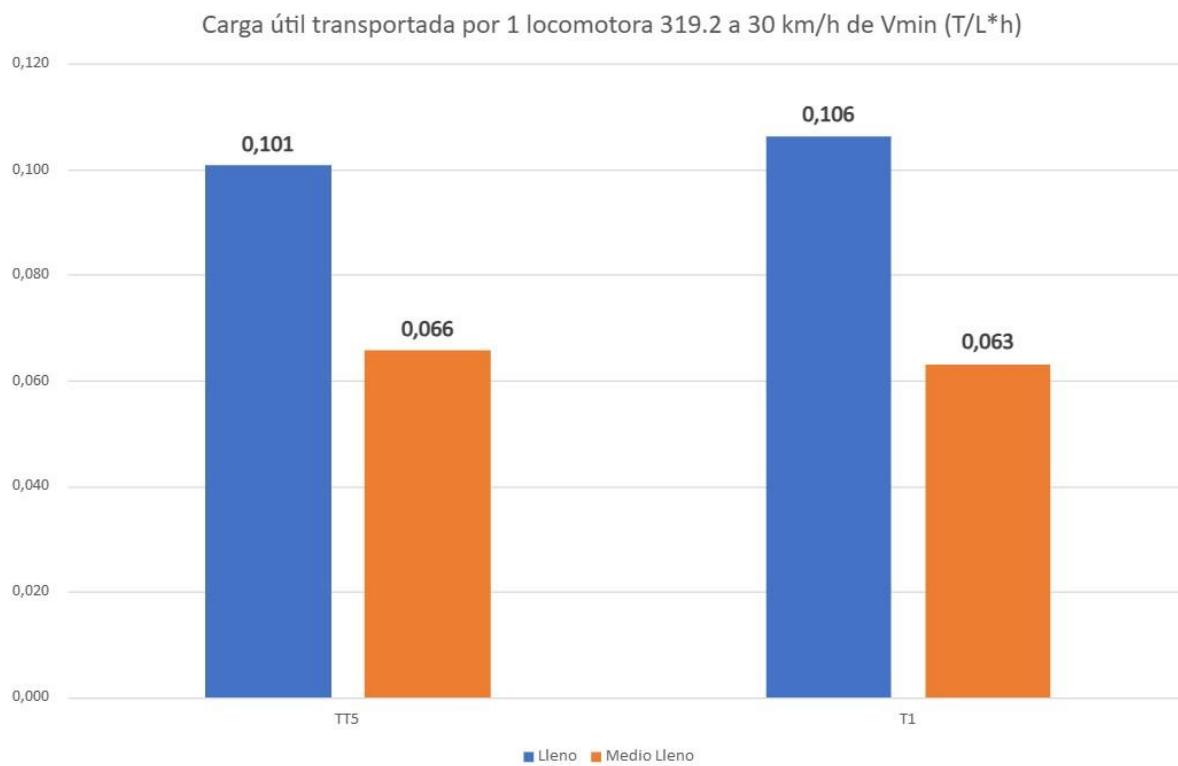


Ilustración 14: Comparativa del Caudal 2 para una locomotora 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

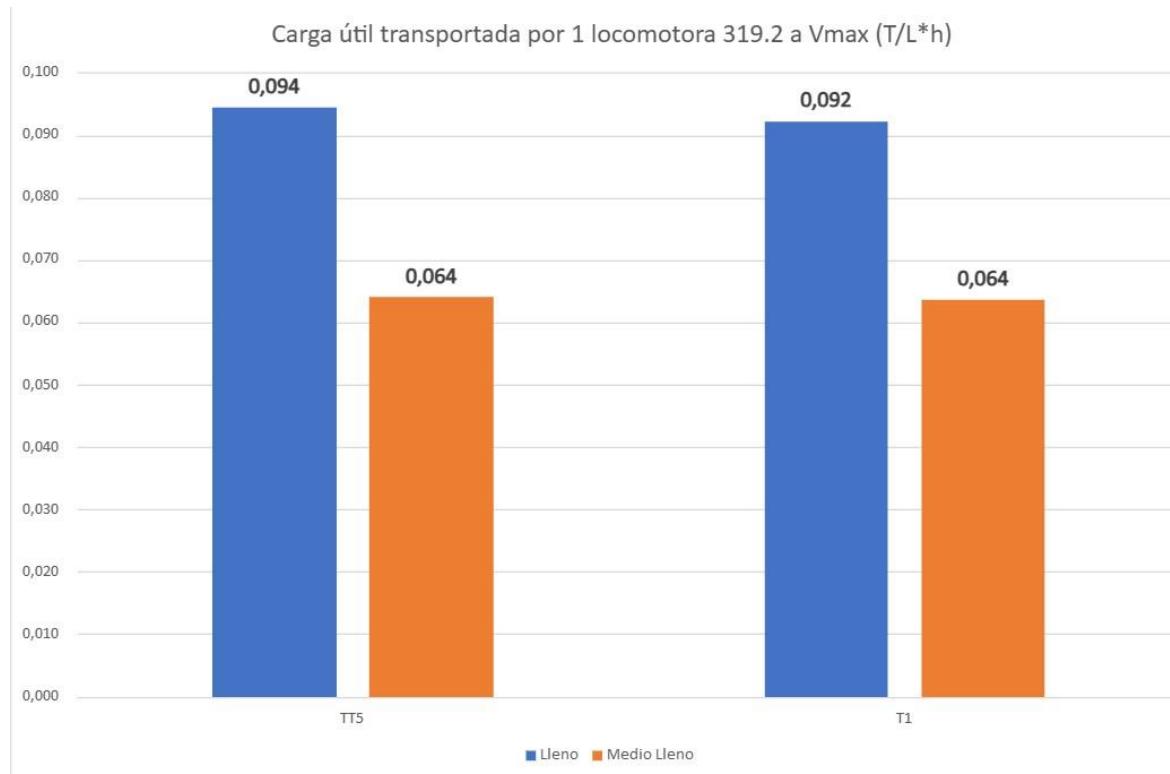


Ilustración 15: Comparativa del Caudal 2 para una locomotora 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

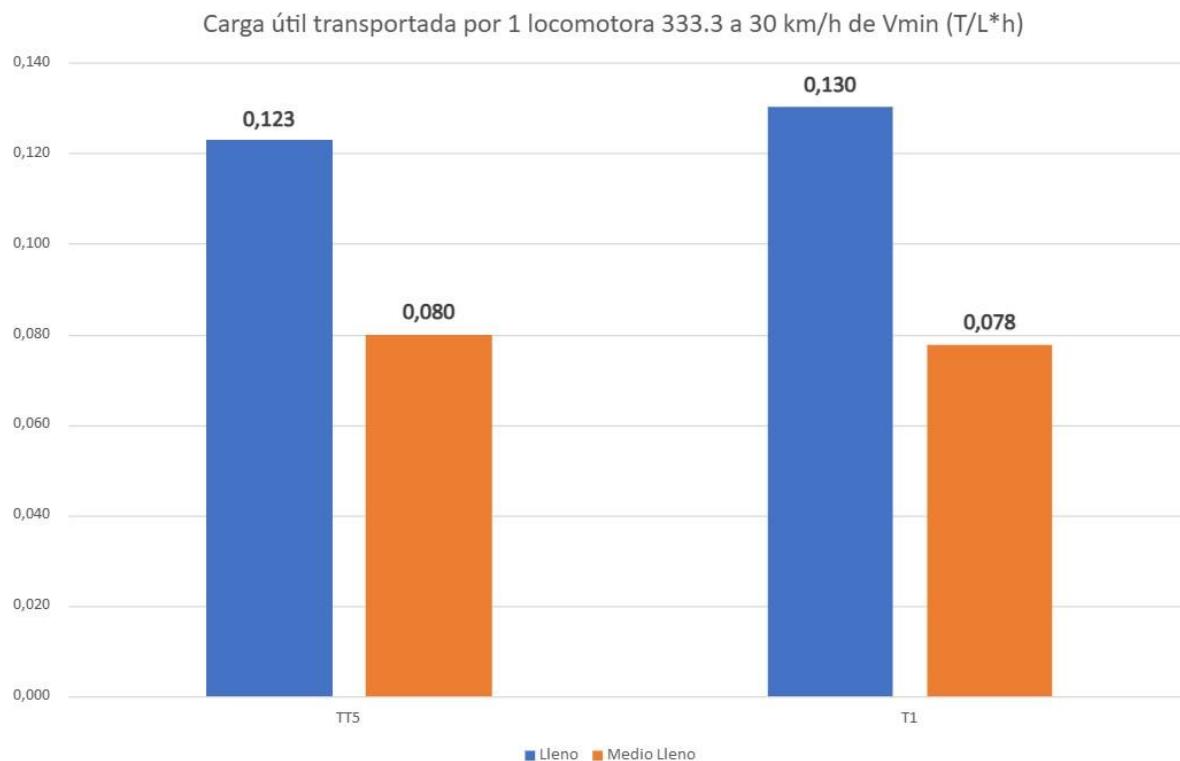


Ilustración 16: Comparativa del Caudal 2 para una locomotora 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

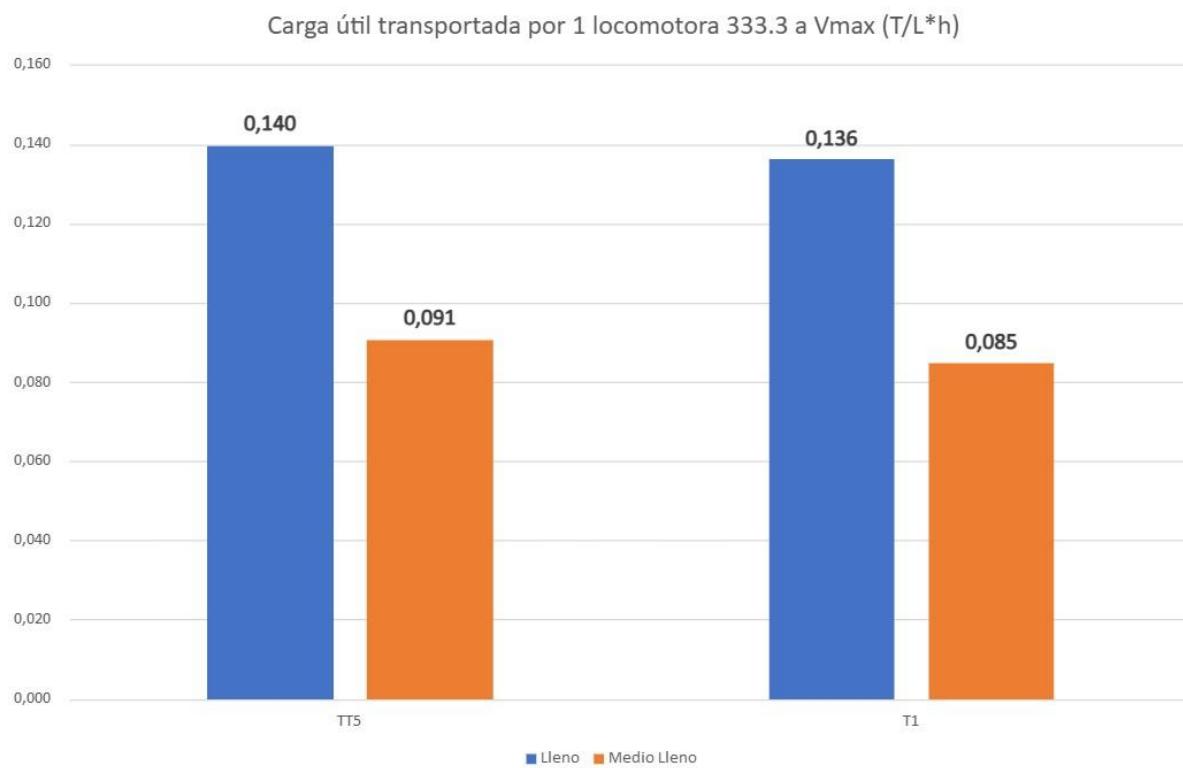


Ilustración 17: Comparativa del Caudal 2 para una locomotora 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

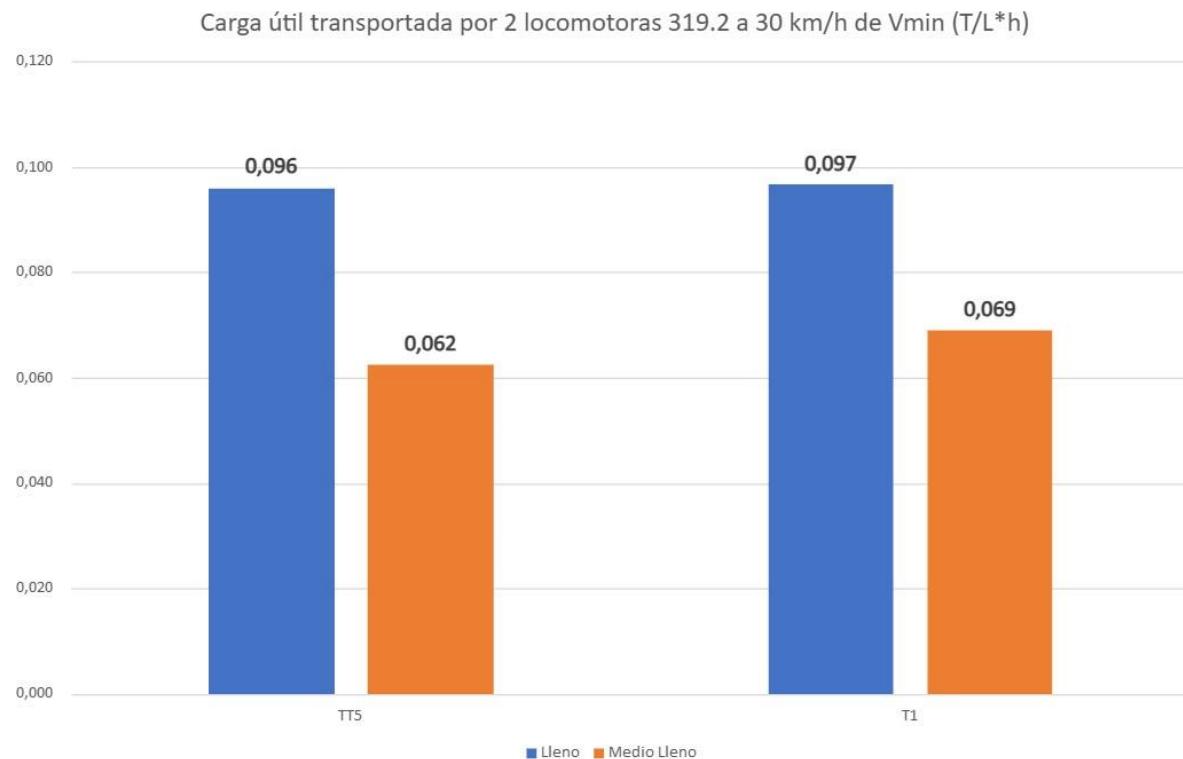


Ilustración 18: Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

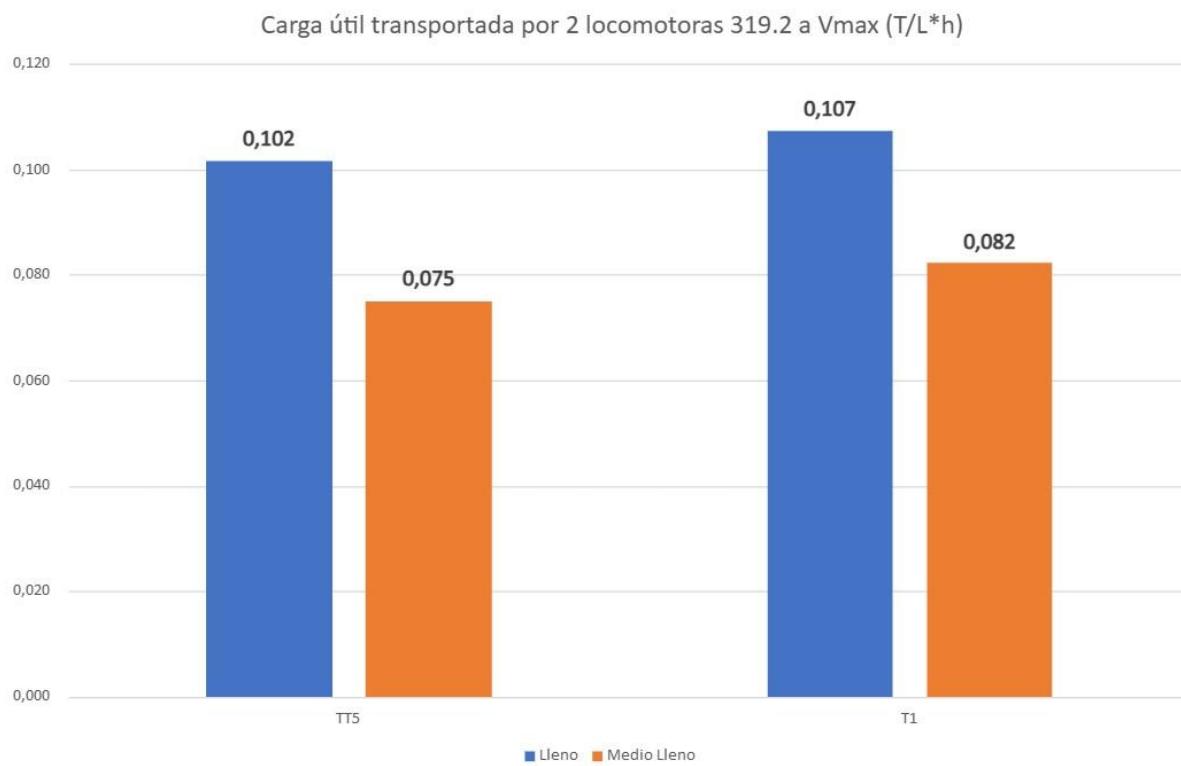


Ilustración 19: Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

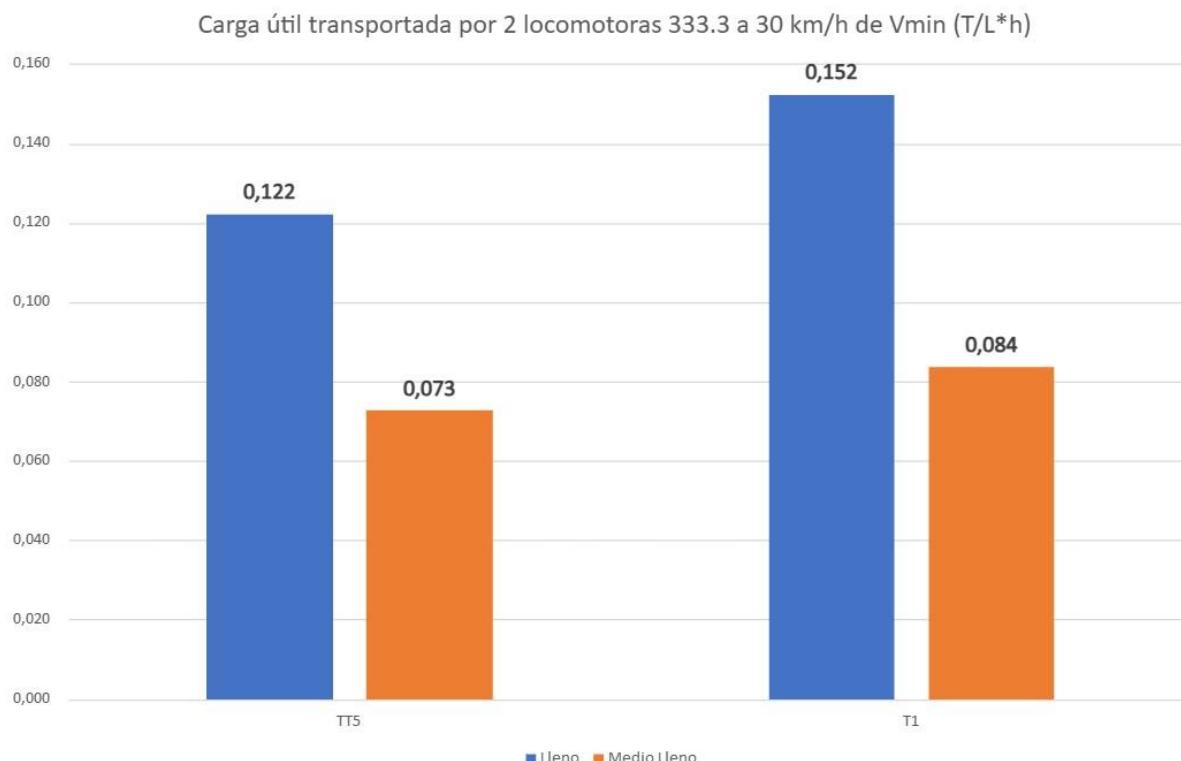


Ilustración 20: Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

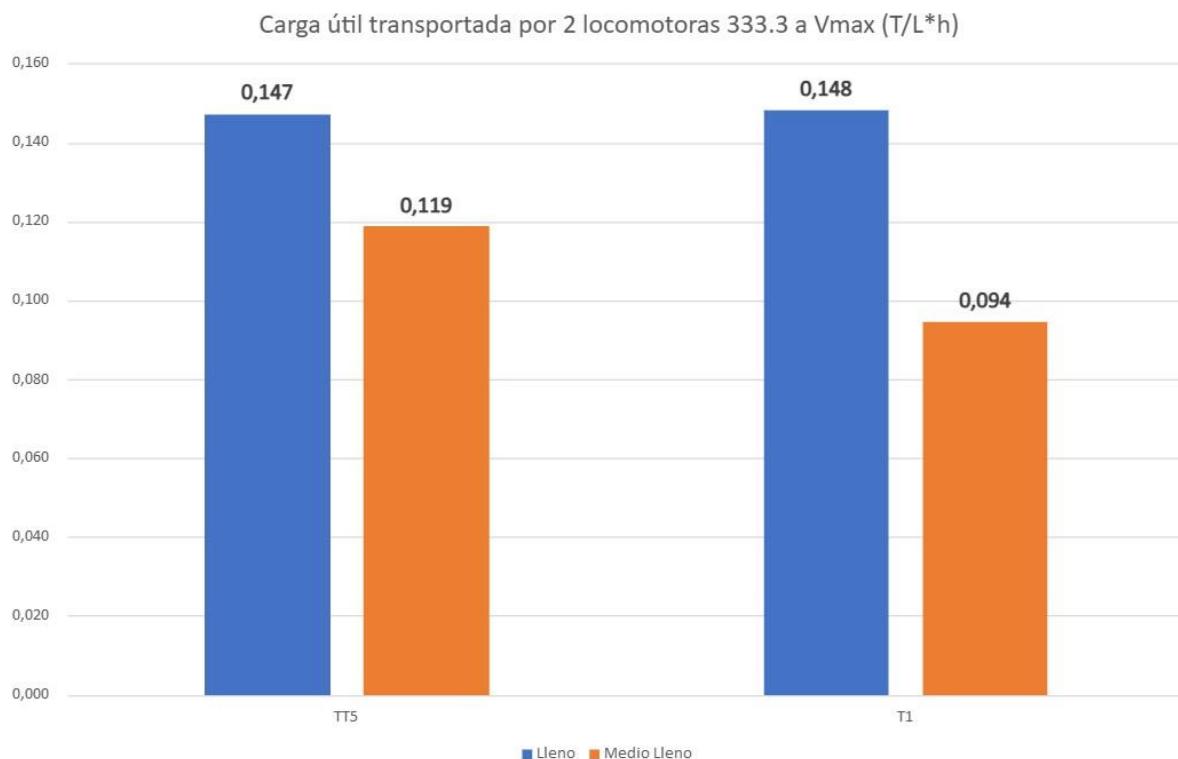


Ilustración 21: Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

Observando los gráficos se ve que siempre resulta más eficiente llevar trenes con material más denso independientemente del tipo de vagón, tipo y número de locomotoras. Esto se debe a que la tara de los vagones es igual para todos los casos Y lo único que se consigue llevando material menos denso es arrastrar una mayor cantidad de carga no útil.

Respecto a qué tipo de vagón es mejor utilizar vemos que no hay una gran diferencia en la mayoría de casos, sin embargo, hay 1 comparación en la que esta diferencia es bastante significativa. Se trata de la comparativa para dos locomotoras 333.3 a una velocidad mínima de 30 km/h, casos 13 y 15. Revisando los resultados obtenidos para ambos casos se observa lo siguiente:

Caso	Carga transportada (T)	Tiempo (h)	Combustible consumido (L)
13	1008	5,832	1415,811
15	632,5	5,661	733,906

Tabla 15: Comparación de resultados entre los casos 13 y 15. Fuente: Elaboración propia

En el caso 13, se transportan 1008 toneladas de carga útil en 5,832 horas con un consumo de 1415,811 litros mientras que en el caso 15 se transportan 632,5 toneladas en 5,661 horas con un consumo de 733,906 litros. La relación entre la carga transportada en ambos casos es mayor que la relación del combustible consumido por lo que se transporta más carga a un menor coste de combustible.

También se ha hecho una comparativa en función del número de locomotoras y vagón remolcado. Esto va permitir comparar ver locomotora es más eficiente bajo las mismas condiciones de velocidad y densidad de material transportado.

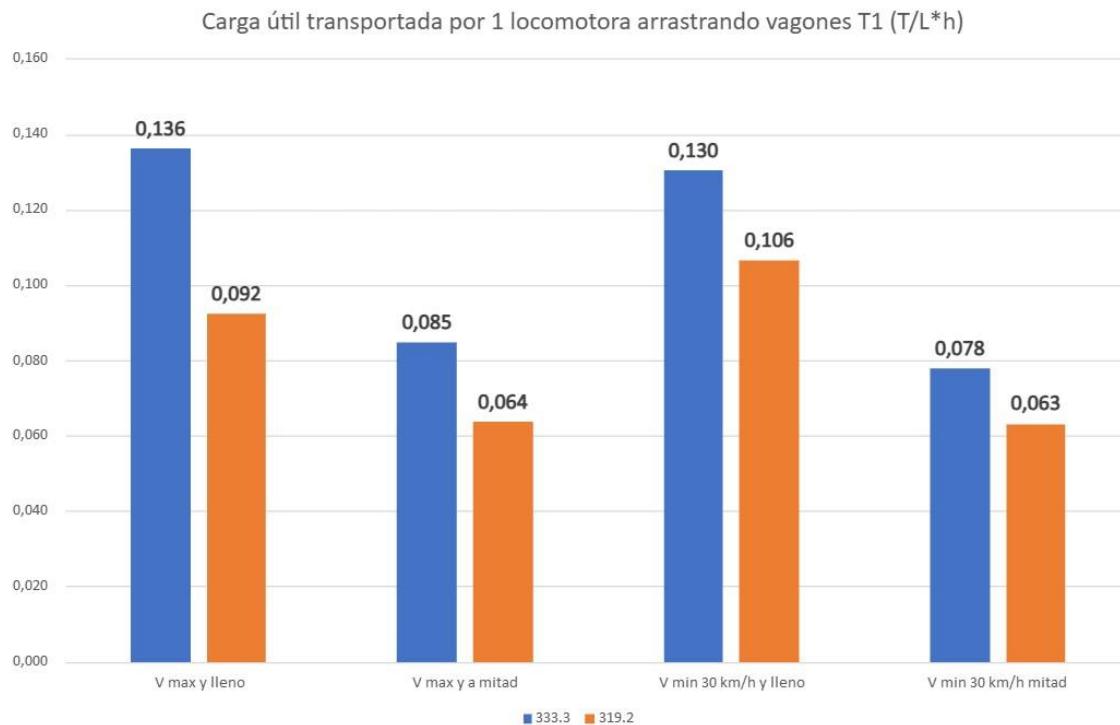


Ilustración 22: Comparativa del Caudal 2 para una locomotora remolcando vagones T1. Fuente: elaboración propia

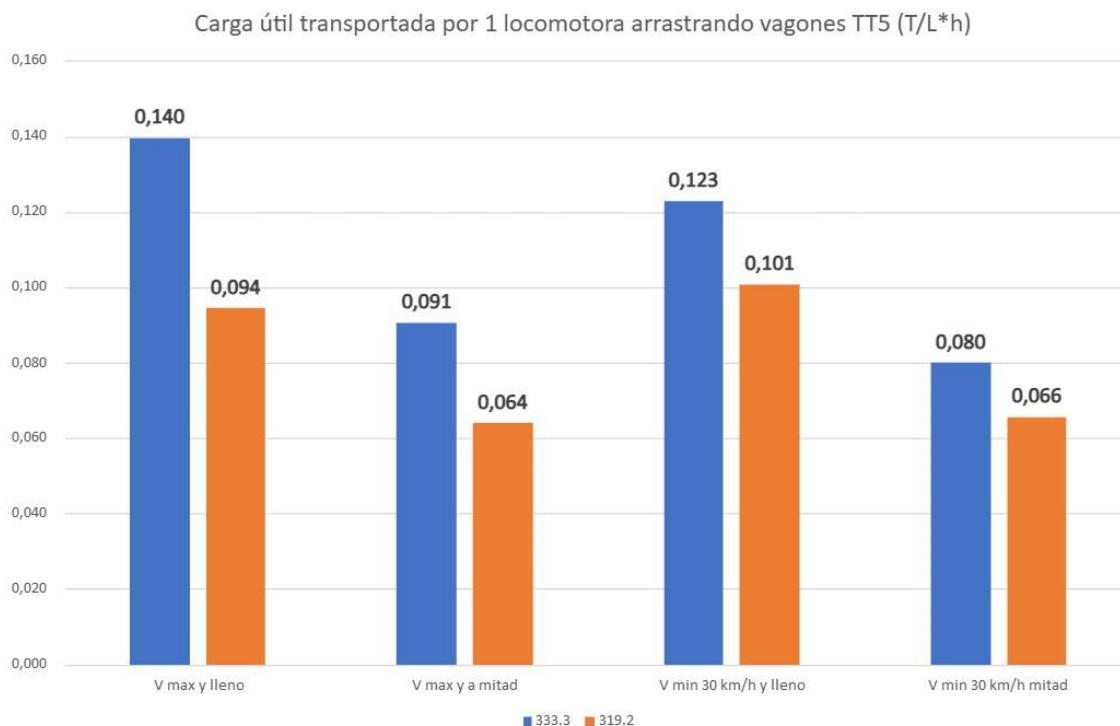


Ilustración 23: Comparativa del Caudal 2 para una locomotora remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia

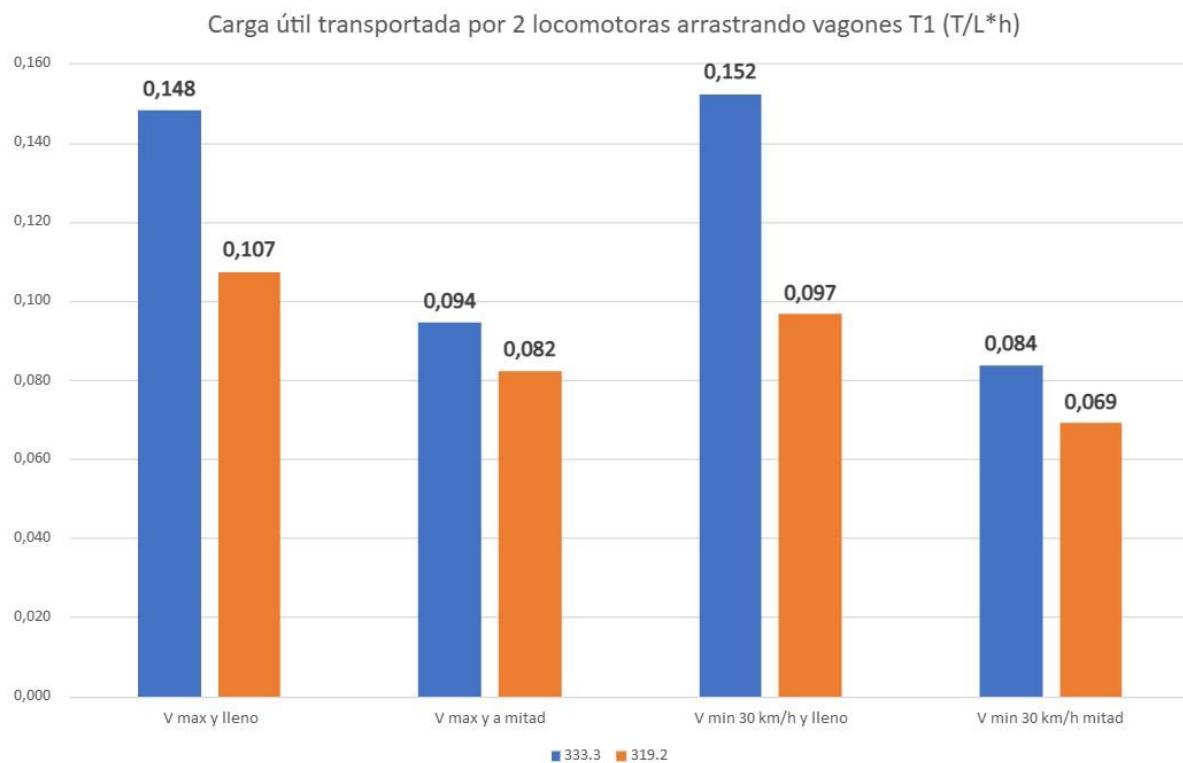


Ilustración 24: Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia

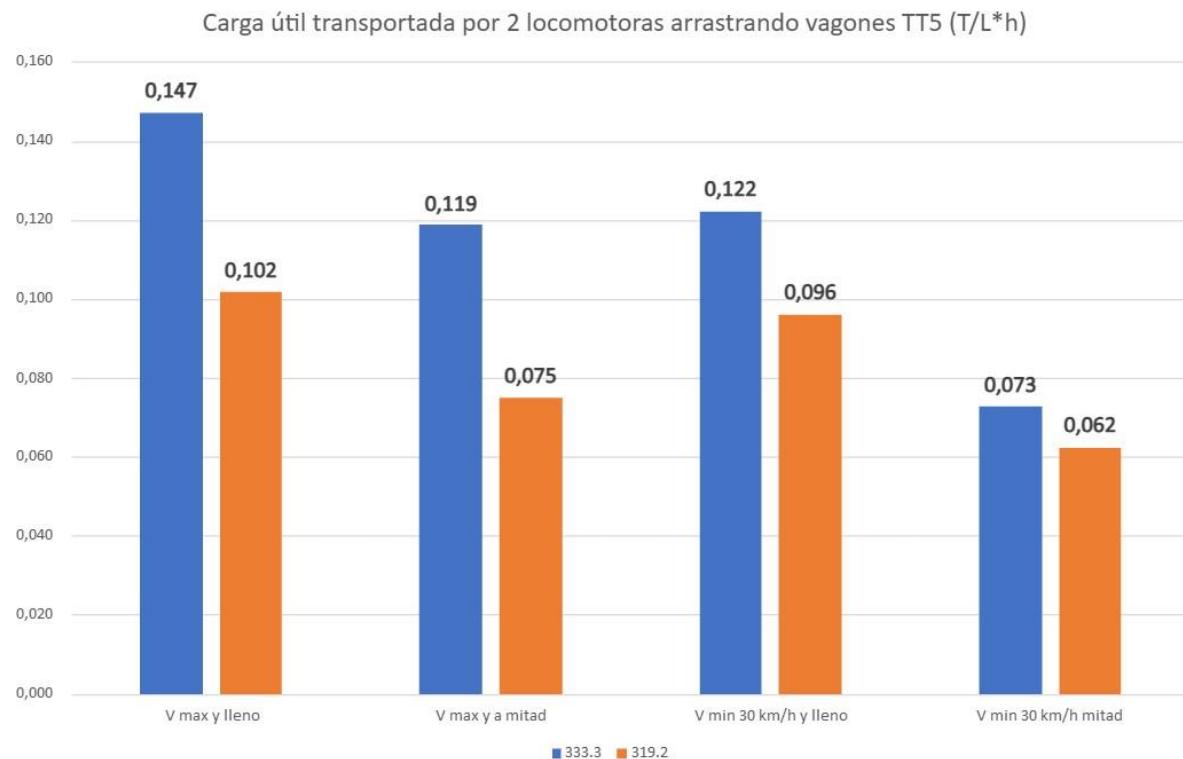


Ilustración 25: Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras remolcando vagones TT5. Fuente: elaboración propia

Con estos gráficos volvemos a ver que resulta más eficiente mandar vagones con material más denso. También se observa que hacer uso de una locomotora serie 333.3 es mejor que hacer uso de una locomotora serie 319.2 para cualquier condición de velocidad y densidad del material transportado.

Se han visto los caudales de carga útil que se transporta en cada uno de los casos. Ahora hace falta sacar KPI que permitan comparar los consumos de cada caso para ver cuál resulta más eficiente desde la perspectiva del consumo de diésel.

El primer KPI calculado ha sido llamado “Consumo 1” y no es más que el resultado de dividir el consumo total de litros de combustible entre la carga útil transportada.

$$C_1 \left(\frac{L}{T} \right) = \frac{C(L)}{P_u(T)}$$

- C_1 : Consumo 1
- P_u : Peso de la carga útil
- C : Consumo de combustible

Este KPI sirve para saber la eficiencia del combustible gastado en relación a la carga útil transportada, es decir, cuántos litros de diésel son necesarios para que 1 tonelada de material haga el recorrido completo. De este indicador se han sacado cuatro gráficos agrupados según el número y tipo de locomotora empleada para poder comparar los resultados según las condiciones de velocidad, densidad del material y vagón remolcado.

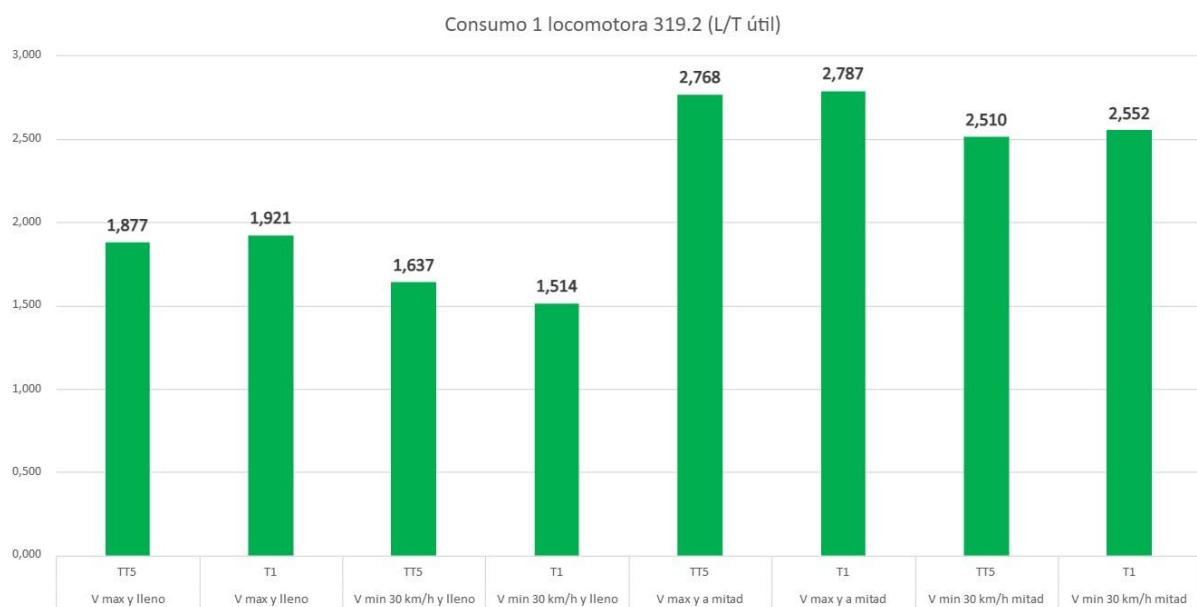


Ilustración 26: Comparativa del Consumo 1 para una locomotora 319.2. Fuente: Elaboración propia

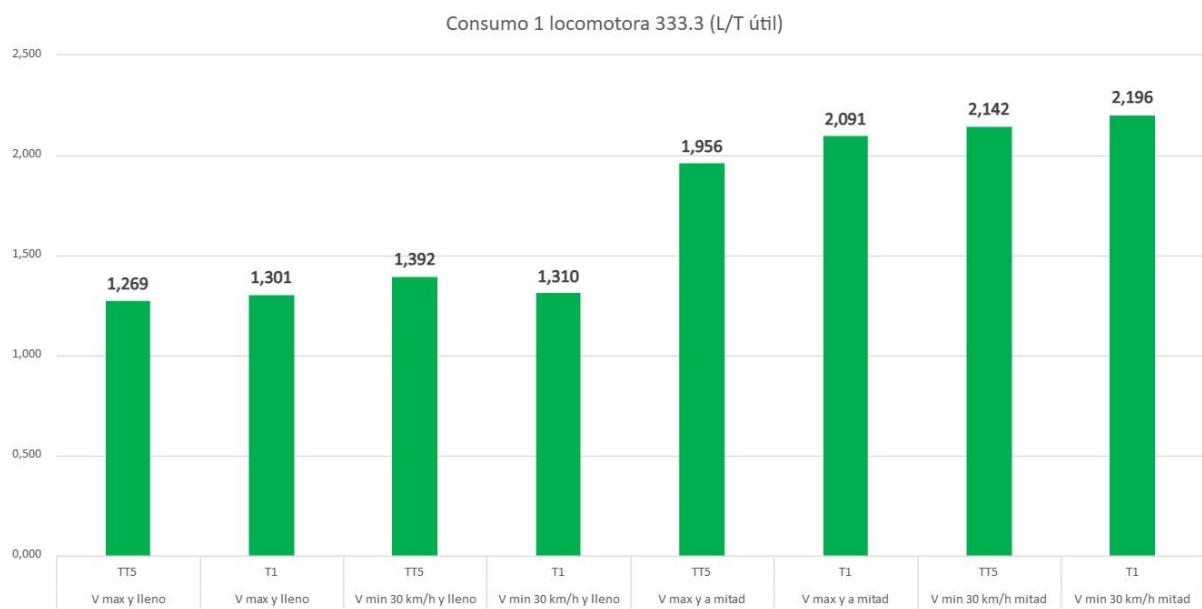


Ilustración 27: Comparativa del Consumo 1 para una locomotora 333.3. Fuente: Elaboración propia

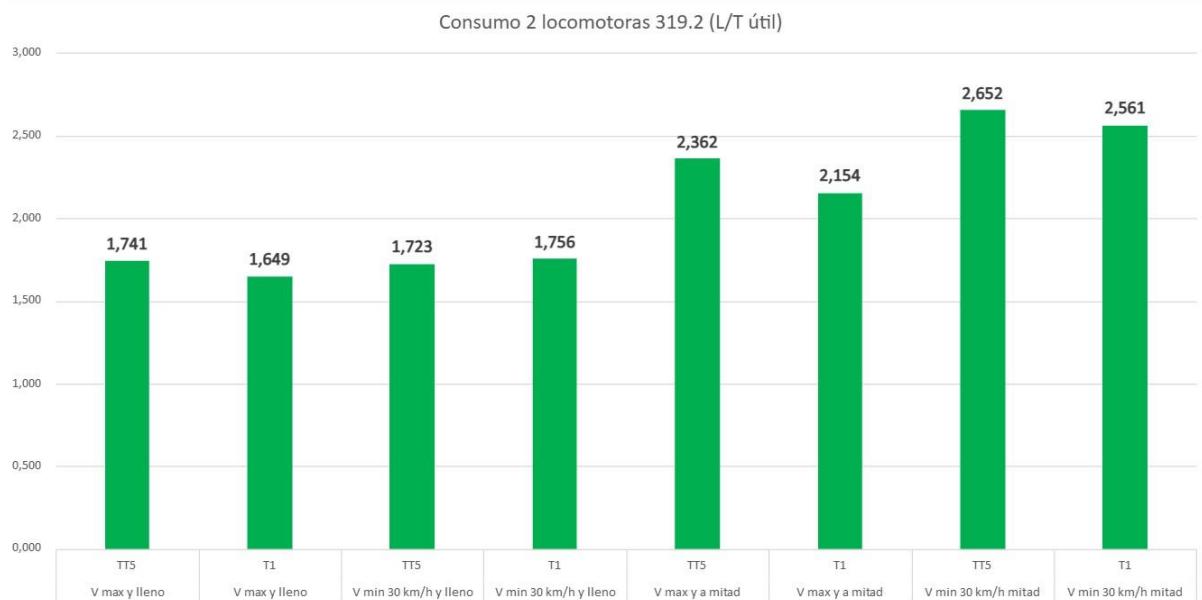


Ilustración 28: Comparativa del Consumo 1 para 2 locomotoras 319.2. Fuente: Elaboración propia

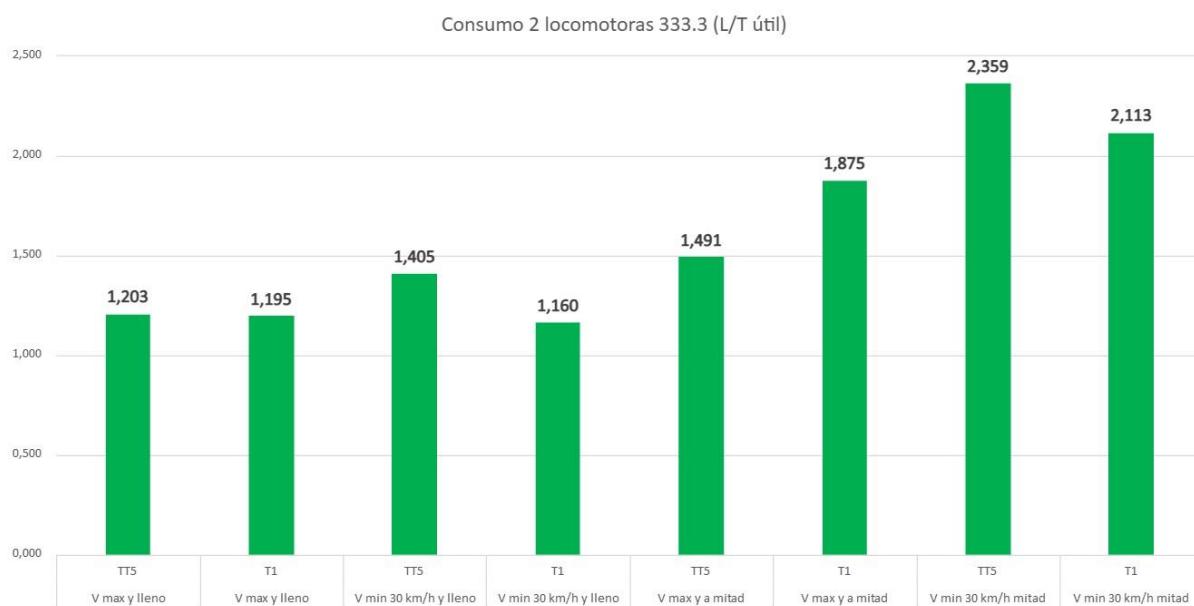


Ilustración 29: Comparativa del Consumo 1 para 2 locomotoras 333.3. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en las gráficas que el transporte de materiales poco densos implica una menor eficiencia del consumo de combustible como era de esperarse, ya que como se ha explicado anteriormente la tara de los vagones remolcados es la misma en todos los casos y lo único que se hace es transportar una cantidad de carga no útil mayor.

De las casas en los que se transporta material denso se ve que no hay una clara mejor opción en función del número de locomotoras, tipo de locomotora, tipo de vagón remolcado y las condiciones de velocidad. Por ejemplo, para dos locomotoras serie 333.3 lo más óptimo es lanzar trenes que remolquen vagones T1 con una velocidad mínima de 30 km/h, pero para entonces locomotoras 319.2 lo mejor son convoyes de vagones T1 yendo a la velocidad máxima.

El siguiente KPI calculado es el “Consumo 2” y es el consumo de combustible por hora.

$$C_2 \left(\frac{L}{h} \right) = \frac{C(L)}{T(h)}$$

Donde:

- C_2 : Consumo 2
- T: Tiempo que se tarda en hacer el recorrido
- C: Consumo de combustible

Este indicador representa la eficiencia del consumo de litros de diésel en función de cuánto tarda el tren en recorrer la línea. Al igual que pasaba con el Caudal 1 este KPI sufre de un sesgo ya que va a favorecer a los convoyes cuya condición de velocidad sea la de ir a la velocidad máxima posible. Para evitar este problema se ha calculado un nuevo KPI que va a normalizar los consumos.

El “Consumo 3” es el indicador que va a relacionar el combustible usado por las locomotoras con las toneladas de carga útil transportadas y el tiempo.

$$C_3 \left(\frac{L}{T \cdot h} \right) = \frac{C(L)}{P_u(T) \cdot T(h)}$$

Donde:

- C_2 : Consumo 3
- C : Consumo de combustible
- P_u : Peso de la carga útil
- T : Tiempo que se tarda en hacer el recorrido

Para la representación de los resultados de este indicador se ha seguido el mismo proceso que con el Caudal 2. Se ha sacado un primer grupo de gráficos en función de la cantidad y tipo de locomotora y la condición de velocidad. El segundo grupo de gráficos que se ha obtenido ha sido en función del número de locomotoras utilizadas y el tipo de vagones remolcados.

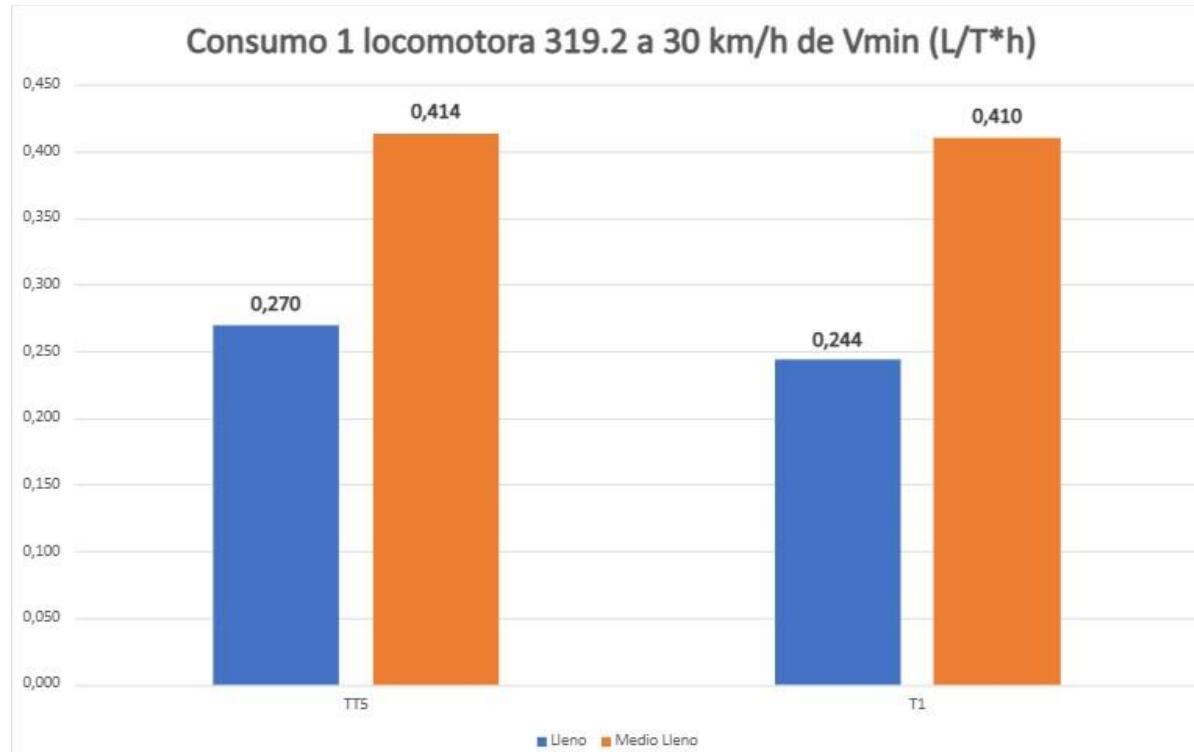


Ilustración 30: Comparativa del Consumo 3 para una locomotora 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

Consumo 1 locomotora 319.2 a Vmax (L/T*h)

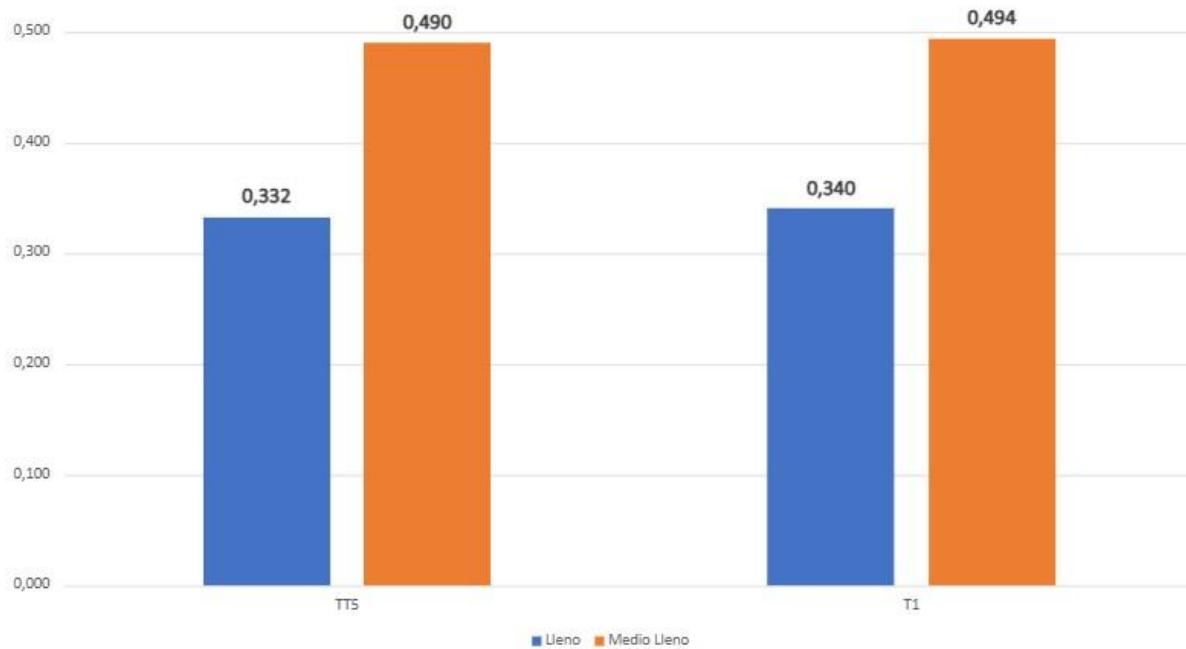


Ilustración 31: Comparativa del Consumo 3 para una locomotora 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

Consumo 1 locomotora 333.3 a 30 km/h de Vmin (L/T*h)

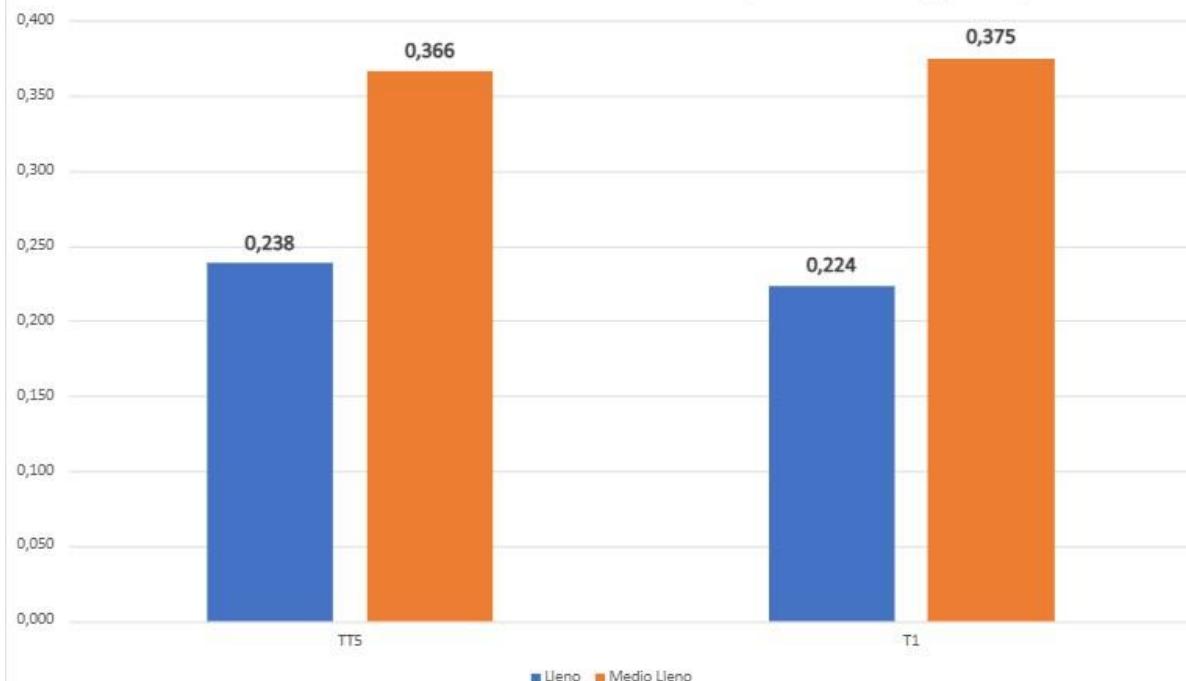


Ilustración 32: Comparativa del Consumo 3 para una locomotora 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

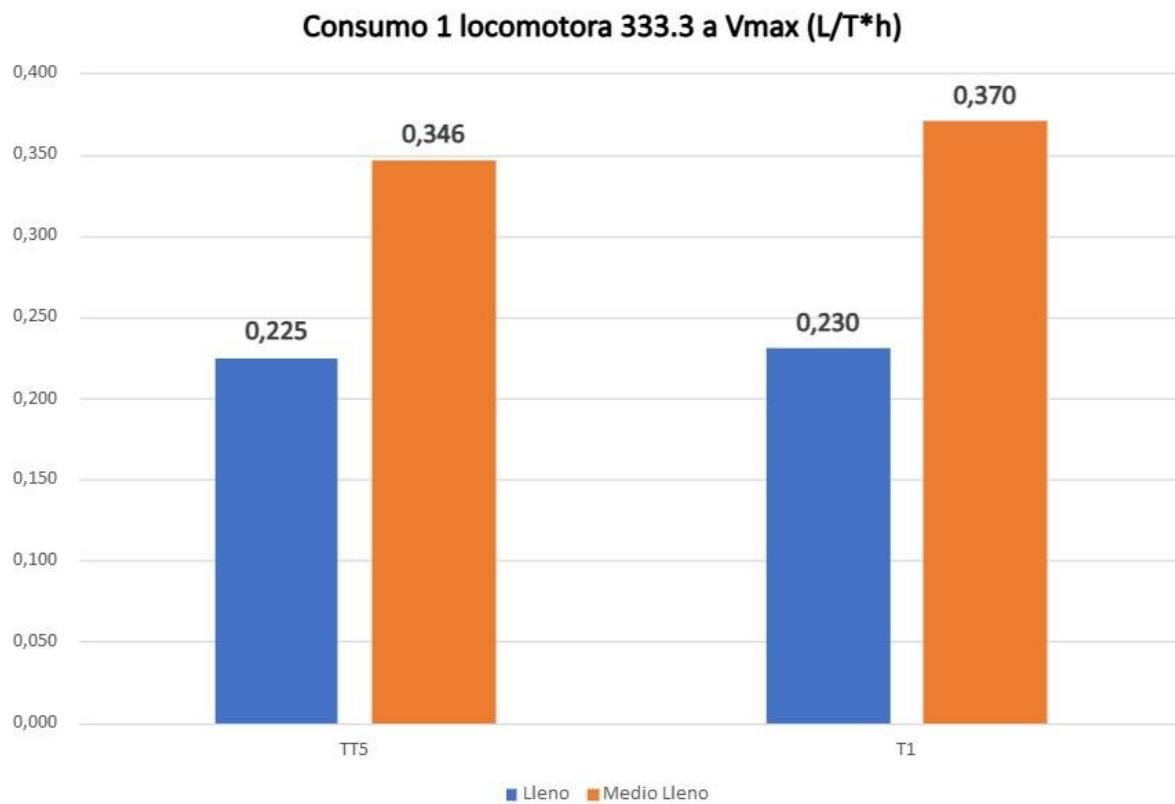


Ilustración 33: Comparativa del Consumo 3 para una locomotora 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

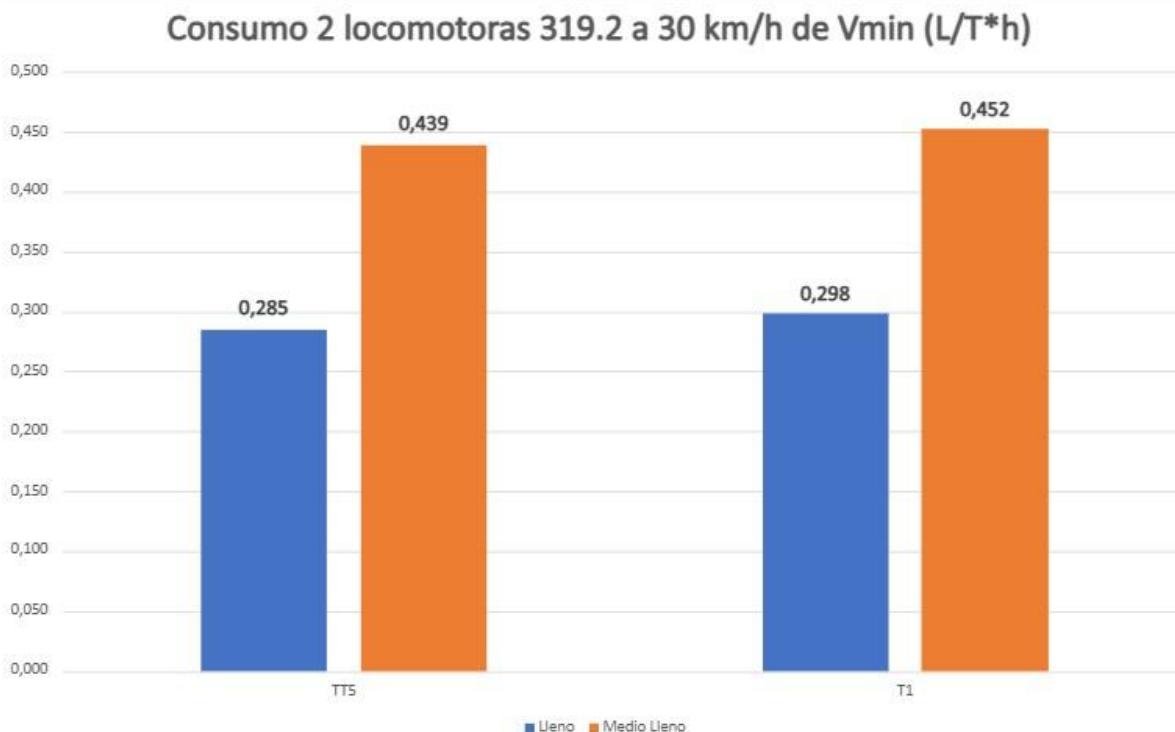


Ilustración 34: Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

Consumo 2 locomotoras 319.2 Vmax (L/T*h)

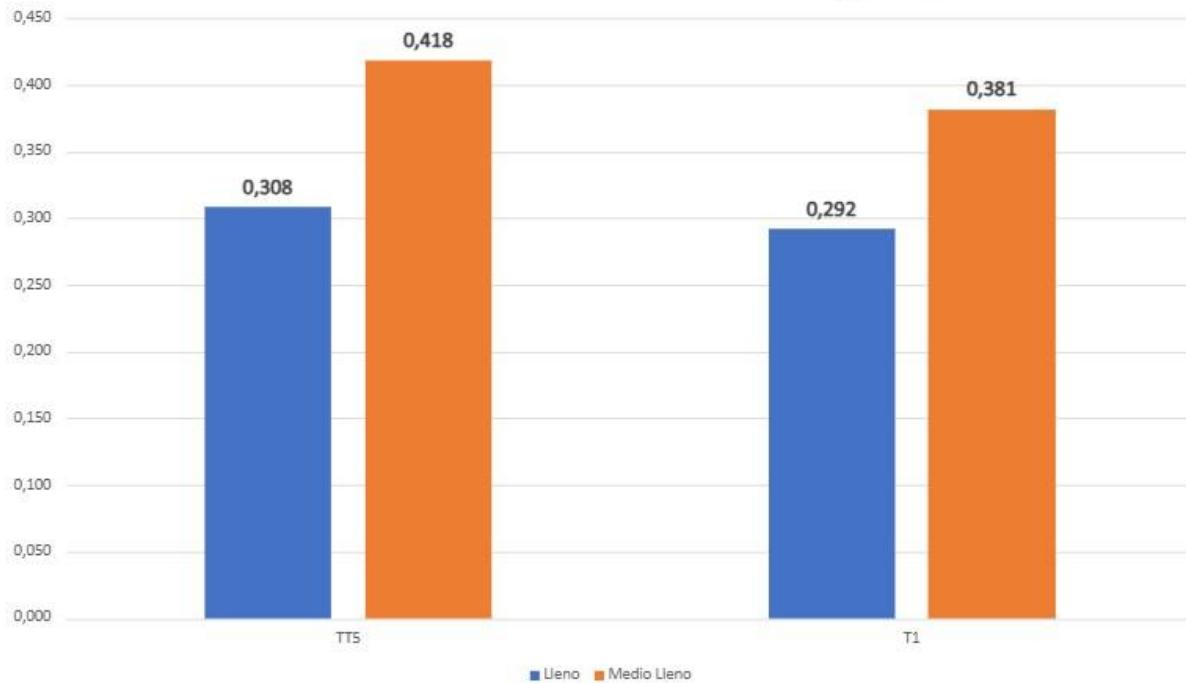


Ilustración 35: Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

Consumo 2 locomotoras 333.3 a 30 km/h de Vmin (L/T*h)

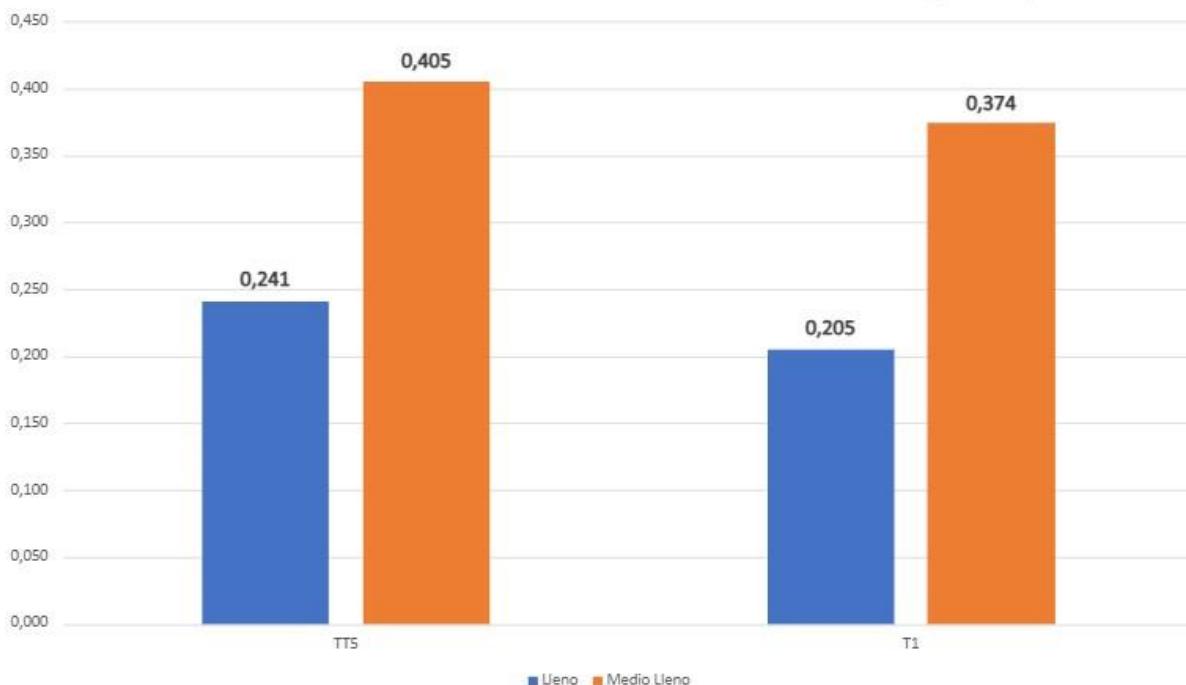


Ilustración 36: Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

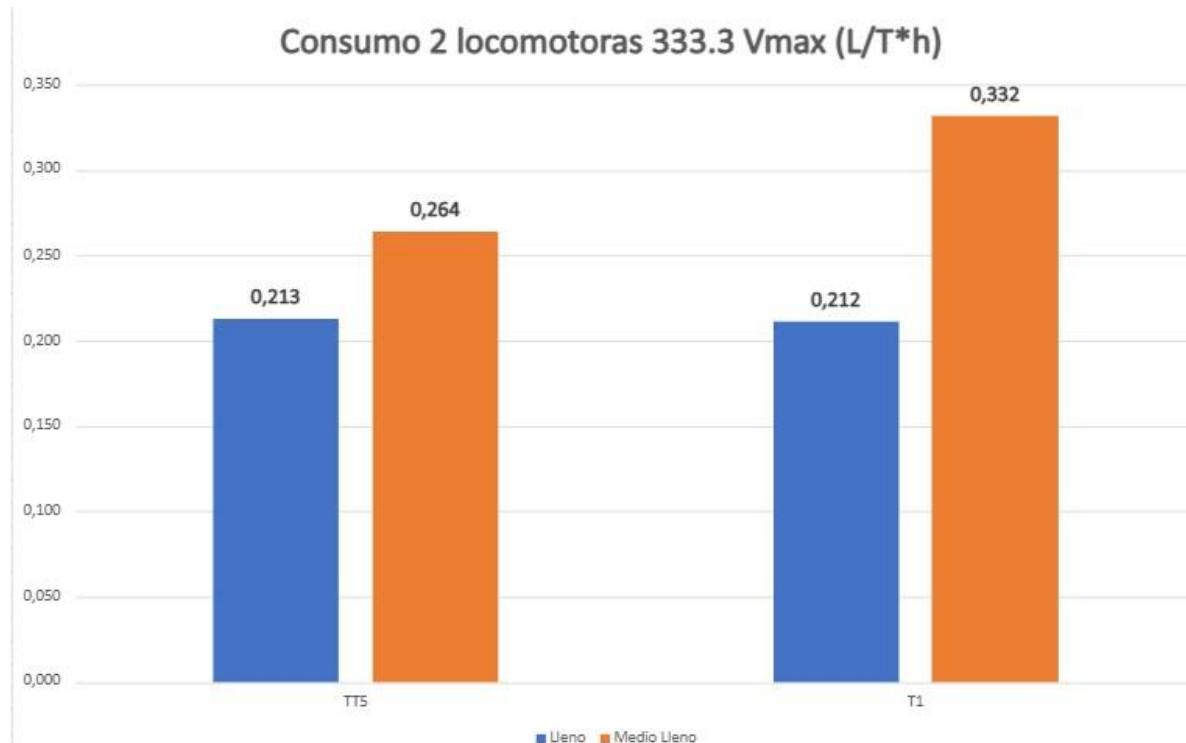


Ilustración 37: Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

Observando estos gráficos se vuelve a comprobar que transportar materiales menos densos es más ineficiente que transportar materiales más densos.

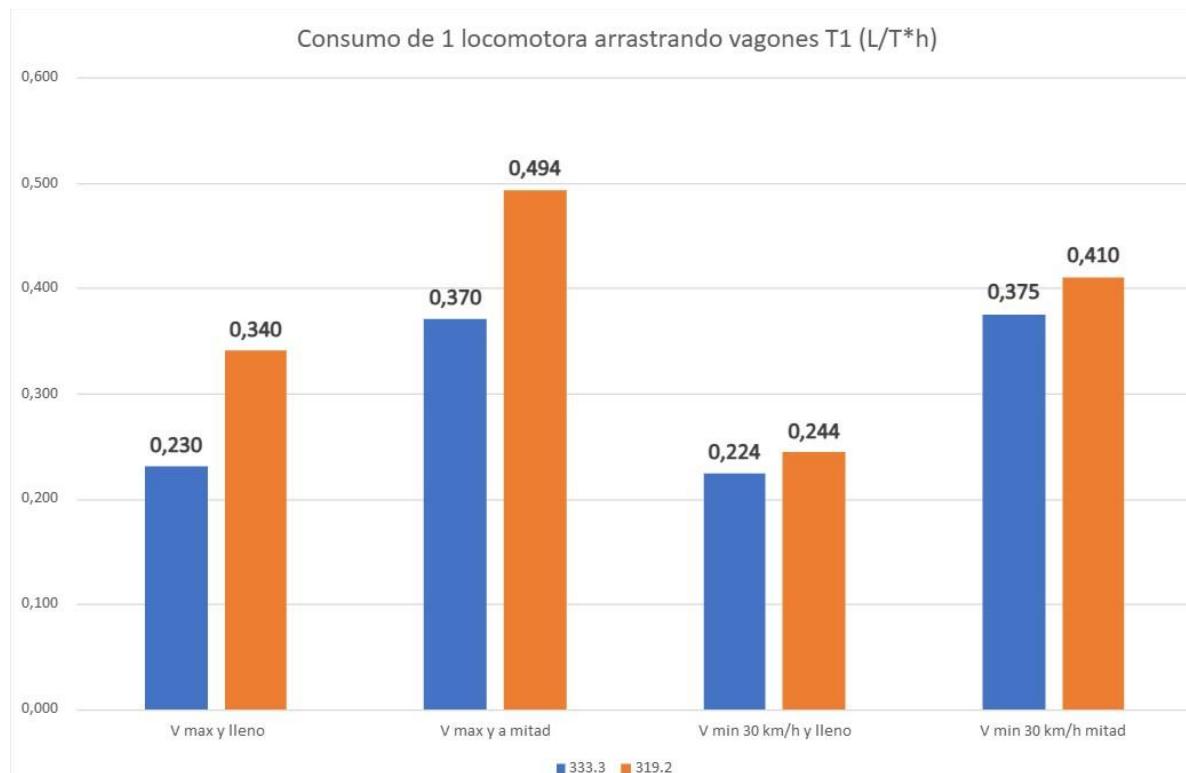


Ilustración 38: Comparativa del Consumo 3 para una locomotora remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia

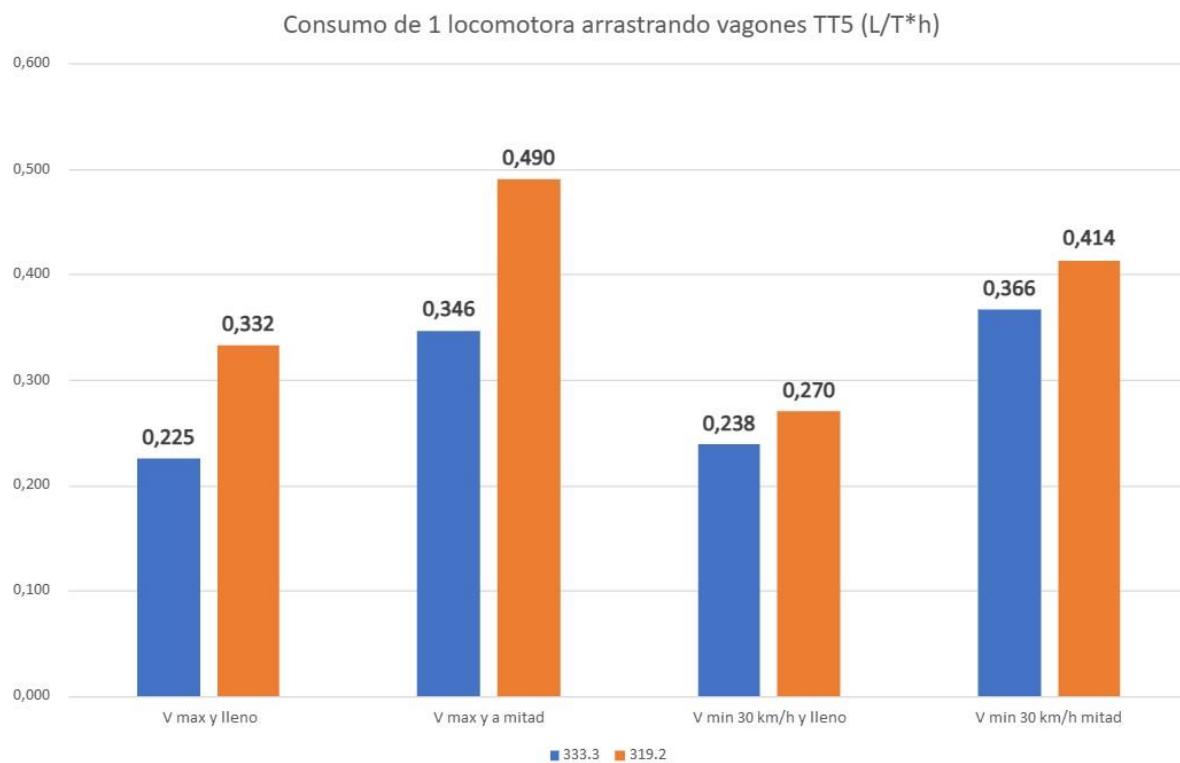


Ilustración 39: Comparativa del Consumo 3 para una locomotora remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia

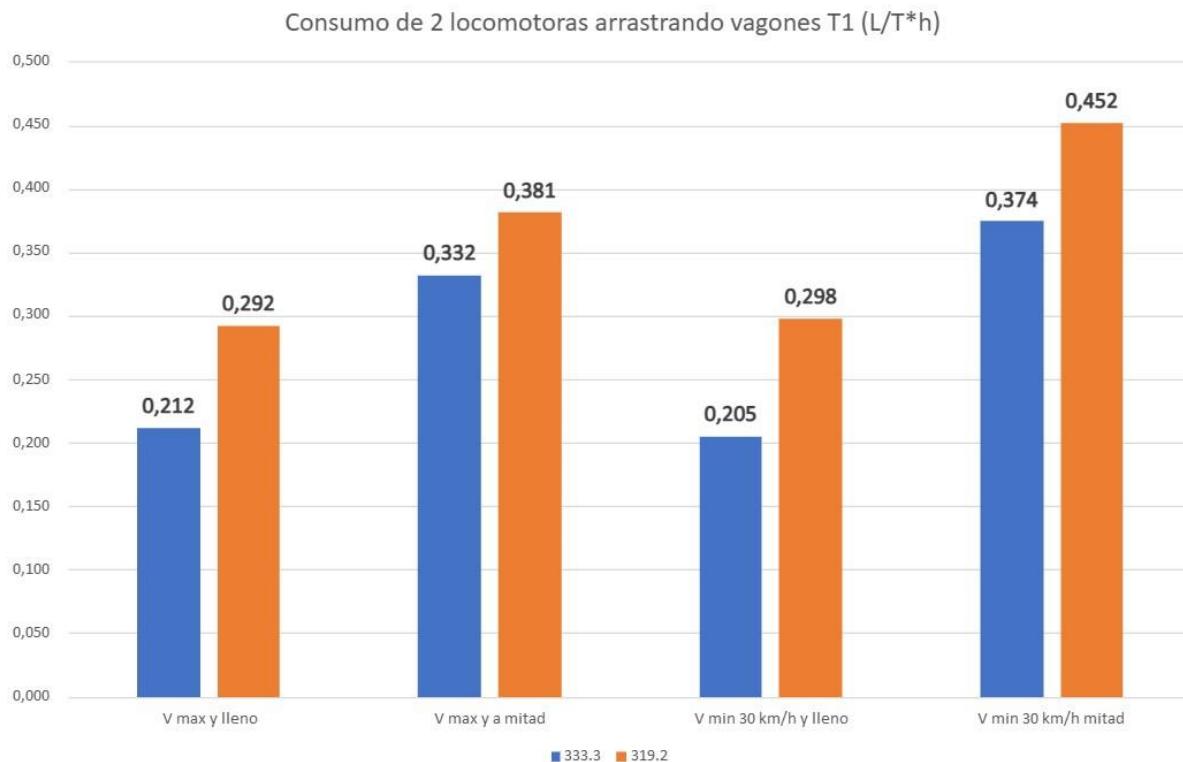


Ilustración 40: Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia

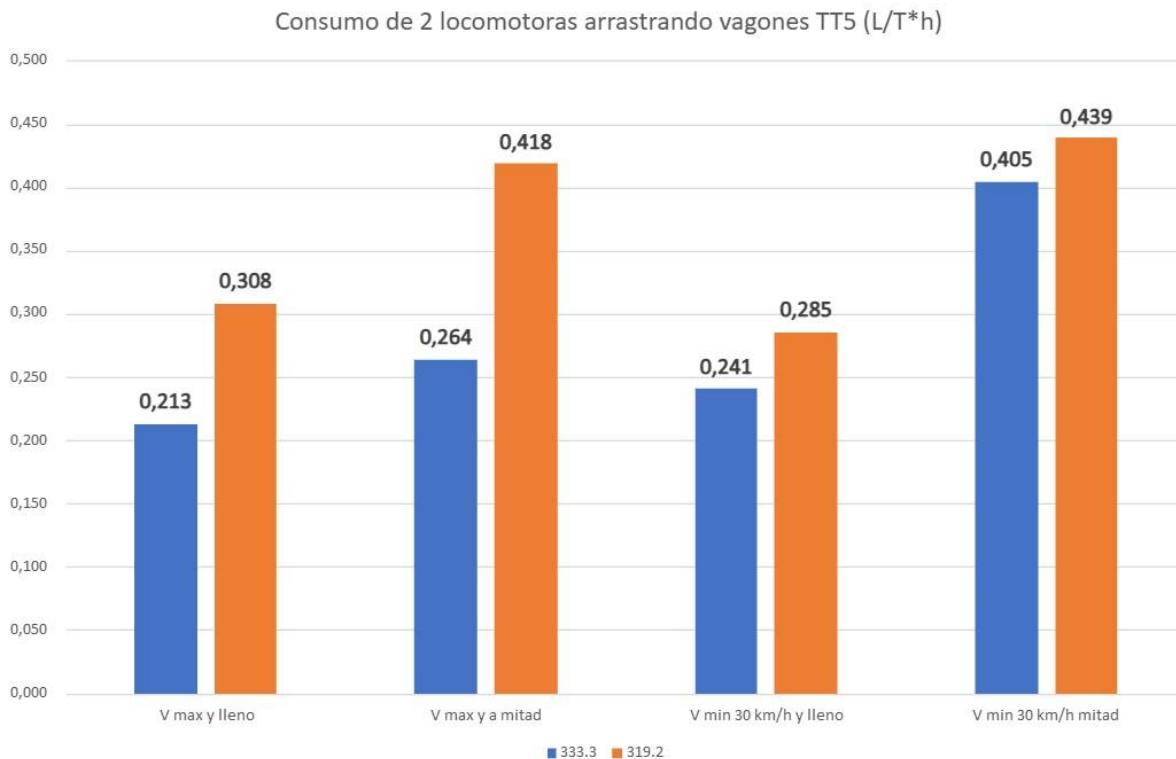


Ilustración 41: Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia

De este segundo grupo de gráficos se puede observar que hacer uso de locomotoras 333.3 es más eficiente que el uso de locomotoras 319.2.

El último KPI calculado es la cantidad de combustible que se destina a mover la carga útil, esto quiere decir que cuanto más cercanos y este valor al consumo total más eficiente es el transporte de la carga útil ya que se está destinando una mayor parte del combustible a mover la. Se ha llamado “Consumo 4”.

$$C_4(L) = C(L) \cdot \frac{P_u(T)}{M(T)}$$

Donde:

- C_4 : Consumo 4
- C : Consumo de combustible
- P_u : Peso de la carga útil
- M : Masa del tren

En relación a este último KPI se han sacado dos grupos de gráficos como en los casos anteriores. El primero en función de la condición de velocidad, el tipo y cantidad de locomotoras utilizadas. El segundo en función el número de locomotoras utilizado y del tipo de vagón remolcado.

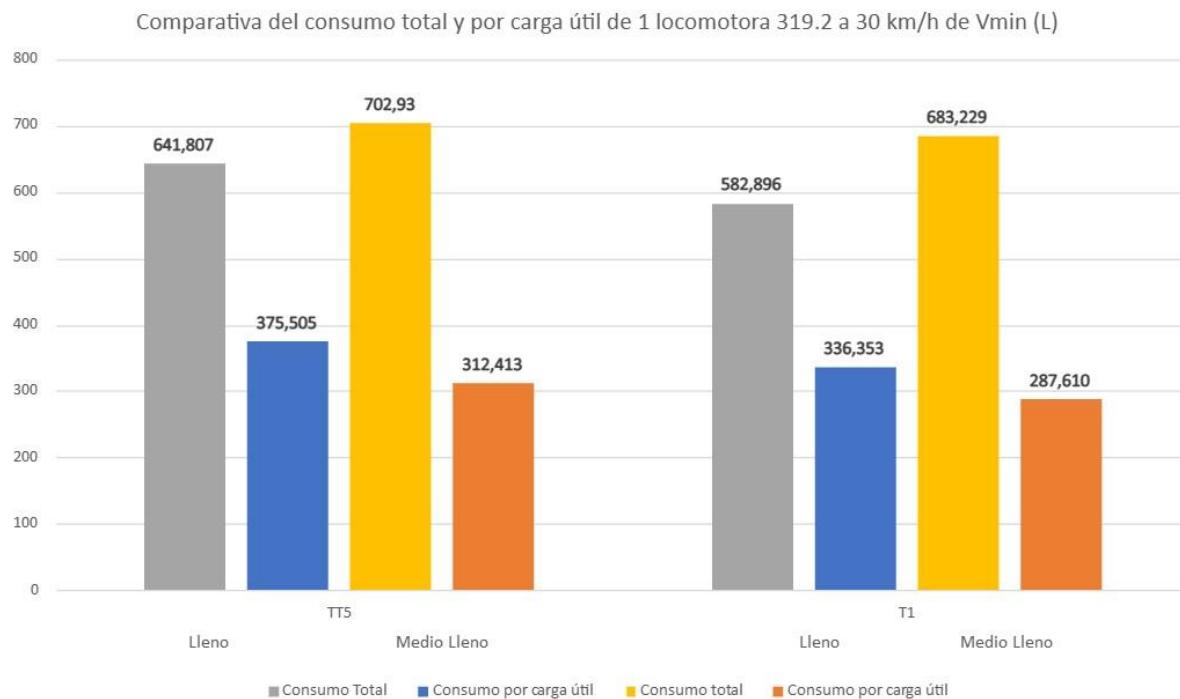


Ilustración 42: Comparativa del Consumo 4 para una locomotora 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

Viendo los datos en valor absoluto permite tener una idea de cómo de eficiente es el transporte de la mercancía, pero no es la mejor forma de hacer la comparación entre casos. Por esta razón además de sacar gráficas en valor absoluto también sean elaborado gráficos con la distribución porcentual de a qué va dedicado cada litro de combustible.

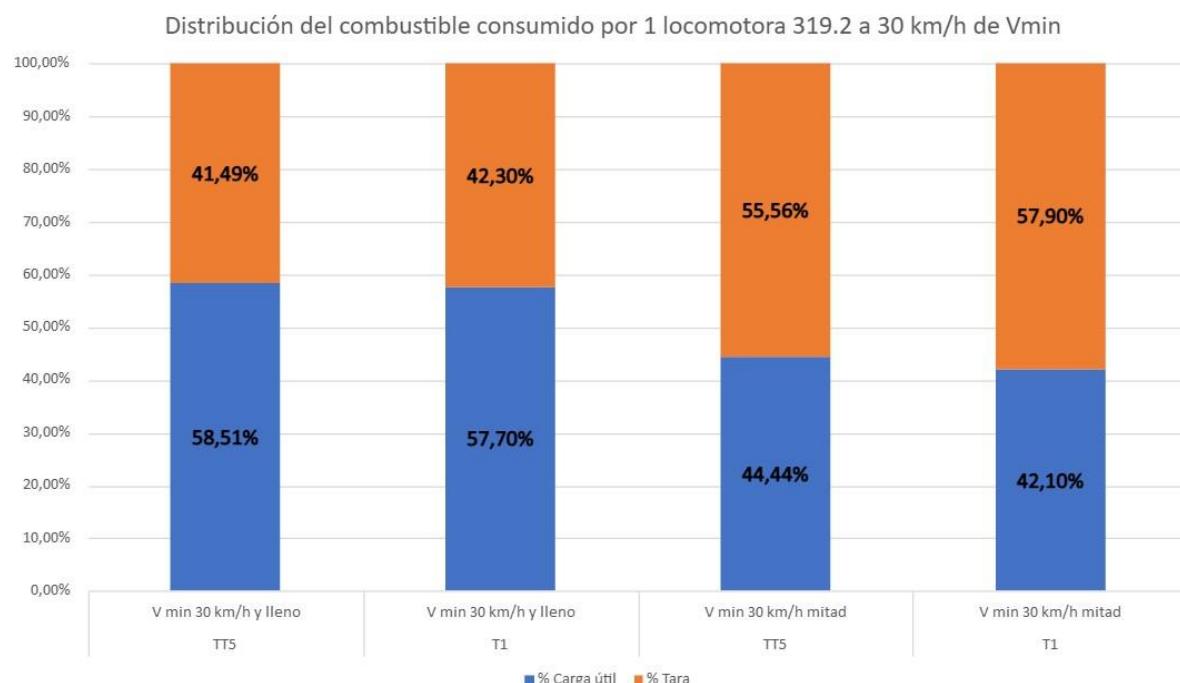


Ilustración 43: Distribución del consumo de combustible para una locomotora 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

Comparativa del consumo total y por carga útil de 1 locomotora 319.2 a Vmax (L)

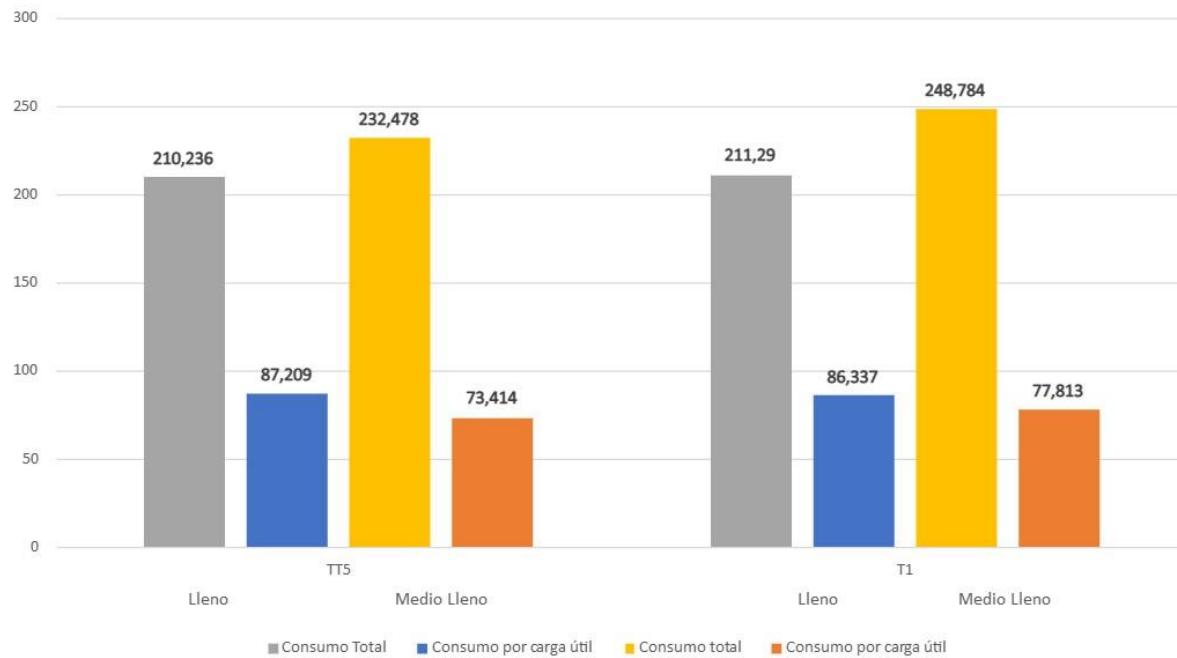


Ilustración 44: Comparativa del Consumo 4 para una locomotora 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

Distribución del combustible consumido por 1 locomotora 319.2 a Vmax

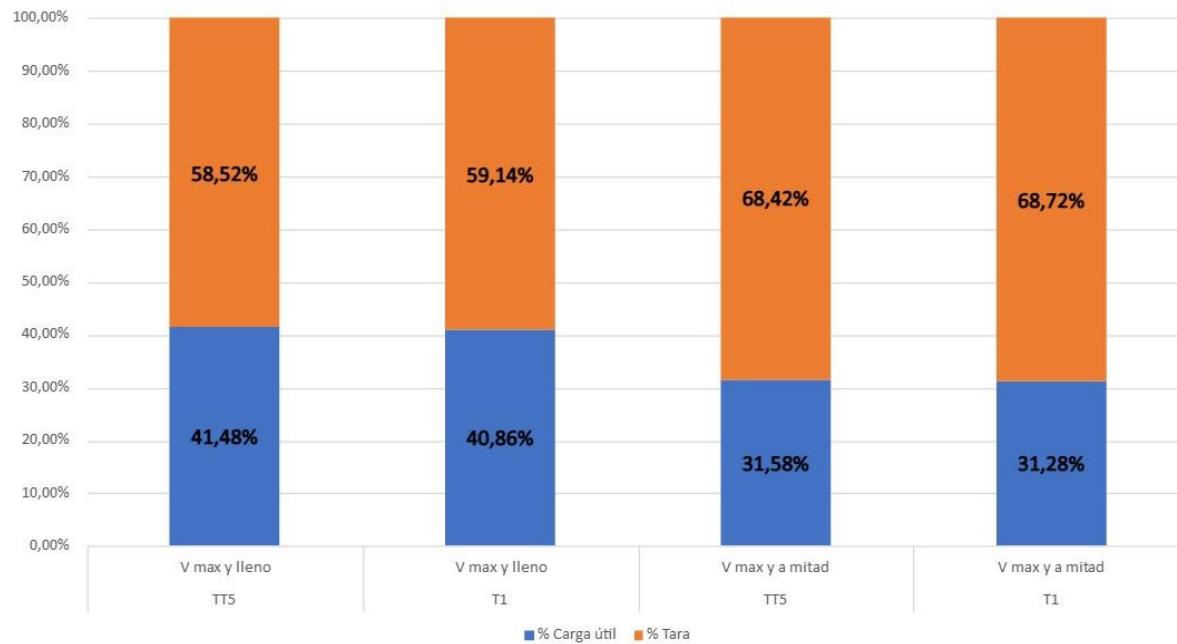


Ilustración 45: Distribución del consumo de combustible para una locomotora 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

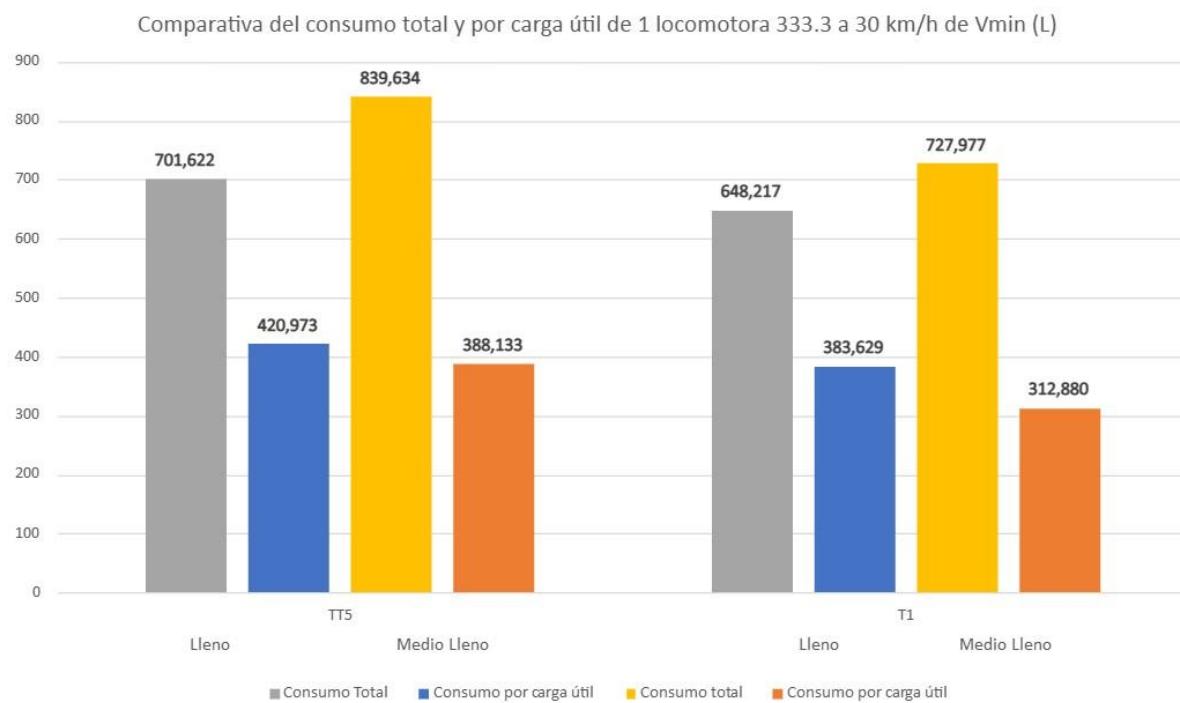


Ilustración 46: Comparativa del Consumo 4 para una locomotora 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

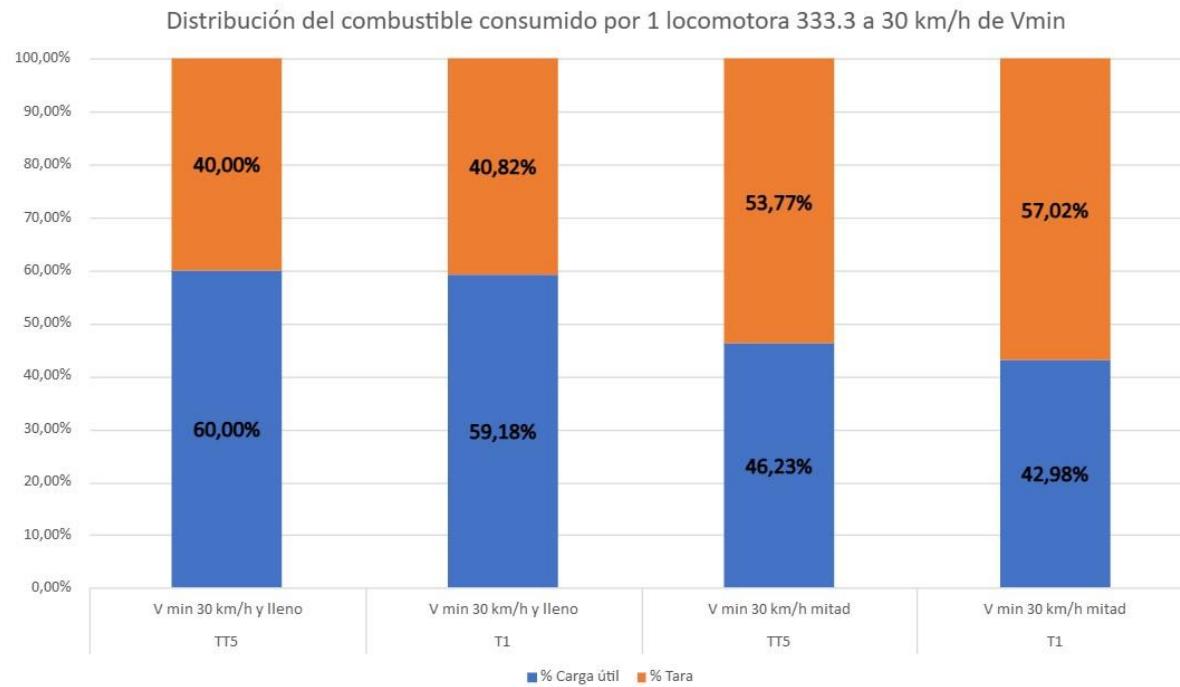


Ilustración 47: Distribución del consumo de combustible para una locomotora 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

Comparativa del consumo total y por carga útil de 1 locomotora 333.3 a Vmax (L)

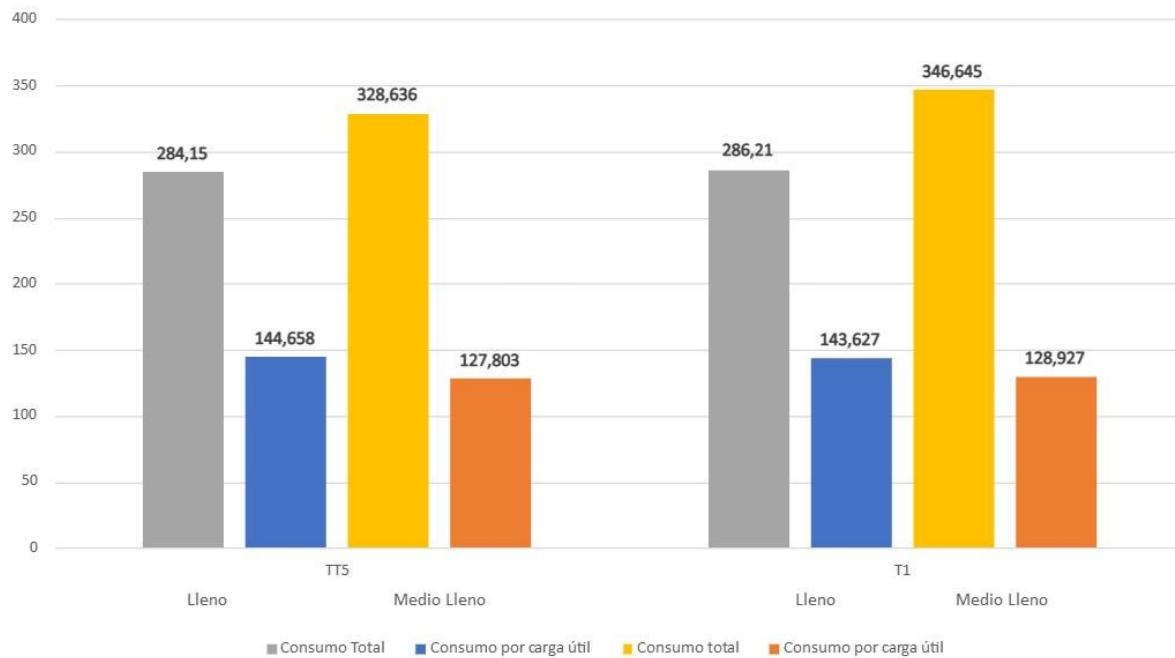


Ilustración 48: Comparativa del Consumo 4 para una locomotora 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

Distribución del combustible consumido por 1 locomotora 333.3 a Vmax

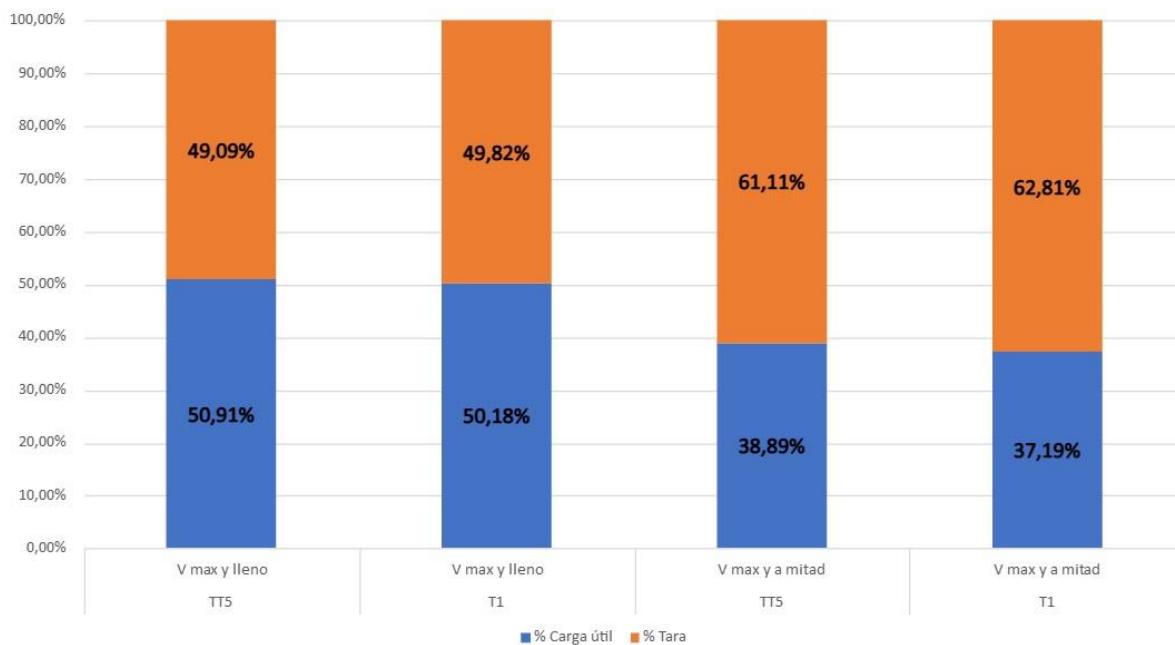


Ilustración 49: Distribución del consumo de combustible para una locomotora 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

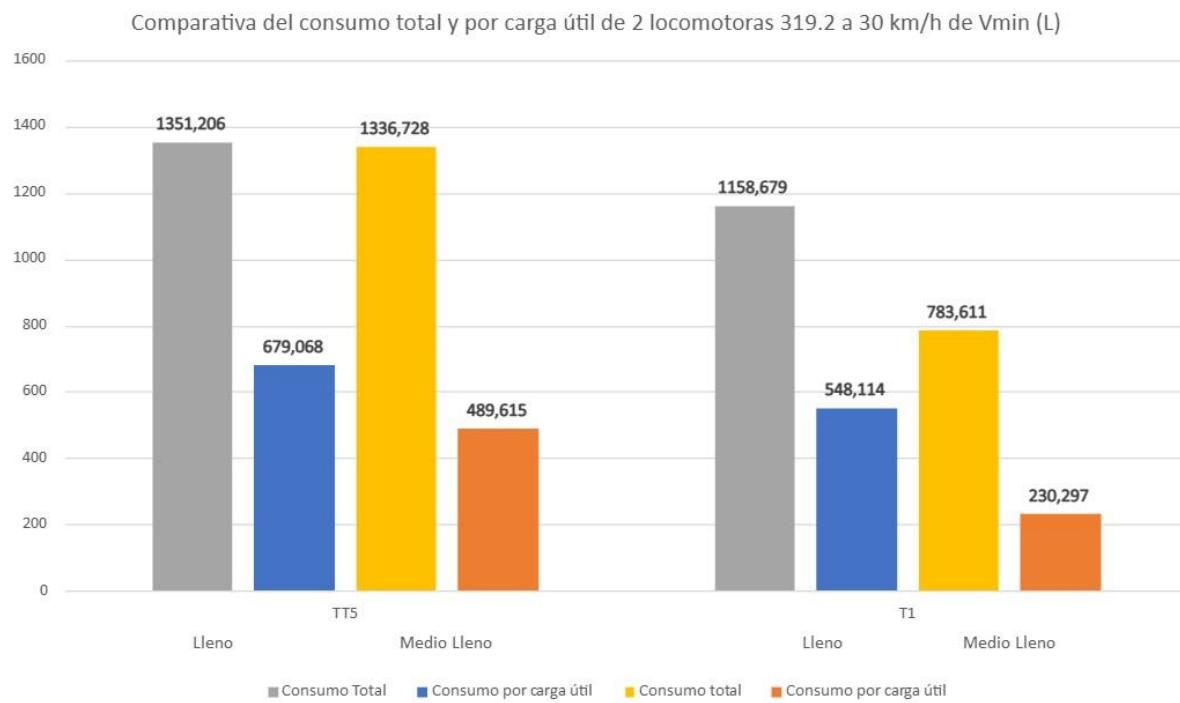


Ilustración 50: Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

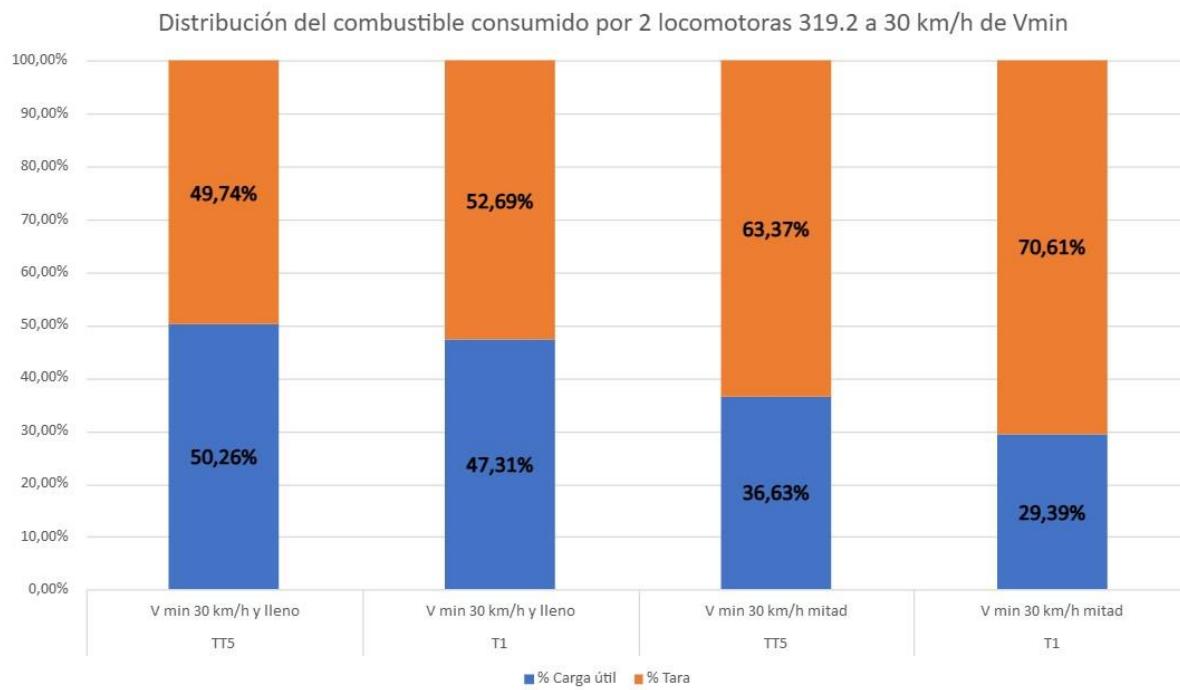


Ilustración 51: Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

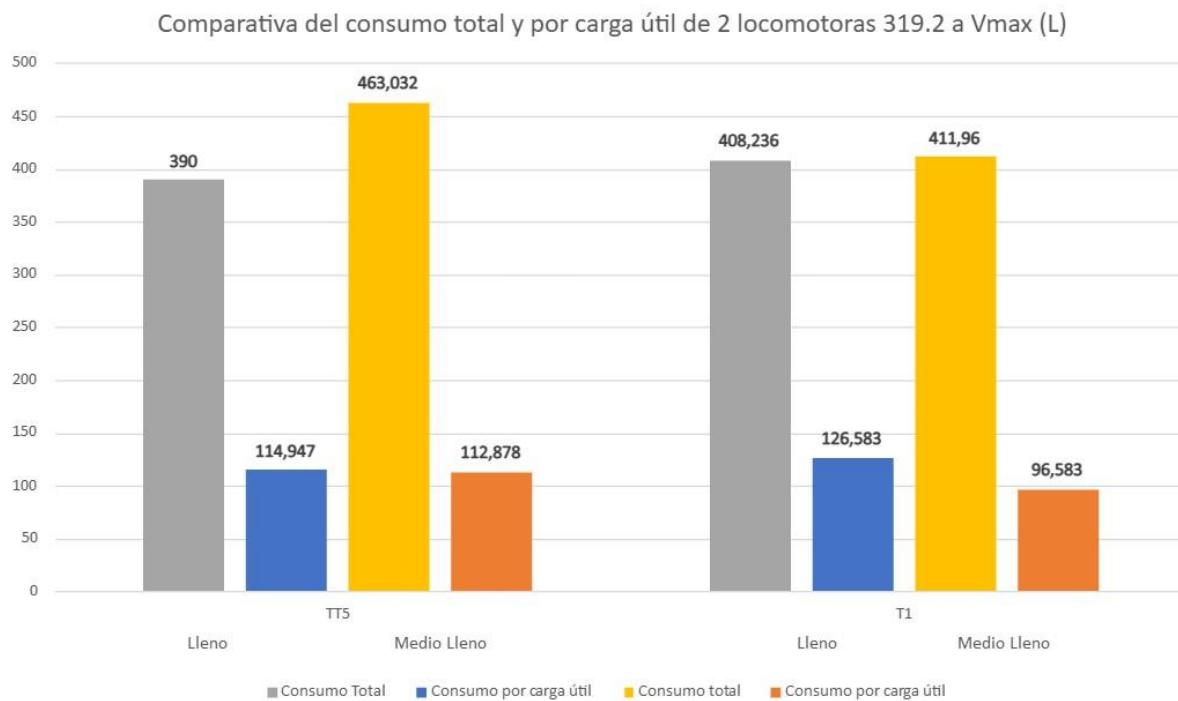


Ilustración 52: Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

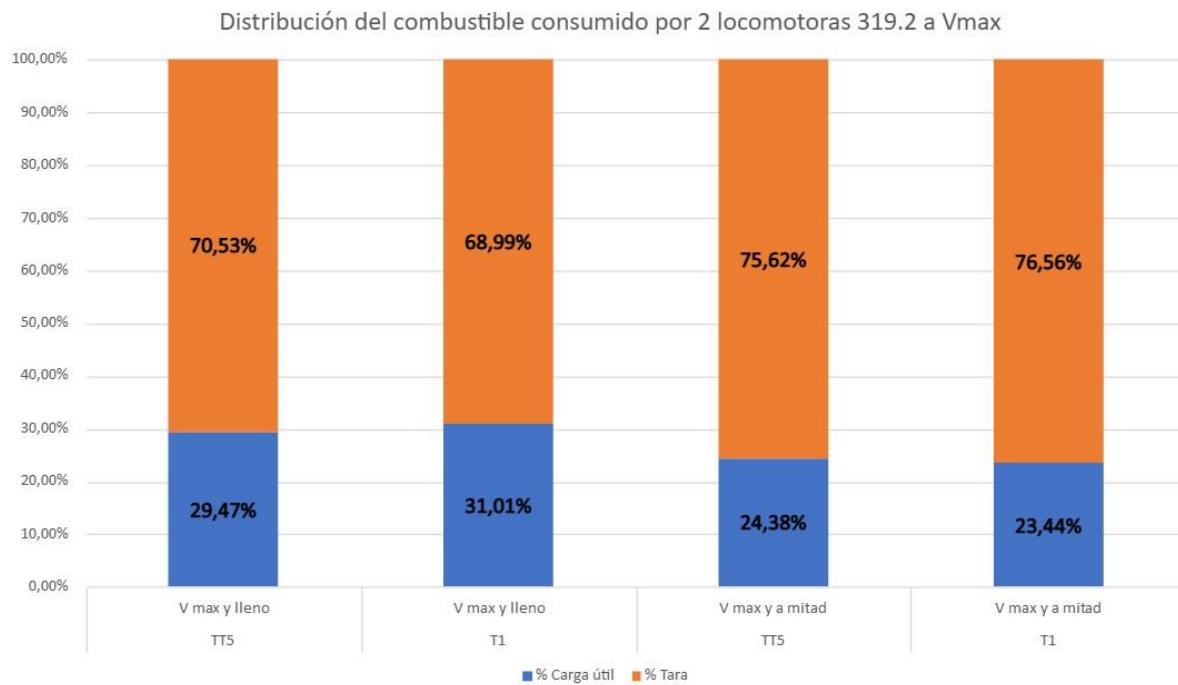


Ilustración 53: Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

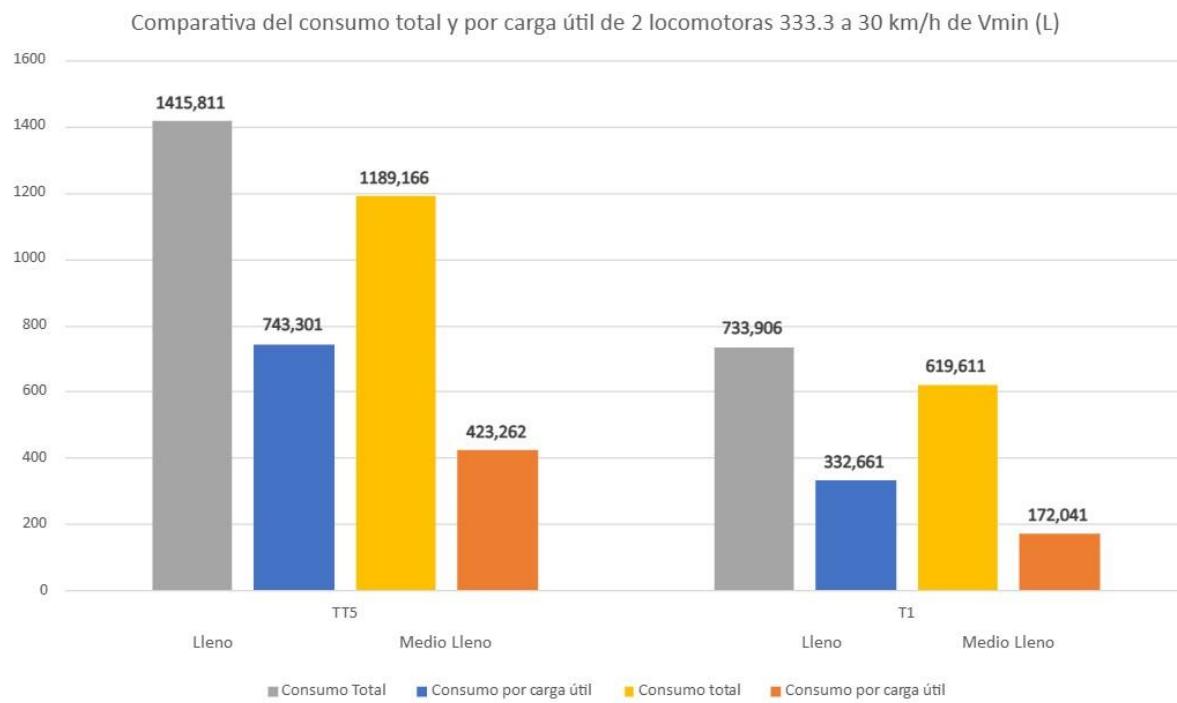


Ilustración 54: Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

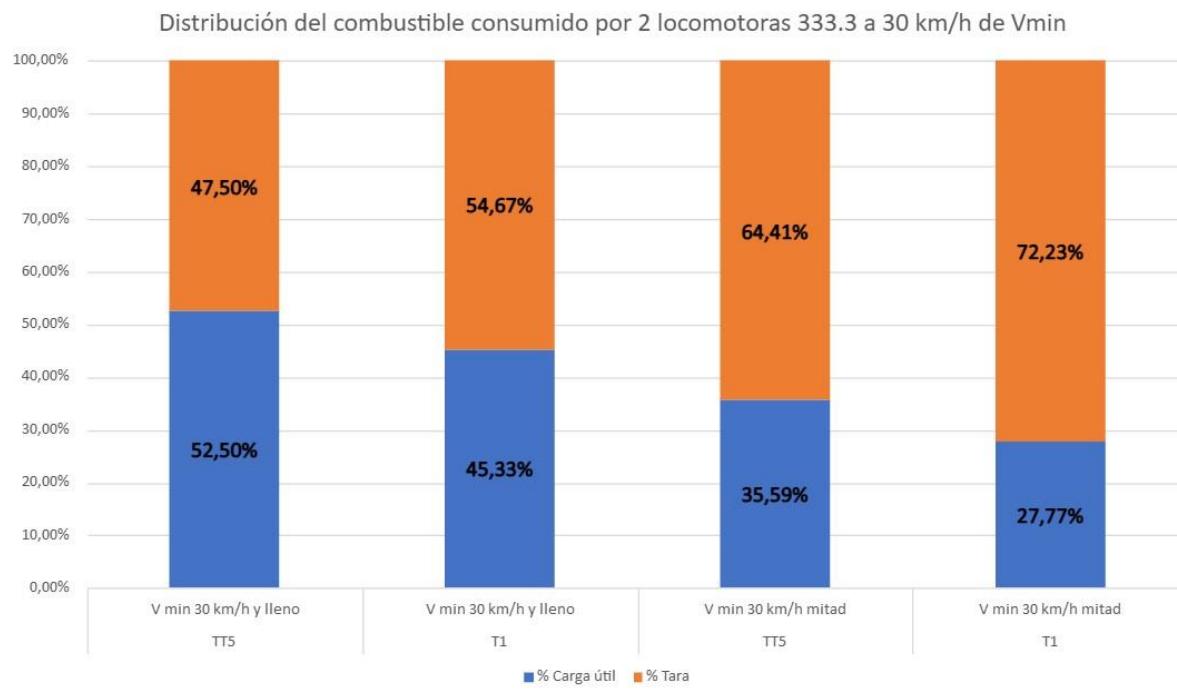


Ilustración 55: Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia

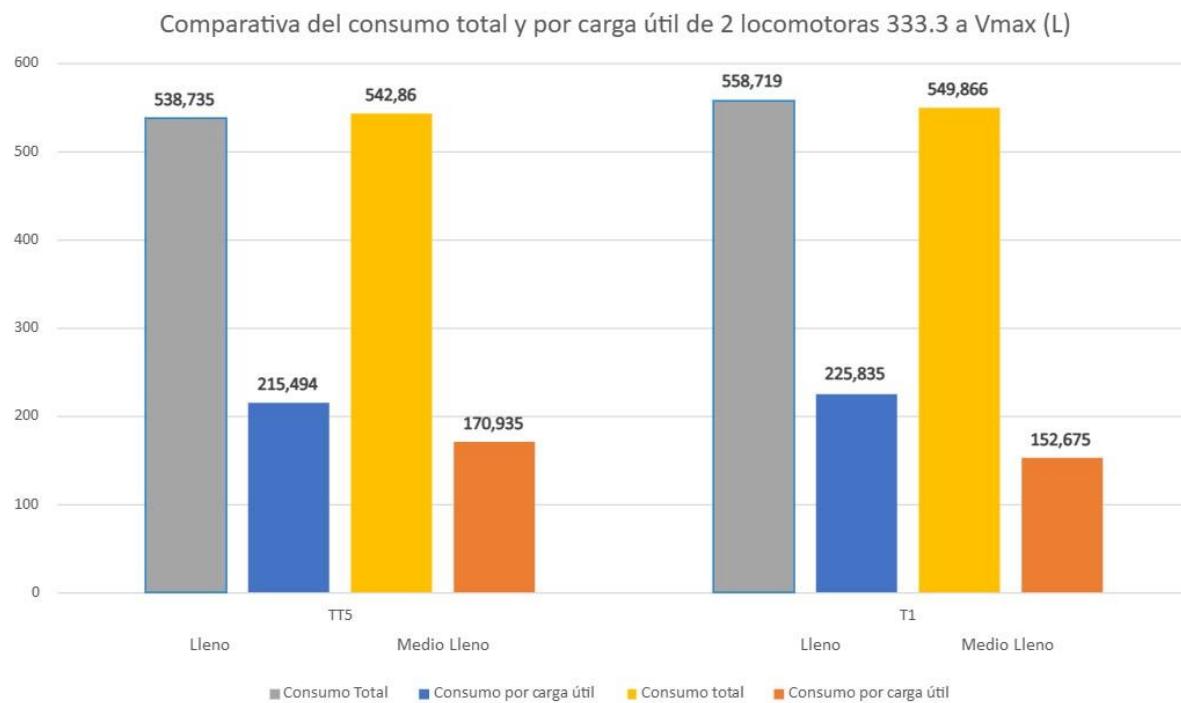


Ilustración 56: Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

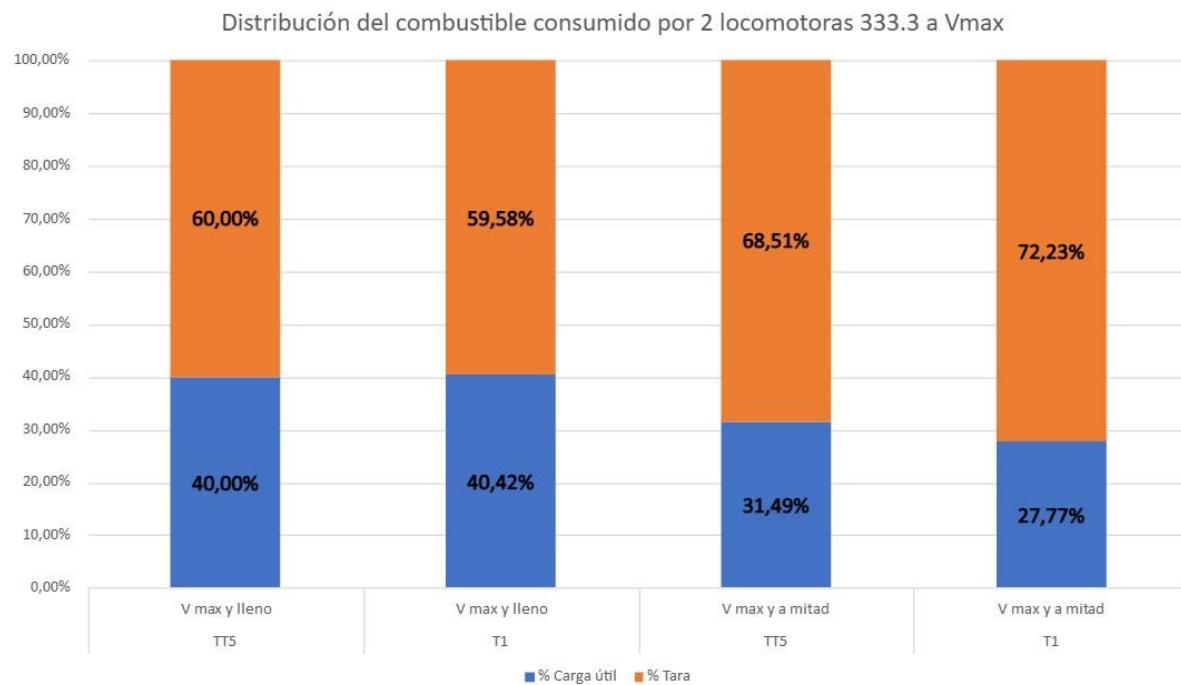


Ilustración 57: Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras 333.3 velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia

De los gráficos de las distribuciones del consumo del combustible podemos deducir una vez más que transportar materiales menos densos es poco eficaz desde el punto de vista del combustible dedicado a mover la carga útil. Estos gráficos resultan ser muy útiles ya que permiten visualizar de manera clara y sencilla cuánto combustible se predica a mover peso de las taras del material ferroviario.

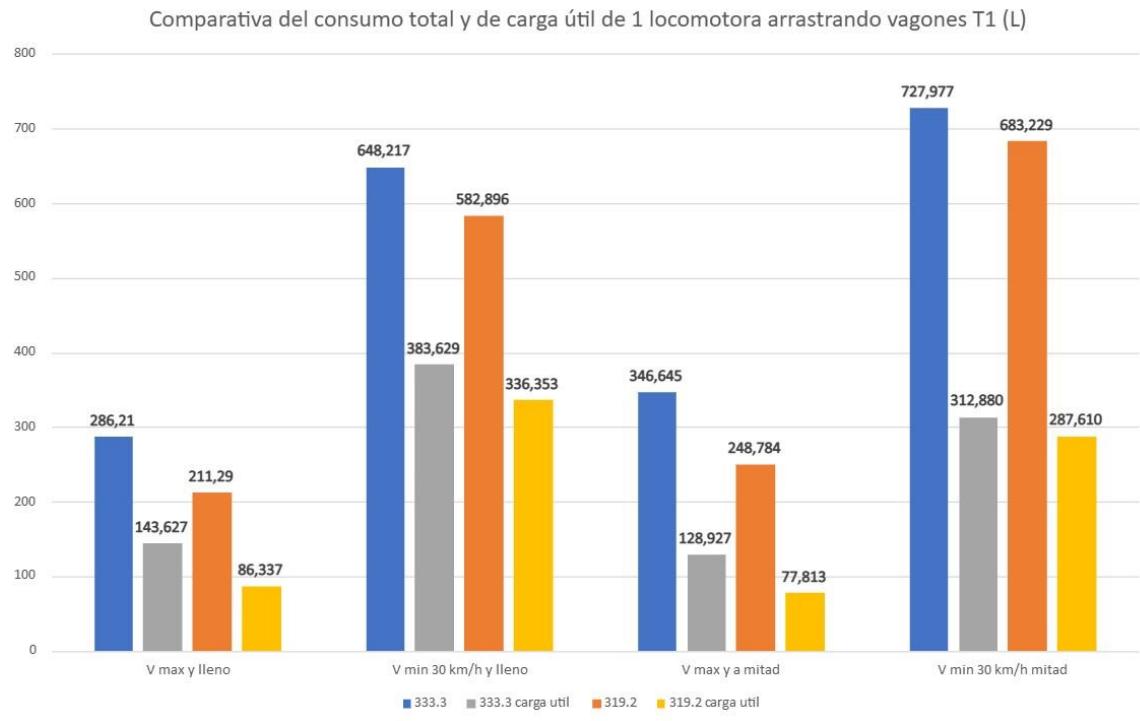


Ilustración 58: Comparativa del Consumo 4 para una locomotora remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia

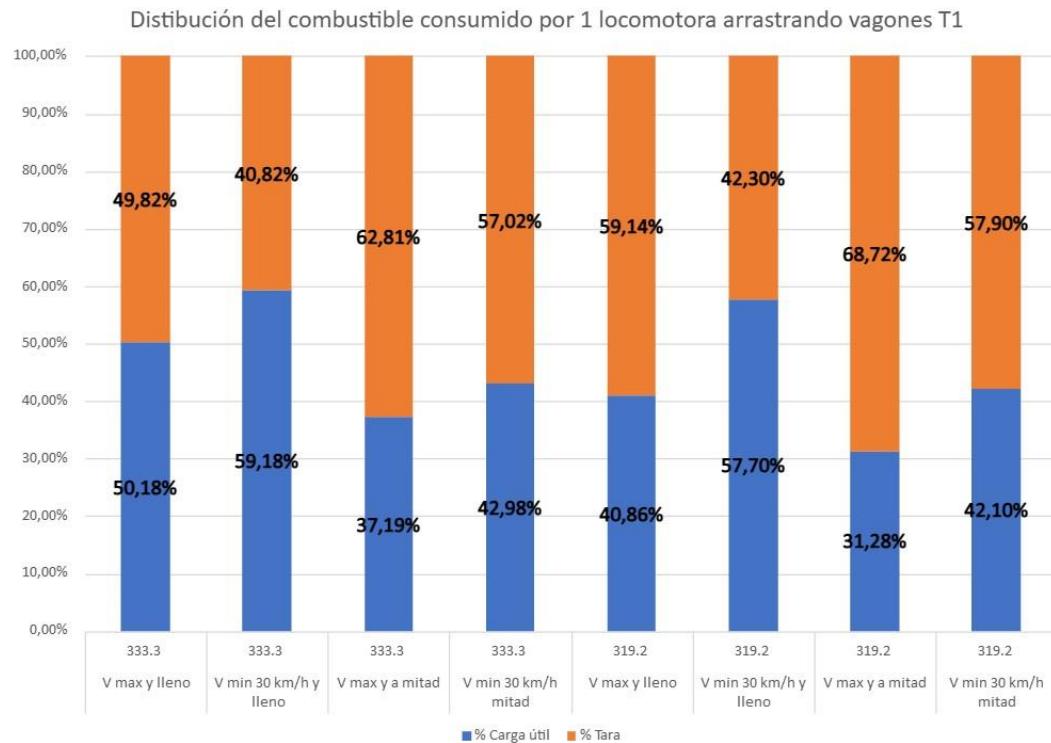


Ilustración 59: Distribución del consumo de combustible para una locomotora remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia

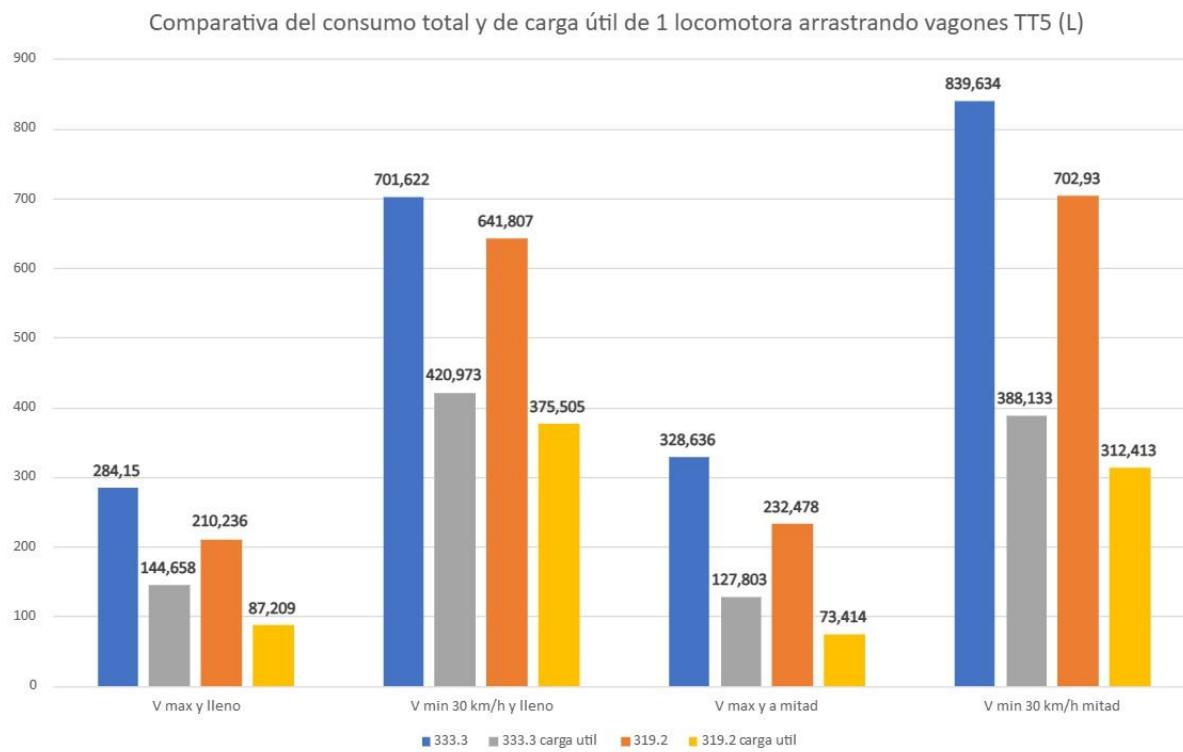


Ilustración 60: Comparativa del Consumo 4 para una locomotora remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia

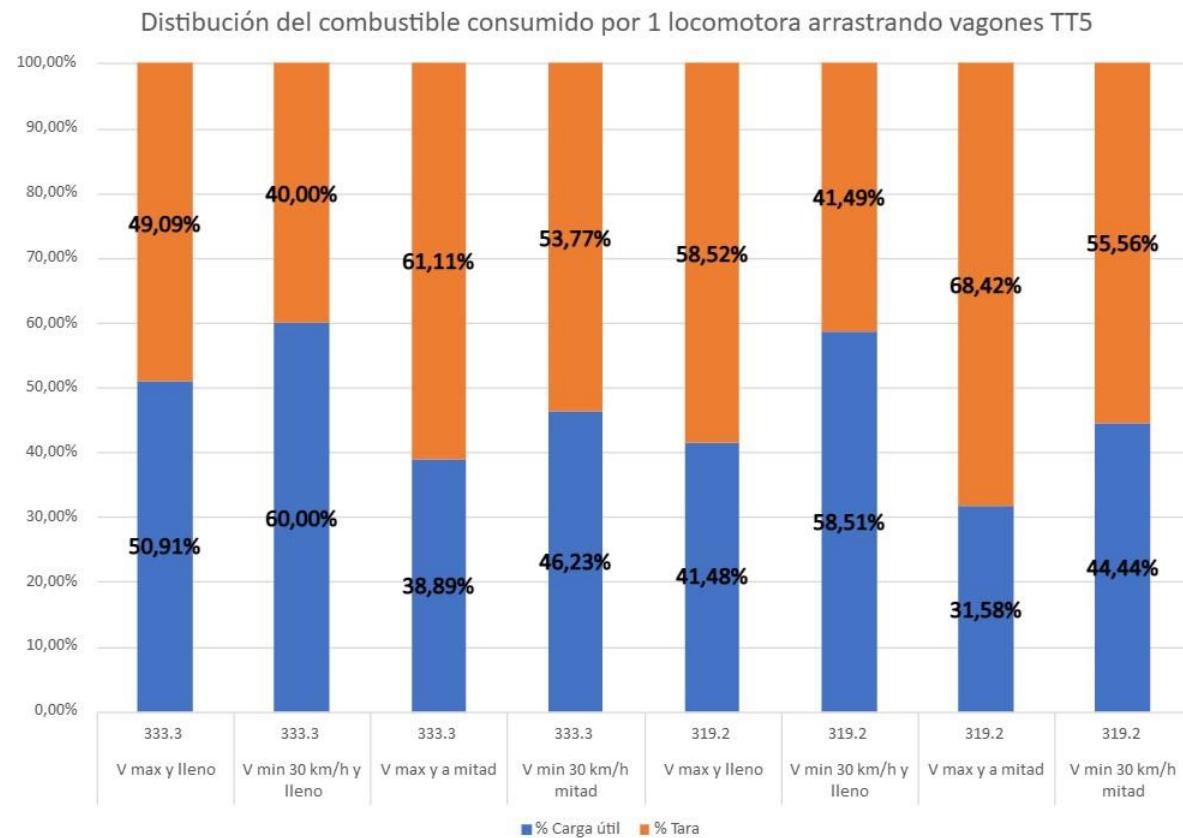


Ilustración 61: Distribución del consumo de combustible para una locomotora remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia

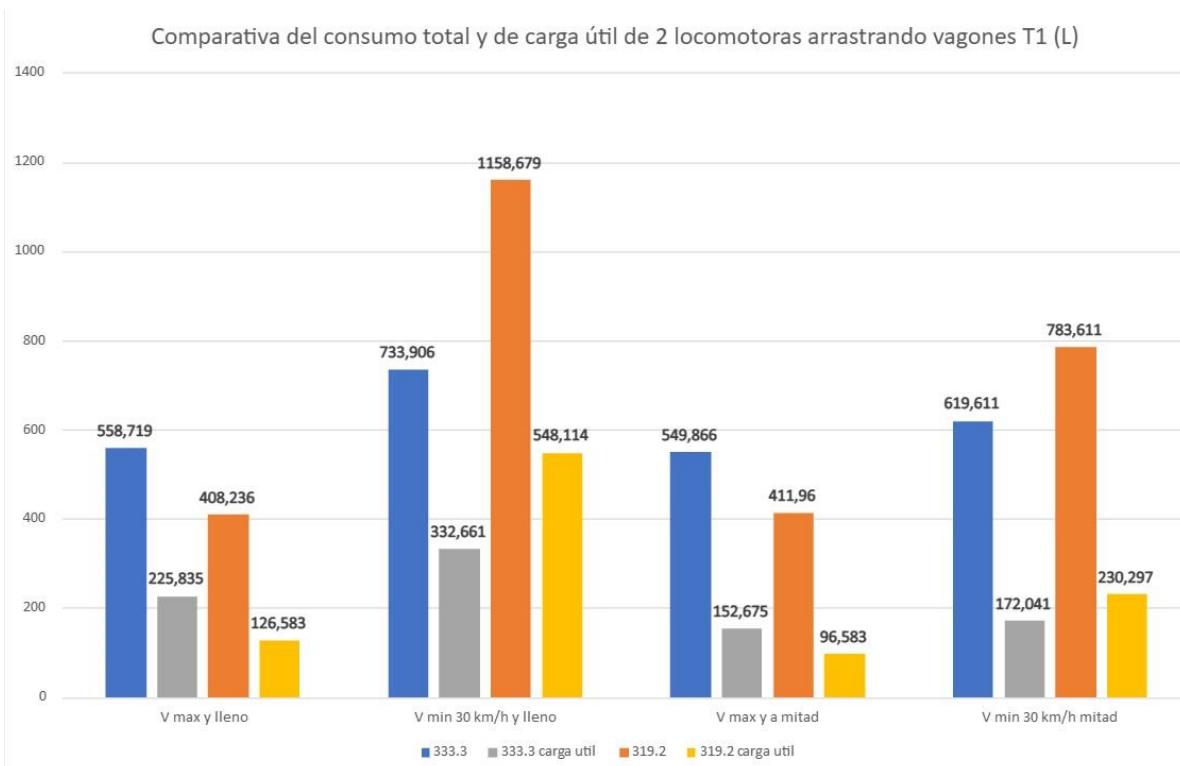


Ilustración 62: Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia

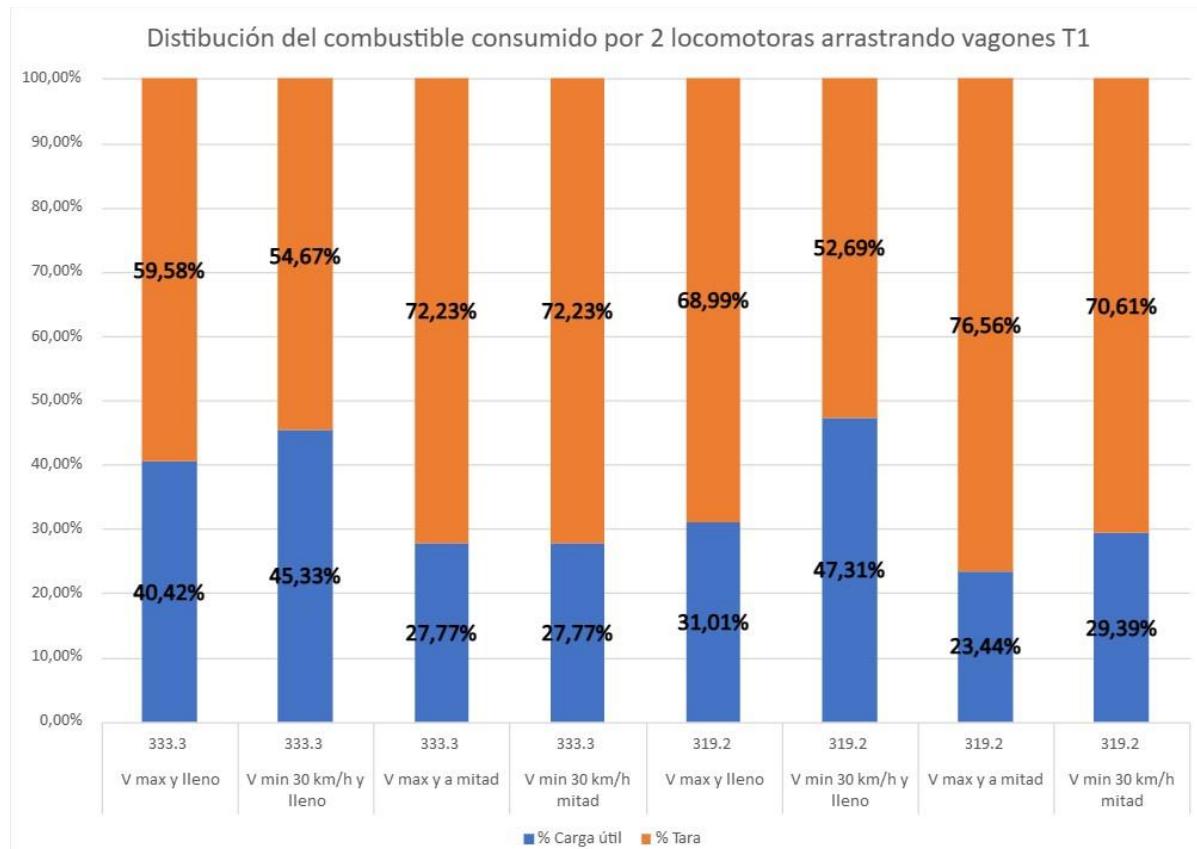


Ilustración 63: Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia

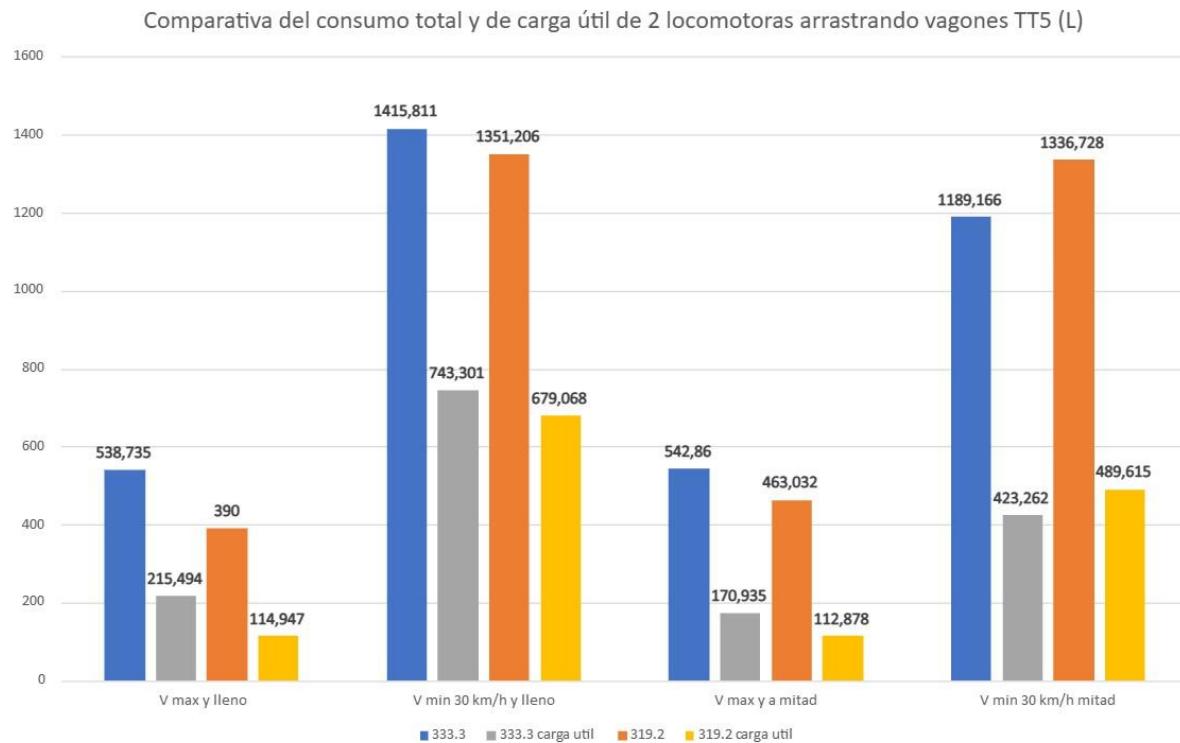


Ilustración 64: Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia

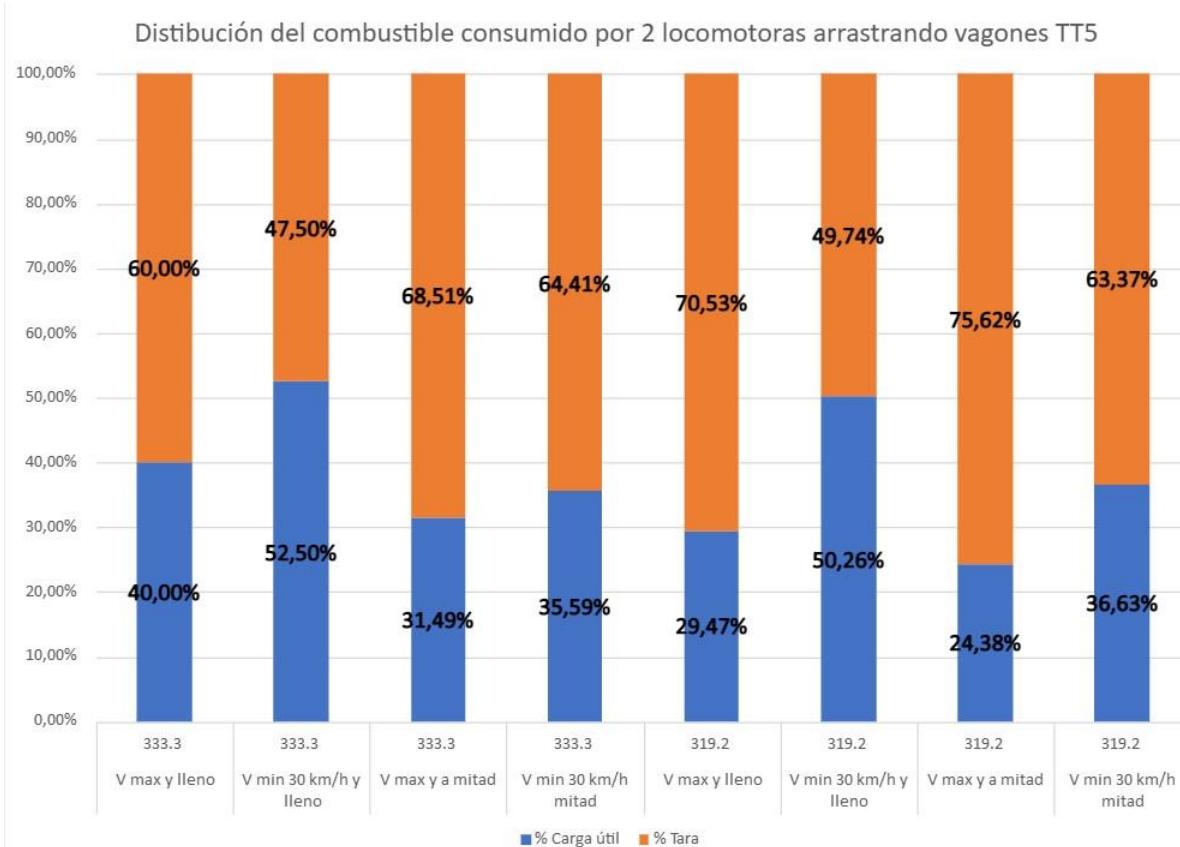


Ilustración 65: Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia

De este segundo grupo de gráficos se pueden extraer las siguientes conclusiones. El hacer uso de más de una locomotora hace que más parte del combustible vaya destinado a mover tara en vez de carga útil. Esto es porque, aunque se añada una locomotora más y esto permita remolcar más vagones el peso de esa segunda locomotora y de los vagones adicionales también tiene que ser arrastrado.

También se puede ver que las condiciones óptimas desde el punto de vista de aprovechamiento del combustible son las de vagones cargados con material denso y una velocidad mínima de 30 km/h.

7. Conclusiones

El primer análisis que se ha hecho de los datos deja claro que la línea Zaragoza-Canfranc es una línea difícil de explotar. Para el transporte de mercancías por sus condiciones de rampas elevadas, falta de electrificación y distinto tipo de anchos en diferentes tramos del trazado.

Su situación geográfica hace que sea una línea estratégica para España ya que sería un nuevo punto de entrada al país vecino. Por este motivo las administraciones públicas han decidido modernizar la línea y acondicionarla para poder hacer uso de ella a nivel nacional y con la esperanza de que se retome la conexión con Pau para recuperar su uso internacional.

Por todo esto hacer estudios sobre la capacidad de esta línea resulta de vital importancia para poder determinar qué modelo de explotación será el más adecuado cuando la línea esté preparada.

A partir de los resultados obtenidos y respondiendo a las hipótesis lanzadas al inicio se puede concluir que hacer convoyes con más de una locomotora permite transportar más carga útil por tren. Esto no siempre resulta ser la mejor opción como ya se ha visto debido a que el peso adicional de la locomotora y vagones hace que el consumo de combustible sea más elevado haciendo que se use más combustible en mover tara en vez de carga útil. También se ha visto que por las elevadas pendientes no se puede hacer un uso completo de toda la potencia debido a las restricciones de adherencia.

Respecto a qué tipo de locomotora es mejor no se puede decidir claramente ya que depende de muchos factores como se ha visto, pero la que ofrece mejores resultados en la mayoría de casos y en los que no es la mejor la diferencia es poca es la locomotora serie 333.3.

Ha quedado demostrado que en la línea Zaragoza-Canfranc lo óptimo es mandar trenes con la mayor carga útil posible independientemente del tipo de vagón remolcado, tipo de locomotora y número de locomotoras. Esto quiere decir que, si bien es posible transportar materiales poco densos por esta línea como la madera, esto no es lo ideal ya que se destina mucha parte del combustible a mover los propios vagones y locomotoras. Por este motivo la mejor opción es seguir transportando el mismo tipo de mercancías que se ha hecho hasta ahora, cereales por qué son más densos y se aprovecha más el combustible por tonelada de mercancía transportada.

Las variaciones de tiempo que se tarda en realizar el recorrido, subida y bajada, en función de las diferentes composiciones estudiadas son muy pequeñas como para poder considerarlas determinantes a la hora de decidir qué tipo de convoy es mejor. Relacionado con esto se ha visto que en la mayoría de los casos la mejor opción es hacer trenes grandes que vayan más despacio en lugar de trenes cortos con poca carga y que sea más rápidos.

Como conclusión final se puede decir que la mejor composición de tren posible para esta línea es una locomotora 333.3 cargado lo máxima posible y que vaya más despacio por la línea junto

8. Índices

8.1 Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Trazado y perfil de altura de la línea 56 de media distancia Zaragoza-Canfranc. Fuente: Google Earth.....	5
Ilustración 2 Límite de velocidad en la línea Zaragoza-Canfranc. Fuente: [4]	6
Ilustración 3 Mapa de longitudes máximas y pendientes. Fuente: Declaración de Red Adif 2021.....	8
Ilustración 4 Detalle de longitudes máximas y pendientes. Fuente: Declaración de Red Adif 2021.....	8
Ilustración 5 Mapa del tipo de vía y velocidades máximas. Fuente: Declaración de red Adif 2021.....	9
Ilustración 6 Detalle del tipo de vía y velocidades máximas. Fuente: Declaración de red Adif 2021.....	9
Ilustración 7 Mapa de sistemas de seguridad. Fuente: Declaración de red Adif 2021.....	10
Ilustración 8 Detalle de sistemas de seguridad. Fuente: Declaración de red Adif 2021.....	10
Ilustración 9 Discretización del trazado en San Juan de Mozarrifar. Fuente: Google Earth..	11
Ilustración 10 Toma de datos de curva – Ontinar de Salz. Fuente: Google Earth.....	12
Ilustración 11 Toma de datos entrada a túnel. Fuente: Google Earth.....	12
Ilustración 12 Toma de datos salida túnel. Fuente: Google Earth.....	13
Ilustración 13 Perfil de elevación del túnel. Fuente: Google Earth.....	13
Ilustración 14 Comparativa del Caudal 2 para una locomotora 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	35
Ilustración 15 Comparativa del Caudal 2 para una locomotora 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	36
Ilustración 16 Comparativa del Caudal 2 para una locomotora 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	36
Ilustración 17 Comparativa del Caudal 2 para una locomotora 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	37
Ilustración 18 Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	37
Ilustración 19 Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	38

Ilustración 20 Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	38
Ilustración 21 Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	39
Ilustración 22 Comparativa del Caudal 2 para una locomotora remolcando vagones T1. Fuente: elaboración propia.....	40
Ilustración 23 Comparativa del Caudal 2 para una locomotora remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia.....	40
Ilustración 24 Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia.....	41
Ilustración 25 Comparativa del Caudal 2 para 2 locomotoras remolcando vagones TT5. Fuente: elaboración propia.....	41
Ilustración 26 Comparativa del Consumo 1 para una locomotora 319.2. Fuente: Elaboración propia.....	42
Ilustración 27 Comparativa del Consumo 1 para una locomotora 333.3. Fuente: Elaboración propia.....	43
Ilustración 28 Comparativa del Consumo 1 para 2 locomotoras 319.2. Fuente: Elaboración propia.....	43
Ilustración 29: Comparativa del Consumo 1 para 2 locomotoras 333.3. Fuente: Elaboración propia.....	44
Ilustración 30 Comparativa del Consumo 3 para una locomotora 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	45
Ilustración 31 Comparativa del Consumo 3 para una locomotora 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	46
Ilustración 32 Comparativa del Consumo 3 para una locomotora 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	46
Ilustración 33 Comparativa del Consumo 3 para una locomotora 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	47
Ilustración 34 Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	47
Ilustración 35 Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	48
Ilustración 36 Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	48

Ilustración 37 Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	49
Ilustración 38 Comparativa del Consumo 3 para una locomotora remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia.....	49
Ilustración 39 Comparativa del Consumo 3 para una locomotora remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia.....	50
Ilustración 40 Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia.....	50
Ilustración 41 Comparativa del Consumo 3 para 2 locomotoras remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia.....	51
Ilustración 42 Comparativa del Consumo 4 para una locomotora 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	52
Ilustración 43 Distribución del consumo de combustible para una locomotora 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	52
Ilustración 44 Comparativa del Consumo 4 para una locomotora 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	53
Ilustración 45 Distribución del consumo de combustible para una locomotora 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	53
Ilustración 46 Comparativa del Consumo 4 para una locomotora 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	54
Ilustración 47 Distribución del consumo de combustible para una locomotora 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	54
Ilustración 48 Comparativa del Consumo 4 para una locomotora 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	55
Ilustración 49 Distribución del consumo de combustible para una locomotora 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	55
Ilustración 50 Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	56
Ilustración 51 Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras 319.2 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	56
Ilustración 52 Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	57
Ilustración 53 Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras 319.2 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	57

Ilustración 54 Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	58
Ilustración 55 Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras 333.3 a 30 km/h de velocidad mínima. Fuente: Elaboración propia.....	58
Ilustración 56 Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras 333.3 a velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	59
Ilustración 57 Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras 333.3 velocidad máxima. Fuente: Elaboración propia.....	59
Ilustración 58 Comparativa del Consumo 4 para una locomotora remolcando vagones T1. Fuente: elaboración propia.....	60
Ilustración 59 Distribución del consumo de combustible para una locomotora remolcando vagones T1. Fuente: elaboración propia.....	60
Ilustración 60 Comparativa del Consumo 4 para una locomotora remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia.....	61
Ilustración 61 Distribución del consumo de combustible para una locomotora remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia.....	61
Ilustración 62 Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia.....	62
Ilustración 63 Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras remolcando vagones T1. Fuente: Elaboración propia.....	62
Ilustración 64: Comparativa del Consumo 4 para 2 locomotoras remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia.....	63
Ilustración 65: Distribución del consumo de combustible para 2 locomotoras remolcando vagones TT5. Fuente: Elaboración propia.....	63

8.2 Índice de tablas

Tabla 1 Datos de locomotora 319.2 y 333.3. Fuente: Elaboración propia.....	15
Tabla 2 Datos de tolvas T1 y TT5. Fuente: Elaboración propia.....	16
Tabla 3 Casos a simular. Fuente: Elaboración propia.....	16-17
Tabla 4 Número máximo de vagones que puede que puede llevar el tren con las condiciones descritas. Fuente: Elaboración propia.....	26-27
Tabla 5 Comparativa del número de vagones arrastrados – Mismo tipo de vagón y locomotora. Fuente: Elaboración propia.....	27
Tabla 6 Comparativa del número de vagones arrastrados – Mismo tipo de vagón y distinta locomotora. Fuente: Elaboración propia.....	27
Tabla 7 Comparativa del número de vagones arrastrados – Distinto tipo de vagón y locomotora. Fuente: Elaboración propia.....	28
Tabla 8 Comparativa del número de vagones arrastrados – Mismo tipo de vagón y con diferentes condiciones de velocidad. Fuente: Elaboración propia.....	28
Tabla 9 Carga útil transportada en cada caso según la composición del tren. Fuente: Elaboración propia.....	29-30
Tabla 10 Tiempo que cada tren tarda en hacer el recorrido. Fuente: Elaboración propia.30-31	
Tabla 11 Consumo de combustible diésel en litros. Fuente: Elaboración propia.....	32
Tabla 12 Comparativa del consumo entre el caso 1 y el caso 3. Fuente: Elaboración propia.....	32
Tabla 13 Comparativa del consumo entre el caso 8 y el caso 24. Fuente: Elaboración propia.....	33
Tabla 14: KPI calculados de caudal y consumo calculados. Fuente: Elaboración propia.....	33-34
Tabla 15 Comparación de resultados entre los casos 13 y 15. Fuente: Elaboración propia...39	

9. Bibliografía

[1] Línea 56 (Media distancia). (22 de enero de 2024). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*.

Recuperado el 18 de septiembre de 2024 de

[https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_56_\(Media_Distancia\)](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_56_(Media_Distancia))

[2] Frontera entre España y Francia. (26 de mayo de 2024). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado el 18 de septiembre de 2024 de

https://es.wikipedia.org/wiki/Frontera_entre_Espa%C3%B1a_y_Francia

[3] Línea de alta velocidad Zaragoza–Huesca. (5 de octubre de 2023). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado el 18 de septiembre de 2024 de

https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_de_alta_velocidad_Zaragoza%E2%80%93Huesca

[4] Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2024). ESTUDIO INFORMATIVO DE IMPLANTACIÓN DEL ANCHO ESTÁNDAR EN EL TRAMO HUESCA-

CANFRANC. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. Recuperado de

https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/estudio_ferrocarriles/Huesca-Canfranc/memoria-y-anejos/a01_antecedentes.pdf

[5] Adif. (2024). Declaración sobre la red. Recuperado de

https://www.adifaltavelocidad.es/documents/34745/30955149/20240719_03_DR_Adif_AV_2024_Mapas.pdf/cb0e465e-9854-da34-0b8e-ca2f08bdf51b?t=1721388993480

[6] Botifoll, M. (2024). Tipos de Bloqueos. *Señales R.G.C.* Recuperado de

<https://senalesrgc.jimdofree.com/inicio/nociones-b%C3%A1sicas/tipos-de-bloqueos/>

[7] Bloqueo (ferrocarril). (6 de junio de 2024). En *Wikipedia, la enciclopedia libre*.

Recuperado el 18 de septiembre de 2024 de

[https://es.wikipedia.org/wiki/Bloqueo_\(ferrocarril\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Bloqueo_(ferrocarril))

[8] Renfe (2024). Material de alquiler. Recuperado de

<https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/sociedades/renfe-alquiler/material-de-alquiler>