

Modelación del Consumo y Costos de Energía en la Operación Ferroviaria.

Tristán E. Gálvez Pérez

y

Luis A. Sánchez Garrido

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
Casilla 228/3, Santiago, Chile.

RESUMEN

El consumo de energía en la operación ferroviaria comprende dos categorías claramente definidas desde el punto de vista de la fuente energética utilizada: petróleo diesel y electricidad. El presente trabajo presenta los resultados de una investigación realizada sobre ambos consumos, cuyo principal objetivo era la modelación de consumos unitarios en función del tipo de tren (carga, pasajeros), zona geográfica y otros factores. Por otra parte, interesaba conocer los costos de provisión de esta energía. Estos objetivos, además de su función obvia en términos de apoyo a la gestión de una empresa ferroviaria, son piezas esenciales de un sistema de tarificación de uso de vías en ferrocarriles en que la gestión de estas últimas sea realizada por un ente distinto al operador de trenes. Por otra parte, son también elementos clave para la formulación de una metodología de evaluación de proyectos de inversión en infraestructura y equipos ferroviarios.

Para la modelación estadística o econométrica de los consumos energéticos se utiliza datos provistos por la Empresa de los Ferrocarriles del Estado, acerca de consumos mensuales de energía eléctrica y petróleo diesel, y acerca del número y tipo de trenes movilizados en cada mes. Para el modelo de consumo de energía eléctrica, las variables explicativas más significativas fueron los trenes-kilómetro y toneladas brutas-kilómetro de trenes de pasajeros y carga, y el tipo de subestación de rectificación. Sin embargo, el modelo de consumo de petróleo diesel no apareció sensible a ninguna variable operacional, por lo cual se plantea la necesidad de mejorar a futuro los sistemas de registro y control del consumo.

Estos resultados son validados parcialmente mediante una modelación analítica, que corresponde al cálculo numérico de la ecuación de marcha de un tren en vía libre para un ejemplo concreto correspondiente a un tren típico, considerando como variables explicativas del consumo de energía la relación consumo/potencia de la locomotora, las fuerzas disipativas, las características de la vía en cuanto a geometría y velocidades permitidas y la adherencia llanta/riel.

Se determina a continuación el costo de provisión de los recursos energéticos. Para el caso Diesel se refiere a almacenamiento, transporte y servicio. En el caso de la electricidad se considera costos de mantenimiento y operación de subestaciones y líneas de contacto, y costos de adquisición de energía y potencia.

Finalmente, se sugiere líneas de acción para futuros estudios en el ámbito energético ferroviario, ya sea destinados a implementar herramientas para evaluación socioeconómica o a proveer antecedentes para tarificación.

I. INTRODUCCION

El objetivo de este trabajo es el planteamiento de metodologías para la formulación y calibración de modelos de consumo de energía en la operación ferroviaria, sensibles a las características geométricas de la vía, a su estado de conservación y a la tipología de trenes que la usan. Para ello se utiliza información de la Empresa de los Ferrocarriles del Estado. Este tipo de modelos son esenciales para el desarrollo de metodologías de evaluación de proyectos de inversión en infraestructura ferroviaria, tanto en términos sociales como privados. Es fundamental además para el establecimiento de sistemas de tarifas o peajes por el uso de vías. Finalmente, aporta a la evaluación de políticas de operación y gestión de la empresa ferroviaria. Los temas señalados adquieren singular importancia en el presente, dado que la Empresa de los Ferrocarriles del Estado se halla en proceso de restructuración. El trabajo se inicia con la presentación de antecedentes generales acerca del consumo de energía en el país, en el sector transporte y en el subsector ferroviario. A continuación se realiza una modelación econométrica de los consumos, basada en información histórica y se estudia el costo de provisión de la energía. Finalmente se presentan las principales conclusiones del estudio.

2. ANTECEDENTES

El Sector Transporte consumió en 1992 el 23.8% de la energía total consumida en el país, el Sector Industrial un 27.9% y el Sector Comercial, Público y Residencial un 23.5%. El 24.7% restante corresponde a pérdidas y consumo en centros de transformación de energía (CNE, 1992). El Cuadro N°1 detalla el balance de energía del año 1991, donde se aprecia la incidencia de cada uno de los sectores de actividad del país, desglosando el Sector Transporte para visualizar la reducida participación del modo ferroviario.

Cuadro N° 1
Consumo de Recursos Energéticos en 1991 (Teracalorías)

Recurso Energético	Sector Transporte					Otros Sectores		Consumo Final	Centros Transformación	Consumo Total
	Terrestre	Ferroviario	Mari	Aéreo	Total	Ind. y Min.	C. P. y R.			
P. Diesel	11.936	192	4.066	0	16.192	6.272	1.528	23.992	1.196	25.188
P. Combust.	0	0	1.948	0	1.948	8.754	74	10.775	4.857	15.432
Gas 81	1.102	0	0	0	1.102	0	0	1.102	0	1.102
Gas 93	14.824	0	0	0	14.824	0	0	14.824	0	14.824
Gasol. Av.	0	0	0	62	62	0	0	62	0	62
K. Aviac.	0	0	0	3.044	3.044	0	0	3.044	0	3.044
Electricidad	71	121	0	0	192	9.797	4.542	14.531	719	15.250
Gas Natural	76	0	0	0	76	55	1.757	1.888	11.779	13.667
Otros	0	0	0	0	0	18.937	29.051	47.990	57.216	68.504
Total (%)	28.009 (17.8)	311 (0.2)	6.014 (3.8)	3.106 (2.0)	37.440 (23.8)	43.815 (27.9)	36.952 (23.5)	118.208 (75.3)	38.865 (24.7)	157.073 (100)

Otros: Kerosene, gas licuado, nafta, gas refinería, carbón, coke, alquitrán, gas corriente, gas alto horno, metanol, leña y otros, biogas.

El Sector Transporte es el de menor eficiencia energética debido fundamentalmente al predominio del uso de derivados del petróleo. En efecto, según se aprecia en el Cuadro N°1, de la Energía consumida en el Sector Transporte, 37.172 Teracalorías provienen de derivados del petróleo (99,28%), 192 Teracalorías corresponden a electricidad (0,51%) y 76 Teracalorías (0,20%) a otros energéticos; a su vez, del total de energía consumida un 68,43% corresponde a pérdidas y sólo 31,57% es energía útil (CNE, 1989). En el Cuadro N° 2 se detalla el consumo de recursos energéticos en la Empresa de los Ferrocarriles del Estado, que representa un 73,3% dentro del Transporte Ferroviario y 0,6% en el Sector Transporte.

Cuadro N° 2
Consumo de Energéticos en EFE durante 1991

Detalle	Unidad	Tracción	Otros Serv.	Total
Carbón	Ton.	-	78	78
Petróleo	m ³	11.182	1.458	12.640
Electricidad	MWH	117.703	12.040	129.743
Consumo Total (Gigacalorías)				227.857

$$\begin{aligned} \text{Kg de carbón} &= 7,000 \text{ Kcal} \\ \text{Kg de petróleo diesel} &= 10,900 \text{ Kcal} \\ \text{KWH electricidad} &= 860 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

Este trabajo se centra en el petróleo consumido en tracción que significó en 1991 el 88.5 % del consumo total de la empresa y en la electricidad consumida en las subestaciones de rectificación correspondiente al 90.7 % del mismo. La participación de consumo de energía en el gasto de 1991 (EFE, 1992a), excluida la depreciación, alcanzó al 10.6%. El Cuadro N°3 presenta la partición del consumo por categoría de vías y tipos de tren.

Cuadro N°3
Partición Energética según Categorías de Vía

Tipo de Tren y Energético	Categorías				Totales
	Primera	Segunda	Tercera	Cuarta	
Pax Eléctr.	2,075,244 38.4	15,467 0.3	- 0.0	- 0.0	2,090,711 38.6
Pax Diesel	68,259 1.3	139,029 2.6	67,304 1.2	3,556 0.1	278,148 5.1
Carga Eléctr.	1,651,619 30.5	221,564 4.1	19 0.0	5,615 0.1	1,878,817 34.7
Carga Diesel	549,162 10.1	540,852 10.0	17,654 0.3	55,830 1.0	1,163,498 21.5
Total	4,344,284 80.3	916,911 16.9	84,976 1.6	65,002 1.2	5,411,173 100.0 %

3. MODELACIÓN ECONOMÉTRICA.

Una función de costos en un proceso productivo cualquiera según la Teoría de Multiproducción (Jara-Díaz, 1984) corresponde a:

$$C(w, Y, \bar{X}) = \{ \min_x \langle w, X \rangle / (X, Y) \in T, X_i \geq 0 \forall i, X_j = \bar{X}_j \forall j \in k \} \quad (1)$$

donde:

- $w \in \mathbb{R}^m$: vector de precios de insumos.
- $Y \in \mathbb{R}^n$: vector de productos.
- $\{X_i\} = X \in \mathbb{R}^m$: vector de insumos.
- $\{X_j\} = \bar{X} \in \mathbb{R}^k$: vector de insumos fijos ($k < m$).
- T : conjunto técnicamente factible.
- K : conjunto de insumos fijos.

Luego, la función de costos representa el nivel mínimo de gasto para producir un vector Y a precios de factores w , disponiendo de ciertos insumos en cantidades X , la cantidad a usar del resto de los insumos es el problema que implicitamente se resuelve en $c(w, Y, X)$.

Así, la información imprescindible para estimar estadísticamente una función de costos para un sistema de transporte dado, está compuesta de una serie de observaciones de períodos sucesivos y/o varias simultáneas (cross section) que comprendan el gasto total G y los volúmenes transportados, los precios de insumos y los niveles de factores considerados como fijos o no adaptables entre períodos. Particularmente interesante es la propiedad conocida como lema de Shepard, según el cual la demanda por factores de producción cumple con:

$$X_i = \frac{\partial C(w, Y, \bar{X})}{\partial w_i} = X_i(w, Y, \bar{X}) \quad (2)$$

De aquí se desprende que el gasto G_i (3):

$$G_i = w_i X_i(w, Y, \bar{X}) \quad (3)$$

asociado a un tipo de insumo es también una función del flujo, precios de factores y niveles fijos de insumos. Las ecuaciones 1 y 2 proveen varias maneras de estimar la función de costos, dependiendo de la cantidad y naturaleza de la información disponible, y de las características técnicas y económicas del proceso de generación de flujos en el sistema de transporte en estudio.

Cada componente del vector de flujos Y , según la teoría de multiproducción, debería representar movimientos de pasajeros y carga entre un determinado par de estaciones por tipo de pasajeros y tipo de producto, por períodos (temporada alta, baja), etc. Tal descripción es usualmente inmanejable y la información necesaria no está disponible, por lo tanto se debe generar una representación distinta que sea a la vez razonable y factible sin caer en la agregación total. Sin embargo, en esta investigación de trabajará con con flujos de trenes.

La correspondencia temporal entre los niveles de gasto (G o G_i) y flujo, es un factor de mucha importancia en la generación de series para estimar una función de costos. En este sentido debe diferenciarse entre el gasto contable, nominalmente asignado a un periodo (día, mes, año, etc.) y el gasto real, asociado al uso de insumos efectivamente utilizados en ese periodo para generar el flujo observado.

En general, el carácter fijo de un factor depende de la unidad de tiempo (día, mes, año) en que se realizan las observaciones de gastos y flujos. El caso de la energía para tracción es de aquellos indudablemente dependientes de X y Y aun en períodos muy breves.

La estimación de la función C o de las funciones C_i a partir de las observaciones, requiere que todas las variables involucradas presenten suficiente variación, ya que la técnica econométrica se basa en explicar variaciones de la(s) variable(s) dependiente(s), en este caso G o G_i , a partir de variaciones en las variables independientes, en este caso w , Y y X . Así, factores que sean fijos a lo largo de todos los períodos observados, no podrían ser incluidos en el análisis estadístico de su efecto sobre el gasto. Una muy buena función de costo debiera explicarlo perfectamente en función de las variables precisas (w , Y , X), sin embargo la especificación utilizada depende de la información disponible y de las expectativas y requerimientos del modelador. En efecto, los antecedentes de utilización de funciones de costo asociadas a la energía en operación de sistemas de transporte tienen dos características comunes: en primer lugar, se utiliza el consumo de recurso (energía) y no el gasto como variable dependiente; y en segundo lugar, el modelador se ve en la necesidad de adaptarse a las estadísticas existentes para construir la base de datos, ya sea de las variables explicativas como dependientes especialmente en lo concerniente a períodos y cobertura.

Se revisó los siguientes trabajos específicos: (Araneda, 1991) resume las experiencias previas de estimación de consumo de energía en la operación del Metro de Santiago, algunas de las cuales fueron examinadas en detalle, incluyendo estimaciones econométricas de demanda de potencia eléctrica; (Valenzuela, 1985) estima funciones de consumo de energía eléctrica para el Metro de Santiago valiéndose de técnicas econométricas enriquecidas en base a la teoría de multiproducción; (Gálvez, 1989) estima funciones de consumo de combustible diesel para transporte de pasajeros en ferrocarriles ingleses; (Jara-Díaz y Vigouroux, 1986) perfeccionan y amplían la cobertura de utilización de funciones de costo (y consumo de recursos) para el Metro de Santiago. A partir de la metodología expuesta, se ha de precisar el tipo de información necesaria, a saber: del multiproducto o flujos, del consumo de electricidad (KWH, kilowatt-hora) y del consumo de petróleo (L, litros), y no el gasto (G). En efecto, el precio (w)

de los insumos energéticos afectan la estructura productiva, por ejemplo en términos de sustitución, sin embargo no es asible en el plazo estudiado. Para realizar los procesamientos econométricos se ha utilizado el paquete computacional Time Series Program (TSP), (TSP International, 1986).

3.1 Información de Flujos.

La información de los flujos es procesada a partir del Parte Diario, Formulario T 16. Estos Partes Diarios son procesados de tal manera que confluye a un informe mensual (EFE, 1992b) en que se diferencia entre vehículos de pasajeros (sean trenes, automotores o buscarriles) y trenes de carga, por tramos de la red y por sistema de tracción eléctrico y diesel. Se presenta en miles de toneladas-kilómetro brutas, trenes-kilómetro, trenes y coches-kilómetro o carros-kilómetro, para fines de cobro de peajes al interior de EFE entre la Gerencia de Infraestructura (FERROVIA), y Operadores (MERVAL, VIA SUR, Gerencia de Carga y ASMAR).

Para calcular el tonelaje del tren se utilizan valores nominales de la tara del carro y de su capacidad de carga si viaja cargado. Esto es especialmente distorsionador para los coches de pasajeros a los cuales se les asigna un peso de 50 toneladas sin considerar su utilización. Para calcular la composición del tren (número y tipo de carros cargados y vacíos) en un tramo dado, se promedia su composición al inicio y fin del tramo, de tal manera que la información sobre operaciones en las estaciones intermedias (carga, descarga, agregación y extracción de carros, etc.) que haga diferir el valor real de dicho promedio se pierde. Este efecto indeseado es más reducido en la medida que los tramos sean cortos y/o con estaciones de escasa operación comercial. No registra maniobras en estaciones, por tanto no es posible incluir esta variable como explicativa del consumo; sin embargo, ha de esperarse maniobras crecientes con los flujos.

3.2 Modelación Econométrica del Consumo de Electricidad.

Los principales componentes del Sistema de Tracción Eléctrica son las subestaciones de rectificación y las líneas de contacto. La Empresa de los Ferrocarriles del Estado de Chile cuenta con una red electrificada en una extensión de 1.317 Km de vías principales y 484 Km de vías secundarias, totalizando con ello, 1.801 Km de líneas de contacto. Las subestaciones de rectificación producen corriente continua en 3000 V, utilizando diversas tecnologías que dependen de la época en que fueron construidas. El Cuadro N°4 resume sus principales características.

Se agrupó el consumo y los flujos de trenes atendiendo a la tecnología de rectificación descrita. Sin embargo el sector con subestaciones con exitrón fue dividido en dos partes con el fin de mejorar la cantidad de información. El Cuadro N° 4 se presenta un análisis cualitativo de las implicancias de esta zonificación calificando cuatro aspectos de la operación ferroviaria en cada una de estas Zonas: tipo de subestación, calidad del trazado, estado de la vía y velocidades admisibles. Cada uno de estos factores tiene en principio incidencia sobre los consumos unitarios que cabría esperar. Detalles técnicos de las instalaciones pueden encontrarse en Prado, (1992).

Cuadro N° 4
Características Zonales

Zonas	Cobertura		Características			
	Desde	Hasta	Subestación N° y estado	Trazado	Vía	Veloc. Km/h
Rotatoria	Puerto	Polpaico	6 mala	exigente	media	60
Exitrón	Polpaico	Talca	8 media	plano	buena	90
Exitrón	Talca	G. Cruz	5 media	plano	buena	80
Silicio	G. Cruz	Metrenco	9 buena	plano	mala	40

Las empresas distribuidoras facturan los consumos mediante una tarifa en dos partes: un cargo por potencia y uno por consumo. La modelación se referirá sólo a la parte consumo de energía, pues la de potencia es independiente del flujo, al menos en el corto plazo.

Las Subestaciones abastecen, además de la tracción, otras áreas de consumo, tales como servicios de la propia subestación, señales asociadas a sistema de movilización y consumos misceláneos. Por ejemplo, Laja provee a una Escuela en Diuquín; Quilacoya, el patio de una industria forestal; Viña del Mar y Los Andes, maestranzas, etc. Sin embargo, es posible sustraerlos de la facturación.

La tramificación del producto no coincide, en general, con el área de influencia de las subestaciones, necesitándose particionar el consumo entre los tramos generados, para lo cual se ha considerado una aproximación muy simplificada consistente en determinar la caída de tensión entre las subestaciones consecutivas atendiendo una carga móvil de resistencia fija (tren), lo cual permite calcular el aporte de energía proveniente de cada subestación.

Fue necesario manipular los flujos a fin de contar con información experimental de los flujos en torno a Polpaico y General Cruz para los meses recientes, que permitiera particionar los flujos respecto de los tramos originales. Una vez puesta en concordancia la información del tráfico con la información del consumo en la dimensión temporal y espacial, se consolidó un conjunto de observaciones que comprende una observación para cada zona, o sea cuatro (4) vectores simultáneos, corte transversal, durante un periodo de veintiún (21) meses, serie de tiempo. En consecuencia se cuenta con ochenta y cuatro (84) observaciones. Cada uno de estos vectores comprende:

- Trenes Kilómetro de Carga (TRENCAR).
- Trenes Kilómetro de Pasajeros (TRENPAZ).
- Toneladas Kilómetro Brutas de Carga (TONCAR).
- Toneladas Kilómetro Brutas de Pasajeros (TONPAX).
- Variable muda para distinguir Zona Rotatoria (RR).
- Variable muda para distinguir Zona Exitrón (MM).
- Variable muda para distinguir Zona Silicio (SS).
- KiloWatt-Hora de consumo eléctrico en Empalme (KWTOT).
- KiloWatt-Hora de consumo eléctrico en Servicios (KWSER).
- KiloWatt-Hora de consumo eléctrico en Otros (KWOTROS).

Se calculó las siguientes tres variables a partir de las variables observadas.

$$\text{TRACCION} = \text{KWTOT} - \text{KWSER} - \text{KWOTROS} \quad (4)$$

$$\text{TTPAX} = \text{TRENPAZ} * \text{TONPAX} \quad (5)$$

$$\text{TTCAR} = \text{TRENCAR} * \text{TONCAR} \quad (6)$$

Cuadro N° 5
Correlaciones Entre Variables

	TRACCION	TONPAX	TRENPAZ	TONCAR	TRENCAR	TTCAR	TTPAX
TRACCION	1.000						
TONPAX	0.642	1.000					
TRENPAZ	0.869	0.534	1.000				
TONCAR	0.492	0.718	0.193	1.000			
TRENCAR	0.331	0.291	0.002	0.804	1.000		
TTCAR	0.407	0.407	0.084	0.916	0.956	1.000	
TTPAX	0.839	0.920	0.806	0.579	0.215	0.372	1.000

El Cuadro N°5 muestra los valores de la correlación entre las variables observadas y las calculadas. De este cuadro se desprende la inconveniencia de incluir simultáneamente variables correlacionadas como explicativas en la función de consumo por el riesgo de multicolinealidad que significa, por ejemplo, TRENCAR Y TONCAR.

La energía consumida puede suponerse proporcional a la cantidad de trenes kilómetro observados o las toneladas transportadas. Sin embargo se distinguirá entre dos tipos de convoy, o sea carga y pasajeros, por tres razones: la operación de los trenes de pasajeros es distinta que la operación de los de carga en cuanto a su rapidez (dissipación aerodinámica) y detenciones; la información posee sesgos sistemáticos que aconsejan tratarlos separadamente; y la configuración del equipo arrastrado es mucho más variable en trenes de carga que de pasajeros, ya sea en número de piezas como en su peso (tara más carga).

Siguiendo lo expuesto en el punto anterior se calibrará la especificaciones definidas en (7) y (8), cuya única diferencia es la constante (σ).

$$\text{TRACCION} = (\pi \cdot RR + \mu \cdot MM + SS) * \\ (\sigma + \alpha \cdot TRENPAZ + \beta \cdot TONCAR + \Gamma \cdot TTPAX + \delta \cdot TTCAR) \quad (7)$$

$$\text{TRACCION} = (\pi \cdot RR + \mu \cdot MM + SS) * \\ (\alpha \cdot TRENPAZ + \beta \cdot TONCAR + \Gamma \cdot TTPAX + \delta \cdot TTCAR) \quad (8)$$

El Cuadro N° 6 muestra los valores de los coeficientes para cada modelo indicando el valor del test estadístico bajo cada guarismo y los test R^2 (ajustado) y Durbin-Watson (D-W) para las expresiones en general en las columnas de la derecha.

Cuadro N° 6
Calibración Económética

Modelo	Valor de Coeficientes							R^2 ajus	D-W
	σ	α	β	$\Gamma E-4$	$\delta E-4$	π	μ		
7	29165 0.07	12.44 2.07	11.02 0.92	0.78 1.35	0.87 0.79	1.09 6.88	0.97 20.23	0.872	1.680
8	-	12.79 3.25	11.50 1.34	0.74 1.79	0.83 0.95	1.09 8.28	0.97 22.97	0.874	1.677

La Figura N°1 muestra un gráfico en que el modelo (8) está representado por la recta y las observaciones de consumo dispersas y diferenciadas por pertenencia a los distintas zonas. La ordenada corresponde a los consumos observados. Se aprecia los mayores residuos correspondientes a las subestaciones rotatorias y los menores residuos de las subestaciones correspondientes a Zona de Silicio. Según los antecedentes gráficos y numéricos aportados se concluye el buen comportamiento del modelo (8) escogido, coeficientes robustos y bondad aceptable dada la múltiple incertidumbre en la información. Éste posee la buena característica de tener constante nula, resultó pequeña (1 % a 2 % del consumo total) y con test cercano a cero, que significa que a flujo nulo no hay consumo de electricidad. También se destaca lo apropiado de la especificación que recoge parámetros muy representativos del tráfico ferroviario eléctrico.

En el Cuadro N°7 se sintetiza la interpretación de los coeficientes de las variables mudas (RR, MM y SS); allí se compara el impacto esperado, en la columna "Cuali" sobre el consumo de energía debido a la zona en que se realiza, según visto en el Cuadro N°4, vale decir si la zona está dotada con subestaciones de mercurio, rotatorias o silicio que arbitrariamente se consideró uno (1) o base se encuentra sintetizada en el indica la calificación asociándole un valor en torno a la base con signos mucho menor (< σ), menor (<), mayor (>) y mucho mayor (> σ), dando origen a una aproximación cualitativa del coeficiente, a su vez se muestra el valor proveniente de la calibración económica dando resultados muy concordantes.

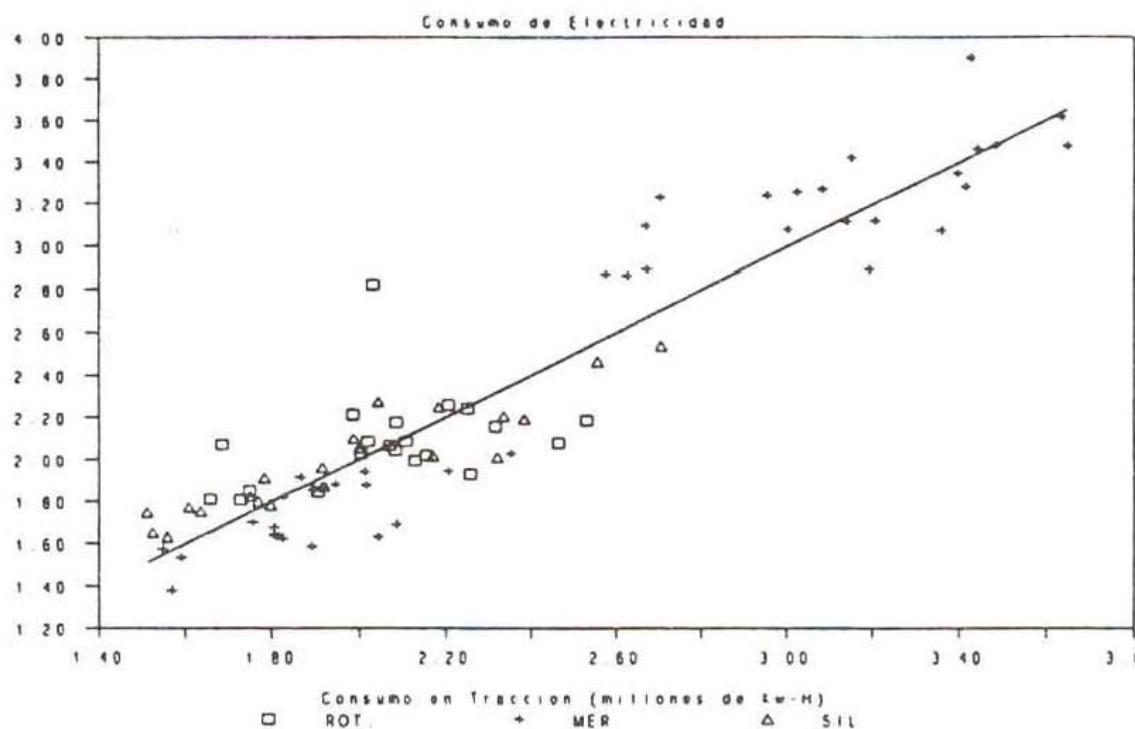


Figura N°1 Representación Gráfica del Modelo de Consumo de Electricidad.

Cuadro N° 7
Coeficientes de las Variables Mudas

Zonas	Características				Valores de Variables	
	Sub-Estación.	Trazado	Calidad Vía	Velocidad Km/hra.	Cualitativa	
					Econométrica	
Silicio	Buena 1	Medio 1	Mala 1	40 1	= 1	Base 1
Rotatoria	Mala » 1	Exigente » 1	Media < 1	60 > 1	» 1	π 1.11
Mercurio	Media > 1	Plano < 1	Buena « 1	90 » 1	= 1	μ 0.94

3.3 Modelación Económética del Consumo de Combustible Diesel.

El sistema de tracción diesel-eléctrico utilizado en los ferrocarriles coexiste con el sistema de tracción eléctrica (el carbón ya no se utiliza). No obstante, es exclusivo en aquellas zonas de la red sin electrificación. Para el suministro de combustible diesel opera un sistema administrativo centralizado en la Subgerencia de Mantenimiento, dependiente de la Gerencia de Carga de la Empresa de los Ferrocarriles del Estado (EFE), para lo cual contrata a compañías distribuidoras, quienes suministran el combustible a requerimiento de EFE en los siguientes lugares del país: San Eugenio, San Vicente, San Pedro, Barón y Los Andes. Desde estos lugares, a su vez, se provee a las locomotoras o petroleras dentro de su área de suministro, con la administración de un despachador, que cuenta con carros estanque a su disposición para la distribución. No todo el petróleo diesel que adquiere la empresa es utilizado en

la tracción de trenes, también se usa en vehículos livianos como motocarriles y autocarriles, o equipo pesado como pescantes o grúas y en las maestranzas para probar motores o lavar piezas. Las estadísticas de consumo (EFE, 1992c) se llevan en períodos mensuales por separado distinguiendo entre petróleo destinado a locomotoras y petróleo destinado a otros servicios. En general no es posible asociar el consumo a un tramo particular de la red como en el caso de la energía eléctrica, o si se consumió en plena vía o en maniobras, cuestión relevante pues se sospecha un alto consumo en patios de estaciones y mermas.

El procesamiento econométrico se desarrolló con 17 vectores correspondientes al período comprendido entre Agosto de 1990 y Diciembre de 1991. Cada uno de ellos contiene:

- Trenes Kilómetro de Carga (TRENCAR).
- Trenes Kilómetro de Pasajeros (TRENPAZ).
- Toneladas Kilómetro Brutas de Carga (TONCAR).
- Toneladas Kilómetro Brutas de Pasajeros (TONPAX).
- Consumo de petróleo diesel en locomotoras (TRACCION).
- Mes observado donde agosto de 1990 = 1 (MES).

Se utilizará las variables (9) y (10) en el análisis, pues a diferencia del caso eléctrico, las condiciones para distinguir entre convoyes de pasajeros y carga no se cumplen. En efecto, el transporte diesel en general se desarrolla en vías de deficiente estado de conservación que hace semejante el comportamiento de los dos tipos de tren. Adicionalmente, el tráfico de trenes de pasajeros es muy bajo.

$$\text{TREN} = \text{TRENPAZ} + \text{TRENCAR} \quad (9)$$

$$\text{TON} = \text{TONPAX} + \text{TONCAR} \quad (10)$$

El Cuadro N° 8 muestra los valores de la correlación entre las variables observadas que se utilizarán y de las derivadas que finalmente se utilizarán, dejando de manifiesto la inconveniencia de incluir TREN Y TON en un mismo modelo.

Cuadro N° 8
Correlaciones Entre Variables

Variables	TRACCION	TREN	TON	MES
TRACCION	1.000			
TREN	0.869	1.000		
TON	0.847	0.979	1.000	
MES	-0.074	-0.310	-0.310	1.000

La especificación de los modelos debiera ser análoga al tratamiento de los consumos de electricidad. Sin embargo, en el caso del petróleo diesel se modificarán levemente aplicando lo expuesto en el punto anterior, dando lugar a las especificaciones (11) y (12). En ambas se ha incluido la variable MES con la intención de aislar el efecto del aumento del consumo con el tiempo.

$$\text{TRACCION} = \alpha + \alpha * \text{TON} + \beta * \text{TREN} + \delta * \text{MES} \quad (11)$$

$$\text{TRACCION} = \alpha + \alpha * \text{TON} + \delta * \text{MES} \quad (12)$$

El Cuadro N°9 muestra el resultado de la calibración econométrica, indicando los test asociados a cada coeficiente y los relativos a la especificación en general. Se elige el modelo (12) más por la consistencia de los valores de sus coeficientes que por el comportamiento económico. La Figura N°2 muestra el comportamiento gráfico de dicho modelo, representado por la recta y el consumo observado en la ordenada (Agosto 1991 = 1).

Este modelo (12) presenta una característica indeseable, un término constante alto y significativo, correspondiente al 32% del consumo mensual promedio durante 1991. Con los datos disponibles no es posible explicar este término. Sólo puede aventurarse la hipótesis de que se debe al consumo en maniobras, sobre cuya magnitud no hay datos confiables. En segundo lugar llama la atención el valor y significancia del coeficiente asociado a la variable MES que obliga a su incorporación en la fórmula y cuya interpretación puede tener que ver con el aumento de operaciones no relacionadas directamente con el tráfico tales como maniobras u otros fenómenos como ineficiencias y/o mermas. Por último en cuanto al valor asociado a TON tiene semejanza con valores calculados para plena vía, que se discuten más adelante.

Cuadro N°9
Calibración Económica

Modelos	Valor de Coeficientes				R^2 ajus.	D-W
	α	α	β	δ		
11	269,400 3.81	0.523 0.22	1.978 1.29	3,719.5 1.65	0.751	1.325
12	289,860 4.11	3.482 6.86	-	4,167.9 1.84	0.739	1.194

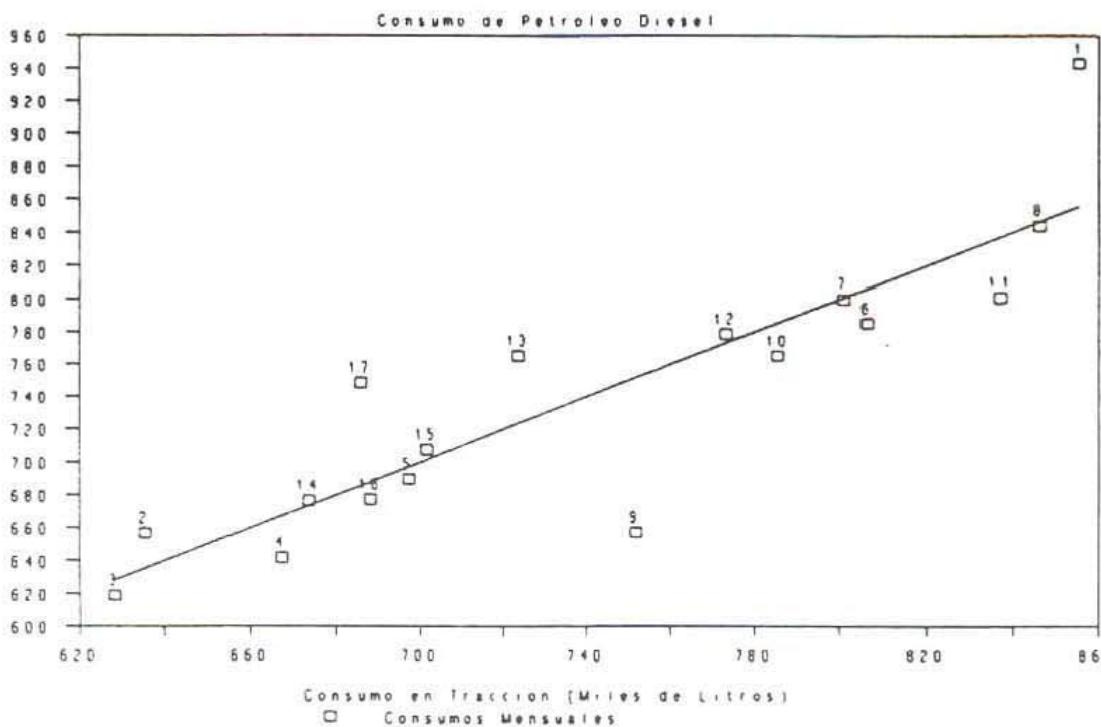


Figura N°2 Representación gráfica del modelo de Consumo de petróleo.

3.4 Consumos Marginales de Energía.

A partir de los modelos económicos especificados en (12) y (8), tratándose de petróleo o electricidad respectivamente, es posible derivar el valor de consumos marginales de energía por miles de toneladas-kilómetro brutas (MTonKM) o trenes-kilómetro (TrenKM), que se presentan en el Cuadro N°10.

Cuadro N° 10
Consumos Marginales de Energía (UE = unidad energética).

Energético	UE/UTráfico	Consumo Marginal
Petróleo	Litros/MTonKM	3.482
Electricidad Pasajeros	KWH/MTonKM	7.8E-5 * TrenKM
	KWH/TrenKM	12.79 + 7.8E-5 * MTonKM
Electricidad Carga	KWH/MTonKM	11.50 + 8.7E-5 * TrenKM
	KWH/TrenKM	8.7E-5 * MTonKM

3.5. Validación de los modelos

Con el objeto de validar parcialmente las predicciones del modelo, se ha comparado los resultados obtenidos de los modelos econométricos con los consumos obtenidos de otras fuentes.

a) Consumo Diesel.

Para efectos de la validación se ha modelado analíticamente un tren de viaje en el ramal de San Rosendo a Concepción, con la siguiente composición: una locomotora diesel-eléctrica del tipo D-18.000 con 23 carros de 15 ton. de tara y 30 ton. de carga cada uno, además de la correspondiente casita de 10 ton. sumando un total de 1,130 ton. brutas. Se procede con la velocidad máxima admisible vigente actualmente, en que la vía es mantenida precariamente. Es, previsiblemente, la menor estimación calculada, por tres razones: es un viaje sin esperas ni demoras, las cuales debieran agregar un pequeño consumo adicional en ralentí, se realiza en uno de los ramales más lentos de la red, y la estrategia de marcha, de mínimo tiempo de viaje, es obtenida rigurosamente, cuestión que un maquinista es difícil que consiga.

Para obtener la trayectoria espacio/temporal, se han usado las siguientes expresiones, que son ampliamente conocidas (Piraud, 1978; Davis, 1926):

$$F = m a + \alpha + \beta V + \gamma V^2 + (\pm i + r_c) M g \quad (13)$$

$$F \leq \min \left(\frac{P}{V}, f_a P_a \right) \quad (14)$$

$$V \leq V_M \quad (15)$$

Donde:

- F : Fuerza de tracción o esfuerzo tractor.
- m : masa corregida del tren.
- a : aceleración del convoy.
- α : coeficiente asociado al tipo de tren.
- β : coeficiente asociado al tipo de tren.
- γ : coeficiente asociado al tipo de tren.
- V : velocidad del convoy respecto del aire.
- i : pendiente (-) o gradiente (+) de la vía.
- r_c : resistencia debida a curvas.
- M : masa del tren.
- g : aceleración de gravedad (9.8 m/s^2).
- f_a : coeficiente de adherencia llanta/riel.
- P_a : peso adherente.
- V_M : velocidad permitida o máxima admisible (dictaminada por los inspectores de vía)

En el Cuadro N°11 se compara los valores de consumo de combustible diesel obtenidos en este estudio con valores provenientes de otras fuentes. Los resultados de la modelación Económica se presentan en términos de consumo marginal por tonelada-kilómetro bruta y consumo medio, no corresponde a ningún tren en particular sino al conjunto de EFE.

Se calculó el valor medio del consumo observado (Cuadro N°2) tanto por tren-kilómetro como por cada mil toneladas-kilómetro brutas (MTonKM). Por otra parte según información de funcionarios vinculados a la Gerencia de Carga de la empresa de ferrocarriles (EFE) se utiliza un valor medio de cuatro (4) litros por tren-kilómetro (TrenKM) como estimación del consumo, reconociendo que, a la luz de la experiencia, este valor varía dependiendo de las exigencias del trazado, el tamaño del tren, la potencia de la locomotora, etc. La Superintendencia de Explotación Sur (S. E. S.) realiza periódicamente análisis de readmiente de combustible diesel a partir de los cuales se obtiene un valor promedio medido en litros por tren-kilómetro (EFE, 1991a) en el entendido que cada tren es convoyado por una locomotora, diferenciando por tipo de locomotora. Para la comparación se trata del correspondiente al de las locomotoras modelo D-18000. El promedio de las dos fuentes de EFE se aproxima razonablemente al promedio de la modelación económica. Sin embargo, dado que el modelo económico posee un elevado término constante, lucen superiores al consumo marginal calculado en dicha modelación.

Cuadro N° 11
Comparación de Consumo de Petróleo Diesel

Fuente	Consumo	
	Litros/TrenKM	Litros/MTonKM
Modelación Económica:		
- Consumo Marginal	-	3.48
- Consumo Medio Observado	3.70	5.93
EFE:		
- Conocimiento Empírico	4.00	-
- Superintendencia Explotación Sur	3.28	-
Rail (Banco Mundial)	5.79	5.12
Modelación Analítica	3.10	2.75

En Rail (Banco Mundial, 1985) se utiliza una fórmula que considera el tiempo de viaje en vía libre, las demoras, el tiempo en espera, las velocidades media y máxima, la potencia, el número de locomotoras y su consumo por unidad de energía (tiempo-potencia). Para la determinación de estos parámetros se consideró los valores resultantes de la modelación analítica, por lo tanto estas estimaciones son comparables entre sí. Los valores resultantes son muy altos.

b) Consumo Eléctrico.

Interesa comparar el consumo de energía eléctrica proveniente de la modelación económica desarrollada con las asignaciones utilizadas por EFE. Para ello se aplicará ambos cálculos al tráfico de un mes promedio de 1991. El Cuadro N°12 sintetiza tanto observaciones de producción y consumo como las estimaciones provenientes de la modelación estadística y los valores asignados por EFE, los cuales están basados en estudios previos (INECON, 1980; Price Waterhouse e INECON, 1987; Camilia, 1991) que permiten a la empresa asignar consumos a distintas zonas y/o modalidades de servicio (EFE, 1992d).

La comparación de ambos cálculos (valor △) permite observar que el Modelo Económico sobreestima en un 1.1% el consumo en tracción, y EFE subestima en un 0.5%; sin embargo, hay que considerar que ambos valores no son directamente comparables, pues la estimación económica no considera el consumo en servicios auxiliares ni otros, en cambio la asignación de EFE es completa, mezclando inconsistentemente el tráfico con otros consumos.

El mismo cuadro muestra una interesante tendencia, aumento del consumo específico, por ton-km, a medida que disminuye el tamaño del tren. Por otra parte, la modelación econométrica indica que los consumos de electricidad por parte de trenes de pasajeros tienden a ser subestimados por EFE, en tanto que el consumo de los trenes de carga son sobreestimados.

Cuadro N° 12
Comparación de Producción, Consumo y Rendimientos

Fuente	Operadores			Total
	Merval	Via Sur	Carga	
Producción observada:				
Trenes-kilómetro (%)	17.41	52.63	29.96	100
Toneladas Kilómetro (%)	4.62	48.05	47.33	100
Modelación Econométrica:				
Consumo (KWH)	1,589,669	5,249,542	2,395,594	9,133,336
Participación (%)	17.21	52.63	29.96	△ = 1.1%
KWH/TrenKM	15	17	13	15
KWH/MTonKM	104	33	15	28
EFE:				
Consumo (KWH)	1,147,186	4,317,282	4,359,844	9,877,307
Participación (%)	11.68	43.94	44.38	△ = 0.5%
KWH/TrenKM	11	14	24	16
KWH/MTonKM	75	27	28	30
Peso Promedio del Tren (ton)	146	502	868	550
Otros Valores de Interés:	Analítico			Medio Observado
KWH/TrenKM	9.44			15.18
KWH/MTonKM	8.35			27.61

5. COSTOS DE ENERGIA

Se ha analizado el costo de la energía por sus implicaciones tanto en el cobro de tarifas eléctricas por consumo y por conservación y operación de infraestructura como por el cobro de petróleo puesto en locomotora a transarse entre empresa de infraestructura y operadores. Todos en pesos de 1991 y el dolar americano a 380 pesos.

El costo del petróleo se resume en el Cuadro N°13. Incluye el costo de adquisición a las empresas distribuidoras, el costo de transporte ferroviario al interior de EFE y el costo de servicio y administración del sistema de distribución.

Cuadro N° 13
Costo Promedio Final del Combustible Diesel

Ítem	Costo por litro	
	\$/litro	%
Adquisición	82.887	94.2
Transporte Promedio	2.204	2.5
Servicio y otros	2.886	3.3
Costo promedio final	87.977	100.0

El costo de la electricidad se sintetiza en el Cuadro N°14. Incluye el costo de mantenimiento y operación de las subestaciones y líneas de contacto, el costo de la potencia eléctrica demandada y la adquisición de energía. El valor del mantenimiento por tren-kilómetro resulta aproximadamente cinco veces mayor al adoptado por EFE de veinte pesos (\$ 20), en efecto aquí se ha considerado el valor de mantenimiento según consta en el Plan de Rehabilitación que es notablemente superior al mantenimiento actual.

Cuadro N° 14
Costo Medio de Electricidad

Ítem	Unidad	%
Mantenimiento y Operación Mensual	5.9	24.5
Potencia	8.1	33.6
Energía	10.1	41.9
Costo Medio del Kilowatt-hora	24.1	100.0

Con la intención de comparar el precio de los energéticos se calcula el precio de la producción a partir del rendimiento medio observado de combustible diesel y de la electricidad, según se aprecian en el cuadro N°15 los valores resultantes permiten establecer el menor precio del diesel sin embargo para comparar el precio en situaciones reales (no medias) es necesario utilizar los consumos resultantes de modelaciones sensibles a las variables de operación. Esta comparación no corresponde a una comparación de sistemas de tracción (Muñoz, 1963), puesto que para ello se requiere incluir el costo de posesión y mantenimiento del equipo tractor (Ivanovic, 1992), además del estudio de los casos específicos.

Cuadro N° 15
Comparación del Costo Medio de los Energéticos

Energético	Rendimiento y Precio	
	\$/TrenKM	\$/MTonKM
Diesel	325	521
Electricidad	366	665

6. CONCLUSIONES.

De los modelos obtenidos, el de mejor comportamiento es el de consumo de energía eléctrica. Posee constante nula que permite asegurar que sus variables representan efectivamente la producción de la empresa en cuanto a tráfico eléctrico y al modelar el consumo antes de rectificación incluye implícitamente las pérdidas en línea, el rendimiento de los rectificadores y los consumos auxiliares a bordo de los trenes.

En cambio, el modelo de consumo de petróleo diesel posee una constante muy fuerte que alcanza el 32% del consumo mensual. Se comporta estadísticamente mejor al incluir una variable temporal que indica aumento del consumo con el transcurso del tiempo y es sensible a la magnitud del producto medido solamente en miles de toneladas-kilómetro. Sin embargo el consumo marginal resulta muy parecido a valores provenientes de otras fuentes y en especial de la modelación analítica, pese a tratarse de un caso particular. Ello puede deberse a que la mayor parte de las maniobras se desarrolla con tracción diesel, exigiendo observar otras variables, de las cuales no existen valores confiables, tales como la magnitud de las maniobras, las velocidades de los convoyes en plena vía y su tara y carga reales. En consecuencia resulta urgente el desarrollo y operación de un sistema de información que permita capturar estos datos. También debe mejorarse el procesamiento de la información de tráfico, incluyendo un mayor nivel de detalle del tonelaje efectivo arrastrado y una sectorización por tramos de menor extensión. Todos estos mejoramientos, no tan sólo permitirán mejor calibración de modelos, sino también mejorar el control necesario en la operación de EFE.

A la luz del buen comportamiento de la modelación econométrica del consumo de electricidad, que da cuenta del adecuado procesamiento llevado a cabo, resulta atractivo y relativamente simple repetir la experiencia con series más largas, las cuales ya están disponibles, y/o más refinadas en el sentido espacial o temporal, de manera de perfeccionar los resultados de esta investigación.

Otro tema relevante es la calibración de ecuaciones de disipación de energía, realmente aplicables a las condiciones locales y en lo posible con sensibilidad respecto a la calidad de conservación de vías, previéndose la instrumentación de equipo motriz lo cual tendría efectos inmediatos en el control de consumo. Estos modelos debieran calibrarse de modo de reproducir los consumos observados, dado que los modelos analíticos explorados en la presente investigación tienden a subestimar los consumos reales, resultando conveniente el desarrollo de un simulador computacional para cálculo numérico de trayectorias espacio/tiempo en viajes en vía libre, para lo cual es necesario el registro computacional de la geometría de la vía para toda la red de ferrocarriles. Naturalmente, éstas son recomendaciones de los autores y corresponderá a EFE decidir en cuanto al mejor curso de acción futuro.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue principalmente financiada por la Empresa de los Ferrocarriles del Estado, por el Proyecto FONSECYT 1217-91 y por el proyecto DTI I-3092/9222 de la Universidad de Chile.

REFERENCIAS

- Araneda (1991). Estimación del Consumo de Energía Eléctrica en el Metro de Santiago Utilizando Técnicas Econométricas. Departamento de Planificación, Metro S.A. Presentación en el V Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. SOCHITRAN. Santiago de Chile.
- Banco Mundial (1985). Manual de Simulador para Evaluación de Proyectos Ferroviarios (Rail). Issued: March 29, 1985. Draft, Chapter 2, pp. 29-30.
- Camilla (1991). Consumo en Automotores y Trenes de Carga. Informes. Departamento de Ingeniería Eléctrica. P. Universidad Católica de Chile.
- CNE (1989). El Consumo de Energía en Chile. Comisión Nacional de Energía. Santiago de Chile.
- CNE (1992). Balance de Energía 1991. Comisión Nacional de Energía. Santiago de Chile.
- Davis, W. J., Jr. (1926). The tractive resistance of electric locomotives and cars. General Electric Review, 1926, Vol. 29, pp. 685-707.
- EFE (1991a). Oficios Nº 1821 (septiembre), Nº 2150 (octubre) y Nº 2241 (noviembre). Oficina de Combustibles y Lubricantes, Superintendencia de Explotación Sur, Gerencia de Carga, EFE.
- EFE (1992a). Anuario Estadístico 1991. Departamento de Estudios. Gerencia de Planificación y Control de Gestión. EFE. Santiago de Chile.
- EFE (1992b). Informes de Tráfico Mensual. Oficina Informática, Gerencia de Infraestructura. Empresa de los Ferrocarriles del Estado. Santiago de Chile.
- EFE (1992c). Informes de Consumo de Combustible Diesel. Subgerencia de Mantenimiento, Gerencia de Carga. Empresa de los Ferrocarriles del Estado. Santiago de Chile.
- EFE (1992d). Tarifas por Uso de Infraestructura. Oficio Interno Gerencia de Infraestructura..

Gálvez (1989). *Assessment of Operating Policies in Public Transport: A Comprehensive Model Applied to a Rail Service*. Tesis de doctorado. Institute for Transport Studies. School of Business and Economics Studies. University of Leeds. Inglaterra.

INECON (1980). *Análisis de Costos Ferroviarios en la red sur de los Ferrocarriles del Estado*. Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE). Santiago de Chile.

Ivanovic, Yenny (1992). *Modelación de Costos de Mantenimiento de Equipo Rodante en Ferrocarriles*. (manuscrito) Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Jara-Díaz (1984). *La nueva teoría de multiproducción en el análisis económico de sistemas de transporte*, Actas del I Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. Santiago de Chile.

Jara-Díaz, Vigouroux (1986). *Estimación de Costos Marginales en el Metro de Santiago*. Actas del IV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte. Santiago de Chile.

Muñoz Vadillo, José (1963). *Consideraciones Económicas para la Selección de Sistemas de Tracción*. Departamento de Programación. EFE. Presentación en el XI Congreso Panamericano de Ferrocarriles. México. Octubre 1963.

Piraud, Roberto (1978). *Tracción Ferroviaria*. Publicación del Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

Prado, Héctor (1992). *Plan de Rehabilitación Electrificación*. Gerencia de Infraestructura. EFE.

Price Waterhouse, INECON LTDA. (1987). *Manual del Sistema de Cálculo y Negociación de las Tarifas por Servicios Prestados entre EFE y la Filial de Pasajeros del Sur*. Informe Final. Empresa de los Ferrocarriles del Estado.

TSP International (1986). *TSP Version 4.1B. Reference Manual*. TSP International. Palo Alto, USA.

Valenzuela (1985). *El Consumo de Energía en la Estructura de Costos del Metro*. Memoria de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.