

---

---

# TRES CONTRIBUCIONES A LA INGENIERIA DE TRANSPORTE

**Instituto Mexicano del Transporte**  
**Secretaría de Comunicaciones y Transportes**

Publicación Técnica No. 116  
Sanfandila, Qro. 1998

---

**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE  
SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**

**Tres contribuciones a la ingeniería de  
transporte**

**Publicación Técnica No. 116  
Sanfandila, Qro., 1998**

---

## **Presentación**

Este trabajo fue realizado por el Ing. Alfonso Rico Rodríguez, Director General del IMT y el Dr. Alberto Mendoza Díaz, Coordinador de Seguridad y Operación del Transporte. La elaboración de este documento fue realizada por el Ing. José Luis Gutiérrez Hernández.

## **Resumen Ejecutivo.**

---

### **A.- Una Comparación Aproximada entre Costos de Operación de Rutas Tradicionales y de Modernas Autopistas**

Este trabajo tiene por objeto cuantificar los costos de operación en algunas de las autopistas que en épocas recientes se han incorporado a la Red Federal Mexicana, especialmente comparando esos costos con los que rigen en rutas libres que cubren el mismo origen y destino o, en alguna ocasión, con recorridos alternos en que se combinan tramos libres con tramos de cuota, pero formando itinerarios frecuentemente usados y que ofrecen rutas alternativas a autopistas directas. La comparación de costos se hace para automóviles, dos tipos de autobuses (B2, autobús de dos ejes y B3, autobús con eje trasero dual) y los 5 tipos de camiones de carga que transportan más del 95% de las mercancías mexicanas que se mueven por carretera (C2, C3, T3-S2, T3-S3 y T3-S2-R4). La comparación de costos se realiza para 8 casos de autopista y su ruta alternativa. La estimación de costos operativos toma en consideración la calidad de la superficie de rodamiento de las vías (en términos del Índice Internacional de Rugosidad), así como la pendiente y curvatura de los tramos que las constituyen. También considera, en el caso de los vehículos de carga, que éstos circulan dentro de las condiciones que establece el actual Reglamento de Pesos y Dimensiones.

De los cálculos efectuados se concluye que:

- La ventaja en costos de operación de la alternativa de cuota es muy variable, dependiendo de las características del tramo libre que compite y del tipo de vehículo que se considere.
- En el caso de los automóviles, el sobrecosto de no usar la alternativa de cuota puede oscilar entre un 20% hasta un 50%. Obviamente, estas diferencias no se refieren únicamente a las características técnicas de la carretera, sino que incluyen también los ahorros en longitud que ofrecen los nuevos trazos.
- Los ahorros son cualitativamente más importantes en el caso de los autobuses, para los que oscilan desde un 25% hasta prácticamente el 100% del costo operativo.
- En el caso de los camiones de carga, se tienen proporciones de ahorro menores, comparativamente hablando, en los vehículos de mayor capacidad.

---

## **B.- Una Metodología que Contribuye a la Optimización del Intermodalismo Ferrocarril-Carretera en el Transporte de Carga: el Caso de México**

Actualmente, una cantidad relativamente pequeña de carga se transporta en México por ferrocarril. Este documento proporciona una metodología para identificar las estaciones de ferrocarril con mayor potencial para atraer embarques que actualmente se mueven por autotransporte. Empieza con una muestra de los embarques de carga actualmente transportados por camiones.

En México el sistema ferroviario ha mostrado en ocasiones deficiencias de manejo que frecuentemente hacen que el servicio sea no confiable, inseguro, etc. Por esta razón, aunque en muchas situaciones la tarifa y el tiempo de servicio por ferrocarril son más bajos que por camión, los expedidores prefieren al último. El tratamiento del caso mostrado aquí asume que tales factores (fiabilidad, seguridad, etc.) mejorarían, en parte como un resultado del proceso de privatización que actualmente se produce en los ferrocarriles. La metodología propuesta se basa en cuantificar los flujos de carga en las estaciones de ferrocarril a través de las cuales podría ocurrir la atracción de dichos embarques.

Este trabajo apunta a una participación alentadora del ferrocarril en la búsqueda de un sistema nacional de transporte intermodal más equilibrado.

## **C. Ampliaciones Requeridas en Curva para algunas Configuraciones Modernas de Carga (Consideraciones mexicanas).**

El propósito de este trabajo es llegar a valores específicos de anchos demandados por algunos vehículos de carga modernos, en curvas con características dadas. El trabajo básicamente toma en cuenta las combinaciones de tractor y semirremolque debido a su impacto crítico en los aspectos discutidos aquí dentro.

Se consideran tres efectos en el trabajo: el desplazamiento del centro del eje trasero del semirremolque con respecto al centro del eje delantero del tractor debido a la configuración geométrica adoptada por el vehículo cuando toma una curva a baja velocidad (desplazamiento entre ejes a baja velocidad); el efecto del componente del peso del vehículo hacia el centro de la curva como un resultado de la sobre-elevación (efecto de la sobre-elevación); y el efecto centrífugo debido a la inercia del vehículo mientras toma la curva a una velocidad alta (desplazamiento entre ejes a alta velocidad).

Se presenta una descripción breve de los modelos seleccionados para predecir los efectos referidos anteriormente. Se hace una aprobación de los valores de

## **Abstract.**

---

### **A An Approximate Comparison of Vehicle Operating Costs between Traditional Routes and Modern Toll Freeways**

This work is aimed at quantifying vehicle operating costs (VOC) on some of the toll freeways that have been constructed recently in Mexico, and compare such costs with those that are incurred by vehicles on heavily used traditional (mainly free) alternatives. The VOC comparison is carried out for automobiles, two bus types (B2, a bus with two axles and B3, a bus with a rear dual tandem axle) and the 5 truck types that haul 95% of the merchandise transported in Mexico (C2, C3, T3-S2, T3-S3 y T3-S2-R4). The VOC comparison is conducted for 8 cases of toll freeway and its corresponding alternative. The VOC estimation considers the quality of pavement surface (in terms of the International Roughness Index), and the grade and curvature of the composing segments of the roads. In the case of freight vehicles, it is considered that these comply with current truck size and weight regulations. From the effected calculations, the following can be concluded:

- The VOC advantage of toll freeways is quite variable, depending on the vehicle type considered and the particular characteristics of the competing alternative.
- In the case of automobiles, the extra cost associated with not using the toll freeway ranges between 20% and 50%. Obviously, these savings refer not only to the technical advantages of the toll alternative (better pavement condition, lower grades, etc.) but also to shorter journeys through it.
- The savings are more important in the case of buses, ranging from 25% to 100%.
- In the case of trucks, the savings are proportionally lower for larger vehicles.

### **B Methodology which Contributes to the optimization of Railroad-Highway Intermodalism in Cargo Transport: The Case of Mexico.**

A minimal amount of freight is currently transported in Mexico by rail. This paper provides a methodology for identifying the railroad stations with greater potential for attracting shipments that are currently moved by motor transport. It begins with a sample of the cargo shipments presently carried by trucks.

In Mexico, the railroad system shows management deficiencies that make frequently the service be unreliable, unsafe, etc. For this reason, though in most

---

situations the rate and service time by railroad are lower than by truck, the shippers prefer the latter. The approach of the case shown herein is to assume that such factors (reliability, safety, security, etc.) would improve, partly as a result of the privatization process currently taking place for railroads. Such an improvement would cause the attraction to railroad of the shipments for which the combined cost for rate and service time by railroad is lower than by truck. The proposed methodology is based on quantifying the cargo flows on the railroad stations through which those attracted shipments would occur.

This work aims at encouraging railroad participation in the search for a more balanced national intermodal transportation system.

### **C. Required Highway Curve Widenings for Some Modern Freight Vehicles (Mexican Considerations)**

The purpose of this paper is to arrive at specific widening values demanded by some modern freight vehicles at circular curves with given characteristics. The work basically takes into account combinations of tractor and semitrailer vehicles because of their critical impact in the issues discussed herein.

Three effects are considered in the work: the displacement of the center of the rear semitrailer axle with respect to the center of the tractor front axle because of the geometric configuration adopted by the vehicle when negotiating a curve at low speed ("low-speed offtracking"); the effect of the component of the vehicular weight toward the center of the curve as a result of the superelevation ("superelevation effect"); and the centrifugal effect due to the inertia of the vehicle while negotiating the curve at a high speed ("high speed offtracking").

A brief description is presented herein of the models selected for predicting the effects referred to earlier. A validation is made of the offtracking values obtained from these models, based on the results of a series of field tests. The widenings are calculated for a series of conditions likely to be encountered on the highways. A comparison is made between the values thus generated and the enforced Mexican and American standards. The work regards exclusively to rural two-lane two-way roads.

# Indice

---

Página

Indice .....	IX
<b>A.- Una Comparación Aproximada entre Costos de Operación de Rutas Tradicionales y de Modernas Autopistas</b>	
I INTRODUCCIÓN.....	1
II RUTAS CONSIDERADAS.....	1
III COMENTARIOS.....	7
<b>B.- Una Metodología que Contribuye a la Optimización del Intermodalismo Ferrocarril-Carretera en el Transporte de Carga: el Caso de México.</b>	
I INTRODUCCION.....	9
II METODOLOGÍA.....	10
III ESTRUCTURA DE COSTO DEL TRANSPORTE POR CAMIÓN Y FERROCARRIL.....	14
IV CRITERIO DE SELECCIÓN DEL MODO.....	16
V UN EJEMPLO DE APLICACIÓN.....	17
VI CONCLUSIONES.....	18
VII RECONOCIMIENTOS.....	24
VIII REFERENCIAS.....	24
<b>C. Ampliaciones Requeridas en Curva para algunas Configuraciones Modernas de Carga (Consideraciones Mexicanas).</b>	
I INTRODUCCIÓN.....	25
III MODELOS SELECCIONADOS.....	26
IV PROGRAMA AUTOTURN.....	26

---

V	MODELO BERNARD Y VANDERPLOEG.....	30
VI	MODELO GLAUZ Y HARWOOD.....	32
VII	CALIBRACIÓN.....	32
VIII	PRIMERA SERIE DE PRUEBAS DE CAMPO.....	33
IX	SEGUNDA SERIE DE PRUEBAS DE CAMPO.....	36
X	CALCULO DE LA ANCHURA TOTAL DE CURVA EN CARRETERAS.....	40
XI	CONCLUSIONES.....	43
XII	REFERENCIAS.....	44

## **A.- Una Comparación Aproximada entre Costos de Operación de Rutas Tradicionales y de Modernas Autopistas**

---

### **I INTRODUCCIÓN.**

El objetivo de este trabajo es cuantificar los costos de operación en algunas de las autopistas que en épocas recientes se han incorporado a la Red Federal Mexicana, especialmente comparando esos costos con los que rigen en rutas libres que cubren el mismo origen y destino o, en alguna ocasión, con recorridos alternos en que se combinan tramos libres con tramos de cuota, pero formando itinerarios frecuentemente usados y que ofrecen rutas alternativas a autopistas directas.

En el trabajo se analizan las condiciones de 8 autopistas de cuota, comparando el costo de viaje con los recorridos alternos más usuales.

La comparación de costos se hace para automóviles, dos tipos de autobuses (B2, autobús de dos ejes y B3, autobús con eje trasero dual) y los 5 tipos de camiones de carga que transportan más del 95% de las mercancías mexicanas que se mueven por carretera. Estos vehículos son:

- C2        Camión de 2 ejes.
- C3        Camión de eje sencillo delantero y eje tandem trasero.
- T3-S2    Vehículo articulado con tractor de 2 ejes, sencillo el delantero y tandem el trasero y con semirremolque con eje trasero tandem.
- T3-S3    Análogo al anterior en arreglo general, pero con el eje trasero del senirremolque, tridem.
- T3-S2-R4 Vehículo con tractor, semirremolque y remolque; los dos primeros elementos análogos a un T3-S2 y un remolque con dos ejes tandem.

### **II RUTAS CONSIDERADAS.**

Las comparaciones de costos involucran a las siguientes autopistas:

- México-Guadalajara, con 511 km.
- León-Aguascalientes; con 116 km.
- Monterrey-Nuevo Laredo; con 171 km.
- México-Veracruz; con 409 km.
- México-Puebla; con 111 km.

- Puebla-Oaxaca; con 307 km.
- La Tinaja-Cosoleacaque; con 230 km.
- Mazatlán-Las Brisas; con 312 km.

Los tramos libres que se compararon son:

- México-Guadalajara, por Mil Cumbres, con 608 km.
- México-Guadalajara, vía Querétaro, La Piedad-Zapotlanejo; con 577 km.
- León-Aguascalientes, vía larga de Moreno; con 126 km. .
- Monterrey-Nuevo Laredo, por Ciénega de Flores; con 236 km.
- México-Veracruz, por Jalapa; con 446 km.
- México-Puebla; con 128 km.
- Puebla-Oaxaca; con 425 km.
- La Tinaja-Cosoleacaque, por Acayucan; con 264 km.
- Mazatlán-Las Brisas, Vía Culiacán; con 354 km.

Para todas las autopistas de cuota se consideró una calidad de rodamiento correspondiente a un Índice Internacional de Rugosidad de 3.50, probablemente razonable dado lo reciente de la construcción y el cuidado que se tiene con su conservación. Las pendientes medias tomadas en cuenta en cada una de las autopistas analizadas figuran en la Tabla A1.

La información sobre las longitudes y los trazos de estas carreteras fue proporcionada por la Unidad de Autopistas Concesionadas de la SCT.

Por el contrario, en los tramos libres que se usaron en las comparaciones de costos, se utilizó información detallada proporcionada en gran parte por la Dirección General de Conservación de la SCT, señalando la condición de rodamiento superficial y la situación en cuanto a pendiente de un conjunto de subtramos, valores que en cada caso se ponderaron con respecto a las longitudes parciales, para llegar a un promedio ponderado total que aspira a representar razonablemente el Índice Internacional de Rugosidad medio y un valor también promedio de la pendiente que pueda considerarse representativa.

Tanto para las autopistas como para los tramos libres alternativos se tomaron en cuenta, adicionalmente, las velocidades de operación normal del flujo vehicular pesado en las condiciones prevalecientes, cuya influencia en los costos operativos es menos significativa para los rangos reales de operación, pero no despreciable

La misma Tabla A1 proporciona la información adoptada para los tramos libres o mixtos, tanto en coeficiente internacional de rugosidad como en pendiente media y velocidad de operación.

Considerando los índices internacionales de rugosidad, las pendientes y las velocidades que se tienen en cada caso, se pudieron calcular los costos por kilómetro para automóviles, autobuses y diferentes vehículos de carga, de donde salieron los costos totales de operación para cada tipo de vehículo en los diferentes recorridos.

En todos los casos de vehículos de carga se supone que circulan dentro del actual Reglamento de Pesos y Dimensiones.

La Tabla A2 resume la información de costos operativos a la que se llegó.

La Tabla A3 presenta los costos operativos relativos de los diferentes tipos de vehículos considerados, asignando un valor unitario a los costos en los recorridos de cuota y el coeficiente correspondiente que resultó siempre mayor que 1, para los recorridos que se comparan con las nuevas autopistas.

Tabla A1 Parámetros Considerados para el Cálculo de Costos de Operación para Alternativas Libre y de Cuota

Corredor	Longitud. Km	Velocidad								INDICE INTERNACIONAL DE RUGOSIDAD	PENDIENTE
		Kilómetros / Hora									
		A	B2	B3	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2-R4		
MEXICO-GUADALAJARA (Via Mil Cumbres)	608	70.00	70.00	70.00	60.00	70.00	65.00	65.00	60.00	5.00	4.60
MEXICO-GUADALAJARA (Via Querétaro-La Piedad)	577	95.00	80.00	80.00	95.00	75.00	80.00	80.00	75.00	4.50	3.00
MEXICO-GUADALAJARA (Cuota)	511	105.00	90.00	90.00	105.00	85.00	90.00	90.00	85.00	3.50	2.00
LEON-AGUASCALIENTES (Via Lagos)	126	70.00	70.00	70.00	70.00	60.00	65.00	65.00	60.00	5.50	1.00
LEON-AGUASCALIENTES (Cuota)	116	95.00	80.00	80.00	95.00	75.00	80.00	80.00	75.00	3.50	0.50
MONTERREY-NUOVO LAREDO (Via Ciénega)	236	90.00	90.00	90.00	90.00	80.00	85.00	85.00	80.00	6.50	1.00
MONTERREY-NUOVO LAREDO (Cuota)	171	100.00	90.00	90.00	100.00	80.00	85.00	85.00	80.00	3.50	0.50
MEXICO-VERACRUZ (Via Xalapa)	446	80.00	80.00	80.00	80.00	70.00	75.00	75.00	70.00	6.50	3.50
MEXICO-VERACRUZ (Cuota)	409	90.00	80.00	80.00	90.00	75.00	75.00	75.00	75.00	3.50	2.50
MEXICO-PUEBLA	128	75.00	70.00	70.00	75.00	60.00	65.00	65.00	60.00	6.00	3.00
MEXICO-PUEBLA (Cuota)	111	105.00	90.00	90.00	105.00	85.00	90.00	90.00	85.00	3.50	2.00
PUEBLA-OAXACA	425	65.00	65.00	65.00	65.00	55.00	60.00	60.00	55.00	7.00	2.00
PUEBLA-OAXACA (Cuota)	307	80.00	75.00	75.00	80.00	70.00	70.00	70.00	70.00	3.50	1.50
LA TINAJA-COSOLEACAQUE (Via Tuxtepec-Acayucan)	264	70.00	70.00	70.00	70.00	60.00	65.00	65.00	60.00	7.50	1.80
LA TINAJA-COSOLEACAQUE (Cuota)	230	90.00	80.00	80.00	90.00	75.00	75.00	75.00	75.00	3.50	1.50
MAZATLAN-LAS BRISAS (Via Culiacan)	354	75.00	70.00	70.00	75.00	60.00	65.00	65.00	65.00	4.50	4.00
MAZATLAN-LAS BRISAS (Cuota)	312	90.00	80.00	80.00	90.00	75.00	85.00	85.00	75.00	3.50	2.50

Tabla A2 Costos de Operación para Alternativas Libre y de Cuota en los Diferentes Corredores por tipo de Vehículo

Corredor	Longitud Km.	Costo por Kilómetro										Costo Total en el Corredor									
		Dólares E.U.A.					Dólares E.U.A.					Dólares E.U.A.					Dólares E.U.A.				
		A	B2	B3	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2	T3-S3	T3-S2	T3-S3	A	B2	B3	C2	C3	T3-S2	T3-S3	T3-S2	T3-S3
MEXICO-GUADALAJARA (Via Mil Cumbres)	608	0.30	0.84	0.89	0.69	0.88	1.50	1.56	1.95	1.95	182.38	512.55	538.88	422.15	535.76	909.41	949.27	1187.69			
MEXICO-GUADALAJARA (Via Querétaro-La Piedad)	577	0.26	0.66	0.69	0.53	0.71	1.22	1.29	1.63	149.00	382.17	399.74	304.14	406.80	706.20	742.96	940.91				
MEXICO-GUADALAJARA (Cuota)	511	0.24	0.51	0.54	0.41	0.59	1.04	1.11	1.44	123.84	262.29	274.84	211.76	303.01	533.47	567.93	735.86				
LEON-AGUASCALIENTES (Via Lagos)	126	0.30	0.64	0.65	0.56	0.72	1.19	1.25	1.55	38.09	81.24	82.36	71.05	91.03	149.82	156.9	195.88				
LEON-AGUASCALIENTES (Cuota)	116	0.25	0.50	0.50	0.40	0.57	0.97	1.04	1.35	29.34	57.59	58.51	46.90	66.30	112.95	120.55	156.59				
MONTERREY-NUOVO LAREDO (Via Ciénega)	236	0.27	0.49	0.51	0.46	0.64	1.08	1.14	1.46	64.34	116.30	120.14	109.73	149.95	255.16	269.87	344.03				
MONTERREY-NUOVO LAREDO (Cuota)	171	0.25	0.42	0.43	0.38	0.55	0.95	1.01	1.33	42.30	72.12	74.19	65.02	94.26	161.87	173.43	227.01				
MEXICO-VERACRUZ (Via Xalapa)	446	0.29	0.71	0.75	0.62	0.80	1.37	1.43	1.79	128.47	318.31	334.17	275.30	356.46	609.24	637.34	798.10				
MEXICO-VERACRUZ (Cuota)	409	0.26	0.62	0.64	0.48	0.66	1.17	1.24	1.54	105.96	252.78	263.29	196.82	268.33	480.40	506.6	629.49				
MEXICO-PUEBLA	128	0.29	0.77	0.80	0.66	0.83	1.39	1.45	1.80	37.64	98.62	102.28	84.09	106.46	177.91	185.56	230.62				
MEXICO-PUEBLA (Cuota)	111	0.24	0.51	0.54	0.41	0.59	1.04	1.11	1.44	26.90	56.97	59.70	46.00	65.82	115.88	123.37	159.84				
PUEBLA-OAXACA	425	0.32	0.77	0.79	0.67	0.84	1.37	1.43	1.76	136.16	238.34	335.91	286.52	357.13	582.63	606.23	747.51				
PUEBLA-OAXACA (Cuota)	307	0.27	0.60	0.62	0.47	0.64	1.12	1.18	1.47	83.83	184.63	189.26	144.59	195.94	345.12	363.73	451.64				
LA TINAJA-COSOLEACAQUE (Via Tuxtepec-Acayucan)	264	0.31	0.72	0.73	0.63	0.80	1.32	1.37	1.70	82.07	188.87	193.43	167.64	211.58	348.11	362.94	449.15				
LA TINAJA-COSOLEACAQUE (Cuota)	230	0.26	0.56	0.58	0.44	0.61	1.09	1.15	1.44	59.57	128.69	132.57	102.10	141.33	250.74	265.11	331.97				
MAZATLAN-LAS BRISAS (Via Cullacán)	354	0.29	0.81	0.84	0.66	0.84	1.42	1.49	1.84	101.81	284.99	298.24	233.48	297.27	504.20	526.53	641.80				
MAZATLAN-LAS BRISAS (Cuota)	312	0.26	0.62	0.64	0.48	0.66	1.14	1.21	1.54	80.83	192.83	200.85	150.14	204.69	356.22	376.28	480.20				

Tabla A3 Costos de Operación Relativos para Alternativas Libre y de Cuota en los Diferentes Corredores por tipo de Vehículo

Corredor	Costo Relativo por Kilómetro						Costo Relativo Total en el Corredor							
	A	B2	B3	C2	C3	T3-S2 T3-S3	A	B2	B3	C2	C3	T3-S2 T3-S3	T3-S2-R4	
	Dólares E.U.A						Dólares E.U.A							
MEXICO-GUADALAJARA (Via Mil Cumbres)	1.24	1.64	1.65	1.68	1.49	1.43	1.47	1.95	1.96	1.99	1.77	1.70	1.67	1.61
MEXICO-GUADALAJARA (Via Querétaro-La Piedad)	1.07	1.29	1.29	1.27	1.19	1.17	1.20	1.46	1.45	1.44	1.34	1.32	1.31	1.28
MEXICO-GUADALAJARA (Cuota)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LEON-AGUASCALIENTES (Via Lagos)	1.20	1.30	1.30	1.39	1.26	1.22	1.30	1.41	1.41	1.51	1.37	1.33	1.30	1.25
LEON-AGUASCALIENTES (Cuota)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
MONTERREY-NUOVO LAREDO (Via Ciénega)	1.10	1.17	1.17	1.22	1.15	1.14	1.52	1.61	1.62	1.69	1.59	1.58	1.56	1.52
MONTERREY-NUOVO LAREDO (Cuota)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
MEXICO-VERACRUZ (Via Xalapa)	1.11	1.15	1.16	1.28	1.22	1.16	1.21	1.26	1.27	1.40	1.33	1.27	1.26	1.27
MEXICO-VERACRUZ (Cuota)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
MEXICO-PUEBLA	1.22	1.50	1.49	1.59	1.40	1.33	1.40	1.73	1.71	1.83	1.62	1.54	1.50	1.44
MEXICO-PUEBLA (Cuota)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
PUEBLA-OAXACA	1.17	1.28	1.28	1.43	1.32	1.22	1.62	1.78	1.77	1.98	1.82	1.69	1.67	1.66
PUEBLA-OAXACA (Cuota)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
LA TINAJA-COSOLEACAQUE (Via Tuxtpec-Acayucan)	1.20	1.28	1.27	1.43	1.30	1.21	1.38	1.47	1.46	1.64	1.50	1.39	1.37	1.35
LA TINAJA-COSOLEACAQUE (Cuota)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
MAZATLAN-LAS BRISAS (Via Culiacan)	1.11	1.30	1.31	1.37	1.28	1.25	1.26	1.48	1.48	1.556	1.45	1.42	1.40	1.34
MAZATLAN-LAS BRISAS (Cuota)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

### III COMENTARIOS.

Si se consideran los costos relativos en los corredores completos que se comparan con el tramo de cuota correspondiente, pueden hacerse algunos comentarios de carácter general:

- La ventaja en costos de operación de la alternativa de cuota es muy variable, dependiendo de las características del tramo libre que compite y del tipo de vehículo que se considere.

En el caso de los automóviles, el sobre costo de no usar la alternativa de cuota puede oscilar entre un 20% hasta un 50%. Obviamente, estas diferencias no se refieren únicamente a las características técnicas de la carretera, sino que incluyen también los ahorros en longitud que ofrecen los nuevos trazos.

Los ahorros son cualitativamente más importantes en el caso de los autobuses, para los que oscilan desde un 25% hasta prácticamente el 100% del costo operativo.

- En el caso de los camiones de carga, se tienen proporciones de ahorro menores, comparativamente hablando, en los vehículos de mayor capacidad. De confirmarse esta tendencia en todas las comparaciones entre carretera de cuota y alternativas libres, pudiera pensarse en una política de cuotas que beneficiase a las grandes combinaciones vehiculares, que de alguna manera resultan ventajosas para la operación conjunta del transporte nacional. Como no puede menos de suceder, los costos son muy sensibles a la pendiente.
- Debe notarse que las carreteras más modernas tienen ciertas ventajas no consideradas en este escrito, tales como las que emanan de la seguridad, comodidad, tiempos de recorrido y otras.

## B.- Una Metodología que Contribuye a la Optimización del Intermodalismo Ferrocarril-Carretera en el Transporte de Carga: el Caso de México.

### I INTRODUCCION.

La Tabla B1 muestra la distribución modal en el transporte de carga terrestre en México entre la carretera y el ferrocarril (1997). Los datos usados en preparar esta tabla provienen, en el caso del autotransporte, de información recabada en estaciones de exploración establecidas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) en las carreteras del país, como parte del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional [1,2]. En el caso del ferrocarril, la información viene de Ferrocarriles Nacionales de México (FNM) [3]. Ambos tipos de información se refieren a los embarques de carga llevados a cabo por cada modo durante el período de un año. Esta información permitió la generación de una matriz origen-destino (O-D) para cada modo, de acuerdo con una división del país en 517 zonas.

Las últimas dos columnas de la Tabla B1 se refieren a los pares O-D identificados para cada modo. Del total de pares identificados (19,257), el autotransporte registró carga en 95% de ellos (66.6% por camión exclusivamente y 28.4% en combinación con el ferrocarril). El transporte ferroviario registró carga en 33.4% de los pares.

La Tabla muestra el tonelaje total y el valor de la carga movida diariamente por ambos modos para los diferentes casos observados. La distribución global de tonelaje terrestre es 88.9% por autotransporte y 11.1% por ferrocarril. Del valor económico total de las mercancías, 93.5% es efectuado por camión y 6.5% por ferrocarril. Considerando sólo los pares en el que ambos modos registraron carga, la distribución global de tonelaje es 83.6% por camión y 16.4% por ferrocarril; en cuanto al valor de las mercancías, la distribución es 91.2% y 8.8% respectivamente.

Tabla B1 **Distribución Modal en México del Transporte de Carga por Tierra (1977).**

Casos	Tonelaje		Valor de la Carga		Pares O-D	
	(ton/día)	%	(\$10 <sup>6</sup> /día)	%	Nº	%
Sólo servicios de ferrocarril	15,012	1.2	13.0	0.6	963	5.0
Sólo servicios de Carretera	498.252	38.5	682.3	32.5	12,822	66.6
Ambos Servicios						
Ferrocarril	127.728	9.9	123.4	5.9	5,472	28.4
Carretera	652 432	50.4	1,282.3	61.0	"	"
<b>Total</b>	<b>1,293.424</b>	<b>100.0</b>	<b>2,101.0</b>	<b>100.0</b>	<b>19,257</b>	<b>100.0</b>

Estos números muestran que la cantidad de carga transportada por ferrocarril en México es baja. Varias causas relacionadas con el manejo de este servicio, ahora en proceso de ser privatizado, son las razones de esta escasa participación [4].

Este trabajo apunta a incrementar la participación del ferrocarril en busca de un sistema de transporte nacional mejor equilibrado. Parte del desequilibrio entre el ferrocarril y camión observado en México, es obligada debido a la falta de servicio de ferrocarril en varias zonas del país.

La metodología propuesta se basa en un análisis comparativo del costo de transportar por camión cada uno de los embarques considerados contra el costo que se podría obtener a través de la alternativa férrea más conveniente (intermodalismo). Una mejoría del servicio ferroviario mejoraría sus posibilidades entre las exigencias de los potenciales usuarios de sus servicios. Tal mejora causaría la atracción al ferrocarril de los embarques para los que el costo combinado de tarifa y tiempo de servicio por ferrocarril es más bajo que por camión. La metodología propuesta se basa en cuantificar los flujos de carga en las estaciones de ferrocarril para los embarques que podrían ser atraídos.

## II METODOLOGÍA.

Los autores creen que el costo total es la consideración principal para seleccionar un modo de transporte por parte de los expedidores. Incluida en esta evaluación, sin embargo, hay muchos costos parciales relacionados con consideraciones muy diferentes que son difíciles de estimar en un análisis teórico (fiabilidad, puntualidad, garantía, etc.). Estos costos son frecuentemente casuísticos y dependen de factores de una muy variada clase.

En este trabajo se asume que los expedidores seleccionan los medios menos costosos de transporte. La fuente de información inicial para el análisis propuesto, es una base de datos de embarques de carga llevados a cabo por camión durante un período específico. En el ejemplo de México mostrado aquí, tal período es un día.

Para cada uno de los embarques en la base de datos, se asume que existen dos alternativas de transporte (ver Figura B1):

- *Alternativa 1.* Esta opción se refiere al transporte de bienes por camión. En esta alternativa el servicio se asume desde las instalaciones del consignador (origen de la carga) a las del consignatario (destino de la carga); es decir, se asume un servicio "puerta a puerta" para esta alternativa.
- *Alternativa 2* Esta opción se refiere al transporte de mercancía por ferrocarril. Además del transporte por ferrocarril entre las estaciones del ferrocarril iniciales y finales, esta alternativa requiere que inicialmente la carga sea transportada desde su punto de origen a la estación inicial de ferrocarril y de la vía férrea final a su punto de destino. Estas dos

distancias normalmente se llevan a cabo por camión. Se asume también que el servicio es "puerta a puerta" para esta alternativa. En esencia, esta opción es una alternativa intermodal.

Se asume que para ambas opciones de transporte, se llevan a cabo los embarques por los tramos más importantes de la Red de Carreteras Nacional y la Red de Ferrocarril. Estos tramos normalmente son conocidos como Redes Básicas. La longitud de la Red de Caminos Básica es de aproximadamente 50,000 Km. Mientras que para la Red Básica de Ferrocarriles es aproximadamente 17,700 Km. [5]. Estos tramos son los de mejores características geométricas y capacidad y por la misma razón, llevan la mayor parte del tráfico en el país [5].

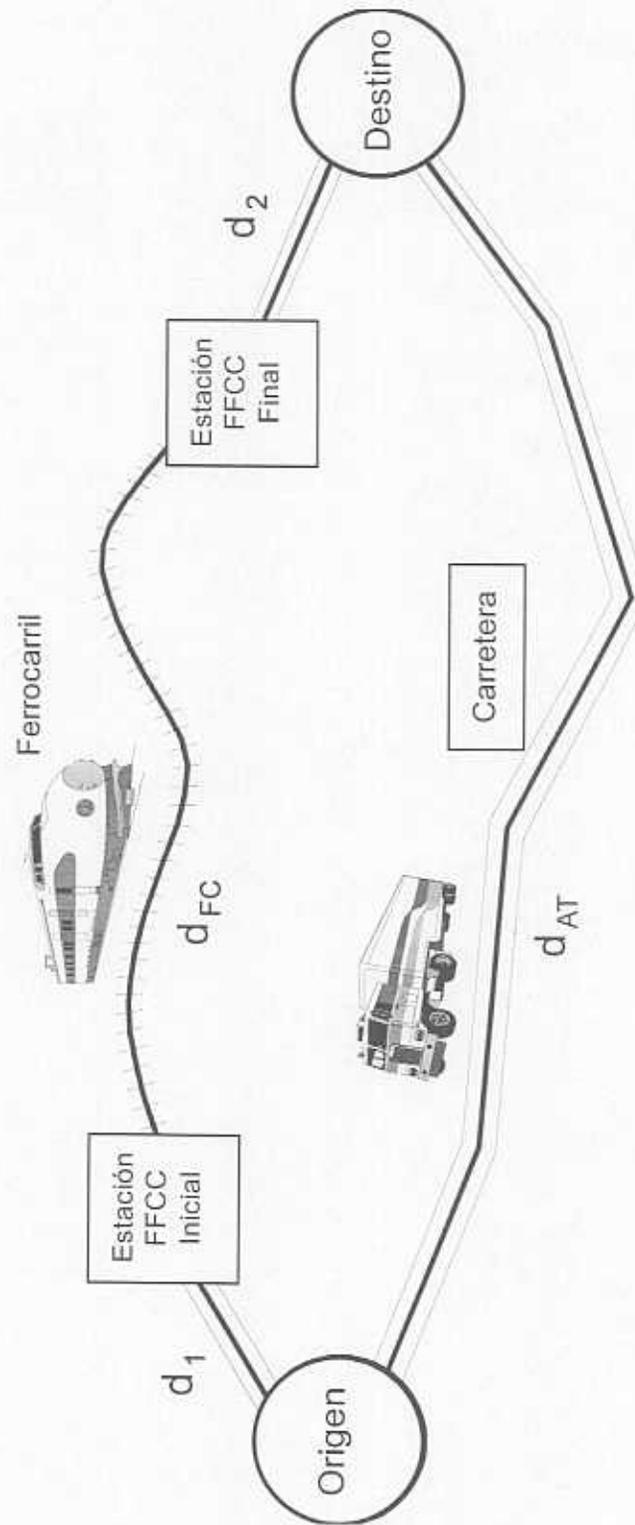


Figura B1. Opciones de Transporte Consideradas

### III ESTRUCTURA DE COSTO DEL TRANSPORTE POR CAMIÓN Y FERROCARRIL.

Para los movimientos puerta a puerta por camión, se considera una tarifa por tonelada más el costo de oportunidad causado por el tiempo que la mercancía está en tránsito y no en el mercado. Este costo puede ser expresado por la siguiente relación:

$$C_{AT} = T_{AT} + (t_{AT} \cdot r \cdot V) \quad (1)$$

Donde:

- $C_{AT}$  es el costo de esta alternativa, por tonelada.
- $T_{AT}$  es la tarifa del camión para el embarque considerado, por tonelada.
- $t_{AT}$  es el tiempo del viaje;
- $r$  es el costo de oportunidad real de capital, en %; y
- $V$  es el valor por tonelada métrica de la carga movida.

En el caso de México, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) proporciona la ecuación siguiente para el promedio nacional global de operaciones de autotransporte [6]:

$$T_{AT} = 6.0 + 0,025 d_{AT} \quad (2)$$

Donde:

- $T_{AT}$  tiene el mismo significado que el expresado anteriormente, en dólares por tonelada
- $d_{AT}$  es la distancia de la operación de transporte especificada, en Km.

El número 6 indica dólares por tonelada.

- El valor de  $r$  es aproximadamente 5% en México.
- Como se mencionó anteriormente, la base de datos de embarques por camión usada en México viene del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional [1,2]. En este estudio la información es recogida por interrogatorio al chófer de cada camión circulante por las estaciones de exploración instaladas durante las 24 horas de cuatro días consecutivos (martes a viernes), en lugares específicos de la Red Federal de Carreteras, acerca del origen y destino de su viaje, el tipo de carga transportada y otros datos pertinentes. La carga es registrada en el campo con suficiente descripción, pero en el proceso de los datos se clasifica según un sistema de más de cien tipos de productos, proporcionado por la Secretaría de Comercio (SECOFI). Con base en la información en este sistema se determina el valor unitario de cada tipo de producto en el mercado

internacional. De esta manera, es posible evaluar el valor monetario de la carga (V) para cada uno de los embarques considerados.

En el caso de la alternativa ferroviaria, el costo, incluidos aspectos intermodales, se puede expresar como:

$$C_{FC} = T_1 + T_2 + T_{FC} + T_T + [(t_1 + t_2 + t_{FC})r V] \quad (3)$$

donde:

- $C_{FC}$  es el costo de esta alternativa, por tonelada.
- $T_1$  y  $T_2$  son, respectivamente, las tarifas por tonelada que se paga generalmente por autotransporte, por mover carga desde su punto de origen a la estación de ferrocarril inicial y de la estación de ferrocarril final al lugar donde se recibe.
- $T_{FC}$  es la tarifa por tonelada para el tramo de ferrocarril involucrado.
- $T_T$  es el cargo por manipulación de carga en las estaciones de ferrocarril inicial y final (incluso carga y descarga entre modos y almacenamiento), por tonelada.
- $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_{FC}$  son los tiempos por autotransporte ( $t_1$  y  $t_2$ ) y por ferrocarril ( $t_{FC}$ ) durante los cuales la mercancía está fuera del mercado;  $t_{FC}$  puede incluir demoras en las estaciones de ferrocarril iniciales, intermedias y finales (relacionados con el despacho, reparto y recolección de la carga).
- $r$  y  $V$  tienen el mismo significado expresado en la Ecuación 1.

La Dirección General de Tarifas y Transporte Multimodal de la SCT proporcionó las formas generales para evaluar estos costos [6].

- $T_1$  y  $T_2$  pueden ser evaluadas ingresando  $d_1$  o  $d_2$ , respectivamente, en la Ecuación 2 (ver Figura B1).
- $T_{FC}$  se puede calcular mediante:

$$T_{FC} = 3.89 + 0.016d_{FC} \quad (4)$$

donde:

$d_{FC}$  es la distancia recorrida por ferrocarril.

- En México  $T_T$  tiene un valor promedio de 2 dólares por tonelada para propósitos de análisis general.
- Los tiempos  $t_{AT}$ ,  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_{FC}$  se calculan en México asumiendo una velocidad comercial de 55 Km./h para autotransporte y de 25 Km./h para ferrocarril [6]. En el caso del ferrocarril, se aumentan 72 horas al tiempo de viaje

obtenidas de la velocidad comercial anterior, para considerar retrasos debido a despacho, reparto y entrega de la carga en las estaciones del ferrocarril iniciales y finales. La cifra anterior es un valor del retraso típico [6].

- Los valores de  $r$  y  $V$  son los mismos que en el autotransporte.

Para cada uno de los embarques considerados, las distancias por carretera  $d_{AT}$ ,  $d_1$  y  $d_2$  y la distancia del ferrocarril  $d_{FC}$  se obtuvieron de mapas desarrollados por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) mediante un estudio de campo de la Red Básica llevado a cabo con Sistemas del Posicionamiento Global (GPS) [7].

Las ecuaciones 1 y 3 no incluyen aquellos costos que son difíciles de evaluar (relacionados con fiabilidad, puntualidad, seguridad, etc.) porque se considera que para la nueva privatización ferroviaria mexicana, las condiciones de tales factores pueden tender a igualarse en ambas alternativas.

#### IV CRITERIO DE SELECCIÓN DEL MODO.

Para cada uno de los embarques de carga por autotransporte en la base de datos considerada, se identifica la mejor ruta para cada alternativa (camión e intermodal). En el caso de México, estas rutas fueron aquellas de distancia mínima por la Red Básica entre origen y destino. En el caso de la alternativa intermodal, fue necesario determinar la estación de ferrocarril más cercana, por carretera, a los puntos de origen y destino.

Con base en las definiciones anteriores, se calcula el costo de transporte para cada opción y para cada embarque en la base de datos, usando la Ecuación 1 para la alternativa carretera y la Ecuación 3 para la alternativa intermodal.

Entonces, de la base de datos general de envíos de carga considerados, se seleccionan aquellos para los que el costo de usar la opción intermodal es teóricamente más bajo que por la alternativa del camión. En este momento es posible ligar un filtro adicional para seleccionar sólo aquellos embarques de mercancía para los que el ferrocarril tiene especial potencial, o aquellos para los que el ferrocarril ha demostrado experiencia, equipo especial, etc.

Finalmente, se cuantifica el flujo adicional de productos (en tonelaje o valor) que la estación de ferrocarril manejaría en caso de que los embarques finalmente seleccionados fueran atraídos a la alternativa del ferrocarril (intermodal). Se debe notar que en este procedimiento, ambos, el tonelaje y el valor de la carga, son tomados en cuenta dos veces, una vez en la estación de ferrocarril inicial y de nuevo en la final.

Como un ejemplo del tipo de información que es posible obtener, se puede mencionar que en el transporte de cereal a granel en México, dentro de las condiciones normales prevalecientes, el ferrocarril es competitivo y progresivamente rentable para arrastrar distancias de más de 800 kilómetros [8]. Para carga de rutas más cortas, la ventaja de costo en México se inclina hacia los camiones. El IMT tiene este tipo de análisis detallados para todo tipo

de mercancías movidas dentro del país [8]. El ferrocarril es también competitivo en el movimiento de mercancías en distancias más cortas, por ejemplo entre 400 y 500 kilómetros; obviamente hay otros casos en el que transporte del camión tiene la ventaja aunque las distancias sean más grandes que 800 kilómetros. Evidentemente, estos números pueden cambiar de país a país según la eficacia de los modos de transporte terrestres [9].

## **V UN EJEMPLO DE APLICACIÓN.**

En el caso de México, el Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional proporciona un banco de datos representativo de aproximadamente 80,000 embarques llevados a cabo diariamente por camiones por la Red Básica de Carreteras [1,2]. Cada uno de estos embarques fue relacionado con la estación de ferrocarril más cercana a sus puntos de origen y destino. Para cada uno de los embarques, los costos de embarque por ferrocarril o por camión se calcularon según los métodos ya descritos. De estos costos fue posible identificar aquellos embarques para los que un cambio hacia la alternativa intermodal pudiera ser ventajoso para el país. En la Tabla B2 se muestra un ejemplo de tales embarques, incluyendo su costo correspondiente por carretera y ferrocarril. Las estaciones de ferrocarril relacionadas con estos embarques serían los puntos de traslado intermodal recomendables.

Con base en los embarques identificados, fue posible cuantificar, para cada tipo de mercancía, el tonelaje adicional y el valor de la carga que se manejaría en cada estación de ferrocarril como un resultado de cambios modales. Toda esta información se incluye en otro trabajo [8].

La Tabla B3 proporciona una lista de 34 estaciones en las que el 75% del tonelaje involucrado en todos los cambios potenciales, podrían producirse. La información contenida en la tabla es para mercancías agregadas, pero el trabajo referido anteriormente [8] proporciona información desagregada para más de 200 tipos de carga. La última columna en la Tabla B3 muestra el tonelaje diario de carga manejado actualmente en las estaciones. El mapa en la Figura B2 muestra la ubicación de las estaciones anteriores.

Las 34 estaciones seleccionadas se distribuyen uniformemente en todo el país, indicando que las oportunidades para el ferrocarril mexicano son una posibilidad general. Tales oportunidades no se volverían realidad sin mejorar la fiabilidad, puntualidad, garantía, calidad de servicios, imagen y el mercadeo agresivo de este modo. Estudios de mayor detalle serán necesarios para determinar los medios específicos y equipos requeridos para implementar la transferencia intermodal a estas estaciones.

Este análisis también hace posible determinar que la participación ferroviaria presente cubre, según los criterios antedichos, alrededor de 211,800 toneladas de carga diariamente (este número es para la condición actual de la infraestructura ferroviaria). De esta cantidad, 142,700 toneladas ya se mueven por ferrocarril y el resto puede ser desviado del autotransporte [8]. La última situación representa una participación ferroviaria de aproximadamente 16,4%

del tonelaje de la carga movido por tierra. La realización de tal situación produciría al país un ahorro de transportación anual de aproximadamente 75 millones de dólares [8].

Como un ejemplo de la información por tipo de carga que se puede generar, la Tabla B4 da el caso de la estación Buenavista (México, D.F.) mostrando las mercancías que actualmente son movidas por autotransporte, pero que tienen una oportunidad de usar el ferrocarril.

## **VI CONCLUSIONES.**

El trabajo ejemplifica el potencial enorme para la planeación del transporte del Estudio Estadístico de campo del Autotransporte Nacional que México lleva a cabo anualmente por el IMT. Basado en este estudio, la planificación de estaciones de transferencia se apoyarán fuertemente en el futuro y se pueden perfeccionar los costos del transporte nacional.

La información mostrada aquí puede ser muy útil para guiar el desarrollo de planes de inversión para llevar a cabo instalaciones de intermodales en las estaciones de ferrocarril identificadas. También puede ser útil para evaluar la ubicación de terminales intermodales carretera-ferrocarril. Puede ser de suma importancia por el desarrollo de planes de inversión y expansión de las recientemente privatizadas empresas ferroviarias mexicanas.

Los datos específicos usados en este artículo parecen ser de valor innegable en optimizar el transporte terrestre y en promover un mayor uso del intermodalismo.

Tabla B2 Ejemplo de Embarques el Ferrocarril tiene Potencial por Atraer de Transporte del Camión.

Origen	Destino	Mercancía	Tonelaje de carga (Ton)	Valor (\$ US)	Distancias (Km)			Tiempo de servicio (Hora)			Costos (\$US)	
					d <sub>1</sub>	d <sub>FC</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>AT</sub>	t <sub>FC</sub>	t <sub>AT</sub>		CFC
Cd. Obregón Son.	Guadalajara, Jal.	Resinas	8.46	50,711	0	1,243	0	1,737	121.72	69.48	304.07	43825
Mexicali, B.C.	México, D.F.	Ropa	7.35	66,269	0	2,710	0	2,733	180.40	109.32	474.32	587.64
Nogales, Son.	Culiacán, Sin.	Flores	39.35	53,523	0	951	0	966	110.04	38.64	1,100.24	1,198.21
Querétaro, Qro.	Cd. Juárez, Chih.	Frutas frescas	13.33	5,200	3	1,727	0	1,548	141.13	61.92	532.02	597.69
Cd. Juárez, Chih.	Culiacán, Sin.	Aparatos eléctricos	5.99	11,934	0	1,199	0	1,458	119.96	58.32	194.30	258.25
Nuevo Laredo, Tms.	Xalapa, Ver.	Papelaría y art. de oficina	6.55	6,227	0	1,541	0	1,618	133.64	64.72	244.13	306.55
México, D.F.	Hermosillo, Son.	Colchones	6.55	22,025	0	2,094	0	2,002	155.76	80.08	316.91	377.19
Villahermosa, Tab.	Guadalajara, Jal.	Licor	12.15	4,254	56	1,569	0	1,494	135.77	59.76	469.73	528.15
Hermosillo, Son.	México, D.F.	Muebles	6.36	21,393	0	2,095	0	2,002	155.80	80.08	307.83	366.26
Villahermosa, Tab.	Culiacán, Sin.	Flores	5.99	8,156	56	2,505	0	2,277	173.21	91.08	327.72	381.16
Nacozari, Son.	México, D.F.	Comestibles	7.35	13,092	0	2,647	0	2,252	177.88	90.08	411.97	464.64
Puebla, Pue.	Monterrey, N.L.	Bananas	15.35	5,588	0	1,150	0	1,114	118.00	44.56	468.98	521.12
Tapachula, Chs.	México, D.F.	Químicos	9.13	12,514	0	1,200	0	1,247	120.00	49.88	292.42	342.97
Huatabampo, Son.	México, D.F.	Ganado	7.35	16,034	0	1,812	0	1,698	144.48	67.92	313.71	362.32
Monterrey, N.L.	Hermosillo, Son.	Artículos domésticos	6.55	31,267	0	1,930	0	1,845	149.20	73.80	306.77	354.59
Nuevo Laredo, Tms.	Puebla, Pue.	Botellas usadas	11.35	9,538	0	1,450	0	1,344	130.30	53.76	405.35	452.39
Cd Obregón, Son.	Morelia, Mich.	Muebles	5.99	20,150	0	1,656	0	1,656	138.24	66.24	245.83	291.54
Monterrey, N.L.	Mérida, Yuc.	Productos lácteos	8.95	3,492	0	2,524	0	2,061	172.96	82.44	471.30	516.49
Nogales, Son.	Los Mochis, Sin.	Productos Industriales	5.75	19,337	0	253	0	750	82.12	30.00	100.71	145.62
México, D.F.	Cd Obregón, Son.	Fibra sintética	5.99	10,375	0	1,836	0	1,737	145.44	69.48	255.80	300.17
Los Mochis, Sin.	Tlalnepantla, Mex.	Aceite combustible	5.99	15,532	0	1,662	0	1,636	138.48	65.44	242.78	286.73
Hgo. del Parraí, Chih	México, D.F.	Muebles	7.35	8,605	0	1,458	0	1,423	130.32	56.92	265.25	308.37
Mérida, Yuc.	Guadalajara, Jal.	Productos lácteos	5.75	19,337	0	2,196	0	1,982	159.84	75.28	288.04	328.16
Cd. Juárez, Chih.	México, D.F.	Licor	4.84	1,694	0	1,967	0	1,820	150.68	72.80	211.33	249.96
Toluca, Mex.	Monterrey, N.L.	Papelaría y art. de oficina	12.15	11,547	0	1,006	0	1,020	123.24	40.80	347.43	385.41
Escárcega, Cam.	México, D.F.	Verduras	9.75	6,731	0	1,281	0	1,214	135.84	48.56	320.50	356.28
Toluca, Mex	Monterrey, N.L.	Licor	10.55	2,744	0	1,596	0	1,392	132.36	55.68	396.37	431.31
Delicias, Chih	México, D.F.	Comestibles	9.99	17,788	0	1,509	0	1,361	132.36	54.44	373.42	405.38
Coatzacoalcos, Ver.	Guadalajara, Jal.	Anilina	12.15	37,194	0	1,301	0	1,224	124.04	48.96	473.71	455.08

Tabla B3 34 Estaciones de Ferrocarril con mayor Potencial para Atraer Carga del autotransporte.

Estación	Tonelaje (Ton/Día)				Valor de la Carga (\$10 <sup>6</sup> /día)			
	Origen	Destino	Total	% Acumulado	Origen	Destino	Total	% Acumulado
Buenavista	10,120	16,008	26,128	19	20.593	37.038	57.630	18
Guadalajara	3,647	4,828	8,475	25	5.716	8.309	14.025	23
Monterrey	4,396	3,781	8,177	31	7.719	6.122	13.842	27
Nuevo Laredo	4,017	1,358	5,375	35	17.851	4.001	21.852	34
Torreón	2,471	1,626	4,097	38	2.264	2.437	4.701	36
San Luis Potosí	1,481	2,047	3,535	41	2.756	3.328	6.085	38
Chihuahua	1,584	1,740	3,323	43	2.144	2.490	4.634	39
Veracruz	2,007	1,204	3,211	46	7.091	3.550	10.641	43
Ciudad Juárez	1,450	1,550	3,000	48	2.250	2.287	4.537	44
Tampico	1,632	1,239	2,871	50	3.003	2.125	5.129	46
Teapa	798	1,913	2,711	52	1.028	3.072	4.100	47
Puebla	1,425	1,286	2,710	54	4.435	3.357	7.792	50
Matamoros	1.622	895	2,517	56	2.666	1.498	4.164	51
Coatzacoalcos	1,498	746	2,243	58	2.056	1.134	3.190	52
Aguascalientes	649	1,245	1,894	59	2.194	2.352	4.546	53
Toluca	687	827	1,514	60	1.498	1.838	3.337	54
Durango	724	701	1,426	61	0.923	1.105	2.028	55
Reynosa	598	806	1,405	62	1.129	1.160	2.289	56
Minatitlán	990	393	1,383	63	1.291	0.647	1.938	56
León	461	856	1,317	64	1.619	1.283	2.902	57
Querétaro	563	745	1,308	65	1.140	1.514	2.653	58
Gómez Palacio	920	377	1,297	66	1.417	0.649	2.066	59
Saltillo	700	522	1,221	67	1.298	1.205	2.502	60
Orizaba	648	554	1,203	68	0.335	0.554	0.889	60
Tijuana	429	774	1,202	69	1.025	1.177	2.203	61
Culiacán	437	745	1,182	70	0.460	1.072	1.531	61
Hermosillo	509	580	1,089	70	0.708	0.939	1.646	62
Mérida	314	735	1,048	71	0.483	1.207	1.690	62
Ciudad Frontera	611	325	936	72	0.979	0.580	1.559	63
Manzanillo	508	423	931	72	1.494	1.148	2.642	64
Zacatecas	324	605	929	73	0.417	0.538	0.955	64
Oaxaca	219	670	889	74	0.291	1.017	1.308	64
Salamanca	563	314	877	74	0.786	0.188	1.274	65
Mexicali	305	508	813	75	0.594	0.834	1.427	65

Tabla B4 20 Mercancías con mayor Tonelaje en la Estación "Buenavista".

MERCANCIA	Tonelaje (Ton/día)				Valor de la Carga (\$10 <sup>6</sup> /día)			
	Origen	Destino	Total	% Acumulado	Origen	Destino	Total	% Acumulado
Minerales	69	2,099	2,168	8	0.374	11.367	11.741	20
Productos manufacturados	440	544	984	12	0.754	0.947	1.700	23
Químicos	292	585	877	15	0.431	0.838	1.269	26
Frutas frescas	173	453	626	18	0.068	0.185	0.252	26
Accesorios automotrices	213	398	611	20	3.462	6.629	10.091	43
Leche fresca	86	512	597	22	0.137	0.819	0.956	45
Comestibles	446	143	589	25	0.746	0.234	0.980	47
Verduras	351	234	585	27	0.241	0.143	0.384	47
Cerveza	399	174	573	29	0.140	0.061	0.200	48
Acero	85	475	560	31	0.083	0.465	0.548	49
Productos agrícolas	158	389	547	33	0.279	0.692	0.971	50
Papelería y artículos de oficina	223	323	546	35	0.229	0.308	0.537	51
Jabón y detergente	465	31	495	37	0.560	0.058	0.617	52
Colchones y muebles	304	164	468	39	1.020	0.548	1.568	55
Aceite vegetal	176	231	407	41	0.076	0.113	0.189	56
Derivados del petróleo	75	269	344	42	0.088	0.315	0.403	56
Tomate	22	270	292	43	0.015	0.186	0.202	57
Plátanos	8	276	284	44	0.003	0.108	0.111	57
Carne fresca	40	234	275	45	0.038	0.218	0.256	57
Naranja	6	244	250	46	0.002	0.095	0.098	57
Aceite de petróleo	41	203	244	47	0.048	0.237	0.285	58



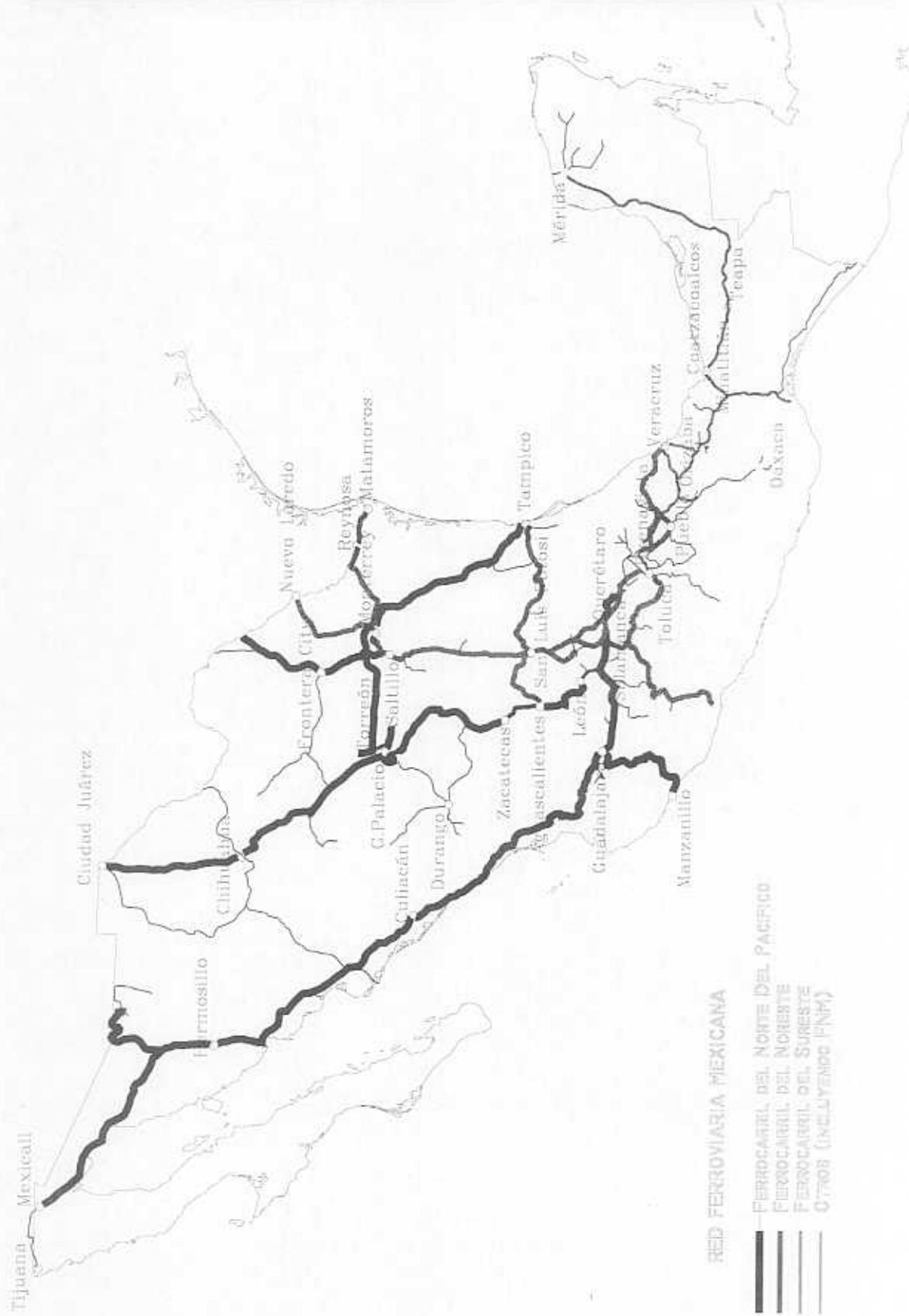


Figura B2. Ubicación de las 34 Estaciones

## VII RECONOCIMIENTOS.

A los autores les gustaría expresar su gratitud sincera al Instituto Mexicano del Transporte, del que son parte, por darles la oportunidad de llevar a cabo este trabajo.

## VIII REFERENCIAS.

- 1 Rico, A., A. Mendoza, J. L. Gutiérrez and E. Mayoral. *A Mexican Field Study to obtain Basic Information on Truck Transport*. Transportation Research Record 1602, Transportation Research Board. Washington, D.C., U.S.A., 1997.
- 2 Durán, G., J. L. Gutiérrez y A. Mendoza. *Análisis Estadístico del Peso y las Dimensiones de los Vehículos de Carga que Circulan por las Carreteras Mexicanas. Estaciones Instaladas durante 1994 y 1995*. Documento técnico N°. 18, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, Qro., 1996
- 3 Informe en los Embarques Comerciales por Mercancía y Estación (E-2). Subdirección de Programación y Sistemas, Ferrocarriles Nacionales de México (FNM), México, D F, 1996.
- 4 Jiménez, E. y A. Mendoza. *Factibilidad Económica de Mejoras al Sistema Nacional de Ferrocarriles*. Publicación Técnica No. 82 Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, Qro., 1996.
- 5 Rico, A., A. Mendoza y E. Mayoral. *Una Aproximación a la Definición de los Principales Corredores del Autotransporte en México*. Documento Técnico No. 94, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, Qro., 1997.
- 6 Tarifas de Transporte de Carga del Autotransporte y del Ferrocarril. Dirección General de Tarifas y Transporte Multimodal, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), México, D.F., 1996.
- 7 Inventario de Transporte Geostadístico. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México D.F., 1996.
- 8 Rico, A., A. Mendoza y M. De Alba. *Oportunidades de Intermodalismo Ferrocarril-Carretera en Transporte de Carga*. Documento Técnico No. 95, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, Qro., 1997.
- 9 López Pita, A. y B. Lizcano. *Ferrocarril, Un Modo de Transporte para el Siglo 21*. Primer Congreso de Transporte Terrestre Internacional, Universidad Autónoma de Chihuahua. Chihuahua. Chih. .1997.

## **C. Ampliaciones Requeridas en Curva para algunas Configuraciones Modernas de Carga (Consideraciones Mexicanas)**

---

### **I INTRODUCCIÓN.**

Los autores de este documento han tenido la oportunidad de revisar la metodología actualmente disponible para el cálculo de anchos necesarios requeridos para carreteras en curvas horizontales. El propósito de este trabajo es llegar a valores específicos de los anchos demandados por algunos vehículos de carga modernos, en curvas con características dadas. Estos anchos se han estimado en la práctica universal como un valor constante para toda la extensión de la curva y son aproximados con una transición gradual ajustada al inicio y al final de las zonas de transición.

El trabajo básicamente toma en cuenta combinaciones de vehículos tractor y semirremolque (articulados) debido a su impacto crítico en los aspectos discutidos aquí.

Se consideran tres efectos en este trabajo. Primeramente, el desplazamiento del centro del eje trasero del semirremolque con respecto al centro del eje delantero del tractor, debido a la configuración geométrica adoptada por el vehículo cuando describe una curva a baja velocidad (desplazamiento entre ejes a baja velocidad); este desplazamiento es hacia el interior de la curva. En segundo lugar, se toma en cuenta el efecto de la componente del peso del vehículo hacia el centro de la curva por acción de la sobre-elevación (efecto de sobre-elevación); este efecto es agregado a la baja velocidad de desplazamiento de ejes. Adicionalmente se toma en cuenta el efecto centrífugo debido a la inercia del vehículo al circular éste por la curva a alta velocidad, el cual genera otro desplazamiento relativo entre los centros del eje delanteros y trasero del vehículo (desplazamiento entre ejes a alta velocidad) que es en dirección opuesta a los otros mencionados; de esta manera debe ser restado de tales valores. Se asumirá en este trabajo, como convención de signo, que los valores del desplazamiento entre ejes son positivos hacia el interior de las curvas y negativos hacia el exterior.

La combinación de los tres efectos anteriores produce una demanda de espacio para el vehículo y la necesidad de ensanchar la sección transversal del camino a lo largo de la curva; tradicionalmente se ha tomado en cuenta este requisito en el diseño geométrico de carreteras. Sin embargo, los valores convencionales son insuficientes cuando se tratan algunas combinaciones de vehículos pesados modernos, con la resultante necesidad de revisar los criterios de diseño. El objetivo final de este trabajo es llegar a proponer nuevas normas con el propósito de proporcionar mejores condiciones de seguridad al tránsito en el camino.

Se presenta una descripción breve de los modelos seleccionados para predecir los efectos referidos anteriormente. Se hace una validación del

desplazamiento total obtenido de estos modelos, basada en una serie de pruebas de campo. Se calculan los anchos requeridos para varias combinaciones de los parámetros que definen la geometría de las curvas (por ejemplo, radio de curvatura) y el funcionamiento del vehículo considerado (por ejemplo, dimensiones, velocidad de operación, etc.); estas combinaciones son probables en las condiciones prevaletientes de la Red Mexicana de Carreteras. Se hace una comparación de los valores así generados con las normas mexicanas y americanas en vigor. Finalmente, se presentan las conclusiones.

Se debe hacer mención especial que el propósito principal de este trabajo es ayudar en la actualización de las normas mexicanas de diseño geométrico de carreteras ante la aparición de vehículos nuevos con dimensiones más grandes. El trabajo se refiere a caminos de dos carriles y dos sentidos, que en México suman casi el 90% del total del Sistema del Carreteras Federales.

### **III MODELOS SELECCIONADOS.**

Los autores adoptaron las herramientas matemáticas de cómputo siguiente para el cálculo de los desplazamientos a ser considerados.

Modelo AutoTURN [1, 2] para el cálculo de desplazamiento de ejes a baja velocidad. Esta herramienta se seleccionó debido a su inherente expedita capacidad de cálculo.

Modelo Glauz y Harwood [3] para calcular el efecto de la sobre-elevación.

La parte del modelo Bernard y Vanderploeg [4] para desplazamiento de ejes a alta velocidad (el modelo completo también incluye el cálculo del desplazamiento de ejes a baja velocidad).

Para efectos de claridad, a continuación se presenta una breve descripción de los modelos matemáticos seleccionados.

### **IV PROGRAMA AUTOTURN.**

AutoTURN es un software de modelos de cinemática asistido por computadora que permite predecir la ruta de puntos específicos de un vehículo mientras recorre una trayectoria predeterminada. AutoTURN ha sido escrito en lenguaje C para operar en diseño asistido por computadora y ambiente de dibujo (CADD); usa coordenadas cartesianas. AutoTURN tiene capacidad interactiva para permitir que el diseñador genere alternativas de diseño para las rutas de varios tipos de vehículos. El algoritmo de cálculo de AutoTURN se basa en el "método de análisis incremental" desarrollado por Vaughn y Sims [5], también llamado el "método de persecución constante" o el "modelo de la bicicleta." El método ayuda a determinar la ubicación del centro del eje trasero de un vehículo de una sola unidad para diferentes desplazamientos secuenciales (DS) del centro del eje delantero a lo largo de la ruta predeterminada (ver Figura C1), mediante las ecuaciones siguientes:

$$X_{i2} = (X_{i1} - X_{(i-1)2}) * [(l_{i(i-1)} - l) / (l_{i(i-1)})] + X_{(i-1)2} \quad (1)$$

$$Y_{i2} = (Y_{i1} - Y_{(i-1)2}) * [(l_{i(i-1)} - l) / (l_{i(i-1)})] + Y_{(i-1)2} \quad (2)$$

Donde:

- $i$   $i$ -ésima posición del vehículo.
- $1$  Centro geométrico del eje delantero.
- $2$  Centro geométrico del eje trasero.
- $l_{i(i-1)}$  Distancia entre el eje delantero en la  $i$ -ésima posición y el eje trasero en la  $(i-1)$ -ésima posición.
- $l$  Distancia entre ejes del vehículo.

y

$$l_{i(i-1)} = \sqrt{(x_{i1} - x_{(i-1)2})^2 + (y_{i1} - y_{(i-1)2})^2} \quad (3)$$



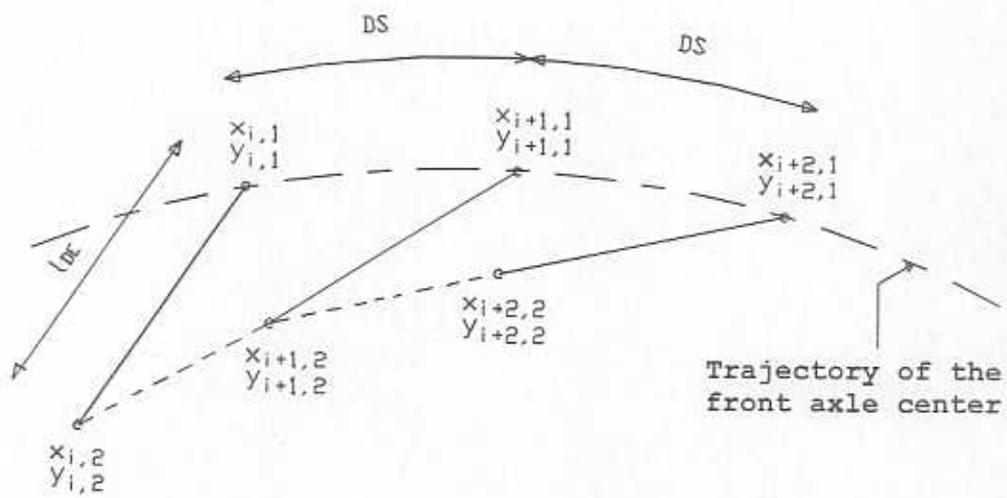


Figura C1. Representación Gráfica del Método incremental de análisis.

La derivación de éstas y otras ecuaciones importantes se muestra en [6]. Se usa el mismo principio para vehículos articulados, porque dos ecuaciones similares por resolver siempre estarán disponibles para calcular las coordenadas del centro del eje trasero de cada unidad. Los puntos del remolque tales como la quinta rueda o los puntos de articulación se pueden obtener cuando se ha determinado la posición de la unidad del remolque.

El registro secuencial de las coordenadas del centro del eje delantero y del trasero, permite determinar el desplazamiento entre ejes a baja velocidad ( $O_{bv}$ ) para cualquier posición del vehículo. Cuando la trayectoria especificada es una curva circular, la cantidad de este desplazamiento aumenta a medida que el vehículo se interna en la curva, alcanzando un valor máximo y reduciéndose gradualmente en la medida en que el vehículo avanza en la nueva dirección. Este desplazamiento entre ejes siempre será hacia el interior de la curva y por consiguiente tendrá un signo positivo, según la convención asumida al respecto. El procedimiento previo de cálculo secuencial permite determinar el desplazamiento entre ejes máximo observado y la ubicación donde es registrado. El desplazamiento máximo entre ejes es el parámetro que generalmente se utiliza en este trabajo.

No se ignoran algunas limitaciones potenciales de los modelos cinemáticos o el hecho de que AutoTURN no es sensible al derrapamiento por hielo (condición no frecuente en México); así como el hecho de que no se toma en cuenta el efecto de la velocidad del vehículo ni el de la sobreelevación transversal (estos efectos se consideran en lo que sigue).

## V MODELO BERNARD Y VANDERPLOEG.

La parte de este modelo para el cálculo de desplazamiento de alta velocidad de un segundo eje o arreglo de ejes (tandem o triaxial) o punto de articulación, en relación con el eje delantero de la unidad es:

$$O_{av} = \frac{V^2}{12.96R} \left[ \frac{1}{C_a g (1+t/l)} + S \right] \quad (4)$$

donde,

- $O_{av}$  desplazamiento entre ejes de alta velocidad, en metros.
- $V$  Velocidad del vehículo, en kilómetros por hora.
- $l$  Distancia entre dos ejes o centros geométricos de arreglos de ejes o puntos de articulación consecutivos, en metros.
- $R$  Radio de curvatura, en metros.
- $C_a$  Cociente entre la rigidez lateral total y la carga normal total, en radianes<sup>-1</sup>.
- $g$  Aceleración debida a la fuerza de gravedad, en m/seg<sup>2</sup>.

$t$	Soporte longitudinal del neumático, en metros.
$S$	Angulo de cambio de dirección por tendencia al volteo.

El cociente entre la rigidez lateral total y la carga normal total ( $C_a$ ) se calcula como sigue:

$$C_a = \frac{n(C_a / F_{zr})(F_{zr})(n_t)(57.296)}{W_a f} \quad (5)$$

donde:

- $C_a$  Rigidez de esquina de los neumáticos, en  $\text{kg-grados}^{-1}$
- $F_{zr}$  Carga máxima permisible por neumático, en kg.
- $C_a/F_{zr}$  Cociente entre los dos parámetros anteriores, también denominado coeficiente de esquina del neumático, en grados.
- $n$  Número de ejes en el grupo (1= sencillo, 2= tandem, 3=tridem).
- $n_t$  Número de neumáticos por eje (normalmente 4).
- $W_a$  Peso soportado por los neumáticos de eje o arreglo de ejes, en kg.
- $f$  Fracción de  $W_a$  soportada por la suspensión del eje o arreglo de ejes. De aquí que  $W_a f$  sea el peso soportado por la suspensión para el arreglo de ejes.

El ángulo de cambio de dirección por la tendencia al volteo se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{M_a f s h}{k_r - M_a f g h} \quad (6)$$

donde:

- $M_a f$  Masa soportada por la suspensión para el arreglo de ejes, en  $\text{kg-seg}^2/\text{m}$  ( $W_a f/g$ ).
- $s$  Coeficiente de cambio de dirección por la tendencia al volteo para la suspensión (grados de dirección por grados de volteo).
- $h$  Distancia entre el centro de gravedad del peso total y el centro de volteo de la suspensión ( $h_{CG} - h_{RC}$ ), en metros.
- $h_{CG}$  Altura del centro de gravedad del peso soportado por el arreglo de ejes, en metros.

$h_{RC}$	Altura de centro de volteo del sistema de suspensión del arreglo de ejes, en metros.
$k_r$	Rigidez compuesta al volteo para el arreglo de ejes, en m-kg/radianes.

La ecuación 4 es aplicable a "ejes" (ejes, arreglos de ejes o puntos de articulación) consecutivos. Para determinar el desplazamiento entre ejes de alta velocidad de todo el vehículo, deben sumarse algebraicamente los valores de  $O_{av}$  entre cada par de "ejes" tomando como positivos los valores de  $O_{av}$  para los casos en que el segundo "eje" sea una articulación [3]. Este desplazamiento entre ejes siempre será hacia el exterior de la curva y, por lo tanto negativo.

## VI MODELO GLAUZ Y HARWOOD.

Este modelo trata de tomar en cuenta que la sobre-elevación proporcionada a las curvas de alineamiento horizontal amplía el desplazamiento entre ejes de baja velocidad y que sobre-elevación genera una tendencia al volteo en el vehículo (hacia el interior del curva), lo cual induce a cambiar la dirección.

El cálculo del desplazamiento de un segundo eje (arreglo de ejes o puntos de articulación) en relación al eje delantero de la unidad, como resultado de este efecto, se puede calcular como sigue:

$$O_s = \frac{l\theta}{C_a(1+t/l)} + Sgl\theta \quad (7)$$

donde:

- $O_s$  Desplazamiento por efecto de la sobre elevación, en metros.
- $\theta$  Sobreelevación proporcionada a la curva estudiada, en m/m;  
y  
los otros términos ya se han definido.

Como la ecuación 7 calcula el efecto entre "ejes" consecutivos, también para este caso es aplicable el criterio de sumar algebraicamente los valores de  $O_s$  entre cada par de ejes para obtener el comportamiento total del vehículo. El signo de los valores es, sin embargo, opuesto al del desplazamiento de alta velocidad, pues estos desplazamientos son hacia el interior del curva (es decir, con signo positivo).

## VII CALIBRACIÓN.

Los autores de este trabajo piensan que las actuales normas de proyecto geométrico de carreteras que hoy existen en muchos países, incluyendo México, resultan escasas en lo relativo al cálculo de sobreamanchos de curvas circulares requeridos por los modernos vehículos pesados, a tal grado que

llegan a ser poco confiables desde el punto de vista de seguridad. Por esta razón después de una investigación en la literatura reciente, los autores han pensado que los modelos teóricos descritos anteriormente proporcionan elementos de cálculo simples que son recomendables para la aplicación en el desarrollo de nuevas especificaciones de diseño.

Sin embargo, antes de formular una propuesta sería necesario ejecutar una calibración y validación de campo, comparando el funcionamiento calculado con los métodos propuestos con las condiciones actuales del camino y del tráfico.

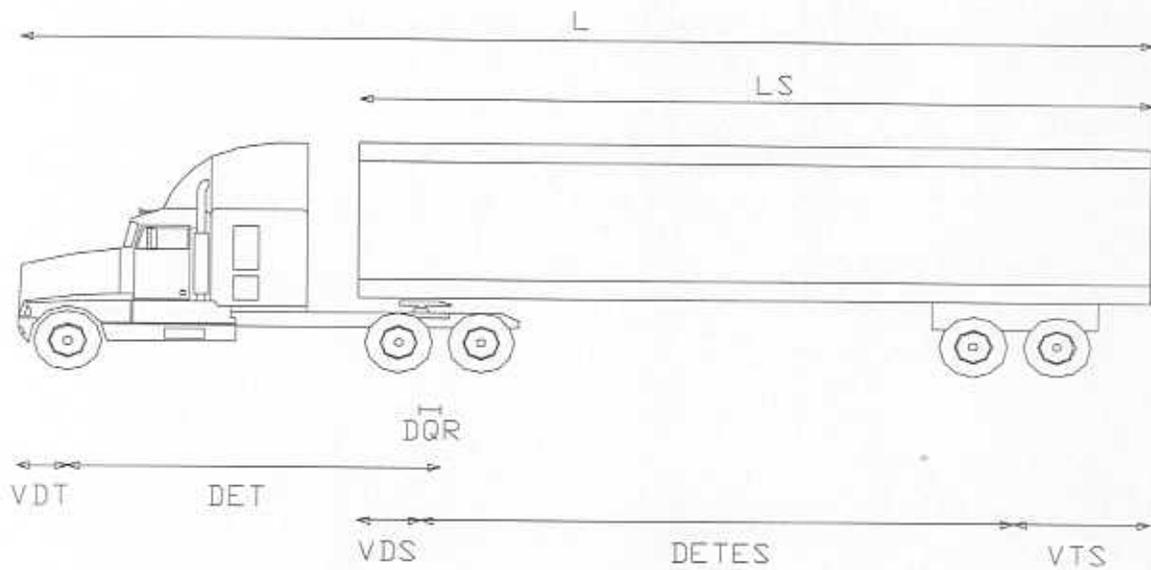
Para tal propósito se llevó a cabo la prueba de campo descrita a continuación.

### **VIII PRIMERA SERIE DE PRUEBAS DE CAMPO.**

En primer lugar, se diseñaron pruebas a baja velocidad (20 Km./h) para medir el desplazamiento entre ejes a baja velocidad

Estas pruebas se llevaron a cabo en un patio de maniobras amplio (superficie plana) con mediciones directas del ancho del camino barrido del vehículo (diferencia entre la huella exterior del eje delantero del tractor y la huella interna del eje trasero del remolque); para cada prueba se registró el valor máximo de cada giro. Los vehículos utilizados fueron unidades articuladas con tractor convencional y semirremolque de 48 y 53 pies. La Figura C2 proporciona información respecto a todos los vehículos utilizados [5]. Se trazaron tres trayectorias en curva en el patio; una con un grado de curvatura igual a  $45^\circ$  y un ángulo del giro de  $40.5^\circ$  (curva 1) otra con grado de curvatura de  $22^\circ$  y ángulo de giro de  $21.7^\circ$  (curva 2), y la última con un grado de curvatura igual a  $11^\circ$  y un ángulo de giro de  $11^\circ$  (curva 3). Cada prueba consistió en circular cada uno de los cinco vehículos por las tres curvas consideradas, tratando que el centro del eje delantero del tractor siguiese la trayectoria dibujada. En cada prueba se dibujaron la trayectoria del neumático exterior del eje delantero del tractor y del neumático interior del eje trasero del semirremolque mediante la activación de boquillas de la pintura presurizada.





Dimensión Vehicular	Símbolo	Vehículo				
		1	2	3	4	5
<b>Vehículo:</b>						
Longitud total (m)	L	20.30	20.10	21.90	21.80	19.90
Anchura (m)	A	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60
<b>Tractor:</b>						
Vuelo delantero (m)	VDT	1.40	1.15	1.10	1.00	1.15
Distancia entre ejes (m)	DET	4.00	5.60	5.65	5.50	5.50
Deriva del enganche de tiro (m)	DQR	0.20	0.15	0.10	0.00	0.10
Entre vía (ancho) del tractor (m)	EVT	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
<b>Semirremolque:</b>						
Longitud (m)	LS	16.15	14.60	16.15	16.15	14.60
Distancia del enganche de tiro al centro geométrico del arreglo de ejes del semirremolque (m)	DETES	11.90	11.90	11.50	11.15	11.15
Vuelo delantero del semirremolque (m)	VDS	0.90	0.90	0.95	0.85	0.90
Vuelo trasero del semirremolque (m)	VTS	3.35	1.80	3.70	4.15	2.55

Figura C2. Características Geométricas de los Vehículos Utilizados durante la Primer Serie de Pruebas de Campo.

La Tabla C1 indica los resultados finales obtenidos para las cinco pruebas de vehículos en cada una de las tres curvas. Se muestran valores para las anchuras de barrido máximas de las trayectorias calculados con AutoTURN ( $W$  de AutoTURN) y para aquellas medidas durante la prueba ( $W$  de campo); el porcentaje de diferencia entre ambos se puede observar también. Se debe hacer mención que los datos calculados son bastante similares a los valores medidos. De un análisis estadístico de regresión llevado a cabo entre los valores del ancho de barrido de la trayectoria calculado y medido, fue posible obtener un factor de calibración igual a 0,959 para lo anterior, con el propósito de eliminar el sesgo positivo observado por tales valores en la Tabla C1 cuando son comparadas con las medidas reales. Después de la calibración, los valores de  $W$  calculados con AutoTURN mostraron un error máximo de aproximadamente 20 cm, con un nivel de confianza del 95%. Estos resultados validan la aplicación de AutoTURN en el cálculo de los parámetros descriptivos del área requerida en curvas para vehículos a baja velocidad (particularmente de desplazamiento entre ejes a baja velocidad).

Cabe señalar que para cualquier ubicación del vehículo a lo largo de la trayectoria considerada, el ancho del camino de barrido del mismo ( $W$ ) se puede obtener al sumar el desplazamiento correspondiente la mitad del ancho del eje delantero del tractor y la mitad del ancho del eje trasero del semirremolque. Estos dos últimos términos son constantes para cualquier ubicación del vehículo a lo largo de la curva.

## **IX SEGUNDA SERIE DE PRUEBAS DE CAMPO.**

El segundo conjunto de pruebas de campo fue efectuado en un camino real usando vehículos con tractor convencional y con tractores con la cabina encima del motor ("chato"). Las dimensiones de los vehículos usados se muestran en la Figura C3 (sólo el vehículo 4 tiene un tractor con cabina encima del motor). En este caso se cargaron los vehículos al nivel máximo permitido por el Reglamento de Pesos y Dimensiones [7] para este particular tipo de vehículo (44 toneladas). Además, la mayor parte de los parámetros involucrados en las ecuaciones 4 a 7 relacionadas con el funcionamiento dinámico del vehículo, se usaron con valores típicos de camiones de carga mexicanos [8]. Se llevaron a cabo un total de ocho pruebas (Tabla C2).

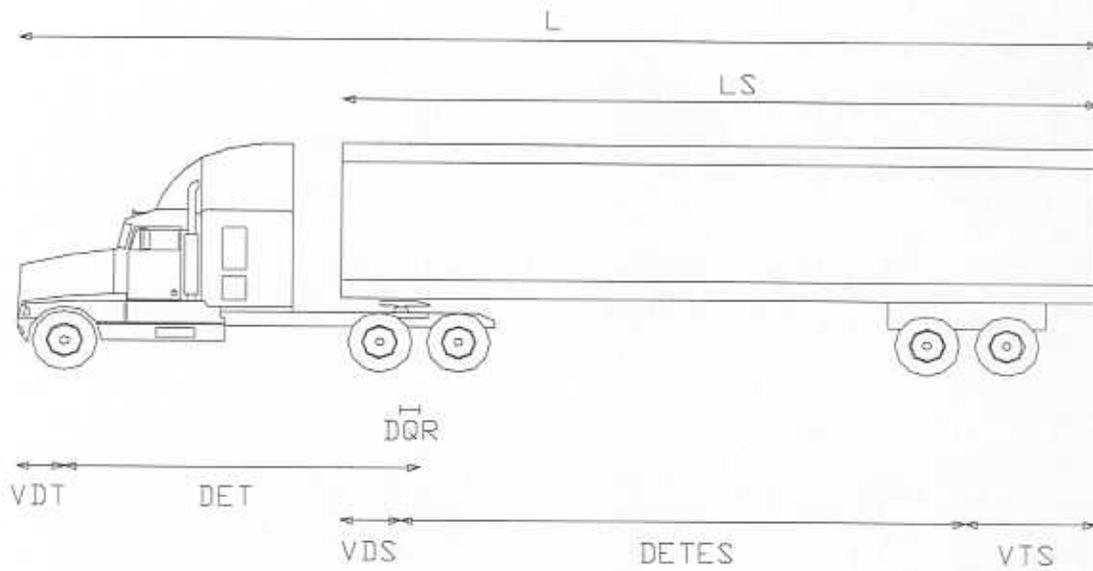
Todas las pruebas fueron realizadas a lo largo de una curva con dos carriles y dos sentidos de la carretera federal Los Reyes - Zacatepec (MEX-136). Se caracteriza esta curva como sigue: (i) radio de curvatura igual a 120,7 m; (ii) longitud de curva igual a 108,9 m; (iii) sobre elevación igual a 10%; y (iv) anchura de carril igual a 4 m. La curva no cuenta con acotamientos ni con transiciones inicial o final.

Cada prueba consistió en circular los vehículos en las direcciones y a las velocidades señaladas en la Tabla C2. Al paso de los vehículos sobre la curva, también se dibujaron, mediante la activación de boquillas de pintura presurizada, la trayectoria de la huella exterior del eje delantero del tractor y la

huella interior del eje trasero del semirremolque. El resultado final fue obtener sobre la superficie del carril de circulación el trazo continuo de dichas huellas.

Tabla C1 Valores de Ancho Máximo Calculados con AutoTURN y Observados en Campo.

Caso	Curva	Vehículo	W (AutoTURN) (m)	W (Campo) (m)	Diferencia %
1	1	1	5.00	4.70	6.38
2	1	2	5.10	4.83	5.59
3	1	3	5.00	4.68	6.84
4	1	4	4.90	4.75	3.16
5	1	5	5.00	4.80	4.17
6	2	1	3.80	3.63	4.68
7	2	2	3.80	3.68	3.26
8	2	3	3.80	3.76	1.06
9	2	4	3.70	3.55	4.23
10	2	5	3.70	3.61	2.49
11	3	1	3.20	3.28	-2.44
12	3	2	3.20	3.12	2.56
13	3	3	3.20	3.06	4.58
14	3	4	3.10	2.85	8.77
15	3	5	3.10	2.92	6.16



Dimensión Vehicular	Símbolo	Vehículo			
		1	2	3	4
<b>Vehículo:</b>					
Longitud total (m)	L	20.00	20.25	21,35	2~ 40
Anchura (m)	A	2.60	2.60	2,60	2.60
<b>Tractor:</b>					
Vuelo delantero (m)	VDT	1.20	1,20	1,15	1,35
Distancia entre ejes (m)	DET	6.40	5,43	5,08	4.00
Deriva del enganche de tiro (m)	DQR	0.15	0,17	0,15	0,17
Entre vía (ancho) del tractor (m)	EVT	2,45	2,45	2,45	2,48
<b>Semirremolque:</b>					
Longitud (m)	LS	14,65	14,65	16,15	16,15
Distancia del enganche de tiro al centro geométrico del arreglo de ejes (m)	DETES	11,35	11,73	13,50	13,50
Eje trasero del semirremolque (m)					
Vuelo delantero (m)	VDS	0,95	0,90	0,91	0,91
Vuelo trasero (m)	VTS	2,35	1,97	1,75	1,75
Separación entre ejes (m)	SES	1.25	1.25	1.25	1.25

Figura C3 Características de los Vehículos Utilizados durante la Segunda Serie de Pruebas Campo.

La tabla C3 resume los resultados obtenidos. Se reportan los tres tipos de desplazamiento entre ejes calculados así como la suma algebraica de los mismos y el ancho máximo del camino de barrido calculado ( $W$  Calculada); también se presenta el ancho máximo del camino de barrido realmente en la carretera ( $W$  de Campo). Se puede observar que en este caso también existe un acuerdo muy razonable entre los valores de anchura determinados por los modelos teóricos aplicados (después de considerar la calibración introducida a partir de la primera serie de pruebas) y los obtenidos de estas pruebas de campo.

## X CALCULO DE LA ANCHURA TOTAL DE CURVA EN CARRETERAS.

En el diseño de carreteras, la ampliación total de que debe dotárselas en curvas ( $A$ ) se puede calcular mediante la siguiente ecuación [9]:

$$A = 2(O_{bv} - O_{av} + O_s) + F_A + Z \quad (8)$$

donde:

- $F_A$  es la proyección del vuelo delantero, en m.
- $Z$  es el sobreaño por dificultad de maniobra, en m; y los otros términos ya se han definido anteriormente.

$F_A$  y  $Z$  pueden calcularse de la siguiente manera:

$$F_A = [R^2 + V(21 + V)]^2 - R \quad (9)$$

$$Z = V/R^{1/2} \quad (10)$$

donde

$R, V, l$  ya han sido definidas.

Con base en las consideraciones previas, la Tabla C4 presenta los valores de ancho total que pueden ser calculados con la metodología aplicada en este trabajo para combinaciones diferentes de radio de la curvatura y longitud del remolque, así como el ancho total requerido por la Manual de Diseño Geométrico de Carreteras vigente en México [9]. Se debe mencionar que el ancho en el Manual Mexicano es similar a los del Libro Verde de la AASHTO [10] basado en automóviles. Otras referencias [11] han recomendado anchos para camiones que son similares a los de la Tabla C4.

Para el cálculo del ancho total en la Tabla C4, fueron consideradas la velocidad máxima de diseño y la tasa de sobre-elevación especificada por los manuales actuales [9, 10] para cada radio de curvatura,. Los cálculos también asumen que el semirremolque siempre es remolcado por un tractor convencional.

Tabla C2 **Secuencia de Pruebas Llevadas a Cabo.**

Prueba	Vehículo	Velocidad (Km./h)	Dirección
1	1	30	Zacatepec- Los Reyes (circulación por el carril exterior de la curva)
2	2	30	Los Reyes- Zacatepec (circulación por el carril interior de la curva)
3	1	80	Zacatepec- Los Reyes
4	2	80	Los Reyes- Zacatepec
5	3	80	Zacatepec- Los Reyes
6	4	80	Los Reyes--Zacatepec
7	3	80	Los Reyes- Zacatepec
8	4	30	Los Reyes- Zacatepec

Tabla C3 **Ancho de Barrido Máximo de la Trayectoria Calculado y Medido en el Campo.**

Prueba	Valores Calculados				W Campo (m)	Diferencia (%)
	$O_{bv}$ (m)	$O_{av}$ (m)	$O_s$ (m)	W Calculado (m)		
1	0,69	0,06	0,08	3,24	3,78	- 14,02
2	0,73	0,05	0,07	3,24	3,85	- 15,32
3	0,69	0,21	0,08	3,19	2,73	13,92
4	0,73	0,21	0,07	3,11	3,31	- 5,44
5	0,88	0,22	0,07	3,27	2,94	11,56
6	0,90	0,22	0,06	3,28	3,10	5,81
7	0,91	0,22	0,07	3,28	2,76	19,20
8	0,90	0,05	0,06	3,44	3,57	- 4,48

Tabla C4 Anchos Requeridos y Demandados por el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras Mexicano.

Radio (m)	Anchos Requeridos para diferentes valores de DETES										
	Anchos en el Manual Mexicano (m)	DETES=10.52 m. (LS= 45ft)	DETES=11.43 m. (LS= 48ft)	DETES=12.34 m. (LS= 51ft)	DETES=12.95 m. (LS= 53ft)	DETES=14.17 m. (LS= 57ft)	DETES=14.78 m. (LS= 59ft)				
40	1.90	4.67 (146%) <sup>A</sup>	5.20 (174%)	5.79 (205%)	6.22 (227%)	7.09 (273%)	7.60 (300%)				
70	1.30	2.98 (129%)	3.28 (152%)	3.60 (177%)	3.85 (196%)	4.34 (234%)	4.61 (255%)				
100	1.10	2.32 (111%)	2.53 (130%)	2.75 (150%)	2.93 (166%)	3.27 (197%)	3.46 (215%)				
130	0.90	1.96 (118%)	2.12 (136%)	2.30 (156%)	2.43 (170%)	2.70 (200%)	2.84 (216%)				
160	0.90	1.73 (92%)	1.86 (107%)	2.01 (123%)	2.12 (136%)	2.34 (160%)	2.46 (173%)				
190	0.90	1.57 (74%)	1.69 (88%)	1.81 (101%)	1.91 (112%)	2.10 (133%)	2.20 (144%)				
220	0.90	1.44 (60%)	1.55 (72%)	1.66 (84%)	1.74 (93%)	1.91 (112%)	1.91 (121%)				
250	0.80	1.36 (70%)	1.45 (81%)	1.55 (94%)	1.62 (103%)	1.77 (121%)	1.84 (130%)				
280	0.80	1.29 (61%)	1.37 (71%)	1.47 (84%)	1.53 (91%)	1.66 (107%)	1.73 (116%)				
310	0.70	1.23 (76%)	1.31 (87%)	1.39 (99%)	1.45 (107%)	1.57 (124%)	1.63 (133%)				

A Porcentaje en que la ampliación requerida es mayor al valor dado en las especificaciones Mexicanas.

El análisis de los valores de la Tabla hacen evidente que para casi cualquier radio de curvatura, el ancho recomendado por los manuales de diseño actuales es más pequeño que los valores calculados con la metodología empleada en este trabajo. El déficit parece ser menor para las curvas más anchas.

También es importante mencionar que los valores calculados son conservadores ya que corresponden a ángulos de giro que para cada radio de curvatura genera el valor pico de desplazamiento entre ejes. Sin embargo, el procedimiento del cálculo usado en este trabajo hace posible obtener para cada curva, un valor de desplazamiento entre ejes exacto, correspondiente al ángulo de giro de cada curva específica por proyectar.

## **XI CONCLUSIONES.**

La sensación de muchos proyectistas de carreteras y los resultados de las pruebas descritas en este trabajo hacen ver que para los vehículos de carga de uso actual, los sobre anchos totales recomendados por los Manuales de Proyecto actuales son subestimados induciendo así condiciones de operación inseguras.

Los autores piensan que el procedimiento matemático empleado aquí, constituye una herramienta valiosa para calcular el desplazamiento entre ejes que es realmente necesario. Las pruebas de campo realizadas parecen validar esta declaración.

En conclusión y no obstante la necesidad de llevar a cabo una investigación más extensa, los autores creen que el procedimiento de cálculo seguido por ellos proporciona un medio satisfactorio para conducir proyectos nuevos o para realinear curvas peligrosas ("puntos negros"). En este último caso otras deficiencias deben ser corregidas (anchuras de hombro y sobre-elevaciones insuficientes, radios demasiado agudos, falta de espirales de transición, etc.).

## XII REFERENCIAS.

1. AutoTURN, User's Guide. Transoft Solutions Inc., Richmond, B.C., Canada, 1994.
2. Carrasco, M. S. E. *Turning Vehicle Simulation: Interactive Computer-Aided Design and Drafting Application*. Transportation Research Record 1500, pp. 1-11, Washington, DC, USA, 1995.
3. Glauz, W. D. y D. H. Harwood. *Superelevation and Body Roll Effects on offtracking of Large Trucks*. Transport Research Record 1303, pp. 1-10, Washington, DC, USA, 1991 .
4. Bernard, J. E. y M. Vanderploeg. *Static and Dynamic "omracking" of Articulated Vehicles*. Paper 800151, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., USA, 1981 .
5. Vaughan, R. G. y A. G. Sims. *Determination of Swept Paths of Vehicles*. Traffic Accident Research Unit, Department of Motor Transport, New South Wales. Australia July 1970.
6. Carrasco, M. S. E. *Computerized Vehicle-Turning Simulation-An Interactive Application*. M. E. Thesis, University of Calgary, Alberta, 1992.
7. Truck Size and Weight Regulation. Secretariat of Communications and Transports, Mexico City, Mexico, 1993.
8. Lozano, A.. *Heavy Duty Vehicles Stability and its Relation to Safety*. Publicacion Técnica en edición, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, Mexico 1997.
9. Manual de Proyecto geométrico de Carreteras. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Ciudad de México, México, 1990.
10. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. ASSHTO, Washington, D.C., 1990.
11. Fitzpatrick, K. Geometric Design and Operational Considerations for Trucks. Institute of Transport Engineers (ITE) Report No. IR-O62, Washington, DC, 1992.

NAME	ADDRESS
J. B. ...	...
...	...
...	...
...	...
...	...
...	...