



Certificación ISO 9001:2000 †
Laboratorios acreditados por EMA §

Un análisis económico sobre el uso del concepto de confiabilidad, en relación con algunos elementos del proyecto geométrico de carreteras

Rafael Soto Espitia
Alberto Mendoza Díaz
José Luis Gutiérrez Hernández

**Publicación Técnica No 309
Sanfandila, Qro, 2008**

**Un análisis económico sobre el uso del
concepto de confiabilidad, en relación con
algunos elementos del proyecto geométrico
de carreteras**

Este trabajo se elaboró en la Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), por Rafael Soto Espitia, Alberto Mendoza Díaz, y José Luis Gutiérrez Hernández

Índice

Índice	iii
Índice de tablas y figuras	vii
Resumen	xi
Abstract	xiii
Resumen ejecutivo	xv
1 Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Generalidades	1
1.2.1 Metodología tradicional	2
1.2.2 Etapas de una carretera	2
1.2.3 Metodología de proyecto geométrico	3
1.2.4 Propuesta basada en el concepto de “confiabilidad”	3
1.3 Justificación	5
1.4 Fundamentación teórica	5
1.4.1 El usuario	6
1.4.2 El vehículo	6
1.4.3 Tránsito	6
1.4.4 Volumen de tránsito	6
1.4.5 Densidad de tráfico	6
1.4.6 Velocidad	6
1.4.7 Distancia de visibilidad	7
1.5 Objetivos	7
1.6 Hipótesis	7
1.7 Metodología	7
1.8 Contenido	8
1.9 Utilidad del proyecto	8
2 Antecedentes	9
2.1 Los caminos en México	9
2.2 Evolución de la normativa de proyecto geométrico	13
2.2.1 Normativa mexicana	13
2.2.2 Normativa internacional	16
2.3 Elementos de una propuesta basada en la confiabilidad	17

2.3.1	Distribuciones continuas de probabilidad	17
2.3.2	Distribuciones, tipo Weibull	18
2.3.2.1	La distribución, tipo Weibull en la ingeniería	19
2.3.2.2	Confiabilidad	20
2.3.3	La confiabilidad en la ingeniería civil	21
2.3.3.1	Factor de seguridad y confiabilidad estructural	21
3	Análisis de velocidades	25
3.1	Algunos conceptos útiles relacionados con la velocidad	25
3.1.1	Velocidad de proyecto	25
3.1.2	Alineamiento horizontal	29
3.1.2.1	Radio de curvatura	30
3.1.3	Alineamiento vertical	30
3.1.3.1	Pendiente de la tangente	30
3.1.4	Sección transversal	30
3.1.4.1	Ancho de corona	30
3.2	Análisis de velocidades obtenidas en campo	31
3.2.1	Principios del análisis	31
3.2.2	Análisis para troncales	32
3.2.3	Análisis para alimentadoras	35
3.2.4	Conclusión	38
4	Algunas implicaciones económicas del concepto de <i>confiabilidad</i>	39
4.1	Desarrollo de elementos de base	39
4.1.1	Principios del análisis	39
4.1.2	Generación de curvas de costo	40
4.1.2.1	Carreteras tipo A4	40
4.1.2.2	Carreteras tipo A2	47
4.1.2.3	Carreteras tipo B	50
4.1.2.4	Carreteras tipo C	53
4.1.2.5	Carreteras tipo E	56
4.1.3	Análisis de costos	59
4.2.1	Carreteras tipo A4	59
4.2.2	Carreteras tipo A2	61

4.2.3 Carreteras tipo B	61
4.2.4 Carreteras tipo C	61
4.2.5 Carreteras tipo E	62
4.3 Otros análisis	62
4.3.1 Carreteras tipo A2	64
4.3.2 Carreteras tipo B	65
4.3.3 Carreteras tipo C	66
4.3.4 Carreteras tipo E	67
5 Conclusiones y recomendaciones	69
Referencias	71

Índice de tablas y figuras

Tabla R.1.	Incrementos porcentuales en los costos de construcción	xxvi
Tabla 2.1.	Clasificación y características de las carreteras	15
Fig 2.1.	Componentes de la efectividad	18
Fig 2.2.	Curva de distribución Weibul	20
Fig 2.3.	Distribución de las velocidades deseadas	23
Tabla 3.1.	Unión Europea: velocidades de proyecto (límites de velocidad)	27
Tabla 3.2.	Estados Unidos: velocidades de proyecto (límites de velocidad)	28
Tabla 3.3.	Canadá: velocidades de proyecto (límites de velocidad)	28
Tabla 3.4.	China: velocidades de proyecto (límites de velocidad)	28
Tabla 3.5.	Australia: velocidades de proyecto (límites de velocidad)	29
Tabla 3.6.	Nueva Zelanda: velocidades de proyecto (límites de velocidad)	29
Tabla 3.7.	Venezuela: velocidades de proyecto (límites de velocidad)	29
Tabla 3.8.	Parámetros de la función de probabilidad, tipo Weibull, para los distintos tipos de carreteras	31
Tabla 3.9.	México–Puebla (km 31+450): frecuencias observadas y esperadas en el primer punto	34
Tabla 3.10.	México–Puebla (km 63+200): frecuencias observadas y esperadas en el primer punto	35
Tabla 3.11.	La Pera–Cuautla (km 1+260): frecuencias observadas y esperadas en el primer punto	37
Tabla 3.12.	La Pera–Cuautla (km 1+360): frecuencias observadas y esperadas en el segundo punto	38
Tabla 4.1.	Caminos A4: costo de construcción promedio (pesos corrientes/km)	41
Tabla 4.2.	Paridad histórica del peso frente al dólar	42
Tabla 4.3.	Caminos A4: costo de construcción promedio (miles de dólares/km)	43
Fig 4.1.	Caminos A4: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno plano	44
Fig 4.2.	Caminos A4: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno en lomerío	44
Fig 4.3.	Caminos A4: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno montañoso	45
Fig 4.4.	Caminos A4: curvas velocidad contra costo de construcción para los tres tipos de terreno	46
Tabla 4.4.	Caminos A2: costo de construcción promedio (pesos corrientes/km)	47

Tabla 4.5.	Caminos A2: costo de construcción promedio (miles de dólares/km)	47
Fig 4.5.	Caminos A2: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno plano	48
Fig 4.6.	Caminos A2: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno en lomerío	48
Fig 4.7.	Caminos A2: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno montañoso	49
Figura 4.8.	Caminos A2: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno tipo los tres tipos de terreno	49
Tabla 4.6.	Caminos B: costo de construcción promedio (pesos corrientes/km)	50
Tabla 4.7.	Caminos B: costo de construcción promedio (miles de dólares/km)	50
Figura 4.9.	Caminos B: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno plano	51
Figura 4.10.	Caminos B: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno en lomerío	51
Figura 4.11.	Caminos B: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno tipo montañoso	52
Figura 4.12.	Caminos B: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno tipo los tres tipos de terreno	52
Tabla 4.8.	Caminos C: costo de construcción promedio (pesos corrientes/km)	53
Tabla 4.9.	Caminos C: costo de construcción promedio (miles de dólares/km)	53
Figura 4.13.	Caminos C: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno plano	54
Figura 4.14.	Caminos C: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno en lomerío	54
Figura 4.15.	Caminos C: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno montañoso	55
Figura 4.16.	Caminos C: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno tipo los tres tipos de terreno	55
Tabla 4.10.	Caminos E: costo de construcción promedio (pesos corrientes/km)	56
Tabla 4.11.	Caminos E: costo de construcción promedio (miles de dólares/km)	56
Figura 4.17.	Caminos E: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno plano	57
Figura 4.18.	Caminos E: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno en lomerío	57

Figura 4.19. Caminos E: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno montañoso	58
Figura 4.20. Caminos E: curvas velocidad, contra costo de construcción para los tres tipos de terreno	58
Tabla 4.12. Caminos A4: análisis de costos de construcción (dólares)	60
Tabla 4.13. Caminos B: análisis de costos de construcción (dólares)	61
Tabla 4.15. Caminos A4: análisis de costos de construcción (dólares)	63
Tabla 4.16. Caminos A2: análisis de costos de construcción (dólares)	64
Tabla 4.17. Caminos B: análisis de costos de construcción (dólares)	65
Tabla 4.18. Caminos C: análisis de costos de construcción (dólares)	66
Tabla 4.19. Caminos E: análisis de costos de construcción E (dólares)	67
Tabla 5.1. Incrementos porcentuales en los costos de construcción	69

Resumen

Este trabajo presenta un análisis económico sobre la aplicación del concepto llamado *confiabilidad*, en el proyecto geométrico de carreteras. Con dicho concepto se busca diseñar las carreteras para velocidades, más congruentes con los deseos de los conductores. El valor de confiabilidad seleccionado es la fracción de los usuarios, cuyos propósitos quedarán satisfechos con el diseño realizado para ese valor.

También se analiza la pertinencia de diferentes valores de confiabilidad recomendados para distintas situaciones (tramos de carreteras troncales, alimentadoras o locales, etc).

Se realizó un estudio bibliográfico acerca de los estándares mexicanos de diseño, así como de los manuales internacionales de Canadá, Estados Unidos y España en busca de este concepto. También se compararon diversas velocidades de proyecto de diferentes países.

Se realizaron análisis de velocidades de punto en diferentes sitios de la red carretera. Éstos se compararon contra la teoría de aplicación del concepto de *confiabilidad*.

Se evaluaron las implicaciones en el costo de construcción de las carreteras, de la aplicación de los criterios de confiabilidad, concluyéndose que éstos generan costos de construcción mayores y crecientes para los tipos de terreno en lomerío y montañoso en relación con el terreno plano. Similares resultados se obtuvieron si se varía la confiabilidad según el tipo de terreno. Puede decirse que la aplicación del criterio de confiabilidad tiende a traer como consecuencia proyectos carreteros más congruentes con las velocidades de los usuarios y, por lo mismo, de mejores características geométricas y más seguras. También traería como resultado carreteras con un monto de construcción significativamente mayor.

Se recomienda incorporar la confiabilidad en el proyecto geométrico de carreteras como un criterio de verificación y revisión de que lo proyectado, cumpla con los deseos de los usuarios.

Abstract

This paper intends to analyze the economic impact of the use of the concept named *reliability* on geometric road design. Based on this concept the idea is to design roads which support velocities according to drivers' desires. The reliability value selected is the proportion of users whose desires are satisfied with the design done to that value.

The pertinence of different reliability values recommended for several situations (main road segments, feeders or local, etc) is analyzed.

A bibliographic research about design standards for Mexican roads is carried out, along with international manuals from Canada, United States and Spain, looking for the use of the concept of reliability. Besides, project speeds from different countries are compared.

The implications, on road construction costs, of the application of the reliability criterion are assessed. It is concluded that the reliability criterion generates higher construction costs, particularly for rolling and mountainous terrain. Similar results are obtained if the reliability value is varied according to terrain type. It can be concluded that the implementation of the reliability criterion may lead to road designs which are more in agreement to the users' speeds and, by this mean, to better and safer geometric characteristics. It also leads to significantly higher construction costs.

It is recommended to incorporate the reliability criterion on road geometric design as a verification criterion and for reviewing that the project will meet users' desires.

Resumen ejecutivo

1. Introducción

El proyecto geométrico de carreteras se ha basado, desde hace más de 20 años, en el manual de proyecto geométrico de carreteras, así como en las normas de la Dirección General de Servicios Técnicos, DGST. Debido al desarrollo tecnológico y a los cambios sociales y culturales, se ha planteado la propuesta respaldar el proyecto geométrico de carreteras en un concepto denominado “confiabilidad”. La intención en este trabajo es probar la aplicación práctica de ese concepto, dentro de las metodologías tradicionalmente utilizadas para el proyecto geométrico de carreteras. Se considera que dicho concepto puede contribuir de forma notable en los aspectos relacionados con la seguridad vial en las carreteras. Con ese término, se busca diseñar carreteras para velocidades más congruentes con los deseos de los conductores. El valor de confiabilidad seleccionado es la fracción de los usuarios, cuyos propósitos quedarán satisfechos con el diseño realizado para ese valor.

Se ha propuesto introducir el concepto de confiabilidad en la selección de diversos elementos del proyecto geométrico de carreteras, partiendo del uso la distribución de probabilidad, tipo Weibull. Se asume que la velocidad es la variable más importante en el diseño vial. También se consideran dos tipos de velocidades: la permitida u ofrecida por el camino, y la deseada o demandada por el conductor. El cual compara ambas velocidades, y decide cual es la más adecuada para no sufrir un accidente.

La confiabilidad se interpreta como la fracción de conductores satisfechos con el proyecto. Si en vez de asumir que la velocidad deseada por el conductor, y la velocidad ofrecida por el camino son variables independientes, se asume que son iguales, puede obtenerse que la confiabilidad es el percentil de la velocidad deseada.

Se parte de una clasificación de las carreteras de la red nacional, de acuerdo con su importancia en relación con su contribución en la realización de las actividades económicas, políticas y sociales que requiere el país. Se identifican tres tipos de carreteras: troncales, alimentadoras, y locales.

Para asignar velocidades medias por tipo de vehículo y carretera se toman como base las velocidades registradas en México y en otros países. A partir de esas velocidades medias se generan distribuciones probabilísticas, tipo Weibull para las velocidades deseadas.

Justificación

Generalmente, el porcentaje de vehículos que exceden la velocidad para la cual un tramo carretero fue construido es muy elevado (por ejemplo, de más del 50%). Asimismo, se han atribuido al comportamiento anterior, más del 50% de los accidentes que ocurren en las carreteras.

Se ha propuesto diseñar los tramos carreteros para que la confiabilidad no sea menor de cierto límite mínimo, o “piso” a lo largo de todo el tramo (por ejemplo, 90%), en vez de diseñarlo para una velocidad de proyecto. Esta última es la velocidad máxima a la cual los vehículos pueden circular con seguridad sobre un tramo carretero, y que se

utiliza para su diseño geométrico, o la velocidad mínima a lo largo de una sección para la que quedarán preparados los segmentos diseñados con los estándares más restrictivos permitidos para esa velocidad. Con la incorporación del concepto de confiabilidad se diseñarán carreteras para mayores velocidades, más congruentes con los deseos de los usuarios, con lo cual se busca reducir los accidentes viales.

Antes de incorporar el concepto de confiabilidad en la normativa, deben analizarse las repercusiones prácticas y técnico-económicas en todo lo relacionados con el proyecto geométrico de las carreteras.

Objetivo

El objetivo fundamental de este trabajo es analizar la aplicabilidad del concepto de confiabilidad a través de los pasos que constituyen las metodologías utilizadas tradicionalmente en el proyecto geométrico de carreteras, para de esta forma conocer el uso práctico de dicho concepto.

Hipótesis

Si se pueden obtener resultados adecuados desde los puntos de vista práctico y técnico-económico a partir de aplicar el concepto de confiabilidad, y si además es posible corroborar los criterios contenidos en la ref 3 con base en información de campo, entonces es factible incluir dichos criterios en la normativa mexicana para el proyecto geométrico de carreteras.

Metodología

En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica sobre el tema de confiabilidad y algunos elementos del proyecto geométrico de carreteras. Entonces, se emplea el concepto de confiabilidad mediante las metodologías tradicionales de proyecto geométrico. Se realizan comparaciones entre los datos viales obtenidos en campo y los recomendados (ref 3) A continuación se realizan los análisis de los pasos anteriores, y se generan recomendaciones acerca de la aplicación del concepto.

Utilidad del proyecto

Se considera que la aplicación del concepto de confiabilidad llevará a generar vías más seguras. La utilidad consiste en evaluar si la aplicación de dicho concepto es adecuada desde los puntos de vista práctico y técnico-económico.

2. Antecedentes

Las principales vías terrestres en el país datan desde tiempos prehispánicos, supuestamente trabajadas por los pueblos vencidos. Se ha considerado que los mexicanos construyeron sus caminos con terrecerías, usando sólidas bases de piedra, cuya superficie era revestida con grava para rellenar los intersticios, y una capa de argamasa como cemento natural, que al endurecer formaba una cubierta recia.

Durante la época de la Independencia, los caminos sirvieron para comunicar a los ejércitos, pero éstos casi los dejaron inservibles. En la época de Juárez se le concedió importancia real a la Red Carretera Nacional. Posteriormente, durante el Porfiriato, el esfuerzo en materia de comunicación se volcó sobre los ferrocarriles. Poco se realizó en materia de caminos, cuyo objetivo principal fue alimentar las estaciones de los

ferrocarriles. En 1895 se expidió una ley que encargaba a los estados, la responsabilidad de la reparación y conservación de los caminos dentro de su territorio, correspondiendo ello a la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas. La clasificación del camino dependía de la cantidad de ganado que transitara; un buen camino era aquél que soportaba una recua de cien mulas (ref 9).

El Gobierno del general Plutarco Elías Calles creó la Comisión Nacional de Caminos, en 1925. Obtuvo recursos para comenzar la construcción, implantando un impuesto sobre la venta de la gasolina. Luego, durante el Gobierno del General Lázaro Cárdenas, la carretera de México a Nuevo Laredo, fue terminada en 1935. Debido a su longitud. Se consideró una de las grandes obras de ingeniería mexicana.

La Ciudad de México fue conectada entre los años 1925–1930 con las de Pachuca, Puebla, Toluca y Acapulco; la de Mérida con el Puerto de Progreso y Valladolid; y la de Monterrey con Nuevo Laredo. En la siguiente década se agregaron a la red 8,500km, con lo cual quedaba comunicado el 9% del área total de la República por el automóvil y el camión (ref 9). Cuando se terminó de unir por medio de la red de carreteras la capital del país con las de los estados, ciudades fronterizas y puertos principales, las vías se saturaron, motivando que el Gobierno federal trazara en 1952 un nuevo camino entre México y Cuernavaca. El primero con altas especificaciones, fue el tramo Amacuzac a Iguala.

Se estima que para 1970 existían 59 ciudades con más de 50,000 habitantes. Todas ellas habían quedado ligadas a la red carretera, cuya longitud sumaba ya 71,882 km.

En los años 1970-1980, el mapa carretero no se modificó con gran importancia; se terminaron tramos de la carretera transpeninsular y de la costera del Pacífico. En los siguientes años la vía de mayor relevancia fue la Mazatlán–Culiacán; en 1992, Cadereyta–Reynosa, con 18 puentes, 41 pasos a desnivel y siete entronques. Desde esa fecha hasta nuestros días, los caminos en México han ido evolucionando tanto en especificaciones como en longitud, quedando enlazados hoy por igual en cuanto a los principales centros de población, y los de producción y consumo del país.

Para el 2000, el sistema carretero mexicano contaba con alrededor de 6,500km de autopistas de cuota (5,700km federales y el resto estatales); 42,000km de carreteras federales libres; 60,000km de carreteras estatales libres; 170,000km de caminos rurales y 53,000km de brechas mejoradas.

El uso de la red carretera nacional se ha quintuplicado de 1960 a la fecha, con un crecimiento anual del 9%.

Evolución de la normativa de proyecto geométrico

Las primeras especificaciones mexicanas para proyecto geométrico, se hicieron en 1958 (ref 10). Se consideró, para el atributo económico, solamente el costo de construcción; el atributo de seguridad se estimó a través del concepto de *velocidad de proyecto*. Los demás atributos pasaron a segundo término, y se consideraban casuísticamente, siempre que no tuvieran efectos desfavorables en el monto de construcción. En ningún caso se incluyó el impacto ambiental. La normativa para el proyecto geométrico de carreteras fue generada a partir de pruebas de campo efectuadas para estudiar el comportamiento del sistema automotor, incluyendo

conductores, vehículos, etc. Todas las pruebas que se realizaron se enfocaron a los vehículos de proyecto de aquellos años. Sin embargo, los pesos, dimensiones y otras características automotrices, han variado significativamente.

En 1976, se decretó la creación de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP).

En 1977, la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, creada en 1976, publicó el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras, basado primordialmente en las investigaciones y hallazgos efectuados en países más avanzados. En 1984, la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT, realizó una síntesis de las especificaciones del antiguo manual, generándose las normas de Servicios Técnicos o las Normas SCT (ref 2). Dichas normas contienen lo necesario para proyectar geoméricamente una obra vial.

Elementos de una propuesta basada en la confiabilidad

Confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, cuando opera en el entorno para el que ha sido diseñado (ref 14). Hay cuatro atributos específicos de esta definición; probabilidad; funcionamiento adecuado; calificación con respecto al entorno; y tiempo. Los modelos de confiabilidad serán desarrollados sucesivamente, incluyendo secuencialmente en los mismos cada uno de los cuatro atributos.

Confiabilidad en el proyecto geométrico de carreteras

Los estímulos del medio ambiente que actúan sobre el conductor que posee características específicas, generan habilidades y riesgos que regulan sus decisiones. En un instante dado, dichos atributos producto de las interrelaciones entre vehículo, carretera y conductor, generan dos tipos de velocidades: la velocidad deseada o demandada por el conductor Y y la velocidad permitida u ofrecida por la carretera X .

Mediante un proceso intuitivo, el conductor compara esas velocidades, y selecciona su deseada con el fin de no sufrir un accidente.

La confiabilidad es la probabilidad de que la velocidad deseada por el conductor sea menor o igual a la ofrecida por los elementos de la carretera, esto es:

$$C = P[Y \leq X]$$

Si estas velocidades no son independientes entre sí, entonces la confiabilidad es el percentil de la distribución de frecuencias acumuladas de la velocidad deseada, y las frecuencias de los elementos de proyecto geométrico.

Los modelos mecanicistas relacionan un parámetro de diseño Q , con la velocidad deseada V , y un conjunto de parámetros característicos R de la carretera, vehículo o conductor.

Para generar los parámetros de proyecto geométrico, es posible considerar la naturaleza estocástica de la velocidad y la de los elementos del conjunto (R), que

agrupan las características del conductor, del vehículo, y de la carretera; y trabajar con la distribución de probabilidad completa de sus parámetros.

La velocidad deseada por el conductor se caracteriza por la velocidad de operación en tramos rectos, con pendiente nula, y cuya superficie de rodamiento se considera en condiciones óptimas.

Esta velocidad deseada para vías troncales, alimentadoras y locales, se caracteriza a través de una distribución de probabilidad, tipo Weibull

La consistencia caracteriza la uniformidad de todos y cada uno de los elementos de proyecto. Los parámetros distintivos de estos elementos se refieren a una mediada de confiabilidad, definida como la probabilidad de que la velocidad deseada por los usuarios exceda a la ofrecida por los elementos de la carretera, y por tanto, la fracción de conductores satisfechos con los parámetros de diseño.

La confiabilidad mínima por considerar debe de ser mayor al 50% y el diferencial de confiabilidad tolerable entre elementos sucesivos de 10% para diseños buenos, entre el 10 y el 20% para diseños aceptables; y mayores a 20% para diseños pobres.

3. Análisis de velocidades

La velocidad es un factor muy importante en todo proyecto; y factor definitivo al calificar la calidad del flujo del tránsito. Su importancia queda establecida por ser un parámetro en el cálculo de la mayoría de los demás elementos del proyecto.

Debido a los factores que afectan la velocidad, generalmente existe una diferencia significativa entre las velocidades a que viajan los diferentes vehículos, dentro de la corriente de tránsito. La velocidad representativa es la velocidad media, la cual está definida con respecto al tiempo como la suma de velocidades, dividida entre el número total de unidades consideradas. De las diversas clasificaciones de velocidad, para nuestro estudio solamente revisaremos lo referente a velocidad de proyecto.

Velocidad de proyecto es la velocidad máxima con la que los automotores pueden circular con seguridad cuando las condiciones atmosféricas y del tránsito son favorables. Los conductores no ajustan sus velocidades a la importancia de la vía, sino a las limitaciones físicas o de los volúmenes de tránsito. Algunos usuarios reusarse a cambiar la velocidad que ellos creen conveniente, a aquella de seguridad y tratan de viajar con una velocidad alta, que no está de acuerdo con el camino y las condiciones predominantes. Al proyectar un camino, es conveniente suponer una velocidad de proyecto constante, recordando que los elementos del alineamiento vertical y horizontal están íntimamente relacionados con la velocidad de proyecto.

En el caso de México, de acuerdo con su topografía, los límites superior e inferior para la velocidad de proyecto son 30km/h y 110km/h respectivamente. Asimismo, se consideran incrementos de 10km/h para la velocidad de proyecto.

Alineamiento horizontal: es la proyección del centro de línea de una obra vial sobre un plano horizontal. Se define considerando las velocidades esperadas de los vehículos que circularán por el tramo proyectado. Sus elementos son tangentes y curvas horizontales

Radio de curvatura: es la inversa proporcional del grado de curvatura que es el ángulo

subtendido por un arco de 20m.

Alineamiento vertical: Es la proyección del desarrollo del centro de línea de una vía terrestre sobre un plano vertical; sus elementos son tangentes verticales y curvas verticales.

Pendiente de la tangente: Es la relación entre el desnivel y la distancia entre dos puntos de la misma; existen tres tipos de pendientes:

- Pendiente gobernadora: Es la pendiente media que teóricamente puede darse a la línea subrasante para dominar un desnivel determinado, la mejor será aquella que al conjugar la configuración del terreno y características del tránsito, permita obtener el menor costo de construcción, conservación y operación.
- Pendiente máxima: es la mayor pendiente que se permite en el proyecto determinada por la composición, volumen del tránsito y configuración del terreno.
- Pendiente mínima: se fija para permitir el drenaje. En los terraplenes puede ser nula, en cortes se recomienda 0,5% mínimo.

Sección transversal: es un corte acorde a un plano vertical y normal al centro de línea en el alineamiento horizontal. Permite observar la disposición y las dimensiones de sus elementos que forman el camino en el punto correspondiente a cada sección y su relación con el terreno natural.

Ancho de corona: La corona forma parte integral de la sección transversal, esta es la superficie del camino terminado que queda comprendida entre los hombros del camino, o sea las aristas superiores de los taludes del terraplén y/o las anteriores de las cunetas. En la sección transversal está representada por una línea. Los elementos que definen la corona son la rasante, la pendiente transversal, la calzada y los acotamientos.

- Rasante: línea obtenida al proyectar sobre un plano vertical el desarrollo del eje de la corona del camino.
- Pendiente transversal: pendiente que se da a la corona normal a su eje según con los elementos del alineamiento horizontal; se presentan tres casos:
 1. Bombeo: pendiente que se da a la corona en las tangentes del alineamiento horizontal hacia uno y otro lado de la rasante.
 2. Sobrelevación: pendiente que se da a la corona hacia el centro de la curva para contrarrestar parcialmente el efecto de la fuerza centrífuga de un vehículo en las curvas del alineamiento horizontal.
 3. Transición del bombeo a la sobrelevación: es el alineamiento horizontal, al pasar de una sección en tangente a otra en curva.

Análisis de velocidades obtenidas en campo

Según se indicó en el capítulo 2, la ref 3 propone que las velocidades vehiculares a flujo libre para un tramo carretero determinado, siguen una distribución de probabilidades de tipo Weibull, cuya expresión general para el cálculo de la probabilidad de que la velocidad de un vehículo (Y) sea menor o igual a un valor específico (y), es la siguiente:

$$F_Y(y) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{y - \varepsilon}{\theta_Y - \varepsilon}\right)^\alpha\right] \quad 3.1$$

en donde:

- α, inverso del factor de forma
- θ_Y, factor de escala o velocidad media
- ε, límite inferior de las velocidades o velocidad mínima

La ref 3 asume que un factor de forma igual a 0,274 es válido para todos los tipos de carreteras. Lo anterior equivale a un valor para α, igual a 3,65.

Para el caso de carreteras troncales, la ref 3 considera una velocidad media θ_Y de 104km/h; en tanto que para carreteras alimentadoras, de 84km/h; y para carreteras locales, de 64km/h.

Tanto para carreteras troncales, como para alimentadores y locales, la ref 3 utiliza una velocidad mínima igual a la mitad de la velocidad media.

En los análisis que serán efectuados en las secciones siguientes se explorará, a través de pruebas estadísticas, si los supuestos involucrados en las distribuciones, tipo Weibull, asumidas son congruentes con las distribuciones de las velocidades medidas en campo, para cada tipo de carretera.

En particular, se examinará si las distribuciones de las velocidades medidas en campo siguen patrones tipo Weibull, así como si los valores específicos de los parámetros de la Weibull asumidos para cada tipo de carretera, son adecuados.

Las velocidades que se emplearon son velocidades obtenidas de los tramos y carreteras siguientes:

- Méx-Pue(31+450) sitio1
- Mex-Pue(63+200) sitio3
- La Pera-Cuautla(1+260)
- La Pera-Cuautla(1+360)

Análisis para troncales

Se aplicó una muestra de velocidades medidas en la carretera troncal México–Puebla, en el km 31+450 y en el 63+200.

En el primer sitio, km 31+450, se tomaron 90 velocidades de punto a vehículos circulantes por ellos; en tanto que en el segundo, km 63+200, se consideraron 120. En cada uno de los dos sitios anteriores, las velocidades de punto se tomaron en las inmediaciones de una curva horizontal.

Las estadísticas más relevantes para la muestra de velocidades captada en el primer punto de la carretera troncal México–Puebla (km 31+450), son: tamaño de la muestra, 90; velocidad mínima, 65,00km/h; velocidad máxima, 126,00km/h; media, 95,42km/h; y desviación estándar, 14,64km/h.

Asimismo, las estadísticas más relevantes para la muestra de velocidades tomada en el segundo punto de la carretera troncal México–Puebla (km 63+200), son: tamaño de muestra, 120; velocidad mínima, 39,00km/h; velocidad máxima, 143,00km/h; media, 92,91km/h y; desviación estándar, 19,89km/h.

En la prueba estadística de bondad de ajuste entre la distribución de frecuencias observadas y la distribución de frecuencias esperadas utilizando una distribución Weibull, se emplea como factor de escala de ésta la media de la muestra. La distribución de frecuencias observadas tiene la misma forma que la de la Weibull posicionada en el valor de la media de la muestra.

El estadístico de prueba X^2_0 se obtiene de la expresión:

$$X^2_0 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Para el primer punto considerado en la carretera troncal México-Puebla, resultó de 3 357 para el factor de forma $\beta=0,274$. El valor crítico de $X^2_{.999}$ para 16 grados de libertad, es igual a 39,3. Dado que $3\ 235 > 39,3$, al nivel de significancia de 0,001 se rechaza la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el primer punto de la carretera troncal México–Puebla (km 31+450) sigue una distribución de probabilidades tipo Weibull para un factor de forma $\beta=0,274$.

El menor valor del estadístico X^2_0 , ocurrió para una $\beta=0,55$ para la que X^2_0 mínima obtenida fue de 12,91. En este caso $12,91 < 39,3$, con significancia de 0,001 se acepta la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el primer punto de la carretera troncal México–Puebla (km 31+450) sigue una distribución de probabilidades tipo Weibull para un factor de forma $\beta=0,55$.

Para el segundo punto considerado en la carretera troncal México-Puebla (km 63+200), el estadístico de prueba X^2_0 fue de 220,38 para el factor de forma $\beta =0,274$.

En este caso, el valor crítico de $X^2_{.999}$ es igual a 39,3, dado que $220,38 > 39,3$ al nivel de significancia de 0,001 rechazamos la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 1 de la carretera sigue una distribución de probabilidades tipo Weibull para un factor de forma β igual a 0,274. El menor valor del estadístico X^2_0 , ocurrió para una β igual a 0,46 para la que X^2_0 mínima obtenida fue de 26,35. Como en este caso $26,35 < 39,3$, al nivel de significancia de 0,001 se acepta la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 2 de la carretera troncal México–Puebla (km 62+200) sigue una distribución de probabilidades tipo Weibull para un factor de forma β igual a 0,46.

Análisis para alimentadoras

En este análisis se empleó una muestra de velocidades medidas en la carretera La Pera-Cuautla en el km 1+260; y otra muestra medida en el km 1+360.

Las estadísticas más significativas para la muestra de velocidades de la carretera

troncal La Pera-Cuautla (kilometraje 1+260) son: tamaño de muestra: 137; velocidad mínima de 43,00km/h; velocidad máxima igual a 117,00km/h; media de 83,28km/h; y desviación estándar de 10,36km/h.

Para el segundo punto de la carretera La Pera-Cuautla (kilometraje 1+360), las estadísticas relevantes son: tamaño de muestra, 137; velocidad mínima, 42,00m/h; velocidad máxima, 120,00km/h; media, 85,27km/h; y desviación estándar, 10,86km/h.

El cálculo del estadístico de prueba X^2_0 para el primer punto considerado en la carretera alimentadora resultó de 30,40 para el factor de forma $\beta=0,274$. El valor crítico de $X^2_{.999}$ es de 39,3. Dado que $30,40 < 39,3$, al nivel de significancia de 0,001 se acepta la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 1 de la alimentadora La Pera-Cuautla (km 1+260) sigue una distribución de probabilidades, tipo Weibull, para un factor de forma $\beta=0,274$.

Para el segundo punto tomado en cuenta en la carretera, X^2_0 , resultó igual a 39,48 para el factor de forma $\beta=0,274$. El valor crítico de $X^2_{.999}$ es igual a 39,3. Dado que $39,48 > 39,3$, al nivel de significancia de 0,001 se rechaza la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 2 de la carretera alimentadora sigue una distribución de probabilidades, tipo Weibull, para un factor de forma β igual a 0,274. El menor valor de la estadística X^2_0 , ocurrió para una β igual a 0,46, para la que la X^2_0 mínima obtenida fue de 38,19. Como en este caso $38,19 < 39,3$, al nivel de significancia de 0,001 se acepta la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 2 de la vía alimentadora La Pera-Cuautla (km 1+360) sigue una distribución de probabilidades, tipo Weibull, para un factor de forma β igual a 0,30

A partir de los análisis realizados puede concluirse que las velocidades de los usuarios en las carreteras consideradas, siguen una distribución de probabilidades, tipo Weibull. Sin embargo, fue necesario ajustar el factor de forma β en cada caso analizado, ya que sólo en uno de ellos el valor de 0,274 recomendado para ese factor en la ref 3, resultó adecuado.

Se obtuvo la tendencia general de que el factor de forma β que mejor se ajusta a una distribución de velocidades medidas en campo, es mayor en la medida en que la media y la desviación estándar de esa muestra son mayores.

4. Algunas implicaciones económicas del concepto de confiabilidad

Se efectúa un análisis dirigido a comparar el costo de construcción de la infraestructura carretera proyectada aplicando el concepto de confiabilidad, contra el costo correspondiente con base en las normas de proyecto geométrico existentes.

Desarrollo de elementos de base

En primer lugar, se determina una línea o curva de costo de construcción por km contra velocidad de proyecto por tipo de terreno, y para los tres grupos de caminos considerados. Dichas curvas se generan a partir de información de costos de construcción registrados por la SCT para un conjunto de carreteras construidas desde 1989. Con la información de cada uno de los tramos estudiados, se generó una base de datos con los datos básicos requeridos para este análisis (tipo de carretera; longitud del tramo; año de construcción; tipo de terreno; velocidad de proyecto; ancho de corona, y

costo de construcción.

Una vez logradas las curvas de costo, con la velocidad de proyecto, tipo de camino y la velocidad deseada (de proyecto), se obtienen los costos de construcción por km correspondientes. A partir de esos valores, se desarrolla el análisis comparativo correspondiente.

Generación de curvas de costo

Con base en los principios mencionados, se generaron curvas de costo de construcción por km contra velocidad de proyecto para carreteras tipo A4, A2, B, C y E, y de acuerdo con el tipo de terreno. Las carreteras clase D son muy semejantes a las C, por lo que no se generaron curvas específicas para ellas, siendo aplicables los análisis aplicados para las tipo C.

Carreteras tipo A4

Se separó la muestra de montos de construcción por km contra velocidad de proyecto, para un conjunto de tramos dentro de esta categoría, construidos en terreno plano, en lomerío y montañoso, en 1989, 1990, 1994, 1995, 1997, 1998, 1999 y 2003.

El costo de construcción fue posteriormente transformado a su correspondiente valor en dólares, con el fin de reducir el efecto de la inflación en las cifras de los diferentes años.

El costo de construcción obtenido corresponde al promedio de una muestra de tramos para los que también se definió la velocidad de proyecto. Se ajustó la mejor línea de tendencia para la muestra de datos. El proceso se realizó para terreno plano; para cada año se generó una gráfica. Para los ajustes se obtuvieron valores de R^2 superiores a 0,78. El proceso se repitió en la muestra de datos correspondiente a terreno en lomerío, así como para la muestra de datos de suelo montañoso.

Análisis de costos

Primero se clasifica a las carreteras en troncales, alimentadoras, y locales. Luego se clasifican de acuerdo con el servicio que prestan; en relación con los atributos deseables al usuario (rapidez, seguridad, comodidad, y economía), en: autopistas, carreteras de acceso de dos o más carriles; caminos; y brechas de uno o dos carriles. Con base en estas dos clasificaciones se realiza la siguiente tipificación con fines de proyecto geométrico de carreteras; las troncales, si son autopistas, son tipo A, si son carreteras, son tipo B; las alimentadoras son carreteras tipo C; los caminos tipo D; las locales son caminos tipo E; y las brechas tipo F.

Con base en el tránsito diario promedio anual TPD, la normativa vigente en México clasifica las carreteras para proyecto geométrico, en: A de más de 3,000, en el horizonte de proyecto; B, entre 1,500 y 3,000, C; entre 500 y 1500, D; entre 100 y 500; y E, menor a 100 vehículos por día.

Con base en la tipificación de carreteras, y la clasificación vigente para proyecto geométrico, así como las curvas de costo de construcción contra velocidad de proyecto generadas en la primera parte de este capítulo, es posible realizar los análisis de impacto económico comparativo entre las clasificaciones anteriores.

Carreteras Tipo A4

Se recomienda que para fines de proyecto geométrico, se utilice una confiabilidad mínima de 50% para todos los tipos de carreteras (ref 3).

Si se entra a la gráfica para carreteras troncales con una confiabilidad mínima del 50%, se obtiene para esa confiabilidad una velocidad de proyecto de un poco más de 100km/h; para efectos prácticos se selecciona para este análisis el valor de 100 km/h.

Si se entra a las curvas de costo de construcción contra velocidad de proyecto para carreteras tipo A4 con la velocidad de proyecto de 100 km/h obtenida anteriormente, se definen los montos de construcción por km para cada tipo de terreno.

Entrando a las curvas de costo de construcción, contra velocidad de proyecto para carreteras tipo A4 con el promedio de la especificación para cada clase de carretera, se logran los costos de construcción por km para cada tipo de terreno.

El porcentaje en el que el monto de construcción por km se incrementa en: cero para terreno tipo plano; 18% para lomerío y; 43% para suelo montañoso.

En un trayecto en el que se presenten los diversos tipos de terreno, el porcentaje específico de incremento en costo de construcción, será la ponderación de los respectivos porcentajes con los porcentajes de longitud presentados en cada tipo de terreno.

El análisis anterior se realizó para Carreteras Tipo A2, B, C y E

Otros análisis

Con el fin de lograr “consistencia” a lo largo del proyecto se han propuesto los siguientes tres criterios:

- La consistencia es buena cuando el diferencial de confiabilidad tolerable entre elementos sucesivos es de 10%
- Es aceptable cuando el diferencial de confiabilidad entre elementos sucesivos esta entre 10 y 20%
- Es pobre cuando el diferencial anterior excede el 20%

Se presentan algunos análisis adicionales para los diferentes tipos de caminos, en donde a través de la variación de las velocidades de proyecto en la tercera columna, se introducen los diferenciales máximos de confiabilidad en los criterios anteriores entre segmentos sucesivos en cada uno de los tres tipos de terreno.

Para carreteras tipo A4, la variación de la velocidad de proyecto de 120 km/h para terreno plano; a 115 km/h para terreno en lomerío; y a 100 km/h para terreno montañoso, corresponde a un diferencial de confiabilidad de 10% entre los tres tipos de suelo (80, 70 y 60% respectivamente), por lo que dicha variación responde a una consistencia buena en el diseño. Si se entra a las curvas de monto de construcción con las velocidades anteriores se obtienen los costos de construcción por km para cada tipo de suelo. Por otra parte, si de la normativa existente (ref 2) se toman las velocidades de proyecto, es posible calcular para ellas los gastos de construcción correspondientes. El porcentaje de incremento en el costo de construcción es de 9% para terreno tipo plano,

aumentando a alrededor del 15% para suelo en lomerío, y a casi 25% para montañoso.

Los porcentajes anteriores confirman los resultados de los análisis de la sección anterior, en el sentido de que la introducción de los conceptos de confiabilidad y consistencia, conduce a velocidades de proyecto más elevadas, y mayores costos de construcción; aunque también a carreteras de trazo geométrico mejor y más uniforme y, por lo mismo, de mayor seguridad, mejor calidad de servicio, y menores costos operativos.

5. Conclusiones y recomendaciones

En primer lugar, se puede citar que la Norma Mexicana de Servicios Técnicos es una disposición que en términos de tecnología vehicular y de materiales carreteros, corresponde a condiciones prevalecientes hace varios años. Dicha norma así como los manuales que rigen el diseño del proyecto geométrico de carreteras exigen una actualización, ya que las condiciones tecnológicas y de diseño se han ido modificando de acuerdo con los tiempos actuales.

Así mismo, podemos identificar que el concepto de confiabilidad es un termino utilizado en Ingeniería Civil, particularmente en la Ingeniería Estructural, aplicado en el uso del factor de seguridad: pero es un concepto nuevo dentro de la Ingeniería de Vías Terrestres. La aplicación de este termino resultaría en un incremento de la seguridad de los vehículos circulantes por cualquier vía diseñada bajo dicha apreciación.

En tanto que para las vías troncales, el análisis de bondad de ajuste resultó negativo (las distribuciones de velocidades medidas en campo no siguen una distribución, tipo Weibull) para el factor de forma propuesto por la ref 3 que es de $\beta = 0,274$; dicho análisis fue positivo para valores de β de 0,46 y 0,55.

Para los caminos alimentadores, el análisis de bondad de ajuste resultó positivo para valores de β de 0.274 y 0.30.

Al realizar los distintos análisis económicos en los caminos A4, B, C y E, contra los criterios planteados en la ref 3 para una confiabilidad uniforme de 50% en todos los tipos de terreno, se obtuvo que la aplicación de dichos criterios conllevaría aumentos porcentuales en los costos de construcción, de los siguientes órdenes de magnitud:

Tabla R.1
Incrementos porcentuales en los costos de construcción

Tipo de terreno	Incremento porcentual por tipo de camino			
	A4	B	C	E
Plano	0,0	0,0	0,0	6,7
Lomerío	17,6	33,3	27,7	28,0
Montañoso	42,9	66,7	66,0	82,84

- Los resultados anteriores son reflejo de que si se aplica una misma confiabilidad en todos los tipos de terreno, ello se traduce en una misma velocidad para todos los tipos de terreno. Por otra parte, como la Norma Mexicana de Servicios

Técnicos sí reduce mucho la velocidad especificada para los tipos de suelo en lomerío y montañoso (en relación con la velocidad especificada para terreno plano); la aplicación del criterio de confiabilidad genera costos de construcción mayores y crecientes para estos tipos de terreno en relación con los que corresponderían a las velocidades especificadas en la Norma Mexicana de Servicios Técnicos. Similares resultados se obtienen si se varía la confiabilidad según el tipo de terreno, con base en los criterios de consistencia en el diseño recomendados en la ref 3.

- En síntesis, la aplicación del criterio de confiabilidad puede traer como consecuencia proyectos carreteros más congruentes con las velocidades de los usuarios y, por lo mismo, de mejores características geométricas y más seguras. También traería como consecuencia carreteras de costo de construcción significativamente mayor.

Se recomienda incorporar la confiabilidad en el proyecto geométrico de carreteras como un criterio de verificación y revisión de que lo proyectado cumpla con recomendaciones como las presentadas en la ref 3

1 Introducción

Este capítulo contiene la descripción del problema que se determinó emprender para el presente estudio. Incluye la justificación del mismo; su fundamentación teórica: generalidades; objetivos; alcances; metodología; y la utilidad del proyecto.

1.1 Descripción del problema

El proyecto geométrico se ha basado, desde hace más de 20 años, en el manual de proyecto geométrico de carreteras (ref 1), así como en las normas de la Dirección General de Servicios Técnicos, DGST (ref 2). Estas últimas han sido las normas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT, que más se han empleado recientemente.

Es evidente que los aspectos tecnológicos, científicos, sociales y culturales se han modificado de una manera significativa en todos los aspectos de la vida, por lo cual en el área de la Ingeniería se tendrán que realizar las actualizaciones correspondientes.

Considerando lo anterior, se sugiere un cambio en la aplicación y funcionamiento de las normas de la SCT. Por este motivo, se plantea la propuesta de basar el proyecto geométrico de carreteras en un concepto denominado “confiabilidad” (ref 3). La intención en el trabajo es probar la aplicación práctica del concepto, dentro de las metodologías tradicionalmente utilizadas para el proyecto geométrico de carreteras.

Se considera que el concepto de confiabilidad puede contribuir de forma notable, en los aspectos relacionados con la seguridad vial en las carreteras (ref 3).

Por las razones anteriores, se analiza la sugerencia de incluir el concepto de confiabilidad en las normas de la SCT, dicho análisis permitirá anticipar los posibles problemas derivados de su eventual aplicación, un concepto nuevo que, por el momento no ha sido probado en casos reales.

También se desea realizar una comparativa entre las teorías propuestas al respecto (ref 3) y los datos obtenidos en campo. De esta forma habrá elementos objetivos para emitir una opinión sustentada sobre la pertinencia del concepto de confiabilidad.

En síntesis, dentro de la metodología empleada tradicionalmente para definir los diversos elementos de la geometría de un proyecto carretero, paralelamente se realizarán algunos análisis específicos sobre la aplicabilidad del concepto propuesto, en relación con algunos de esos conceptos.

1.2 Generalidades

Por lo ya mencionado, los antecedentes básicos para el desarrollo del trabajo propuesto, son de dos tipos: por un lado, los relacionados con la metodología tradicionalmente utilizada para el proyecto geométrico de carreteras; y por el otro, los referentes a los aspectos comprendidos en la propuesta, y que incorpora el concepto de confiabilidad. A continuación se describen brevemente los aspectos relevantes de ambos.

1.2.1 Metodología tradicional

Antecedentes históricos

El proyecto geométrico se ha realizado desde tiempos antiguos. Los grandes constructores romanos, egipcios y mayas, entre otros, desarrollaron vías terrestres, considerando aspectos variados en sus proyectos.

En el aspecto académico, el proyecto geométrico de carreteras forma parte de una de las disciplinas de la ingeniería civil; las vías terrestres. La primera escuela de ingeniería civil se instituyó en México en 1867. De este año hasta la fecha, la ingeniería mexicana ha continuado su evolución. En el aspecto institucional, en 1891 se creó por primera vez la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, SCOP (ref 4).

La normativa para el proyecto geométrico de carreteras fue generada con base en pruebas de campo efectuadas para estudiar el comportamiento del sistema automotor, incluyendo vía, conductores y vehículos. Todas las pruebas que se realizaron fueron enfocadas a los vehículos de proyecto de aquellos años. Sin embargo, los pesos, dimensiones, potencia y otras características vehiculares, han variado significativamente.

En 1976 se decretó la creación de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, SAHOP. En 1977 se publicó el manual de proyecto geométrico de carreteras. Este manual, como muchos de los que existen en el mundo, se ha basado primordialmente en las investigaciones y hallazgos efectuados en los países más avanzados. Dicho manual tomó consideraciones de importancia del manual de la American Association of State Highway Officials, AASHO, publicado en 1965 (ref 5).

En el año de 1984, la Dirección General de Servicios Técnicos, DGST, de la SCT realizó una síntesis de las especificaciones del antiguo manual (ref 2), generándose las Normas de Servicios Técnicos o las normas SCT que más se han utilizado recientemente.

1.2.2. Etapas de una carretera

Tradicionalmente, el proyecto de una carretera involucra las siguientes etapas (ref 6):

- Planeación,
- Proyecto,
- Construcción, y
- Operación

En la etapa de planeación, se realizan estudios geográfico-físicos, económico-sociales y políticos. Mediante los estudios geográfico-físicos, se estudia la topografía del terreno. Mediante los estudios económico-sociales, se determinan las necesidades de las diferentes regiones para su desarrollo, por área económico-social (industria, ganadería, comercio, educación, costumbres, salud, etc). El aspecto político es indispensable para conocer jerarquías, procedimientos y jurisdicciones, así como para determinar la viabilidad política de los proyectos.

La etapa de proyecto incluye los siguientes pasos:

- Estudio topográfico: consiste en fijar puntos obligados técnicos y político-sociales, a partir de los cuales se realiza el trazo preliminar, y posteriormente la línea definitiva. En el trazo de la línea definitiva se consideran las características geométricas, que se definen con base en los elementos de proyecto. El proyecto geométrico incluye la determinación de curvas horizontales, curvas verticales, secciones de construcción, diagrama de masas, drenaje superficial, etc).
- Estudio de mecánica de suelos: tiene por objeto sondear y caracterizar los materiales sobre posibles rutas, y reconocimientos geológicos e hidrológicos.
- Estudio de estructuras: se encarga de los cruces del camino, cargas vivas, cargas muertas en alcantarillas, flexión transversal en el interior de los tubos, puentes, vados, drenaje subterráneo, etc.

La etapa de construcción incluye la dirección técnica de la obra; la ejecución de la misma; así como el control de mecánica de suelos y de calidad para todos los elementos de la obra en general.

La etapa de operación considera la conservación de los diferentes elementos de la carretera; la realización de estudios de tránsito para control de la circulación, demás de mecánica de suelos y pruebas de materiales para las labores de conservación, reconstrucción y modernización requeridas.

1.2.3 Metodología de proyecto geométrico

Generalmente, se han considerado tres pasos para el proyecto geométrico de una carretera: selección de ruta; anteproyecto; y proyecto (ref 1).

En el paso de selección de ruta, se obtiene la zona más ventajosa para la localización de un camino.

En el anteproyecto, se establece el trazo del camino, haciéndose necesario completar y definir los trazos recogidos previamente, a través de un levantamiento topográfico.

Una vez situado el trazo, se inicia el proyecto mediante estudios de precisión que permiten definir las características geométricas del camino; los materiales que lo forman; y los cauces que lo cruzan.

Este trabajo se circunscribe a los diferentes pasos de la metodología tradicionalmente utilizada en el proyecto geométrico de las carreteras en México.

1.2.4 Propuesta basada en el concepto de “confiabilidad”

“Confiabilidad” es un concepto nuevo en lo que respecta a la Ingeniería de Vías Terrestres, pero no así en otras áreas o ramas de la Ingeniería (sistemas, procesos, etc); incluso, dentro de la Ingeniería Civil, en el área de estructuras, es común la aplicación de este concepto.

Confiabilidad es la probabilidad de que una máquina (sistema o elemento) no falle durante un período de tiempo determinado. La ley de falla es el modelo probabilístico asociado al comportamiento del tiempo entre fallas (TEF). Las leyes o distribuciones de

probabilidad que mejor reflejan el comportamiento del TEF, son la “exponencial” y la “Weibull”.

La distribución exponencial resulta particularmente adecuada para el estudio de la confiabilidad de sistemas eléctricos; en tanto que la distribución de Weibull, lo es para sistemas mecánicos.

La distribución de probabilidad Weibull es versátil, permite modelar el cambio de la probabilidad en función del tiempo, a la vez que representar varios modelos estadísticos según sea el valor de alguno de sus parámetros.

Se ha propuesto introducir el concepto de confiabilidad en la selección de diversos elementos del proyecto geométrico de carreteras, partiendo del uso la distribución de probabilidad, tipo Weibull. Se asume que la velocidad es la variable más importante en el diseño vial. También se consideran dos tipos de velocidades: la permitida u ofrecida por el camino, y la deseada o demandada por el conductor. El usuario compara ambas velocidades, y decide cual es la más adecuada para no sufrir un accidente (ref 3).

Si la velocidad deseada excede la ofrecida por el camino, se crea una falla. Por tanto, puede caracterizarse por la probabilidad del evento complementario, o probabilidad de no falla, que es la confiabilidad. Partiendo de estos preceptos, si se asigna el valor de la confiabilidad y se conoce la velocidad deseada, podrá determinarse la velocidad que debe ofrecer la carretera (ref 3).

Bajo los principios anteriores, la confiabilidad se interpreta como la fracción de conductores satisfechos con el proyecto. Si en vez de asumir que la velocidad deseada por el conductor y la ofrecida por el camino son variables independientes, se asume que son iguales, pudiendose obtenerse que la confiabilidad sea el percentil de la velocidad deseada.

Se inicia con una clasificación de las carreteras que conforman la red nacional, de acuerdo con su importancia en relación con su contribución en la realización de las actividades económicas, políticas y sociales que requiere el país. La clasificación identifica tres tipos de vías: troncales, alimentadoras y locales. Las troncales son las que unen centros de población de más de 50,000 habitantes, cuyas actividades generan o atraen viajes de largo itinerario; las alimentadoras vinculan poblaciones medianas o pequeñas con nodos de la red troncal, destinándose a viajes de mediano o corto itinerario; y las locales, para viajes de muy corto itinerario.

Las velocidades registradas en México y en otros países, se toman como base para asignar velocidades medias en el caso de automóviles, autobuses y camiones, de acuerdo con el tipo de carretera.

Tabla 1.1
Velocidades medias, por tipo de vehículo y carretera

Tipo de vehículo	Velocidad según tipo de carretera		
	Troncales	Alimentadoras	Locales
Autos y autobuses	110	90	7
Camiones	90	70	50

A partir de las velocidades medias anteriores, se generan distribuciones probabilísticas, tipo Weibull, para las velocidades deseadas; obteniéndose a partir de las mismas, que si se desea diseñar una carretera troncal para una confiabilidad mayor de 90%, por ejemplo, la velocidad ofrecida por el camino debe ser superior a 130km/h; en tanto que si la vía es alimentadora debe de ser superior a 110km/h; para carretera, local será mayor a 80km/h (ref 3).

1.3 Justificación

La propuesta de introducir en la normativa de proyecto geométrico el concepto de “confiabilidad”, obedece a que se ha detectado que en muchos tramos carreteros, el porcentaje de vehículos que exceden la velocidad para la cual se trazaron (velocidad de proyecto) es muy elevado (por ejemplo, de más del 50%). Asimismo, se han atribuido al comportamiento anterior, más del 50% de los accidentes que ocurren en las carreteras.

Se ha propuesto diseñar los tramos carreteros, de tal manera que la confiabilidad no sea menor de cierto límite mínimo o “piso”, a lo largo de todo el tramo (por ejemplo, 90%), en vez de diseñarlo para una velocidad de proyecto. Esta última es la velocidad máxima a la cual las unidades pueden circular con seguridad sobre un tramo carretero, y que se utiliza para su trazo geométrico; o la velocidad mínima a lo largo de un tramo para la que quedarán preparados los segmentos concebidos con los estándares más restrictivos permitidos para esa velocidad (radio mínimo de curvatura, pendiente máxima, etc).

Por tanto, con la incorporación del concepto de confiabilidad se diseñarán las carreteras para mayores velocidades, más congruentes con los deseos de los usuarios, con lo cual se busca reducir los accidentes viales.

Aunque en teoría, la propuesta anterior parece conveniente, antes de incorporar el concepto de confiabilidad en la normativa, las repercusiones prácticas y técnico-económicas de ello para todos los actores relacionados con el proyecto geométrico de las carreteras (incluyendo los usuarios), deben ser analizadas, residiendo en los análisis a efectuar, la justificación de este trabajo.

1.4 Fundamentación teórica

El proyecto geométrico de un camino se basa en ciertas características físicas del conductor como usuario del camino, los vehículos y del camino mismo (ref 1). Los elementos básicos para el proyecto geométrico tratan de aspectos relacionados con el usuario como conductor; las características dimensionales y de operación de los vehículos, como unidades; estableciéndose cinco tipos de vehículos de proyecto;

características del tránsito vehicular, como es el volumen de tránsito y la velocidad; la relación entre velocidad, el volumen y la densidad; y por último, los métodos para obtener la distancia de visibilidad de parada y de rebase.

1.4.1 El usuario

La planeación y el proyecto geométrico de carreteras, así como el control y la operación del tránsito, requieren el conocimiento de las características físicas y psicológicas del usuario del camino. El ser humano, bien sea como peatón o como conductor, considerado individual o colectivamente, es el elemento crítico en la determinación de muchas de las características del tránsito.

1.4.2 El vehículo

Una carretera tiene por objeto permitir la circulación rápida, económica, segura y cómoda, de vehículos autopropulsados sujetos al control de un conductor; por tanto, debe proyectarse de acuerdo con las características del vehículo que la va a usar, y considerando en lo posible, las reacciones y limitaciones del conductor.

1.4.3 Tránsito

Al proyectar una carretera, la sección del tipo de camino; las intersecciones; los accesos; y los servicios, dependen fundamentalmente de la demanda; es decir, del volumen de tránsito que circulará en un intervalo de tiempo dado; su variación; su tasa de crecimiento; y su composición.

Un error en la determinación de la demanda de tránsito ocasionará que la carretera funcione bien solo durante el período de previsión en caso de volúmenes de tránsito muy inferiores a aquellos para los que se proyectó; o que se presenten problemas de congestión en caso contrario.

1.4.4 Volumen de tránsito

Es el volumen de vehículos que pasan por un tramo en un intervalo de tiempo dado; los intervalos más usuales son la hora y el día, teniéndose así el tránsito horario y el tránsito diario.

1.4.5 Densidad de tráfico

Es el número de unidades que se encuentran en cierta longitud de camino, en un instante dado.

1.4.6 Velocidad

La velocidad es un factor muy importante en todo proyecto, y factor definitivo al calificar la calidad del flujo de tránsito. Su importancia, como elemento básico para el proyecto, queda establecida por ser un parámetro en el cálculo de la mayoría del resto de los elementos de proyecto.

1.4.7 Distancia de visibilidad

A la longitud de carretera que un conductor ve continuamente delante de él, cuando las condiciones atmosféricas y de tránsito son favorables, se le denomina distancia de visibilidad. En general, se consideran dos distancias de visibilidad: la distancia de visibilidad de parada y la distancia de visibilidad de rebase.

Distancia de visibilidad de parada

La distancia de visibilidad de parada es la distancia de visibilidad mínima necesaria para que un conductor que transita a, o cerca de la velocidad de proyecto, capte un objeto en su trayectoria, y pueda parar su vehículo antes de llegar a él. Es la mínima distancia de visibilidad que debe proporcionarse en cualquier punto de la carretera.

Distancia de visibilidad de rebase

Se dice que un tramo de carretera tiene una distancia de visibilidad de rebase, cuando la distancia de visibilidad en ese tramo es suficiente para que el conductor pueda adelantar a otro que circula por el mismo carril, sin peligro de interferir con un tercer vehículo en sentido contrario y que se haga visible al iniciarse la maniobra.

1.5 Objetivos

El objetivo fundamental del presente trabajo es analizar la aplicabilidad del concepto de confiabilidad, a través de los pasos que constituyen las metodologías empleadas tradicionalmente en el proyecto geométrico de carreteras, para de esta forma conocer el uso práctico de dicho concepto.

1.6 Hipótesis

Si se pueden obtener resultados adecuados desde los puntos de vista práctico y técnico-económico a partir de aplicar el concepto de confiabilidad, y si además es factible corroborar los criterios contenidos en la ref 3 con base en información de campo, entonces es posible incluir dichos criterios en la normativa mexicana para el proyecto geométrico de carreteras.

1.7 Metodología

Consiste en los siguientes pasos:

- Recopilar información bibliográfica sobre el tema de confiabilidad, y algunos elementos del proyecto geométrico de carreteras en varios rubros del conocimiento
- Emplear el concepto de confiabilidad mediante las metodologías tradicionales de proyecto geométrico
- Realizar comparaciones entre los datos viales obtenidos en campo, y la recomendación de la ref 3
- Realizar análisis detallados de los pasos anteriores y de esta manera generar recomendaciones acerca de la aplicación del concepto

1.8 Contenido

Este trabajo de tesis contiene los siguientes capítulos:

El capítulo 1 contiene la introducción.

El 2 describe los antecedentes relevantes para el desarrollo del trabajo de tesis, por ejemplo, la descripción detallada del concepto de confiabilidad, las normas vigentes para el proyecto geométrico, etc.

En el capítulo 3 se compara una serie de valores específicos de proyecto desarrollados a partir del concepto de confiabilidad, contra un conjunto de datos recopilados en campo.

En el 4 se presenta un análisis sobre la aplicabilidad de los valores de proyecto desarrollados a partir del concepto de confiabilidad, con base en consideraciones de tipo práctico, económico, etc.

El capítulo 5 presenta un conjunto de conclusiones y recomendaciones derivadas de los análisis realizados en los capítulos anteriores.

1.9. Utilidad del proyecto

El concepto “confiabilidad” es nuevo, surgió de la necesidad de diseñar carreteras con características geométricas más congruentes con los deseos de velocidad de los usuarios. La aplicación del concepto anterior llevaría a generar vías más seguras. La utilidad del proyecto reside en que permitirá evaluar si la aplicación de dicho concepto se adapta desde los puntos de vista práctico y técnico-económico.

2 Antecedentes

2.1 Los caminos en México

Las principales vías terrestres en el país datan desde los tiempos prehispánicos, supuestamente construidas por los pueblos vencidos. Algunos documentos históricos refieren que los caminos prehispánicos eran simples brechas, abiertas a través de bosques y montañas; sin embargo, otros precisan que los mexicanos diseñaron y trazaron sus caminos con terracerías, recurriendo a sólidas bases de piedra, cuya superficie era revestida con grava para rellenar los intersticios, y una capa de argamasa como cemento natural, que al endurecer formaba una carpeta recia y lisa. La anchura de esas vías alcanzaba hasta ocho metros para facilitar el intenso tránsito de viajeros, de las numerosas caravanas de mercaderes, de los pains, o correos, de los tequipantlatis o mensajeros de guerra, y de numerosos topiles o tatemes (ref 7).

Algunas de las vías más importantes fueron:

- De Tenochtitlan a Texcoco, Teotihuacan y Tollancingo (ref 8). En esta última población, se iniciaban dos vías: una a Papantla, en la costa del golfo, y la otra a Veracruz, de donde continuaba casi paralelamente a la costa hasta la región maya
- De Tenochtitlan a Xicalanco
- De Tenochtitlan a Atlixco, Cholula, Tecamachalco y Xicalanco, desde donde partían dos rutas: una a Tlaxiaco, en la región mixtecozapoteca y la otra a Tehuantepec, Tuxtla y Centroamérica

Numerosos caminos comunicaban a la federación de estados, que integraban el mundo Maya. Ciudades como Cobá y Uxmal, eran centros de donde partían redes de caminos que tuvieron la particularidad de atravesar el manto de agua de las lagunas. Éstos fueron llamados caminos de agua, que se conectaban con la vereda o el sendero, y que a su vez se unían con los anchos caminos terraceados, o sacbés, que enlazaban a los grandes centros ceremoniales, como el de Cobá, en Quintana Roo, y a Chichén Itzá, en Yucatán, que se dice medía 100km, con anchura de 9.5m.

Durante la época de la Independencia, los caminos sirvieron para comunicar a los ejércitos, pero éstos casi los dejaron inservibles. De hecho, una de las causas por las cuales México perdió los territorios de Nueva California, Texas y Nuevo México fue por la falta de infraestructura carretera.

El Gobierno del presidente Juárez fue el primero en conceder una importancia real a la red carretera nacional. Después de la muerte de Juárez los principales caminos eran:

- De México a Puebla, Jalapa y Veracruz
- De Orizaba a Córdoba
- De México a Pachuca, Tulancingo y Tuxpan
- De Huejutla a Tampico
- De México a Querétaro y San Luis Potosí

- De Ciudad Victoria a Matamoros
- De Monterrey a Piedras Negras
- De Aguascalientes a Zacatecas, Durango y Mazatlán
- De Ciudad del Maíz a Tampico
- De Guanajuato a Lagos de Moreno y Aguascalientes
- De México a Cuernavaca, Chilpancingo y Acapulco
- De México a Toluca, Morelia y Guadalajara
- De Zapotlán a Colima y Manzanillo
- De Guadalajara a San Blas
- De Tonalá a San Cristóbal y Frontera
- De Campeche a Calkiní, Mérida y Progreso

Durante el Porfiriato, el esfuerzo en materia de comunicación estuvo volcado sobre los ferrocarriles. Poco se realizó en materia de caminos. La construcción de éstos no sobrepasó los 1000km y el objetivo principal era alimentar las estaciones de la red ferroviaria y en menor cuantía, conectar zonas que carecían de medio de transporte. En 1895, se expidió una ley que encargaba a los estados, la responsabilidad de la reparación y conservación de los caminos dentro de su territorio, correspondiendo la responsabilidad a la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas. La clasificación del camino dependía de la cantidad de ganado que transitara; un buen, camino era aquél que soportaba una recua de cien mulas (ref 9).

Hasta 1910, eran transitables los siguientes caminos, construidos o reparados:

- De Mérida a Progreso
- De Mérida a Campeche
- De Jalapa a Perote
- De Matehuala a Linares
- De Guadalajara a San Blas
- De Guaymas a Punta Blanco
- De Comitán a San Benito
- De San Juan Bautista a San Cristóbal las Casas
- De Oaxaca a Miahuatlán y a Puerto Ángel
- De Tula de Tamaulipas a Ciudad Victoria
- De Linares a Saltillo
- De Galeana a Ciénega del Toro
- De Querétaro a Guadalajara

- De Guadalajara a Ahuacatlán y a Tepic
- De México a Querétaro
- De México a Toluca
- De México a Veracruz por Orizaba y Córdoba
- De Mazatlán a Culiacán
- De Chiapa de Corzo a la Frontera con Guatemala
- De Iguala a Chilpancingo
- De Huamantla a Nautla
- De Puebla a Oaxaca por Tehuacán
- De Toluca a Morelia

El 13 de mayo de 1891, se promulgó una ley expedida por el Congreso, en virtud de la cual se establecía la distribución de los quehaceres públicos del Poder Ejecutivo en siete Secretarías de Estado, entre ellas figuraba por primera vez la de Comunicaciones y Obras Públicas, lo que viene a significar un cambio en la política de construcción de caminos, considerándose que las carreteras y su desarrollo eran indispensables para impulsar la economía del país.

Se creó una Secretaría que contenía 12 departamentos:

- Correos internos
- Vías marítimas de comunicación o vapores
- Faros
- Unión postal universal
- Telégrafos y teléfonos
- Ferrocarriles, monumentos
- Carreteras
- Calzadas y puentes
- Lagos y canales
- Consejería y obras con el palacio nacional y Chapultepec
- Desagüe del valle de México

La Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas conservó su estructura institucional durante el período revolucionario.

El Gobierno del general Plutarco Elías Calles, creó la Comisión Nacional de Caminos, en 1925. Obtuvo recursos para comenzar la construcción, a través de un impuesto sobre la venta de la gasolina.

Durante el Gobierno del General Lázaro Cárdenas, la carretera de México a Nuevo Laredo. Fue terminada en 1935, debido a su longitud. Fue una de las grandes obras de

ingeniería mexicana.

La Ciudad de México se conectó entre los años 1925–1930 con las de Pachuca, Puebla, Toluca y Acapulco; la de Mérida con el puerto de Progreso y Valladolid, y la de Monterrey con Nuevo Laredo.

En la siguiente década se agregaron a la red 8,500km, con lo cual quedaba comunicado el 9% del área de la República por automóvil y camiones (ref 9).

Cuando se terminó de unir por medio de la red de carreteras, la capital de la república con las de los estados, ciudades fronterizas y puertos principales, las vías se saturaron, motivando que el Gobierno Federal construyera en 1952 un nuevo camino entre México y Cuernavaca.

El primer camino de altas especificaciones que se construyó fue el tramo Amacuzac a Iguala. Le siguieron:

- De México a Cuernavaca, en 1952
- De Cuernavaca a Amacuzac, en 1954
- De México a Palmillas, en 1958
- De México a Puebla, en 1962
- De la Pera a Cuautla, en 1965
- De Puebla a Córdoba, en 1966
- De México a Tecamac, en 1967
- Del entronque Morelos a Pirámides, en 1967
- De Tijuana a Ensenada, en 1967
- De Querétaro a Irapuato, en 1968
- De Zapotlanejo a Guadalajara, en 1969
- De Chapalilla a Compostela, en 1973

De igual forma se añadieron importantes rutas troncales, como la de Saltillo a Guadalajara, y de ésta a Barra de Navidad. También estuvo la llamada carretera transpeninsular en Baja California, que fue terminada en 1973. Entre 1960 y 1970 se calcula que cerca de cuatro millones de personas emigraron del campo a las ciudades; y que para 1970 existían 59 ciudades con más de 50,000 mil habitantes. Todas ellas habían quedado ligadas a la red carretera, cuya longitud sumaba ya 71,882km.

En los años 1970-1980, el mapa carretero no se modificó con gran importancia; se terminaron tramos de la carretera transpeninsular y de la costera del Pacífico.

En los siguientes años la carretera de mayor relevancia fue la Mazatlán–Culiacán en 1992, siguiéndole Cadereyta–Reynosa, con 18 puentes, 41 pasos a desnivel, y siete entronques.

De esta fecha hasta nuestros días, los caminos en México han ido evolucionando tanto en especificaciones como en longitud, quedando enlazados hoy por igual, tanto a los

principales centros de población, como a los de producción y consumo del país.

Para el 2000, el sistema carretero mexicano contaba con alrededor de 6,500km de autopistas de cuota (5,700km federales y el resto estatales); 42,000km de carreteras federales libres, 60,000km de carreteras estatales libres, 170,000km de caminos rurales, y 53,000km de brechas mejoradas.

En sus diferentes modalidades, por este sistema se movilizan anualmente más de 2,700 millones de personas y alrededor de 620 millones de toneladas de carga, lo que lo convierte en el principal medio de traslado en el país; equivalente al 60% del tonelaje total de carga que circula por el territorio, y al 98% de los pasajeros.

El uso de la red carretera del país se ha quintuplicado de 1960 a la fecha, con un crecimiento anual del 9%.

2.2 Evolución de la normativa de proyecto geométrico

2.2.1 Normativa mexicana

Las primeras especificaciones mexicanas para proyecto geométrico se hicieron en 1958 (ref 10) bajo la premisa de que *México necesita más caminos antes que mejores caminos*, lo que se justificó por el escaso tránsito de entonces, y por la urgente necesidad de completar la Red Nacional de Carreteras. Por ello, se consideró para el atributo económico, solamente el costo de construcción; el atributo de seguridad, se consideró a través del concepto de *velocidad de proyecto*. Los demás atributos pasaron a segundo término, y se consideraban casuísticamente, siempre que no tuvieran efectos desfavorables en el monto de construcción. En ningún caso, se estimó el impacto ambiental

En 1891 se creó la Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas, SCOP (ref 9).

La normativa para el proyecto geométrico de carreteras se generó a partir de pruebas de campo efectuadas para estudiar el comportamiento del sistema automotor, incluyendo conductores, vehículos, etc. Todas las pruebas se enfocaron a los vehículos de proyecto de aquellos años. Sin embargo, los pesos, dimensiones y otras características vehiculares, han variado significativamente.

En 1976 se decretó la creación de la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP). En 1977, se publicó el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras. Este manual, como muchos de los que existen, se ha basado primordialmente en las investigaciones y hallazgos en los países más avanzados. En dicho manual se tomaron consideraciones de importancia del manual de la American Association of State Highway Officials (AASHO), publicado en 1965 (ref 5).

En 1984, la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT, realizó una síntesis de las especificaciones del antiguo manual (ref 2), generándose las normas de Servicios Técnicos o las Normas SCT que más se han utilizado recientemente.

Las normas de Servicios Técnicos comprenden lo necesario para proyectar geométricamente una obra vial; y contienen el significado de algunos términos más

usados en la norma.

El documento anterior comprende los términos que pueden tener varias y distintas acepciones en el lenguaje común, de las que se toma el significado taxativo con que se definen. Comprende las palabras cuyo significado o acepción será el que se indica. Abarca las de otros idiomas, o adaptaciones libres de ellas, que sin equivalencia castellana son, sin embargo, términos de uso común en el medio técnico en que se emplean estas normas. No se formulan definiciones de aquellos términos cuyo significado o interpretación son suficientemente conocidos, precisos y claros.

La tabla 2.1 corresponde a un resumen de especificaciones extraído de las normas de Servicios Técnicos, según las diferentes categorías de caminos consideradas con fines de proyecto geométrico.

Tabla 2.1
Clasificación y características de las carreteras

Concepto		Unidad	E					D					C					B					A									
TDPA en el horizonte de proyecto		Veh/día	Hasta 100					100 a 500					500 a 1,500					1,500 a 3,000					más de 3,000									
Terreno	Montañoso		██████████					██████████					██████████					██████████					██████████									
	Lomerío		██████████					██████████					██████████					██████████					██████████									
	Plano		██████████					██████████					██████████					██████████					██████████									
Velocidad de proyecto	Km/h	30	40	50	60	70	30	40	50	60	70	40	50	60	70	80	90	100	50	60	70	80	90	100	110	60	70	80	90	100	110	
Distancia de visibilidad de parada	m	30	40	55	75	95	30	40	55	75	95	40	55	75	95	115	135	155	55	75	95	115	135	155	175	75	95	115	135	155	175	
Distancia de visibilidad de rebase	m	Na	Na	Na	Na	Na	135	100	225	270	315	180	225	270	315	360	405	450	225	270	315	360	405	450	495	270	315	360	405	450	495	
Grado máximo de curvatura	°	60	30	17	11	7.5	60	30	17	11	7.5	30	17	11	7.5	5.5	4.25	3.25	17	11	7.5	5.5	4.25	3.25	2.75	11	7.5	5.5	4.25	3.25	2.75	
Curvas verticales	K cresta	m/%	4	7	12	23	36	3	4	8	14	20	4	8	14	20	31	43	57	8	14	20	31	43	57	72	14	20	31	43	57	72
	K columpio	m/%	4	7	10	15	20	4	7	10	15	20	7	10	15	20	25	31	37	10	15	20	25	31	37	43	15	20	25	31	37	43
	Longitud mínima	m	20	30	30	40	40	20	30	30	40	40	30	30	40	40	50	50	60	30	40	40	50	50	60	60	40	40	50	50	60	60
Pendiente gobernadora	%	9					8					6					5					4										
		7					6					5					4					3										
		Na					Na					Na					Na					Na										
Pendiente máxima	%	13					12					8					7					6										
		10					9					7					6					5										
		7					6					5					4					4										
Ancho de calzada	m	4.0					6.0					6.0					7.0					A2	A4	A4S								
		7.0					2 x 7.0					2 x 7.0																				
Ancho de corona	m	4.0					6.0					7.0					9.0					12.0	22.0	2 x 11.0								
Ancho de acotamientos	m	Na					Na					0.5					1.0					Ver fig.002										
Ancho de faja separadora central	m	Na					Na					Na					Na					Ver fig.002										
Bombeo	%	3					3					2					2					Ver fig.002										
Sobreelevación máxima	%	10					10					10					10					Ver fig.002										

2.2.2 Normativa internacional

En España, en 1964 y 1976 se aprobaron respectivamente las “Características Geométricas: Trazado”, y su Norma complementaria “Trazado de Autopistas”. Esta serie de libros sería el homólogo para la parte mexicana “Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras”, y “Normas de Servicios Técnicos”. Al igual que nuestros libros, la edición española sufrió una revisión y actualización.

En el caso de la normativa estadounidense, ésta se desarrolló por el Comité en turno de carreteras, nombrado Comité de Planeación y Diseño de Normas (políticas), establecido en 1937 para formular y recomendar normas ingenieriles acerca de las carreteras.

En 1954 y 1965, se publicaron las políticas en diseño geométrico para carreteras rurales. En 1957, se editó la política para calles principales, o arterias urbanas. En 1973, se generaron los estándares para el diseño geométrico para el sistema interestatal y de defensa nacional de carreteras. En 1969 se publicaron los estándares para el diseño geométrico para carreteras y autopistas. En 1984, fue la Norma de Diseño Geométrico para Calles y Carreteras. En 1990, se actualizaron las normas de la AASHTO, publicándose en un sólo volumen lo correspondiente a carreteras y vialidades urbanas (ref 11).

Las normas de la AASHTO se desarrollan de la siguiente manera:

1. El Comité selecciona los temas a tratar;
2. El subcomité encargado, en este caso el Subcomité de Diseño encargado del proyecto geométrico, revisa y analiza la información y datos relevantes, y presenta una propuesta tentativa de norma; se realizan juntas de trabajo que revisan la propuesta; de ser necesario, la propuesta es vuelta a revisar por el Subcomité, hasta que se llega a un acuerdo mutuo.
3. La propuesta ya redactada es aprobada por el Comité de Aprobación de Carreteras y el Comité Ejecutivo de Aprobaciones. La norma y estándares deben ser adoptados por dos tercios de los miembros del Departamento, antes de su publicación. Durante el proceso de desarrollo, se toman en cuenta los comentarios y se consideran de todos los estados; la Administración Federal de Carreteras; representantes de la Asociación de Trabajos Públicos Norteamericana, Asociación Nacional de Ingenieros y otras Dependencias u Organizaciones interesadas.

En el caso canadiense, existe la Asociación de Transporte de Canadá, TAC, por sus siglas en inglés. Es nacional, multimodal, organizada multijurisdiccional, con la misión de promover la provisión de los servicios de transporte de una manera segura, eficiente, efectiva, y ecológicamente sustentable, con el fin de cumplir las metas sociales y económicas de la nación. De esta manera, el TAC actúa como foro neutral para discutir los problemas, servicios y enfoques técnicos del transporte en todo el campo de los caminos (diseño geométrico).

El TAC, es guiado y dirigido por la Asociación de Jefes Ingenieros; la parte administrativa, es patrocinada por: Infraestructura de Alberta; Ministerio de Transporte y Autopistas de Columbia Británica; Gobierno de los Territorios del Noroeste; Gobierno de Yukón; Transporte y Autopistas de Manitoa; Ministerio de Transporte de Québec;

Ministerio de Transporte de Notario; Ministerio de Transporte de Nueva Brunswick; Departamento de Servicios; Trabajos y Transporte de Newfoundland; Transporte y Trabajos Públicos de Nueva Escocia; Transporte y Trabajos Públicos PEI; Transporte y Autopistas de Saskatchewan; Transporte de Canadá.

Existe un Manual de Diseño Geométrico para Caminos Canadienses (ref 12). Éste sigue la misma metodología que el Manual de la AASHTO de EU, que es un compendio de normas, políticas, y manual que se aplica como norma de acuerdo con el estado donde se emplee.

2.3 Elementos de una propuesta basada en la confiabilidad

2.3.1 Distribuciones continuas de probabilidad

La probabilidad mide la mayor o menor posibilidad de que se dé un determinado resultado (suceso) cuando se realiza un experimento aleatorio, en donde la probabilidad toma valores entre 0 y 1 (referencia13).

Eventos independientes son cuando la ocurrencia o no-ocurrencia de un evento no tiene efecto sobre la probabilidad de ocurrencia de otro evento (o eventos). Un caso típico de eventos independientes, es el muestreo con reposición; es decir, una vez tomada la muestra se regresa de nuevo a la población donde se obtuvo.

Eventos dependientes son cuando la ocurrencia o no-ocurrencia de uno de ellos afecta la probabilidad de ocurrencia del otro (u otros). Cuando se tiene este caso, se emplea entonces el concepto de probabilidad condicional para determinar la probabilidad del evento relacionado.

La fig 2.1 presenta un esquema de efectividad, el cual se basa en los siguientes componentes y definiciones:

- **Efectividad:** probabilidad de que el sistema (máquina o equipo) realice las funciones requeridas, conforme a los estándares establecidos durante un periodo determinado
- **Equipo de reserva**
- **Probabilidad de falla inaceptable (muy caro):** falla de alto costo (en los aviones se manejan equipos adicionales; “se llaman equipos imposibles”)
- **Disponibilidad:** probabilidad de que una máquina (sistema o elemento) esté disponible para la operación (conforme a los estándares requeridos), durante un determinado periodo de tiempo
- **Confiabilidad:** “probabilidad de que una máquina (sistema o elemento) no falle”, durante un periodo de tiempo determinado. Este concepto se analiza con mayor profundidad más adelante

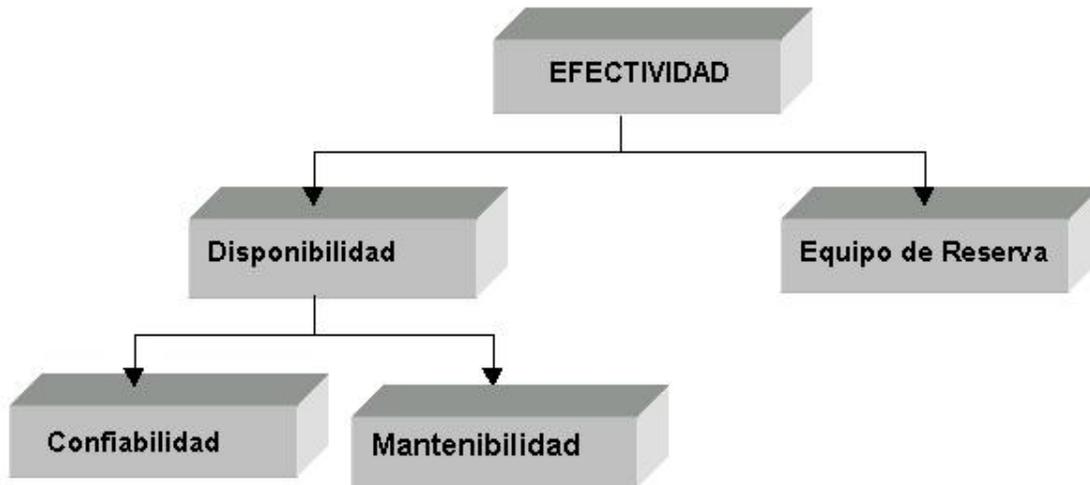


Fig 2.1
Componentes de la efectividad

- **Mantenibilidad**: probabilidad de que el sistema (máquina o equipo) realice las funciones requeridas, conforme a los estándares establecidos, durante un periodo determinado. Capacidad de volverlo al servicio en caso de falla. La mantenibilidad está para evitar problemas; para esto está la confiabilidad
- **Mecanismos de falla**: los mecanismos de falla es una información interesante para poder determinar la forma (tendencia) de la tasa de falla para así poder predecir la falla a partir del tiempo de operación.
- **Ley de falla f(t)**: modelo probabilístico asociado al comportamiento del tiempo entre fallas. Las leyes de falla que mejor parecen reflejar el comportamiento del tiempo esperado de falla, TEF, son la “exponencial” y la “Weibull”.
- **Ley exponencial**: resulta particularmente adecuada para el estudio de la confiabilidad de sistemas eléctricos, en tanto que la ley de Weibull, lo es para sistemas mecánicos

2.3.2 Distribuciones, tipo Weibull

La tecnología moderna ha permitido diseñar muchos sistemas complicados cuya operación, o tal vez seguridad, dependen de la confiabilidad de los diversos componentes del sistema.

La distribución de Weibull es en gran medida, el modelo estadístico más popular del mundo para los datos de vida. También se utiliza en muchos otros casos, tales como pronóstico de tiempo y datos apropiados de todas clases. Entre las técnicas estadísticas suele aplicarse en el análisis de la Ingeniería, con tamaños de muestra más pequeños que cualquier otro método

Dos o más eventos son independientes, cuando la ocurrencia o no-ocurrencia de un

suceso no tiene efecto sobre la probabilidad de ocurrencia de otro evento (o eventos). Un caso típico de eventos independientes es el muestreo con reposición; es decir, una vez tomada la muestra se regresa de nuevo a la población donde se obtuvo

Dos o más eventos serán dependientes cuando la ocurrencia o no-ocurrencia de uno de ellos afecta la probabilidad de ocurrencia del otro (u otros). Cuando tenemos este caso, empleamos entonces, el concepto de probabilidad condicional para determinar la probabilidad del suceso relacionado. La expresión $P(A/B)$ indica la probabilidad de ocurrencia del evento A sí el evento B. Se debe tener en claro que A/B no es una fracción.

2.3.2.1 La distribución, tipo Weibull en la ingeniería

En la industria eólica es muy importante, ser capaz de describir la variación de las velocidades del viento. Los proyectistas de turbinas necesitan la información para optimizar el diseño de sus aerogeneradores, así como para minimizar los costos de generación. Los inversores requieren la información para estimar sus ingresos por producción de electricidad

Si se miden las velocidades del viento a lo largo de un año, se observará que en la mayoría de áreas los fuertes vendavales son raros; mientras que los vientos frescos y moderados, son bastante comunes.

La variación del viento en un emplazamiento típico suele describirse utilizando la llamada distribución de Weibull, como la mostrada en el dibujo. Este emplazamiento particular tiene una velocidad media del viento de 7m/s, y la forma de la curva la determina un parámetro de forma igual a 2.

La distribución estadística de las velocidades eólicas varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje, y de su superficie. Por tanto, la distribución de Weibull suele variar tanto en la forma como en el valor medio.

Si el parámetro de forma es exactamente 2, como en la fig 2.2, la distribución se conoce como distribución de Rayleigh. Los fabricantes de aerogeneradores proporcionan gráficas de rendimiento para sus máquinas, usando la distribución de Rayleigh.

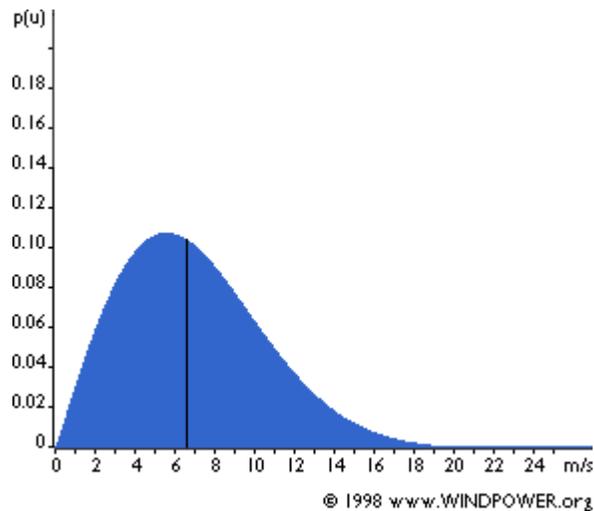


Figura 2.2.
Curva de distribución de Weibul

Otra forma de obtener la velocidad media del viento es equilibrando el montón de bloques hacia la derecha, que representa exactamente lo mismo que la gráfica de arriba. Cada bloque representa la probabilidad de que el viento sople a esa velocidad durante un 1% del tiempo durante un año: las velocidades de 1 m/s están en la cima de más, a la izquierda, mientras que las de 17m/s están en el periodo de más, a la derecha.

El punto en el que la cima se equilibrará exactamente será en la séptima tendencia, con lo que la velocidad media del viento resultaría de 7m/s.

2.3.2.2 Confiabilidad

Confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo realice adecuadamente su función prevista a lo largo del tiempo, cuando opera en el entorno para el que se diseña (ref 14).

Debe observarse que hay cuatro atributos específicos de esta definición. Estos son: 1) probabilidad; 2) un funcionamiento adecuado; 3) calificación con respecto al entorno; y 4) tiempo. Los cuatro son importantes. Así, los modelos de confiabilidad se desarrollaron sucesivamente, incluyendo secuencialmente en los mismos cada uno de los cuatro atributos.

Las siguientes definiciones son pertinentes:

- **Probabilidad:** el resultado general que se busca es poder cuantificar la posibilidad de no fallar. Así, la probabilidad es la unidad de medida de la confiabilidad. Además, se espera poder expresar la probabilidad de funcionamiento del sistema en términos de los componentes que lo integran.

- **Funcionamiento adecuado:** el punto de partida para el estudio de la confiabilidad, es el funcionamiento correcto. Anteriormente, no definimos el correcto funcionamiento. En cambio, señalamos el hecho de que el complemento del funcionamiento correcto, es el fallo.
- **Entorno:** para examinar las relaciones entre el entorno de funcionamiento y la confiabilidad, comenzamos con la pregunta de por qué fallan los equipos. Una respuesta razonable, es que normalmente el fallo de un sistema se debe al fallo o fallos de uno o varios componentes. Esta es una razón por la que los modelos de estructura componentes-sistema son importantes. ¿Entonces por qué fallan los componentes? Una respuesta verosímil es que la operación de un sistema implica la imposición de fuerzas (energía) sobre el sistema y sus componentes. Estas fuerzas inducen y sostienen el progreso de varios tipos de procesos de deterioro, los cuales finalmente tienen como resultado el fallo de componentes.
- **Tiempo:** la confiabilidad es la probabilidad de funcionamiento satisfactorio a lo largo del tiempo. El supuesto subyacente implícito es que en una muestra de dispositivos idénticos, la supervivencia (o duración de vida) se dispersa en una manera que se modela bien con la probabilidad y, por tanto, con una función de distribución. Por eso, la extensión de las medidas de fiabilidad para incluir el tiempo implica la especificación de las distribuciones de probabilidad, las cuales deben ser modelos razonables de la dispersión de duración de vida.

2.3.3 La confiabilidad en la ingeniería civil

2.3.3.1 Factor de seguridad y confiabilidad estructural

Se entiende por seguridad evitar que la estructura o elemento alcance o sobrepase un estado límite hasta el cuál, se considera que el comportamiento es aceptable. Tal estado límite es la falla o colapso de un elemento, o de la estructura completa. Para establecer una medida cuantitativa de la seguridad se introduce el concepto de factor de seguridad cuya evaluación requiere comparar la “demanda” de resistencia (solicitud o carga) con la capacidad “suministrada” a la estructura (su resistencia máxima) (ref 15).

El estudio de seguridad de un sistema estructural implica tomar en cuenta la aleatoriedad del sistema en si mismo, y de las solicitaciones a las que esta sometido.

Se supone la geometría determinista, y se toma en cuenta el carácter aleatorio de las resistencias y de las solicitaciones; para sistemas estructurales con comportamiento ideal, se puede establecer funciones simples que representan los estados límite de falla del sistema.

Estas funciones de estado del sistema pueden ser descritas por las distribuciones de probabilidad conjunta de las variables de base; y la probabilidad de falla del sistema, se puede obtener a través de la evaluación de las integrales de convulsión apropiadas (ref 16).

Para el análisis de la seguridad estructural, se considera separadamente la solicitud S , o carga aplicada; y la resistencia R , o capacidad de un elemento. Como variables

aleatorias sus valores no son determinísticos; es decir, que no pueden fijarse con precisión, sino describirse por una función de distribución de probabilidad o función de densidad de probabilidad. En el problema de confiabilidad estructural hay que aclarar que al referirse a la resistencia r de un elemento, se piensa no sólo en la capacidad del material que lo constituye, sino en el conjunto de variables que intervienen en la resistencia.

Confiabilidad de sistemas estructurales

La teoría de confiabilidad se enfoca a problemas de confiabilidad del tipo de estado límite; es decir, problemas definidos por una división del espacio de formulación n – dimensional de las variables de base $\{X\} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ en dos conjuntos de puntos; un conjunto ligado a un conjunto de seguridad s ; y otro ligado a un conjunto complemento de falla f . La hipótesis que constituye la frontera parcial de $s =$ parcial de f se llama la superficie de estado límite, y está convencionalmente considera como un subconjunto de falla.

Confiabilidad en el proyecto geométrico de carreteras

Los estímulos del medio ambiente que actúan sobre el conductor que posee características específicas, generan habilidades y riesgos que regulan sus decisiones. En un instante dado, dichos atributos producto de las interrelaciones entre vehículo, carretera y conductor, generan dos tipos de velocidades: la velocidad deseada o demandada por el conductor (Y), y la velocidad permitida u ofrecida por la carretera (X).

Mediante un proceso intuitivo, el conductor compara esas velocidades y selecciona su velocidad deseada con el fin de no sufrir un accidente.

La confiabilidad es la probabilidad de que la velocidad deseada por el conductor sea menor o igual a la velocidad ofrecida por los elementos de la carretera, esto es:

$$C = P[Y \leq X]$$

Si se considera que estas velocidades no son independientes entre sí y, según el criterio de consistencia, que la velocidad permitida por los elementos de la carretera sean iguales a los correspondientes a la velocidad demandada por el conductor, entonces la confiabilidad es el percentil de la distribución de frecuencias acumuladas de la velocidad deseada, y las frecuencias de los elementos de proyecto geométrico.

Los modelos mecanicistas relacionan un parámetro de diseño (Q) con la velocidad deseada (V), y un conjunto de parámetros característicos (R) de la carretera, vehículo o conductor.

Para generar los parámetros de proyecto geométrico, es posible considerar la naturaleza estocástica de la velocidad y la de los elementos del conjunto (R), que agrupan las características del conductor, del vehículo y de la carretera, y trabajar con la distribución de probabilidad completa de sus parámetros.

La velocidad deseada por el conductor se caracteriza por la velocidad de operación en

tramos rectos; con pendiente nula y cuya superficie de rodamiento se considera en condiciones óptimas.

Esta velocidad deseada para vías troncales, alimentadoras y locales, se caracterizan a través de una distribución de probabilidad, tipo Weibull, con los parámetros que se señalan a continuación:

- Vías troncales, W (0,274;110;55)
- Vías alimentadoras, W (0,274;90;45)
- Vías locales, W (0,274;70;35)

La distribución de la velocidad deseada, se muestran en la figura 2.3

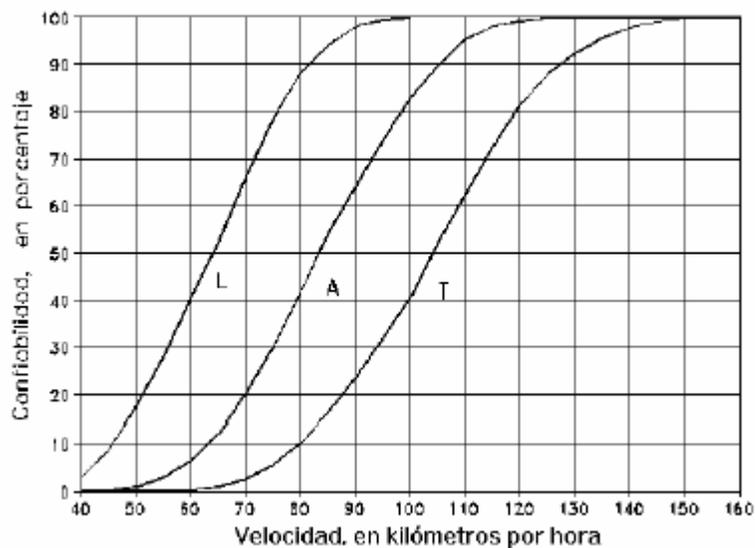


Fig 2.3
Distribución de las velocidades deseadas

Notas:

- T vías troncales (unen centros de población de más de 50 mil habitantes, cuyas actividades generan o atraen viajes de largo itinerario)
- A vías alimentadoras (unen poblaciones medianas o pequeñas con nodos de la red troncal, utilizándose para viajes de mediano o corto itinerario)
- L vías locales (utilizadas para viajes de muy corto itinerario)

La consistencia caracteriza la uniformidad de todos y cada uno de los elementos de proyecto. Los parámetros distintivos de estos elementos se refieren a una mediada de confiabilidad; definida como la probabilidad de que la velocidad deseada por los conductores exceda a la ofrecida por los elementos de la carretera y por tanto, la fracción de conductores satisfechos con los parámetros de diseño.

La confiabilidad mínima por considerar, debe de ser mayor al 50% y el diferencial de confiabilidad tolerable entre elementos sucesivos de 10% para diseños buenos, entre el 10 y el 20% para diseños aceptables; y mayores a 20% para diseños pobres.

3 Análisis de velocidades

En este capítulo inicialmente se describen algunos conceptos de utilidad para los fines del trabajo, relacionados con la velocidad de los vehículos en las carreteras, y el proyecto de las mismas. Posteriormente, se efectúan algunos análisis estadísticos para verificar si el comportamiento de las velocidades vehiculares en las carreteras, es congruente con la distribución de probabilidad, tipo Weibull, tal como se asume en la ref 3.

3.1 Algunos conceptos útiles relacionados con la velocidad

La velocidad es un factor muy importante en todo proyecto, y factor definitivo al calificar la calidad del flujo del tránsito. Su importancia, como elemento básico para el proyecto, queda establecida por ser un parámetro en el cálculo de la mayoría de los demás elementos del proyecto.

Con excepción de una condición de flujo forzado, existe una diferencia significativa entre las velocidades a que viajan los diferentes vehículos dentro de la corriente de tránsito. Esto es a consecuencia del número de factores que afectan la velocidad, como son las limitaciones del conductor; las características de operación del vehículo; la presencia de otros automotores, las condiciones ambientales y las limitaciones de velocidad.

Frecuentemente, la velocidad representativa es la velocidad media, la cual se define con respecto al tiempo, como la suma de velocidades dividida entre el número total de unidades consideradas.

Existen varias clasificaciones dentro de la velocidad:

- Velocidad de punto
- Velocidad de marcha
- Velocidad de operación
- Velocidad de proyecto
- Velocidad de proyecto ponderada

Para nuestro estudio, solamente revisaremos lo referente a velocidad de proyecto.

3.1.1 Velocidad de proyecto

Es la velocidad máxima con la que los vehículos pueden circular con seguridad sobre un camino, cuando las condiciones atmosféricas y del tránsito son favorables. Un camino en terreno plano o con lomerío suave, justifica una velocidad de proyecto mayor que en un terreno tipo montañoso. Un camino con un gran volumen de tránsito, justifica una velocidad de proyecto mayor que uno con menor volumen de tránsito.

Los usuarios no ajustan sus velocidades a la importancia del camino, sino a las

limitaciones físicas o de los volúmenes de tránsito. En algunos casos, los conductores se muestran renuentes a cambiar la velocidad que ellos creen conveniente, a aquella de seguridad y tratan de viajar con una velocidad alta, que no va de acuerdo con el camino y con las condiciones predominantes. Es conveniente al proyectar un camino, suponer una velocidad de proyecto constante. Hay que recordar que los elementos del alineamiento vertical y del alineamiento horizontal, están íntimamente relacionados con la velocidad de proyecto.

En el caso de México, de acuerdo con su topografía, los límites superior e inferior para la velocidad de proyecto son 30km/h y 110km/h respectivamente. Asimismo, se consideran incrementos de 10km/h para la velocidad de proyecto.

A continuación se anexa una tabla donde se exponen las diferentes velocidades de proyecto en algunos países de la Unión Europea y Estados Unidos. En la tabla puede percibirse que México se encuentra cerca de la media.

Tabla 3.1
Unión Europea: velocidades de proyecto (límites de velocidad)

País	Velocidades por tipo de camino, y tipo de vehículo			
	Alimentadores y locales (Outside towns/motorroutes*)		Troncales (Expressway /motorway)	
	Automóvil y motocicleta	Vehículos de carga	Automóvil y motocicleta	Vehículos de carga
Austria	100 (65)	100 (65)4	130 (80)	100 (65)5
Bélgica	90 (55)	90 (55)	120 (75)	120 (75)
Croacia	80 (50)/100 (65)	80 (50)	130 (80)	80 (50)
Chipre	80 (50)	80 (50)	100 (65)	100 (65)
Republica Checa	90 (55)/130 (80)	80 (50)	130 (80)	80 (50)
Dinamarca	80 (50)	80 (50)	130 (80)	80 (50)
Finlandia	80 (50)/100 (65)	60 (40)/80 (50)	120 (75)	80 (50)
Francia	90 (55)/110 (70)	90 (55)/110 (70)	130 (80)	130 (80)
Alemania	100 (65)	80 (50)	130 (80)1	80 (50)/100 (65)6
Grecia (PKW)	90 (55)	80 (50)	120 (75)	80 (50)
Grecia (motocicletas)	70 (45)		90 (55)	
Hungría	90 (55)/110 (70)	70 (45)	130 (80)	80 (50)
Irlanda7	80 (50)/100 (65)	80 (50)/100 (65)	120 (75)	80 (50)
Italia	90 (55)/130 (80)2	70 (45)	130 (80)/150 (95)3	80 (50)
Liechtenstein	80 (50)	80 (50)		
Malta	64 (40)	64 (40)		
Holanda	80 (50)/100 (65)	80 (50)	120 (75)	80 (50)
Noruega	80 (50)	80 (50)	90 (55)/100 (65)8	80 (50)
Polonia	90 (55)	70 (45)	130 (80)	80 (50)
Portugal	90 (55) /100 (65)	70 (45)/80 (50)	120 (75)	100 (65)
Eslovaquia	90 (55)	80 (50)	130 (80)	80 (50)
Eslovenia	90 (55)/100 (65)	80 (50)	130 (80)	80 (50)
España	90 (55)/100 (65)	70 (45)/80 (50)	120 (75)	80 (50)
Suecia	70 (45)/90 (55)	80 (50)	110 (70)	80 (50)
Suiza	80 (50)/100 (65)	80 (50)	120 (75)	80 (50)
Turquía	90 (55)/130 (80)	70 (45)	130 (80)	70 (45)
Reino Unido	95 (60) /110 (70)	80 (50)/95 (60)	110 (70)	95 (60)

Notas: Las unidades de las velocidades son km/h; las que están en paréntesis son mph

Motorroutes: Dos o más carriles con faja separadora (carril doble) con una velocidad media de 60km/h (40 mph).

En la mayoría de las ciudades y pueblos, el límite es de 50km/h (30mph)

1 130 (80) es la velocidad recomendada (en la mayoría de los caminos alemanes, aunque 120 (75) es el máximo).

2 Para motocicletas 110 (70).

3 Caminos de dos carriles: 130 (80); caminos de tres carriles: 150 (95) (desde 2003 el límite de velocidad es de 150km/h (95mph) y solamente es válido cuando está indicado).

4 Vehículo ligero con remolque: 80 (50); vehículo de carga con remolque: 70 (45).

5 Vehículo ligero con remolque: 100 (65); vehículo de carga con remolque: 80 (50).

6 Necesita la autorización de la autoridad de Inspección Técnica Alemana (TÜV).

7 Efectivo hasta el 20 de enero, 2005

8 El límite de velocidad de 100km/h en algunos caminos se hizo permanente, hasta que el número de accidentes se reduzca.

9 En el Reino Unido, los señalamientos actualmente aparecen en millas por hora, eventualmente cambiarán

Tabla 3.2
Estados Unidos: velocidades de proyecto (límites de velocidad)

Tipo de camino	Velocidad de proyecto (límite de velocidad)
Zonas escolares	15-25mph (20-40km/h)
Calles en ciudades o pueblos	25-30mph (40-50km/h)
Avenida importante dentro de la ciudad, o por la periferia	35-45mph (60-70km/h)
Carreteras locales o municipales	45-65mph (70-100km/h)
Autopistas estatales y rurales	55-70mph (90-110km/h)

Tabla 3.3
Canadá: velocidades de proyecto (límites de velocidad)

Tipo de Camino	Velocidad de proyecto (límite de velocidad)
Zonas escolares	30km/h (20mph)
Calles en ciudades o pueblos	40-50km/h (25-30mph)
Avenida importante dentro de la ciudad, o por la periferia	80-90km/h (50-55mph)
Carreteras locales o municipales	45-65 mph (70-100km/h)
Autopistas estatales y rurales	100-110km/h (65-70 mph)

Nota:

Existe más de un límite de velocidad para cada camino; usualmente están indicados de acuerdo con las provincias. Sin embargo, sin importar las provincias, caminos de la misma clasificación pueden tener diferente límite de velocidad, por ejemplo, en Alberta algunas autopistas tienen el límite de 100km/h, mientras que otras tienen el límite de 110km/h, pero en Ontario, todas las autopistas manejan el límite de 100km/h.

Tabla 3.4
China: velocidades de proyecto (límites de velocidad)

Tipo de camino	Velocidad de proyecto (límite de velocidad)
Avenida importante dentro de la ciudad o por la periferia.	80km/h
Carreteras locales o municipales.	Alrededor de 100km/h
Autopistas estatales y rurales	120km/h -110km/h

Nota:

En algunas llamadas "vías rápidas" en las ciudades, el límite puede ser superior a 80km/h. Sin embargo, los límites son de 70km/h, 60km/h, o incluso 50km/h. Los límites menores en las autopistas son variados, pero en general son de 60km/h incluso dentro de congestionamientos, de acuerdo con la ley. El carril derecho tiene un límite menor de 110km/h, y el segundo carril de 90-100km/h. (El segundo carril sólo tiene límite si existen más carriles, y así de manera subsiguiente tercero, cuarto carril, etc)

Tabla 3.5
Australia: velocidades de proyecto (límites de velocidad)

Tipo de camino	Velocidad de proyecto (límite de velocidad)
Zonas escolares	40km/h y 25km/h en sur de Australia
Caminos suburbanos	50km/h (en la mayoría de estados)
Avenida importante dentro de la ciudad, o por la periferia	60km/h
Caminos que entronquen con caminos alimentadores	80km/h
Autopistas estatales y rurales	100km/h
Autopistas nacionales	100 o 110km/h

Nota:

Algunos estados no tienen zonas de 50km/h; estos límites se han incluido recientemente. En el territorio del norte no existen límites de velocidad en los caminos

Tabla 3.6
Nueva Zelanda: velocidades de proyecto (límites de velocidad)

Tipo de camino	Velocidad de proyecto (límite de velocidad)
Zonas escolares y sitios con alto índice de accidentes	20km/h
Caminos suburbanos	30km/h
Calles y caminos dentro de la ciudad	50km/h
Caminos que entronquen con caminos alimentadores.	80km/h
Autopistas estatales y rurales	100km/h

Nota:

Existen restricciones de baja velocidad para ciertos vehículos:

90km/h para camiones

80km/h para autobuses escolares y para tractocamiones

70km/h para motocicletas

Tabla 3.7
Venezuela: velocidades de proyecto (límites de velocidad)

Tipo de Camino	Velocidad de proyecto (límite de velocidad)
Carretera en llano	90-120km/h
Carretera en terreno muy ondulado	80-100km/h
Carretera en terreno montañoso	60-80km/h

3.1.2 Alineamiento horizontal

Es la proyección del centro de línea de una obra vial sobre un plano horizontal. Se define considerando las velocidades esperadas de los vehículos que circularán por el tramo proyectado. Sus elementos son tangentes y curvas horizontales.

3.1.2.1 Radio de curvatura

Es la inversa proporcional del grado de curvatura que es el ángulo subtendido por un arco de 20m.

3.1.3 Alineamiento vertical

Es la proyección del desarrollo del centro de línea de una vía terrestre sobre un plano vertical; sus elementos son tangentes verticales y curvas verticales.

3.1.3.1 Pendiente de la tangente

Es la relación entre el desnivel y la distancia entre dos puntos de la misma; existen tres tipos de pendientes:

- Pendiente gobernadora: Es la pendiente media que teóricamente puede darse a la línea subrasante para dominar un desnivel determinado, la mejor será aquella que al conjugar la configuración del terreno y características del tránsito, permita obtener el menor costo de construcción, conservación y operación.
- Pendiente máxima: es la mayor pendiente que se permite en el proyecto determinada por la composición, volumen del tránsito y configuración del terreno.
- Pendiente mínima: se fija para permitir el drenaje. En los terraplenes puede ser nula, en cortes se recomienda 0,5% mínimo.

3.1.4 Sección transversal

Es un corte acorde con un plano vertical y normal al centro de línea en el alineamiento horizontal. Permite observar la disposición y las dimensiones de sus elementos, que forman el camino en el punto correspondiente a cada sección, y su relación con el terreno natural.

3.1.4.1 Ancho de corona

La corona forma parte integral de la sección transversal; esta es la superficie del camino terminado, comprendida entre los hombros del camino, o sea las aristas superiores de los taludes del terraplén, y/o las anteriores de las cunetas. En la sección transversal se representa por una línea. Los elementos que definen la corona son la rasante, la pendiente transversal, la calzada, y los acotamientos.

- Rasante: línea obtenida al proyectar sobre un plano vertical, el desarrollo del eje de la corona del camino.
- Pendiente transversal: pendiente que se da a la corona normal a su eje, según los elementos del alineamiento horizontal; se presentan tres casos:
- Bombeo: pendiente que se da a la corona en las tangentes del alineamiento horizontal, hacia uno y otro lado de la rasante.

- **Sobrelavación:** pendiente que se da a la corona hacia el centro de la curva, para contrarrestar parcialmente el efecto de la fuerza centrífuga de un vehículo en las curvas del alineamiento horizontal.
- **Transición del bombeo a la sobrelevación:** es el alineamiento horizontal, al pasar de una sección en tangente a otra en curva.

3.2 Análisis de velocidades obtenidas en campo

3.2.1 Principios del Análisis

Según se indicó en el capítulo 2, la ref 3 propone que las velocidades vehiculares a flujo libre para un tramo carretero determinado, siguen una distribución de probabilidades, de tipo Weibull, cuya expresión general para el cálculo de la probabilidad de que la velocidad de un vehículo (Y) sea menor o igual a un valor específico (y), es la siguiente:

$$F_Y(y) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{y - \varepsilon}{\theta_Y - \varepsilon}\right)^\alpha\right] \quad 3.1$$

Donde:

- α , el inverso del factor de forma
- θ_Y , el factor de escala o velocidad media
- ε , el límite inferior de las velocidades, o velocidad mínima

La ref 3 asume que un factor de forma igual a 0,274 es válido para todos los tipos de carreteras. Lo anterior equivale a un valor para α , igual a 3,65.

Para el caso de carreteras troncales, la ref 3 considera una velocidad media θ_Y de 104km/h; en tanto que para vías alimentadoras, de 84km/h; y para carreteras locales, de 64km/h.

Tanto para carreteras troncales, como para alimentadoras y locales, la ref 3 utiliza una velocidad mínima igual a la mitad de la velocidad media.

La tabla 3.8 sintetiza los valores de los tres parámetros anteriores, los cuales dan lugar a la fig 2.3 para cada tipo de carretera.

Tabla 3.8
Parámetros de la función de probabilidad tipo Weibull, para los distintos tipos de carreteras

Tipo de carretera	Factor de forma (β)	Inverso del factor de forma (α)	Factor de escala (θ_Y)	límite inferior (ε)
Troncales	0,274	3,65	110	52
Alimentadoras	0,274	3,65	90	43
Locales	0,274	3,65	70	35

En los análisis que se efectuarán en las secciones siguientes se explorará, a través de

pruebas estadísticas, si los supuestos involucrados en las distribuciones, tipo Weibull, asumidas son congruentes con las distribuciones de las velocidades medidas en campo, para cada tipo de carretera.

En particular, se examinará si las distribuciones de las velocidades medidas en campo siguen patrones, tipo Weibull; así como si los valores específicos de los parámetros de la Weibull asumidos para cada tipo de carretera, son adecuados.

Las velocidades que se emplearon son velocidades obtenidas de los tramos y carreteras siguientes:

- México-Puebla (31+450) sitio1
- México-Puebla (63+200) sitio3
- La Pera-Cuautla (1+260)
- La Pera-Cuautla (1+360)

3.2.2 Análisis para troncales

Para este caso, se utilizó una muestra de velocidades medidas en la carretera México–Puebla, en el kilometraje (31+450) y en el (63+200). Esta vía se considera como troncal dentro de la tipología de caminos propuesta por la ref 3, ya que une centros de población de más de 50,000 habitantes; cuenta con control de accesos, y cuatro o más carriles; de igual forma por sus características geométricas.

En el primer sitio (km 31+450) se tomaron 90 velocidades de punto a vehículos circulantes por ellos; en tanto que en el segundo (km 63+200) se consideraron 120. En cada uno de los dos sitios anteriores, las velocidades de punto se registraron en las inmediaciones de una curva horizontal.

Para tomar todas las velocidades de punto de todas las carreteras (troncales, alimentadoras, y locales), se utilizó el siguiente equipo:

- GPS Magellan, ProMARK X
- Pistola láser, Laser Technology, Markamna
- Radar, tipo pistola Kustom Signals, Falcon
- Cinta métrica, Lufkin, 30m
- Odómetro. Meter-man, 45m
- 4 radios comunicadores, portátiles Motorola, 481609003NT
- Cámara fotográfica digital, Vivitar, Vivicam 3625
- Cámara de video, Sony, CCDTRV65PK/HE32
- Computadora portatil, Dell, Latitude C840 Intel Pentium IV a1,8 Ghz

Las estadísticas más relevantes para la muestra de velocidades tomada en el primer punto de la carretera troncal México–Puebla (km 31+450), son:

- Tamaño de la muestra: 90
- Velocidad mínima: 65,00km/h
- Velocidad máxima: 126,00km/h
- Media: 95,42km/h
- Desviación estándar: 14,64km/h

Asimismo, las estadísticas más relevantes para la muestra de velocidades tomada en el segundo punto de la carretera troncal México–Puebla (km 63+200), son:

- Tamaño de la muestra: 120
- Velocidad mínima: 39,00km/h
- Velocidad máxima: 143,00km/h
- Media: 92,91km/h
- Desviación estándar: 19,89km/h

El análisis realizado consistió en efectuar una prueba estadística de bondad de ajuste entre la distribución de frecuencias observadas (a partir de la muestra) y la distribución de frecuencias esperadas utilizando una distribución Weibull, pero empleando como factor de escala de ésta, la media de la muestra. Con lo anterior se está probando que la distribución de las frecuencias observadas, tiene la misma forma que la de la Weibull posicionada en el valor de la media de la muestra. En la ref 20 se presenta en detalle la prueba estadística efectuada.

En la prueba de bondad de ajuste utilizada, hay que calcular el valor estadístico de prueba X^2_0 mediante la siguiente expresión:

$$X^2_0 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

Las columnas dos y tres de la tabla 3.9 presentan los valores necesarios para el cálculo de la estadística de prueba X^2_0 para el primer punto considerado en la carretera troncal México-Puebla, obteniéndose un valor igual a 3,357 para el factor de forma $\beta=0,274$.

El valor crítico de $X^2_{.999}$ para 16 grados de libertad, que corresponde a 20 rangos menos tres parámetros para la Weibull, que son el factor de forma (β); el factor de escala y el límite inferior (ϵ), es igual a 39,3. Dado que $3,235 > 39,3$, al nivel de significancia de 0,001, rechazamos la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 1 de la carretera troncal México–Puebla (km 31+450), sigue una distribución de probabilidades, tipo Weibull, para un factor de forma $\beta=0,274$.

El procedimiento anterior se repitió consecutivamente, variando cada vez el valor de β hasta obtener el menor valor de la estadística X^2_0 , lo cual ocurrió para una $\beta=0,55$ para la que la X^2_0 mínima obtenida fue de 12,91. Como en este caso $12,91 < 39,3$, al nivel de

significancia de 0,001 se acepta la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 1 de la carretera troncal México–Puebla (km 31+450), sigue una distribución de probabilidades, tipo Weibull, para un factor de forma $\beta=0,55$.

Tabla 3.9
México–Puebla (km 31+450): frecuencias observadas y esperadas en el primer punto

Velocidad Rango, en km/h	Frecuencia observada	Frecuencia esperada	
		$\beta=0,274$	$\beta=0,55$
10 - 20	0,0	-	-
20 - 30	0,0	-	-
30 - 40	0,0	-	-
40 - 50	0,0	-	-
50 - 60	0,0	-	-
60 - 70	2,0	0,1	-
70 - 80	12,0	6,4	-
80 - 90	16,0	28,2	7,42
90 - 100	29,0	38,2	28,34
100 - 110	16,0	15,6	36,22
110 - 120	8,0	1,4	15,90
120 - 130	7,0	0,0	1,90
130 - 140	0,0	0,0	0,04
140 - 150	0,0	0,0	0,00
150 - 160	0,0	0,0	0,00
160 - 170	0,0	0,0	0,0
170 - 180	0,0	0,0	0,0
180 - 190	0,0	0,0	0,0
190 - 200	0,0	0,0	0,0

Para el segundo punto considerado en la carretera troncal México-Puebla (km 63+200), las columnas dos y tres de la tabla 3.10 presentan los valores necesarios para el cálculo de la estadística de prueba X^2_0 , obteniéndose un valor igual a 220,38 para el factor de forma $\beta =0,274$.

El valor crítico de $X^2_{.999}$ para 16 grados de libertad, que corresponde a 20 rangos menos tres parámetros para la Weibull, que son el factor de forma (β); el factor de escala; y el límite inferior (ϵ), es igual a 39.3. Dado que $220,38 > 39,3$ al nivel de significancia de 0,001, se rechaza la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 1 de la carretera troncal México–Puebla (km 62+200) sigue una distribución de probabilidades, tipo Weibull, para un factor de forma β igual a 0.274.

El procedimiento anterior se repitió consecutivamente, variando cada vez el valor de β hasta obtener el menor valor de la estadística X^2_0 , lo cual ocurrió para una β igual a 0,46 para la que la X^2_0 mínima obtenida, fue de 26,35. Como en este caso $26,35 < 39,3$,

al nivel de significancia de 0,001, se acepta la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 2 de la carretera troncal México–Puebla (km 62+200) sigue una distribución de probabilidades, tipo Weibull, para un factor de forma β igual a 0,46.

Tabla 3.10
México–Puebla (km 63+200): frecuencias observadas y esperadas en el primer punto

Velocidad Rango, en km/h	Frecuencia observada	Frecuencia esperada	
		$\beta=0,274$	$\beta=0,46$
10 - 20	0,0	-	-
20 - 30	0,0	-	-
30 - 40	1,0	-	-
40 - 50	9,0	0,36	3,68
50 - 60	7,0	3,42	10,74
60 - 70	14,0	11,13	16,62
70 - 80	16,0	22,05	19,76
80 - 90	31,0	30,01	19,71
90 - 100	21,0	28,06	17,06
100 - 110	14,0	17,16	13,01
110 - 120	5,0	6,36	8,82
120 - 130	1,0	1,31	5,33
130 - 140	1,0	0,13	2,89
140 - 150	0,0	0,01	1,40
150 - 160	0,0	0,0	0,61
160 - 170	0,0	0,0	0,24
170 - 180	0,0	0,0	0,08
180 - 190	0,0	0,0	0,03
190 - 200	0,0	0,0	0,00

3.2.3 Análisis para alimentadoras

En este análisis se empleó una muestra de velocidades medidas en la carretera La Pera-Cuautla en el km 1+260, y otra muestra medida en el km 1+360. Esta vía se considera como alimentadora dentro de la tipología de carreteras propuesta por la ref 3, ya que una poblaciones medianas con nodos en la red troncal, considerando, asimismo sus características geométricas.

Las estadísticas más relevantes para la muestra de velocidades de la carretera troncal La Pera-Cuautla (kilometraje 1+260) considerada para este tipo de carretera, son:

- Tamaño de la muestra: 137
- Velocidad mínima: 43,00km/h
- Velocidad máxima: 117,00km/h

- Media: 83,28km/h
- Desviación estándar 10,36km/h

De igual forma, las estadísticas más relevantes para la muestra de velocidades tomada en el segundo punto de la carretera alimentadora La Pera-Cuautla (kilometraje 1+360) considerada para este tipo de carretera, son:

- Tamaño de la muestra: 137
- Velocidad mínima: 42,00m/h
- Velocidad máxima: 120,00km/h
- Media: 85,27km/h
- Desviación estándar: 10,86km/h

Realizando el mismo tipo de análisis que para la carretera México-Puebla, las columnas dos y tres de la tabla 3.11 presentan los valores necesarios para el cálculo de la estadística de prueba X^2_0 , para el primer punto considerado en la carretera alimentadora La Pera-Cuautla, obteniéndose un valor igual a 30,40 para el factor de forma $\beta=0,274$.

El valor crítico de $X^2_{.999}$ para 16 grados de libertad, que corresponde a 20 rangos menos tres parámetros para la Weibull, que son el factor de forma (β); el factor de escala; y el límite inferior (ϵ), es igual a 39,3. Dado que $30.40 < 39.3$ al nivel de significancia de 0.001; se acepta la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 1 de la carretera alimentadora La Pera – Cuautla (km 1+260) sigue una distribución de probabilidades, tipo Weibull, para un factor de forma $\beta=0,274$.

Para el segundo punto considerado en la carretera La Pera-Cuautla, las columnas dos y tres de la tabla 3.12 presentan los valores necesarios para el cálculo de la estadística de prueba X^2_0 , obteniéndose un valor igual a 39,48 para el factor de forma $\beta=0.274$.

El valor crítico de $X^2_{.999}$ para 16 grados de libertad, que corresponde a 20 rangos menos tres parámetros para la Weibull, que son el factor de forma (β), el factor de escala y el límite inferior (ϵ), es igual a 39,3. Dado que $39,48 > 39,3$, al nivel de significancia de 0.001 se rechaza la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 2 de la carretera alimentadora La Pera-Cuautla (km 1+360), sigue una distribución de probabilidades, tipo Weibull, para un factor de forma β igual a 0,274.

El procedimiento anterior se repitió consecutivamente, variando cada vez el valor de β hasta obtener el menor valor de la estadística X^2_0 , lo cual ocurrió para una β igual a 0,46 para la que la X^2_0 mínima obtenida, fue de 38,19. Como en este caso $38,19 < 39,3$, al nivel de significancia de 0,001, se acepta la hipótesis de que la muestra de velocidades tomada en el punto 2 de la carretera alimentadora La Pera-Cuautla (kilometraje 1+360), sigue una distribución de probabilidades tipo, Weibull, para un factor de forma β igual a 0,30.

Tabla 3.11
La Pera–Cuautla (km 1+260): frecuencias observadas
y esperadas en el primer punto

Velocidad Rango, en km/h	Frecuencia	
	observada	esperada $\beta=0.274$
10 - 20	0,0	-
20 - 30	0,0	-
30 - 40	0,0	-
40 - 50	1,0	-
50 - 60	2,0	-
60 - 70	7,0	5,52
70 - 80	40,0	22,63
80 - 90	50,0	42,80
90 - 100	29,0	42,14
100 - 110	5,0	19,74
110 - 120	3,0	3,71
120 - 130	0,0	0,22
130 - 140	0,0	0,00
140 - 150	0,0	0,00
150 - 160	0,0	0,00
160 - 170	0,0	0,00
170 - 180	0,0	0,00
180 - 190	0,0	0,00
190 - 200	0,0	0,00

Tabla 3.12
La Pera–Cuautla (km 1+360): frecuencias observadas y esperadas en el segundo punto

Velocidad Rango, en km/h	Frecuencia observada	Frecuencia esperada	
		$\beta=0,274$	$\beta=0,30$
10 - 20	0,0	-	-
20 - 30	0,0	-	-
30 - 40	1,0	-	-
40 - 50	2,0	-	-
50 - 60	7,0	-	-
60 - 70	31,0	4,99	6,69
70 - 80	56,0	19,19	21,05
80 - 90	32,0	37,31	35,81
90 - 100	5,0	41,65	37,74
100 - 110	3,0	25,30	24,30
110 - 120	0,0	7,38	8,98
120 - 130	0,0	0,88	1,74
130 - 140	0,0	0,03	0,16
140 - 150	0,0	0,00	0,01
150 - 160	0,0	0,0	0,00
160 - 170	0,0	0,0	0,00
170 - 180	0,0	0,0	0,00
180 - 190	0,0	0,0	0,00
190 - 200	0,0	0,0	0,00

3.2.4 Conclusión

A partir de los análisis realizados en este capítulo, puede concluirse que las velocidades de los usuarios en las carreteras consideradas, efectivamente siguen una distribución de probabilidades, tipo Weibull. Sin embargo, fue necesario ajustar el factor de forma β en cada caso analizado, ya que sólo en uno de ellos el valor de 0,274 recomendado para ese factor en la ref 3, resultó adecuado.

Se obtuvo la tendencia general de que el factor de forma β que mejor se ajusta a una distribución de velocidades medidas en campo, es mayor en la medida en que la media y la desviación estándar de esa muestra, son mayores.

4 Algunas implicaciones económicas del concepto de confiabilidad

En este capítulo, primordialmente se efectúa un análisis dirigido a comparar el costo de construcción de la infraestructura carretera proyectada, aplicando el concepto de confiabilidad según las recomendaciones de la ref 3, contra el costo correspondiente aplicando las normas de proyecto geométrico existentes (ref 2).

En una primera parte de este capítulo se desarrolla un conjunto de elementos de base, los cuales posteriormente se utilizan en una segunda parte, para el análisis comparativo de costos.

4.1 Desarrollo de elementos de base

4.1.1. Principios del análisis

El análisis se basa en la determinación, en primer lugar, de una línea o curva de costo de construcción por km contra velocidad de proyecto, por tipo de terreno y para los tres tipos de caminos considerados en la ref 3.

Las curvas anteriores se generan a partir de información de costos de construcción registrados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), en carreteras de dicho organismo en los últimos años.

Específicamente, para un conjunto de carreteras efectuadas desde 1989 hasta la fecha, se obtuvieron los costos de construcción para tramos en distintos tipos de terreno (plano, lomerío, o montañoso), diseñados con diferentes velocidades de proyecto.

Los tipos de las carreteras construidas oscilan desde A hasta E; abarcando con ello, la gama de categorías incluidas en la ref 3 (troncales, alimentadoras y locales).

Con la información de cada uno de los tramos considerados, se generó una base de datos conteniendo los datos básicos requeridos para este análisis. Estos datos son:

- Tipo de carretera. Se refiere al tipo de carretera al que corresponde el tramo, entre las diferentes categorías de la ref 2 (A4, A2, B, C, D y E)
- Longitud del tramo. Se refiere a la longitud del tramo construido, en km
- Año de construcción. Se refiere al año en que fue realizada la construcción del tramo (desde 1989 hasta 2004)
- Tipo de terreno. Se refiere al tipo de terreno en el que fue construido el tramo, entre plano, lomerío y montañoso
- Velocidad de proyecto. Se refiere a la velocidad para la que fue diseñado el tramo según planos de proyecto, en km/h
- Ancho de corona. Se refiere a la superficie terminada de una carretera, comprendida entre los dos hombros del camino

- Costo de construcción. Se refiere al costo total de construcción del tramo, en pesos del año en el que se realizó la obra

Aunque en general, para todos los tramos se obtuvieron mucho más datos; en la lista anterior sólo se incluyen aquéllos relevantes para los análisis efectuados.

En segundo lugar, una vez obtenidas las curvas de costo se puede entrar a ellas con la velocidad de proyecto recomendada por las especificaciones para un tipo de camino en especial (ref 2); así como con la velocidad de deseada (de proyecto) conforme la ref 3, obteniéndose los costos de construcción por km correspondientes.

A partir de los valores de costo así obtenidos, se desarrolla el análisis comparativo correspondiente.

4.1.2 Generación de curvas de costo

Con base en los principios mencionados, se generaron curvas de costo de construcción por km contra velocidad de proyecto, para carreteras tipo A4, A2, B, C y E.

Para cada una de las categorías anteriores de camino, se generaron tres curvas: una para terreno plano, otra para lomerío, y otra para montañoso

Dado que las carreteras tipo D, son muy semejantes a las tipo C, no se generaron curvas específicas para carreteras tipo D, siendo aplicables a estas últimas los análisis para las carreteras tipo C.

4.1.2.1 Carreteras tipo A4

Se separó la muestra de costos de construcción por km contra velocidad de proyecto, para un conjunto de tramos dentro de esta categoría, construidos en terreno plano, en lomerío y montañoso, en 1989, 1990, 1994, 1995, 1997, 1998, 1999 y 2003.

La tabla 4.1 presenta el costo promedio registrado en cada uno de los ocho años anteriores, en pesos corrientes de cada año, para los tramos construidos en los tres tipos de terreno.

El costo de construcción en la tabla 4.1 fue posteriormente transformado a su correspondiente valor en dólares, con el fin de reducir el efecto de la inflación en las cifras de los diferentes años.

Para la transformación de los costos de construcción de la tabla 4.1, a sus correspondientes valores en dólares, se utilizó la información sobre la evolución histórica del tipo de cambio en la tabla 4.2.

La tabla 4.3 presenta los costos de construcción por km en dólares, obtenidos a partir de la transformación efectuada.

Tabla 4.1
Caminos A4: costo de construcción promedio (pesos corrientes/km)

Año	Plano	Lomerío	Montañoso
1989	1 519 700,00	2 314 400,00	3 556 400,00 ¹
1990	2 320 000,00	3 230 000,00	5 160 000,00 ¹
1993	2 582,00	3 595,00	5 743,00 ²
1994	2 540,00	3 537,00	5 650,00 ²
1995	3 144,00	4 377,00	6 992,00 ²
1997	8 273,00	11 518,00	18 401,00 ²
1998	9 440,00	13 143,00	20 996,00 ²
1999	10 992,16	15 303,74	24 448,08 ²
2003	20 000,00	38 000,00	65 000,00 ²

Notas:

- 1 Millones de pesos
- 2 Miles de pesos

Tabla 4.2
Paridad histórica del peso frente al dólar

Paridad histórica peso–dólar					
Año	Pesos por dólar	Fecha			Pesos por dólar
		Día	Mes	Año	
1915	11,15	19	Diciembre	1994	3,47
1930	2,65	20	Diciembre	1994	4,00
1939	5,19	31	Diciembre	1994	5,32
1949	8,65		Enero	1995	7,10
1953	12,50		Enero	1996	7,45
1976	20,00		Enero	1997	7,85
1977	22,60		Enero	1998	8,20
1980	23,35		Enero	1999	10,55
1981	26,50		Enero	2000	9,55
1982	150,00		Enero	2001	9,80
1983	162,00		Enero	2002	9,25
1984	210,00		Enero	2003	10,60
1985	420,00		Enero	2004	11,23
1986	920,00				
1987	1 560,00				
1988	2 300,00				
1989	2 700,00				
1990	2 950,00				
1991	3 080,00				
1992	3 100,00				
1993	N\$3.12				
1994	N\$3.33				

Notas:

- 1 La paridad se refiere al promedio anual hasta 1994. A partir de ahí se señala el mes específico
- 2 A partir del 1 de enero de 1993, se cancelaron tres ceros a la paridad, dando lugar a los nuevos pesos N\$, denominación que se conservó hasta 1995
- 3 Con base en el Índice General de Precios al Consumidor a partir de 1952. Para fechas anteriores, se consultaron fuentes oficiales diversas

Tabla 4.3
Caminos A4: costo de construcción promedio
(miles de dólares/km)

Año	Plano	Lomerío	Montañoso
1989	562,85	857,19	1 317,19
1990	786,44	1 094,92	1 749,15
1993	827,56	1 152,24	1 840,71
1994	477,44	664,85	1 062,03
1995	442,82	616,48	984,79
1997	1 053,89	1 467,26	2 344,08
1998	1 151,22	1 602,80	2 560,49
1999	1 041,91	1 450,59	2 317,35
2003	1 886,80	3 584,91	6 132,08

El costo de construcción en cada celda de la tabla 4.2 corresponde al promedio de una muestra de tramos para los que también se obtuvo la velocidad de proyecto.

La muestra correspondiente a cada celda se puso en una hoja del programa Excel, utilizándose posteriormente el asistente para gráficos de ese programa, para ajustar la mejor línea de tendencia a esa muestra de datos.

El proceso anterior, repetido para terreno plano y para todos los años, generó la gráfica de la fig 4.1.

Cabe destacar que para los ajustes anteriores, se obtuvieron valores de R^2 superiores a **0.78**. Al ser estos valores cercanos a 1, indican que las líneas o curvas de tendencia se apegaron adecuadamente a los datos utilizados como base para su obtención.

La muestra anterior se puso en una hoja del programa de cómputo Microsoft Excel, empleándose posteriormente el asistente para gráficos de dicho programa, para ajustar la mejor línea de tendencia al conjunto de datos.

El proceso anterior se repitió para la muestra de datos de terreno en lomerío, así como para la muestra de datos de terreno montañoso.

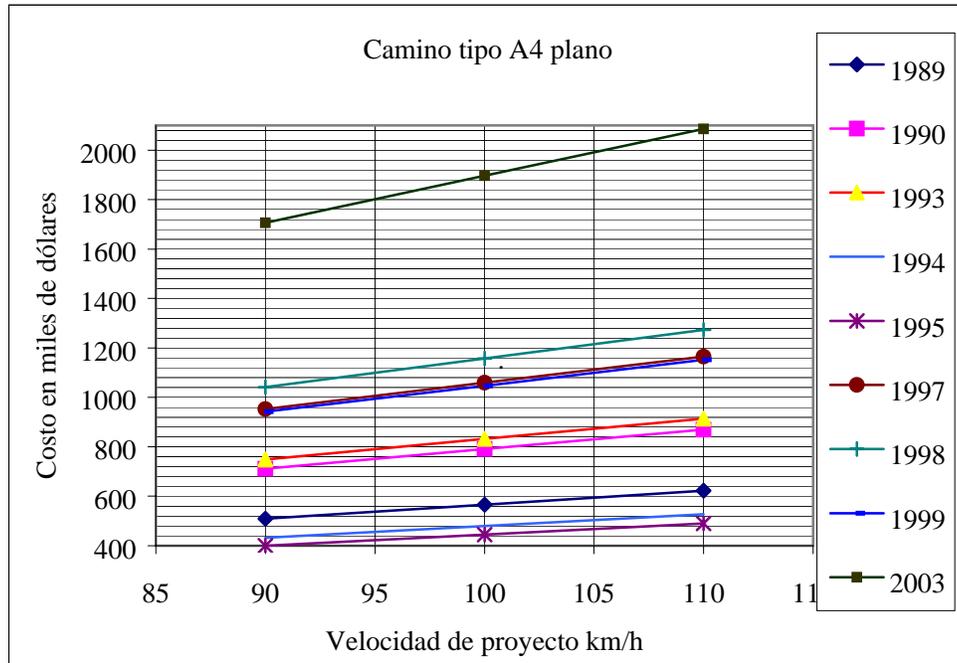


Figura 4.1
Camino A4: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno plano

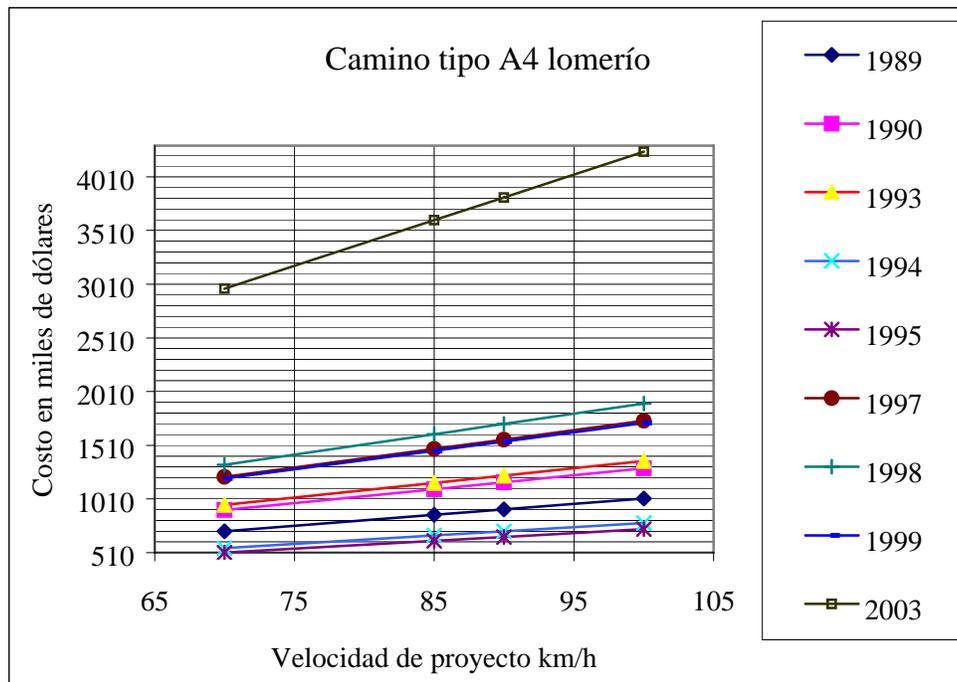


Fig 4.2
Camino A4: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno en lomerío

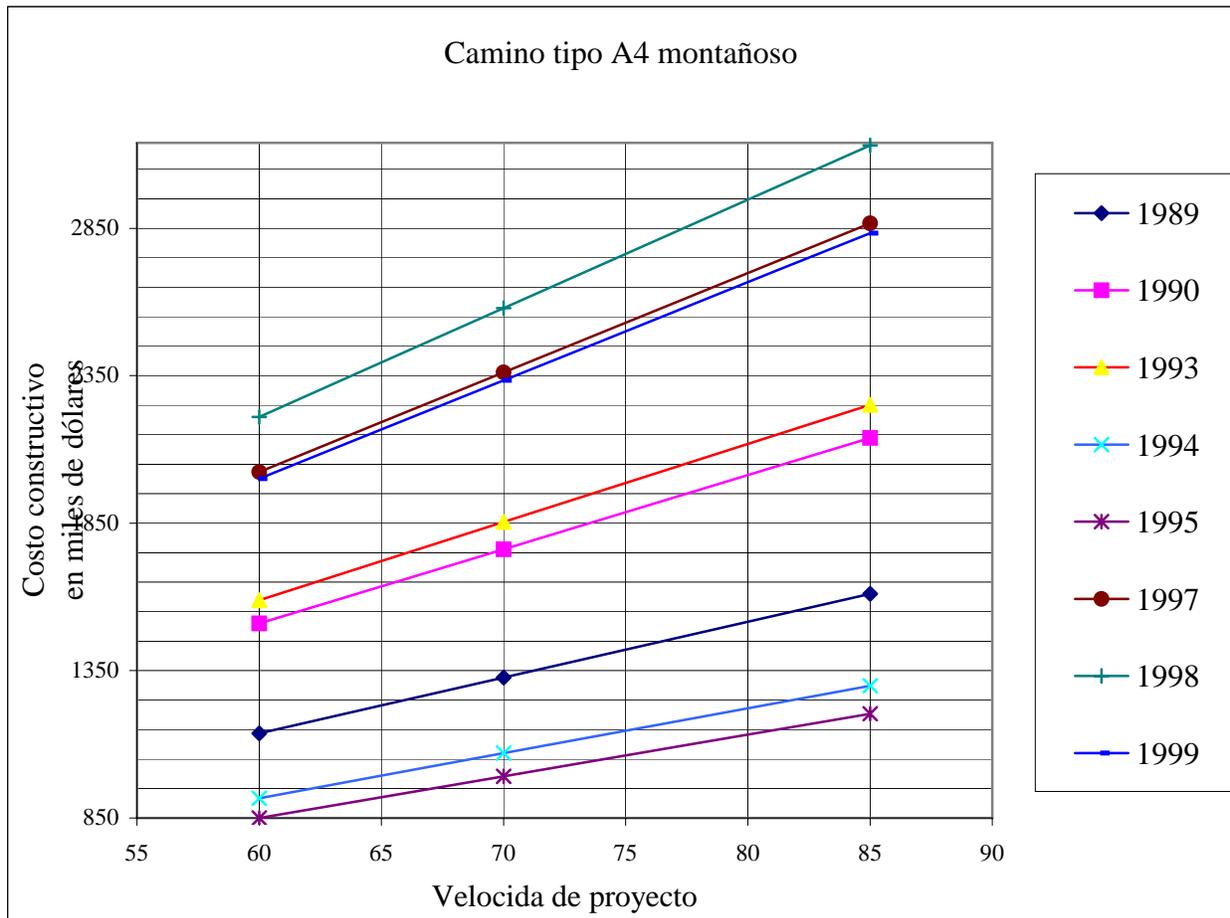


Fig 4.3
Camino A4: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno montañoso

Como resultado del proceso anterior se obtuvo la fig 4.4, la cual muestra las curvas de costo de construcción por km contra velocidad de proyecto, obtenidas para los tres tipos de terreno.

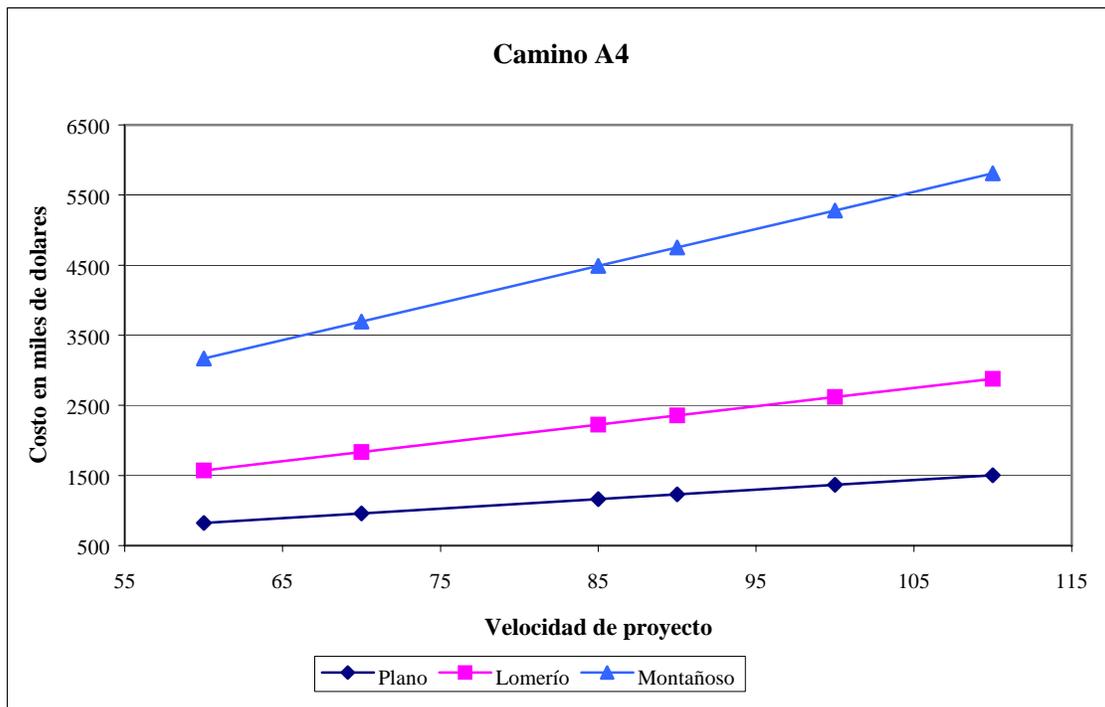


Fig 4.4
Caminos A4: curvas velocidad, contra costo de construcción para los tres tipos de terreno

4.1.2.2 Carreteras tipo A2

Para los caminos A2 se siguió la misma metodología que para los caminos A4.

Tabla 4.4
Caminos A2: costo de construcción promedio
(pesos corrientes/km)

Año	Plano	Lomerío	Montañoso
1989	702 700,00	1 014 500,00	1 438 500,00 ¹
1990	1 030 000,00	1 930 000,00	1 940 000,00 ¹
1993	1 146,00	2 148,00	2 159,00 ²
1994	1 128,00	2 113,00	2 124,00 ²
1995	1 396,00	2 615,00	2 629,00 ²
1997	3 673,00	6 882,00	6 918,00 ²
1998	4 191,00	7 853,00	7 894,00 ²
1999	4 880,14	9 144,34	9 191,72 ²
2003	13 000,00	20 000,00	40 000,00 ²

Notas:

- 1 Millones de pesos
- 2 Miles de pesos

Tabla 4.5
Caminos A2: costo de construcción promedio
(miles de dólares/km)

Año	Plano	Lomerío	Montañoso
1989	260,26	375,74	532,78
1990	349,15	654,24	657,63
1993	367,31	688,46	691,99
1994	212,03	397,18	399,25
1995	196,62	368,31	370,28
1997	467,90	876,69	881,27
1998	511,10	957,68	962,68
1999	462,57	866,76	871,25
2003	1 226,42	1 886,79	3 773,58

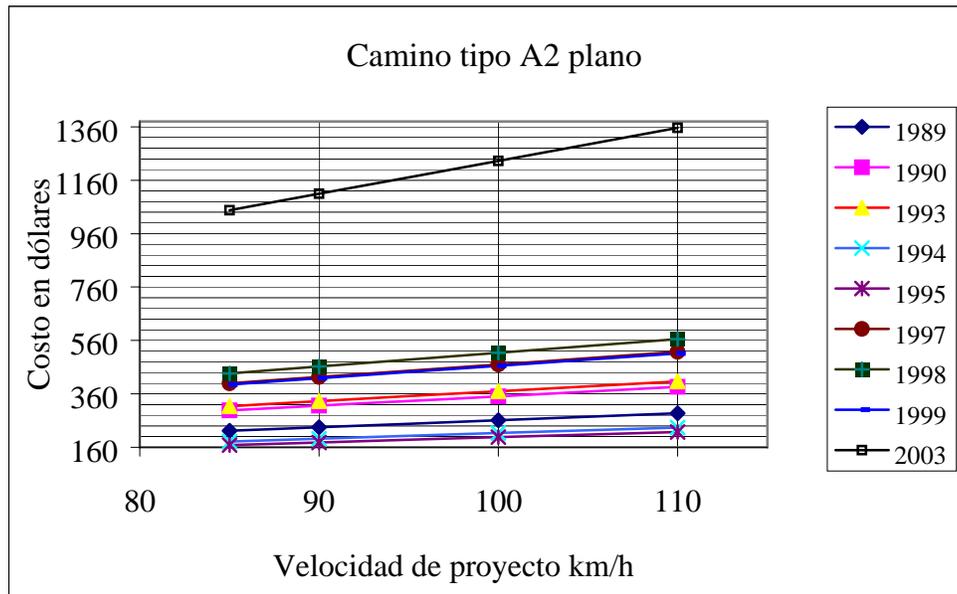


Figura 4.5
Camino A2: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno plano

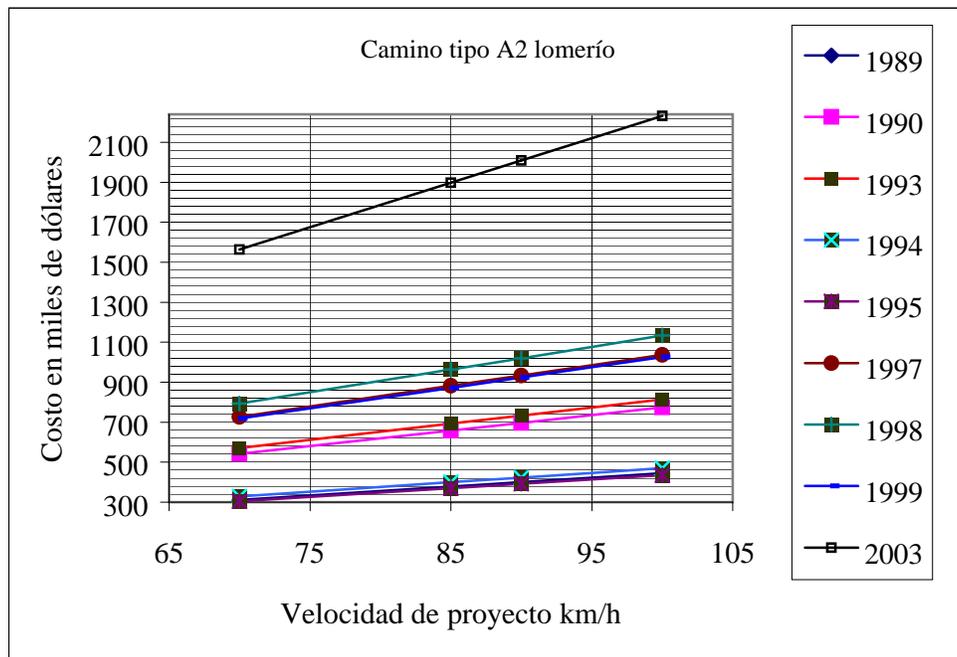


Fig 4.6
Camino A2: curvas velocidad, contra, costo de construcción para terreno en lomerío

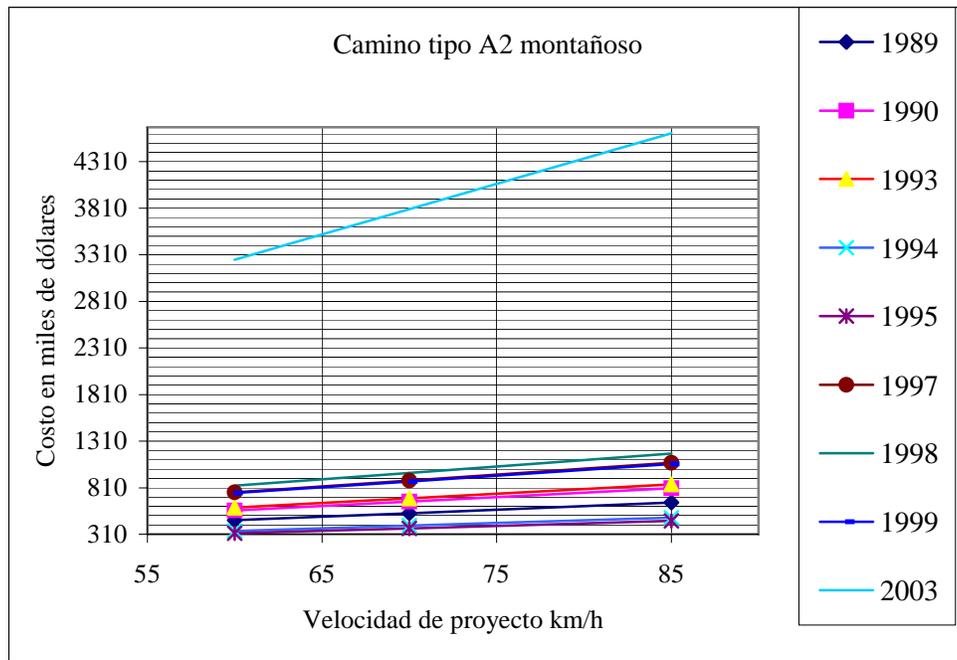


Fig 4.7
Camino A2: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno montañoso

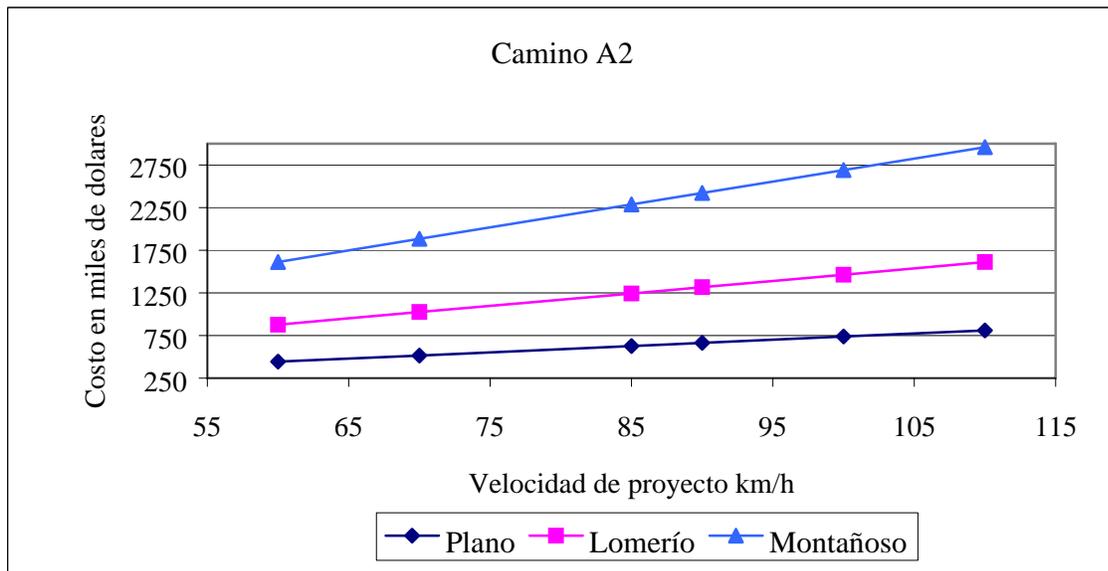


Fig 4.8
Camino A2: curvas velocidad, contra costo de construcción para los tres tipos de terreno

4.1.2.3 Carreteras tipo B

Para los caminos B se siguió la misma metodología que para los caminos A4.

Tabla 4.6
Caminos B: costo de construcción promedio
(pesos corrientes/km)

Año	Plano	Lomerío	Montañoso
1989	588 200,00	743 200,00	1 066 800,00 ¹
1990	770 000,00	1 030 000,00	1 420 000,00 ¹
1993	857,00	1 146,00	1 580,00 ²
1994	843,00	1 128,00	1 555,00 ²
1995	1 043,00	1 396,00	1 924,00 ²
1997	2 746,00	3 673,00	5 064,00 ²
1998	3 133,00	4 191,00	5 778,00 ²
1999	3 648,26	4 880,14	6 727,96 ²
2003	4 857,00	6 497,00	8 958,00 ²

Notas:

1 Millones de pesos

2 Miles de pesos

Tabla 4.7
Caminos B: costo de construcción promedio
(miles de dólares/km)

Año	Plano	Lomerío	Montañoso
1989	217,85	275,26	395,11
1990	261,02	349,15	481,36
1993	274,68	367,31	506,41
1994	158,46	212,03	292,29
1995	146,90	196,62	270,99
1997	349,81	467,90	645,10
1998	382,07	511,10	704,63
1999	345,81	462,57	637,72
2003	458,21	612,92	845,09

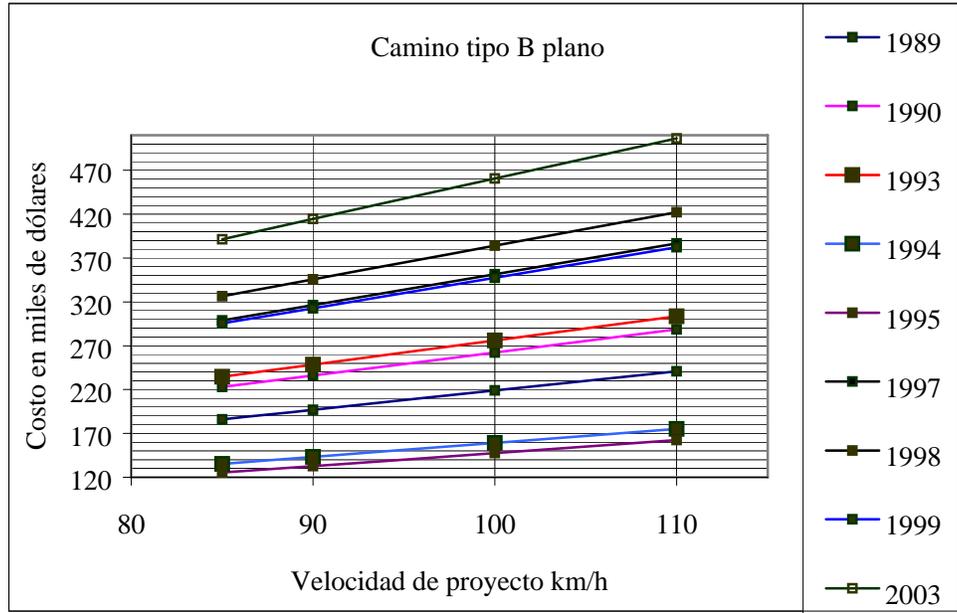


Fig 4.9
Caminos B: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno plano

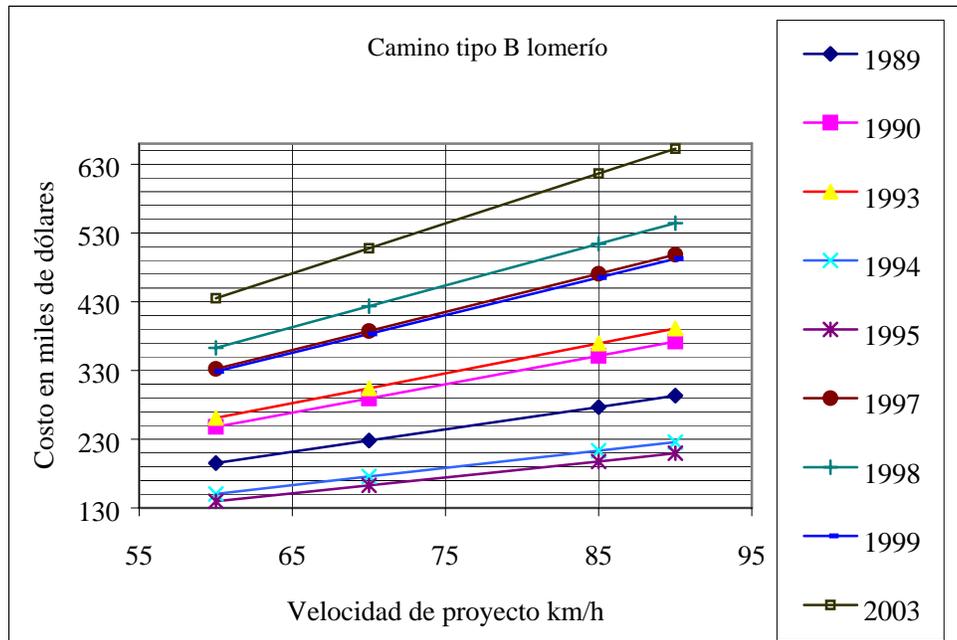


Fig 4.10
Caminos B: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno en lomerío

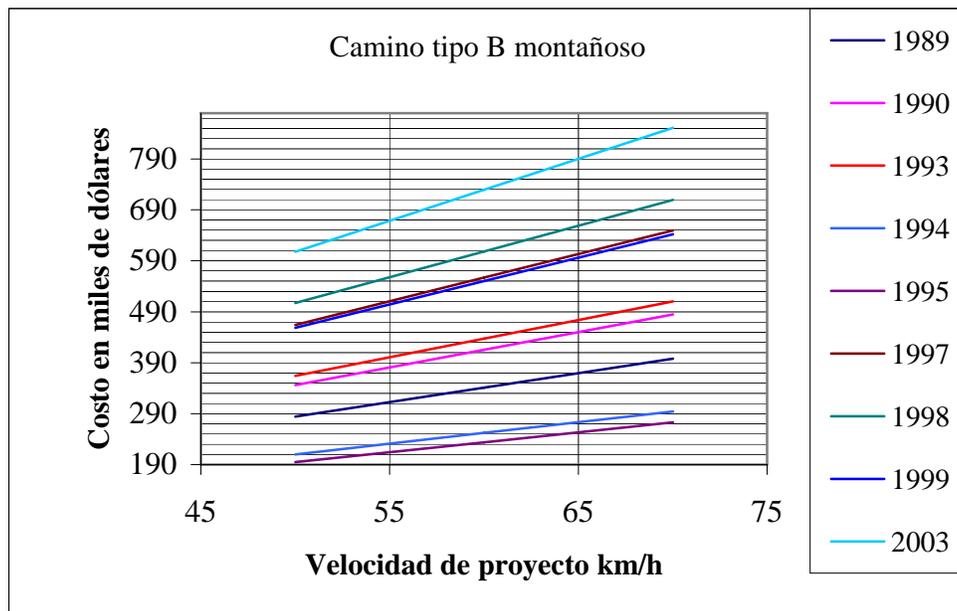


Fig 4.11
Camino B: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno tipo montañoso

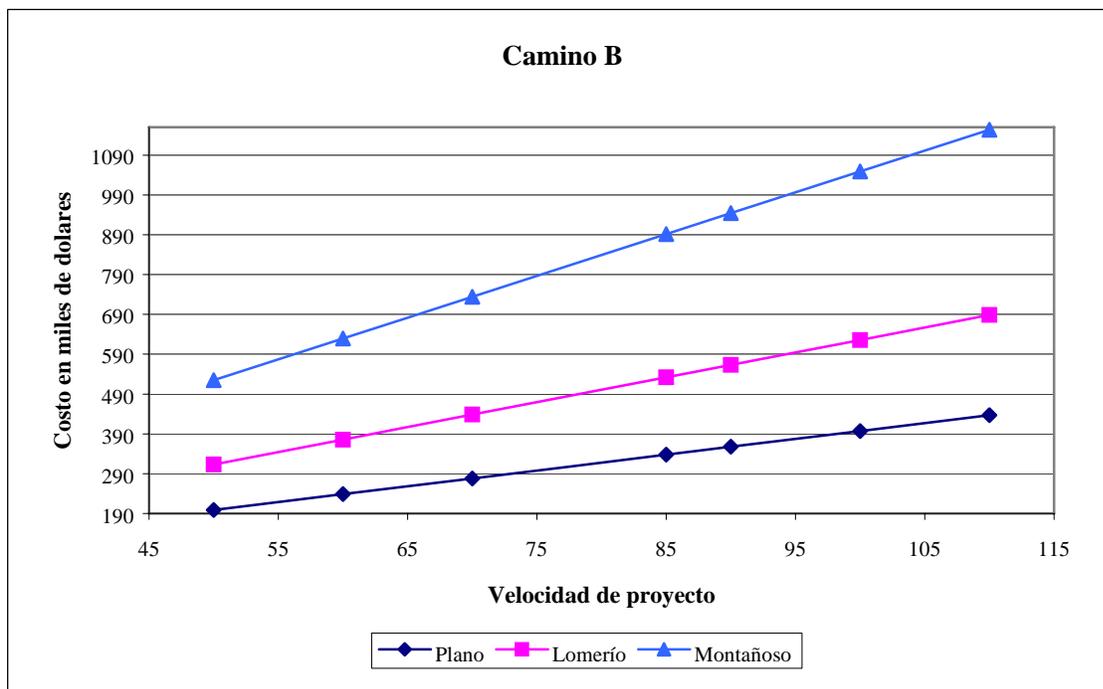


Figura 4.12
Camino B: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno tipo los tres tipos de terreno

4.1.2.4. Carreteras tipo C

Para los caminos C se siguió la misma metodología que para los caminos A4.

Tabla 4.8
Caminos C: costo de construcción promedio
(pesos corrientes/km)

Año	Plano	Lomerío	Montañoso
1989	445 806,50	594 700,00	797 600,00
1990	650 000,00	770 000,00	1 160 000,00
1993	723,00	857,00	1 291,00
1994	712,00	843,00	1 270,00
1995	881,00	1 043,00	1 572,00
1997	2 318,00	2 746,00	4 137,00
1998	2 645,00	3 133,00	4 720,00
1999	3 079,70	3 648,26	5 496,08
2003	4 100,00	4 857,00	7 318,00

Notas:

- 1 Millones de pesos
- 2 Miles de pesos

Tabla 4.9
Caminos C: costo de construcción promedio
(miles de dólares/km)

Año	Plano	Lomerío	Montañoso
1989	165,11	220,26	295,41
1990	220,34	261,02	393,22
1993	231,73	274,68	413,78
1994	133,83	158,46	238,72
1995	124,08	146,90	221,41
1997	295,29	349,81	527,01
1998	322,56	382,07	575,61
1999	291,91	345,81	520,96
2003	386,79	458,21	690,38

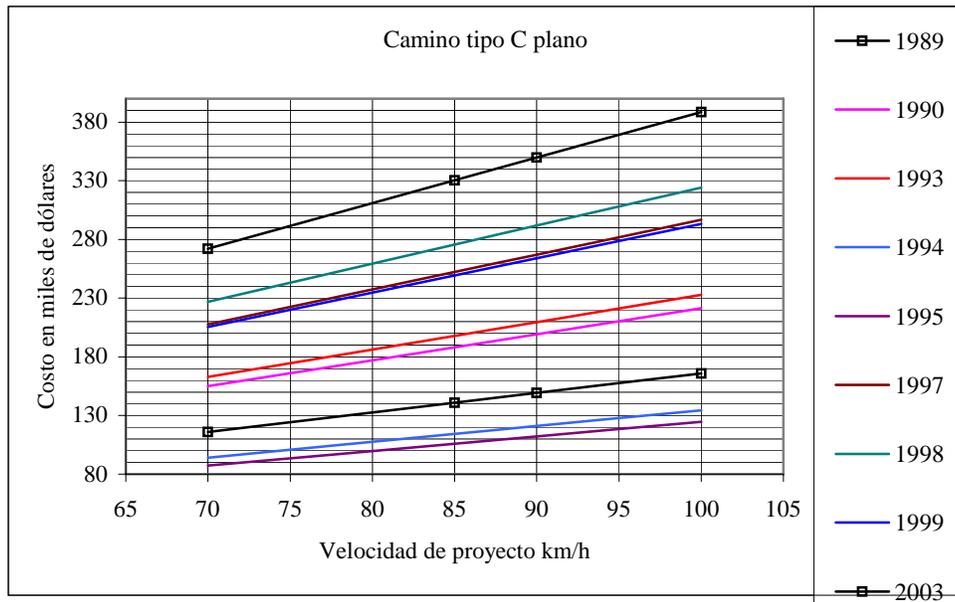


Fig 4.13
Camino C: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno plano

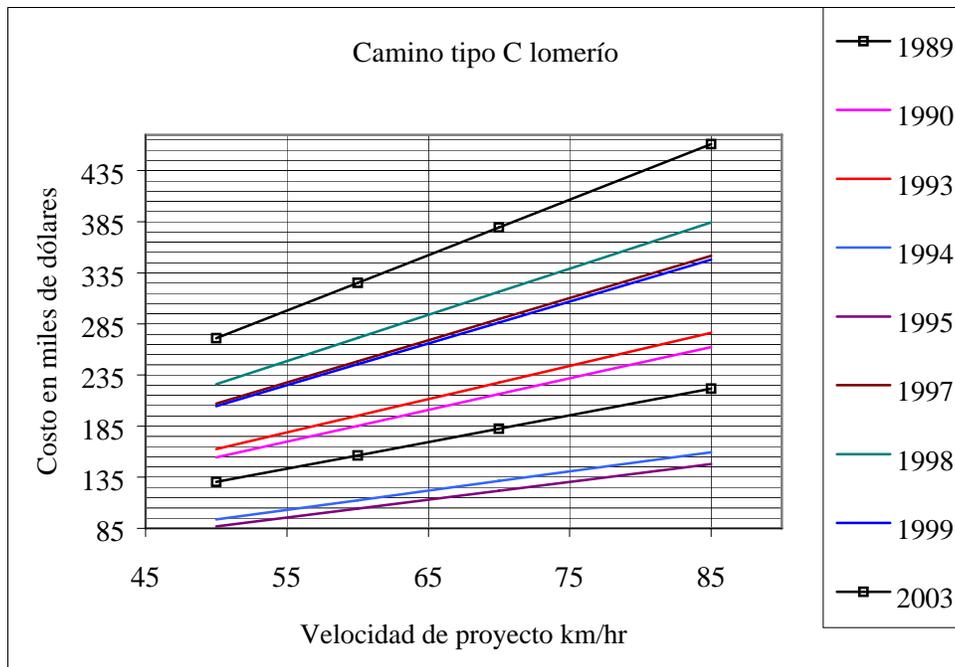


Fig 4.14
Camino C: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno en lomerío

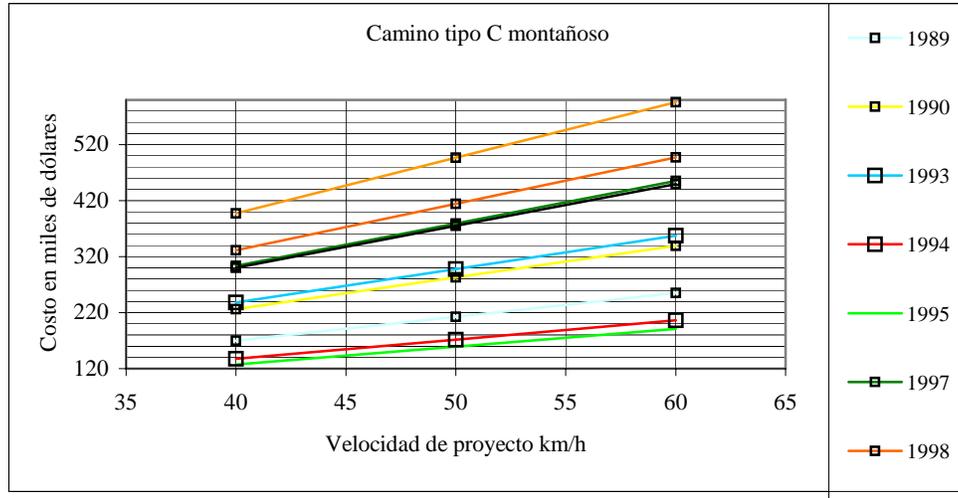


Fig 4.15
Camino C: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno montañoso

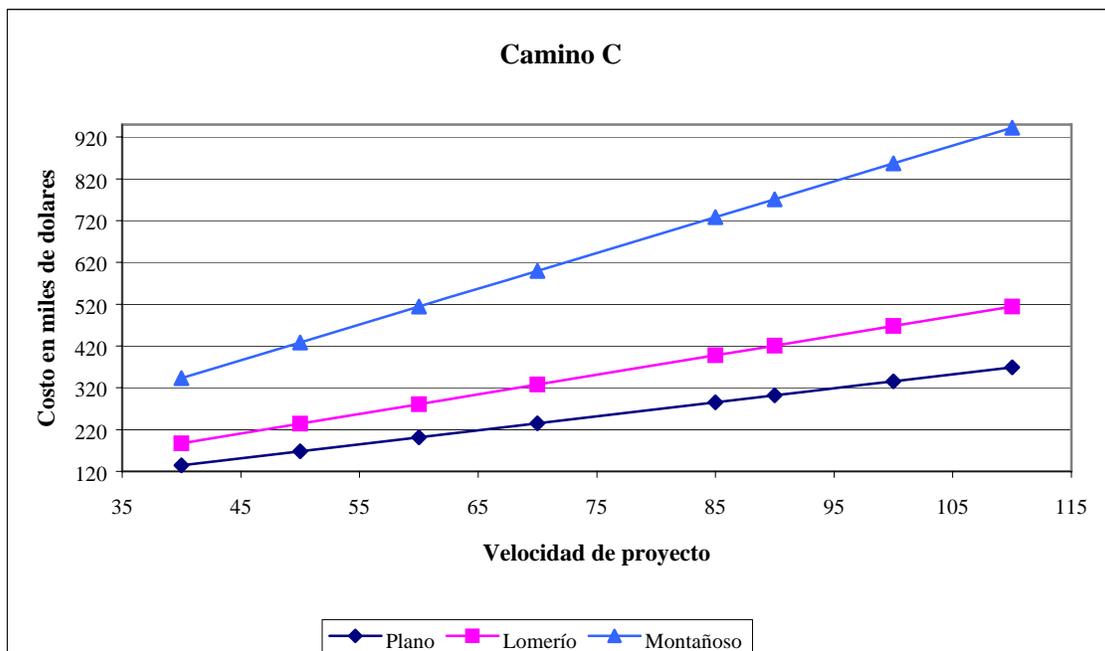


Figura 4.16
Camino C: curvas velocidad, contra costo de construcción para los tres tipos de terreno

4.1.2.5 Carreteras tipo E

Para los caminos E, se siguió la misma metodología que para los caminos A4.

Tabla 4.10
Caminos E: costo de construcción promedio
(pesos corrientes/km)

Año	Plano	Lomerío	Montañoso
1989	31 200,00	62 200,00	123 500,00 ¹
1990	65 000,00	130 000,00	190 000,00 ¹
1993	72,00	145,00	211,00 ²
1994	71,00	142,00	208,00 ²
1995	88,00	176,00	257,00 ²
1997	232,00	464,00	678,00 ²
1998	264,00	529,00	773,00 ²
1999	307,97	615,94	900,22 ²
2003	410,00	820,00	1 199,00 ²

Notas:

1 Millones de pesos

2 Miles de pesos

Tabla 4.11
Caminos E: costo de construcción promedio
(miles de dólares/km)

Año	Plano	Lomerío	Montañoso
1989	11,56	23,04	45,74
1990	22,03	44,07	64,41
1993	23,08	46,47	67,63
1994	13,35	26,69	39,10
1995	12,39	24,79	36,20
1997	29,55	59,11	86,37
1998	32,20	64,51	94,27
1999	29,19	58,38	85,33
2003	38,68	77,36	113,11

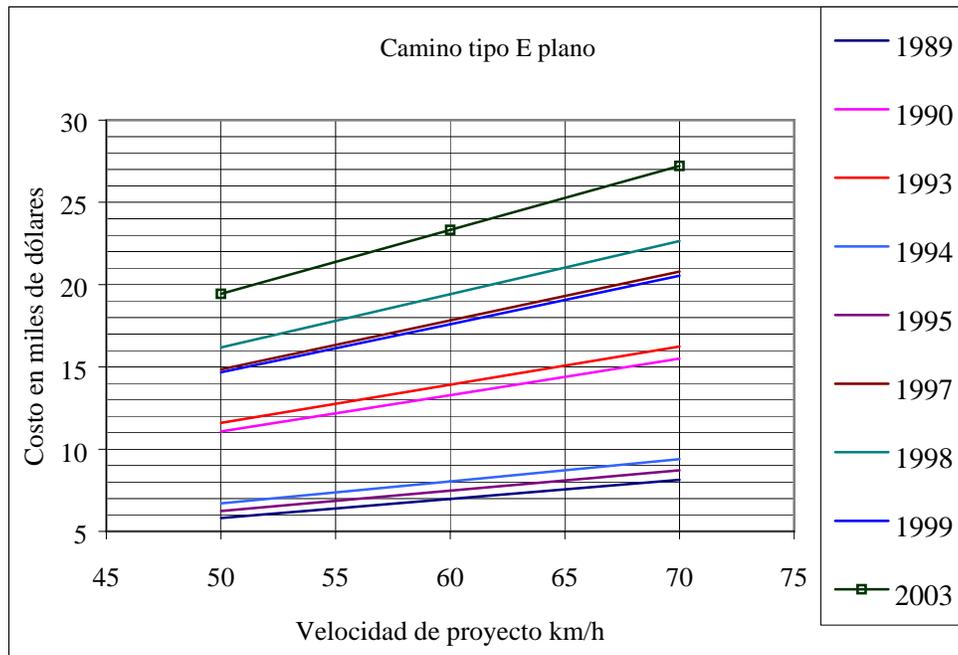


Fig 4.17
Caminos E: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno plano

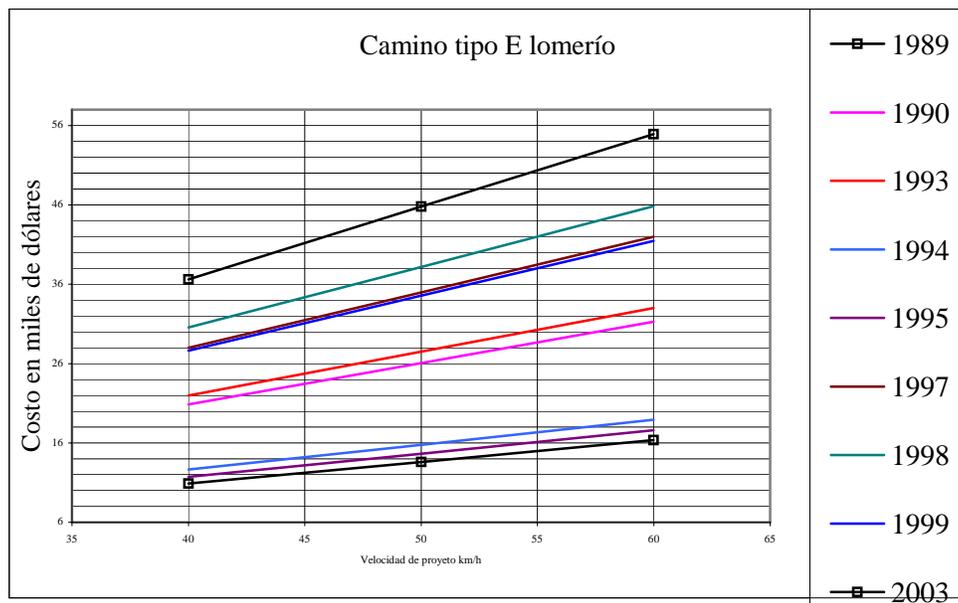


Fig 4.18
Caminos E: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno en lomerío

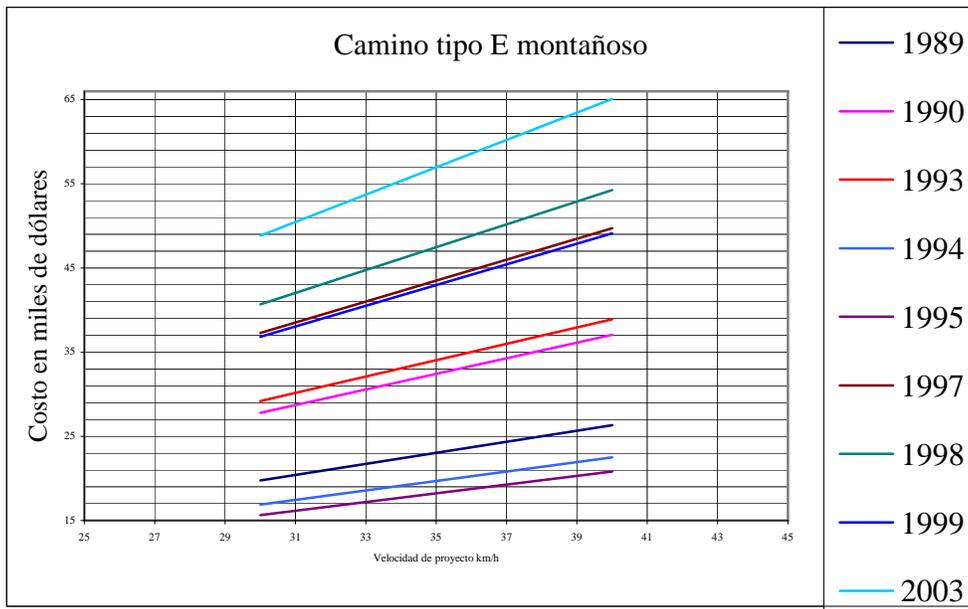


Fig 4.19
Camino E: curvas velocidad, contra costo de construcción para terreno montañoso

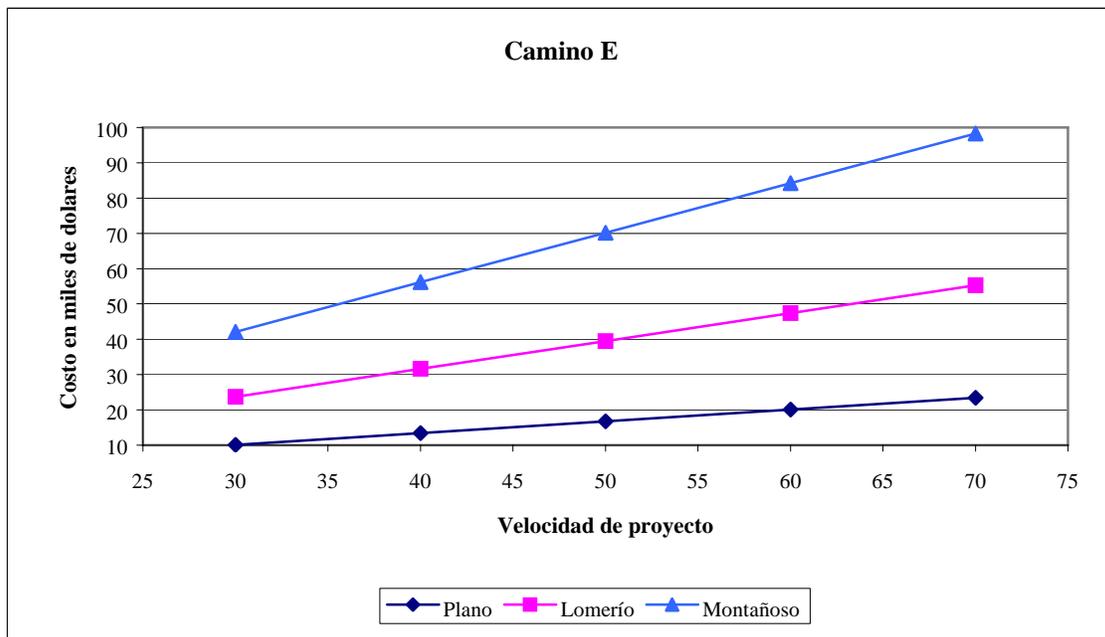


Fig 4.20
Camino E: curvas velocidad contra, costo de construcción para los tres tipos de terreno

Para los caminos tipo D, no se generaron curvas de costo debido a que no existe información reciente al respecto. Sin embargo, se considera que las curvas generadas para caminos tipos E son también válidas para los caminos tipo D.

4.1.3 Análisis de costos

Como ya se mencionó, la ref 3 clasifica a las carreteras según su importancia en relación con su contribución en el contexto de la red nacional, para facilitar la realización de las actividades económicas, políticas y sociales que requiere el país, en: troncales (unen centros de población de más de 50,000 habitantes, cuyas actividades generan o atraen viajes de largo itinerario); alimentadoras (unen poblaciones medianas o pequeñas con nodos de la red troncal, utilizándose para viajes de mediano o corto itinerario); y locales (utilizadas para viajes de muy corto itinerario).

La ref 3 también clasifica a las carreteras según el servicio que prestan en relación con los atributos deseables al usuario, tales como rapidez, seguridad, comodidad y economía, en: autopistas (con control de acceso, y cuatro o más carriles); carreteras (sin control de acceso, y dos o más carriles), caminos (sin control de acceso y dos carriles); y brechas (sin control de acceso y uno o dos carriles).

Con base en las dos clasificaciones anteriores, la ref 3 introduce la siguiente tipificación con fines de proyecto geométrico de carreteras:

- Si las troncales son autopistas, la ref 3 las tipifica como A; en tanto que si son carreteras, las tipifica como B
- Si las alimentadoras son carreteras, las tipifica como C; en tanto que si son caminos, las tipifica como D
- Si las locales son caminos, las tipifica como E; en tanto que si son brechas, las tipifica como F

También se mencionó en capítulos anteriores que la normativa vigente en México para el diseño geométrico (ref 2) clasifica a las carreteras con fines de proyecto según el nivel de tránsito esperado en ellas, en: A (tránsito diario promedio anual o TDPA, de más de 3,000 en el horizonte de proyecto); B (TDPA entre 1,500 y 3,000); C (TDPA entre 500 y 1,500); D (TDPA entre 100 y 500); y E (TDPA menor a 100).

Con base en la tipificación de carreteras de la ref 3, y la clasificación vigente para proyecto geométrico en la ref 2; así como las curvas de costo de construcción, contra velocidad de proyecto generadas en la primera parte de este capítulo, es posible realizar los análisis de impacto económico comparativo entre las clasificaciones de las dos referencias anteriores, considerando que el tipo A de la ref 3 es equivalente al tipo A de la ref 2; el tipo B de la ref 3 al tipo B de la ref 2; etc. Este análisis comparativo se efectúa en las secciones siguientes, para cada tipo de carretera.

4.2.1 Carreteras tipo A4

La ref 3 recomienda, con fines de proyecto geométrico, utilizar una confiabilidad, mínima de 50% para todos los tipos de carreteras.

Asimismo, la ref 3 proporciona una gráfica de confiabilidad, contra velocidad de

proyecto para cada tipo de carretera según su importancia, es decir, una gráfica para carreteras troncales, otra para alimentadoras, y otra para locales.

Si se entra a la gráfica para carreteras troncales con una confiabilidad mínima del 50%, se obtiene para esa confiabilidad, una velocidad de proyecto de un poco más de 100km/h; pero para efectos prácticos, se selecciona para este análisis el valor de 100km/h.

Si se entra a las curvas de costo de construcción contra velocidad de proyecto para carreteras tipo A4 con la velocidad de proyecto de 100km/h obtenida anteriormente, se logran los costos de construcción por km para cada tipo de terreno indicados en la cuarta columna de la tabla 4.12.

En la ref 2, se especifican valores de velocidad de proyecto entre 90 y 110km/h para tipo de terreno plano (o un promedio de 100km/h); entre 70 y 100km/h para terreno en lomerío (o un promedio de 85km/h); y entre 60 y 80km/h para terreno montañoso (o un promedio de 70km/h).

Si se entra a las curvas de costo de construcción, contra velocidad de proyecto para carreteras tipo A4 con el promedio de la especificación en la ref 2 para cada tipo de carretera (100km/h para terreno plano; 85km/h para terreno en lomerío; y 70 km/h para terreno montañoso), se obtienen los costos de construcción por km para cada tipo de terreno indicados en la sexta columna de la tabla 4.12.

La última columna de la tabla 4.12 presenta el porcentaje en el que el costo de construcción por km se incrementa, de adoptarse la propuesta en la ref 3 en relación con las especificaciones de velocidad de proyecto en la normativa vigente (ref 2). Como es evidente a partir esta columna, el porcentaje de incremento en el costo de construcción es cero para terreno tipo plano; aumentando a alrededor del 18% para terreno en lomerío; y a casi 43% para terreno montañoso.

Evidentemente, en un trayecto en el que se presenten los diversos tipos de terreno, el porcentaje específico de incremento en costo de construcción será la ponderación de los porcentajes en la última columna de la tabla 4.12 por los porcentajes de longitud en que cada tipo de terreno respectivo se presente.

Tabla 4.12
Caminos A4: análisis de costos de construcción (dólares)

Carretera	Terreno	Vp (km/h) Ref 3	Costo constructivo US\$/km	VP km/h				Promedio	Costo de construcción	
				Normativa existente Ref 2					US\$/km	%
A4	Plano	100	1 366,77	90	100	110		100	1 366,77	0,0
	Lomerío	100	2 618,56	70	80	90	100	85	2 225,79	17,6
	Montañoso	100	5 280,08	60	70	80		70	3 696,17	42,9

4.2.2 Carreteras, tipo A2

Dado que en este caso, tanto los costos de construcción para la ref 3 como los costos de construcción para la ref 2 se duplican en relación con sus correspondientes valores presentados en la tabla 4.12, los porcentajes de incremento para carreteras tipo A2 resultan iguales a los de la última columna de la tabla 4.12, para carreteras tipo A4.

4.2.3 Carreteras tipo B

Como resultado de realizar para carreteras tipo B el mismo análisis descrito para carreteras tipo A4, se obtuvieron para estas últimas los resultados mostrados en la tabla 4.13. En la tabla anterior es evidente que los porcentajes para el tipo de carretera tipo B, son de cero para terreno tipo plano; 34% para terreno tipo lomerío; y 67% para terreno tipo montañoso.

Tabla 4.13
Caminos B: análisis de costos de construcción (dólares)

Carretera	Terreno	Vp (km/h) Ref 3	Costo constructivo US\$/km	VP km/h				Promedio	Costo de construcción	
				Normativa existente Ref 2					US\$/km	%
B	Plano	100	397,34	90	100	110		100	397,34	0,0
	Lomerío	100	625,85	60	70	80	90	75	469,39	33,3
	Montañoso	100	1 049,08	50	60	70		60	629,48	66,7

4.2.4 Carreteras, tipo C

En el caso de carreteras tipo C, se muestra una variante interesante ya que la ref 3 presenta un costo menor al de la ref 2; tal es el caso que la ref 2 denota un incremento del 3% sobre el costo que señala la ref 2; en el caso de tipo lomerío y montañoso mantiene la tendencia de incremento. 28 y 66% respectivamente.

Tabla 4.14
Caminos C: análisis de costos de construcción (dólares)

Carretera	Terreno	Vp (km/h) Ref 3	Costo constructivo US\$/km	VP km/h				Promedio	Costo de construcción	
				Normativa existente Ref 2					US\$/km	%
C	Plano	83	278.41	70	80	90	100	85	285.12	-2.4
	Lomerío	83	388.34	50	60	70	80	65	304.12	27.7
	Montañoso	83	711.30	40	50	60		50	428.52	66.0

4.2.5 Carreteras, tipo E

Para los carreteras tipo E, se presentan los más dramáticos aumentos en los porcentajes con respecto a la ref 3, tal es el caso, que para el terreno tipo plano hay un incremento del 7%, que este es el único camino en donde aparece una alza en el terreno tipo plano. El terreno tipo lomerío es del 28%; y el más dramático de todos es el terreno tipo montañoso, con el 83% de incremento.

Tabla 4.15
Caminos E: análisis de costos de construcción (dólares)

Carretera	Terreno	Vp (km/h) Ref 3	Costo constructivo US\$/km	VP km/h Normativa existente Ref 2				Promedio	Costo de construcción	
				50	60	70	80		US\$/km	%
E	Plano	64	21,46	50	60	70	80	20,11	6,67	64
	Lomerío	64	50,56	40	50	60	50	39,50	28,00	64
	Montañoso	64	89,85	30	40		35	49,14	82,84	64

4.3 Otros análisis

Con el fin de lograr “consistencia” a lo largo del proyecto, la ref 3 propone los siguientes tres criterios:

- La consistencia es buena cuando el diferencial de confiabilidad tolerable entre elementos sucesivos es de 10%
- Es aceptable, cuando el diferencial de confiabilidad entre elementos sucesivos esta entre 10 y 20%
- Es pobre, cuando el diferencial anterior excede el 20%

En las tablas 4.16 a 4.20 se presentan algunos análisis adicionales para los diferentes tipos de caminos, en donde a través de la variación de las velocidades de proyecto en la tercera columna, se introducen los diferenciales máximos de confiabilidad en los criterios anteriores entre segmentos sucesivos en cada uno de los tres tipos de terreno.

Por ejemplo, en la tabla 4.16, correspondiente a carreteras tipo A4, la variación de la velocidad de proyecto de 120km/h para terreno plano, a 115km/h para terreno en lomerío y a 100km/h para terreno montañoso, corresponde a un diferencial de confiabilidad de 10% entre los tres tipos de terreno (80, 70 y 60% respectivamente, según se indica en la cuarta columna de la tabla); por lo que dicha variación corresponde a una consistencia buena en el diseño. Si se entra a las curvas de costo de construcción con las velocidades anteriores, se obtienen los costos construcción por km para cada tipo de terreno indicados en la quinta columna de la tabla 4.16. Por otra parte, si de la normativa existente (ref 2) se toman las velocidades de proyecto en la sexta columna, es posible calcular para ellas los costos de construcción correspondientes. La última columna de la tabla 4.16 presenta el porcentaje en el que el

costo de construcción por km se incrementa, de adoptarse la propuesta en la ref 3, considerando las recomendaciones de consistencia, en relación con las especificaciones de velocidad de proyecto en la normativa vigente (ref 2). Como es evidente, a partir esta columna, el porcentaje de aumento en el costo de construcción es de 9% para terreno tipo plano, subiendo a alrededor del 15% para terreno en lomerío, y a casi 25% para terreno montañoso.

Tabla 4.15
Caminos A4: análisis de costos de construcción (dólares)

Consistencia en el diseño	Terreno	Vp (km/h) Ref 3	Nivel de confianza (%)	Costo de construcción US\$/km	VP km/h Normativa existente Ref 2	Costo de construcción	
						US\$/km	%
Bueno	Plano	120	80	1 640,11	110	1 503,44	9,09
	Lomerío	115	70	3 011,32	100	2 618,55	15,00
	Montañoso	100	60	5 280,08	80	4 224,14	25,00
Aceptable	Plano	120	80	1 640,11	100	1 366,78	20,00
	Lomerío	115	65	2 932,77	85	2 225,79	31,76
	Montañoso	100	50	5 491,23	70	3 696,17	48,57
Pobre	Plano	120	80	1 640,109	90	1 230,10	33,33
	Lomerío	115	60	2 880,395	70	1 833,03	57,14
	Montañoso	100	40	5 280,080	60	3 168,20	66,66

Los porcentajes precedentes confirman los resultados ya obtenidos de los análisis realizados en la sección anterior; en el sentido de que la introducción de los conceptos de confiabilidad y consistencia, conduce a velocidades de proyecto más elevadas, y mayores costos de construcción; aunque también a carreteras de trazo geométrico mejor y más uniforme y, por lo mismo, de mayor seguridad, mejor calidad de servicio, y menores costos operativos.

4.3.1 Carreteras, tipo A2

Tabla 4.16
Caminos A2: Análisis de costos de construcción (dólares)

Consistencia en el diseño	Terreno	Vp (km/h) Ref 3	Nivel de confianza (%)	Costo de construcción US\$/km	VP km/h Normativa existente Ref 2	Costo de construcción	
						US\$/km	%
Bueno	Plano	120	80	884,437	110	810,74	9,09
	Lomerío	115	70	1 683,46	100	1 463,89	15,00
	Montañoso	100	60	2 689,20	80	2 151,39	25,00
Aceptable	Plano	120	80	884,44	100	737,04	20,00
	Lomerío	112	65	1 639,55	85	1 244,32	31,76
	Montañoso	104	50	2 796,76	70	1 882,49	48,57
Pobre	Plano	120	80	884,437	90	663,34	33,33
	Lomerío	110	60	1 610,27	70	1 024,75	57,14
	Montañoso	100	40	2 689,20	60	1 613,59	66,66

4.3.2 Carreteras, tipo B

Tabla 4.17
Caminos B: análisis de costos de construcción (dólares)

Consistencia en el diseño	Terreno	Vp (km/h) Ref 3	Nivel de confianza (%)	Costo constructivo US\$/km	VP km/h Normativa existente Ref 2	Costo de construcción	
						US\$/km	%
Bueno	Plano	98	80	389,40	110	437,07	-10,91
	Lomerío	92	70	575,79	90	563,27	2,22
	Montañoso	88	60	923,20	70	734,38	25,71
Aceptable	Plano	98	80	389,40	95	377,47	3,16
	Lomerío	90	65	563,27	75	469,39	20,00
	Montañoso	82	50	860,26	60	629,48	36,66
Pobre	Plano	98	80	389,40	80	377,47	3,16
	Lomerío	88	60	550,75	60	375,52	46,66
	Montañoso	79	40	828,79	50	524,58	57,99

4.3.3 Carreteras, tipo C

Tabla 4.18
Caminos C: análisis de costos de construcción (dólares)

Consistencia en el diseño	Terreno	Vp (km/h) Ref 3	Nivel de confianza (%)	Costo constructivo US\$/km	VP km/h Normativa existente Ref 2	Costo de construcción	
						US\$/km	%
Bueno	Plano	98	80	328,72	100	335,43	-2,00
	Lomerío	92	70	430,45	80	374,30	15,00
	Montañoso	88	60	754,15	60	514,21	46,66
Aceptable	Plano	98	80	328,72	85	285,12	15,29
	Lomerío	90	65	421,09	65	304,12	38,46
	Montañoso	82	50	702,73	50	428,52	63,99
Pobre	Plano	98	80	328,72	70	234,80	40,00
	Lomerío	88	60	411,73	50	233,95	75,99
	Montañoso	79	40	677,03	40	342,83	97,48

4.3.4 Carreteras, tipo E

Tabla 4.19
Camino E: análisis de costos de construcción E (dólares)

Consistencia en el diseño	Terreno	Vp (km/h) Ref 3	Nivel de confianza (%)	Costo constructivo US\$/km	VP km/h Normativa existente Ref 2	Costo de construcción	
						US\$/km	%
Bueno	Plano	75	80	25,15	70	23,466	7,14
	Lomerío	71	70	56,09	60	47,399	18,33
	Montañoso	68	60	95,47	40	56,16	69,99
Aceptable	Plano	75	80	25,15	60	20,11	25,00
	Lomerío	70	65	55,230	50	39,50	40,00
	Montañoso	63	50	88,45	35	49,14	79,98
Pobre	Plano	75	80	25,15	50	16,76	49,99
	Lomerío	68	60	53,72	40	31,60	69,99
	Montañoso	60	40	84,24	30	42,12	99,98

5. Conclusiones y recomendaciones

A continuación se describen las conclusiones y recomendaciones más relevantes, derivadas de los análisis realizados en este trabajo:

- Como primer lugar, se puede citar que la Norma Mexicana de Servicios Técnicos es una norma que en términos de tecnología vehicular y de materiales carreteros, corresponde a condiciones prevalecientes, hace varios años.
- Por tanto, dicha norma así como los manuales que rigen el diseño del proyecto Geométrico de carreteras exigen una actualización, ya que las condiciones tecnológicas y de diseño ha ido modificándose de acuerdo a los tiempos actuales.
- Así mismo, es factible identificar que el concepto de Confiabilidad es un término ya utilizado en la Ingeniería Civil, particularmente en la Ingeniería Estructural, aplicado en el uso del factor de seguridad, pero es un concepto nuevo dentro de la Ingeniería de las Vías Terrestres.
- La aplicación de este concepto resultaría en un incremento de la seguridad de los vehículos circulantes por cualquier vía diseñada bajo este concepto.
- En tanto que para las carreteras troncales, el análisis de bondad de ajuste resultó negativo (las distribuciones de velocidades medidas en campo no siguen una distribución tipo Weibull) para el factor de forma propuesto por la ref 3, que es de $\beta = 0,274$; dicho análisis resultó positivo para valores de β de 0,46 y 0,55.
- Para las carreteras alimentadoras, el análisis de bondad de ajuste resultó positivo para valores de β de 0.274 y 0.30.
- Al realizar los distintos análisis económicos para los caminos A4, B, C y E contra los criterios planteados en la ref 3 para una confiabilidad uniforme de 50% para todos los tipos de terreno, se obtuvo que la aplicación de dichos criterios conllevaría aumentos porcentuales en los costos de construcción, de los siguientes órdenes de magnitud:

Tabla 5.1
Incrementos porcentuales en los costos de construcción

Tipo de terreno	Incremento porcentual por tipo de camino			
	A4	B	C	E
Plano	0,0	0,0	0,0	6,7
Lomerío	17,6	33,3	27,7	28,0
Montañoso	42,9	66,7	66,0	82,84

- Los resultados anteriores son reflejo de que si se utiliza una misma confiabilidad para todos los tipos de terreno, ello se traduce en una misma velocidad para todos los tipos de terreno. Por otra parte, como la Norma Mexicana de Servicios Técnicos reduce mucho la velocidad especificada para los tipos de suelo en

lomerío, y montañoso (en relación con la velocidad especificada para terreno plano), la aplicación del criterio de confiabilidad genera costos de construcción mayores y crecientes para estos tipos de terreno en relación con los que corresponderían a las velocidades especificadas en la Norma Mexicana de Servicios Técnicos. Similares resultados se obtienen si se varía la confiabilidad según el tipo de terreno, con base en los criterios de consistencia en el diseño recomendados en la ref 3.

- En síntesis, puede decirse que la aplicación del criterio de confiabilidad suele traer como consecuencia proyectos carreteros más congruentes con las velocidades de los usuarios y, por lo mismo, de mejores características geométricas y más seguras. También traería como consecuencia carreteras de costo de construcción significativamente mayor.
- Se recomienda incorporar la confiabilidad en el proyecto geométrico de carreteras como un criterio de verificación y revisión, de que lo proyectado cumpla con recomendaciones como las presentadas en la ref 3.

Referencias

1. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), "Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras", México (1977)
2. Secretaría de Comunicaciones y Transportes "Libro 2, Normas de Servicios Técnicos. Parte 2.01. Proyecto Geométrico, Título. 2.01.01. Carreteras", México (1984)
3. Magallanes R. "La implicación del concepto de seguridad en el Proyecto Geométrico de Carreteras", Intertraffic Latin America, México (2003)
4. Secretaría de Comunicaciones y Transportes "Centro Nacional SCT, Patrimonio Artístico", México (1988)
5. American Association of State Highway Officials (AASHO), "A Policy on Geometrical Design of Rural Roads", Washington, DC (1965)
6. Crespo C. "Vías terrestres y aeropistas", Editorial Limusa, México (1979)
7. Montoya Ma, Velásquez R, Gálvez A, Parra O, De la Parra Y, "La Ingeniería Civil mexicana, un encuentro con la historia" México (1996)
8. Secretaría de Comunicaciones y Transportes "Hitos de las comunicaciones y los transportes en la historia de México" México (1988)
9. Pagina web de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (http://portal.SCT.gob.mx/SCTPortal/appmanager/Portal/SCT?_nfpb=true&pageLabel=P32004)
10. Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas "Especificaciones generales para Proyecto Geométrico, Parte primera: Caminos", México (1958)
11. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), "A Policy on Geometrical Design of Highways and Streets", Washington, DC (1990)
12. Transportation Association of Canada (TAC), "Geometrical Design Guide for Canadian Roads", Canada (1999)
13. Walpole R, Myhers R. "Probabilidad y Estadística" México (1992)
14. Cybertesis http://cybertesis.ubiobio.cl/tesis/2004/masias_i/html/TH.3.html
15. Ridell R, Hidalgo P, "Diseño Estructural" Chile (1997)
16. Escamilla L, "Análisis de confiabilidad de naves industriales de acero, sometidas al viento", Tesis para obtener al grado de Maestro en Ciencias Querétaro (1997)
17. Olivera F, "Estructuración de vías terrestres" México (2002)
18. Transportation Association of Canada (TAC), "Geometrical Design Guide for Canadian Roads", Canada (1999)



CIUDAD DE MÉXICO

Av. Nuevo León 210
Col. Hipódromo Condesa
CP 06100, México, D F
Tel +52 (55) 52 653600
Fax +52 (55) 52 653600

SANFANDILA

Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777
Fax +52 (442) 216 9671

www.imt.mx
publicaciones@imt.mx