



DESARROLLO DE UN SIG PARA VALUAR LOS COSTOS DE OPERACIÓN VEHICULAR DEL AUTOTRANSPORTE DE CARGA EN CARRETERAS FEDERALES: SIGCOV MEX 1

Juan Ramón Leyva Castro
Alberto Mendoza Díaz
Antonio García Chávez

**Publicación Técnica No. 205
Sanfandila, Qro, 2002**

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

**Desarrollo de un SIG
para valorar los Costos
de Operación Vehicular del
Autotransporte de Carga en
Carreteras Federales: SIGCOV
MEX 1**

Juan Ramón Leyva Castro
Alberto Mendoza Díaz
Antonio García Chávez

**Publicación Técnica No. 205
Sanfandila, Qro, 2002**

Este trabajo fue elaborado por Juan Ramón Leyva Castro y Alberto Mendoza Díaz de la Coordinación de Seguridad y Operación del Transporte del Instituto Mexicano del Transporte. Se contó también con la participación, en la etapa de aplicaciones de este trabajo, de Antonio García Chávez, perteneciente a la misma Coordinación.

Resumen	X
Abstract	XII
Resumen ejecutivo	XIV
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Consideraciones generales	1
1.2 Descripción del trabajo	3
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos	5
1.5 Alcances y metas	6
Capítulo 2 Antecedentes	7
2.1 Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y Sistemas de Información Geográfica (SIG)	7
2.1.1 GPS	7
2.1.2 SIG	11
2.2 Sistema de Información Geoestadística para el Transporte (SIGET)	14
2.3 Sistema de Información Geográfica de Accidentes (SIGA)	15
2.4 VOC (Vehicle Operating Cost)	17

Capítulo 3 Análisis estadístico de levantamientos georreferenciados	19
3.1 Información de inventario de la S.C.T.	19
3.2 Información de campo	21
3.2.1 Levantamiento de información	21
3.2.2 Corrección diferencial	24
3.2.3 Trazo obtenido en campo contra planos de inventario de la S.C.T.	27
3.3 Información obtenida del SIGET	31
3.3.1 Descripción	31
3.3.2 Trazo inventariado en el SIGET contra trazo obtenido en campo	32
3.4 Conclusiones del capítulo	36
Capítulo 4 Análisis de costos de operación vehicular	39
4.1 Naturaleza del análisis	39
4.2 Preparación del análisis	40
4.2.1 Características vehiculares y costos unitarios	41
4.2.2 Generación de la herramienta computacional	41
4.2.3 Proyecto de arcview para el manejo de los trazos considerados	45
4.2.4 Datos de las características de las carreteras	47

4.3 Análisis	51
4.3.1 Generación de valores de COV/km	51
4.3.2 Efectos del trazo y la longitud de segmentación	52
4.3.3 Errores en relación con el trazo de campo segmentado entre puntos consecutivos	56
4.4 Conclusiones del análisis	58
Capítulo 5 Desarrollo del Sistema de Información Geográfica	59
5.1 Generación del sistema	59
5.1.1 Importación de temas	59
5.1.2 Complementación y continuidad de la red	60
5.1.3 Segmentación y generación de coordenadas X, Y y Z de los nodos inicial y final de cada segmento	60
5.1.4 Duplicación de la red para considerar ambos sentidos de circulación	61
5.1.5 Datos ingresados para los segmentos	62
5.2 Algunas aplicaciones	69
Capítulo 6 Conclusiones generales	83
Referencias bibliográficas	87

Anexo A Coordenadas de latitud (x), longitud (y) y altitud (z) sobre el nivel del mar para el trazo carretero Perote – Jalapa – T. Izq. José cardel	92
Anexo B Datos que el VOC selecciona por omisión (“default”)	108

Resumen

Este trabajo se ha realizado con la finalidad de generar un sistema que permita calcular los costos de operación vehicular (COVs) del autotransporte de carga que circula a través de la Red Carretera Federal (RCF), para lo cual, se construyeron las herramientas que permiten llevar a cabo dichas evaluaciones de costo considerando diferentes tipos de vehículo, así como las características físicas y geométricas de la RCF. La información básica con que se elaboró este sistema es de la más precisa con que se cuenta en nuestro país. El desarrollo del modelo se basa en el Sistema de Información Geográfica (SIG) denominado ArcView, así como en el paquete para calcular COVs denominado "Vehicle Operating Costs (VOC)", desarrollado por el Banco Mundial y adaptado para las condiciones de operación de México. La metodología que se siguió para satisfacer las metas planteadas en este trabajo inicia con la recopilación de la información georreferenciada que represente lo más exactamente posible la RCF (levantada con receptor GPS), que es la red a modelar sobre la que se desean calcular los COVs del autotransporte de carga. El siguiente paso consiste en vincular a esta información georreferenciada (inventario de la RCF), sus propiedades físicas y geométricas (pendiente, curvatura, Índice Internacional de Rugosidad, etc). Una vez hecho esto, se cargó en un proyecto de ArcView dicha RCF (se incluyó además información georreferenciada de: localidades, casetas de peaje, etc), así como el código del paquete VOC (traducido de lenguaje de programación "Basic" a "Avenue") reprogramado para los fines de este trabajo. Con dicho proyecto integrado, se pueden desarrollar diversas aplicaciones que van desde determinar, para cualquier tipo de vehículo y cualquier par origen-destino (O-D), la ruta de menor COV o tiempo de recorrido, hasta realizar un programa de ruteo vehicular o bien obtener indicadores macroeconómicos del Autotransporte de Carga Nacional, etc. El modelo desarrollado se basa en estimados de COVs sobre segmentos carreteros de 500 metros de longitud. La red considerada es la RCF bajo jurisdicción de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y la información manejada corresponde al año 2001. Se concluye que las metas planteadas originalmente fueron alcanzadas en su totalidad, por lo que se asume que de este trabajo se deriva una herramienta de planeación de suma utilidad en la toma de decisiones para el Sector Transporte a nivel nacional.

(Palabras Clave: SIG, Modelo, Costos de Operación Vehicular, Red Carretera Federal, México)

Abstract

This work has been carried out with the aim of generating a system that allows calculation of truck vehicle operating costs (VOC) through the Federal Road Network (FRN). The former required the construction of tools that permit such cost calculations, considering different vehicle types, as well as the physical and geometrical properties of the FRN. This model was constructed based on the most precise information currently available in our country. Development of the model is based on the Geographic Information System (GIS) named ArcView, as well as on the Vehicle Operating Costs package named VOC, developed by the World Bank. The methodology followed to meet the proposed objectives, starts with the compilation of most precise available geo-referenced information of the FRN (registered with a GPS receiver). This is the network on which the freight truck vehicle operative costs are to be calculated. The next step consists on link to the geo-referenced FRN inventory, handled in an ArcView project, the physical and geometrical properties of its segments (slope, curvature, International Roughness Index, etc). Then, the VOC package code (translated from “Basic” code to “Avenue” code) was loaded also into that project. Several applications can be developed with the system thus integrated, such as determining: for any vehicle type and origin-destination (O-D) pair, the minimum cost (or time) path; vehicle routing programs; macroeconomics indexes for the national freight transportation, etc. The developed model is based on VOC estimates at the level of 500 meters long segments, which required segmentation of the FRN at that level. The network considered is the FRN under jurisdiction of the Ministry of Communications and Transports (SCT, in Spanish) and the information handled corresponds to the year 2001. It can be concluded that the goals originally proposed were totally reached, so this work provides a very useful planning tool for decision making related to transport at the national level.

(Key words: GIS, Model, Vehicle Operating Cost, Federal Highway Network, Mexico)

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los costos de operación vehicular es fundamental en la planeación, diseño y aspectos operativos de los sistemas de transporte. En el caso de los sistemas de transporte carretero, el costo de operación de un vehículo automotor determinado es aquél en el que se incurre por mantenerlo funcionando por unidad de longitud recorrida. Consiste en el costo de recorrido más los costos fijos.

En México existe una red nacional de carreteras de más de 320,000 kilómetros, cuya vital importancia para el país se refleja en el hecho de que por ella se desplazan más del 95% de las personas-kilómetro y del 70% de las toneladas-kilómetro de carga. De esta red, la fracción que sostiene la mayor parte de las cifras anteriores es la denominada red carretera federal pavimentada (en adelante referida sólo como Red Carretera Federal). Uno de los objetivos fundamentales de la Red Carretera Federal (RCF) es respaldar la actividad productiva nacional, facilitando el tránsito fluido y expedito de los intercambios comerciales nacionales e internacionales. Evidentemente este objetivo está relacionado con minimizar los costos de operación de los vehículos del autotransporte de carga. Con el fin de generar estrategias dirigidas al logro de esta meta, es indispensable estudiar, determinar y analizar, con la mayor precisión posible, los costos operativos en que incurren los diferentes tipos de vehículos de carga que circulan por la RCF.

En el pasado, ya se han realizado estudios [Aguerreberre y Cepeda 1991 a,b] de determinación de los costos operativos de vehículos mexicanos de carga, pero no referidos específicamente a la Red Carretera Federal. Este trabajo será una etapa del esfuerzo global anterior en tanto que buscará efectuar la determinación de los costos de operación vehicular del autotransporte de carga para la RCF. Con la finalidad de que la estimación de Costos de Operación Vehicular (COV) sea "la más precisa posible", será realizada con base en los siguientes dos elementos tecnológicos disponibles:

- Modelos que permiten calcular los COVs para vehículos mexicanos de carga, como es el caso del paquete de cómputo denominado "Vehicle Operating Cost (VOC)", elaborado en el Banco Mundial [Archondo-Callao, 1989] y calibrado para vehículos mexicanos [Aguerreberre y Cepeda 1991 a, b].

- El Sistema de Información GeoEstadística para el Transporte (SIGET) [Backhoff, 2002], el cual es un sistema de manejo de información geográfica para los distintos sistemas de transporte del país, construido sobre un inventario de la infraestructura de los mismos, levantado con Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés).

Más específicamente, con base en los dos elementos anteriores, este trabajo: (I) tomará la Red Carretera Federal, (II) la dividirá en segmentos, y (III) a partir de las características físicas de cada segmento registradas en el SIGET u otra fuente de información (pendiente, curvatura, etc) y aplicando los modelos de COV, determinará éstos, así como las Velocidades de Operación (VOs) correspondientes, para ambos sentidos de circulación de cualquiera de las configuraciones tradicionales de los vehículos de carga que circulan por la red considerada. Cabe señalar que el sistema que se genere será capaz también de calcular COVs y VOs para automóviles y autobuses de pasajeros. Por último, (IV) con la información obtenida se creará un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permita: calcular los COVs y VOs (para la configuración vehicular deseada) para toda la red, manipular la información para realizar consultas específicas sobre los atributos particulares de cada configuración, resolver problemas de ruteo, etc. Ahondando un poco acerca de la elaboración de este trabajo en un SIG, cabe señalar que este último aporta un gran valor agregado, puesto que cualquier consulta o análisis realizado puede acompañarse de un útil despliegue cartográfico para visualizar y comprender eficientemente los resultados de dicho análisis. Además, la herramienta para la obtención de rutas óptimas de recorrido, también es proporcionada por el SIG ArcView que se empleará en este trabajo.

Cabe señalar que otros trabajos ya han abordado el tema referente al registro con GPS del alineamiento horizontal de las carreteras [Backhoff y Vazquez, 1998] y [Aburto, 2000], sin embargo, casi nada ha sido realizado en México sobre el registro del alineamiento vertical. Como este último es de vital importancia en el valor de los COVs incurridos por los vehículos de carga en tránsito, en este trabajo se busca también analizar la precisión con que algunos equipos modernos de GPS registran dicho alineamiento. Asimismo, se aprovechará para hacer algunas evaluaciones sobre el alineamiento horizontal.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

De manera específica, este trabajo toma el tramo carretero Perote-Jalapa-entronque izquierdo (T. Izq.) José Cardel, de las carreteras Zacatepec-Jalapa-Veracruz (00486 y 30526 de la Ruta MEX-140) (antigua México-Veracruz) y obtiene la siguiente información referente a los alineamientos del mismo:

- Planos topográficos del inventario de la Red Carretera Federal con que cuenta la Dirección General de Planeación (D.G.P.) de la S.C.T. [DGP, 1993].
- Trazo georreferenciado obtenido del SIGET.
- Trazo georreferenciado obtenido directamente de campo con el receptor Magellan GPS ProMARK X [Magellan, 1997a]. Se utiliza este equipo por tenerse disponible y porque existen antecedentes documentados que avalan su confiabilidad en el levantamiento de alineamientos viales [Magellan, 1997b].
- El mismo trazo referido en el punto anterior, pero después de haberle aplicado el proceso denominado como "de corrección diferencial" [Magellan, 1997b]. Éste requiere de haber efectuado el levantamiento, con otro "receptor GPS", de un sitio denominado como "de control" (por ser de coordenadas geográficas perfectamente conocidas), durante el mismo periodo de tiempo y con la misma frecuencia de registro de posiciones, que en el levantamiento referido en el punto anterior. El levantamiento del "sitio de control" permite evaluar desviaciones comunes a receptores GPS al tomar registros simultáneamente dentro de un radio máximo de 50 km (en la misma región), mediante el cálculo de la diferencia entre el registro de ubicaciones de ese sitio y su ubicación exacta conocida. De esta manera, es posible corregir el trazo referido en el punto anterior, aplicándole las desviaciones de los momentos correspondientes. Los errores que se corrigen son: (I) errores generados por discrepancias de los registros de tiempo entre el "receptor GPS" y los satélites, (II) imprecisiones derivadas de inadecuada disponibilidad de satélites en un momento dado, (III) errores por demoras ionosféricas (derivadas de la densidad de electrones en la ionósfera) y troposféricas, y (IV) errores por Disponibilidad Selectiva. Más adelante se profundizará sobre estos diversos aspectos.

A partir de los cuatro trazos anteriores, se realizan una serie de comparaciones estadísticas entre pares de ellos, tomando generalmente

como trazo “real” (de base o de referencia) el correspondiente a los planos topográficos del inventario de la Red Carretera Federal. Con base en las comparaciones realizadas se establecen una serie de conclusiones referentes a aspectos tales como: (I) la confiabilidad del levantamiento georreferenciado del inventario del SIGET, (II) la confiabilidad de los registros de trazo obtenidos con el receptor utilizado (Magellan GPS ProMARK X), (III) la utilidad de la corrección diferencial en este caso, entre otras.

Posteriormente se efectúa un análisis de COVs tomando en consideración ambos sentidos de los trazos del SIGET y el levantado en campo (corregido diferencialmente), entre el km 5 y el km 53 del tramo carretero Jalapa – T. Izq. José Cardel. Este análisis se efectúa para la configuración vehicular T3-S2 con el peso bruto vehicular máximo que le permite el Reglamento de Pesos de Dimensiones vigente [DGAF, 1997]. Los COVs se estiman utilizando el programa VOC, calibrándose con base en información de empresas autotransportistas. Se estiman inicialmente considerando segmentos entre puntos consecutivos registrados en campo con el GPS, acumulándose para obtener el COV de recorridos que involucren varios de dichos segmentos. Para ambos trazos y ambos sentidos considerados, los COVs así obtenidos se consideran los más precisos que pueden obtenerse. Esta información, en principio, permite evaluar qué nivel de diferencia en la estimación de COVs se genera con la metodología anterior entre ambos perfiles considerados y los dos sentidos de circulación. Asimismo, en virtud de que este trabajo busca generar estimados de COVs para toda la Red Carretera Federal, este análisis se amplía posteriormente para determinar la máxima longitud de segmento a la que puede llegarse sin sacrificar excesivamente la precisión de los COVs, así como las condiciones en que tales ampliaciones de longitud pueden realizarse. La idea de esto último es minimizar el esfuerzo y requerimientos para toda la red (p ej, fuerza laboral, capacidad de memoria de almacenamiento, etc), reduciendo la segmentación al mínimo detalle.

El conjunto de todos los análisis efectuados, permite generar una serie de criterios que son aplicados posteriormente para desarrollar el sistema de evaluación de COVs en toda la Red Carretera Federal. Asimismo, este esfuerzo es ampliado con el fin de hacer la utilización de dicho sistema más amigable con el usuario.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS LEVANTAMIENTOS

Los análisis realizados se refieren a la comparación de un conjunto de levantamientos efectuados para el tramo carretero Perote-Jalapa-entronque izquierdo (T. Izq.) José Cardel, de las carreteras Zacatepec-Jalapa-Veracruz (00486 y 30526 de la Ruta MEX-140; antigua México-Veracruz). La ubicación de dicho tramo se ilustra en la Figura 1.

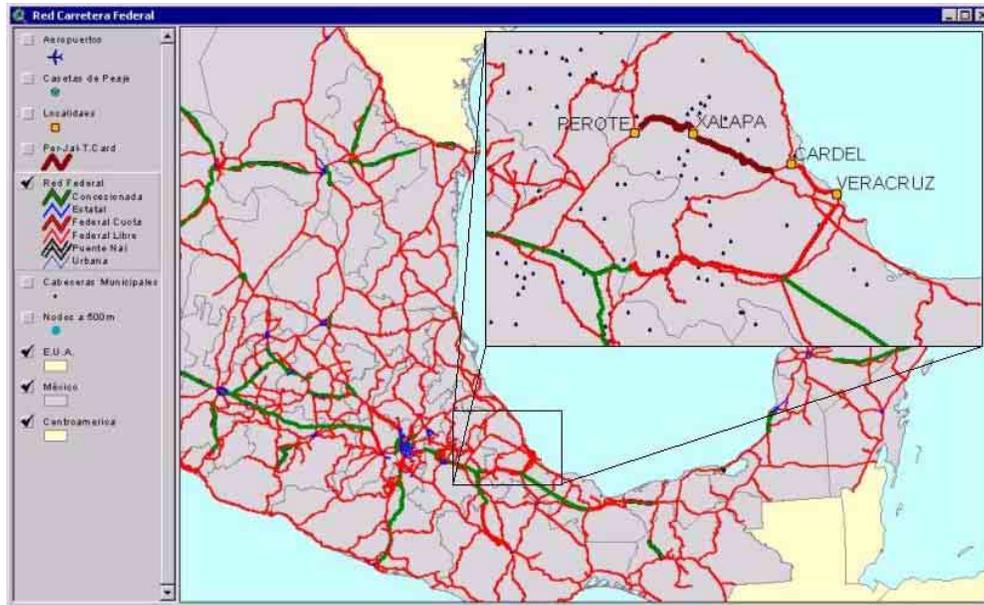


Figura 1 Ubicación geográfica del tramo Perote – Jalapa – T. Izq. José Cardel

Información de Inventario de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes S.C.T.

La información de inventario de la S.C.T. está conformada por un plano y un listado de coordenadas X, Y y Z de 602 puntos ubicados a lo largo del trazo Perote-T. Izq. José Cardel. Los análisis presentados en este trabajo se realizan en términos de estos 602 puntos, ya que fueron determinados con toda precisión durante el levantamiento topográfico de este inventario.

Las coordenadas X y Y de los puntos anteriores, tienen como origen el km 0+000 de un antiguo cadenamamiento a 2.52 kilómetros (sobre el eje del camino) antes de llegar a Perote con dirección a Veracruz. Ese mismo sitio tiene el kilometraje 101+173 en el cadenamamiento actual. Las coordenadas X, Y y Z de los 602 puntos de este inventario, se manejan en metros, por esta razón, se decidió estandarizar los distintos tipos de trazos

considerados (más adelante) al sistema de coordenadas X y Y (en metros) correspondiente a la proyección Cónica Conforme de Lambert. Para la coordenada Z se decidió utilizar la altitud sobre el nivel del mar (en metros).

Información de Campo

Levantamiento de información

El trabajo en campo consistió en obtener el trazo georreferenciado del tramo mencionado mediante el empleo del GPS. Dicho trazo se obtuvo montando el "receptor GPS" en un automóvil y recorriendo en él los tramos mencionados. Se partió desde la localidad de Perote hasta llegar a Jalapa y posteriormente se realizó otra sesión desde Jalapa hasta T. Izq. José Cardel.

Corrección Diferencial

Para los recorridos en ambos sentidos del tramo Jalapa-T. Izq. José Cardel, los archivos computacionales generados con los "receptores GPS", móvil y estático, fueron ingresados en una subrutina del programa MSTAR que, con base en dichos archivos, realiza la corrección diferencial del trazo registrado con el receptor móvil. De esta manera, para 5,093 puntos registrados en el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel, se obtuvo su correspondiente juego de coordenadas X, Y y Z corregidas diferencialmente. Lo mismo fue obtenido para 4,631 puntos registrados en el sentido T. Izq. José Cardel-Jalapa.

Con base en los puntos registrados en el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel, se obtuvieron las acumuladas de frecuencias relativas en la Figura 2 para los errores en X, Y y Z (E_x , E_y y E_z , respectivamente), definidos éstos como la diferencia de la coordenada sin corrección menos la corregida. A partir de esta figura es evidente que el E_x resulta con "sesgo" negativo, en tanto que para los E_y y E_z el "sesgo" resulta positivo. La misma figura también evidencia que, en el 70% de los casos, el E_x se encuentra entre -10 y -5 m, el E_y entre 2 y 7 m, y el E_z entre 8 y 14 m. La Tabla 1, mostrada debajo de la Figura 2, presenta los valores específicos de media y desviación estándar de los errores E_x , E_y y E_z , así como de los errores en dos (E_{xy}) y en tres dimensiones (E_{xyz}). Cabe señalar que para cada uno de los 5,093 puntos los errores E_{xy} y E_{xyz} fueron calculados de manera "euclidiana" (p.ej., $E_{xy} = \sqrt{(E_x^2 + E_y^2)}$ y $E_{xyz} = \sqrt{(E_x^2 + E_y^2 + E_z^2)}$). La forma de las distribuciones para los errores E_x , E_y y E_z , en la Figura 2, es reflejo de la información para los mismos en la Tabla 1.

Con base en la Figura 2 y la Tabla 1 es evidente que la corrección diferencial actúa de manera significativa sobre la media o "sesgo" de los

errores (según fueron definidos anteriormente), aunque también sobre la variabilidad de los mismos. También es evidente que de las tres dimensiones, la corrección diferencial es un tanto mayor para la media y la desviación estándar de la altitud (Z), que para las de la longitud (X) y la latitud (Y). El comportamiento de los errores en el plano (Exy) es similar al de los errores Ex y Ey, puesto que los errores Exy son un reflejo de los dos anteriores. Lo mismo sucede con el error Exyz en relación con los errores Ex, Ey y Ez.

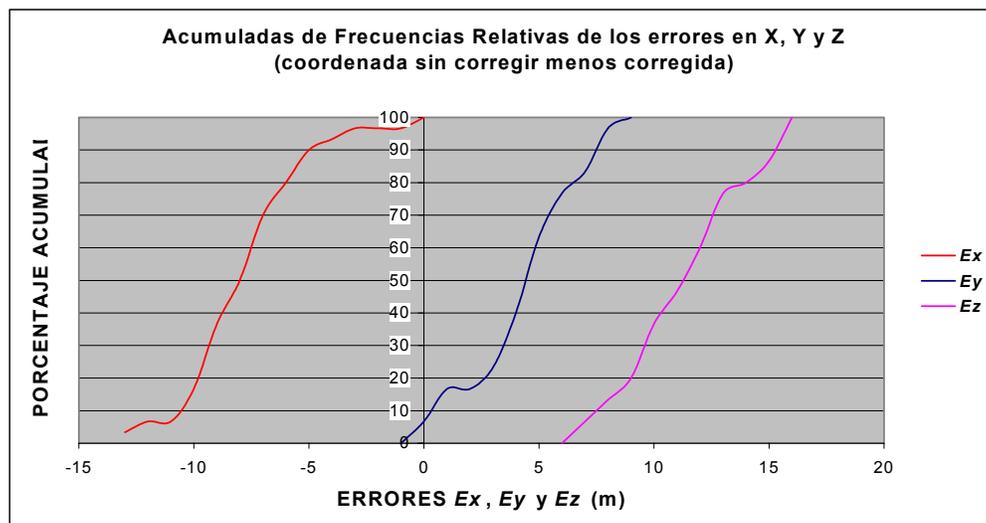


Figura 2 Acumulada de frecuencias relativas de los errores en X (Ex), Y (Ey) y Z (Ez) para el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel

Tabla 1 Valores de media y desviación estándar para los errores en X, Y, Z, en el plano y en el espacio. Sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel

	Ex	Ey	Ez	Exy	Exyz
MEDIA	-7.733333	4.307200	11.146718	9.284750	14.611282
DESV EST	2.599679	2.426099	2.660432	2.126835	2.909137

Se destaca que es más importante efectuar la corrección diferencial para retirar la variabilidad del error Ez que para cualquier otro fin relacionado con las otras dos dimensiones. Lo anterior, dado el efecto tan determinante que la pendiente tiene en los costos de operación de los vehículos de carga [ESRI, 1991], cuya determinación será el objetivo básico de este trabajo.

Para el sentido T. Izq. José Cardel-Jalapa, se obtuvieron también las acumuladas de frecuencias relativas para los Ex, Ey y Ez (Figura 3). A partir de esta figura es evidente que la media del Ex es prácticamente cero y que la del Ey es positiva, pero con valor menor a 1.5 m, mientras que la media del Ez resulta positiva y significativamente alta, asimismo, también evidencia que, en el 70% de los casos, el Ex se encuentra entre -3 y 3 m, el Ey entre -2 y 4 m, y el Ez entre 8 y 17 m. La Tabla 2 presenta los valores específicos de media y desviación estándar de los errores Ex, Ey, Ez, Exy y Exyz. Para cada uno de los 4,631 puntos en este sentido. Como es evidente en la Figura 3 y la Tabla 2, en este sentido de circulación se obtienen resultados similares a los antes presentados para el sentido opuesto. También en este caso la corrección diferencial resulta notablemente mayor para la media y la desviación estándar de la altitud (Z) que para las otras dos dimensiones.

Es de destacar que para los errores Ex, Ey y Ez obtenidos en ambos sentidos analizados, se detectó el fenómeno estadístico denominado "autocorrelación" [Johnston, 1984]. Éste consiste en que los errores se presentan correlacionados a lo largo del tiempo, es decir, el error de la medición siguiente es dependiente del de la anterior.

Tabla 2 Valores de media y desviación estándar para los errores en X, Y, Z, en el plano y en el espacio. Sentido T. Izq. José Cardel-Jalapa

	<i>Ex</i>	<i>Ey</i>	<i>Ez</i>	<i>Exy</i>	<i>Exyz</i>
MEDIA	0.064516	1.143194	12.267308	3.384803	12.960951
DESV EST	2.801017	3.022660	4.716678	2.549145	4.743550

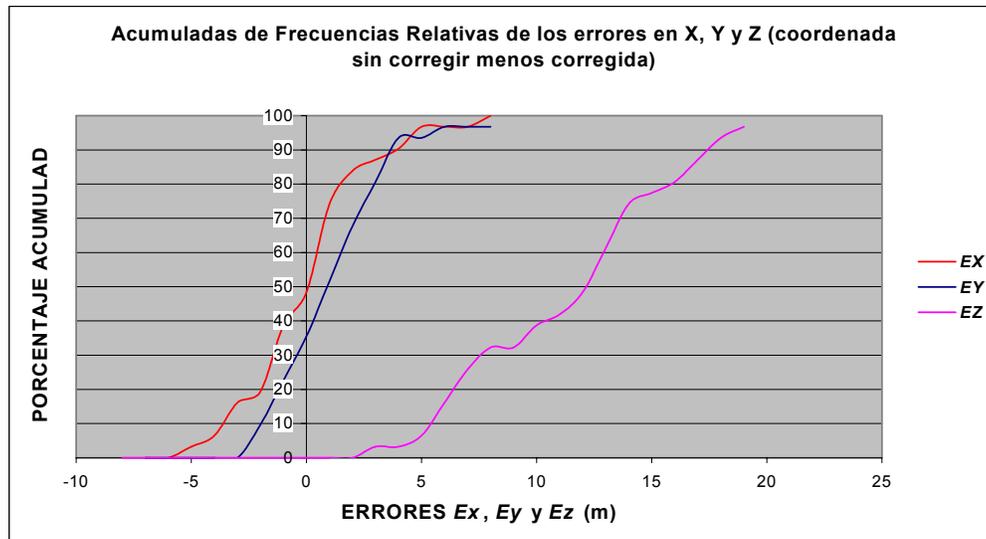


Figura 3 Acumulada de frecuencias relativas de los errores en X (E_x), Y (E_y) y Z (E_z) para el sentido T. Izq. José Cardel-Jalapa

Trazo obtenido en campo contra planos de inventario de la S.C.T.

Se realizó un análisis similar al mostrado anteriormente, pero ahora entre los puntos del inventario de la S.C.T. y sus correspondientes en el trazo obtenido en campo con GPS (corregido diferencialmente). En este caso, los errores E_x , E_y y E_z fueron obtenidos como la diferencia entre la coordenada del trazo de inventario menos la del trazo con el “receptor GPS”. La Tabla 3 reporta los valores de desviación estándar de los errores E_x , E_y y E_z para una muestra de puntos ubicados en tres secciones diferentes cuyos cadenamientos inicial y final también se indican en la tabla. No se reportan valores de media (sesgos) en ninguno de los tres casos considerados pues el procedimiento utilizado para poner ambos trazos en coordenadas tipo Lambert tiende a minimizar el desplazamiento relativo entre los mismos (es decir, reduce los sesgos). Asimismo, para efectos de estimación de los costos de operación de los vehículos de carga, los desplazamientos relativos entre trazos suelen no ser significativos, a diferencia de las desviaciones estándar, las cuales sí son generalmente determinantes en dichas estimaciones, particularmente la de E_z .

Como es evidente en la Tabla 3, los resultados (desviaciones estándar de los errores) para las tres secciones consideradas son muy consistentes. Es interesante que las desviaciones estándar de E_x , E_y y E_z en la Tabla 3 resultan de magnitud similar a las reportadas en las Tablas 1 y 2 para la comparación de trazos obtenidos con el “receptor GPS”, antes y después de corrección diferencial.

Tabla 3 Valores de desviación estándar para los errores E_x , E_y y E_z correspondientes a la comparación del trazo del inventario de la S.C.T. y el obtenido en campo con GPS

CASOS	DESV EST		
	E_x	E_y	E_z
km 112+440 a 113+840	2.712	2.735	4.824
km 123+300 a 128+820	2.712	2.735	3.744
km 136+300 a 143+760	2.712	2.735	3.442

Por el efecto tan determinante de las pendientes en los costos de operación de los vehículos de carga, es importante esclarecer el real impacto de las desviaciones estándar de E_z en la Tabla 3 en la estimación de las pendientes. Con esta finalidad se presenta la Figura 4, la cual compara el perfil vertical del inventario de la S.C.T. y del levantamiento en campo con GPS para una de las tres secciones consideradas.



Figura 4 Perfiles verticales del inventario de la S.C.T. y del levantamiento con GPS. Segmento km 123+300 a 128+820

En la figura es aparente que los perfiles comparados son muy similares entre sí. Como resultado de lo anterior, un análisis aritmético de comparación de pendientes obtenidas de los dos perfiles indicó que para el 70% de los casos, el error en la estimación de las pendientes es de menos de 2.3 unidades porcentuales de pendiente (p ej, si la pendiente es de 5%, en el 70% de los casos su estimación se encontrará entre 2.7 y 7.3%). El error máximo anterior corresponde a la diferencia de pendientes estimadas entre puntos consecutivos registrados con GPS, es decir, pendientes de

segmentos de 15 a 30 metros de longitud. En segmentos más largos, como aquéllos en los que en carreteras reales la pendiente casi no varía (de 200 metros en adelante), dicho error máximo se reduce notablemente si los errores se toman como la diferencia de pendientes estimadas para esos segmentos a través del promedio de las pendientes entre sus puntos a cada 15 a 30 metros (lo cual reduce notablemente la desviación estándar de los errores). Más adelante se indaga sobre los efectos reales de estos niveles de error, en los Costos de Operación Vehicular.

Información obtenida del SIGET

Descripción

A partir de 1994, los “Centros SCT” de los estados de la República realizaron el levantamiento con GPS de sus respectivas redes carreteras así como de una serie de atributos de las mismas (ubicación de puentes, alcantarillas, etc). Este levantamiento fue efectuado siguiendo un procedimiento similar al empleado en el levantamiento en campo del tramo Perote-Jalapa-T. Izq José Cardel (ya descrito), aunque en el primero no se efectuó corrección diferencial de las ubicaciones registradas. Después del registro de dicha información, ésta fue almacenada por el Instituto Mexicano del Transporte (I.M.T.) en archivos electrónicos de ArcInfo que forman la estructura fundamental del SIGET. De estos archivos se extrajo la información del trazo geométrico del tramo carretero Jalapa-T. Izq. José Cardel con la finalidad de realizar un análisis comparativo entre éste y su similar levantado en campo en este trabajo. El tipo de información para tres puntos del trazo proveniente del SIGET, es como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4 Tipo de información para cada punto del trazo proveniente del SIGET

X	Y	Z	FECHA	HORA
-96.8970331	19.525815	1465.42	11/03/94	20:05:30
-96.8969783	19.525724	1465.42	11/03/94	20:05:31
-96.8969233	19.525643	1465.42	11/03/94	20:05:32

En la Tabla 4, X y Y están en coordenadas geográficas (longitud y latitud), en tanto que Z está en metros (sobre el nivel del mar). Por lo tanto, fue necesario transformar las coordenadas X y Y al sistema de coordenadas correspondiente a la proyección tipo Lambert, cuyas unidades son metros.

Trazo inventariado en el SIGET contra trazo obtenido en campo

Las tres coordenadas (X, Y y Z) de 737 puntos del trazo del SIGET del tramo Jalapa-T. Izq. José Cardel, fueron comparadas contra sus valores correspondientes en los trazos registrados en campo en ambos sentidos de circulación (corregidos diferencialmente). La longitud total de la muestra abarcada por estos 737 puntos es de 19.109 kilómetros. Se generó una muestra de 737 puntos con coordenadas X, Y y Z para los tres trazos antes indicados, a partir de la cual se generaron los resultados que se presentan enseguida.

De manera similar a los análisis de comparación de trazos antes mostrados, se presenta la Figura 5, la cual contiene las acumuladas de frecuencias relativas de los errores E_x , E_y y E_z definidos para el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel (por supuesto en relación con el trazo del SIGET). Asimismo, la Tabla 5, presenta los valores de media y desviación estándar para los errores considerados, incluyendo los correspondientes al sentido opuesto al mostrado en la Figura 5.

A partir de la Tabla 5, es evidente que el sesgo de los errores (media) oscila entre los 20 y los 30 metros. Las desviaciones estándar para E_z son bastante mayores que para E_x y E_y . También las desviaciones estándar de E_x , E_y y E_z para ambos sentidos de circulación resultan varias veces mayores (de 4 a 8 veces para E_x y E_y , y alrededor de 11 veces para E_z) que las obtenidas al comparar el trazo obtenido en campo contra el de los planos de inventario de la S.C.T. El análisis aritmético de comparación de pendientes obtenidas de las coordenadas Z de los dos perfiles indicó que para el 70% de los casos, el error en la estimación de las pendientes es de menos de 4 unidades porcentuales de pendiente (p ej, si la pendiente es de 5%, en el 70% de los casos su estimación se encontrará entre 1 y 9%). De manera análoga a lo señalado anteriormente, este error máximo, que corresponde a la diferencia de pendientes de segmentos de 15 a 30 metros de longitud, se reduce notablemente en segmentos más largos, como aquéllos en los que en carreteras reales la pendiente permanece uniforme.

Lo anterior es indicativo del nivel de precisión del levantamiento del SIGET en relación con los efectuados en este trabajo con el "receptor GPS" MAGELLAN, así como de la ganancia en precisión que ha brindado la eliminación de la "Disponibilidad Selectiva" y el desarrollo de la "tecnología GPS" en estos últimos años (entre 1994, cuando se realizó el inventario del SIGET, a la fecha).

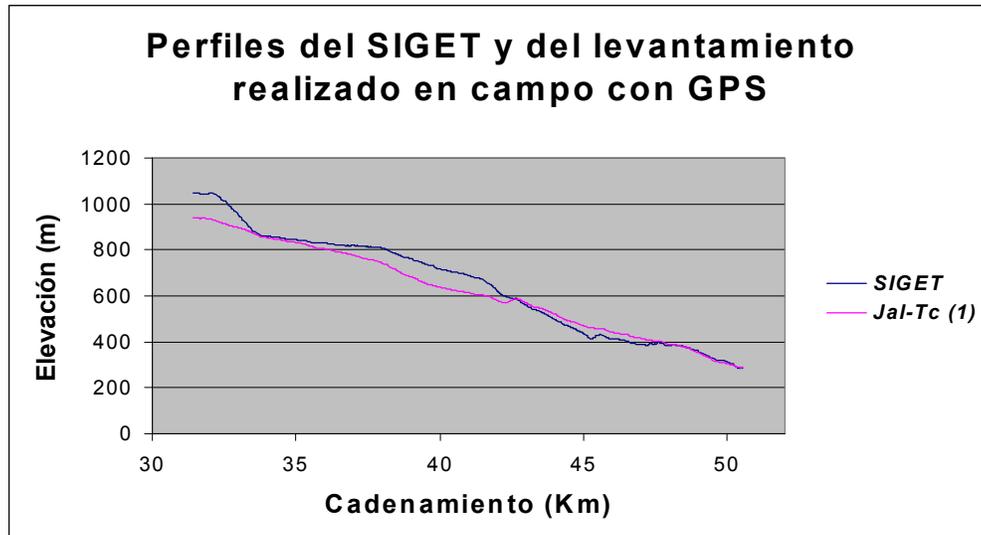


Figura 5 Acumulada de frecuencias relativas de los errores en X (Ex), Y (Ey) y Z (Ez) para el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel

Tabla 5 Valores de media y desviación estándar para los Ex, Ey y Ez, en el tramo Jalapa-T. Izq. José Cardel

SENTIDO	Jalapa-T. Izq. José Cardel			T. Izq. José Cardel-Jalapa		
ERROR	Ex	Ey	Ez	Ex	Ey	Ez
MEDIA	-20,180	-6,498	-24,314	31,584	-25,117	-31,096
DESV EST	11,688	23,107	43,778	22,920	19,869	44,688

Con el fin de tener una mejor sensación de la magnitud de los errores que generan los resultados antes mostrados, se presenta la Figura 6, la cual compara el trazo en planta de los dos levantamientos considerados, así como la Figura 7 que compara los perfiles verticales correspondientes en función del cadenamiento. A partir de la Figura 6 es evidente que para el rango de variación de las coordenadas X y Y del tramo carretero considerado, los errores Ex y Ey son irrelevantes. Alternativamente, la Figura 6 ilustra que para el mucho menor rango de variación de la coordenada Z, los errores Ez son más significativos.

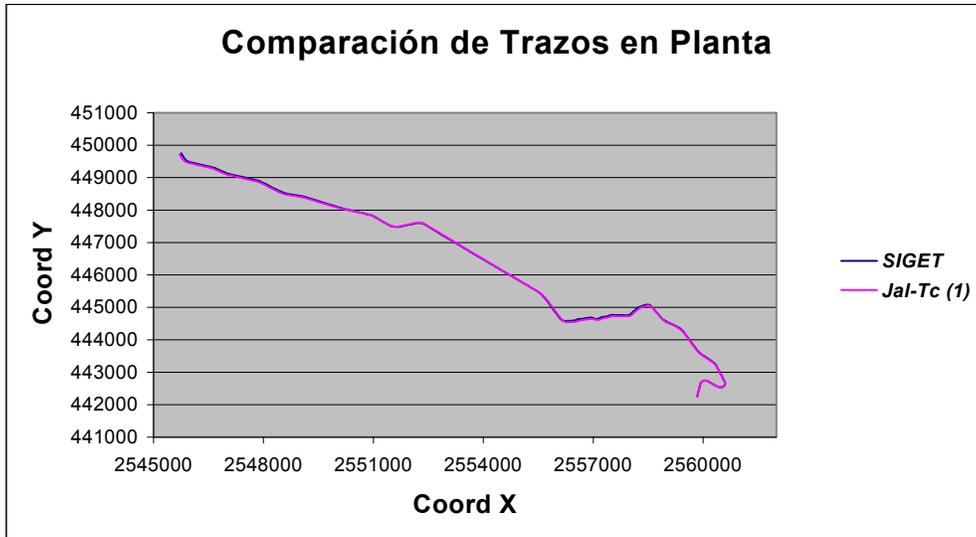


Figura 6 Trazos en planta del levantamiento del SIGET y del levantamiento con GPS

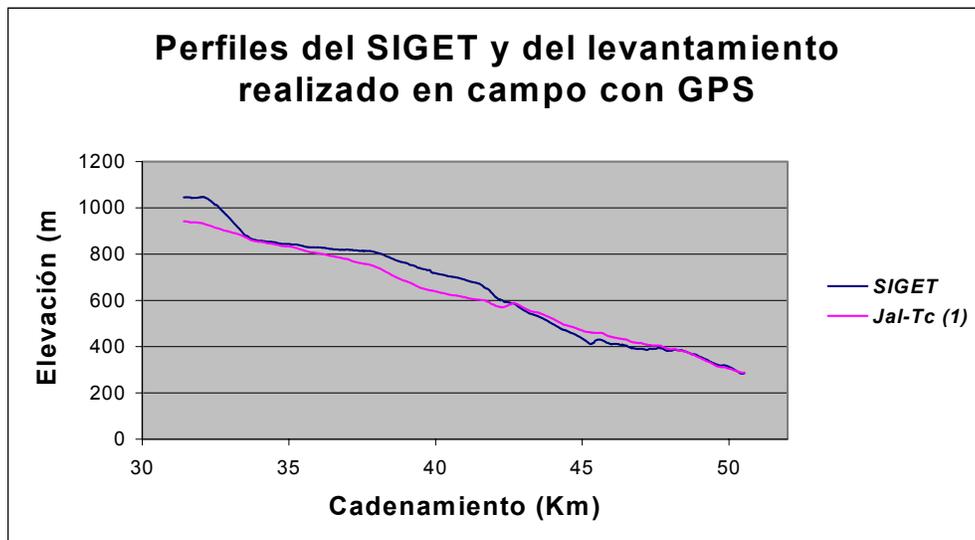


Figura 7 Perfiles del levantamiento del SIGET y del levantamiento con GPS

ANÁLISIS DE COSTOS DE OPERACIÓN VEHICULAR

Naturaleza del Análisis

A partir de este análisis se genera un conjunto de recomendaciones que sirven de base en el desarrollo del SIG que es objeto de este trabajo.

El análisis efectuado se basa en la estimación del COV total para ambos sentidos de 7 secciones dentro del tramo Jalapa – T. Izq. José Cardel, las cuales resultaron con una longitud promedio de 6.85 kilómetros. El COV total se obtiene a partir de la agregación de estimados obtenidos para todos los segmentos componentes de dichas secciones en el sentido dado, considerando una u otra de las siguientes dos segmentaciones:

- (I) una correspondiente a la longitud existente entre puntos consecutivos levantados con GPS (entre 15 y 30 metros), referida de aquí en adelante como segmentación “punto a punto”; y
- (II) otra correspondiente a segmentos de 500 metros.

Dado que entre el levantamiento realizado en campo con GPS para el tramo considerado y el que se tiene en el SIGET, existen diferencias significativas (particularmente en altitud) según se evidenció anteriormente, los COVs totales por sección y por sentido se evalúan para ambos perfiles anteriores levantados con GPS. La combinación de ambos sentidos para las 7 secciones de cada uno de los dos perfiles y de ambas segmentaciones, resulta en 56 casos para los que se estima el COV total. A partir de estos 56 estimados, se pueden generar diferentes estadísticas para valuar el error de estimar los COVs de distintas maneras. Se considera de particular interés la valuación del error de estimar los COVs con el perfil del SIGET segmentado a 500 metros, en relación con el perfil levantado en campo con GPS segmentado “punto a punto”; ya que el primer caso representa la información georreferenciada más completa con que se cuenta y el segundo, la forma más precisa de estimación ensayada hasta ahora, por ser la que mejor corresponde al trazo de la carretera y la que se basa en la mayor cantidad de puntos.

En todos los casos los COVs se evalúan utilizando el algoritmo del programa VOC, para la configuración de carga T3S2. Ésta es una de las más comunes en circulación por las Carreteras Federales (con 22.7% del total de vehículos de carga), así como de las que más participan en el autotransporte de carga en el país (con 32.3% de las toneladas-kilómetro y 48% del valor de lo transportado) y la que más contribuye en el

autotransporte de carga internacional (con más del 70% de las toneladas-kilómetro y del valor de lo transportado), particularmente con los Estados Unidos. Los datos anteriores provienen de Gutiérrez y Mendoza [2001]. Todo el análisis se refiere a la condición de plena carga del T3S2, considerando el peso bruto vehicular (PBV) máximo que el Reglamento de Pesos y Dimensiones actualmente en vigor [DGAF, 1997] le permite a dicha configuración en condiciones convencionales (44 toneladas).

Preparación del Análisis

Para la determinación de los COVs de un segmento carretero determinado, el programa VOC requiere de tres tipos de datos: características del vehículo, características de la carretera y costos unitarios. En primera instancia, se seleccionó el mejor conjunto de características para el vehículo T3S2 y sus costos unitarios. El enfoque que se sigue para los análisis de COVs consiste en utilizar una herramienta computacional, generada ex profeso, que obtiene la información de las características de la carretera (propiedades físicas y geométricas) a partir de un inventario de la infraestructura levantado con GPS y manejado en ArcView. Dicha herramienta también será parte del SIG que es objeto este trabajo.

Asimismo, se integra en ArcView la subrutina del VOC que calcula la Velocidad de Operación (VO) y el COV, para que la herramienta antes referida estime dichos parámetros en paquete para un conjunto de segmentos seleccionados del inventario o para el total de ellos.

Análisis

Generación de valores de COV/km

Con las herramientas generadas, se procedió a realizar las corridas de estimación de COVs para los 56 casos considerados. La Tabla 6 resume los resultados más relevantes obtenidos para la segmentación “punto a punto”, en tanto que en la Tabla 7 se presenta lo correspondiente a la segmentación a cada 500 metros. En ambas tablas se presenta, en su parte superior, los resultados para el sentido de circulación Jalapa – T. Izq. José Cardel y, en su parte inferior, los correspondientes al sentido opuesto. Asimismo, para ambos sentidos de cada tabla, se muestran el cadenamiento aproximado de cada sección, el número de segmentos (“punto a punto” o de 500 metros) ubicados en ellas, la longitud real de cada sección en ArcView, el tiempo de recorrido del T3S2 (en horas), el COV, el COV por kilómetro y la VO (en kilómetros por hora, km/hr o Kph). Además, tanto para un sentido como para el otro de cada tabla, se presenta un renglón con valores globales o promedio para los parámetros anteriores. De ambas tablas se obtiene una longitud promedio para las 7 secciones, de 6.85 kilómetros (47.924 km / 7 secciones). Para los 56 casos en las Tablas 6 y 7 se obtiene un COV/km promedio de 14.37 pesos.

En las Tablas 6 y 7 es evidente que, para ambas segmentaciones y ambos trazos, el COV y el COV/km resultan mayores en el sentido T. Izq. José Cardel – Jalapa, en ascenso, que en el opuesto, el cual es en descenso. Por otra parte, en todos los casos, los dos costos anteriores resultan ligeramente mayores en el trazo del SIGET que en el levantado en campo para este trabajo. También son ligeramente mayores los costos de la segmentación “punto a punto”.

Efectos del trazo y la longitud de segmentación

Con el fin de realizar una determinación más precisa del efecto de los dos trazos y los dos niveles de segmentación en los COV/km, se realizó un análisis de variancia (ANOVA, por sus siglas en inglés) sobre los 56 casos.

Para minimizar el efecto de otras variables (p ej, características físicas específicas de las secciones, tales como pendiente, curvatura, estado del pavimento, longitud, etc), en el “ANOVA” en realidad se tomó como variable dependiente la diferencia del COV/km (correspondiente a una sección y un sentido de circulación) menos el promedio de los 4 valores de COV/km para la misma sección y el mismo sentido. De esta manera, el “ANOVA” es en 2 sentidos de clasificación (longitud de segmentación y trazo) con 14 observaciones por cada una de las 4 celdas (4 combinaciones de las dos

segmentaciones por los dos trazos). Los resultados del ANOVA efectuado se presentan en la Tabla 6. De todas las “F’s” calculadas, sólo la del trazo resulta significativa para una “F crítica” igual a 7.2 correspondiente a un nivel de significancia (α) de 1%. Para un nivel de 5% (“F crítica” igual a 4.05), los dos efectos principales (trazo y longitud de segmentación) resultan significativos. La interacción no resulta significativa para ninguno de los dos niveles de significancia anteriores. Las “F’s” calculadas del trazo y la longitud de segmentación indican que el efecto del primero es 2.2 veces el de la segunda.

Tabla 6 Resultados del ANOVA (Análisis de Variancia)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F calculada	F (1%) crítica	F (5%) crítica
Longitud de segm.	5.32	1	5.32	5.45	7.2	4.05
Trazo	11.73	1	11.73	12.01	7.2	4.05
Longitud de segm. x trazo	1.38	1	1.38	1.41	7.2	4.05
Dentro del error	50.79	52	0.98	1.00	7.2	4.05
Total	69.21	55				

Conclusiones del Análisis

Los errores inducidos en la estimación de COV/km por la segmentación de 500 metros y el empleo del trazo del SIGET se consideran aceptables. Lo anterior valida el que, para el desarrollo del sistema que es objeto de este trabajo, pueda utilizarse una segmentación de 500 metros sobre el trazo del SIGET.

Aunque en este análisis en el que las secciones tienen una longitud promedio de 6.85 kilómetros, los errores máximos (en la estimación de COV/km) obtenidos para el trazo del SIGET segmentado “punto a punto” y el trazo del SIGET segmentado a cada 500 metros, en relación con el trazo de campo segmentado “punto a punto”, resultaron considerables (20.1 y 14.4% respectivamente, en el 70% de las veces), ellos se reducirían considerablemente en recorridos mucho mayores como los que generalmente se modelarán en el sistema que es objeto de este trabajo. Esto último se debe a que en recorridos más largos, la desviación estándar de los COV/km (que son valores promedio por sección o recorrido) se reduce y con ello también la de los errores.

DESARROLLO DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La filosofía adoptada para el desarrollo del sistema, denominado desde un principio como SIGCOV MEX 1, es buscar que éste sea completamente operable en ArcView y su extensión para el análisis de redes, con el fin de lograr la máxima explotación posible de la información contenida en el mismo, así como de las potencialidades de esos dos programas computacionales.

Generación del Sistema

Importación de temas

El primer paso en la generación del SIGCOV MEX consistió en dar de alta en ArcView un proyecto que se designó “SIGCOV.apr” y crear en éste una vista denominada “Red Carretera”, en la que se incorporaron, desde el SIGET y el SIGA, los siguientes temas (en ArcView, cada tema tiene asociado una base de datos o tabla de atributos):

- Red Federal. Es un tema de poligonales abiertas (polilíneas), en el que cada polilínea representa un tramo o arco carretero. Se obtuvo del SIGA.
- Casetas. Es un tema de puntos, en el que cada punto representa una caseta de peaje. Se obtuvo del SIGET
- Cabeceras. Es un tema de puntos, en el que cada punto representa una ciudad importante o una cabecera municipal. Se obtuvo del SIGET.
- México. Es un tema de polígonos, en el que cada polígono corresponde a un estado de la República Mexicana. Se obtuvo del SIGET.
- Fronteras. Es un tema de polígonos, en el que cada polígono corresponde a un país que tiene frontera territorial con México (EUA, Guatemala y Belice). Se obtuvo de los CD's denominados “DATA & MAPS” [ESRI, 2001] de ArcView.

Complementación y Continuidad de la Red

Dado que el principal objetivo de este trabajo es lograr obtener COVs entre dos puntos (localidades) cualquiera que estén comunicados por la Red, fue de primordial importancia complementar la Red importada del SIGA (tema “Red Federal” en formato de ArcView), agregando a ésta tramos urbanos y de jurisdicción estatal, esenciales para permitir la comunicación entre dos o más carreteras federales y dar continuidad a las mismas en los cruces por ciudades. Este proceso se efectuó manualmente, dando continuidad a los nuevos arcos con la Red importada. El tema de ArcView así complementado fue posteriormente transferido al SIG denominado ArcInfo

[ESRI, 1991], el cual generó una intersección en todas las uniones y cruces entre arcos, culminándose con ello el proceso de dar continuidad a la Red.

Segmentación y Generación de Coordenadas X, Y Y Z de los Nodos Inicial y Final de cada Segmento

Mediante comandos de ArcInfo, la Red (en el tema “Red Federal”) se segmentó en elementos de 500 metros, resultando en un total de 106,747 segmentos, generándose también para cada uno de estos segmentos sus respectivos nodos inicial (F_node) y final (T_node). La segmentación de la Red Carretera en elementos de 500 metros, es la mayor discretización a la que se llegará en este trabajo, por lo tanto, ésta será la segmentación base sobre la que se calcularán los COVs. El cálculo de dichos COVs consistirá en la suma de los COVs de todos los segmentos de 500 metros involucrados en el trayecto entre dos o más puntos de interés.

También mediante comandos de ArcInfo, en el tema “Red Federal” se incluyeron las coordenadas X y Y de los nodos inicial (F_node) y final (T_node) de cada segmento. Asimismo, como una aproximación de la coordenada Z de estos nodos, se importó la de su punto más cercano dentro del levantamiento georreferenciado del SIGET. Dado que en éste existe un punto levantado con GPS a cada 15-30 metros, siempre hay uno de ellos prácticamente sobre los nodos inicial y final de cada segmento de 500 metros.

El archivo de la Red segmentada y con coordenadas X, Y y Z de los nodos inicial y final de cada segmento, fue posteriormente exportado desde ArcInfo a un archivo de ArcView. Cabe señalar que, en este archivo, hay un sentido definido para cada segmento, a través de los dos campos que contienen su nodo inicial (F_node) y su nodo final (T_node).

Duplicación de la Red para Considerar Ambos Sentidos de Circulación

Los 106,747 segmentos hasta aquí obtenidos (en el tema “Red Federal”) corresponden tan sólo a un sentido de circulación de las carreteras, y para los fines de este trabajo resulta de vital importancia conocer el COV para ambos sentidos, ya que obviamente existen notables diferencias para un mismo trayecto, si el sentido de operación sobre el mismo es ascendente o descendente.

La solución por la que se optó en este trabajo para considerar ambos sentidos de circulación de cada segmento, consistió en duplicar la Red Carretera (en el tema “Red Federal”) aprovechando que el Módulo de

Redes de ArcView [ESRI, 1996] identifica, para cada arco, su sentido de circulación con sólo indicarle cual de sus extremos será considerado como el punto de inicio.

Datos Ingresados para los Segmentos

Considerando los cambios anteriores, el tema “Red Federal” quedó ahora compuesto por 213,494 segmentos. Como requisito para la determinación de los COVs en estos segmentos, es necesario ingresar en campos de la tabla de atributos del tema “Red Federal” una serie de características para los mismos.

Ingresados manualmente

- Tipo de superficie
- Rugosidad promedio
- Número efectivo de carriles
- Altitud promedio del terreno
- Velocidad deseada
- Nivel de servicio
- Cuotas en los segmentos de autopista

Generados por medio de procesos de cómputo

Esta sección se refiere específicamente al cálculo de pendiente, sobreelevación, curvatura y COV para cada segmento. Las herramientas computacionales que se utilizan son similares a las empleadas anteriormente. La Figura 8 muestra el juego de botones que activan los programas o “scripts” utilizados en este caso.

Cálculo de la pendiente. Para los 213,494 segmentos, se calculó su pendiente considerando el sentido de circulación de cada segmento.

Cálculo de curvatura y sobreelevación. Para cada segmento, la curvatura y la sobreelevación fueron calculadas de acuerdo con los principios y procedimientos descritos antes. Los valores calculados para estas variables fueron ingresados en los campos “CURV” y “SOBREELEV”, respectivamente.

Cálculo de COVs. Para los 213,494 segmentos de 500 metros contenidos en la tabla de atributos del tema "Red Federal", el botón  permitió calcular el COV (en pesos mexicanos) y la VO (en km/hr) en el sentido de circulación de cada uno de ellos. Tanto la VO como el COV calculados, son los valores afectados por los factores que restringen a la velocidad deseada (nivel de servicio, pendiente, etc).

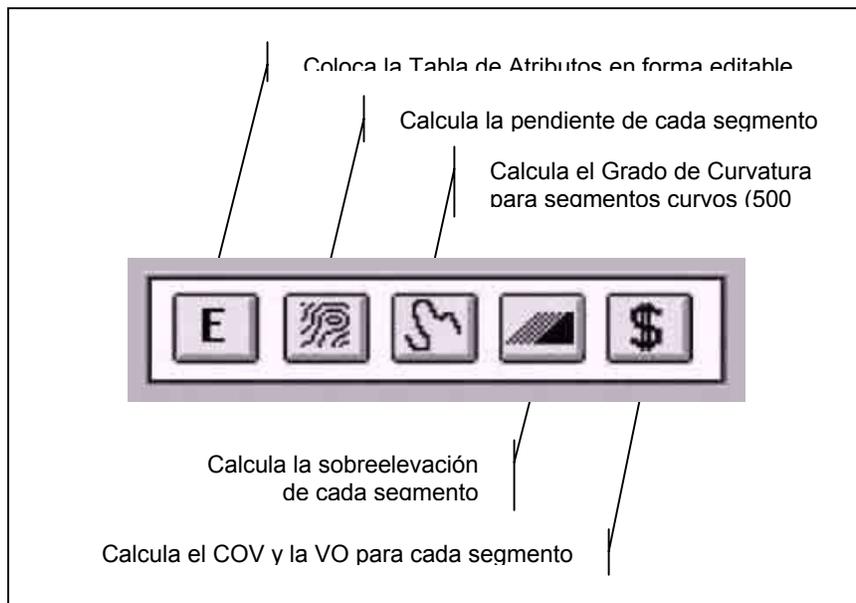


Figura 8 Barra de botones

Finalmente, la Figura 9 muestra una vista del SIGCOV MEX, que ejemplifica visualmente el contenido del mismo.

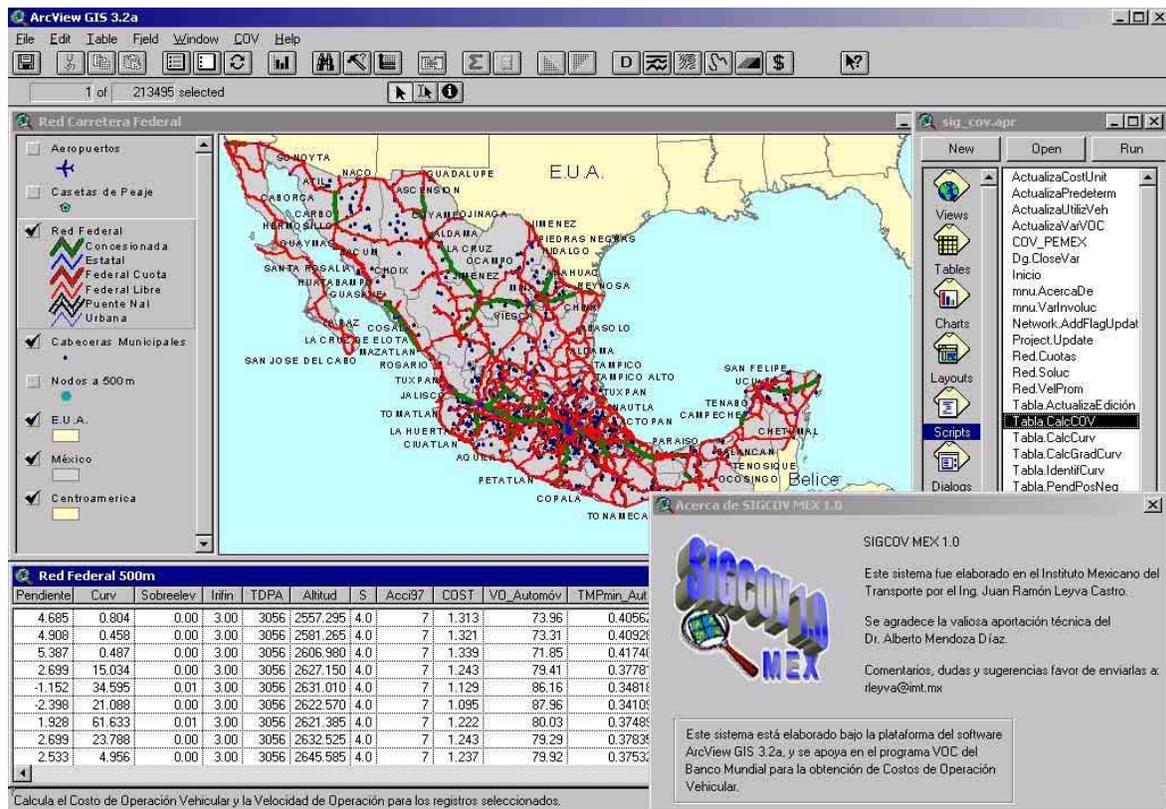


Figura 9 Vista general del SIGCOV MEX

Algunas Aplicaciones

El SIGCOV MEX 1 puede tener diversas aplicaciones. Cabe señalar que, en función del tipo de aplicación de que se trate, algunas de las variables de entrada del sistema deberán definirse de manera distinta, utilizando el criterio y experiencia del analista. Por ejemplo, si se tratase de definir la mejor ruta para un vehículo, habría que considerar las condiciones reales de los caminos en términos de IRI, nivel de servicio, cuotas de autopistas, etc; en cambio, si se tratase de identificar el mejor corredor a modernizar entre dos puntos, no habría que considerar el efecto temporal y diferenciado entre alternativas de algunas de las variables anteriores (p ej, el IRI), ya que éstas se mejorarían con la obra de modernización. La finalidad de esto último sería que la comparación entre alternativas se estableciese en igualdad de circunstancias en lo que respecta a esos parámetros temporales.

Algunas de las aplicaciones del SIGCOV MEX que pueden contemplarse, son:

- 1) En primera instancia, permitir la consulta y el despliegue cartográfico y tabular de los distintos tipos de información contenidos, tanto para recorridos completos como para ciertos tramos o segmentos específicos de interés. Como ya se mencionó, los distintos tipos de datos incluidos para cada tramo o segmento, son: pendiente, curvatura, sobreelevación, IRI, tránsito diario promedio anual (TDPA), cuotas en autopista, velocidades de operación y COVs estimados. A manera de ejemplo se presenta la Tabla 7, la cual muestra para cada Entidad Federativa los siguientes datos calculados a partir del SIGCOV MEX: (I) número de segmentos de 500 metros (en ambos sentidos de circulación) incluidos en la modelación, (II) curvatura promedio en grados de deflexión por kilómetro ($^{\circ}/\text{km}$), (III) IRI promedio en metros por kilómetro (m/km) y (IV) longitud carretera modelada (en ambos sentidos).

En la tabla 7 es evidente que el estado con mayor longitud de red modelada es Veracruz con 3,233 km, seguido por Jalisco con 3,165 km y Oaxaca con 3,036 km. Asimismo, los estados con carreteras más sinuosas (mayor valor de deflexión por kilómetro) en promedio son Oaxaca ($58.8^{\circ}/\text{km}$), Hidalgo ($54^{\circ}/\text{km}$) y Guerrero ($53.4^{\circ}/\text{km}$). Finalmente, los estados con carreteras en peor estado (mayor IRI) en promedio son Zacatecas ($5.99 \text{ m}/\text{km}$), Oaxaca ($5.60 \text{ m}/\text{km}$) y Tabasco ($5.44 \text{ m}/\text{km}$).

Tabla 7 Algunos datos de la red modelada por Entidad Federativa

ESTADO	Segmentos	Curvatura Prom. ($^{\circ}/\text{km}$)	IRI Prom. (m/km)	Longitud (km)
GRO	4800	53.4289	5.11	2,383.695
HGO	2180	53.9870	5.42	1,071.964
JAL	6385	28.3918	4.24	3,164.615
OAX	6112	58.8238	5.60	3,035.704
Q R	2680	7.7897	3.49	1,330.205
QRO	1132	42.0511	4.30	558.801
SIN	2616	16.2550	3.90	1,294.455
SON	4864	19.8025	3.90	2,421.088
TAB	1367	16.4169	5.44	677.293
VER	6534	26.3019	4.34	3,232.856
YUC	2863	8.4993	2.83	1,415.257
ZAC	3101	17.7409	5.99	1,535.682

2) Determinar COVs, cuotas y tiempos de recorrido, entre otros, a lo largo de ciertas rutas específicas, con fines de planeación del autotransporte para propósitos de logística empresarial. Por ejemplo, la empresa Ford produce chasises en Monterrey, NL, de donde los transporta en la modalidad “justo a tiempo”, para surtir su proceso de armado de vehículos en la planta de Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Utilizando el SIGCOV MEX 1, se obtiene que la ruta de menor COV para el movimiento anterior es a través de Saltillo (utilizando el libramiento), Matehuala, San Luis Potosí (utilizando el libramiento) y Querétaro (utilizando el libramiento), como se ilustra en la Figura 10 obtenida del sistema. Asimismo, el COV total del recorrido para un tractocamión articulado tipo T3S2 a plena carga por esa ruta es de \$13,416. Del COV anterior, \$630 corresponden al pago de peajes en autopistas. El tiempo total de recorrido es de 19.5 horas, lo cual significa que si un flete de chasises se requiere en Cuautitlán a las 8:00 horas, deberá salir de Monterrey a más tardar a las 12:30 horas del día anterior, considerando que no se presentase ningún imprevisto. Obviamente, los imprevistos deben siempre ser considerados por el operador logístico para evitar cualquier eventualidad que detenga la línea de producción.

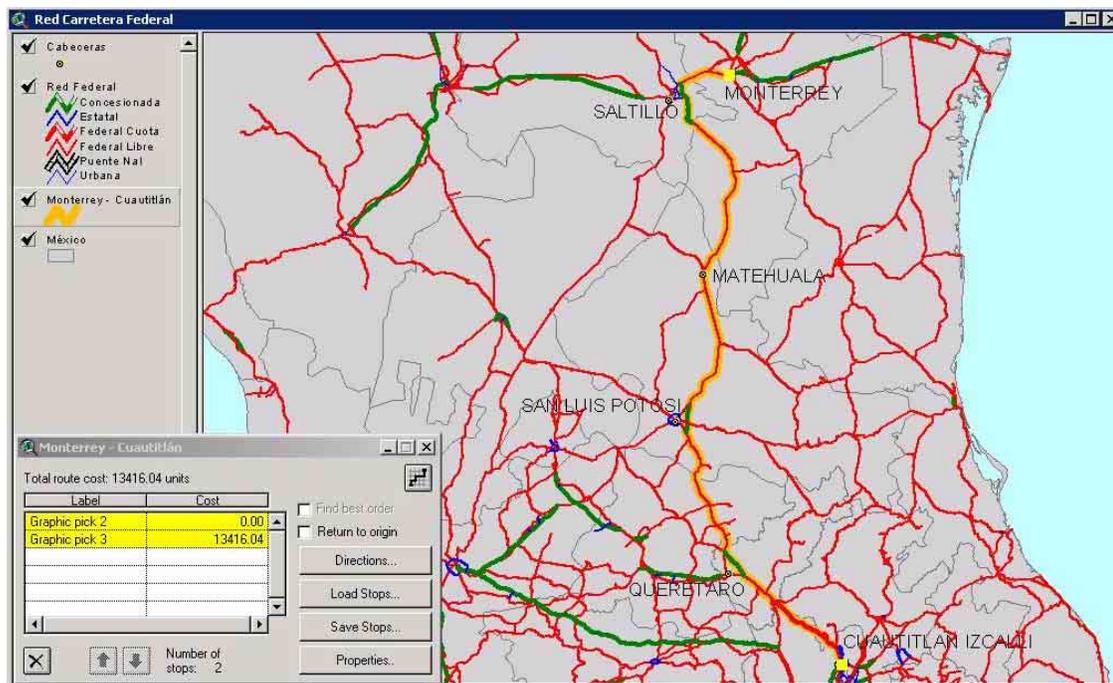


Figura 10 Ruta de menor COV entre Monterrey, NL y Cuautitlán Izcalli, Estado de México

- 3) Determinar el recorrido más corto o de menor costo entre dos o más sitios de la red, ya sea que se respete una cierta secuencia preestablecida de visita de los mismos o que se deje que el SIGCOV MEX elija dicha secuencia atendiendo al objetivo de minimizar distancias, costos o cualquier otro parámetro relacionado con el nivel de servicio. Puede darse la alternativa de que el recorrido regrese o no a su mismo lugar de origen. Esta aplicación normalmente se conoce como “ruteo vehicular” y tiene que ver con la planeación de la operación de flotillas vehiculares de autotransporte. A manera de ejemplo, considérese el caso de una empresa de autotransporte de Yucatán que es contratada para llevar un cargamento de 28 ton de Ixtle desde Mérida hasta Matamoros, Tamaulipas, y que consigue llevar de regreso un cargamento de insumos agrícolas, desde Nuevo Laredo, Tamaulipas, hasta la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Si el vehículo asignado a los dos viajes anteriores (ida y vuelta) es un T3S2 y debe regresar a su sitio original de partida (Mérida, Yucatán), se desea conocer el mejor circuito de recorrido global, así como el COV correspondiente. La Figura 11 ilustra el circuito generado, para el cual se obtiene un COV total de \$65,815. En esta figura, se muestran en color naranja los tramos del circuito en los que el vehículo va a plena carga y en color verde en los que va vacío.



Figura 11 Circuito de menor COV Mérida-Matamoros - Nvo. Laredo - Tuxtla Gtz. - Mérida

- 4) Identificar y evaluar obras de mejoramiento de la infraestructura de la red, tales como nuevas carreteras a construir, corredores a modernizar, etc. Por ejemplo, uno de los pares origen-destino (O-D) que mayor flujo de carga registra, según el Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional [Gutiérrez y Mendoza, 2001], es el Irapuato-Cd. Juárez con alrededor de 2,500 vehículos C3 equivalentes (con tara y carga útil iguales a 8.5 y 10.5 ton, respectivamente) por día en cada sentido. Bajo las condiciones actuales de la infraestructura, el COV diario de ese flujo en ambos sentidos por la ruta de menor COV sin considerar peajes en los tramos que son de se estima mediante el SIGCOV MEX en \$65.7 millones por día (a partir de un COV por viaje de \$13,083 para el sentido Irapuato-Cd. Juárez y de \$13,193 para el opuesto). Adicionalmente, en el viaje de un C3 en la dirección Irapuato-Cd. Juárez (de 1,522 km de longitud), éste pagaría \$1,118 por concepto de cuotas correspondientes a 656 km viajados en carreteras de cuota (43.1% del recorrido). En el otro sentido (de 1,524 km de longitud), pagaría \$1,048 por concepto de cuotas, correspondientes a 636 km viajados en carreteras de cuota (41.7% del recorrido). A partir de las cuotas por vehículo y sentido anteriores, se obtiene un monto adicional para los 5,000 vehículos diarios en ambos sentidos por concepto de cuotas, de \$5.4 millones. La suma de este monto más el COV diario global, da un monto económico total de \$71.1 millones.

- 5) Estimar datos macroeconómicos del autotransporte que circula por la red modelada, tales como veh-km recorridos, ton-km transportadas, COV total así como la proporción que éste representa de la actividad económica nacional (producto interno bruto, PIB). Por ejemplo, incorporando al SIGCOV MEX la información de la S.C.T. para 1998 [DGST, 1996-2000] sobre aforos y composición vehicular por tramos, fue posible obtener que por la red modelada se recorrieron para ese año 85 mil millones de veh-km, de los cuales 74.8% corresponden a los automóviles, 6.1% a los autobuses de pasajeros y 19.1% a los camiones de carga. Asimismo, se obtiene un COV total por la red modelada del orden de \$400 mil millones (cerca del 8% del PIB), de los cuales 62.5% corresponden a los automóviles, 11.2% a los autobuses y 26.3% a los camiones de carga. Este último porcentaje corresponde a un COV anual de cerca de \$105 mil millones. También se obtiene que por esa red se movieron alrededor de 270 mil millones de ton-km en ese año. Si se dividen los \$105 mil millones correspondientes al COV anual de los camiones de carga entre 270 mil millones de ton-km, se obtiene un COV promedio de \$0.39/ton-km.

- 6) En combinación con otros tipos de costos no considerados en este trabajo (externalidades), tales como costos por accidentes viales, realizar análisis comparativos de costos entre autopistas de cuota y sus alternativas libres de recorrido. Lo anterior, con el fin de orientar el establecimiento de políticas tarifarias adecuadas para carreteras de cuota. Por ejemplo, un flete común de carga que a lo largo de su trayecto toca la Ciudad de Los Mochis y el Puerto de Mazatlán es el que se realiza en configuraciones T3-S2-S2 (“madrinas”), que mueven 13 vehículos ligeros sin rodar. Cada “madrina” de ese tipo tiene 7 ejes con un total de 26 llantas y un Peso Bruto Vehicular (PBV) de 30 toneladas a plena carga. Se desea determinar, para esta condición de carga, qué cuota máxima podría cobrarse a través de la alternativa existente de cuota en este tramo (Las Brisas – Mazatlán), mediante un análisis comparativo que considerase COV, así como valor monetario del tiempo de viaje, de la puntualidad y la seguridad vial, entre la autopista de cuota y su alternativa libre por carreteras federales. La Figura 12, obtenida del SIGCOV MEX 1, ilustra las alternativas libre y de cuota a considerar.



Figura 12 Alternativas libre y de cuota a considerar de Las Brisas a Mazatlán

El resultado sugiere que la cuota máxima que puede ser cobrada en la autopista de cuota Las Brisas – Mazatlán es \$819.45, para que ambas alternativas tuviesen igual “costo” de acuerdo a la percepción del usuario. No obstante, la cuota que actualmente se cobra en dicha autopista es de \$439.00 (menor a la máxima calculada), lo cual hace

rentable para la “madrina” circular por la autopista de cuota, en la percepción del autotransportista (usuario).

Otro resultado derivado de la información manejada en el análisis anterior es que, en el autotransporte de carga, los elementos que preponderantemente influyen en la elección de ruta son el COV y las cuotas en que se incurre a lo largo de las alternativas.

Cabe mencionar que esta aplicación puede ser de mucha utilidad para organismos como CAPUFE, ya que les proporcionaría una herramienta más para poder establecer las cuotas adecuadas para cada una de sus autopistas.

Finalmente, a partir de la estructura del SIGCOV MEX 1, pueden construirse sistemas para el manejo de otros datos de la red, relevantes para propósitos de planeación de la infraestructura (p ej, conservación de pavimentos, etc) o la operación vehicular (p ej, identificación de recorridos para el transporte de materiales indivisibles de gran peso y/o volumen, materiales peligrosos, etc).

Capítulo 1 Introducción

1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

El conocimiento de los costos de operación vehicular es fundamental en la planeación, diseño y aspectos operativos de los sistemas de transporte. En el caso de los sistemas de transporte carretero, el costo de operación de un vehículo automotor determinado es aquél en el que se incurre por mantenerlo funcionando por unidad de longitud recorrida. Consiste en el costo de recorrido más los costos fijos.

En México existe una red nacional de carreteras de más de 320,000 kilómetros, cuya vital importancia para el país se refleja en el hecho de que por ella se desplazan más del 95% de las personas-kilómetro y del 70% de las toneladas-kilómetro de carga. De esta red, la fracción que sostiene la mayor parte de las cifras anteriores es la denominada red carretera federal pavimentada (en adelante referida sólo como Red Carretera Federal). Ésta comprende 41,924 kilómetros de carreteras pavimentadas libres (109 km. de más de cuatro carriles, 3,071 km de cuatro carriles y 38,744 km de dos carriles) más aproximadamente 5,500 kilómetros de autopistas de cuota. Uno de los objetivos fundamentales de la Red Carretera Federal (RCF) es respaldar la actividad productiva nacional, facilitando el tránsito fluido y expedito de los intercambios comerciales nacionales e internacionales. Evidentemente este objetivo está relacionado con minimizar los costos de operación de los vehículos del autotransporte de carga. Con el fin de generar estrategias dirigidas al logro de esta meta, es indispensable estudiar, determinar y analizar, con la mayor precisión posible, los costos operativos en que incurren los diferentes tipos de vehículos de carga que circulan por la Red Carretera Federal.

En el pasado ya se han realizado estudios [Aguerreberre y Cepeda 1991 a,b] de determinación de los costos operativos de vehículos mexicanos de carga, pero no referidos específicamente a la Red Carretera Federal. Por lo tanto, la intención ahora es satisfacer esta necesidad. Este trabajo será una etapa del esfuerzo global anterior en tanto que buscará efectuar la determinación de los costos de operación vehicular del autotransporte de carga para la Red Carretera Federal (o una fracción de ella). Con la finalidad de que la estimación de Costos de Operación Vehicular (COV) sea "la más precisa posible", será realizada con base en los siguientes dos elementos tecnológicos disponibles:

- Modelos que permiten calcular los COVs para vehículos mexicanos de carga, por ejemplo el paquete de cómputo denominado "Vehicle Operating Cost (VOC)", elaborado por el Banco Mundial [Archondo-Callao, 1989] y calibrado para vehículos mexicanos [Aguerreberre y Cepeda 1991 a, b].
- El Sistema de Información GeoEstadística para el Transporte (SIGET) [Backhoff, 2002], el cual es un sistema de manejo de información geográfica de los distintos sistemas de transporte del país, construido sobre un inventario de la infraestructura de los mismos, levantado con Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés).

Más específicamente, con base en los dos elementos anteriores, este trabajo: (I) tomará la Red Carretera Federal, (II) la dividirá en segmentos, y (III) a partir de las características físicas de cada segmento registradas en el SIGET u otra fuente de información (pendiente, curvatura, etc) y aplicando los modelos de COV, determinará éstos, así como las Velocidades de Operación (VOs) correspondientes para ambos sentidos de circulación de cualquiera de las configuraciones tradicionales de los vehículos de carga que circulan por la red considerada. Cabe señalar que el sistema que se genere será capaz también de calcular COVs y VOs para automóviles y autobuses de pasajeros. Por último, (IV) con la información obtenida se creará un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permita: calcular los COVs y VOs (para la configuración vehicular deseada) para toda la red, manipular la información para realizar consultas específicas sobre los atributos particulares de cada configuración, resolver problemas de ruteo, etc. Ahondando un poco acerca de la elaboración de este trabajo en un SIG, cabe señalar que este último aporta un gran valor agregado, puesto que cualquier consulta o análisis realizado puede acompañarse de un útil despliegue cartográfico para visualizar y comprender eficientemente los resultados de dicho análisis. Además, la herramienta elemental para la obtención de rutas óptimas de recorrido, también es proporcionada por el SIG ArcView que se empleará en este trabajo.

Cabe señalar que otros trabajos ya han abundado sobre el registro con GPS del alineamiento horizontal de las carreteras [Backhoff y Vázquez, 1998] y [Aburto, 2000], sin embargo, casi nada ha sido realizado en México sobre el registro del alineamiento vertical. Como este último es de vital importancia en el valor de los COVs incurridos por los vehículos de carga en tránsito, en este trabajo se busca también analizar la precisión con que algunos equipos modernos de GPS registran dicho alineamiento. Asimismo,

se aprovechará para hacer algunas evaluaciones sobre el alineamiento horizontal.

Con mayor detalle, enseguida se presentan la descripción de este trabajo, su justificación, objetivos, alcances y metas.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

De manera específica, este trabajo toma el tramo carretero Perote-Jalapa-entronque izquierdo (T. Izq.) José Cardel, de las carreteras Zacatepec-Jalapa-Veracruz (00486 y 30526 de la Ruta MEX-140) (antigua México-Veracruz) y obtiene la siguiente información referente a los alineamientos del mismo:

- Planos topográficos del inventario de la Red Carretera Federal con que cuenta la Dirección General de Planeación (D.G.P.) de la S.C.T. [DGP, 1993].
- Trazo georreferenciado obtenido del SIGET.
- Trazo georreferenciado obtenido directamente de campo con el receptor Magellan GPS ProMARK X [Magellan, 1997a]. Se utiliza este equipo por tenerse disponible y porque existen antecedentes documentados que avalan su confiabilidad en el levantamiento de alineamientos viales [Magellan, 1997b].
- El mismo trazo referido en el punto anterior, pero después de haberle aplicado el proceso denominado como "de corrección diferencial" [Magellan, 1997b]. Éste requiere de haber efectuado el levantamiento, con otro "receptor GPS", de un sitio denominado como "de control" (por ser de coordenadas geográficas perfectamente conocidas), durante el mismo periodo de tiempo y con la misma frecuencia de registro de posiciones, que en el levantamiento referido en el punto anterior. El levantamiento del "sitio de control" permite evaluar desviaciones comunes a receptores GPS al tomar registros simultáneamente dentro de un radio máximo de 50 km (en la misma región), mediante el cálculo de la diferencia entre el registro de ubicaciones de ese sitio y su ubicación exacta conocida; el radio máximo de 50 km obedece a que los receptores GPS deben utilizar la misma configuración satelital y a que los procesos disponibles de corrección de errores troposféricos (relacionados con la humedad, temperatura, etc), son limitados. De esta manera, es posible corregir el trazo referido en el punto anterior,

aplicándole las desviaciones de los momentos correspondientes. Los errores que se corrigen son: (I) errores generados por discrepancias de los registros de tiempo entre el “receptor GPS” y los satélites, (II) imprecisiones derivadas de inadecuada disponibilidad de satélites en un momento dado, (III) errores por demoras ionosféricas (derivadas de la densidad de electrones en la ionósfera) y troposféricas, y (IV) errores por Disponibilidad Selectiva. Esta última se refiere a patrones de “ruido” introducidos intencionalmente en las señales de los satélites, por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos; hasta donde se conoce, la “disponibilidad selectiva” fue desactivada en mayo de 2000. Más adelante se profundizará sobre estos diversos aspectos.

A partir de los cuatro trazos anteriores, se realiza una serie de comparaciones estadísticas entre pares de ellos, tomando generalmente como trazo “real” (de base o de referencia) el correspondiente a los planos topográficos del inventario de la Red Carretera Federal. Con base en las comparaciones realizadas se establecen una serie de conclusiones referentes a aspectos tales como: (I) la confiabilidad del levantamiento georreferenciado del inventario del SIGET, (II) la confiabilidad de los registros de trazo obtenidos con el receptor utilizado (Magellan GPS ProMARK X), (III) la utilidad de la corrección diferencial en este caso, entre otras.

Posteriormente se efectúa un análisis de COVs tomando en consideración ambos sentidos de los trazos del SIGET y el levantado en campo (corregido diferencialmente), entre el km 5 y el km 53 del tramo carretero Jalapa – T. Izq. José Cardel. Este análisis se efectúa para la configuración vehicular T3-S2 con el peso bruto vehicular máximo que le permite el Reglamento de Pesos de Dimensiones vigente [DGAF, 1997]. Los COVs se estiman utilizando el programa VOC, calibrándose con base en información de empresas autotransportistas. Se estiman inicialmente considerando segmentos entre puntos consecutivos registrados en campo con el GPS, acumulándose para obtener el COV de recorridos que involucren varios de dichos segmentos. Para ambos trazos y ambos sentidos considerados, los COVs así obtenidos se consideran los más precisos que pueden obtenerse. Esta información, en principio, permite evaluar qué nivel de diferencia en la estimación de COVs se genera con la metodología anterior entre ambos perfiles considerados y los dos sentidos de circulación. Asimismo, en virtud de que este trabajo busca generar estimados de COVs para toda la Red Carretera Federal, este análisis se amplía posteriormente para determinar la máxima longitud de segmento a la que puede llegarse sin sacrificar

excesivamente la precisión de los COVs (así como las condiciones en que tales ampliaciones de longitud pueden realizarse). La idea de esto último es minimizar el esfuerzo y requerimientos para toda la red (p ej, fuerza laboral, capacidad de memoria de almacenamiento, etc), reduciendo la segmentación al mínimo detalle.

El conjunto de todos los análisis antes efectuados, permite generar una serie de criterios que son aplicados posteriormente para desarrollar el sistema de evaluación de COVs en toda la Red Carretera Federal. Asimismo, este esfuerzo es ampliado con el fin de hacer la utilización de dicho sistema más amigable con el usuario.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Se justifica la realización de este trabajo como un esfuerzo global dirigido a generar información sobre costos de operación del transporte de carga que circula por las carreteras nacionales. Actualmente no se cuenta en el país con un banco de datos de esta índole y más aún, no se cuenta con una herramienta disponible capaz de generar dichos datos eficientemente. El sistema generado será de utilidad para los operadores del autotransporte de carga, los planeadores de infraestructura carretera, operadores de autopistas de cuota, etc.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo general consiste en generar sobre la plataforma de un SIG, a partir de información georreferenciada de carreteras y basándose en el algoritmo de cálculo del paquete "VOC", un sistema que permita obtener, con un mínimo margen de error, los COVs del autotransporte de carga nacional que circula en la RCF y que, además, sea relativamente fácil de operar.

De acuerdo con lo ya expresado, este trabajo abarca los siguientes cuatro objetivos particulares:

- En primer lugar, se trata de definir la estrategia más conveniente de obtención de la información georreferenciada (principalmente referente al alineamiento vertical) que sirva de base para la estimación de COVs.

- Segundo, se desarrollarán un conjunto de criterios, que incluyan las recomendaciones generadas en el punto anterior, para estimar de manera precisa y práctica los COVs para toda la Red Carretera Federal.
- Tercero, aplicar los criterios anteriores para la estimación real de COVs.
- Por último, generar un SIG de estimación de COVs que conjugue todo lo anterior y que además, sea amigable con el usuario.

1.5 ALCANCES Y METAS

En este apartado cabe mencionar que este trabajo se limita sólo al estudio de la red carretera de jurisdicción federal, es decir, las carreteras estatales no han sido incluidas, a excepción de pequeños tramos indispensables para vincular dos o más carreteras federales, así como las trazas urbanas necesarias para comunicar dos o más carreteras federales al paso entre ciudades. El alcance en cuanto a la gama de configuraciones vehiculares, para los fines de este trabajo, se limita a las configuraciones vehiculares de carga, no obstante, se han incluido también dentro del sistema otras posibilidades de análisis para vehículos particulares y de pasajeros.

La meta trazada en este trabajo de tesis consiste en culminar el proyecto con la elaboración de una herramienta capaz de obtener costos de operación vehicular del autotransporte de carga que circula por la red federal de carreteras de México.

Capítulo 2 Antecedentes

Con base en lo señalado en el capítulo anterior, el desarrollo de este trabajo girará fundamentalmente en torno al uso de las siguientes cuatro herramientas tecnológicas: Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés), los Sistemas de Información Geográfica (SIG), el Sistema de Información Geoestadística para el Transporte (SIGET) y el paquete de cómputo Costos de Operación Vehicular (VOC, por sus siglas en inglés). A continuación se describen brevemente los antecedentes de estas herramientas, más relevantes para la realización de este trabajo.

2.1 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS) Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

2.1.1 GPS

Principios

El Sistema de Posicionamiento Global es una constelación de satélites que circundan la tierra, transmitiendo información precisa de tiempo y posicionamiento a cualquier parte del globo, 24 horas al día. Este sistema fue puesto en plena operación durante 1995.

La “constelación GPS” consiste de 24 satélites (21 operativos y 3 de reserva) que circundan la tierra en 6 planos orbitales, inclinados a 60° del ecuador. Cada satélite está a 20,372 kilómetros (11,000 millas náuticas) de distancia de la tierra y gira alrededor de ella dos veces por día.

El sistema fue desarrollado y distribuido por el Departamento de Defensa de los E.U.A. para proporcionar, inicialmente, datos mundiales continuos de posicionamiento y navegación a los E.U.A. y a las fuerzas aliadas esparcidas alrededor del globo terráqueo. Adicionalmente, el GPS tiene una amplia variedad de aplicaciones civiles y comerciales, que van desde navegación y topografía hasta exploración y seguimiento.

Funcionamiento

Los principios básicos del funcionamiento del GPS son bastante simples, no obstante, el sistema emplea equipo desarrollado con la más alta tecnología. Para entender el funcionamiento, se descompondrá al sistema en cinco piezas conceptuales, las cuales se analizarán una por una.

- 1 **Arreglo Satelital.** El GPS está basado en un arreglo satelital. Esto significa que se puede determinar una posición sobre la tierra midiendo sus distancias a un grupo de satélites en el espacio. Los satélites actúan como un punto de referencia precisa para dicho punto.

Si se conoce que el punto se encuentra a una distancia determinada de un satélite A, significa que el mismo debe estar ubicado en algún punto sobre una esfera imaginaria, cuyo centro es el satélite A (Figura 2.1).

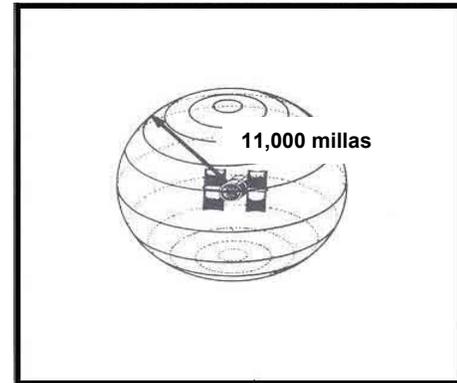


Figura 2.1 Medición al satélite "A" [Hurn, 1989]

Si al mismo tiempo se conoce la distancia del punto a un satélite B, se reducen las posibilidades, y el único lugar en el universo en el que se puede ubicar dicho punto es en el círculo que se genera al intersectarse las esferas de los satélites A y B (Figura 2.2).



Figura 2.2 Medición a los satélites "A" y "B" [Hurn, 1989]

Entonces, si se realiza la medición a un tercer satélite, la ubicación del punto se reduce a solamente dos puntos en el espacio, los cuales se generan cuando la esfera del satélite C corta en dos puntos el círculo generado por las esferas A y B (Figura 2.3). Uno de los dos puntos representa un punto absurdo que puede estar muy alejado de la tierra.

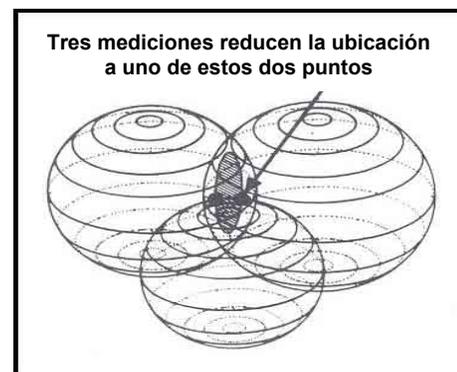


Figura 2.3 Medición a los satélites "A" y "B" y "C" [Hurn, 1989]

Para conocer la ubicación real del punto de interés puede eliminarse el punto incorrecto, o bien realizarse una medición a un cuarto satélite (la cual, como se verá más adelante, resulta de carácter indispensable) para determinarlo.

- 2 *Distancia al Satélite.* El “sistema GPS” trabaja cronometrando el tiempo que tarda en llegar al “receptor GPS” una señal de radio y, a partir del mismo, calculando la distancia.

Las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz, es decir, 300,000 kilómetros/seg. Por lo tanto, si se conoce exactamente el momento en que el satélite envía la señal de radio y el momento en que ésta es captada por el “receptor GPS”, puede determinarse el tiempo de viaje de la onda de radio, lo cual permite calcular fácilmente la distancia requerida.

- 3 *Tiempo Exacto.* Se conoce que la luz viaja a 300,000 kilómetros/seg. Por lo tanto, si la sincronización de tiempos entre el satélite y el “receptor GPS” varía por tan sólo una centésima de segundo, se generaría un error de medición de 3,000 kilómetros.

En el caso del satélite, éste cuenta con un reloj atómico cuya precisión va hasta el nanosegundo (0.000000001 segundo). Los “receptores GPS”, en cambio, están equipados con relojes convencionales, lo cual hace posible que los errores de sincronización de tiempo se presenten.

Afortunadamente, este problema puede solucionarse trigonométricamente al realizar una medición a un cuarto satélite [Hurn, 1989].

- 4 *Ubicación del Satélite en el Espacio.* Hasta este momento se ha supuesto que se conoce la posición de los satélites en el espacio, de tal forma que la posición del punto de interés se puede deducir a partir de la de ellos. La altura de los satélites (20,372 kilómetros sobre la tierra) los sitúa fuera de la atmósfera terrestre, donde la resistencia aerodinámica está ausente. Esto les permite circundar en una órbita muy precisa acorde al “Plan Maestro GPS” [Hurn, 1989].

El “sistema GPS” es operado por la Fuerza Aérea de los E.U.A. desde una estación de control maestro en Colorado, E.U.A (Figura 2.4). La estación está equipada con monitoreo de satélites, telemetría, seguimiento, módulo de mando y control, registro de datos y generación de mensajes de navegación.

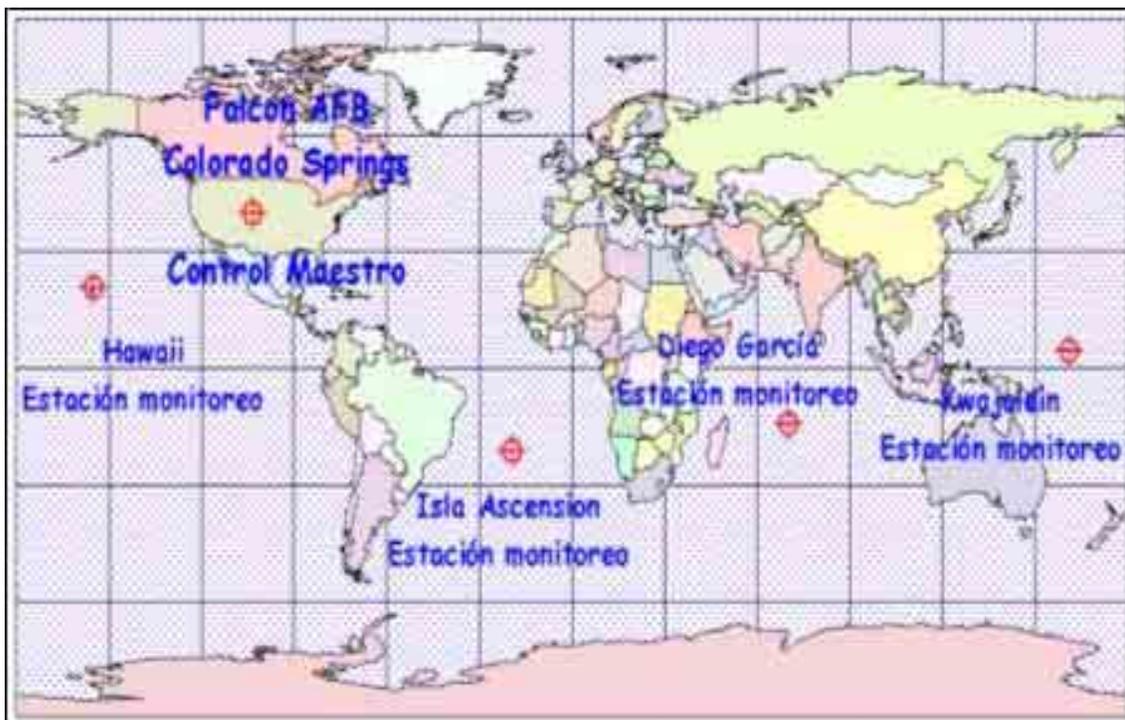


Figura 2.4 Control Maestro y red de estaciones de monitoreo GPS [Backhoff, 2002]

Las estaciones de monitoreo y las antenas colocadas alrededor de la tierra dan seguimiento a los “satélites GPS” y retransmiten los datos a la estación de control maestro. Por lo tanto, la posición exacta del satélite y la precisión de los datos de señales pueden ser actualizados y mantenidos constantemente. Si la estación de control detecta una discrepancia menor (normalmente ocasionada por la atracción gravitacional entre la luna y el sol o por la presión de la radiación solar sobre el satélite), retransmite la información al satélite para que éste corrija su posición.

- 5 *Demoras Ionosféricas y Atmosféricas.* El más significativo de estos errores se deriva de la ionósfera de la tierra (un manto de partículas eléctricamente cargadas con espesor de 100 a 200 kilómetros). Estas partículas afectan la velocidad de la luz y de las “señales de radio GPS” disminuyendo su velocidad y arrojando, por ende, cálculos erróneos de distancia.

El error ocasionado en la medición puede minimizarse de dos formas; la primera, a través de la predicción de la variación de la velocidad para un día promedio, bajo condiciones ionosféricas promedio, y aplicando el

factor de corrección a todas las mediciones. La segunda consiste en medir la variación de la velocidad, comparando, con base en sus frecuencias, las velocidades relativas de dos diferentes señales. Este tipo sofisticado de corrección es realizado por los denominados “receptores GPS” de doble frecuencia, los cuales eliminan los errores de este tipo [Hurn, 1989].

Después de superar la ionósfera, la “señal GPS” entra a la atmósfera de la Tierra, donde el vapor de agua presente, puede también afectar la señal. El error originado es similar en tamaño al ocasionado por la ionósfera, a diferencia de que éste es casi imposible de corregir. Afortunadamente, su efecto neto sobre el cálculo de la posición del punto de interés es considerablemente menor que el ancho promedio de una carretera. Por esto último, este tipo de error no tendrá efectos relevantes en este trabajo.

2.1.2 SIG

Conceptos

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son diseñados para la captura, almacenamiento, manipulación y análisis de información, en donde la ubicación espacial constituye el elemento fundamental. El análisis conjunto, derivado de la combinación de información gráfica en forma de mapas (información espacial) y atributos asociados (información no espacial), da a los SIG su particular potencial de aplicación a los sistemas de transporte. La información espacial, o rasgos geográficos, son datos de carácter obligatorio dentro de un SIG, y son éstos los que permiten que la información no espacial sea asociada a un determinado punto topológico (punto, línea o polígono) de ubicación perfectamente conocida.

Los SIG son fundamentalmente instrumentos computacionales de capacidades múltiples, diseñados y habilitados en primera instancia para inventariar información geográfica y los atributos que la caracterizan, la cual a su vez alimenta las funciones de análisis con que están equipados, para finalmente convertirse en herramientas útiles a las labores de planeación y administración.

Ante el universo de deberes y la multidimensionalidad de sus aspectos, es posible afirmar que los SIG surgen como valiosos instrumentos de apoyo a todas aquellas labores que llevan implícitas en su ejecución la necesidad de análisis geográfico de los elementos o variables que el problema o la actividad en cuestión comprenda, los cuales, en el caso del transporte no son pocos, ya que por naturaleza es un fenómeno geográfico dada su clara expresión territorial. La clave para emplear un SIG y obtener de él efectividad y resultados satisfactorios, estriba en la identificación acertada de su aplicación, la cual deberá tener como característica primordial la necesidad del análisis geográfico. La Tabla 2.1 esquematiza las ventajas que brinda la utilización de un SIG a la planeación, administración e investigación de los sistemas de transporte [García y Backhoff, 1992].

Tabla 2.1 Ventajas que brinda la utilización de un SIG a la planeación, administración e investigación de los sistemas de transporte [García y Backhoff, 1992]

INTEGRACIÓN DE DATOS	Facilidad otorgada por el empleo de un sistema común de referencia, tanto para la información directamente relacionada con las vías de comunicación, como de aquellas otras que hacen posible análisis más amplios (datos demográficos, económicos, de uso del suelo, geología, pendientes, etc).
REPRESENTACIÓN ESPACIAL DE LOS DATOS	Muestra en forma gráfica (representación cartográfica) la distribución y/o comportamiento de los datos en el territorio, lo cual permite una mayor comprensión del problema en cuestión.
ANÁLISIS INNOVADOR	Ofrece nuevas formas de observar viejos problemas al combinar modelos y proporcionar respuestas a preguntas complejas y multidimensionales en forma rápida.

La posibilidad de los SIG de manipular datos geográficos, les permite estudiar procesos territoriales, realizar análisis de tendencias y elaborar proyecciones; insumos todos necesarios para las labores de planeación y administración en una gran diversidad de sectores y actividades económicas y sociales.

Lo que distingue a un SIG de una base de datos tradicional, es que los atributos de éstos están asociados a un objeto topológico (punto, línea, polígono) y registran una ubicación geográfica precisa. La utilización de relaciones espaciales, propuesta explícitamente por los SIG, agrega un nivel de “inteligencia” a las bases de datos.

El uso del GPS para el registro de información georreferenciada, así como el de los SIG para el manejo de esa información, proporcionan herramientas que conjuntamente son muy poderosas para las diversas actividades que tienen que ver con la planeación y operación del transporte. Más adelante se comenta una aplicación conjunta de estas dos tecnologías, relacionada con el levantamiento de un inventario de la infraestructura para el transporte del país (SIGET). Este trabajo de tesis constituirá un ejemplo más de la aplicación conjunta de las tecnologías GPS y SIG, pero avocado a resolver algunos problemas de la operación del transporte en lo que respecta a COVs.

ArcView

El SIG ArcView [ESRI, 1997] es un paquete de cómputo que permite realizar tareas de las anteriormente mencionadas. Se decidió utilizar este SIG por encontrarse disponible en el I.M.T. y por que se tienen antecedentes de su gran versatilidad y facilidad en el manejo de información georreferenciada. En ArcView, una representación cartográfica o mapa se genera integrando conjuntos de rasgos geográficos dentro de un proyecto. Cada uno de estos conjuntos constituye un tema. Para cada tema existe una Tabla de Atributos, la cual es una base de datos que almacena en diferentes campos las características específicas de cada rasgo geográfico. A partir de estos temas puede generarse una vista, en la cual se ilustran tanto el mapa deseado como la información representada en el mismo. En ArcView, un proyecto es un archivo que contiene todas las vistas, tablas, gráficas, etc, utilizadas en una aplicación específica.

Gran parte de la realización de este trabajo se hará bajo la plataforma ArcView, haciéndose también uso de su propio algoritmo de modelación de redes “ArcView Network Analyst” [ESRI, 1996] y de su lenguaje de programación “Avenue” [ESRI, 1998]. La extensión para modelación de redes “ArcView Network Analyst” se utilizará principalmente para determinar el recorrido de menor COV entre un par origen-destino determinado, mientras que el lenguaje de programación “Avenue” será el ambiente gráfico de trabajo sobre el cual se automatizará la posibilidad de que el usuario realice diversas series de consultas concernientes a COVs.

2.2 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOESTADÍSTICA PARA EL TRANSPORTE (SIGET)

El SIGET [Backhoff, 2002] es un sistema computacional desarrollado en el Instituto Mexicano del Transporte. El objetivo principal del SIGET es proporcionar una herramienta computacional accesible que permita el registro, análisis y representación de la información geográfica, así como de datos estadísticos asociados al transporte

Una parte del SIGET es el denominado Inventario Nacional de Infraestructura para el Transporte (I.N.I.T.), realizado por el I.M.T. en coordinación con los 31 “Centros SCT” del país y la Dirección General de Servicios Técnicos (D.G.S.T.) de la misma Secretaría, contando con la asesoría del Instituto de Geografía de la U.N.A.M. El objetivo de la creación de esta parte del SIGET fue generar bases de datos que contuviesen información georreferenciada sobre el trazo (vertical y horizontal) de la Red Carretera Federal, las carreteras estatales y los caminos rurales del país, así como la localización de puntos de importancia asociados con la infraestructura del transporte. La importancia de este banco de información reside tanto en la precisión en la ubicación de los elementos registrados, como en la gran versatilidad de manejo del formato digital a través de un SIG.

Durante el proceso de la realización de la parte del SIGET denominada I.N.I.T., se llevó a cabo la creación de las bases de datos referenciados geográficamente, los cuales contienen la información del trazo de las redes carreteras y la ubicación de localidades, puertos y aeropuertos, así como la descripción exacta de características asociadas a las vialidades como tipo de camino, número de carriles, jurisdicción, “centro SCT” responsable del levantamiento, etc.

La obtención de los datos georreferenciados de carreteras pavimentadas se llevó a cabo en el periodo 1994-1996 (durante 1997-1998 se obtuvieron las carreteras rurales) por los 31 “Centros SCT” mediante levantamientos en campo con GPS, los cuales permitieron capturar la información en campo y archivarla en computadoras portátiles. Posteriormente, dicha información fue recopilada por el I.M.T., donde fue transformada al formato del Sistema de Información Geográfica ArcInfo [ESRI, 1991]. Este SIG es una herramienta muy poderosa, pero a la vez muy costosa y con mayor complejidad de manejo.

Lo anterior permite que la información esté disponible en un formato accesible para numerosos usuarios. Al tener la información georreferenciada en el SIG ArcInfo, es posible importar los archivos con dicha información para posteriormente utilizarlos en el SIG ArcView [ESRI, 1997], el cual tiene menor costo y es más fácil de manejar.

El inventario de carreteras del SIGET cobra vital relevancia en la realización de este trabajo ya que contiene información referente a las coordenadas geográficas (X, Y y Z) del trazo de los caminos, las cuales son de carácter indispensable para el cálculo de las pendientes de los mismos. Las coordenadas X y Y, referentes a longitud y latitud, respectivamente, están expresadas en grados decimales dentro del SIGET, mientras que la coordenada Z, referente a la altitud, se encuentra expresada en metros.

Cada archivo ArcInfo del SIGET, contiene una serie de registros asociados a un camino determinado. Los registros representan una cadena de puntos distanciados entre sí en una unidad de tiempo (segundo). Lo anterior significa que la distancia entre ellos es variable y está en función de las variaciones presentadas en la velocidad de recorrido en el momento en que se realizó el levantamiento en campo con el GPS.

2.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE ACCIDENTES (SIGA)

El SIG que se generará para evaluar los Costos de Operación Vehiculares (COVs) de los camiones de carga, para el total de la Red Federal de Carreteras, utilizará como plataforma estructural una segmentación de la Red Carretera Federal similar a la elaborada para el SIGA [IMT, 2000].

El SIGA es un sistema que fue desarrollado en el I.M.T., bajo la plataforma computacional ArcView, para llevar un control de los accidentes ocurridos en carreteras federales. Permite manipular la información de tal manera que los segmentos con mayor índice de accidentalidad puedan ser fácilmente identificados.

La representación cartográfica elaborada para el SIGA fue generada a partir de la información espacial registrada en el Sistema de Información Geoestadística para el Transporte (SIGET), de donde se importaron los rasgos geográficos siguientes: división política de la República Mexicana, estados, cabeceras municipales, localidades con más de 15,000 habitantes, casetas de cobro, puentes y carreteras federales.

Cabe mencionar que el desarrollo de este trabajo se basará de manera casi exclusiva en los archivos correspondientes a las carreteras federales, al contorno de los Estados y a la división política de la República Mexicana. El conjunto de estos tres elementos conformará la cartografía básica a partir de la cual se generará la metodología para obtener las pendientes de los caminos.

El SIGA maneja información a los siguientes 4 niveles territoriales: ruta, carretera, tramo, y segmento de 500 metros. Esto significa que, para cada uno de los 4 niveles anteriores, cuenta con una segmentación de la Red de Carreteras Federales, a partir de la cartografía básica antes descrita. La segmentación para cada uno de los niveles anteriores está preparada en una vista diferente.

La primera segmentación elaborada para el SIGA fue la segmentación por tramos, derivándose a partir de ella las otras 3 segmentaciones (por rutas, por carreteras y por segmentos). Las 4 segmentaciones realizadas son congruentes con la clasificación de las carreteras federales de la D.G.S.T. [1996-2000], que es la clasificación oficial de carreteras de la S.C.T. Al realizarse cada segmentación, a cada elemento de la misma se le asignó un identificador en ArcView, con el cual puede identificarse dicho elemento dentro de la Red Federal Básica, de alrededor de 50,000 kilómetros de longitud, dividida en 147 rutas, éstas a su vez en 561 carreteras, éstas en 2,538 tramos y estos últimos en alrededor de 100,000 segmentos de 500 metros.

El desarrollo del SIG que es objeto de este trabajo, parte de la segmentación a nivel de tramos del SIGA, complementándola con tramos viales de otras fuentes de información para tener una red vial continua. Ésta, a su vez, es manipulada y complementada con datos adicionales necesarios para poder estimar los COVs del autotransporte de carga a través de diferentes recorridos sobre dicha red.

2.4 VOC (VEHICLE OPERATING COST)

El paquete de cómputo que se utilizará en este trabajo de tesis para obtener los COVs de los vehículos de autotransporte de carga, en la Red Federal de Carreteras, es el denominado VOC [Archondo-Callao, 1989]. Dicho paquete fue elaborado por el Banco Mundial, con el propósito de proporcionar a los planeadores una herramienta que genere información de COVs que contribuya a una confiable evaluación técnica y económica de sus opciones de inversión. Este paquete, estructurado por el Banco Mundial, se basó en diversos estudios realizados en diferentes países, de los cuales algunos cuentan con sistemas de transporte carretero con condiciones similares al de México, como es el caso de Brasil. Dichos estudios se refieren a una serie de modelos matemáticos para diferentes configuraciones vehiculares, que van desde automóviles hasta camiones de pasajeros y de carga. Algunos de los modelos generados son: (I) de consumo de combustibles, (II) de consumo de lubricantes, (III) de consumo de llantas, (IV) de salario de tripulantes, (V) de mantenimiento vehicular (incluye mano de obra y refacciones), (VI) de depreciación del vehículo, etc. En casi todos los casos, el VOC utiliza valores y modelos matemáticos generados en Brasil.

La función del modelo VOC es simular los efectos de las características físicas y condiciones del camino en las velocidades de operación de varios tipos de vehículos, en sus consumos de combustibles y lubricantes, en sus requerimientos de mantenimiento, etc, y determinar sus costos totales de operación, para lo cual requiere que sean introducidos previamente algunos costos unitarios (p ej, de combustibles, lubricantes, llantas, etc). Para esto, el modelo calcula las cantidades consumidas de recursos, tales como litros de combustible, número de llantas, horas-hombre (h-h) de trabajo, etc, así como la velocidad del vehículo como función de las características de cada tipo de vehículo y la geometría, tipo de superficie y condición actual del camino.

Los pasos seguidos por el modelo en el cálculo de la velocidad, uso de recursos y costos de operación para un tipo de vehículo dado y una sección de camino determinada, son:

- 1 Calcular la velocidad de operación promedio para el vehículo seleccionado.
- 2 Calcular las cantidades de recursos utilizadas por cada 1,000 vehículos-kilómetro (veh-km) para los siguientes componentes:

- Consumo de combustibles
 - Consumo de lubricantes
 - Consumo de llantas
 - Tiempo de los tripulantes
 - Tiempo de los pasajeros
 - Tiempo o retención de la carga
 - Mano de obra o de mantenimiento
 - Refacciones
 - Depreciación
 - Interés
 - Indirectos
- 3 Aplicar costos unitarios a las cantidades consumidas de recursos para obtener el costo de operación por cada 1,000 veh-km para cada componente.
- 4 Sumar los costos de operación para cada componente con el fin de calcular el costo de operación vehicular total por cada 1,000 veh-km.

Para conocer a mayor detalle los principios sobre los cuales se basa el cálculo de la velocidad de operación y los costos por cada uno de los conceptos anteriores, consulte a Archondo-Callao [1989] y Aburto [2000].

Capítulo 3 Análisis Estadístico de Levantamientos Georreferenciados

Los análisis en este capítulo se refieren a la comparación de un conjunto de levantamientos efectuados para el tramo carretero Perote-Jalapa-entronque izquierdo (T. Izq.) José Cardel, de las carreteras Zacatepec-Jalapa-Veracruz (00486 y 30526 de la Ruta MEX-140; antigua México-Veracruz). La ubicación de dicho tramo se ilustra en la Figura 3.1.

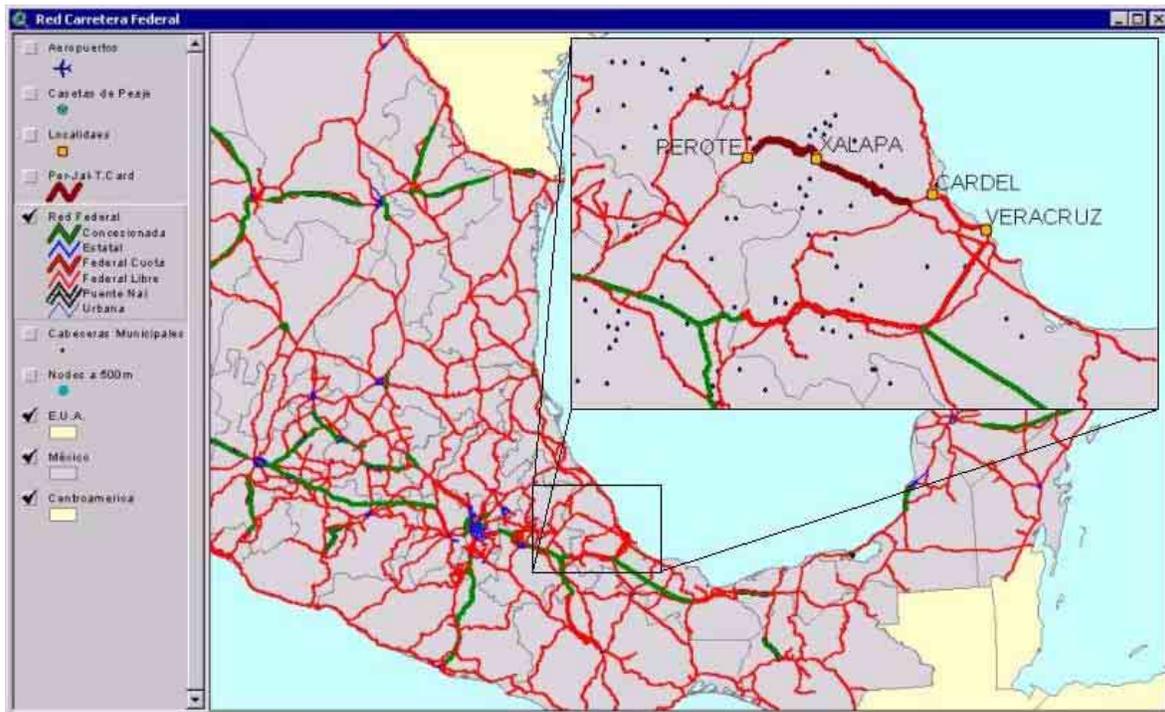


Figura 3.1 Ubicación geográfica del tramo Perote – Jalapa – T. Izq. José Cardel

3.1 INFORMACIÓN DE INVENTARIO DE LA S.C.T.

La información de inventario de la S.C.T. consiste en el plano esquematizado en la Figura 3.2, así como en un listado de coordenadas X, Y y Z de 602 puntos ubicados a lo largo del trazo mostrado en la figura. Los análisis presentados en este trabajo se realizan en términos de estos 602 puntos, ya que fueron determinados con toda precisión durante el levantamiento topográfico de este inventario.

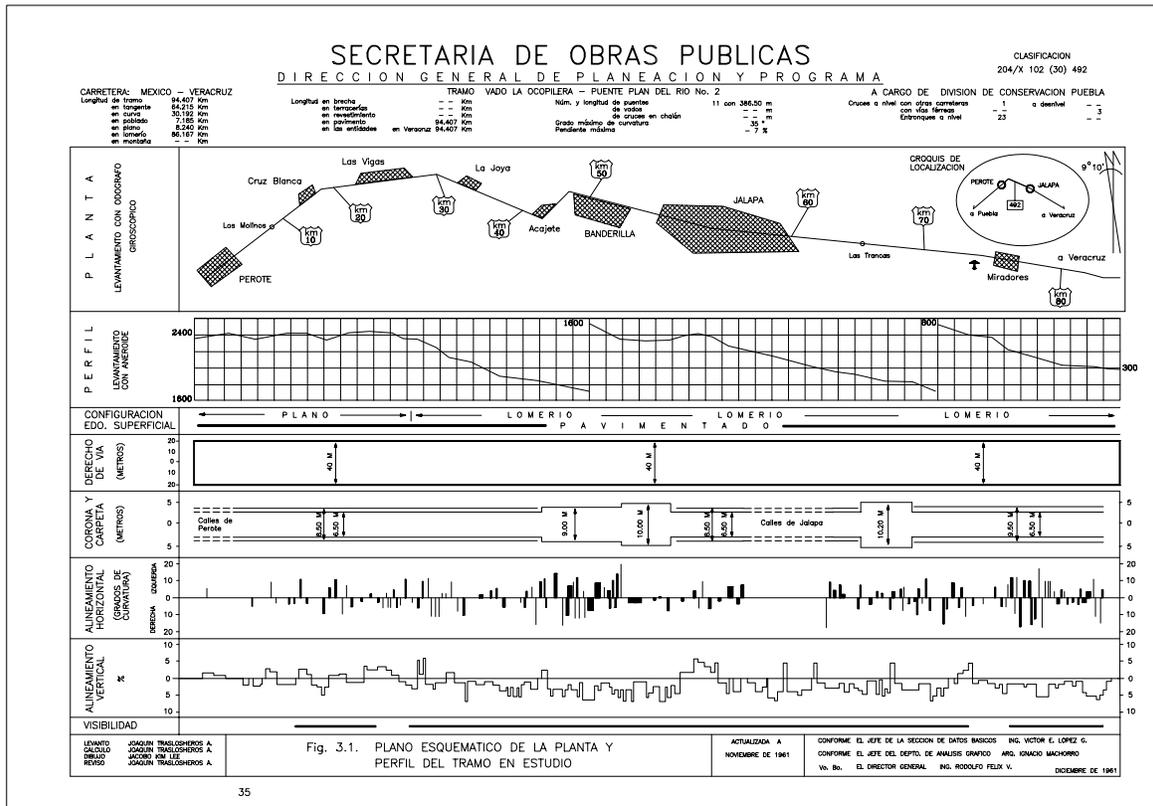


Figura 3.2 Plano topográfico del tramo Perote-T. Izq. José Cardel, de la Dirección General de Planeación (D.G.P.)

Las coordenadas X y Y de los puntos anteriores, tienen como origen el km 0+000 de un antiguo cadenamamiento a 2.52 kilómetros (sobre el eje del camino) antes de llegar a Perote con dirección a Veracruz. Ese mismo sitio tiene el kilometraje 101+173 en el cadenamamiento actual. Tanto el cadenamamiento antiguo como el actual crecen en la dirección hacia Veracruz, aunque en el actual el kilometraje se reinicializa a 0+000 a partir de Jalapa, por iniciarse en esta ciudad una carretera diferente en el sistema actual de clasificación de Carreteras Federales de la S.C.T., que es el de la D.G.S.T. Las coordenadas X, Y y Z de los 602 puntos de este inventario, se manejan en metros.

Los análisis comparativos de trazos efectuados más adelante requieren que los trazos comparados se encuentren en el mismo sistema de coordenadas, por esta razón, se decidió estandarizar los distintos tipos de trazos considerados al sistema de coordenadas X y Y (en metros) correspondiente a la proyección Cónica Conforme de Lambert. Para la coordenada Z se decidió utilizar la altitud sobre el nivel del mar (en metros).

Con el propósito anterior, en el levantamiento con GPS del tramo carretero (descrito más adelante) se tomaron las tres coordenadas del origen (km 0+000) del antiguo cadenamiento. Como el GPS permite obtener las coordenadas X y Y de un punto correspondiente a la proyección Cónica Conforme de Lambert, estas coordenadas de dicho origen sirvieron para escalar o transformar a este sistema las coordenadas X y Y de los 602 puntos. La coordenada Z no requirió transformación porque, tanto en el inventario de la S.C.T. como en los registros provenientes del GPS, esta coordenada se obtiene en metros sobre el nivel del mar.

En el Anexo A se presentan las coordenadas X, Y (Lambert) y Z (altitud sobre el nivel del mar) para los 602 puntos de este trazo, con base en los cuales éste se compara contra otras versiones del trazo del tramo carretero considerado.

3.2 INFORMACIÓN DE CAMPO

3.2.1 Levantamiento de información

Como ya se mencionó, esta prueba fue realizada sobre los tramos carreteros Perote-Jalapa y Jalapa-T. Izq. José Cardel, ambos pertenecientes a la Red Federal Básica de Carreteras de México, en el Estado de Veracruz.

El trabajo en campo consistió en obtener el trazo georreferenciado de los tramos mencionados mediante el empleo del GPS. Dicho trazo se obtuvo montando el “receptor GPS” en un automóvil y recorriendo en él los tramos mencionados. Se partió desde la localidad de Perote hasta llegar a Jalapa y posteriormente se realizó otra sesión desde Jalapa hasta T. Izq. José Cardel. El recorrido antes descrito fue también realizado en orden inverso para enriquecer la información obtenida originalmente. La intención de ello fue cubrir algunos puntos no registrados inicialmente durante el recorrido, debido a interferencias en la recepción de la “señal GPS”. De acuerdo con lo antes descrito, se obtuvieron los siguientes cuatro levantamientos en el mismo orden en que se citan: (I) Perote-Jalapa, (II) Jalapa-T. Izq. José Cardel, (III) T. Izq. José Cardel-Jalapa, y (IV) Jalapa-Perote. Las denominaciones anteriores también indican la dirección en la que los levantamientos fueron realizados. Simultáneamente a la realización de los levantamientos (II) y (III), otro “receptor GPS” fue activado en un sitio de coordenadas conocidas (de “control”), con el fin de efectuar la corrección diferencial de las posiciones registradas por el “receptor GPS” móvil.

Durante el recorrido se tomaron fotografías de algunos puntos de los tramos estudiados. Las Figuras 3.3 a 3.7 presentan fotografías del tramo Perote-Jalapa, en tanto que las 3.8 a 3.13 corresponden al tramo Jalapa-T. Izq. José Cardel. Estas fotografías esclarecen el panorama mostrado en la Figura 3.1, ya que aquí pueden apreciarse más detalladamente las condiciones físicas del tramo carretero en estudio.

Tramo Perote Jalapa:

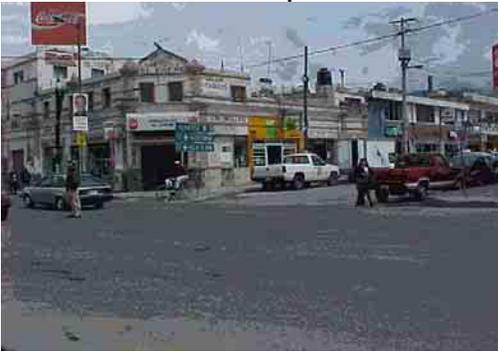


Figura 3.3 Perote (Inicio del levantamiento)



Figura 3.4 La Joya (sentido Per-Jal)



Figura 3.5 La Joya (sentido Jal-Per)



Figura 3.6 Boulevard (sentido Per-Jal)



Figura 3.7 Boulevard (sentido Jal-Per)

Tramo Jalapa-T. Izq. José Cardel:



Figura 3.8. km 12 (sentido T. Izq: José Cardel-Jalapa).



Figura 3.9. Carril de ascenso, km 29 (sentido T. Izq: José Cardel-Jalapa).



Figura 3.10. Cruce de ferrocarril, km 45.



Figura 3.11. km 50 (sentido Jalapa-T. Izq: Cardel).



Figura 3.12. km 50 (sentido T. Izq: Cardel-Jalapa).



Figura 3.13. Entronque carretero a Cardel.

El resultado de este trabajo de campo se traduce en una serie de archivos computacionales, los cuales son transferidos de la “unidad GPS” a una “PC”, para su procesamiento, mediante un software de nombre MSTAR [Magellan, 1997b]. Los archivos son procesados mediante el “software” ArcView. Finalmente, en ArcView, se genera una vista que contiene los arcos en estudio. Estos arcos, que comunican a Perote-Jalapa-T. Izq. José Cardel, están representados por una serie de puntos registrados cada segundo de tiempo por el “receptor GPS”. Por lo tanto, cada punto registrado cada segundo contiene información referente a su posición geográfica tridimensional, la cual está determinada por las coordenadas geográficas de longitud y latitud (X y Y respectivamente) y por la coordenada de altitud, Z.

Considerando que el recorrido se realizó a una velocidad promedio de 60 km/hr, el tiempo de un segundo entre lecturas con el “receptor GPS” genera la ubicación de un punto cada 17 m (aproximadamente) a lo largo del recorrido. Sin embargo, otros estudios han revelado que, para fines prácticos, la obtención de Costos de Operación Vehicular realmente no requiere de puntos tan cercanos entre sí [ESRI, 1991].

3.2.2 Corrección Diferencial

Para los recorridos en ambos sentidos del tramo Jalapa-T. Izq. José Cardel, los archivos computacionales generados con los “receptores GPS”, móvil y estático, fueron ingresados en una subrutina del programa MSTAR que, con base en dichos archivos, realiza la corrección diferencial del trazo registrado con el receptor móvil. De esta manera, para 5,093 puntos registrados en el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel, se obtuvo su correspondiente juego de coordenadas X, Y y Z corregidas diferencialmente. Lo mismo fue obtenido para 4,631 puntos registrados en el sentido T. Izq. José Cardel-Jalapa. No obstante que se trata del mismo recorrido, la diferencia anterior entre las cantidades de puntos registrados para un sentido y otro, obedecen a la obstrucción de la señal en áreas sinuosas o demasiado vegetadas y a la disponibilidad y ubicación relativa de los satélites en el momento del levantamiento.

Con base en los puntos registrados en el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel, se obtuvieron las acumuladas de frecuencias relativas en la Figura 3.14 para los errores en X, Y y Z (E_x , E_y y E_z , respectivamente), definidos éstos como la diferencia de la coordenada sin corrección menos la corregida. A

partir de esta figura es evidente que el E_x resulta con “sesgo” negativo, en tanto que para los E_y y E_z el “sesgo” resulta positivo. La misma figura también evidencia que, en el 70% de los casos, el E_x se encuentra entre -10 y -5 m, el E_y entre 2 y 7 m, y el E_z entre 8 y 14 m. La Tabla 3.1, mostrada debajo de la Figura 3.14, presenta los valores específicos de media y desviación estándar de los errores E_x , E_y y E_z , así como de los errores en dos (E_{xy}) y en tres dimensiones (E_{xyz}). Cabe señalar que para cada uno de los 5,093 puntos los errores E_{xy} y E_{xyz} fueron calculados de manera "euclidiana" (p.ej, $E_{xy} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$ y $E_{xyz} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$). La forma de las distribuciones para los errores E_x , E_y y E_z , en la Figura 3.14, es reflejo de la información para los mismos en la Tabla 3.1.

Con base en la Figura 3.14 y la Tabla 3.1 es evidente que la corrección diferencial actúa de manera significativa sobre la media o "sesgo" de los errores (según fueron definidos anteriormente), aunque también sobre la variabilidad de los mismos. También es evidente que de las tres dimensiones, la corrección diferencial es un tanto mayor para la media y la desviación estándar de la altitud (Z), que para las de la longitud (X) y la latitud (Y). El comportamiento de los errores en el plano (E_{xy}) es similar al de los errores E_x y E_y , puesto que los errores E_{xy} son un reflejo de los dos anteriores. Lo mismo sucede con el error E_{xyz} en relación con los errores E_x , E_y y E_z .

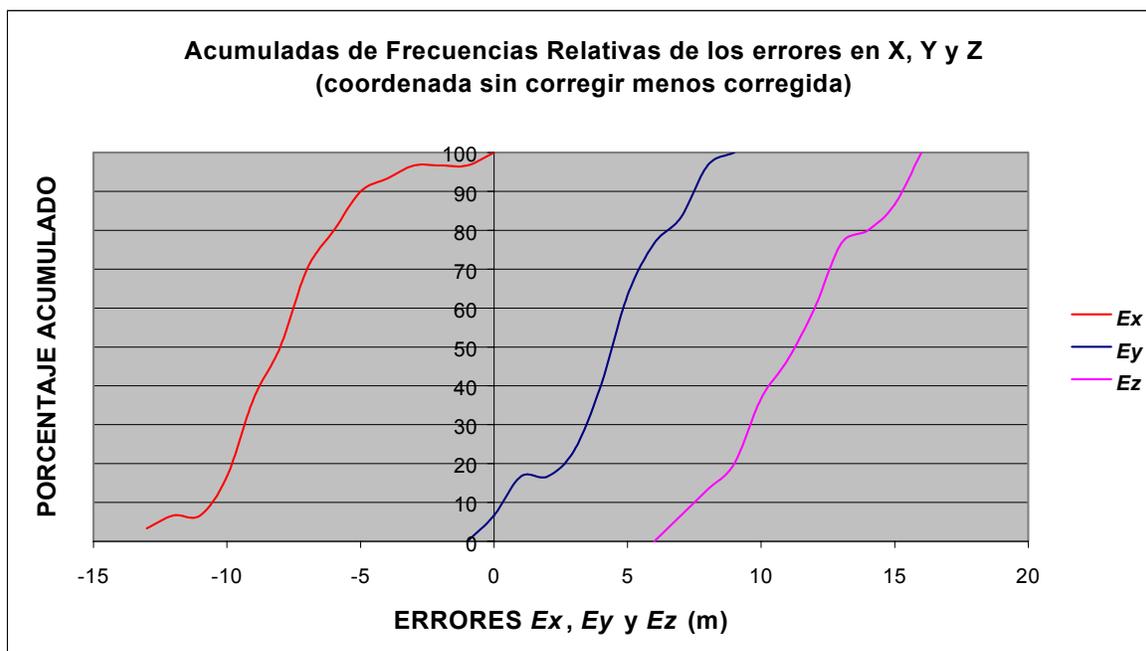


Figura 3.14 Acumulada de frecuencias relativas de los errores en X (E_x), Y (E_y) y Z (E_z) para el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel

Tabla 3.1 Valores de media y desviación estándar para los errores en X, Y, Z, en el plano y en el espacio. Sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel

	<i>Ex</i>	<i>Ey</i>	<i>Ez</i>	<i>Exy</i>	<i>Exyz</i>
MEDIA	-7.733333	4.307200	11.146718	9.284750	14.611282
DESV EST	2.599679	2.426099	2.660432	2.126835	2.909137

Se destaca que es más importante efectuar la corrección diferencial para retirar la variabilidad del error *Ez* que para cualquier otro fin relacionado con las otras dos dimensiones. Lo anterior, dado el efecto tan determinante que la pendiente tiene en los costos de operación de los vehículos de carga [ESRI, 1991], cuya determinación será el objetivo básico de este trabajo (etapa subsiguiente de este proyecto de investigación). La corrección diferencial elimina la variabilidad en *Ex*, *Ey* y *Ez*. La de este último es muy importante ya que es la fuente principal de imprecisión en la estimación de las pendientes.

Para el sentido T. Izq. José Cardel-Jalapa, se obtuvieron también las acumuladas de frecuencias relativas para los *Ex*, *Ey* y *Ez* (Figura 3.15). A partir de esta figura es evidente que la media del *Ex* es prácticamente cero y que la del *Ey* es positiva, pero con valor menor a 1.5 m, mientras que la media del *Ez* resulta positiva y significativamente alta. La misma figura también evidencia que, en el 70% de los casos, el *Ex* se encuentra entre -3 y 3 m, el *Ey* entre -2 y 4 m, y el *Ez* entre 8 y 17 m. La Tabla 3.2, mostrada debajo de la Figura 3.15, presenta los valores específicos de media y desviación estándar de los errores *Ex*, *Ey*, *Ez*, *Exy* y *Exyz*. Para cada uno de los 4,631 puntos en este sentido (T. Izq. José Cardel-Jalapa), los errores *Exy* y *Exyz* fueron también calculados de manera "euclidiana". Como es evidente en la Figura 3.15 y la Tabla 3.2, en este sentido de circulación se obtienen resultados similares a los antes presentados para el sentido opuesto. También en este caso la corrección diferencial resulta notablemente mayor para la media y la desviación estándar de la altitud (*Z*) que para las otras dos dimensiones. Asimismo, la media y la desviación estándar del error *Ez* resultan ligeramente mayores para este sentido que para el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel. El hecho de que la magnitud de los errores varíe para ambos sentidos de circulación de un mismo tramo, está relacionado con la ubicación y disponibilidad de los satélites que en determinado momento están siendo utilizados por el "receptor GPS".

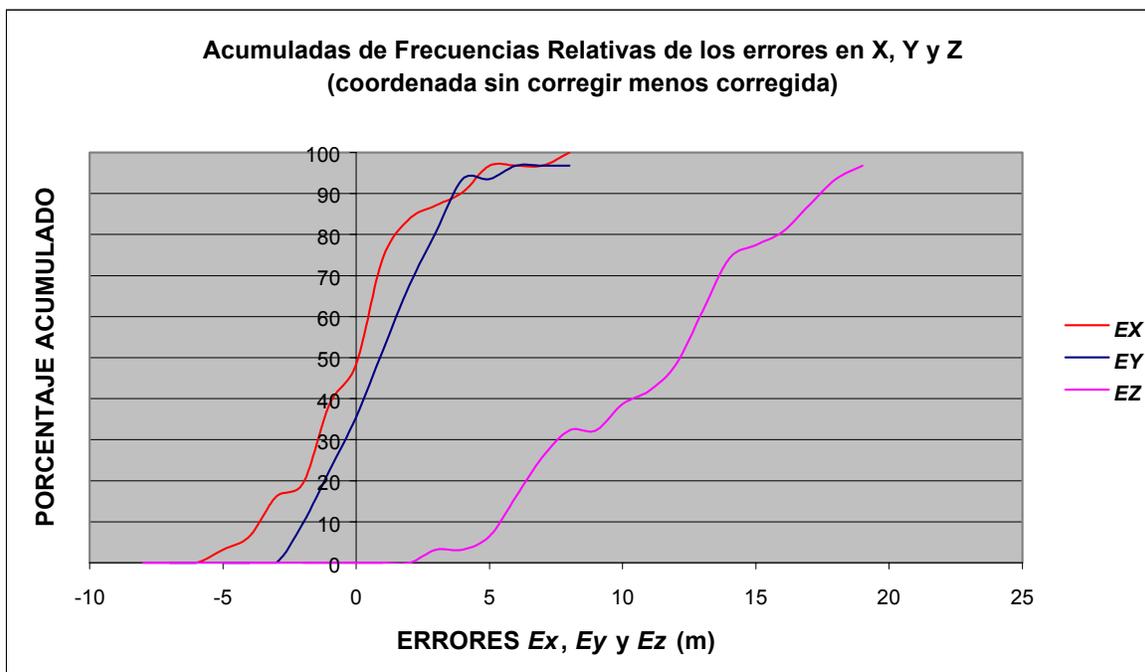


Figura 3.15 Acumulada de frecuencias relativas de los errores en X (E_x), Y (E_y) y Z (E_z) para el sentido T. Izq. José Cardel-Jalapa

Tabla 3.2 Valores de media y desviación estándar para los errores en X, Y, Z, en el plano y en el espacio. Sentido T. Izq. José Cardel-Jalapa

	E_x	E_y	E_z	E_{xy}	E_{xyz}
MEDIA	0.064516	1.143194	12.267308	3.384803	12.960951
DESV EST	2.801017	3.022660	4.716678	2.549145	4.743550

Es de destacar que para los errores E_x , E_y y E_z obtenidos en ambos sentidos analizados, se detectó el fenómeno estadístico denominado "autocorrelación" [Johnston, 1984]. Éste consiste en que los errores se presentan correlacionados a lo largo del tiempo (es decir, el error de la medición siguiente es dependiente del de la anterior).

3.2.3 Trazo obtenido en campo contra planos de inventario de la S.C.T.

Se realizó un análisis similar al mostrado en la sección anterior, pero ahora entre los puntos del inventario de la S.C.T. y sus correspondientes en el trazo obtenido en campo con GPS (corregido diferencialmente). En este caso, los errores E_x , E_y y E_z fueron obtenidos como la diferencia entre la

coordenada del trazo de inventario menos la del trazo con el “receptor GPS”. La Tabla 3.3 reporta los valores de desviación estándar de los errores E_x , E_y y E_z para una muestra de puntos ubicados en tres secciones diferentes cuyos cadenamientos inicial y final también se indican en la tabla. No se reportan valores de media (sesgos) en ninguno de los tres casos considerados pues el procedimiento utilizado para poner ambos trazos en coordenadas tipo Lambert tiende a minimizar el desplazamiento relativo entre los mismos (es decir, reduce los sesgos). Asimismo, para efectos de estimación de los costos de operación de los vehículos de carga, los desplazamientos relativos entre trazos suelen no ser significativos, a diferencia de las desviaciones estándar, las cuales sí son generalmente determinantes en dichas estimaciones, particularmente la de E_z .

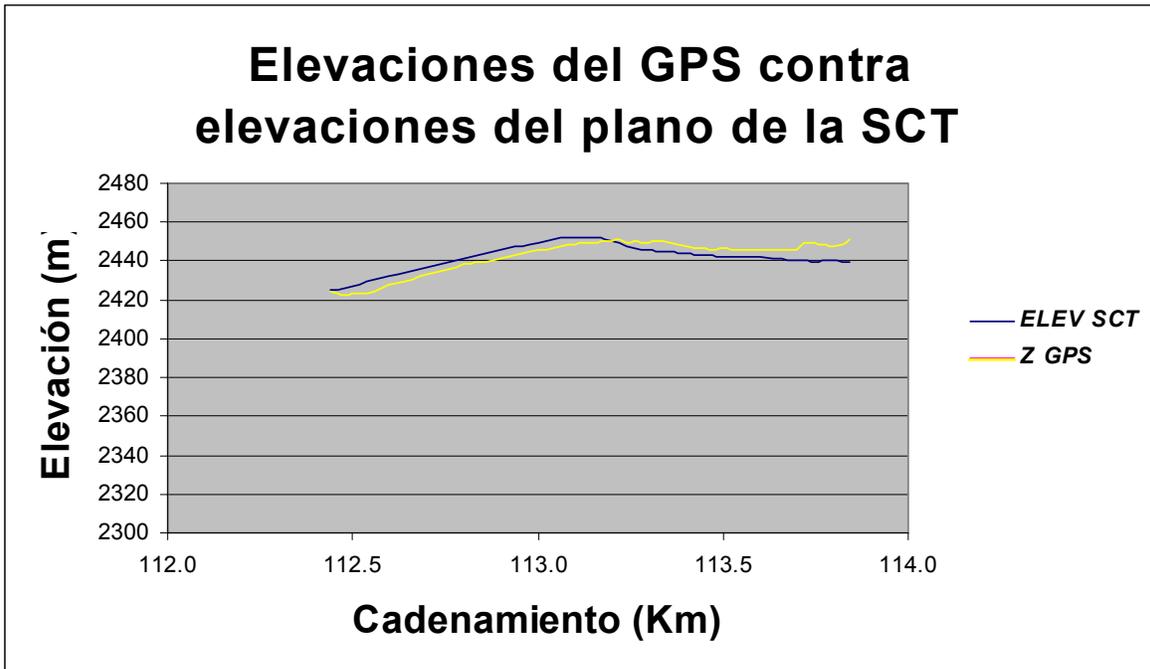
Como es evidente en la Tabla 3.3, los resultados (desviaciones estándar de los errores) para las tres secciones consideradas son muy consistentes. Es interesante que las desviaciones estándar de E_x , E_y y E_z en la Tabla 3.3 resultan de magnitud similar a las reportadas en las Tablas 3.1 y 3.2 para la comparación de trazos obtenidos con el “receptor GPS”, antes y después de corrección diferencial.

Tabla 3.3 Valores de desviación estándar para los errores E_x , E_y y E_z correspondientes a la comparación del trazo del inventario de la S.C.T. y el obtenido en campo con GPS

CASOS	DESV EST		
	E_x	E_y	E_z
km 112+440 a 113+840	2.712	2.735	4.824
km 123+300 a 128+820	2.712	2.735	3.744
km 136+300 a 143+760	2.712	2.735	3.442

Por el efecto tan determinante de las pendientes en los costos de operación de los vehículos de carga, es importante esclarecer el real impacto de las desviaciones estándar de E_z en la Tabla 3.3 en la estimación de las pendientes. Con esta finalidad se presentan las Figuras 3.16 a 3.18, las cuales comparan los perfiles verticales del inventario de la S.C.T. y del levantamiento en campo con GPS para las tres secciones consideradas.

Figura 3.16 Perfiles verticales del inventario de la S.C.T. y del



levantamiento con GPS. Segmento km 112+440 a 113+840



Figura 3.17 Perfiles verticales del inventario de la S.C.T. y del levantamiento con GPS. Segmento km 123+300 a 128+820

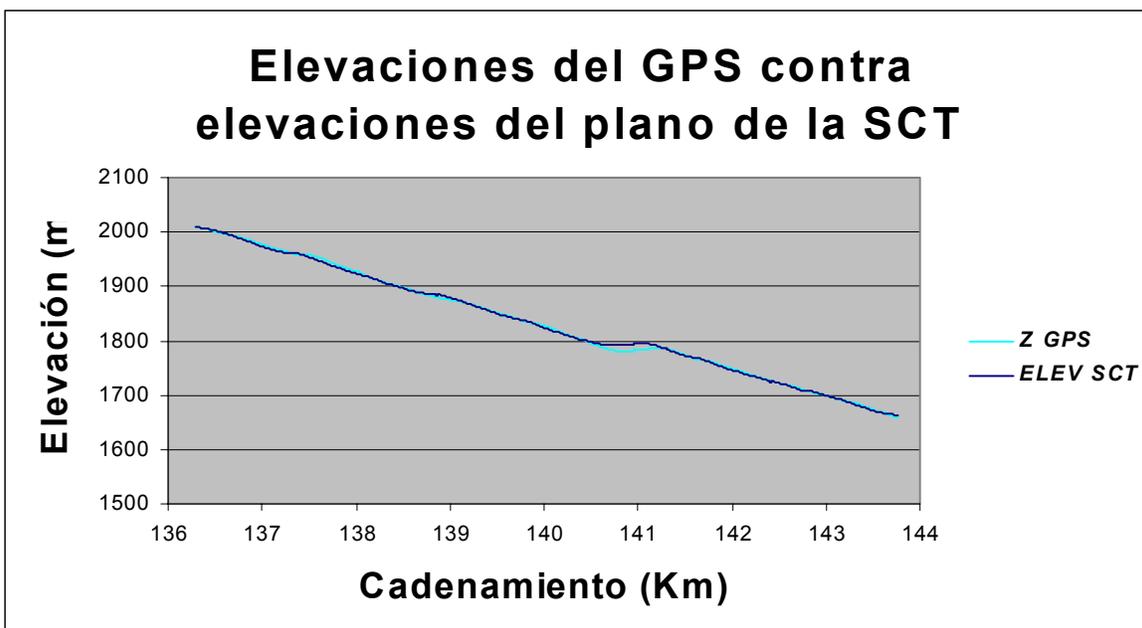


Figura 3.18 Perfiles verticales del inventario de la S.C.T. y del levantamiento con GPS. Segmento km 136+300 a 143+760

En las tres figuras es aparente que los perfiles comparados son muy similares entre sí. Como resultado de lo anterior, un análisis aritmético de comparación de pendientes obtenidas de los dos perfiles indicó que para el 70% de los casos, el error en la estimación de las pendientes es de menos de 2.3 unidades porcentuales de pendiente (p ej, si la pendiente es de 5%, en el 70% de los casos su estimación se encontrará entre 2.7 y 7.3%). El error máximo anterior corresponde a la diferencia de pendientes estimadas entre puntos consecutivos registrados con GPS, es decir, pendientes de segmentos de 15 a 30 metros de longitud. En segmentos más largos, como aquéllos en los que en carreteras reales la pendiente casi no varía (de 200 metros en adelante), dicho error máximo se reduce notablemente si los errores se toman como la diferencia de pendientes estimadas para esos segmentos a través del promedio de las pendientes entre sus puntos a cada 15 a 30 metros (lo cual reduce notablemente la desviación estándar de los errores). En el capítulo siguiente se indaga sobre los efectos reales de estos niveles de error, en los Costos de Operación Vehicular.

3.3 INFORMACIÓN OBTENIDA DEL SIGET

3.3.1 Descripción

Como ya se mencionó, a partir de 1994, los “Centros SCT” de los estados de la República realizaron el levantamiento con GPS de sus respectivas redes carreteras así como de una serie de atributos de las mismas (ubicación de puentes, alcantarillas, etc). Este levantamiento fue efectuado siguiendo un procedimiento similar al empleado en el levantamiento en campo del tramo Perote-Jalapa-T. Izq José Cardel (ya descrito), aunque en el primero el “receptor GPS” utilizado fue un Motorola modelo "SIXGUN", y no se efectuó corrección diferencial de las ubicaciones registradas. Después del registro de dicha información por los “Centros SCT”, la misma fue almacenada por el I.M.T. en archivos electrónicos de ArcInfo que forman la estructura fundamental del SIGET. De estos archivos se extrajo la información del trazo geométrico del tramo carretero Jalapa-T. Izq. José Cardel con la finalidad de realizar un análisis comparativo entre éste y su similar levantado en campo en este trabajo. El tipo de información para tres puntos del trazo proveniente del SIGET, es como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.4 Tipo de información para cada punto del trazo proveniente del SIGET

X	Y	Z	FECHA	HORA
-96.8970331	19.525815	1465.42	11/03/94	20:05:30
-96.8969783	19.525724	1465.42	11/03/94	20:05:31
-96.8969233	19.525643	1465.42	11/03/94	20:05:32

En la tabla anterior X y Y están en coordenadas geográficas (longitud y latitud), en tanto que Z está en metros (sobre el nivel del mar). Por lo tanto, fue necesario transformar las coordenadas X y Y al sistema de coordenadas correspondiente a la proyección tipo Lambert, cuyas unidades son metros. Esta transformación, así como otras del mismo tipo efectuadas en este trabajo, fue realizada mediante una función para realizar proyecciones dentro de las herramientas de ArcView. De esta manera, quedó listo el trazo del SIGET del tramo Jalapa-T. Izq. José Cardel para ser comparado con el trazo de campo del mismo tramo (también en coordenadas tipo Lambert), según se describe en la sección siguiente.

3.3.2 Trazo inventariado en el SIGET contra trazo obtenido en campo

Las tres coordenadas (X, Y y Z) de 737 puntos del trazo del SIGET del tramo Jalapa-T. Izq. José Cardel, fueron comparadas contra sus valores correspondientes en los trazos registrados en campo en ambos sentidos de circulación (corregidos diferencialmente). La longitud total de la muestra abarcada por estos 737 puntos es de 19.109 kilómetros, que van del km 16+414 al km 35+523. Originalmente, estos 737 puntos corresponden a ubicaciones consecutivas registradas con GPS durante el levantamiento del SIGET. Dado que para uno de esos puntos (en el km 32+500) se registró el cadenamiento en los tres trazos, dicho punto sirvió de referencia para estimar el cadenamiento de los 736 puntos restantes en el trazo del SIGET (utilizando distancias "euclidianas" entre puntos consecutivos) y de las ubicaciones registradas con GPS en los dos trazos levantados en campo (uno en cada sentido de circulación), dentro de los 19.109 kilómetros considerados. Así, con los cadenamientos de los 737 puntos del trazo del SIGET, fue posible obtener sus correspondientes coordenadas en los otros dos trazos mediante interpolación. Fue necesario interpolar puesto que los puntos registrados en los trazos de campo son diferentes a los del trazo del SIGET por provenir de levantamientos independientes. De esta manera se generó una muestra de 737 puntos con coordenadas X, Y y Z para los tres trazos antes indicados, a partir de la cual se generaron los resultados que se presentan enseguida.

De manera similar a los análisis de comparación de trazos antes mostrados, se presentan las Figuras 3.19 y 3.20, las cuales contienen las acumuladas de frecuencias relativas de los errores E_x , E_y y E_z definidos para el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel (por supuesto en relación con el trazo del SIGET) y el opuesto, respectivamente. Asimismo, la Tabla 3.5, debajo de las dos figuras anteriores, presenta los valores de media y desviación estándar para los seis errores considerados.

Tanto a partir de las Figuras 3.19 y 3.20 como de la Tabla 3.5, es evidente que el sesgo de los errores (media) oscila entre los 20 y los 30 metros. Asimismo, las desviaciones estándar para E_z son bastantes mayores que para E_x y E_y (del orden del doble que para estos últimos). También las desviaciones estándar de E_x , E_y y E_z para ambos sentidos de circulación resultan varias veces mayores (de 4 a 8 veces para E_x y E_y , y alrededor de 11 veces para E_z) que las obtenidas al comparar el trazo obtenido en campo contra el de los planos de inventario de la S.C.T. El análisis aritmético de comparación de pendientes obtenidas de las coordenadas Z de los dos perfiles indicó que para el 70% de los casos, el error en la

estimación de las pendientes es de menos de 4 unidades porcentuales de pendiente (p ej, si la pendiente es de 5%, en el 70% de los casos su estimación se encontrará entre 1 y 9%). De manera análoga a lo señalado en la Sección III.2.3, el error máximo anterior, que corresponde a la diferencia de pendientes de segmentos de 15 a 30 metros de longitud, se reduce notablemente en segmentos más largos, como aquéllos en los que en carreteras reales la pendiente permanece uniforme.

Tabla 3.5 Valores de media y desviación estándar para los Ex, Ey y Ez, en el tramo Jalapa-T. Izq. José Cardel

SENTIDO	Jalapa-T. Izq. José Cardel			T. Izq. José Cardel-Jalapa		
ERROR	<i>Ex</i>	<i>Ey</i>	<i>Ez</i>	<i>Ex</i>	<i>Ey</i>	<i>Ez</i>
MEDIA	-20,180	-6,498	-24,314	31,584	-25,117	-31,096
DESV EST	11,688	23,107	43,778	22,920	19,869	44,688

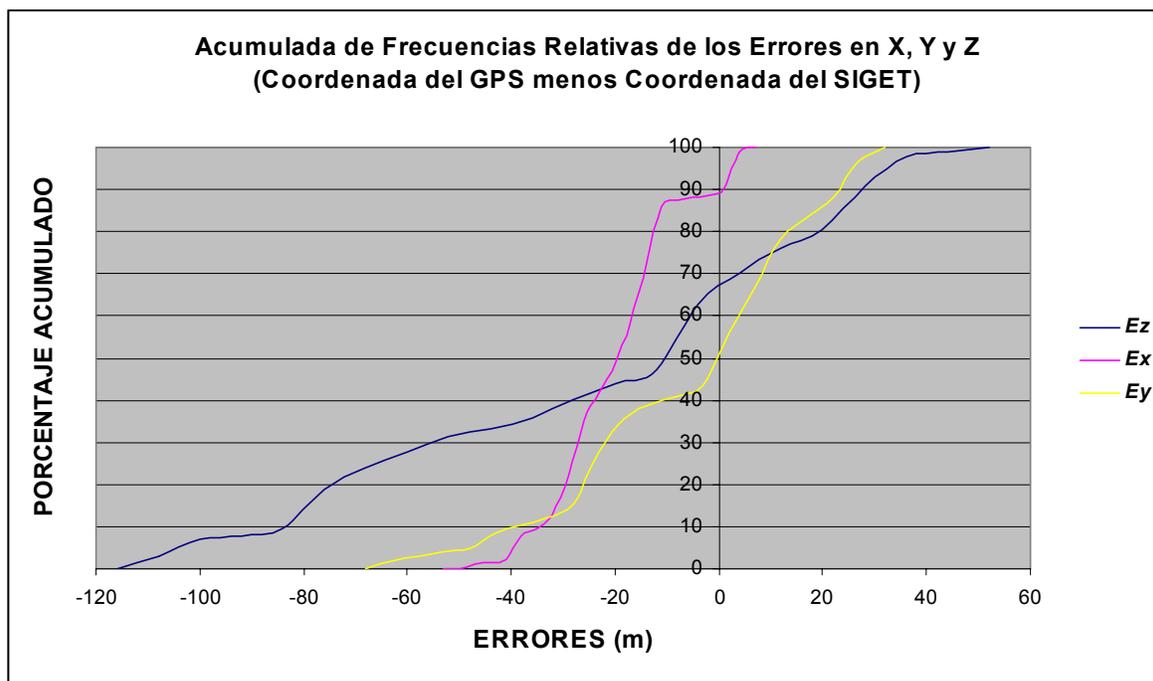


Figura 3.19 Acumulada de frecuencias relativas de los errores en X (Ex), Y (Ey) y Z (Ez) para el sentido Jalapa-T. Izq. José Cardel

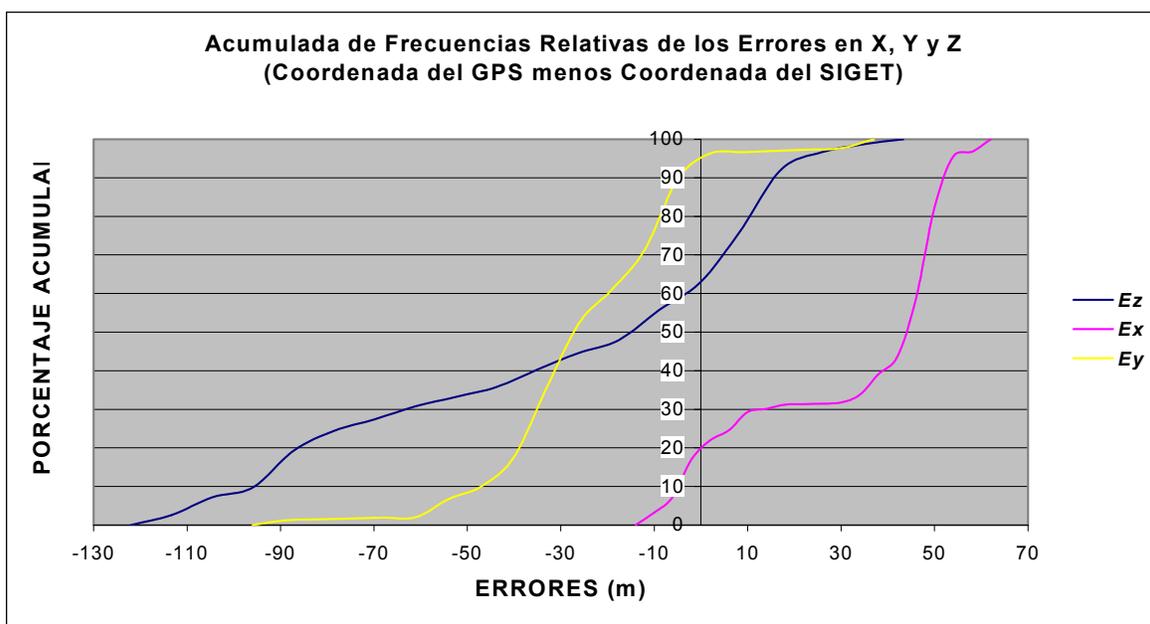


Figura 3.20 Acumulada de frecuencias relativas de los errores en X (E_x), Y (E_y) y Z (E_z) para el sentido T. Izq. José Cardel-Jalapa

Lo anterior es indicativo del nivel de precisión del levantamiento del SIGET en relación con los efectuados en este trabajo con el “receptor GPS” MAGELLAN, así como de la ganancia en precisión que ha brindado la eliminación de la “Disponibilidad Selectiva” y el desarrollo de la “tecnología GPS” en estos últimos años (entre 1994 cuando se realizó el inventario del SIGET y la fecha).

Con el fin de tener una mejor sensación de la magnitud de los errores que generan los resultados antes mostrados, se presenta la Figura 3.21, la cual compara el trazo en planta de los dos levantamientos considerados, así como la Figura 3.22 que compara los perfiles verticales correspondientes en función del cadenamamiento. A partir de la Figura 3.21 es evidente que para el rango de variación de las coordenadas X y Y del tramo carretero considerado, los errores E_x y E_y son irrelevantes. Alternativamente, la Figura 3.22 ilustra que para el mucho menor rango de variación de la coordenada Z, los errores E_z son más significativos.

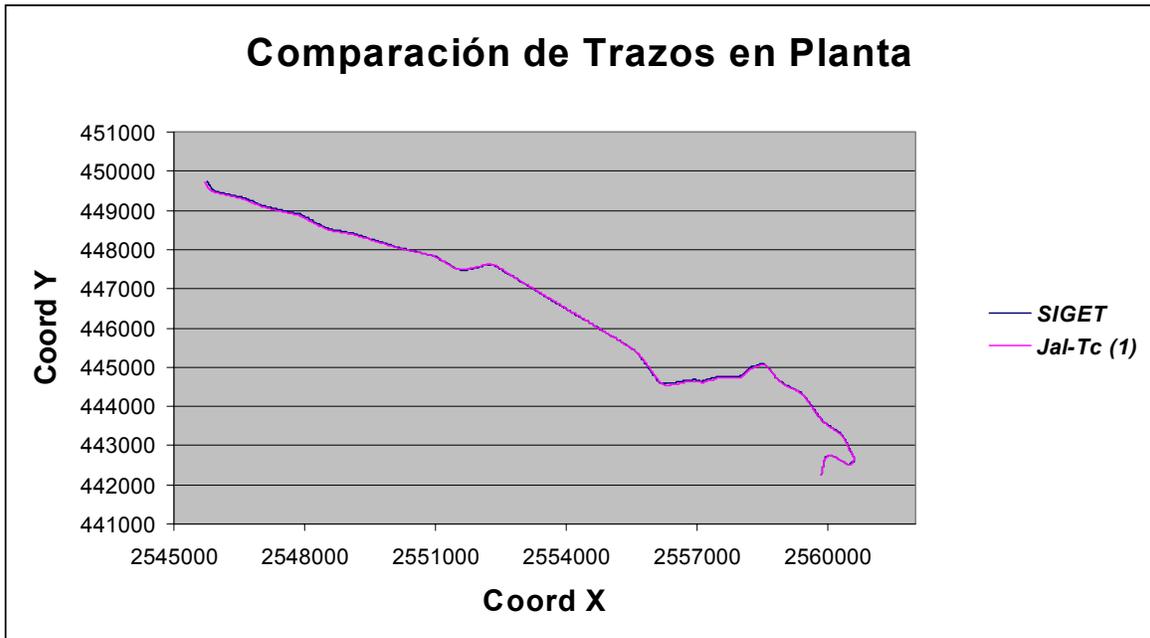


Figura 3.21 Trazos en planta del levantamiento del SIGET y del levantamiento con GPS

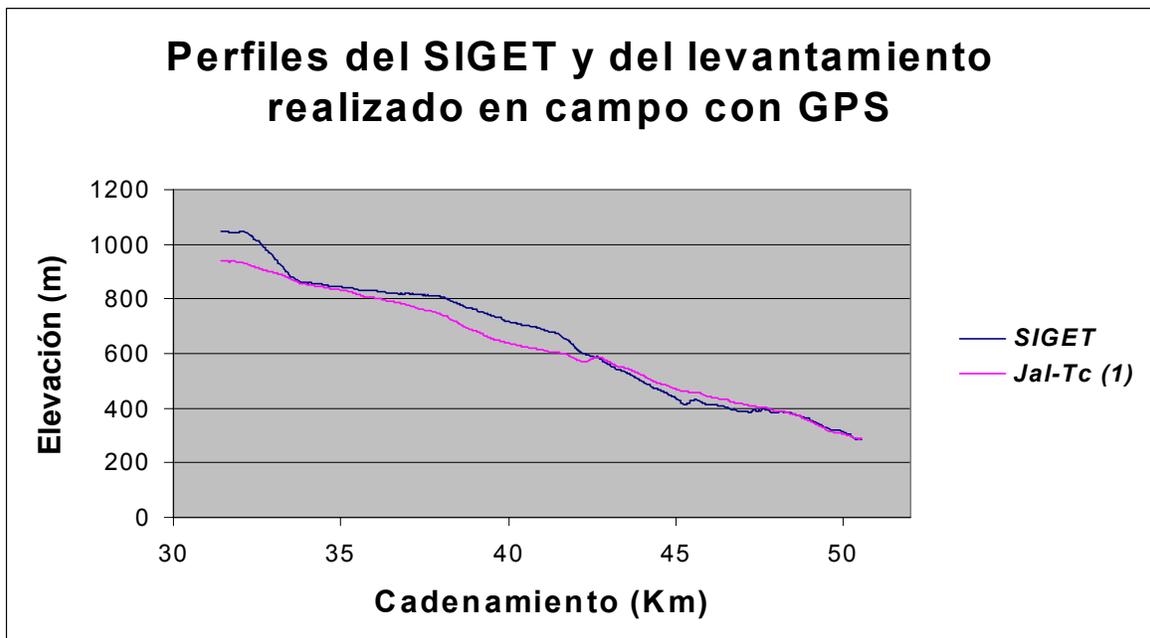


Figura 3.22 Perfiles del levantamiento del SIGET y del levantamiento con GPS

3.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

En todas las comparaciones realizadas en este trabajo, se encontró que la precisión de los “equipos GPS” es un tanto mejor para los trazos en planta (X, Y) que para los perfiles o alineamientos verticales del camino (Z contra cadenamiento).

Se cree que el levantamiento realizado en campo con GPS tiene suficiente aproximación tanto en las coordenadas X y Y como en Z, para fines de obtención de valores de pendientes del camino. Sin embargo, si lo que se pretende es elaborar un estudio de COVs con mayor detalle, lo más recomendable sería realizar el proceso de Corrección Diferencial a los trazos levantados, fundamentalmente para corregir las coordenadas Z, a partir de las que se obtienen las pendientes, las cuales tienen una influencia muy significativa en los COVs.

Se encontraron diferencias aceptables entre los trazos de la S.C.T. y levantado con GPS en campo. Por esta razón y porque proporciona una mejor resolución del trazo en formato electrónico (una mayor densidad de puntos), el segundo será utilizado en los análisis en el capítulo siguiente.

Se encontró una diferencia significativa entre el levantamiento de campo realizado en este trabajo y el del SIGET. Esto obedece a la ganancia en precisión que ha brindado la eliminación de la "Disponibilidad Selectiva" y el desarrollo de la tecnología GPS en estos últimos años.

Como resultado final de este trabajo se obtuvo que, para el 70% de los casos, el error en la estimación de las pendientes es de menos de 2.3 unidades porcentuales de pendiente para el trazo levantado en campo con GPS, y de menos de 4 unidades porcentuales para el trazo del SIGET. Estos errores máximos son considerables, sin embargo, los mismos provienen de coordenadas registradas con GPS cada 15 a 30 metros. En segmentos más largos, como aquéllos en los que en carreteras reales la pendiente casi no varía, dichos errores máximos se reducen notablemente si se estiman las pendientes de esos segmentos a través del promedio de las pendientes entre sus puntos a cada 15 a 30 metros. En el siguiente capítulo se indaga sobre los efectos reales de estos niveles de error en los Costos de Operación Vehicular.

En síntesis, las evaluaciones con GPS de la coordenada Z no sólo resultan un tanto más imprecisas que las de X y Y sino que además sus errores son más significativos en relación con el rango normal de variación de Z en un

tramo determinado. Son también más significativos para los fines para los cuales los perfiles verticales evaluados se utilizarán en la tesis, que son la estimación de pendientes verticales para la obtención de Costos de Operación Vehicular. Es, por lo tanto, para la estimación de la coordenada Z para lo que primordialmente se justifica la utilización de equipos de mayor precisión y la aplicación del procedimiento de corrección diferencial, aprovechando la ausencia de la “Disponibilidad Selectiva”.

Capítulo 4 Análisis de Costos de Operación Vehicular

4.1 NATURALEZA DEL ANÁLISIS

A partir del análisis que se presenta en este capítulo, se genera un conjunto de recomendaciones que sirven de base en el desarrollo del SIG que es objeto de este trabajo.

El análisis efectuado se basa en la estimación del COV total para ambos sentidos de 7 secciones dentro del tramo Jalapa – T. Izq. José Cardel, las cuales resultaron con una longitud promedio de 6.85 kilómetros. El COV total se obtiene a partir de la agregación de estimados obtenidos para todos los segmentos componentes de dichas secciones en el sentido dado, considerando una u otra de las siguientes dos segmentaciones:

- Una, correspondiente a la longitud existente entre puntos consecutivos levantados con GPS (entre 15 y 30 metros), referida de aquí en adelante como segmentación “punto a punto”.
- Otra, correspondiente a segmentos de 500 metros.

Dado que entre el levantamiento realizado en campo con GPS para el tramo considerado y el que se tiene en el SIGET, existen diferencias significativas (particularmente en altitud) según se evidenció en el capítulo anterior, los COVs totales por sección y por sentido se evalúan para ambos perfiles anteriores levantados con GPS. La combinación de ambos sentidos para las 7 secciones de cada uno de los dos perfiles y de ambas segmentaciones, resulta en 56 casos para los que se estima el COV total. A partir de estos 56 estimados, se pueden generar diferentes estadísticas para valorar el error de estimar los COVs de distintas maneras. Se considera de particular interés la valuación del error de estimar los COVs con el perfil del SIGET segmentado a 500 metros, en relación con el perfil levantado en campo con GPS segmentado “punto a punto”; ya que el primer caso representa la información georreferenciada más completa con que se cuenta y el segundo, la forma más precisa de estimación ensayada hasta ahora, por ser la que mejor corresponde al trazo de la carretera y la que se basa en la mayor cantidad de puntos.

En todos los casos los COVs se evalúan utilizando el algoritmo del programa VOC, para la configuración de carga T3S2. Ésta es una de las

más comunes en circulación por las Carreteras Federales (con 22.7% del total de vehículos de carga), así como de las que más participan en el autotransporte de carga en el país (con 32.3% de las toneladas-kilómetro y 48% del valor de lo transportado) y la que más contribuye en el autotransporte de carga internacional (con más del 70% de las toneladas-kilómetro y del valor de lo transportado), particularmente con los Estados Unidos. Los datos anteriores provienen de Gutiérrez y Mendoza [2001]. Todo el análisis en este capítulo se refiere a la condición de plena carga del T3S2, considerando el peso bruto vehicular (PBV) máximo que el Reglamento de Pesos y Dimensiones actualmente en vigor [DGAF, 1997] le permite a dicha configuración en condiciones convencionales (44 toneladas).

4.2 PREPARACIÓN DEL ANÁLISIS

Para la determinación de los COVs de un segmento carretero determinado, el programa VOC requiere de tres tipos de datos: características del vehículo, características de la carretera y costos unitarios. Esta sección se refiere, en primera instancia, a la selección del mejor conjunto de características para el vehículo T3S2 y sus costos unitarios. Asimismo, el enfoque que se sigue para los análisis en este capítulo es basarlos en la utilización de una herramienta computacional, generada ex profeso, que obtenga la información de las características de la carretera (propiedades físicas y geométricas) a partir de un inventario de la infraestructura levantado con GPS y manejado en ArcView. Dicha herramienta también será parte del SIG que es objeto este trabajo.

Asimismo, esta sección se refiere a la integración en ArcView de la subrutina del VOC que calcula la Velocidad de Operación (VO) y el COV, para que la herramienta antes referida estime dichos parámetros en paquete para un conjunto de segmentos seleccionados del inventario o para el total de ellos. Esto último es por requisitos de eficiencia ya que, como ya se dijo, el COV de una sección determinada se obtendrá por integración del COV de sus segmentos componentes, lo cual obligará a estimar con frecuencia el COV de una gran cantidad de segmentos consecutivos.

4.2.1 Características vehiculares y costos unitarios

De todos los datos de entrada que requiere el VOC [Archondo-Callao, 1989], la Tabla 4.1 presenta los seleccionados para las variables más relevantes para este análisis (“Costos Unitarios” y algunos “Datos del Vehículo”). Por lo ya mencionado, la tabla no incluye los datos correspondientes a características físicas y geométricas de los segmentos (“Características de las Carreteras”). Como el VOC también requiere del dato de calidad superficial del pavimento, se utilizó un Índice Internacional de Rugosidad (IRI, por sus siglas en inglés) promedio de 3.2 m/km (Calificación de Servicio Actual = 3.7) para el tramo considerado, según información actual (al año 2000) de la DGST [DGST, 2000a]. La Tabla 4.1 no incluye los datos que el VOC selecciona por omisión (“default”), los cuales sí se presentan en el compendio de datos totales ingresados al VOC en el Anexo B.

Tabla 4.1 Conjunto de datos de entrada para el programa VOC

CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO		
CONCEPTO	UNIDAD	VALOR
<i>Peso del vehículo vacío</i>	<i>Kg</i>	<i>16,000.00</i>
<i>Carga útil</i>	<i>Kg</i>	<i>28,000.00</i>
COSTOS UNITARIOS		
CONCEPTO	UNIDAD	VALOR
<i>Precio del vehículo nuevo</i>	<i>\$</i>	<i>1,000,000.00</i>
<i>Costo del combustible</i>	<i>\$/litro</i>	<i>4.45</i>
<i>Costo de los lubricantes</i>	<i>\$/litro</i>	<i>3.10</i>
<i>Costo por llanta nueva</i>	<i>\$/llanta</i>	<i>3,000.00</i>
<i>Tiempo de los operarios</i>	<i>\$/hora</i>	<i>35.00</i>
<i>Mano de obra de mantenimiento</i>	<i>\$/hora</i>	<i>25.00</i>
<i>Retención de la carga</i>	<i>\$/hora</i>	<i>8.00</i>
<i>Tasa de interés real anual</i>	<i>%</i>	<i>15.00</i>
<i>Costos indirectos por vehículo-km</i>	<i>\$</i>	<i>1.00</i>

4.2.2 Generación de la herramienta computacional

Como ya se mencionó, se utiliza el programa VOC para obtener los costos de operación vehicular para cada uno de los segmentos de un recorrido determinado. El COV total de este recorrido será la suma del COV de sus segmentos componentes.

La versión del VOC que se utiliza en este trabajo corresponde a una que ya fue calibrada para los vehículos y las condiciones específicas de nuestro país y que, por la misma razón, ha sido renombrada como “VOCmex” [Aguerrebere y Cepeda, 1991a].

El programa “VOCmex” calcula, para un caso en particular (un vehículo y un intervalo carretero), el COV total por 1,000 vehículos-km, la velocidad de operación (VO) y los consumos (combustible, lubricantes, llantas, etc), entre otras variables. Lo anterior genera una limitante para los fines de este trabajo, ya que se requeriría de una enorme cantidad de tiempo para resolver, uno por uno, los casos correspondientes a todos los intervalos o segmentos componentes de un tramo o recorrido determinado. Por lo tanto, fue necesario adaptar el programa “VOCmex” para que pudiese resolver automáticamente (“en paquete”) un conjunto de segmentos contenidos o seleccionados en una base de datos.

Antes de entrar en detalle respecto a la generación de la herramienta computacional, es necesario comprender algunos aspectos del funcionamiento del ArcView. Como ya se mencionó en el Capítulo II, en ArcView cada aplicación se maneja en un proyecto (archivo *.apr), el cual es un archivo que contiene la ruta o dirección de todos los documentos (vistas, tablas, gráficas, “scripts” o escritos, etc) utilizados en esa aplicación. Una vista es un ambiente en el que se visualizan un conjunto de rasgos geográficos, donde cada uno de estos conjuntos constituye un tema. Dependiendo del tipo de elemento que representen (sitio, línea o área), los rasgos geográficos pueden ser puntuales, lineales o poligonales. Un tema sólo puede contener uno de estos tres tipos de elementos. Para cada tema existe una Tabla de Atributos, la cual es una base de datos que almacena en diferentes campos las características específicas de cada rasgo geográfico. Los rasgos geográficos de un tema pueden ser clasificados para su representación en la vista, de acuerdo con cualquiera de sus características contenidas en la Tabla de Atributos.

La integración del programa VOCmex dentro del ambiente de ArcView se efectuó de la siguiente manera:

- Se realizó la modificación del VOCmex antes mencionada, para que éste pueda resolver en paquete un conjunto de casos.
- Se tradujo el código del VOCmex (después de las modificaciones indicadas en el punto anterior), originalmente escrito en lenguaje

“Basic”, al lenguaje de programación de ArcView denominado Avenue [ESRI, 1998]. Cabe señalar que, a diferencia del VOCmex que permite seleccionar el tipo de vehículo a considerar entre varias opciones, el código que se generó en Avenue para los fines de los análisis en este capítulo, fija todos los parámetros y variables vehiculares a las correspondientes al T3S2 a plena carga (con PBV de 44 ton). En el capítulo siguiente se describe la ampliación de dicho código en el desarrollo del sistema definitivo que es objeto de este trabajo, el cual sí permitirá seleccionar un vehículo dado entre diferentes alternativas.

- Se colocó el código traducido en el punto anterior, en un “script” de un proyecto generado específicamente para manejar la información del recorrido para el cual se desean los COVs. Esta información para cada segmento de dicho recorrido se maneja en un tema de elementos lineales de una vista de este mismo proyecto. A la Tabla de Atributos de este tema es a la que recurre el “script” realizado, para obtener las características físicas y geométricas de los segmentos requeridas por el VOCmex.
- Dentro del proyecto generado, se creó un botón para correr el “script” de cálculo de COVs sobre la Tabla de Atributos de los segmentos del recorrido considerado (o algunos de ellos previamente seleccionados). El “script” corre sobre la Tabla de Atributos activada al momento de presionar el botón. Cabe mencionar que dicha tabla debe encontrarse en modo editable al momento de correr el “script”; de lo contrario, el botón no se presentará disponible.

Las propiedades físicas y geométricas de los segmentos que requiere el VOCmex son:

Tipo de superficie, ya sea pavimentada o no pavimentada, ingresándose 1 en el primer caso y 0 en el segundo.

Rugosidad promedio, medida a través del Índice Internacional de Rugosidad (IRI), que es un indicador de la acumulación de las deformaciones absolutas del perfil vertical del pavimento (en metros) por unidad de longitud (1 km). El IRI oscila entre 2 y 12 m/km.

Pendiente media ascendente en el sentido de circulación, **pendiente media descendente** y **proporción de viaje que es ascendente**. Estos tres

parámetros se expresan en porcentaje. Las pendientes oscilan típicamente entre 0% y 5%, y la proporción del viaje en ascenso entre 0% y 100%, obviamente.

Curvatura horizontal promedio, que es la suma de los valores absolutos de las deflexiones (en grados), dividido por la longitud total (en km) del segmento considerado.

Sobreelevación promedio, que es el promedio ponderado de las sobreelevaciones de las curvas existentes en el segmento. Se expresa de manera fraccionaria.

Altitud del terreno, que es la altura promedio del segmento sobre el nivel del mar. Se expresa en metros.

Número efectivo de carriles, ya sea uno o más de uno, ingresándose 1 en el primer caso y 0 en el segundo.

Asimismo, el VOCmex requiere los siguientes dos datos operativos:

Velocidad deseada, que es la velocidad de recorrido deseada (en km/hr) en ausencia de otras restricciones, basada en consideraciones psicológicas, económicas, de seguridad y otras. A partir de esta velocidad, el VOCmex calcula la velocidad de operación (VO) y la reporta como un resultado, ya considerando las restricciones pertinentes (nivel de servicio, pendiente, curvatura, etc).

Nivel de Servicio, que es una medida cualitativa de las condiciones de congestión vehicular en el segmento y que va desde A hasta F, donde A representa condiciones de flujo libre y F condiciones de flujo extremadamente inestable. Es una de las restricciones a la velocidad, que en este trabajo se toma en cuenta mediante un factor de reducción de la VO generada por el VOCmex, para niveles de servicio menores que el A. Este factor se calcula mediante la Ecuación 4.1, según recomendaciones del Manual de Capacidad de Carreteras de los Estados Unidos [TRB, 2000]:

$$FV = [2.67 (S + 0.8)^{0.0663}] - 2 \quad \dots \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

FV = Factor de reducción de la VO para niveles de servicio inferiores al A.

S = 5 si el nivel de servicio es A, 4 si es B, 3 si es C, 2 si es D, 1 si es E y 0.1 si es F.

La velocidad que se obtiene del VOCmex y que es reducida por el factor anterior, es la que se utiliza en el cálculo de COVs.

4.2.3 Proyecto de ArcView para el manejo de los trazos considerados

La realización de los análisis en este capítulo requiere de manejar los ocho temas indicados en la Tabla 4.2, dentro de una vista de un proyecto denominado “SIG COV.apr”, creado específicamente para dichos análisis. Como es evidente, la Tabla 4.2 incluye un tema de líneas (segmentos) y otro de puntos (inicial y final de cada segmento) para las dos segmentaciones y los dos trazos considerados.

Tabla 4.2 Temas contenidos dentro de la vista del proyecto SIG COV en ArcView

TRAZOS	TEMAS	TIPO	DESCRIPCIÓN
TRAZO LEVANTADO CON GPS PARA ESTE TRABAJO	<i>Jtc-cd</i>	<i>Líneas</i>	<i>Contiene los rasgos geográficos de los segmentos existentes entre cada punto del levantamiento realizado con GPS para este trabajo.</i>
	<i>Jtc-cd_nodos</i>	<i>Puntos</i>	<i>Contiene los atributos de cada uno de los puntos (registrados cada segundo) que se generaron durante el levantamiento realizado en campo con GPS. Estos puntos indican el inicio y término de cada uno de los segmentos del tema anterior.</i>
	<i>Jtc-cd_500m</i>	<i>Líneas</i>	<i>Contiene los rasgos geográficos de los segmentos de 500 metros, generados a partir del tema “Jtc-cd” del levantamiento realizado con GPS para este trabajo.</i>
	<i>Jtc-cd_nodos500m</i>	<i>Puntos</i>	<i>Contiene los atributos de los puntos que indican el inicio y término de cada uno de los segmentos de 500 metros del tema anterior.</i>
TRAZO DEL SIGET	<i>Jtc-siget</i>	<i>Líneas</i>	<i>Contiene los rasgos geográficos de los segmentos existentes entre cada punto del levantamiento del SIGET.</i>
	<i>Jtc-siget_nodos</i>	<i>Puntos</i>	<i>Contiene los atributos de cada uno de los puntos (registrados cada segundo) que se generaron durante el levantamiento del SIGET. Estos puntos indican el inicio y término de cada uno de los segmentos del tema anterior.</i>
	<i>Jtc-siget_500m</i>	<i>Líneas</i>	<i>Contiene los rasgos geográficos de los segmentos de 500 metros, generados a partir del tema “Jtc-siget” del levantamiento del SIGET.</i>
	<i>Jtc-sig_nodos500m</i>	<i>Puntos</i>	<i>Contiene los atributos de los puntos que indican el inicio y término de cada uno de los segmentos de 500 metros del tema anterior.</i>

La Figura 4.1 muestra una imagen de una pantalla de ArcView del proyecto “SIG COV.apr”. En su parte superior, la imagen presenta una vista con los

ocho temas considerados, para un acercamiento de una parte de ambos trazos, haciendo visibles sólo los temas denominados como “Jtc-cd”, “Jtc-cd_nodos”, “Jtc-siget_500m” y “Jtc-siget_nodos500m” en la Tabla 4.2. La Tabla de Contenidos, a la izquierda de la vista, indica los ocho temas incluidos en la misma. Asimismo, con una marca a la izquierda de sus letreros descriptivos o leyendas, se señalan los temas que son visibles. En su parte inferior izquierda, la imagen ilustra una parte del “script” que calcula el COV y la VO de cada segmento, denominado “Tabla.CalcCOV”. En su parte inferior derecha, la imagen presenta la Tabla de Atributos del tema “Jtc-cd”, el cual se encuentra activo en la vista (mostrándose, por lo mismo, resaltada su leyenda en la Tabla de Contenidos). Cabe señalar que el “script” “Tabla.CalcCOV”, por referirse al cálculo del COV de un recorrido longitudinal, se ejecuta exclusivamente sobre Tablas de Atributos de temas de líneas, como son los temas “Jtc-cd”, “Jtc-cd_500m”, “Jtc-siget” y “Jtc-siget_500m” de la Tabla 4.2. En la parte superior de la imagen en la Figura 4.1, dentro de la barra de botones de control, se encuentra incluido el botón  que corre el “script” de cálculo de COVs sobre la Tabla de Atributos del tema activado.

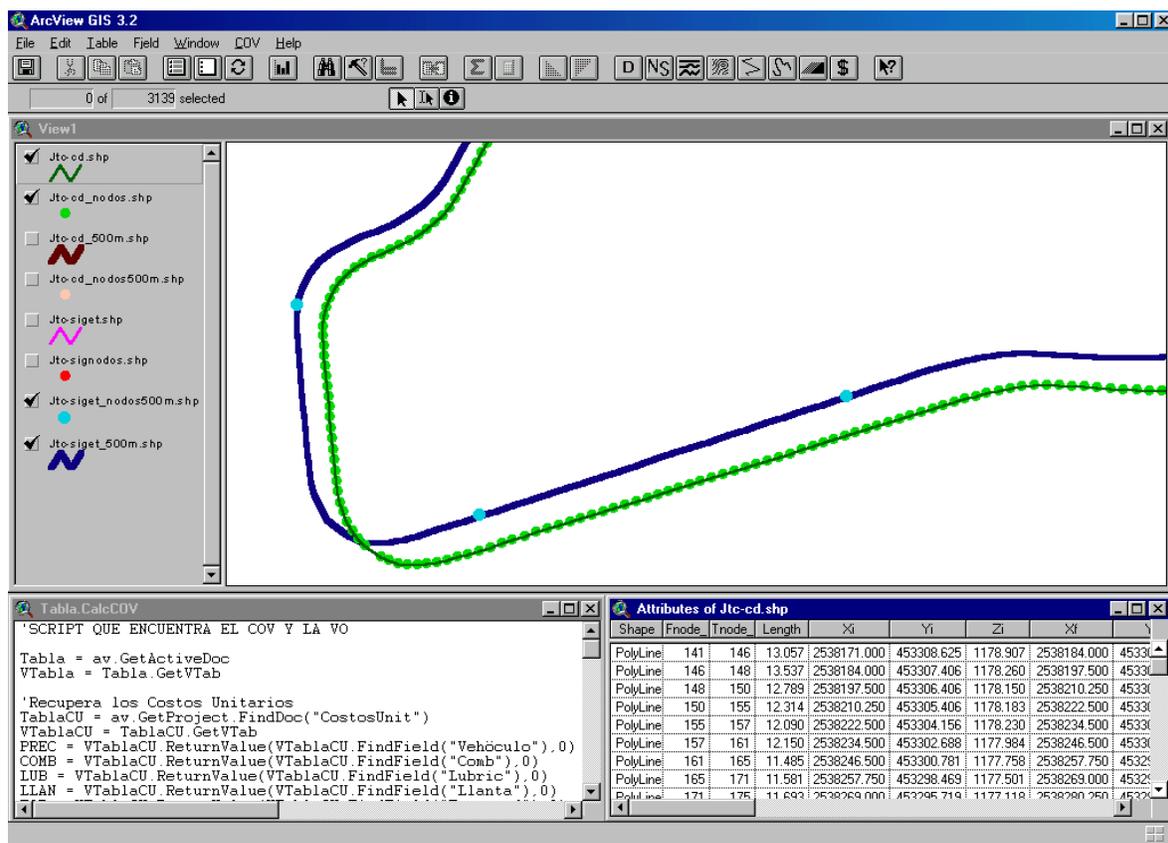


Figura 4.1 Pantalla de trabajo del proyecto “SIG COV.apr” en ArcView

4.2.4 Datos de las características de las carreteras

Los datos de entrada que requiere el VOCmex referentes a las características de la carretera, deben ingresarse en la Tabla de Atributos del tema de segmentos, previamente al cálculo de COVs. Algunos se toman de determinadas fuentes y se ingresan manualmente, en tanto que otros se calculan a partir de procesos sobre datos ya contenidos en la Tabla de Atributos (coordenadas de los nodos inicial y final de los segmentos).

4.2.4.1 *Datos que se ingresan manualmente*

Tipo de superficie. El tramo Jalapa – T. Izq. José Cardel es pavimentado en su totalidad, por lo que, para todos los casos considerados en este análisis, a esta variable se le asigna un valor de 1 para todos los segmentos.

Rugosidad promedio. Según sea el caso considerado, para los segmentos de cada una de las siete secciones en las que se dividió el tramo, el IRI provino de mediciones recientes realizadas por la Dirección General de Servicios Técnicos [DGST, 2000a].

Número efectivo de carriles. El tramo Jalapa – T. Izq. José Cardel tiene un solo carril efectivo por sentido (a excepción de pequeñas longitudes que cuentan con carril de ascenso), por lo que, para todos los casos considerados, a esta variable se le asigna un valor de 1 para todos los segmentos.

Velocidad deseada. Para todos los segmentos se ingresó un valor de 100 km/hr, que corresponde al límite máximo de velocidad establecido para el tramo Jalapa – T. Izq. José Cardel.

Nivel de servicio. Para los segmentos de ambos sentidos, se especificó un nivel de servicio C ($S = 3$), según reporta la DGST para el tramo [DGST, 2000b].

4.2.4.2 *Datos que se calculan a partir de procesos de cómputo*

a) Variables

Como paso previo a la ejecución de estos procesos, es necesario transferir las coordenadas (X, Y y Z) de los puntos inicial y final de cada segmento, al

tema de líneas o segmentos para el que se desea la estimación de COVs (“Jtc-cd”, “Jtc-cd_500m”, “Jtc-siget” y “Jtc-siget_500m”), a partir del tema de nodos correspondiente de los cuatro mencionados en la Tabla 4.2 (“Jtc-cd_nodos”, “Jtc-cd_nodos500m”, “Jtc-siget_nodos” y “Jtc-sig_nodos500m”). Las siguientes variables se calculan a partir de procesos efectuados sobre las coordenadas transferidas.

Pendiente media ascendente en el sentido de circulación, pendiente media descendente y proporción de viaje que es ascendente. En el caso de segmentos de longitud pequeña, como en los que se basa este análisis (de 500 metros o menos), la pendiente en el sentido de circulación se obtiene directamente de las coordenadas (X, Y y Z) iniciales y finales de cada segmento de acuerdo con la Ecuación 4.2; si ésta resulta positiva, la proporción de viaje en ascenso se considera como 100%, si resulta negativa, dicha proporción se considera 0%.

$$\text{Pendiente} = [Z_{\text{final}} - Z_{\text{inicial}}] / [\sqrt{(X_{\text{final}} - X_{\text{inicial}})^2 + (Y_{\text{final}} - Y_{\text{inicial}})^2}] \dots \text{Ec.}$$

4.2

De los dos puntos que delimitan cada segmento, se toma uno u otro como inicial o final dependiendo de la dirección de recorrido considerada, o lo que es igual, el valor de la pendiente cambia de signo dependiendo de la dirección considerada.

Curvatura horizontal promedio. Tanto para el trazo levantado en campo en este trabajo como para el del SIGET, si la segmentación es la denominada como “punto a punto”, se asumen pequeñas líneas rectas entre dichos puntos (de 15 a 30 metros de longitud), por lo que la deflexión por kilómetro para un segmento determinado puede calcularse obteniendo la deflexión del mismo en relación con el segmento anterior a partir de las coordenadas de los puntos inicial y final de ambos segmentos, dividiendo ésta entre la longitud del segmento (obtenida también a partir de las coordenadas de sus puntos inicial y final). Para el caso de la segmentación a cada 500 metros, la deflexión por kilómetro puede aproximarse asumiendo que cada segmento es una porción de circunferencia, con longitud de curva (LC) de alrededor de 500 metros y cuerda (C) definida por la distancia en línea recta entre el punto inicial y final de esa porción de circunferencia, calculada a partir de las coordenadas de dichos puntos. De esta forma, combinando las Ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5 del trazo geométrico de curvas simples horizontales en carreteras [SCT, 1984], se obtiene la

Ecuación 4.6, que representa una solución de forma abierta para el cálculo del parámetro requerido $Q (= \Delta/LC)$ de cada segmento.

$$C = 2 R \text{ sen } \Delta/2 \dots\dots\dots \text{Ec. 4.3}$$

Donde: C = Cuerda, R = Radio, Δ = Deflexión

$$LC = 20 \Delta / G \dots\dots\dots \text{Ec. 4.4}$$

Donde: LC = Longitud de la Curva, G = Grado de Curvatura

$$R = 1146 / G \dots\dots\dots \text{Ec. 4.5}$$

Donde: R = Radio, G = Grado de Curvatura

$$Q = \frac{\Delta}{LC} = \frac{10 \times C}{LC} \times \text{Sen} \left(\frac{LC \times Q}{2} \right) \dots\dots\dots \text{Ec. 4.6}$$

Donde:

Q = Curvatura (deflexión por unidad de longitud de curva)

Los parámetros C y LC de la Ecuación 4.6 tienen valores conocidos para todos los segmentos, por lo tanto, es posible conocer el valor de curvatura $Q (= \Delta/LC)$ de cada segmento, al iterar para el parámetro Δ/LC dentro de la Ecuación 4.6.

En el cálculo anterior es indiferente la dirección de recorrido, es decir, cuál de los dos puntos que delimitan cada segmento se toma como inicial y cual como final.

Sobreelevación promedio. Para su uso dentro del programa VOCmex, la sobreelevación de cada segmento puede calcularse en función de la curvatura (Q) del mismo y del tipo de superficie del camino [Archondo-Callao, 1989]. Si la superficie es pavimentada, la sobreelevación se calcula con la Ecuación 4.7; de lo contrario, se calcula con la Ecuación 4.8.

$$S = 0.00012 * Q \dots\dots\dots \text{Ec. 4.7}$$

$$S = 0.00017 * Q \dots\dots\dots \text{Ec. 4.8}$$

Donde: S = Sobreelevación, Q = Curvatura

También en este caso es indiferente la dirección de recorrido.

Altitud del terreno. Se obtiene a partir de las coordenadas de los puntos inicial y final de cada segmento, como la media aritmética de la coordenada Z de ambos puntos. La altitud para cada segmento es calculada a partir de la Ecuación 4.9.

$$\text{Altitud} = [Z_{\text{inicial}} + Z_{\text{final}}] / 2 \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 4.9}$$

Donde:

Z_{inicial} = Coordenada de altitud del nodo inicial del segmento

Z_{final} = Coordenada de altitud del nodo final del segmento

En este caso también es indiferente la dirección de recorrido.

b) “Scripts” para el cálculo de las variables anteriores

De manera análoga que para COVs y VO, se elaboró un “script” para calcular, a partir de la Tabla de Atributos del tema de segmentos, las variables antes descritas (para todos los segmentos o algunos de ellos previamente seleccionados). Cada uno de estos “scripts” fue también asociado a un botón, el cual debe oprimirse para que se efectúe el cálculo del parámetro correspondiente. La Figura 4.2 muestra cada uno de los botones e indica cuál es su función.

El primer botón de la Figura 4.2, al oprimirse, coloca la tabla de atributos del tema seleccionado (el tema de segmentos en este caso) en forma editable, lo cual significa que cuando no está en forma editable (cuando en el botón aparece la leyenda “E”), no pueden hacerse cambios en ella. Por lo tanto, como requisito para que puedan ejecutarse el resto de los botones, debe ejecutarse primero el botón , con lo cual la leyenda de este botón cambia a “D” (Detener Modo de Edición). Cuando este botón se oprime nuevamente, su leyenda cambia a “E” y la tabla de atributos deja de estar en modo editable.

La aplicación de los últimos 5 botones genera, primero, los campos necesarios para la estimación y almacenamiento de la variable calculada. El último de los botones en la Figura 4.2 es al que ya se hizo referencia, para el cálculo de COVs y VO de los segmentos deseados.

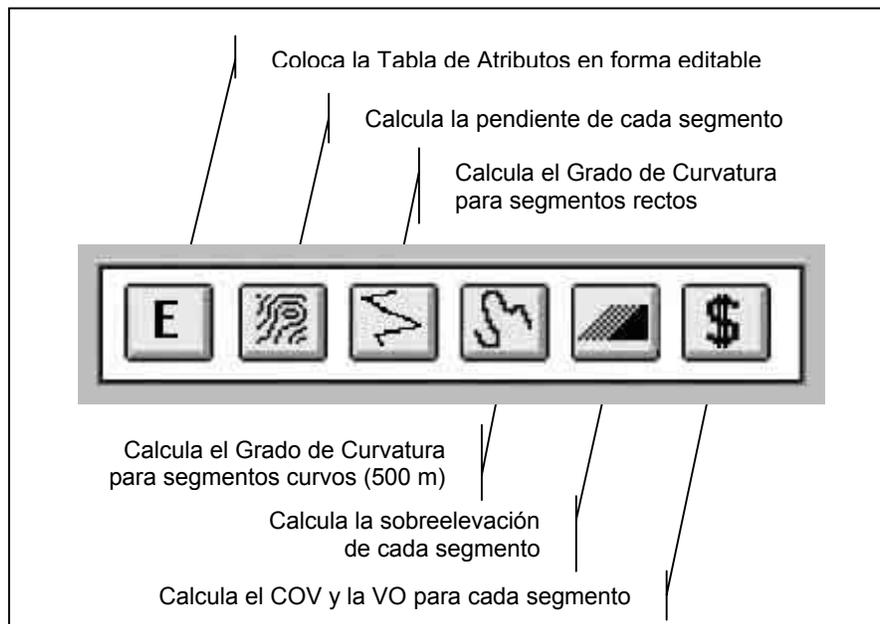


Figura 4.2 Barra de botones

4.3 ANÁLISIS

4.3.1 Generación de valores de COV/km

Con las herramientas antes generadas, se procedió a realizar las corridas de estimación de COVs para los 56 casos considerados (7 secciones x 2 trazos x 2 sentidos de circulación x 2 segmentaciones). La Tabla 4.3 resume los resultados más relevantes obtenidos para la segmentación “punto a punto”, en tanto que en la Tabla 4.4 se presenta lo correspondiente a la segmentación a cada 500 metros. En ambas tablas anteriores se presenta, en su parte superior, los resultados para el sentido de circulación Jalapa – T. Izq. José Cardel y, en su parte inferior, los correspondientes al sentido opuesto. Asimismo, para ambos sentidos de cada tabla, se muestran el cadenamamiento aproximado de cada sección, el número de segmentos (“punto a punto” o de 500 metros) ubicados en ellas, la longitud real de cada sección en ArcView, el tiempo de recorrido del T3S2 (en horas), el COV, el COV por kilómetro y la VO (en kilómetros por hora, km/hr o Kph). Además, tanto para un sentido como para el otro de cada tabla, se presenta un renglón con valores globales o promedio para los parámetros anteriores. De ambas tablas se obtiene una longitud promedio para las 7 secciones, de 6.85 kilómetros (47.924 km / 7 secciones). Para los 56 casos en las Tablas 4.3 y 4.4 se obtiene un COV/km promedio de 14.37 pesos.

En las Tablas 4.3 y 4.4 es evidente que, para ambas segmentaciones y ambos trazos, el COV y el COV/km resultan mayores en el sentido T. Izq. José Cardel – Jalapa, en ascenso, que en el opuesto, el cual es en descenso. Por otra parte, en todos los casos, los dos costos anteriores resultan ligeramente mayores en el trazo del SIGET que en el levantado en campo para este trabajo. También son ligeramente mayores los costos de la segmentación “punto a punto”.

4.3.2 Efectos del trazo y la longitud de segmentación

Con el fin de realizar una determinación más fina del efecto de los dos trazos y los dos niveles de segmentación en los COV/km, se realizó un análisis de variancia (ANOVA, por sus siglas en inglés) sobre los 56 casos en las Tablas 4.3 y 4.4. Para minimizar el efecto de otras variables (p ej, características físicas específicas de las secciones, tales como pendiente, curvatura, estado del pavimento, longitud, etc), en el “ANOVA” en realidad se tomó como variable dependiente la diferencia del COV/km (correspondiente a una sección y un sentido de circulación) menos el promedio de los 4 valores de COV/km para la misma sección y el mismo sentido. De esta manera, el “ANOVA” es en 2 sentidos de clasificación (longitud de segmentación y trazo) con 14 observaciones por cada una de las 4 celdas (4 combinaciones de las dos segmentaciones por los dos trazos). Los resultados del ANOVA efectuado se presentan en la Tabla 4.5. De todas las “F’s” calculadas, sólo la del trazo resulta significativa para una “F crítica” igual a 7.2 correspondiente a un nivel de significancia (α) de 1%. Para un nivel de 5% (“F crítica” igual a 4.05), los dos efectos principales (trazo y longitud de segmentación) resultan significativos. La interacción no resulta significativa para ninguno de los dos niveles de significancia anteriores. Las “F’s” calculadas del trazo y la longitud de segmentación indican que el efecto del primero es 2.2 veces el de la segunda.

Tabla 4.3 Resultados obtenidos de la segmentación “punto a punto” (se incluyen ambos sentidos de circulación)

SECCIÓN	CADENAM	Levantado en Campo para este Trabajo (Jalapa - TC Cardel)					
		No. SEGM	Long (m)	Tiempo (hr)	COV(\$)	COV/km	VO(Kph)
1	km 5-10	294.000	4,958.072	0.067	47.302	9.540	74.486
2	km 10-20	579.000	9,914.651	0.125	89.287	9.006	79.114
3	km 20-25	300.000	4,922.480	0.066	43.825	8.903	74.723
4	km 25-35	677.000	10,049.033	0.163	125.851	12.524	61.707
5	km 35-40	400.000	5,064.304	0.074	52.171	10.302	68.623
6	km 40-45	306.000	4,918.241	0.068	49.577	10.080	72.605
7	km 45-53	583.000	8,097.176	0.118	81.707	10.091	68.882
TOTAL		3,139	47,924	0.680	489.720		
PROMEDIO						10.219	70.507

SECCIÓN	CADENAM	SIGET (Circulación Jalapa - TC Cardel)					
		No. SEGM	Long (m)	Tiempo (hr)	COV(\$)	COV/km	VO(Kph)
1	km 5-10	199	4,966.744	0.068	49.184	9.903	73.059
2	km 10-20	381	9,800.860	0.136	103.156	10.525	72.151
3	km 20-25	175	4,894.498	0.065	48.970	10.005	75.883
4	km 25-35	444	10,109.363	0.179	154.668	15.300	56.487
5	km 35-40	189	5,092.857	0.077	61.681	12.111	65.786
6	km 40-45	178	5,006.924	0.072	61.890	12.361	69.587
7	km 45-53	365	8,094.809	0.130	103.715	12.813	62.126
TOTAL		1,931	47,966	0.727	583.264		
PROMEDIO						12.160	65.982

SECCIÓN	CADENAM	Levantado en Campo para este Trabajo (TC Cardel - Jalapa)					
		No. SEGM	Long (m)	Tiempo (hr)	COV(\$)	COV/km	VO(Kph)
1	km 5-10	294	4,958.072	0.137	104.786	21.135	36.305
2	km 10-20	579	9,914.651	0.234	176.976	17.850	42.392
3	km 20-25	300	4,922.480	0.155	109.501	22.245	31.668
4	km 25-35	677	10,049.033	0.246	193.282	19.234	40.882
5	km 35-40	400	5,064.304	0.103	77.041	15.213	49.160
6	km 40-45	306	4,918.241	0.082	60.836	12.369	60.092
7	km 45-53	583	8,097.176	0.160	121.453	14.999	50.705
TOTAL		3,139	47,924	1.116	843.875		
PROMEDIO						17.609	42.933

SECCIÓN	CADENAM	SIGET (Circulación TC Cardel - Jalapa)					
		No. SEGM	Long (m)	Tiempo (hr)	COV(\$)	COV/km	VO(Kph)
1	km 5-10	199	4,966.744	0.100	80.813	16.271	49.611
2	km 10-20	381	9,800.860	0.210	199.285	20.333	46.682
3	km 20-25	175	4,894.498	0.148	113.482	23.186	33.108
4	km 25-35	444	10,109.363	0.266	231.873	22.937	38.017
5	km 35-40	189	5,092.857	0.096	83.013	16.300	53.233
6	km 40-45	178	5,006.924	0.079	63.950	12.772	63.246
7	km 45-53	365	8,094.809	0.153	129.005	15.937	52.846
TOTAL		1,931	47,966	1.052	901.421		
PROMEDIO						18.793	45.603

Tabla 4.4 Resultados obtenidos de la segmentación de 500 metros (se incluyen ambos sentidos de circulación)

SECCIÓN	CADENAM	Levantado en Campo para este Trabajo (Jalapa - TC Cardel)					
		No. SEGM	Long (m)	Tiempo (hr)	COV(\$)	COV/km	VO(Kph)
1	km 5-10	10.000	4958.074	0.073	45.974	9.272	67.576
2	km 10-20	20.000	9914.633	0.142	87.445	8.820	69.824
3	km 20-25	10.000	4922.474	0.070	42.876	8.710	70.310
4	km 25-35	20.000	10049.051	0.166	122.755	12.216	60.578
5	km 35-40	10.000	5064.295	0.072	46.150	9.113	70.025
6	km 40-45	10.000	4918.254	0.070	47.006	9.557	70.211
7	km 45-53	16.000	8097.219	0.119	78.673	9.716	68.071
TOTAL		96	47924	0.713	470.879		
PROMEDIO						9.826	67.254

SECCIÓN	CADENAM	SIGET (Jalapa - TC Cardel)					
		No. SEGM	Long (m)	Tiempo (hr)	COV(\$)	COV/km	VO(Kph)
1	km 5-10	10.000	4966.735	0.071	44.450	8.950	69.926
2	km 10-20	20.000	9800.853	0.144	91.723	9.359	68.063
3	km 20-25	10.000	4894.497	0.069	45.853	9.368	70.505
4	km 25-35	20.000	10109.370	0.174	137.495	13.601	58.212
5	km 35-40	10.000	5092.847	0.084	57.489	11.288	60.429
6	km 40-45	10.000	5006.926	0.078	54.114	10.808	64.480
7	km 45-53	16.000	8094.816	0.128	88.441	10.926	63.049
TOTAL		96	47966	0.748	519.565		
PROMEDIO						10.832	64.089

SECCIÓN	CADENAM	Levantado en Campo para este Trabajo (TC Cardel - Jalapa)					
		No. SEGM	Long (m)	Tiempo (hr)	COV(\$)	COV/km	VO(Kph)
1	km 5-10	10.000	4958.074	0.141	105.082	21.194	35.089
2	km 10-20	20.000	9914.633	0.254	176.748	17.827	39.046
3	km 20-25	10.000	4922.474	0.164	109.821	22.310	30.096
4	km 25-35	20.000	10049.051	0.263	192.228	19.129	38.200
5	km 35-40	10.000	5064.295	0.102	73.168	14.448	49.458
6	km 40-45	10.000	4918.254	0.083	58.597	11.914	59.317
7	km 45-53	16.000	8097.219	0.163	121.253	14.975	49.786
TOTAL		96	47924	1.170	836.897		
PROMEDIO						17.463	40.968

SECCIÓN	CADENAM	SIGET (TC Cardel - Jalapa)					
		No. SEGM	Long (m)	Tiempo (hr)	COV(\$)	COV/km	VO(Kph)
1	km 5-10	10.000	4966.735	0.113	82.956	16.702	43.771
2	km 10-20	20.000	9800.853	0.246	198.455	20.249	39.764
3	km 20-25	10.000	4894.497	0.169	118.129	24.135	29.034
4	km 25-35	20.000	10109.370	0.276	217.702	21.535	36.681
5	km 35-40	10.000	5092.847	0.099	78.685	15.450	51.513
6	km 40-45	10.000	5006.926	0.079	54.700	10.925	63.067
7	km 45-53	16.000	8094.816	0.153	117.362	14.498	53.024
TOTAL		96	47966	1.135	867.989		
PROMEDIO						18.096	42.259

Tabla 4.5 Resultados del ANOVA (Análisis de Variancia)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados libertad	Cuadrado medio	F calculada	F (1%) crítica	F (5%) crítica
Longitud de segm.	5.32	1	5.32	5.45	7.2	4.05
Trazo	11.73	1	11.73	12.01	7.2	4.05
Longitud de segm. x trazo	1.38	1	1.38	1.41	7.2	4.05
Dentro del error	50.79	52	0.98	1.00	7.2	4.05
Total	69.21	55				

Los resultados del ANOVA son también evidentes en la Figura 4.3, en la cual se ilustra la acumulada de frecuencias relativas para las 28 diferencias de COV/km entre los 2 trazos, junto con la acumulada para las 28 diferencias de COV/km entre las 2 segmentaciones. Puede observarse que para la gama de variantes de condiciones carreteras consideradas (7 secciones x 2 sentidos), la diferencia de trazo (entre el SIGET y el levantado en campo) generará un error máximo en el COV/km entre -1 y 2.5 pesos/km en el 70% de los casos. El mayor de los valores absolutos de los dos límites anteriores (2.5 pesos/km) representa el 18.1% del COV/km promedio obtenido para los 28 casos del trazo de campo (13.8 pesos/km). Por su parte, la diferencia de longitud de segmentación (entre “punto a punto” y 500 m) generará un error máximo entre -1.5 y 0 pesos/km, también en el 70% de los casos. El mayor de los valores absolutos de los dos límites anteriores (1.5 pesos/km) representa el 10.2% del COV promedio para los 28 casos correspondientes a la segmentación “punto a punto” (14.7 pesos/km).

La Tabla 4.6 resume la media y desviación estándar de las diferencias o errores en COV/km tanto por efecto del trazo como de la longitud de segmentación. Los valores de sesgo o media en la Tabla 4.6 representan errores promedio de -4% y 6.3% para la segmentación a cada 500 m en relación con la segmentación “punto a punto” y para el trazo del SIGET en relación con el trazo de campo, respectivamente.

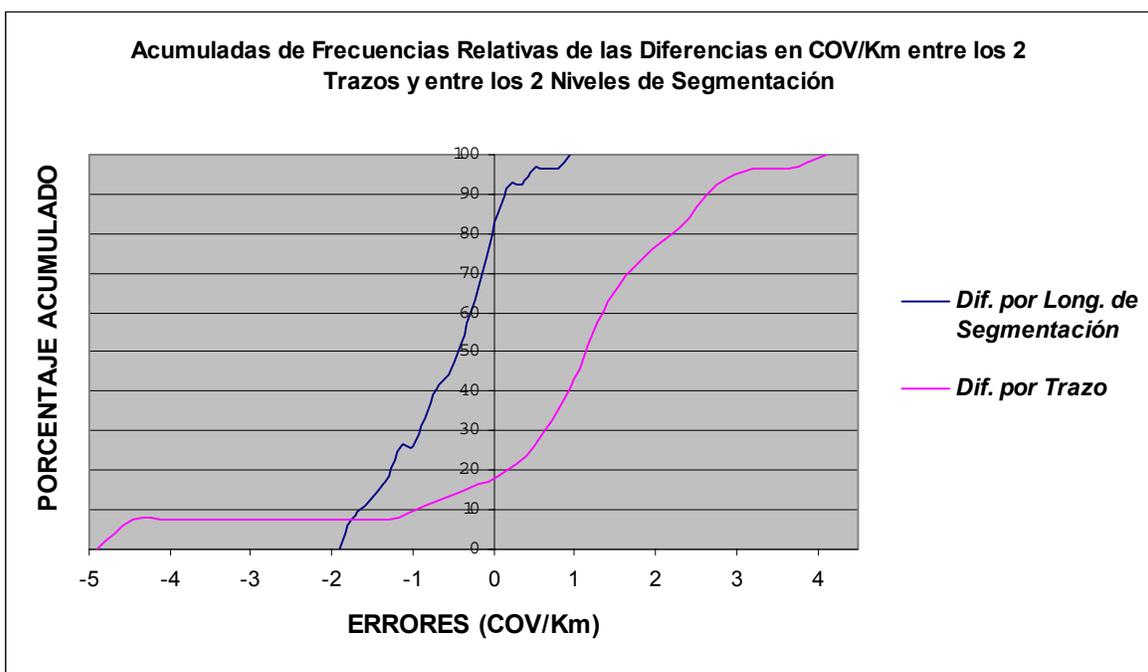


Figura 4.3 Acumulada de frecuencias relativas

Tabla 4.6 Valores de media y desviación estándar para las diferencias en COV/km entre los dos trazos y las dos segmentaciones

	<i>Diferencias entre las Long. de Segmentación (500 m - 15@30 m)</i>	<i>Diferencias entre los trazos (EN CAMPO - SIGET)</i>
MEDIA	-0.5870	0.8685
DESV EST	0.7094	1.9176

4.3.3 Errores en relación con el trazo de campo segmentado entre puntos consecutivos

Los resultados de los 56 casos considerados pueden también analizarse como se mencionó al inicio de este capítulo, es decir, tomando como referencia los COV/km del trazo de campo segmentado “punto a punto”. De esta manera, se generan 3 series de 14 diferencias al restar los COV/km del trazo anterior (de referencia) a los COV/km de: (I) el trazo de campo segmentado a cada 500 metros, (II) el trazo del SIGET segmentado “punto a punto”, y (III) el trazo del SIGET segmentado a cada 500 metros. Para cada una de estas 3 series de diferencias, la Figura 4.4 presenta su respectiva acumulada de frecuencias relativas. En la figura es evidente que

el trazo de campo segmentado a cada 500 metros induce una diferencia o error máximo en el COV/km entre -0.7 y 0 pesos/km en el 70% de los casos, en relación con los COV/km del trazo de referencia. El mayor de los valores absolutos de los dos límites anteriores (0.7 pesos/km) representa el 5% del COV/km promedio para los 14 COV/km del trazo de referencia (13.91 pesos/km). Por su parte, el trazo del SIGET segmentado “punto a punto” induce un error máximo en el COV/km entre 0.5 y 2.8 pesos/km en el 70% de los casos. El mayor de los valores absolutos de los dos límites anteriores (2.8 pesos/km) representa el 20.1% del COV/km promedio para los 14 COV/km del trazo de referencia. Por último, el trazo del SIGET segmentado a cada 500 metros induce un error máximo en el COV/km entre -0.5 y 2.0 pesos/km en el 70% de los casos. El mayor de los valores absolutos de los dos límites anteriores (2.0 pesos/km) representa el 14.4% del COV/km promedio para los 14 COV/km del trazo de referencia.

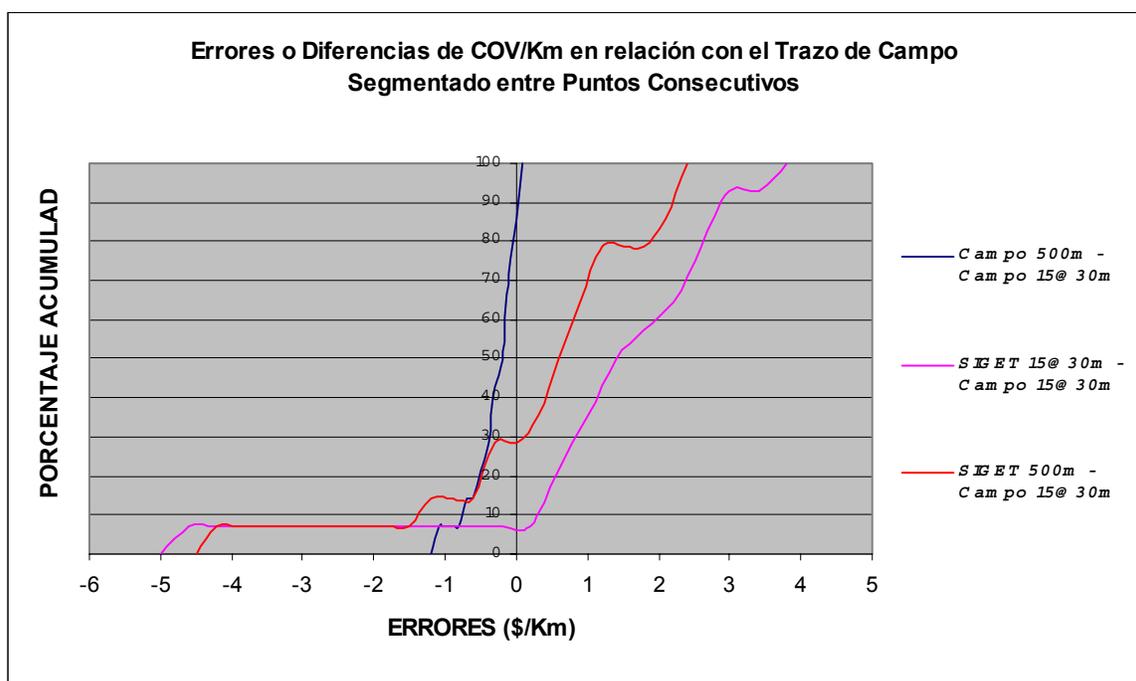


Figura 4.4 Errores de COV/km en relación con el trazo de campo segmentado entre puntos consecutivos

La Tabla 4.7 resume la media y desviación estándar de las diferencias o errores en COV/km inducidos por los 3 trazos considerados, en relación con el trazo de referencia. Los valores de sesgo o media en la Tabla 4.7 representan errores promedio de -2.2%, 8.8% y 2.2% para el trazo de campo segmentado a cada 500 metros, el trazo del SIGET segmentado

“punto a punto” y el trazo del SIGET segmentado a cada 500 metros, respectivamente.

Tabla 4.7 Valores de media y desviación estándar para las diferencias en COV/km en relación con el trazo de campo segmentado entre puntos consecutivos

	Campo 500m	SIGET 15-30	SIGET 500m
MEDIA	-0.31	1.23	0.31
DESV EST	0.35	2.01	1.74

4.4 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS

Los errores inducidos en la estimación de COV/km por la segmentación de 500 metros y el empleo del trazo del SIGET se consideran aceptables. Lo anterior valida el que, para el desarrollo del sistema que es objeto de este trabajo, pueda utilizarse una segmentación de 500 metros sobre el trazo del SIGET.

Aunque en este análisis en el que las secciones tienen una longitud promedio de 6.85 kilómetros, los errores máximos (en la estimación de COV/km) obtenidos para el trazo del SIGET segmentado “punto a punto” y el trazo del SIGET segmentado a cada 500 metros, en relación con el trazo de campo segmentado “punto a punto”, resultaron considerables (20.1 y 14.4% respectivamente, en el 70% de las veces), ellos se reducirían considerablemente en recorridos mucho mayores como los que generalmente se modelarán en el sistema que es objeto de este trabajo. Esto último se debe a que en recorridos más largos, la desviación estándar de los COV/km (que son valores promedio por sección o recorrido) se reduce y con ello también la de los errores.

Capítulo 5 Desarrollo del Sistema de Información Geográfica

La filosofía adoptada para el desarrollo del sistema, denominado desde un principio como SIGCOV MEX, es buscar que éste sea completamente operable en ArcView y su extensión para el análisis de redes (Network Analyst de ArcView), con el fin de lograr la máxima explotación posible de la información contenida en el mismo, así como de las potencialidades de esos dos programas computacionales.

5.1 GENERACIÓN DEL SISTEMA

5.1.1 IMPORTACIÓN DE TEMAS

El primer paso en la generación del SIGCOV MEX consistió en dar de alta en ArcView un proyecto que se designó “SIGCOV.apr” y crear en éste una vista denominada “Red Carretera”, en la que se vaciaron, desde el SIGET y el SIGA los siguientes temas (en ArcView, cada tema tiene asociado una base de datos o tabla de atributos):

- Red Federal. Es un tema de poligonales abiertas (polilíneas), en el que cada polilínea representa un tramo o arco carretero. Se obtuvo del SIGA. El archivo original incluye Autopistas Concesionadas y Carreteras Federales de Cuota y Libres. En el registro de cada polilínea (en la tabla de atributos de este tema) se define un sentido para ésta, a través de dos campos que contienen su nodo inicial (F_node) y su nodo final (T_node).
- Casetas. Es un tema de puntos, en el que cada punto representa una caseta de peaje. Se obtuvo del SIGET
- Cabeceras. Es un tema de puntos, en el que cada punto representa una ciudad importante o una cabecera municipal. Se obtuvo del SIGET.
- México. Es un tema de polígonos, en el que cada polígono corresponde a un estado de la República Mexicana. Se obtuvo del SIGET.
- Fronteras. Es un tema de polígonos, en el que cada polígono corresponde a un país que tiene frontera territorial con México (EUA, Guatemala y Belice). Se obtuvo de los CD's denominados “DATA & MAPS” [ESRI, 2001] de ArcView.

5.1.2 COMPLEMENTACIÓN Y CONTINUIDAD DE LA RED

Dado que el principal objetivo de este trabajo es lograr obtener COVs entre dos puntos (localidades) cualquiera que estén comunicados por la Red, fue de primordial importancia complementar la Red importada del SIGA (tema "Red Federal" en formato de ArcView), agregando a ésta, tramos urbanos y de jurisdicción estatal, esenciales para permitir la comunicación entre dos o más carreteras federales y dar continuidad a las mismas en los cruces por ciudades. Este proceso se efectuó manualmente, dando continuidad a los nuevos arcos con la Red importada. El tema de ArcView así complementado fue posteriormente transferido al SIG denominado ArcInfo [ESRI, 1991], el cual generó una intersección en todas las uniones y cruces entre arcos, culminándose con ello el proceso de dar continuidad a la Red.

5.1.3 SEGMENTACIÓN Y GENERACIÓN DE COORDENADAS X, Y y Z DE LOS NODOS INICIAL Y FINAL DE CADA SEGMENTO

Mediante comandos de ArcInfo, la Red (en el tema "Red Federal") se segmentó en elementos de 500 metros, resultando en un total de 106,747 segmentos, generándose también para cada uno de estos segmentos sus respectivos nodos inicial (F_node) y final (T_node). La segmentación de la Red Carretera en elementos de 500 metros, es la mayor discretización a la que se llegará en este trabajo, por lo tanto, ésta será la segmentación base sobre la que se calcularán los COVs. El cálculo de dichos COVs consistirá en la suma de los COVs de todos los segmentos de 500 metros involucrados en el trayecto entre dos o más puntos de interés. Será, por lo tanto, indispensable obtener el COV para cada uno de estos segmentos de 500 metros.

También mediante comandos de ArcInfo, en el tema "Red Federal" se incluyeron las coordenadas X y Y de los nodos inicial (F_node) y final (T_node) de cada segmento. Asimismo, como una aproximación de la coordenada Z de estos nodos, se importó la de su punto más cercano dentro del levantamiento georreferenciado del SIGET. Dado que en éste existe un punto levantado con GPS a cada 15-30 metros, siempre hay uno de ellos prácticamente sobre los nodos inicial y final de cada segmento de 500 metros (o a una distancia máxima de 15 metros en relación con esos nodos). Por lo tanto, tal aproximación genera estimados muy razonables de dicha coordenada Z.

El archivo de la Red segmentada y con coordenadas X, Y y Z de los nodos inicial y final de cada segmento, fue posteriormente exportado desde ArcInfo a un archivo de ArcView. Cabe señalar que, en este archivo, hay un sentido definido para cada segmento, a través de los dos campos que contienen su nodo inicial (F_node) y su nodo final (T_node).

5.1.4 DUPLICACIÓN DE LA RED PARA CONSIDERAR AMBOS SENTIDOS DE CIRCULACIÓN

Los 106,747 segmentos hasta aquí obtenidos (en el tema “Red Federal”) corresponden tan solo a un sentido de circulación de las carreteras, y para los fines de este trabajo resulta de vital importancia conocer el COV para ambos sentidos, ya que obviamente existen notables diferencias para un mismo trayecto, si el sentido de operación sobre el mismo es ascendente o descendente. Cabe mencionar que, de las variables que más influyen en el COV, existen algunas cuyos valores permanecen constantes sin importar el sentido de circulación considerado, tales como el tipo de superficie, número de carriles, IRI, altitud, curvatura, sobreelevación, etc. Sin embargo, existen otras que sí varían en función del sentido de circulación considerado, tal es el caso de las coordenadas iniciales y finales de cada segmento, de las cuales depende su pendiente. Cabe recordar que es la pendiente la variable que tiene mayor influencia sobre el COV, para un segmento carretero y un vehículo determinado.

La solución por la que se optó en este trabajo para considerar ambos sentidos de circulación de cada segmento, consistió en duplicar la Red Carretera (en el tema “Red Federal”) aprovechando que el Módulo de Redes de ArcView [ESRI, 1996] identifica, para cada arco, su sentido de circulación solo con indicarle cuál de sus extremos será considerado como el punto de inicio. Por lo tanto, debe agregarse a la tabla de atributos del tema “Red Federal”, un nuevo campo denominado “ONEWAY”. En éste, se ingresarán, para cada segmento, los caracteres “FT” (From node To node) o “TF” (To node From node). Si en dicho campo se ingresa “FT”, el Módulo de Redes de ArcView considerará que el sentido de circulación del segmento va de “F_node” (nodo inicial del segmento) hacia “T_node” (nodo final del segmento); y viceversa si en dicho campo se ingresa “TF”. Así, se procedió a duplicar la Red Carretera y a agregar a la tabla de atributos, el campo “ONEWAY”. Posteriormente, en este campo se ingresaron los caracteres “FT” a los 106,747 segmentos originales, y “TF” a los segmentos adicionales.

5.1.5 DATOS INGRESADOS PARA LOS SEGMENTOS

Considerando los cambios anteriores, el tema “Red Federal” quedó ahora compuesto por 213,494 segmentos. Como requisito para la determinación de los COVs en estos segmentos, es necesario ingresar en campos de la tabla de atributos del tema “Red Federal” una serie de características para los mismos. De manera similar que para los análisis de determinación de COVs en el capítulo anterior, en este capítulo algunas de dichas características se ingresan manualmente, en tanto que otras se generan automatizadamente a través de procesos. Enseguida se describe lo correspondiente a uno y otro caso.

5.1.5.1 *Ingresados manualmente*

Tipo de superficie. En un campo denominado “Pavim”, se ingresó el valor de 1 para todos los segmentos, pues toda la Red considerada en este trabajo es pavimentada.

Rugosidad promedio. En un campo denominado “Irifin”, se ingresó el IRI correspondiente al año 2000 para cada segmento, obtenido a partir de mediciones realizadas por la DGST durante ese año [DGST, 2000a].

Número efectivo de carriles. En un campo denominado “Nocarriles”, se ingresó 0 para todos los segmentos, ya que 1 corresponde a un caso especial implementado para caminos estrechos en los que sólo cabe un vehículo a lo ancho.

Altitud promedio del terreno. En un campo denominado “Altitud”, se ingresó la altitud promedio del terreno para cada segmento, calculada como el promedio de la coordenada Z de los nodos inicial y final de cada segmento.

Velocidad deseada. Se ingresó el valor de 110 km/hr, que corresponde al límite máximo general de velocidad establecido para la Red Carretera Federal [LCAF y RPFC, 1998]. De manera similar a lo mencionado en el capítulo anterior, a partir de esta velocidad el SIGCOV MEX calcula la velocidad de operación (VO), ya considerando las restricciones pertinentes.

Nivel de servicio. En un campo denominado “S”, se ingresó el Nivel de Servicio para cada segmento, obtenido a partir de la DGST [DGST, 2000b].

Cuotas en los segmentos de autopista. Para los segmentos sobre los cuales geográficamente están ubicadas casetas de cuota, se ingresaron, en una serie de campos denominados “A”, “B2”, “B3”, “B4”, “C2”, “C3”, “C4”, “C5”, “C6”, “C7”, “C8” y “C9”, los peajes cobrados, respectivamente, a las siguientes configuraciones vehiculares: automóvil, pick-up, panel y motocicleta (A), autobuses de 2, 3 y 4 ejes (B2, B3 y B4), camiones unitarios de carga de 2 y 3 ejes (C2 y C3) y tractocamiones articulados de 4 a 9 ejes (p ej, T2S2 a T3S2R4). Las cuotas ingresadas corresponden a diciembre de 2001 y fueron obtenidas a partir de CAPUFE [CAPUFE, 2001] y de la Unidad de Autopistas de Cuota de la SCT [SCT, 2001]. Si en cualquier momento de uso del sistema se desea actualizar las cuotas anteriores, los sitios donde son cobradas deberán ser identificados primero mediante las herramientas de consulta de ArcView (“Query”), solicitándole al sistema seleccionar los segmentos cuya cuota sea diferente de cero, procediéndose a reemplazar manualmente los valores requeridos.

5.1.5.2 *Generados a través de procesos de cómputo*

Esta sección se refiere específicamente al cálculo de pendiente, sobreelevación, curvatura y COV para cada segmento. Las herramientas computacionales que se utilizan son similares a las empleadas en el capítulo anterior con el mismo fin. La Figura 5.1 muestra el juego de botones que activan los programas o “scripts” utilizados en este caso.

El botón  cumple la misma función indicada en el Capítulo IV (colocar en forma “editable” o “no editable” la tabla de atributos del tema seleccionado). Cabe señalar que a diferencia de la barra de botones de la Figura 4.2 (en el Capítulo IV), la mostrada en la Figura 5.1 no incluye el botón que calcula la curvatura para segmentos rectos entre puntos consecutivos, ya que para la segmentación de 500 metros este cálculo no es necesario.

La aplicación de los últimos 4 botones genera, primero, los campos necesarios para la estimación y almacenamiento de la variable a calcular.

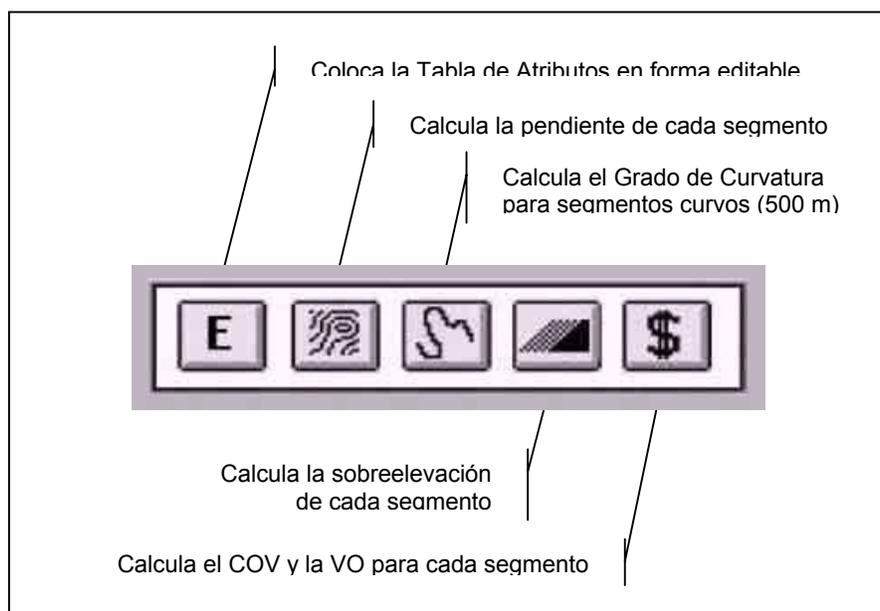


Figura 5.1 Barra de botones

Cálculo de la pendiente. Para los 213,494 segmentos, se calculó su pendiente considerando el sentido de circulación de cada segmento. El cálculo de la pendiente se realizó mediante uno de los “scripts” a los que se hizo referencia en el capítulo anterior. Sin embargo, al “script” que se utilizó en ese capítulo fue necesario hacerle algunas modificaciones con la finalidad de que pudiera distinguir entre ambos sentidos de circulación de cada segmento. Lo anterior se logró agregándole, en su parte inicial, unas líneas de comandos que le permitiesen identificar primeramente el valor del campo “ONEWAY” (“FT” o “TF”), para determinar en función de este valor qué nodo debería ser considerado como inicial y cuál como final. La Tabla 5.1 describe de manera más clara los criterios empleados con este propósito. En aquellos segmentos en los que el primer criterio de la Tabla 5.1 resultó aplicable, su pendiente se calculó mediante la Ecuación 4.2 (en la Sección IV.2.4.2) y el valor resultante se ingresó directamente en el campo “PENDIENTE”. En los segmentos en los que el segundo criterio resultó aplicable, su pendiente se calculó mediante la misma ecuación, pero el valor que se ingresó en el campo “PENDIENTE” fue el negativo de ese valor.

Tabla 5.1 Identificación del sentido de circulación para cada carretera

Campo "ONEWAY"	Nodo Inicial	Nodo Final
FT	Campo F_node ¹	Campo T_node ¹
TF	Campo T_node ¹	Campo F_node ¹

¹ Estos campos contienen valores numéricos que identifican los nodos inicial y final de cada segmento.

El botón  en la Figura 5.1 activa el "script" que calcula la pendiente para todos los segmentos, considerando su sentido de circulación (en función del valor del campo "ONEWAY").

Cálculo de curvatura y sobreelevación. Para cada segmento, la curvatura y la sobreelevación fueron calculadas de acuerdo con los principios y procedimientos ("scripts" y botones) descritos en el capítulo anterior. Los valores calculados para estas variables fueron ingresados en los campos "CURV" y "SOBREELEV", respectivamente.

Los botones  y  activan los "scripts" que calculan la curvatura y la sobreelevación, respectivamente, para todos los segmentos.

Cálculo de COVs. Para los 213,494 segmentos de 500 metros contenidos en la tabla de atributos del tema "Red Federal", el botón  permitió calcular el COV (en pesos mexicanos) y la VO (en km/hr) en el sentido de circulación de cada uno de ellos. Tanto la VO como el COV calculados son los valores afectados por los factores que restringen a la velocidad deseada (nivel de servicio, pendiente, etc). La forma como el SIGCOV MEX considera el efecto del nivel de servicio ya fue descrita en el capítulo anterior (Ecuación 4.1).

El botón anterior activa un "script" generado a partir de su similar descrito en el Capítulo IV, como resultado de haber adicionado a este último algunas líneas de código para enriquecerlo y hacerlo más completo y amigable hacia el usuario. Dentro de estas mejoras se encuentra la posibilidad de elegir entre diferentes configuraciones vehiculares. De hecho, en este "script" mejorado, al oprimir el botón  inmediatamente aparece el cuadro de diálogo mostrado en la Figura 5.2, en el cual se selecciona el vehículo deseado. Una vez efectuado lo anterior, el "script" procede a leer un conjunto de datos de costo unitario (combustibles, lubricantes, llantas, etc), utilización vehicular (kilómetros recorridos y horas de operación por año, vida útil, etc) y comportamiento (tara, carga útil, potencia máxima en operación y frenado, área frontal proyectada, número de llantas, etc) para

dicho vehículo, a partir de unas tablas del proyecto en donde se almacenan valores definidos por omisión para todos esos datos.

Asimismo, si el vehículo elegido fue un camión articulado de carga, aparece el cuadro de diálogo mostrado en la Figura 5.3, en el que debe ingresarse un conjunto de características específicas para ese vehículo (descripción del vehículo, precio, tara, carga útil y número de ejes). Ya sea que se cambien o no algunos de los valores que se ofrecen por omisión en este cuadro, al oprimir "OK" el "script" procederá a leer los demás datos del vehículo a partir de las tablas antes mencionadas.

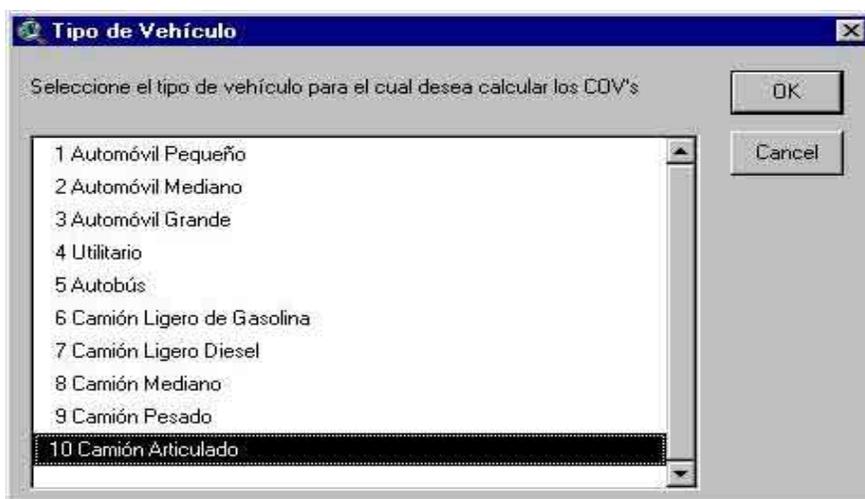


Figura 5.2 Selección del tipo de vehículo

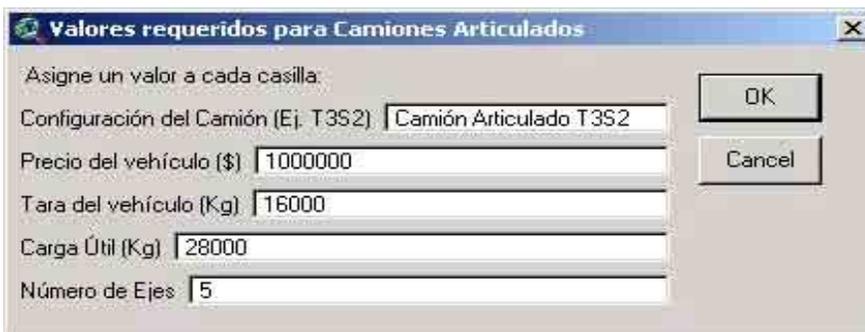


Figura 5.3 Cuadro de inserción de datos para cada configuración específica de vehículo articulado

Ya sea que el proceso provenga del cuadro de diálogo en la Figura 5.2 o del de la Figura 5.3, el “script” calculará posteriormente los COVs y VOs correspondientes para todos los segmentos (o sólo aquellos seleccionados, si éste fuese el caso). Obviamente, previo al cálculo de los valores anteriores, el “script” generará los campos necesarios en la tabla de atributos para almacenar esos valores. La denominación de dichos campos incluirá el nombre del tipo de vehículo seleccionado en el cuadro de diálogo de la Figura 5.2 o de la Figura 5.3 en el caso del camión articulado, más el prefijo “Cov”, “Vo” y “Covseg”. Lo anterior significa que en realidad también se genera un tercer campo (con prefijo “Covseg”), en el que se almacena el COV del segmento más su peaje, si éste fuese el caso.

Como parte del sistema de cálculo de COVs, también se generó un menú (denominado “COV”) dentro de la barra de menús de ArcView (Figura 5.4), que proporciona, para un vehículo determinado, las alternativas en submenú de: (I) actualizar sus costos unitarios, (II) actualizar sus datos de utilización, (III) modificar sus datos de comportamiento, (IV) restablecer los datos de comportamiento a una serie de valores predeterminados (por “default” u omisión) y (V) seleccionar las variables (IRI, Nivel de Servicio y Cuotas en Autopistas) que deseen incluirse o no en el análisis de COVs. La Figura 5.4 ilustra los cinco submenús de este nuevo menú. Al seleccionar cualquiera de las primeras tres alternativas se activa un “script”, generado para el propósito correspondiente, que inmediatamente despliega un cuadro de diálogo similar al de la Figura 5.2 para seleccionar el vehículo deseado. Una vez elegido éste, se despliega otro cuadro de diálogo con los datos actuales, sobre los cuales pueden hacerse las modificaciones requeridas. A manera de ejemplo, la Figura 5.5 muestra el cuadro de diálogo correspondiente al submenú “Costos Unitarios”.

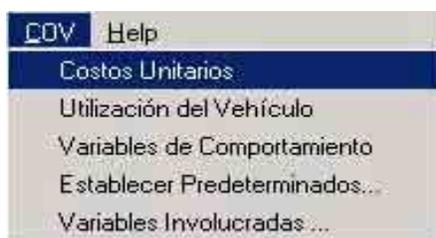


Figura 5.4 Menú de actualización de datos vehiculares

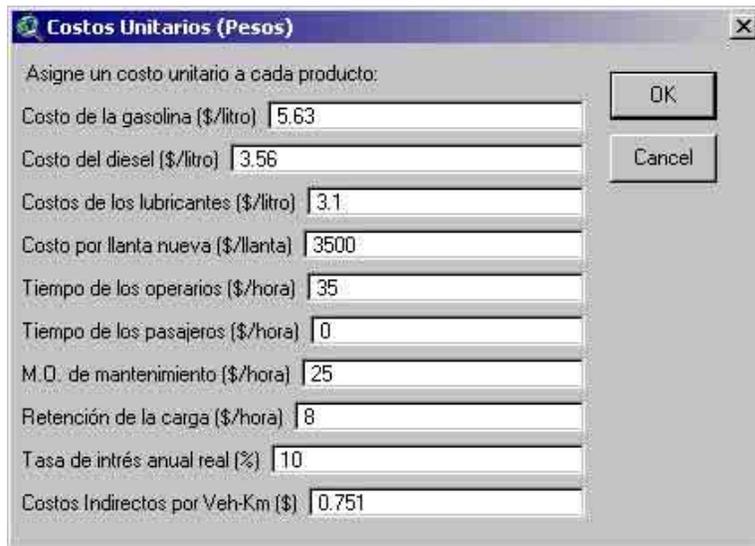


Figura 5.5 Submenú de actualización de costos unitarios

Asimismo, la Figura 5.6 ilustra el cuadro de diálogo que se activa al seleccionar el submenú “Variables Involucradas...”, cuyo propósito se describe más adelante.

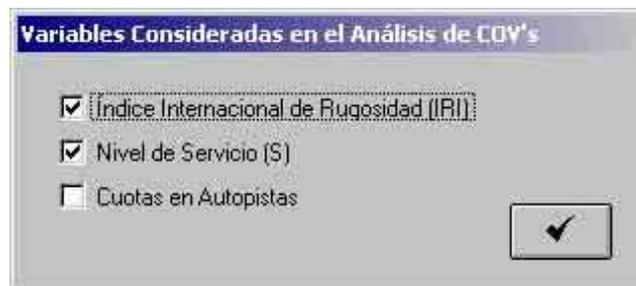


Figura 5.6 Submenú de actualización de las variables involucradas en el análisis

Finalmente, la Figura 5.7 muestra una vista del SIGCOV MEX, que ejemplifica visualmente el contenido del mismo.

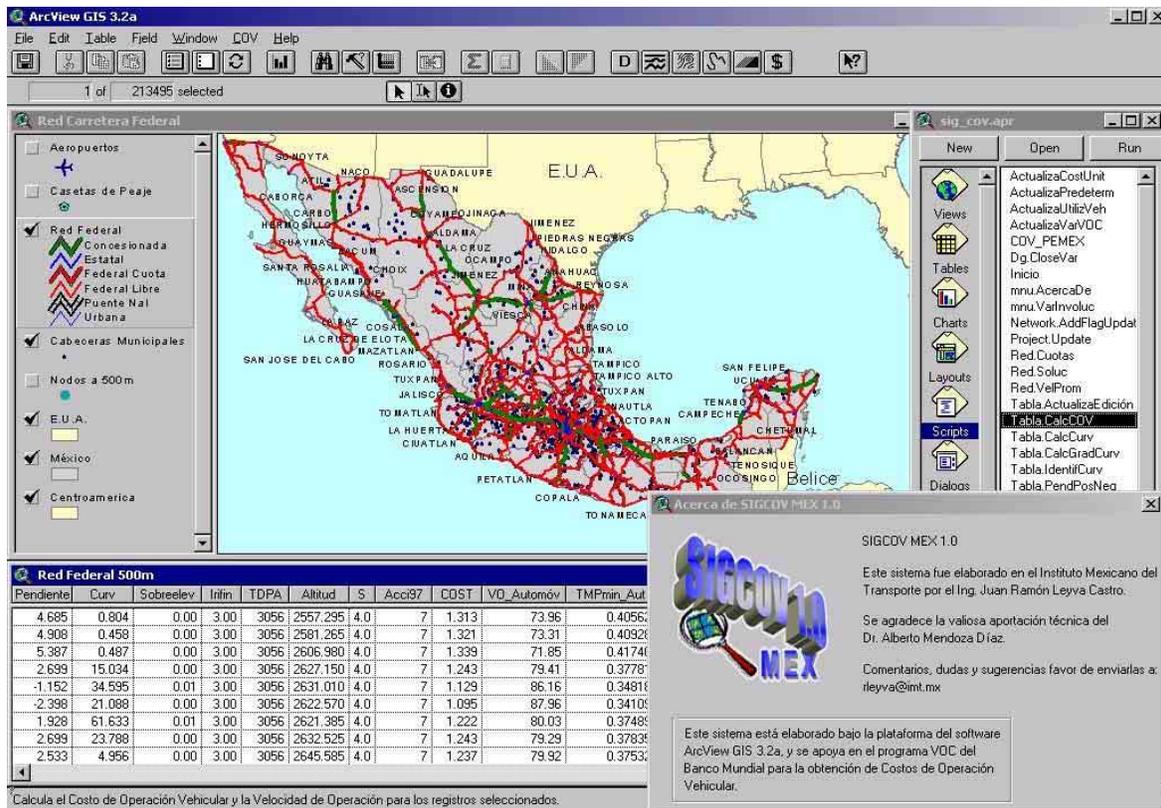


Figura 5.7 Vista general del SIGCOV MEX

5.2 ALGUNAS APLICACIONES

El SIGCOV MEX puede tener diversas aplicaciones. Cabe señalar que, en función del tipo de aplicación de que se trate, algunas de las variables de entrada del sistema deberán definirse de manera distinta, utilizando el criterio y experiencia del analista. Por ejemplo, si se tratase de definir la mejor ruta para un vehículo, habría que considerar las condiciones reales de los caminos en términos de IRI, nivel de servicio, cuotas de autopistas, etc; en cambio, si se tratase de identificar el mejor corredor a modernizar entre dos puntos, no habría que considerar el efecto temporal y diferenciado entre alternativas de algunas de las variables anteriores (p ej, el IRI), ya que éstas se mejorarían con la obra de modernización. La finalidad de esto último sería que la comparación entre alternativas se estableciese en igualdad de circunstancias en lo que respecta a esos parámetros temporales. La posibilidad de incluir o no las variables anteriores, se controla mediante la quinta alternativa del menú mostrado en la Figura 5.4 (“Variables Involucradas...”). Inmediatamente después de seleccionar esta alternativa el sistema permite incluir o excluir el IRI, el nivel de servicio y las cuotas en autopistas, en la estimación de COVs (Figura 5.6). Cabe aclarar que el hecho de excluir una variable no significa que el sistema no la

considere, sino que la fija a niveles tan adecuados (IRI = 2, S = 5 y Cuotas = 0) que prácticamente no genera efectos diferenciales en la estimación de COVs entre segmentos.

Algunas de las aplicaciones del SIGCOV MEX que pueden contemplarse, son:

- 2) En primera instancia, permitir la consulta y el despliegue cartográfico y tabular de los distintos tipos de información contenidos, tanto para recorridos completos como para ciertos tramos o segmentos específicos de interés. Como ya se mencionó, los distintos tipos de datos incluidos para cada tramo o segmento, son: pendiente, curvatura, sobreelevación, IRI, tránsito diario promedio anual (TDPA), cuotas en autopista, velocidades de operación y COVs estimados. A manera de ejemplo se presenta la Tabla 5.2, la cual muestra para cada Entidad Federativa los siguientes datos calculados a partir del SIGCOV MEX: (I) número de segmentos de 500 metros (en ambos sentidos de circulación) incluidos en la modelación, (II) curvatura promedio en grados de deflexión por kilómetro ($^{\circ}/\text{km}$), (III) IRI promedio en metros por kilómetro (m/km) y (IV) longitud carretera modelada (en ambos sentidos).

Tabla 5.2 Algunos datos de la red modelada por Entidad Federativa

ESTADO	Segmentos	Curvatura Prom. (°/km)	IRI Prom. (m/km)	Longitud (km)
AGS	827	20.7388	4.22	404.802
BCN	3694	20.4401	5.02	1,832.773
BCS	2828	18.9442	4.21	1,406.333
CAM	2723	13.5779	3.93	1,348.066
CHI	5668	18.9602	4.53	2,816.241
CHS	3914	43.2199	3.71	1,942.572
COH	4133	10.8295	3.52	2,047.289
COL	906	32.0625	3.79	444.109
D F	988	26.7535	5.11	474.466
DGO	4703	23.1104	3.22	2,330.065
GRO	4800	53.4289	5.11	2,383.695
GTO	3177	18.3670	3.37	1,561.635
HGO	2180	53.9870	5.42	1,071.964
JAL	6385	28.3918	4.24	3,164.615
MEX	3430	43.8765	4.61	1,676.460
MIC	5813	43.5690	4.59	2,873.792
MOR	1062	37.2688	3.22	517.762
N L	3480	10.1295	4.79	1,724.427
NAY	1873	34.4577	4.49	924.156
OAX	6112	58.8238	5.60	3,035.704
PUE	3080	35.2205	3.55	1,517.012
Q R	2680	7.7897	3.49	1,330.205
QRO	1132	42.0511	4.30	558.801
SIN	2616	16.2550	3.90	1,294.455
SLP	3601	27.0956	4.65	1,784.350
SON	4864	19.8025	3.90	2,421.088
TAB	1367	16.4169	5.44	677.293
TLX	1383	33.7794	3.03	665.929
TMS	4830	15.1286	5.18	2,393.615
VER	6534	26.3019	4.34	3,232.856
YUC	2863	8.4993	2.83	1,415.257
ZAC	3101	17.7409	5.99	1,535.682

En la tabla anterior es evidente que el estado con mayor longitud de red modelada es Veracruz con 3,233 km, seguido por Jalisco con 3,165 km y Oaxaca con 3,036 km. Asimismo, los estados con carreteras más sinuosas (mayor valor de deflexión por kilómetro) en promedio son Oaxaca (58.8 °/km), Hidalgo (54 °/km) y Guerrero (53.4 °/km). Finalmente, los estados con carreteras en peor estado (mayor IRI) en promedio son Zacatecas (5.99 m/km), Oaxaca (5.60 m/km) y Tabasco (5.44 m/km).

3) Determinar COVs, cuotas y tiempos de recorrido, entre otros, a lo largo de ciertas rutas específicas, con fines de planeación del autotransporte para propósitos de logística empresarial. Por ejemplo, la empresa Ford produce chasises en Monterrey, NL, de donde los transporta en la modalidad “justo a tiempo”, para surtir su proceso de armado de vehículos en la planta de Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Utilizando el SIGCOV MEX, se obtiene que la ruta de menor COV para el movimiento anterior es a través de Saltillo (utilizando el libramiento), Matehuala, San Luis Potosí (utilizando el libramiento) y Querétaro (utilizando el libramiento), como se ilustra en la Figura 5.8 obtenida del sistema. Asimismo, el COV total del recorrido para un tractocamión articulado tipo T3S2 a plena carga por esa ruta es de \$13,416. Del COV anterior, \$630 corresponden al pago de peajes en autopistas. El tiempo total de recorrido es de 19.5 horas, lo cual significa que si un flete de chasises se requiere en Cuautitlán a las 8:00 horas, deberá salir de Monterrey a más tardar a las 12:30 horas del día anterior, considerando que no se presentase ningún imprevisto. Obviamente, los imprevistos deben siempre ser considerados por el operador logístico para evitar cualquier eventualidad que detenga la línea de producción.

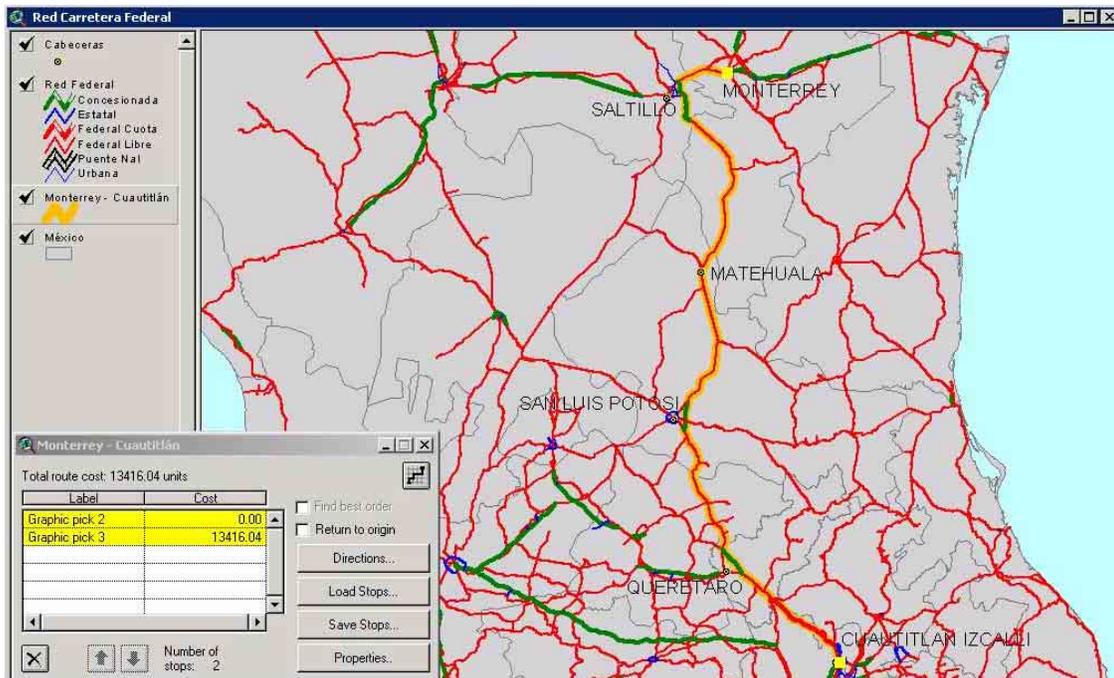


Figura 5.8 Ruta de menor COV entre Monterrey, NL y Cuautitlán Izcalli, Estado de México

- 4) Determinar el recorrido más corto o de menor costo entre dos o más sitios de la red, ya sea que se respete una cierta secuencia preestablecida de visita de los mismos o que se deje que el SIGCOV MEX elija dicha secuencia atendiendo al objetivo de minimizar distancias, costos o cualquier otro parámetro relacionado con el nivel de servicio. Puede darse la alternativa de que el recorrido regrese o no a su mismo lugar de origen. Esta aplicación normalmente se conoce como “ruteo vehicular” y tiene que ver con la planeación de la operación de flotillas vehiculares de autotransporte. A manera de ejemplo, considérese el caso de una empresa de autotransporte de Yucatán que es contratada para llevar un cargamento de 28 ton de Ixtle desde Mérida hasta Matamoros, Tamaulipas, y que consigue llevar de regreso un cargamento de insumos agrícolas, desde Nuevo Laredo, Tamaulipas, hasta la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Si el vehículo asignado a los dos viajes anteriores (ida y vuelta) es un T3S2 y debe regresar a su sitio original de partida (Mérida, Yucatán), se desea conocer el mejor circuito de recorrido global, así como el COV correspondiente. La Tabla 5.3 presenta los diferentes tramos que constituyen el circuito óptimo obtenido con el sistema, la condición de carga del vehículo en cada tramo, así como sus cuotas y COVs correspondientes. Asimismo, en la Figura 5.9 se ilustra el circuito generado, para el cual se obtiene un COV total de \$65,815. En esta figura se muestran en color naranja los tramos del circuito en los que el vehículo va a plena carga y en color verde en los que va vacío.

Tabla 5.3 Descripción del circuito óptimo y sus COVs

VIAJE	CONDICIÓN DE CARGA	DESCRIPCIÓN	TIPO DE CARRETERA	COV
MÉRIDA-MATAMOROS	Plena carga (carga útil de 28 Ton)	Mérida – Campeche	Libre	\$27,641
		Campeche – Champotón	Cuota	
		Champotón – Cd. del Carmen	Libre	
		Pte. Cd. del Carmen	Cuota	
		Pte. Cd. del Carmen - Villahermosa	Libre	
		Villahermosa – Minatitlán	Cuota	
		Minatitlán – Alvarado – T. Der. Veracruz	Libre	
		T. Der. Veracruz – Cardel	Cuota	
		Cardel – Gtz. Zamora – Poza Rica	Libre	
		Poza Rica – T. Tampico	Libre	
		Libramiento Tampico (T. Tampico – Miramar)	Cuota	
		Miramar – Soto la Marina – San Fernando – Matamoros	Libre	
MATAMOROS-NVO. LAREDO	Vacío	Matamoros – Reynosa	Cuota	\$3,580
		Reynosa – Nvo. Laredo	Libre	
NVO. LAREDO-TUXTLA GTZ.	Plena carga (carga útil de 28 Ton)	Nvo. Laredo – Reynosa	Libre	\$25,785
		Reynosa – San Fernando – Soto la Marina – Miramar	Libre	
		Libramiento Tampico (Miramar – T. Tampico)	Cuota	
		T. Tampico – Poza Rica	Libre	
		Poza Rica – Gtz. Zamora – Cardel	Libre	
		Cardel – T. Der. Veracruz	Cuota	
		T. Der. Veracruz – La Tinaja – Acayucan	Cuota	
		Acayucan – Minatitlán	Libre	
		Minatitlán – Cárdenas	Cuota	
		Cárdenas – Malpaso	Libre	
Malpaso – Tuxtla Gtz.	Cuota			
TUXTLA GTZ. - MÉRIDA	Vacío	Tuxtla Gtz. – Malpaso	Cuota	\$8,809
		Malpaso – Cárdenas	Libre	
		Cárdenas – Villahermosa	Libre	
		Villahermosa – Pte. Cd. del Carmen	Libre	
		Pte. Cd. del Carmen	Cuota	
		Cd. del Carmen - Champotón	Libre	
		Champotón – Campeche	Cuota	
		Campeche – Mérida	Libre	
TOTALES				\$65,815



Figura 5.9 Circuito de menor COV Mérida-Matamoros - Nvo. Laredo - Tuxtla Gtz. - Mérida

- 5) Identificar y evaluar obras de mejoramiento de la infraestructura de la red, tales como nuevas carreteras a construir, corredores a modernizar, etc. Por ejemplo, uno de los pares origen-destino (O-D) que mayor flujo de carga registra, según el Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional [Gutiérrez y Mendoza, 2001], es el Irapuato-Cd. Juárez con alrededor de 2,500 vehículos C3 equivalentes (con tara y carga útil iguales a 8.5 y 10.5 ton, respectivamente) por día en cada sentido. Bajo las condiciones actuales de la infraestructura, el COV diario de ese flujo en ambos sentidos por la ruta de menor COV sin considerar peajes en los tramos que son de cuota (indicada con color naranja en la Figura 5.10), se estima mediante el SIGCOV MEX en \$65.7 millones por día (a partir de un COV por viaje de \$13,083 para el sentido Irapuato-Cd. Juárez y de \$13,193 para el opuesto). Adicionalmente, en el viaje de un C3 en la dirección Irapuato-Cd. Juárez (de 1,522 km de longitud), éste pagaría \$1,118 por concepto de cuotas correspondientes a 656 km viajados en carreteras de cuota (43.1% del recorrido). En el otro sentido (de 1,524 km de longitud), pagaría \$1,048 por concepto de cuotas, correspondientes a 636 km viajados en carreteras de cuota (41.7% del recorrido). A partir de las cuotas por vehículo y sentido anteriores, se obtiene un monto adicional para los 5,000 vehículos diarios en ambos

sentidos por concepto de cuotas, de \$5.4 millones. La suma de este monto más el COV diario global, da un monto económico total de \$71.1 millones.

Si todo el corredor con color naranja en la Figura 5.10 se uniformizara a las propiedades de IRI y S óptimas (2 y 5, respectivamente), básicamente mediante la modernización de la fracción que no es de cuota actualmente (58% de la longitud del corredor aproximadamente), siguiendo los mismos principios de cálculo utilizados anteriormente, se obtendría un COV diario para el flujo de carga en ambas direcciones de \$57.3 millones. Por otra parte, si el esquema de cobro de peajes se extendiese a todo el corredor (y no sólo al 42% como es actualmente), el monto diario por concepto de peajes para el flujo en ambas direcciones sería de \$12.8 millones. Este valor más el COV diario global, da un monto económico total de \$70.1 millones para este escenario.



Figura 5.10 Ruta de menor COV (sin considerar peajes) entre Irapuato y Cd. Juárez (ambos sentidos)

Con la intención de mostrar un panorama comparativo entre el escenario actual y otro correspondiente al corredor modernizado, se muestra la Tabla 5.4, la cual presenta los valores anualizados de COV global,

cuotas cobradas y monto económico total para ambos sentidos, en ambos escenarios.

Tabla 5.4 Comparación de montos anuales para ambos escenarios considerados

ESCENARIO	MONTOS ANUALES (Millones de \$)	
SITUACIÓN ACTUAL	COV GLOBAL	23,980.5
	CUOTAS	1,971.0
	MONTO TOTAL	25,951.5
CORREDOR MODERNIZADO	COV GLOBAL	20,914.5
	CUOTAS	4,672.0
	MONTO TOTAL	25,586.5

Los valores en la tabla anterior proporcionan elementos numéricos importantes para la evaluación económica y financiera de las obras requeridas para la modernización y operación del corredor, en el horizonte de análisis. En la evaluación económica, asumiendo una perspectiva social que privilegie el interés público, el flujo de beneficios anuales a considerar, antes de ser descontados, sería la diferencia entre los COVs globales de ambos escenarios (\$3,066 millones anuales), afectado por un factor anual por concepto de crecimiento de tránsito y tránsito adicional generado en el escenario modernizado. El flujo de beneficios así obtenido tendría que ser comparado con el flujo anual de costos descontados adicionales (en relación con la alternativa de no modernizar el corredor), por obra (inicial), conservación, etc. En la perspectiva social asumida, los peajes cobrados en carreteras de cuota no se consideran costos, sino más bien transferencias de recursos económicos entre grupos nacionales internos (de los usuarios a los operadores de las carreteras de cuota). Por otra parte, la diferencia de cuotas cobradas entre ambos escenarios (\$2,701 millones anuales), es un elemento fundamental a considerar en la evaluación financiera de las obras de modernización y operación, en el horizonte de análisis. Cabe destacar que el monto económico total del escenario correspondiente al corredor modernizado es ligeramente menor al del escenario actual, lo cual significa que la reducción de COVs derivada de la modernización del corredor es ligeramente mayor que el incremento de cuotas totales cobradas, dejando aún un pequeño margen de beneficio para el usuario.

- 6) Estimar datos macroeconómicos del autotransporte que circula por la red modelada, tales como veh-km recorridos, ton-km transportadas, COV

total así como la proporción que éste representa de la actividad económica nacional (producto interno bruto, PIB). Por ejemplo, incorporando al SIGCOV MEX la información de la S.C.T. para 1998 [DGST, 1996-2000] sobre aforos y composición vehicular por tramos, fue posible obtener que por la red modelada se recorrieron para ese año 85 mil millones de veh-km, de los cuales 74.8% corresponden a los automóviles, 6.1% a los autobuses de pasajeros y 19.1% a los camiones de carga. Asimismo, se obtiene un COV total por la red modelada del orden de \$400 mil millones (cerca del 8% del PIB), de los cuales 62.5% corresponden a los automóviles, 11.2% a los autobuses y 26.3% a los camiones de carga. Este último porcentaje corresponde a un COV anual de cerca de \$105 mil millones. También se obtiene que por esa red se movieron alrededor de 270 mil millones de ton-km en ese año. Si se dividen los \$105 mil millones correspondientes al COV anual de los camiones de carga entre 270 mil millones de ton-km, se obtiene un COV promedio de \$0.39/ton-km.

- 7) En combinación con otros tipos de costos no considerados en este trabajo (externalidades), tales como costos por accidentes viales, realizar análisis comparativos de costos entre autopistas de cuota y sus alternativas libres de recorrido. Lo anterior, con el fin de orientar el establecimiento de políticas tarifarias adecuadas para carreteras de cuota. Por ejemplo, un flete común de carga que a lo largo de su trayecto toca la Ciudad de Los Mochis y el Puerto de Mazatlán es el que se realiza en configuraciones T3-S2-S2 (“madrinas”), que mueven 13 vehículos ligeros sin rodar. Cada “madrina” de ese tipo tiene 7 ejes con un total de 26 llantas y un Peso Bruto Vehicular (PBV) de 30 toneladas a plena carga. Se desea determinar, para esta condición de carga, qué cuota máxima podría cobrarse a través de la alternativa existente de cuota en este tramo (Las Brisas – Mazatlán), mediante un análisis comparativo que considerase COV, así como valor monetario del tiempo de viaje, de la puntualidad y la seguridad vial, entre la autopista de cuota y su alternativa libre por carreteras federales. La Figura 5.11, obtenida del SIGCOV MEX, ilustra las alternativas libre y de cuota a considerar.



Figura 5.11 Alternativas libre y de cuota a considerar de Las Brisas a Mazatlán

La Tabla 5.5 muestra el proceso de cálculo de costos para los diferentes rubros, en las dos alternativas consideradas. En todos los cálculos de COVs efectuados para este análisis, se ingresó una velocidad deseada de 100 km/hr.

Para cada alternativa, la Tabla 5.5 presenta una columna que muestra algunos datos que son insumos en el cálculo de los respectivos costos, mostrados en la columna inmediata. El primer renglón presenta para ambas alternativas, en la columna de datos, los siguientes aspectos relevantes: longitud de cada alternativa en kilómetros, TDPA (aparece el total y los porcentajes del mismo correspondientes a cada configuración vehicular A, B y C) y veh-km recorridos diariamente. El segundo renglón presenta, en la columna de datos, la velocidad de operación calculada con el SIGCOV MEX de Las Brisas a Mazatlán, a través de ambas alternativas. El tercer renglón muestra, en la columna de costos, los COVs correspondientes a las VO anteriores. El cuarto renglón presenta la cuota cobrada actualmente en la alternativa de cuota, a una “madrina” de 7 ejes; nótese que en la alternativa libre la cuota no es cero, como habría de esperarse, sino que también se efectúa un cargo por uso de la infraestructura, que para el vehículo considerado es de \$90. El quinto renglón presenta, en la columna de datos, las medias del tiempo de

recorrido para las dos alternativas comparadas, obtenidas a partir de la longitud y las VOs antes mostradas; en la columna de costos se presentan los costos de oportunidad de los vehículos transportados en la “madrina” mientras se encuentran en el trayecto (asumiendo que los trece vehículos tienen un valor de alrededor de 2 millones de pesos y una tasa real de interés de 3%). El sexto renglón presenta, en la columna de datos, la desviación estándar asumida para el tiempo de recorrido en ambas alternativas; en la columna de costos se muestra el valor estimado del costo adicional en que se incurre por enviar el vehículo con anticipación para evitar retrasos en la entrega (asumiendo: una distribución normal para el tiempo de recorrido, con la media y desviación estándar señalados; que la diferencia entre el tiempo del 99% en esa distribución y la media del tiempo de recorrido [tiempo del 50% en esa distribución] es el tiempo de anticipación con que se envía el vehículo [para evitar retrasos en el 99% de los fletes]; y que dicho tiempo de anticipación, que el vehículo puede pasar esperando u operando, tiene un costo promedio de \$5 por minuto, es decir, una tercera parte del costo del tiempo en operación [\$4,758/329.78 minutos o \$4,156.62/277.34 minutos, según datos en la Tabla 5.5]).

Tabla 5.5 Comparación de costos por rubros para ambos escenarios considerados

CONCEPTO		FACTOR DE POND.	ALTERNATIVA LIBRE		ALTERNATIVA DE CUOTA	
			DATOS	COSTO (\$)	DATOS	COSTO (\$)
LONGITUD		---	335.30 km	---	322.8 km	---
TDPA			5,975	---	2,313	---
% A			64.3%	---	54.9%	---
% B			8.9%	---	15.1%	---
% C			26.8%	---	30.0%	---
VEH-KM/DÍA			2'003,417	---	746,636	---
VO		---	60.95 km/hr	---	69.87 km/hr	---
COV		1.00	---	4,758.77	---	4,156.62
CUOTA		1.5	---	90.00	---	439.00
TIEMPO DE VIAJE	MEDIA	1.00	329.78 minutos	37.65	277.34 minutos	31.66
	DESV. EST.	2.25	33 minutos	386.10	14 minutos	163.80
ACCIDENTES		2.00	430 Accident/Año	12.97	250 Accident/Año	7.54
TOTAL				4,825.01		4,654.06

En el séptimo renglón se presenta, en la columna de datos, el número de accidentes registrados en 1998 en ambas alternativas; en la columna de

costos muestra el costo esperado por accidentes al realizarse el viaje (obtenido a partir de la frecuencia de accidentes, la longitud del tramo, los veh-km recorridos, así como de asumir un costo promedio por accidente de \$25,000 según Chavarría, Mendoza y Mayoral [1996]). En el último renglón se presentan los costos totales actuales estimados para ambas alternativas (incluyendo la cuota actual). La segunda columna de la tabla muestra un conjunto de coeficientes de ponderación de los distintos tipos de costos, en las preferencias de los usuarios, obtenidos a partir de Rico, Mendoza y Rivera [1999], asumiendo una función de utilidad del tipo siguiente para cualquiera de las alternativas, i :

$$U_i = \theta_0 + \theta_1 * COV_i + \theta_2 * Cuota_i + \theta_3 * COport_i + \theta_4 * CConf_i + \theta_5 * CAcc_i \dots \text{Ec 5.1}$$

Donde:

θ_n = Factor de Ponderación para el n concepto

COV_i = COV para la alternativa i

$Cuota_i$ = Cuota de autopista para la alternativa i

$COport_i$ = Costo de oportunidad para la alternativa i

$CAcc_i$ = Costo de accidentes para la alternativa i

Igualando las utilidades entre la alternativa libre ($i = 1$) y la de cuota ($i = 2$) y con los costos en la Tabla 5.5, se obtiene la siguiente cuota de equilibrio para la alternativa de cuota:

$$Cuota_2 = \frac{[1(4,758.77 - 4,156.62) + 1(37.65 - 31.66) + 2.25(386.1 - 163.8) + 2(12.97 - 7.54)]}{1.5} + 90$$

$$Cuota_2 = \$ 819.45$$

El resultado anterior sugiere que la cuota máxima que puede ser cobrada en la autopista de cuota Las Brisas – Mazatlán es \$819.45, para que ambas alternativas tuviesen igual “costo” de acuerdo a la percepción del usuario. No obstante, la cuota que actualmente se cobra en dicha autopista es de \$439.00 (menor a la máxima calculada), lo cual hace rentable para la “madrina” circular por la autopista de cuota, en la percepción del autotransportista (usuario).

Otro resultado derivado de la información manejada en el análisis anterior es que, en el autotransporte de carga, los elementos que

preponderantemente influyen en la elección de ruta son el COV y las cuotas en que se incurre a lo largo de las alternativas.

Cabe mencionar que esta aplicación puede ser de mucha utilidad para organismos como CAPUFE, ya que les proporcionaría una herramienta más para poder establecer las cuotas adecuadas para cada una de sus autopistas.

- 8) Finalmente, a partir de la estructura del SIGCOV MEX, pueden construirse sistemas para el manejo de otros datos de la red, relevantes para propósitos de planeación de la infraestructura (p ej, conservación de pavimentos, etc) o la operación vehicular (p ej, identificación de recorridos para el transporte de materiales indivisibles de gran peso y/o volumen, materiales peligrosos, etc).

Capítulo 6 Conclusiones Generales

A partir del trabajo de tesis realizado, se pueden establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- 1) Se pretende que el sistema generado en este trabajo pueda consolidarse como una herramienta piloto para visualizar los problemas operativos del transporte y algunos otros que de éste derivan, ofreciendo la oportunidad de resolverlos, o bien de dar alternativas o planteamientos de solución, dignos de ser analizados minuciosamente para seleccionar de entre ellos el que más convenientemente solventa dicho problema.
- 2) Esta herramienta (SIGCOV MEX), que inicialmente surge como un pequeño proyecto cuyo alcance se limitaba al análisis de uno de los principales corredores carreteros (México, D.F. – Nuevo Laredo, Tamaulipas), utilizado en gran medida por el autotransporte de carga nacional, finalmente se extendió de tal forma que se convirtió en un proyecto de alcance nacional, puesto que tiene una total cobertura de la Red Carretera Federal, así como de sus atributos que la caracterizan. Por tal razón, es importante señalar que el SIGCOV MEX puede ser utilizado por una gran diversidad de usuarios, ya sean del ámbito académico, empresarial o gubernamental, entre otros. Lo anterior gracias a que el sistema es capaz de analizar no sólo los COVs del autotransporte de carga nacional (en cualquiera de sus configuraciones vehiculares), sino que también es capaz de analizar lo concerniente al autotransporte de pasajeros (autobuses B2, B3 y B4), así como los movimientos generados por usuarios particulares y otros (automóviles pequeños, medianos y grandes).
- 3) El estudio hasta ahora presentado en este trabajo propone un panorama vanguardista en cuanto al cálculo de COVs para el autotransporte nacional. Cabe mencionar que aunque se trata de ir a la vanguardia en este sentido, existen aún muchos aspectos susceptibles de ser mejorados en un futuro, como es el caso de la precisión en los COVs (los cuales están en función de la pendiente, curvatura, etc), así como de incrementar la cantidad de aplicaciones que pueden derivarse del sistema.
- 4) Entre las aportaciones más significativas del SIGCOV MEX, pueden mencionarse las siguientes:

- a) Aporta a los proyectos subsecuentes, además de una idea innovadora para analizar los COVs mediante un análisis georreferenciado, una segmentación básica de la Red Carretera Federal discretizada en segmentos de 500 metros (lo cual permite obtener mayor precisión en el cálculo de COVs, en este caso), así como los principales atributos de cada uno de esos segmentos (pendiente, curvatura, IRI, TDPA, nivel de servicio, etc).
 - b) La generación de algunos programas de cómputo que permiten calcular automatizadamente (a partir de las coordenadas X, Y y Z iniciales y finales de los segmentos): (I) la pendiente, (II) curvatura y (III) sobreelevación de cada uno de los segmentos de 500 metros. Asimismo, otros programas de cómputo que permiten: (IV) calcular el COV para cualquier vehículo deseado (de los considerados por el programa) que circule por la red, (V) calcular el costo total por concepto de peajes en autopistas (cuando estas formen parte del recorrido de interés) y (VI) actualizar las variables de costos unitarios y datos de utilización del vehículo, entre otros.
- 5) Enseguida se mencionan algunas recomendaciones que pueden aportar beneficios importantes para el desarrollo de proyectos futuros:
- a) Si se desea obtener costos de operación cuya confiabilidad sea mayor a la que proporciona el levantamiento georreferenciado del SIGET (en cuanto a la coordenada de altitud, Z), lo más recomendable sería realizar de nuevo el levantamiento total de la Red Carretera modelada utilizando el proceso de corrección diferencial. Cabe mencionar que para realizar de nuevo dicho levantamiento se requeriría de equipo de alta precisión y considerables recursos económicos, humanos y de tiempo.
 - b) Podría mejorarse un poco la precisión de los COVs calculados por el SIGCOV MEX si se obtuviese un vehículo representativo, dentro de la flota vehicular nacional, para cada uno de los que el VOC [Archondo-Callao, 1989] considera en su modelo. Una vez seleccionados estos vehículos representativos, el paso siguiente consistiría en reemplazar los datos originales del VOC (características geométricas del vehículo y de operación del motor del mismo) por los respectivos datos de los vehículos representativos y, finalmente, se procedería a calcular de nuevo los COVs para cada segmento.

- c) Puesto que el SIGCOV MEX aporta el total o la mayoría de los insumos requeridos para el cálculo de los COVs, sería muy recomendable desarrollar en un futuro un algoritmo propio de cálculo de COVs, adecuado completamente a las condiciones de la flota vehicular nacional, así como a las características geográficas de las carreteras y de las condiciones reales de operación en el país, de tal forma que pudiese reemplazar al algoritmo utilizado actualmente [Archondo-Callao, 1989].
- d) Sería altamente recomendable desarrollar una versión autoejecutable programada con base en los programas más recientes. La intención de lo anterior es propiciar que el sistema opere sin necesidad de contar con el “software” del SIG en el que fue elaborado dicho sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aburto, A. 2000. Tesis de maestría en Ingeniería de Tránsito: Análisis de costos de operación de vehículos de carga a partir de un Inventario georreferenciado de la red de carreteras del estado de Veracruz. Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH). Chihuahua, Chih.
- Aguerreberre, R. y F. Cepeda. 1991a. Elementos de proyecto y costos de operación en carreteras. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica 20. Sanfanfila, Qro.
- Aguerreberre, R. y F. Cepeda. 1991b. Estado superficial y costos de operación en carreteras. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 30. Sanfanfila, Qro.
- Backhoff, M. A. y J. C. Vázquez. 1998. Cálculo del grado de curvatura en un tramo digitalizado de la Red Federal de Carreteras, registrado mediante GPS. Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F.
- Backhoff, M. A. 2002. Tesis de maestría en Geografía: El Sistema de Información GeoEstadística para el Transporte (SIGET). Desarrollo y aplicaciones multitemáticas. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México, D.F.
- CAPUFE. 2001. Sitio web de CAPUFE: <http://www.capufe.gob.mx/tarifas.html>. 2001. Caminos y Puentes Federales.
- Chavarría, J., A. Mendoza y E. Mayoral. 1996. Algunas medidas para mejorar la seguridad vial en las carreteras nacionales. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 89. Querétaro, Qro.
- DGAF. 1997. Reglamento sobre el peso, dimensiones y capacidades de los vehículos de autotransporte que transitan en los caminos y puentes de jurisdicción federal. Dirección General de Autotransporte Federal. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Subsecretaría de Transporte. México, D.F.
- DGP. 1993. Planos topográficos de inventario de la SCT del tramo Perote-Jalapa-T. Izq. José Cardel. Dirección General de Planeación.

- DGST. 1996-2000. Datos viales 1996-2000. Dirección General de Servicios Técnicos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Subsecretaría de Infraestructura.
- DGST. 2000a. IRI Red Federal Libre 2000. Dirección General de Servicios Técnicos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Subsecretaría de Infraestructura.
- DGST. 2000b. Capacidad y niveles de servicio 2000. Dirección General de Servicios Técnicos. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Subsecretaría de Infraestructura.
- ESRI. 1991. ArcInfo GIS. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, California, E.U.A.
- ESRI. 1996. ArcView Network Analyst. Optimum routing, closest facility and service area analysis. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, California, E.U.A.
- ESRI. 1997. Environmental Systems Research Institute, Inc. ArcView GIS. The geographic information system for everyone. Redlands, California, E.U.A.
- ESRI. 1998. Programming with Avenue. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, California, E.U.A.
- ESRI. 2001. CD's ESRI Data & Maps 2000. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, California, E.U.A.
- García Ortega, G y M. A. Backhoff. 1992. Los sistemas de información geográfica y el transporte. Publicación Técnica No. 32. Sanfanfila, Qro.
- Gutiérrez H., J. L. y A. Mendoza. 2001. Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional. Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 1998, 1999 y 2000. Instituto Mexicano del Transporte. Documento Técnico 24. Sanfanfila, Qro.
- Hurn, J. 1989. GPS, a guide to the next utility. E.U.A.

- IMT. 2000. Sistema de Información Geográfica de Accidentes. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfanfila, Qro.
- Johnston, J. 1984. Econometric methods. Tercera edición. University of California. Irvine, California, E.U.A.
- LCAF y RPFC. 1998. Reglamento de tránsito en carreteras federales. Ley de caminos y autotransporte federal y reglamento de la Policía Federal de Caminos. Editorial Pac, S.A. de C.V. México, D.F.
- Magellan Systems Corporation. 1997a. User guide for the MAGELLAN GPS ProMARK X, version 2.0.
- Magellan Systems Corporation. 1997b. MSTAR professional GPS software. User's guide, version 2.0.
- Rico, A., A. Mendoza y C. Rivera. 1999. Un análisis del transporte en la industria automotriz mexicana. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 134. Sanfanfila, Qro.
- SCT. 1984. Normas de Servicios Técnicos, Proyecto Geométrico, Carreteras (Título 2.01.01). Secretaría de Comunicaciones y Transportes. México, D.F.
- SCT. 2001. Sitio web de la SCT: <http://www.sct.gob.mx>. 2001. Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- TRB. 2000. Manual de capacidad de carreteras. Transportation Research Board. National Research Council. Washington, DC.
- Archondo-Callao, R. 1989. The highway design and maintenance standards series. Vehicle Operating Cost Model (VOC Model), version 3.0. Washington, D.C.

ANEXOS

A N E X O A

**Coordenadas de latitud (X), longitud (Y) y altitud (Z)
sobre el nivel del mar, para el trazo carretero
Perote – Jalapa – T. Izq. José Cardel**

ANEXO A Coordenadas de latitud (X), longitud (Y) y altitud (Z) sobre el nivel del mar para el trazo carretero Perote – Jalapa – T. Izq. José Cardel.

PUNTO	X_(m)	Y_(m)	Z_(m)	CAD_(km)
1	2496032.418243	453894.431758	2380.00000	98.650
2	2496490.544545	454236.810050	2381.89435	99.222
3	2497226.403646	454814.710307	2382.51609	100.154
4	2497918.643047	455406.956962	2388.03790	101.054
5	2498292.482518	455722.357537	2392.52224	101.538
6	2498634.875672	456068.200751	2392.84081	102.012
7	2498937.050793	456415.504100	2392.18528	102.455
8	2499245.799923	456853.451653	2392.32454	102.960
9	2499595.646170	457375.542335	2392.27765	103.549
10	2500204.821811	458265.273950	2391.25167	104.563
11	2500720.499363	459056.249505	2401.46533	105.447
12	2501078.352906	459601.331507	2404.66664	106.057
13	2501488.263433	460197.854269	2404.44902	106.738
14	2501880.305649	460773.239850	2396.15376	107.392
15	2502135.134523	461184.603689	2394.45436	107.843
16	2502281.559123	461420.403774	2388.45311	108.102
17	2502497.689247	461569.522876	2384.25501	108.366
18	2502818.602207	461747.891016	2380.85357	108.741
19	2502974.668051	461822.578039	2381.29125	108.920
20	2503159.237195	461922.527701	2384.92490	109.135
21	2503233.223470	462184.239374	2391.91517	109.377
22	2503273.556167	462262.391319	2393.99814	109.458
23	2503361.349773	462356.094851	2397.24306	109.582
24	2503625.045916	462600.389209	2391.20492	109.935
25	2503911.540877	462864.893678	2383.56774	110.318
26	2504198.800257	463135.366155	2380.87087	110.704
27	2504425.680034	463368.234383	2383.96809	111.020
28	2504689.376177	463612.517152	2392.69488	111.373
29	2504781.335871	463699.314019	2395.53904	111.497
30	2504842.604112	463822.521533	2397.47241	111.623
31	2504904.751437	464031.343900	2395.47455	111.817
32	2505034.521242	464570.446305	2384.12956	112.310
33	2505110.045912	464844.128760	2376.47839	112.563
34	2505235.544521	465034.850099	2371.52544	112.776
35	2505387.119399	465153.283206	2370.38679	112.968
36	2505575.405535	465203.518775	2371.84392	113.173

37	2505664.183332	465186.761997	2372.34821	113.268
38	2505759.745354	465144.232692	2372.92681	113.377
39	2505867.920301	465160.572288	2373.49861	113.493
40	2505933.689064	465240.056895	2373.93644	113.591
41	2506004.493442	465398.226512	2375.19896	113.749
42	2506054.687153	465474.512730	2376.39230	113.835
43	2506159.135554	465540.578008	2377.26523	113.960
44	2506291.638160	465589.086911	2377.62625	114.107
45	2506494.725373	465636.529684	2377.49732	114.327
46	2506639.401363	465701.123239	2376.65848	114.491
47	2506764.011334	465806.252902	2374.56685	114.652
48	2506888.191320	465868.586726	2371.59980	114.795
49	2506980.036351	465875.759925	2370.91002	114.893
50	2507088.096636	465812.487443	2374.65866	115.020
51	2507131.276796	465755.333619	2377.03213	115.088
52	2507160.095420	465743.768429	2378.14906	115.120
53	2507213.585690	465727.544715	2379.79957	115.179
54	2507280.434196	465776.192679	2381.75092	115.262
55	2507350.369047	465848.770619	2384.46183	115.360
56	2507427.088122	465895.552855	2388.01419	115.451
57	2507523.529227	465938.615226	2392.79327	115.560
58	2507636.634682	465954.027753	2397.40886	115.681
59	2507757.632770	465912.819521	2406.16174	115.815
60	2507832.373910	465904.835137	2407.50012	115.895
61	2507871.502645	465934.211646	2408.46006	115.943
62	2507875.783395	466006.917059	2410.51729	116.007
63	2507878.191318	466104.479518	2414.25441	116.093
64	2507866.906571	466173.998129	2416.87194	116.155
65	2507860.227454	466279.394324	2420.64559	116.248
66	2507893.766370	466383.341973	2423.87903	116.345
67	2507942.431241	466447.668996	2426.13932	116.422
68	2508019.150316	466494.451232	2428.43324	116.513
69	2508070.442881	466539.912395	2428.45216	116.581
70	2508083.046251	466598.792886	2428.46691	116.634
71	2508085.463728	466696.355344	2429.19551	116.720
72	2508127.325264	466786.466484	2430.00301	116.810
73	2508169.855667	466802.956729	2429.49134	116.858
74	2508293.147015	466779.687289	2428.08424	116.990
75	2508439.896493	466702.983890	2426.27941	117.160
76	2508616.238571	466620.706487	2425.02043	117.361

77	2508772.084644	466536.157764	2422.89647	117.543
78	2508914.238049	466423.576782	2420.41510	117.723
79	2509031.719806	466315.642735	2422.94997	117.880
80	2509093.418034	466205.982021	2425.26741	117.996
81	2509163.782871	466045.680145	2427.20226	118.155
82	2509212.982836	465956.762608	2428.36377	118.249
83	2509268.001946	465952.498089	2431.47978	118.308
84	2509358.423245	466027.335761	2435.61843	118.424
85	2509426.810146	466087.942918	2433.53109	118.514
86	2509561.950000	466117.574372	2429.57673	118.660
87	2509786.622515	466136.440233	2421.88160	118.899
88	2509967.684884	466169.664080	2414.43240	119.094
89	2510119.919074	466214.453117	2410.18261	119.261
90	2510365.966676	466321.170386	2407.51513	119.538
91	2510608.947043	466403.969265	2401.05938	119.807
92	2510915.718238	466511.497720	2393.61067	120.146
93	2511257.776958	466618.481520	2385.79911	120.522
94	2511431.596450	466634.693645	2382.82805	120.707
95	2511720.719104	466604.633422	2382.47626	121.015
96	2512101.237693	466538.962149	2390.64629	121.424
97	2512480.991861	466467.311277	2382.90417	121.832
98	2512753.784598	466428.084656	2381.36055	122.124
99	2512899.110345	466419.045730	2380.56542	122.279
100	2513039.171151	466447.750115	2379.43840	122.430
101	2513179.356175	466556.066578	2378.00476	122.607
102	2513348.464930	466732.441518	2374.75650	122.844
103	2513511.439218	466860.968093	2368.64441	123.050
104	2513623.130496	466944.045093	2366.49243	123.190
105	2513696.772782	466966.897352	2365.68962	123.270
106	2513786.314999	466956.131760	2365.03823	123.366
107	2514084.094706	466875.441963	2361.58664	123.690
108	2514422.417325	466756.464202	2358.39876	124.065
109	2514606.766699	466697.178118	2356.70361	124.268
110	2514695.534941	466680.421340	2354.95895	124.363
111	2514720.856344	466602.130335	2353.26173	124.437
112	2514733.230389	466501.786668	2351.34721	124.526
113	2514783.099221	466339.225061	2348.69069	124.678
114	2514911.540847	466198.588643	2345.37708	124.862
115	2515010.064995	466100.354059	2343.22211	124.997
116	2515048.754189	466086.934730	2342.58107	125.040
117	2515083.277295	466080.422068	2342.02947	125.077

118	2515171.720659	466100.481531	2340.59829	125.173
119	2515295.900644	466162.815355	2337.81070	125.316
120	2515406.493069	466276.729000	2334.86214	125.470
121	2515497.678788	466357.534680	2332.72249	125.590
122	2515618.017565	466389.958930	2330.81992	125.721
123	2515721.586884	466370.420944	2329.92020	125.832
124	2515830.086710	466349.944300	2329.41109	125.949
125	2515940.449809	466304.622198	2328.51986	126.073
126	2516036.346264	466225.265063	2326.83546	126.196
127	2516117.336535	466069.077057	2319.56046	126.358
128	2516233.174791	465869.571737	2309.99916	126.572
129	2516295.646993	465765.890621	2302.31147	126.685
130	2516410.176180	465713.650264	2297.39743	126.815
131	2516520.214401	465705.132814	2295.66418	126.932
132	2516611.285457	465706.326416	2291.35935	127.029
133	2516645.044143	465693.834157	2289.56345	127.066
134	2516664.326631	465647.318453	2287.33071	127.112
135	2516703.340703	465597.071295	2284.93085	127.172
136	2516769.654115	465523.299753	2281.33783	127.268
137	2516789.261481	465439.956220	2278.80972	127.344
138	2516815.232642	465288.032733	2274.32733	127.480
139	2516851.513913	465177.039357	2267.23320	127.584
140	2516909.160716	465153.908978	2263.29735	127.649
141	2516971.078715	465203.484010	2258.36136	127.728
142	2516997.384309	465290.419937	2253.91831	127.809
143	2517034.000014	465418.285975	2249.22378	127.928
144	2517097.236637	465596.260110	2244.60339	128.098
145	2517179.879965	465807.330620	2239.86042	128.302
146	2517293.654287	466024.774732	2226.49973	128.528
147	2517389.445635	466141.469584	2220.65920	128.672
148	2517467.693550	466200.222603	2217.62796	128.770
149	2517540.905850	466180.279024	2214.49307	128.850
150	2517602.279200	466107.434551	2208.68140	128.941
151	2517611.920444	465946.344666	2199.43318	129.083
152	2517620.462834	465816.079837	2192.15398	129.197
153	2517635.923223	465739.654559	2188.21125	129.266
154	2517672.300047	465708.284850	2186.00427	129.314
155	2517746.725864	465737.128295	2182.96754	129.397
156	2517812.809950	465779.785072	2179.64634	129.476
157	2517859.496885	465789.357063	2177.09788	129.527

158	2517930.081492	465788.290933	2173.34204	129.602
159	2518000.990978	465750.408563	2168.95022	129.684
160	2518053.382395	465765.021493	2165.89738	129.741
161	2518131.964744	465786.958271	2162.51027	129.827
162	2518233.670789	465792.265743	2158.51416	129.935
163	2518338.329406	465741.891113	2154.61922	130.055
164	2518447.813423	465610.965747	2149.64824	130.218
165	2518518.617800	465493.459709	2146.30592	130.346
166	2518608.704666	465329.437967	2144.52158	130.519
167	2518721.141254	465142.818911	2142.86306	130.721
168	2518837.858592	465028.893678	2139.73035	130.880
169	2518969.052129	464949.015067	2137.09425	131.036
170	2519182.220127	464878.152205	2131.31195	131.271
171	2519408.641252	464792.548940	2121.07118	131.523
172	2519534.894726	464713.597398	2116.57330	131.674
173	2519637.260084	464645.272388	2116.60770	131.799
174	2519741.928256	464594.886170	2116.64064	131.918
175	2519816.669395	464586.913374	2116.47272	131.998
176	2519882.648374	464549.958073	2115.89773	132.075
177	2519941.604245	464379.551141	2115.16097	132.237
178	2519989.934683	464205.030339	2115.18126	132.399
179	2520031.356678	463976.681574	2114.74591	132.604
180	2520092.175823	463781.417596	2110.60754	132.787
181	2520144.347469	463636.806369	2107.73205	132.925
182	2520196.184683	463528.999794	2105.46421	133.034
183	2520311.363626	463403.126955	2101.95307	133.199
184	2520461.839651	463276.721052	2098.01883	133.394
185	2520582.398198	463192.705393	2095.16069	133.541
186	2520663.933118	463158.948481	2092.87645	133.633
187	2520731.890032	463176.748213	2092.33206	133.707
188	2520827.241839	463250.647227	2093.21503	133.827
189	2520947.695278	463362.695144	2095.77295	133.989
190	2521065.071928	463450.813084	2093.08123	134.135
191	2521161.847467	463457.059214	2090.34377	134.238
192	2521259.282317	463389.661273	2084.63588	134.358
193	2521325.911052	463279.073490	2079.78620	134.478
194	2521374.356153	463184.176356	2074.52876	134.575
195	2521500.494964	463025.601146	2063.39751	134.769
196	2521595.951878	462903.436585	2055.43049	134.916
197	2521661.051774	462780.889608	2050.08174	135.044
198	2521699.951183	462651.030371	2045.63299	135.165

199	2521713.108758	462556.654713	2041.58032	135.249
200	2521734.579397	462448.454133	2038.27429	135.346
201	2521705.206569	462337.599818	2035.49608	135.448
202	2521620.814630	462231.010022	2030.17003	135.578
203	2521538.725506	462142.359017	2024.54067	135.695
204	2521472.192323	462056.894813	2020.84436	135.798
205	2521418.491837	461913.871191	2015.03114	135.936
206	2521388.345034	461797.037279	2009.23465	136.043
207	2521361.275020	461704.133343	2002.92439	136.129
208	2521328.940065	461648.972718	1998.61443	136.189
209	2521290.575750	461625.575806	1996.88678	136.234
210	2521242.684854	461567.228380	1994.12255	136.306
211	2521226.240274	461478.438314	1991.38403	136.386
212	2521266.678078	461360.538272	1987.61907	136.498
213	2521336.058724	461310.696707	1984.04074	136.584
214	2521428.668175	461323.849503	1979.95795	136.683
215	2521505.826792	461413.439166	1976.62185	136.796
216	2521546.923908	461497.570708	1974.09667	136.882
217	2521575.092775	461559.637999	1972.28009	136.944
218	2521658.605631	461580.636120	1970.23023	137.035
219	2521717.790829	461569.476523	1969.40282	137.098
220	2521801.198577	461510.850976	1967.28011	137.201
221	2521892.594511	461475.228337	1963.84696	137.303
222	2522018.637770	461512.705115	1956.71933	137.441
223	2522136.014420	461600.823055	1950.86490	137.588
224	2522222.279187	461682.567393	1948.63859	137.704
225	2522305.457610	461740.381754	1942.15258	137.806
226	2522360.476720	461736.128824	1936.99799	137.865
227	2522405.959694	461696.913791	1933.83781	137.924
228	2522440.817234	461653.584888	1930.99900	137.977
229	2522502.620569	461623.536253	1928.63725	138.048
230	2522574.409138	461671.257147	1927.29387	138.135
231	2522640.502779	461713.925513	1924.45997	138.214
232	2522683.023627	461730.404171	1921.65971	138.262
233	2522745.610492	461706.335133	1918.35059	138.332
234	2522804.786135	461695.175536	1916.25685	138.395
235	2522857.941972	461715.768063	1914.26281	138.455
236	2522869.016503	461762.689360	1913.05804	138.497
237	2522874.061673	461841.374370	1911.09455	138.566
238	2522896.640721	461978.012801	1903.91487	138.689

239	2522933.132208	462026.266760	1897.85310	138.746
240	2522989.364835	462070.789264	1893.96401	138.817
241	2523056.872653	462045.804746	1890.68662	138.892
242	2523078.027969	461974.420407	1888.29193	138.959
243	2523089.962472	461831.269314	1884.75305	139.085
244	2523064.201527	461591.088827	1872.41031	139.297
245	2523009.946836	461325.657288	1858.14089	139.537
246	2522937.498956	461075.904810	1854.77492	139.769
247	2522873.813237	460855.134837	1835.72518	139.974
248	2522866.360145	460678.875780	1826.30260	140.129
249	2522964.119873	460574.673187	1822.83987	140.267
250	2523052.123695	460551.936812	1818.17042	140.363
251	2523155.033702	460606.031308	1809.32929	140.482
252	2523258.832346	460745.729068	1800.62871	140.647
253	2523385.745133	460868.797521	1786.51474	140.819
254	2523483.399754	460960.646916	1775.99341	140.951
255	2523651.638982	461051.418592	1770.49578	141.147
256	2523760.903228	461036.933133	1765.23638	141.263
257	2523822.716118	461006.884498	1761.77970	141.334
258	2523868.313755	461047.293133	1759.57240	141.394
259	2523894.179808	461091.421633	1758.33409	141.442
260	2523903.496174	461242.812055	1755.33132	141.575
261	2523912.812539	461394.202477	1752.33491	141.708
262	2523951.291518	461497.211468	1750.70255	141.807
263	2524015.846764	461527.920640	1748.61836	141.881
264	2524114.476020	461509.309723	1745.83040	141.987
265	2524155.687799	461397.389278	1742.94851	142.094
266	2524160.838077	461280.022301	1738.05344	142.197
267	2524160.723414	461200.398633	1734.73971	142.267
268	2524167.077653	461131.818679	1732.81865	142.327
269	2524187.134116	461091.270984	1731.53106	142.369
270	2524253.552636	461097.123110	1729.51491	142.440
271	2524293.445790	461132.479216	1728.17342	142.492
272	2524327.309585	461199.599036	1726.47544	142.561
273	2524333.119175	461284.263643	1724.98717	142.636
274	2524350.662608	461342.217064	1723.91561	142.690
275	2524380.694748	461379.438898	1722.74663	142.735
276	2524451.269800	461378.372768	1717.81666	142.810
277	2524512.757812	461385.140374	1713.47829	142.876
278	2524546.956040	461415.443953	1710.75901	142.921
279	2524564.489918	461473.397375	1708.49766	142.975

280	2524554.734011	461554.875181	1705.48253	143.047
281	2524528.657743	461627.186589	1703.76427	143.116
282	2524527.234011	461694.839473	1702.85193	143.176
283	2524537.209688	461772.597414	1700.15745	143.245
284	2524614.368305	461862.187076	1693.53885	143.358
285	2524727.913301	461920.395442	1690.97931	143.489
286	2524842.547596	461947.778752	1683.63775	143.613
287	2524999.272752	461948.833294	1681.00501	143.780
288	2525114.575913	461902.572534	1674.44247	143.909
289	2525205.207428	461860.970298	1671.72134	144.012
290	2525268.444050	461763.268778	1668.66491	144.121
291	2525319.956385	461692.290033	1666.25245	144.204
292	2525433.061840	461707.702560	1662.59852	144.325
293	2525538.599540	461742.919606	1654.42592	144.441
294	2525638.451867	461773.095713	1649.04421	144.551
295	2525768.651659	461803.654236	1642.38916	144.692
296	2525909.486439	461838.338218	1631.54238	144.844
297	2526091.313228	461877.541662	1621.37147	145.041
298	2526224.914687	461895.213921	1616.44590	145.184
299	2526307.548460	461830.620365	1610.95931	145.288
300	2526397.415555	461783.026943	1604.14736	145.392
301	2526489.260586	461790.200142	1595.52473	145.490
302	2526575.515798	461871.944481	1587.34881	145.606
303	2526637.768230	461884.703273	1585.29305	145.674
304	2526714.047764	461888.689671	1583.21424	145.755
305	2526811.262844	461937.731638	1578.96533	145.867
306	2526919.103358	461990.899065	1571.43581	145.990
307	2527036.050022	462036.209578	1567.52975	146.121
308	2527163.182579	462042.861301	1562.43574	146.256
309	2527265.987478	462017.332129	1557.64410	146.368
310	2527372.948909	461984.896291	1552.93414	146.485
311	2527490.105789	461913.778484	1548.11759	146.624
312	2527581.511278	461878.155845	1543.63414	146.726
313	2527641.136018	461909.792086	1540.31026	146.795
314	2527667.441612	461996.716425	1536.98458	146.876
315	2527691.559054	462145.314050	1531.65654	147.009
316	2527712.599708	462269.993287	1528.87258	147.121
317	2527771.240256	462412.078251	1524.15406	147.260
318	2527829.766142	462474.551135	1520.72132	147.343
319	2527946.712806	462519.873237	1516.74501	147.473

320	2528059.378720	462492.478338	1512.87084	147.596
321	2528186.071735	462456.322634	1507.10219	147.734
322	2528291.504327	462411.927602	1502.72087	147.853
323	2528465.218712	462348.516059	1493.78113	148.045
324	2528671.917808	462266.632661	1489.27018	148.277
325	2528858.120900	462182.489530	1486.71870	148.488
326	2528971.446125	462081.462150	1485.51747	148.637
327	2529126.852657	461954.129177	1482.54518	148.837
328	2529281.819648	461783.988778	1479.52703	149.059
329	2529440.178751	461600.950527	1474.26202	149.291
330	2529535.960544	461441.981313	1469.05812	149.464
331	2529591.638966	461364.084312	1466.75662	149.554
332	2529735.646089	461226.646284	1460.62906	149.749
333	2529882.280904	461070.330806	1456.64707	149.957
334	2529904.974615	461010.917250	1455.28089	150.014
335	2530000.431529	460888.752689	1450.86857	150.161
336	2530079.883405	460720.617077	1439.18378	150.331
337	2530156.927359	460454.907418	1428.14934	150.578
338	2530212.815997	460260.582098	1419.92984	150.759
339	2530270.233474	460078.215972	1415.92784	150.930
340	2530289.745288	459915.260360	1412.80664	151.074
341	2530320.532293	459682.786136	1407.97247	151.280
342	2530318.449249	459548.407436	1406.61183	151.398
343	2530321.621591	459376.273838	1406.53588	151.549
344	2530341.888269	459219.297824	1406.16926	151.688
345	2530333.336323	459073.886999	1407.36197	151.816
346	2530363.148693	458951.861498	1408.36249	151.928
347	2530382.650951	458788.905886	1410.04089	152.072
348	2530459.035593	458596.840297	1419.82329	152.259
349	2530540.350742	458403.836050	1424.65107	152.449
350	2530612.578852	458218.677128	1433.90321	152.628
351	2530640.078852	458078.724424	1439.07447	152.754
352	2530687.644870	457898.212437	1440.24996	152.920
353	2530730.270825	457718.639107	1442.73336	153.084
354	2530752.620547	457420.377726	1443.41481	153.347
355	2530759.404772	457118.917956	1439.75682	153.611
356	2530764.440387	456921.927311	1437.69746	153.784
357	2530755.563563	456813.332727	1437.07276	153.879
358	2530788.882708	456758.044630	1436.46546	153.939
359	2530854.861687	456721.089329	1435.62330	154.017
360	2530935.192645	456638.545393	1434.33002	154.129

361	2530999.193688	456546.823471	1432.70077	154.234
362	2531046.100394	456439.955554	1430.91316	154.340
363	2531106.594660	456281.519405	1430.09668	154.493
364	2531148.895737	456138.762316	1430.11774	154.626
365	2531234.491637	456018.475070	1428.60409	154.765
366	2531355.040629	455934.459412	1429.34526	154.913
367	2531494.891219	455803.928050	1429.85512	155.101
368	2531557.353867	455700.258522	1429.36204	155.213
369	2531664.210190	455588.199016	1424.53999	155.363
370	2531719.554179	455547.129845	1420.99750	155.432
371	2531842.530204	455560.676645	1415.95938	155.564
372	2531968.124366	455555.357585	1412.59745	155.697
373	2532083.857514	455551.892663	1410.84551	155.820
374	2532241.241982	455479.314723	1406.74040	155.999
375	2532388.316338	455365.806672	1398.60788	156.185
376	2532603.892259	455116.842202	1376.88640	156.501
377	2532793.707234	454903.361312	1362.01230	156.776
378	2532958.544794	454731.366774	1356.70494	157.007
379	2533130.606121	454576.372370	1350.88351	157.235
380	2533339.168490	454469.631925	1349.83013	157.476
381	2533575.135307	454418.979174	1350.57376	157.730
382	2533843.427523	454423.498637	1342.31353	158.016
383	2534071.176827	454466.282887	1335.71944	158.261
384	2534246.534714	454494.454206	1324.20261	158.449
385	2534336.516472	454526.484452	1320.61514	158.548
386	2534417.841177	454609.155859	1316.52023	158.661
387	2534513.192983	454683.054874	1313.17325	158.781
388	2534598.569112	454679.195947	1310.72681	158.872
389	2534765.480161	454641.580109	1304.23272	159.053
390	2534982.814247	454563.810581	1295.09683	159.294
391	2535227.877658	454505.324094	1283.72506	0.209
392	2535492.663099	454443.106154	1274.91030	0.496
393	2535697.938463	454428.875639	1266.51468	0.714
394	2535862.995794	454416.105259	1259.75193	0.890
395	2535940.364626	454389.255014	1258.54084	0.976
396	2536041.965564	454314.950407	1257.42570	1.102
397	2536154.956356	454250.750855	1256.62731	1.234
398	2536273.651630	454191.592244	1256.02968	1.371
399	2536355.626092	454200.631170	1255.86763	1.458
400	2536466.428732	454198.104906	1255.65376	1.576

401	2536601.788356	454111.296451	1255.69825	1.739
402	2536706.341865	453981.298154	1252.77522	1.898
403	2536820.756389	453849.445718	1247.76272	2.066
404	2536931.444367	453767.295787	1244.88929	2.204
405	2537004.981545	453710.535967	1242.94867	2.296
406	2537097.925429	453686.872522	1238.74333	2.397
407	2537307.691760	453628.919101	1230.09843	2.626
408	2537432.081961	453574.813017	1227.19628	2.766
409	2537534.447318	453506.488007	1226.53263	2.891
410	2537711.114274	453387.382775	1223.33013	3.105
411	2537895.129215	453364.912932	1217.55210	3.302
412	2538064.792175	453388.043312	1213.61223	3.484
413	2538211.436545	453507.391900	1209.50943	3.671
414	2538372.872438	453623.959280	1204.03325	3.871
415	2538546.367052	453676.987646	1195.83828	4.061
416	2538699.375217	453727.756280	1189.37341	4.230
417	2538829.899886	453721.498562	1185.09755	4.369
418	2538964.925077	453671.517937	1177.73715	4.519
419	2539072.985362	453608.245455	1176.35979	4.646
420	2539193.219030	453561.057626	1174.93016	4.781
421	2539311.904749	453501.899014	1172.63613	4.917
422	2539419.640156	453475.454361	1170.46192	5.034
423	2539489.125909	453505.224875	1169.17752	5.112
424	2539591.166389	453473.716106	1168.89870	5.224
425	2539766.409613	453422.263758	1164.98845	5.416
426	2539878.635985	453352.084610	1159.06325	5.550
427	2539976.070835	453284.686669	1155.45994	5.669
428	2540063.635116	453219.154456	1152.27390	5.779
429	2540149.995435	453104.846807	1148.01320	5.914
430	2540219.261418	452975.381575	1142.88914	6.050
431	2540279.096373	452890.577908	1146.81389	6.147
432	2540351.869132	452827.838491	1149.45802	6.242
433	2540472.972328	452866.242338	1147.04468	6.375
434	2540540.594809	452920.869898	1144.85775	6.462
435	2540643.399708	452895.352315	1141.81259	6.573
436	2540718.150402	452887.367930	1139.66601	6.653
437	2540788.400576	452923.129630	1137.35621	6.734
438	2540878.047900	452991.976116	1133.57084	6.847
439	2541003.326739	453023.473297	1129.93100	6.983
440	2541141.419164	452997.411060	1123.59504	7.131
441	2541215.395884	452983.458667	1120.37143	7.211

442	2541307.890672	452916.987795	1117.52014	7.325
443	2541409.052068	452799.887350	1110.47580	7.474
444	2541518.096543	452626.154558	1102.45401	7.665
445	2541622.974931	452459.340020	1094.91701	7.849
446	2541732.898488	452371.210491	1086.52674	7.989
447	2541885.677328	452262.743379	1077.70591	8.177
448	2542046.014367	452134.471749	1073.81209	8.382
449	2542135.451476	452044.094077	1071.31160	8.505
450	2542247.563185	451894.291261	1068.19576	8.683
451	2542314.191920	451783.691890	1066.34877	8.803
452	2542384.222323	451660.217843	1064.46538	8.934
453	2542481.982051	451556.003662	1062.10413	9.072
454	2542566.593761	451546.165139	1060.44522	9.163
455	2542623.256374	451633.483482	1055.92959	9.260
456	2542646.169855	451733.305672	1052.11914	9.351
457	2542655.046679	451841.900256	1047.32748	9.447
458	2542690.448868	451920.990858	1046.28447	9.525
459	2542783.822739	451940.123252	1039.10487	9.626
460	2542891.558145	451913.667011	1030.61731	9.743
461	2543000.392404	451856.374126	1023.32344	9.869
462	2543031.848277	451825.943075	1020.63626	9.912
463	2543105.930104	451891.591172	1015.07291	10.009
464	2543116.679756	451975.328709	1011.04482	10.084
465	2543130.811966	452046.179983	1007.52238	10.148
466	2543193.503940	452101.734613	1004.58071	10.230
467	2543240.525309	452074.490363	1002.32230	10.285
468	2543291.263668	451997.520432	998.03009	10.372
469	2543311.320131	451956.984325	996.07727	10.413
470	2543369.301368	451897.037704	992.32005	10.494
471	2543420.479269	451862.875199	989.90095	10.556
472	2543455.661687	451782.718467	986.18174	10.636
473	2543486.228922	451666.684152	980.35348	10.743
474	2543517.245252	451593.445675	976.89357	10.815
475	2543615.444522	451532.038920	970.95141	10.932
476	2543741.697997	451453.075789	964.25018	11.083
477	2543914.647961	451383.684650	955.73208	11.277
478	2544091.429580	451344.203085	947.59400	11.468
479	2544205.624333	451328.778969	945.37126	11.590
480	2544298.893096	451268.299283	941.14710	11.703
481	2544392.926278	451213.799195	938.93604	11.813

482	2544487.723881	451165.278704	938.29671	11.923
483	2544598.421413	451083.128772	938.24110	12.061
484	2544711.737084	450982.112980	936.20204	12.210
485	2544881.505151	450809.179785	931.77063	12.446
486	2545143.653344	450490.163639	936.41397	12.841
487	2545403.288506	450269.648610	941.50566	13.178
488	2545606.805705	450084.223155	944.96763	13.448
489	2545750.812828	449946.773538	941.98427	13.643
490	2545838.377108	449881.241325	940.67604	13.752
491	2545881.117727	449781.291663	939.87405	13.851
492	2545919.262272	449645.441240	938.94817	13.977
493	2546001.016962	449495.244420	937.91578	14.134
494	2546101.079505	449408.980619	937.56522	14.265
495	2546238.397955	449376.938785	937.13343	14.414
496	2546399.623632	449334.270419	935.24143	14.589
497	2546572.564042	449264.879279	930.97678	14.783
498	2546760.630407	449155.879103	925.94440	15.004
499	2546925.897953	449026.680403	917.31272	15.213
500	2546999.435132	448969.920583	914.43504	15.306
501	2547149.261400	448917.147161	910.58843	15.472
502	2547282.423317	448892.011994	906.62501	15.615
503	2547447.805527	448842.436961	898.15209	15.796
504	2547667.767305	448745.789983	887.86894	16.045
505	2547824.377798	448667.232446	881.33933	16.225
506	2547951.395692	448594.260501	871.84436	16.374
507	2548037.106255	448553.585334	862.61084	16.472
508	2548132.668277	448511.044440	856.79598	16.580
509	2548208.068728	448429.427574	853.42618	16.688
510	2548368.080889	448337.972184	850.84080	16.876
511	2548466.280159	448276.565429	848.01772	16.993
512	2548538.728039	448250.642253	843.22316	17.073
513	2548587.717789	448278.153035	839.74710	17.131
514	2548678.463967	448316.162878	835.09110	17.233
515	2548753.979081	448314.169679	831.30577	17.313
516	2548899.964140	448231.486683	825.25042	17.484
517	2548957.610943	448208.356303	822.85286	17.549
518	2549046.818726	448234.406951	818.14533	17.647
519	2549153.464834	448238.787354	812.72847	17.760
520	2549268.433562	448229.342835	810.49643	17.882
521	2549388.218134	448139.359168	805.28267	18.032
522	2549465.156981	448069.701496	801.18260	18.134

523	2549575.844958	447987.563153	796.32960	18.272
524	2549696.843047	447946.354921	794.01102	18.406
525	2549839.101559	447913.386018	791.27584	18.560
526	2550040.975256	447912.041768	783.07870	18.774
527	2550241.320113	447898.749911	777.47464	18.988
528	2550375.246450	447879.605929	772.14905	19.131
529	2550500.085748	447868.295684	767.59757	19.264
530	2550714.782585	447809.403604	759.94064	19.498
531	2550887.732550	447740.012465	754.81633	19.692
532	2551088.727164	447653.076538	746.19797	19.918
533	2551308.688942	447556.441149	736.36559	20.167
534	2551472.207879	447531.711574	725.56686	20.342
535	2551654.034667	447570.915019	714.32756	20.539
536	2551879.920699	447638.567903	699.88925	20.786
537	2552068.206835	447688.803473	688.75800	20.991
538	2552190.408884	447696.370676	681.45595	21.121
539	2552298.144290	447669.914435	672.82729	21.238
540	2552426.261038	447566.105846	668.35022	21.402
541	2552593.831399	447454.845938	663.91702	21.605
542	2552813.353636	447315.403122	654.54260	21.868
543	2553030.248180	447194.837756	647.29049	22.122
544	2553175.793697	447069.358921	639.47930	22.311
545	2553592.478894	446813.082193	627.29844	22.808
546	2553938.254606	446594.687835	623.05030	23.222
547	2554564.591470	446200.822429	601.68983	23.972
548	2554910.367181	445982.428071	592.09749	24.387
549	2555251.212385	445764.960782	585.21098	24.796
550	2555431.281009	445632.969286	581.70634	25.020
551	2555621.869959	445425.479581	576.54403	25.292
552	2555736.609361	445256.799316	574.07552	25.484
553	2555886.206303	445044.790148	560.86968	25.728
554	2556026.706650	444840.626305	548.59555	25.961
555	2556115.369784	444744.257448	541.83412	26.088
556	2556273.958213	444720.454942	532.18219	26.258
557	2556473.643758	444780.795568	518.81328	26.476
558	2556658.977323	444886.724827	505.59775	26.694
559	2556866.230623	444927.249345	488.79337	26.917
560	2557046.079476	444911.697757	485.55959	27.109
561	2557170.584340	444937.215341	476.63563	27.243
562	2557265.171727	445005.134758	471.64054	27.360

563	2557382.548377	445093.252698	469.66195	27.507
564	2557549.908522	445098.432698	467.65296	27.685
565	2557707.073220	445142.283077	464.41530	27.856
566	2557813.050461	445220.307550	461.72254	27.988
567	2557982.933191	445402.662087	457.58627	28.229
568	2558134.183191	445557.899847	454.57128	28.440
569	2558240.494865	445599.108079	452.86899	28.558
570	2558340.672071	445592.456356	449.39022	28.665
571	2558457.828951	445521.338550	445.91493	28.804
572	2558580.575650	445375.649605	439.51372	28.987
573	2558667.700389	445267.321553	435.78531	29.120
574	2558757.127942	445176.932293	434.12657	29.243
575	2558859.493300	445108.607284	431.57511	29.367
576	2559007.007198	445037.895070	426.19332	29.536
577	2559156.059491	444979.142051	419.79675	29.703
578	2559249.328254	444918.662366	416.02929	29.815
579	2559345.549588	444802.488990	412.95784	29.959
580	2559475.090067	444631.015929	409.35513	30.163
581	2559632.694306	444441.998080	404.81812	30.399
582	2559789.190136	444283.828464	400.41955	30.615
583	2559917.306883	444180.008287	397.15253	30.779
584	2560116.667550	444001.489498	391.09051	31.043
585	2560359.198821	443765.816886	380.85124	31.373
586	2560522.822865	443545.035324	372.16295	31.633
587	2560604.032906	443272.418999	364.04684	31.887
588	2560596.245380	443132.987771	360.54012	32.010
589	2560573.331899	443033.165581	358.60715	32.100
590	2560516.019529	443019.479720	354.77332	32.163
591	2560427.681273	443079.032336	348.40716	32.270
592	2560315.130023	443186.039314	341.49135	32.422
593	2560196.434749	443245.186337	330.02004	32.558
594	2560079.163206	443236.680476	324.65823	32.683
595	2560002.444131	443189.898240	321.61761	32.775
596	2559955.202991	443057.918332	315.53083	32.901
597	2559951.581553	442911.568850	309.74438	33.029
598	2559987.308620	442678.167557	307.60958	33.237
599	2560021.277522	442549.235389	307.25115	33.356
600	2560037.827209	442441.973468	305.73241	33.451
601	2560107.857612	442318.487833	305.52542	33.583
602	2560185.121337	442212.013920	304.11700	33.707

A N E X O B

Datos que el VOC selecciona por omisión (“default”)

ANEXO B Datos que el VOC selecciona por omisión (“default”).

VEHTIPO	TARA	CARGA	HPDRIVE	HPBRAKE	VDESIR
Auto Pequeño	960.00	0.000	30.000	17.000	98.300
Auto Mediano	1200.00	0.000	70.000	21.000	110.000
Auto Grande	1650.00	0.000	85.000	27.000	98.300
Utilitario	1300.00	700.000	41.500	32.200	110.000
Autobús	11340.00	4500.000	234.500	218.960	110.000
Camión Ligero Gasolina	1851.00	3149.000	57.600	70.000	100.000
Camión Ligero Diesel	3270.00	4200.000	60.000	100.000	81.600
Camión Liviano (dos ejes)	4100.00	5800.000	106.400	181.000	90.000
Camión Pesado (tres ejes)	8300.00	11300.000	100.000	250.000	88.800
Camión Articulado	15200.00	18500.000	248.500	763.600	100.000
VEHTIPO	CD	AR	CRPM	ALPHA1	ALPHA2
Auto Pequeño	0.450	1.800	3500.000	1.000	1.160
Auto Mediano	0.500	2.080	3000.000	1.000	1.160
Auto Grande	0.450	2.200	3300.000	1.000	1.160
Utilitario	0.460	2.720	3600.000	0.950	1.160
Autobús	0.650	9.000	2100.000	0.950	1.150
Camión Ligero Gasolina	0.700	3.636	3300.000	0.950	1.150
Camión Ligero Diesel	0.700	3.250	2600.000	1.000	1.150
Camión Liviano (dos ejes)	0.850	5.700	1800.000	1.000	1.150
Camión Pesado (tres ejes)	0.850	5.200	1800.000	1.000	1.150
Camión Articulado	0.630	8.640	1600.000	0.900	1.150
VEHTIPO	NT	VOL	RREC	NRO	TWTO
Auto Pequeño	4	0.00	0.150	0.000	0.000
Auto Mediano	4	0.00	0.150	0.000	0.000
Auto Grande	4	0.00	0.150	0.000	0.000
Utilitario	4	0.00	0.300	0.000	0.000
Autobús	10	6.85	0.340	2.390	0.164
Camión Ligero Gasolina	6	4.33	0.380	0.930	0.164
Camión Ligero Diesel	6	4.33	0.150	0.930	0.164
Camión Liviano (dos ejes)	6	7.60	0.300	3.390	0.164
Camión Pesado (tres ejes)	10	7.30	0.150	2.390	0.164
Camión Articulado	10	8.39	0.300	3.570	0.164

VEHTIPO	CTC	KP	CPO	CPQ	QIPO
Auto Pequeño	0.000	0.308	32.490	13.700	120.000
Auto Mediano	0.000	0.308	32.490	13.700	120.000
Auto Grande	0.000	0.308	32.490	13.700	120.000
Utilitario	0.000	0.308	32.490	13.700	120.000
Autobús	12.780	0.483	1.770	3.560	190.000
Camión Ligero Gasolina	12.780	0.371	1.490	251.790	0.000
Camión Ligero Diesel	12.780	0.371	1.490	251.790	0.000
Camión Liviano (dos ejes)	12.780	0.371	1.490	251.790	0.000
Camión Pesado (tres ejes)	12.780	0.371	8.610	35.310	0.000
Camión Articulado	12.780	0.371	13.940	15.650	0.000
VEHTIPO	CLO	CLP	CLQ	COO	FRATIO0
Auto Pequeño	77.140	0.547	0.000	1.550	0.268
Auto Mediano	77.140	0.547	0.000	1.550	0.268
Auto Grande	77.140	0.547	0.000	1.550	0.268
Utilitario	77.140	0.547	0.000	1.550	0.221
Autobús	293.440	0.517	0.005	3.070	0.233
Camión Ligero Gasolina	242.030	0.519	0.000	2.200	0.253
Camión Ligero Diesel	242.030	0.519	0.000	2.200	0.253
Camión Liviano (dos ejes)	242.030	0.519	0.000	3.070	0.292
Camión Pesado (tres ejes)	301.460	0.519	0.000	3.070	0.292
Camión Articulado	652.510	0.519	0.000	5.150	0.179
VEHTIPO	FRATIO1	ARVMAX	BW	BETA	E0
Auto Pequeño	0.000	259.70	1.000	0.274	1.003
Auto Mediano	0.000	259.70	1.000	0.274	1.003
Auto Grande	0.000	259.70	1.000	0.274	1.003
Utilitario	0.000	239.70	1.000	0.306	1.004
Autobús	0.000	212.80	1.000	0.273	1.012
Camión Ligero Gasolina	0.128	194.00	1.000	0.304	1.008
Camión Ligero Diesel	0.128	194.00	1.000	0.304	1.008
Camión Liviano (dos ejes)	0.094	177.70	1.000	0.310	1.013
Camión Pesado (tres ejes)	0.094	177.70	1.000	0.310	1.013
Camión Articulado	0.023	130.90	1.000	0.244	1.018

VEHTIPO	A0	A1	A2	A3	A4
Auto Pequeño	-8201.00	33.40	0.000	5630.000	0.000
Auto Mediano	23453.00	40.60	0.010	7775.000	0.000
Auto Grande	-23705.00	100.80	0.000	2784.000	0.938
Utilitario	6014.00	37.60	0.000	3846.000	1.398
Autobús	-7276.00	63.50	0.000	4323.000	0.000
Camión Ligero Gasolina	-48381.00	127.10	0.000	5867.000	0.000
Camión Ligero Diesel	-41803.00	71.60	0.000	5129.000	0.000
Camión Liviano (dos ejes)	-22955.00	95.00	0.000	3758.000	0.000
Camión Pesado (tres ejes)	-22955.00	95.00	0.000	3758.000	0.000
Camión Articulado	-30559.00	156.10	0.000	4002.000	0.000
VEHTIPO	A5	A6	A7	NHO	
Auto Pequeño	0.00	4460.00	0.000	-10.000	
Auto Mediano	0.00	6552.00	0.000	-12.000	
Auto Grande	13.91	4590.00	0.000	-15.000	
Utilitario	0.00	3604.00	0.000	-12.000	
Autobús	8.64	2479.00	11.500	-50.000	
Camión Ligero Gasolina	43.70	3843.00	0.000	-50.000	
Camión Ligero Diesel	0.00	2653.00	0.000	-30.000	
Camión Liviano (dos ejes)	19.12	2394.00	13.760	-85.000	
Camión Pesado (tres ejes)	19.12	2394.00	13.760	-85.000	
Camión Articulado	4.41	4435.00	26.080	-85.000	

**CIUDAD DE MEXICO**

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx