Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Caracterización del Flujo Vehicular en Autopistas

Informe de Proyecto Final
para optar al grado de
Licenciatura en Ingeniería Civil

Realizado por:
Alejandro José Solano Jiménez

Febrero, 99

Dedicatoria

A mis papás un
ejemplo de dedicación, trabajo y honestidad.

A mis hermanos: Gus, Iva y Silvia.

Agradecimiento

Al Ing. Jorge Picado A., Director de Proyecto de Graduación,
por su guía constante para llevar a feliz término el presente trabajo

A la Ing. Hadda Muñoz S. y al Ing. Junior Araya, asesores del proyecto, por la ayuda brindada.

A mis compañeros y amigos, que de una u otra forma
siempre estuvieron dispuestos a brindarme su colaboración y ayuda.

Caracterización del Flujo Vehicular en Autopistas
Resumen

El presente estudio caracteriza y modela el flujo vehicular presente en las autopistas costarricenses, representadas en este caso por las autopistas General Cañas, Florencio del Castillo y Próspero Fernández. Los resultados obtenidos toman en cuenta únicamente los vehículos livianos y no se detallan según el carril correspondiente, sin embargo ilustran de manera general el comportamiento del tránsito vehicular.

Con los conteos de vehículos realizados en cada autopista se hacen pruebas de Chi cuadrado con la distribución de Poisson para determinar si el flujo es o no aleatorio, en cada una de las tres autopistas, para un nivel de confianza del 95%.

En la Autopista General Cañas se presenta flujo aleatorio para volúmenes bajos, mientras que los volúmenes medios y altos no se ajustan a la distribución de Poisson.

En la Autopista Florencio del Castillo ocurre algo similar a la General Cañas, pero el flujo aleatorio se da incluso con volúmenes medios. Los flujos altos no presentan un comportamiento según la distribución de Poisson.

En la Autopista Próspero Fernández el flujo aleatorio predomina en volúmenes bajos y medios e incluso en algunos casos de volúmenes altos.

Como parte de la caracterización del flujo vehicular se ajustaron curvas para las relaciones Flujo-Densidad, Velocidad-Flujo y Velocidad-Densidad para las tres autopistas seleccionadas. De las curvas obtenidas se selecciona la o las que mejor describan el comportamiento del tránsito observado en el campo.

Para los ajustes de las curvas se realizaron, para cada una de las relaciones en cada autopista, varios tipos de regresiones, a saber, ajustes logarítmicos, exponenciales, cuadráticos y lineales.

El flujo en la Autopista General Cañas es descrito por curvas cuadráticas para las relaciones de Velocidad-Flujo y Flujo-Densidad y una relación cercana a la lineal para la relación Velocidad-Densidad, tal y como se describe en la literatura consultada.

Para el flujo en las autopistas Florencio del Castillo y Próspero Fernández, no se lograron curvas completas, ya que los aforos realizados no se lograron conteos cercanos a la saturación de la vía. Las relaciones se ajustan a curvas lineales, exponenciales y logarítmicas.

La Autopista Próspero Fernández es la que presenta la capacidad teórica mayor de las tres autopistas estudiadas. Con una capacidad teórica un poco menor está la Autopista Florencio del Castillo y finalmente, con la capacidad menor de las tres autopistas, la autopista General Cañas, con aproximadamente 2800 vehículos livianos por hora.

No es posible proponer una única curva que represente el comportamiento del flujo vehicular en las tres autopistas, sino que debe realizarse un estudio individual, dado el número de factores que en forma distinta se presentaron en cada una de ellas.

Ing Jorge Picado A
Director de Proyecto de Graduación

Índice

Capítulo I

1.1 Introducción 1
1.2 El proyecto específico y su importancia 2
1.3 Objetivos, alcances y limitaciones 4
1.4 Antecedentes 5

Capítulo II

2.1 Introducción 6
2.2 Medidas en un punto 7
2.2.1 Flujo 7
2.2.2 Velocidad 8
2.2.3 Densidad en el punto de medición 10
2.3 Modelos básicos del flujo vehicular 11
2.3.1 Modelo lineal 12
2.3.2 Modelos no lineales 16
2.3.2.1 Modelo logarítmico 16
2.3.2.2 Modelos exponenciales 17
2.3.2.3 Otros modelos 18

Capítulo III

3.1 Descripción probabilística del flujo vehicular 19
3.1.1 Distribución de Poisson 20
3.1.1.1 Cálculo de la distribución de Poisson 22

Capítulo IV

4.1 Autopistas 23
4.1.1 Componentes principales de una autopista 24
4.1.2 Tramos básicos de autopistas 25
4.1.2.1 Características básicas 25

Capitulo V

5.1 Tramos representativos 28

5.1.1 Descripción de los tramos 28

5.2 Métodos de medición 29

5.2.1 Determinación de la velocidad 30

5.2.1.1 Método del vehículo flotante 30

5.2.1.2 Método del radármetro 30

5.2.1.3 Determinación del flujo 31

5.2.1.4 Determinación de la densidad 31

5.2.1.5 Prueba de Chi cuadrado 31

5.3 Determinación de las curvas características 32

Capítulo VI

6.1 Autopista General Cañas 33

Cuadro 6.1.1 33
Gráfico 6.1.1 34
Gráfico 6.1.2 34
Cuadro 6.1.2 35
Gráfico 6.1.3 36
Gráfico 6.1.4 36
Cuadro 6.1.3 37
Gráfico 6.1.5 38
Gráfico 6.1.6 38
Cuadro 6.1.4 39

6.1.2 Curvas características 39

Gráfico 6.1.2.1 40
Gráfico 6.1.2.2 40
Gráfico 6.1.2.3 41

6.2 Autopista Florencio del Castillo 42

Cuadro 6.2.1 42
Gráfico 6.2.1 43
Gráfico 6.2.2 43
Cuadro 6.2.2 43
Gráfico 6.2.3 44
Gráfico 6.2.4 44
Cuadro 6.2.3 45
Gráfico 6.2.5 46
Gráfico 6.2.6 46
Cuadro 6.2.4 47

6.2.2 Curvas características 47

Gráfico 6.2.2.1 48
Gráfico 6.2.2.2 49
Gráfico 6.2.2.3 50

6.3 Autopista Próspero Fernández 51

Cuadro 6.3.1 51
Gráfico 6.3.1 52
Gráfico 6.3.2 52
Cuadro 6.3.2 53
Gráfico 6.3.3 53
Gráfico 6.3.4 54
Cuadro 6.3.3 54
Gráfico 6.3.5 55
Gráfico 6.3.6 55
Cuadro 6.3.4 56

6.3.2 Curvas características 57

Gráfico 6.3.2.1 57
Gráfico 6.3.2.2 58
Gráfico 6.3.2.3 58

6.4 Resumen de las pruebas de Chi cuadrado las tres autopistas 59

Cuadro 6.4.1 60

Capitulo VII

Conclusiones y recomendaciones 61

Bibliografía 66

Anexos

Capítulo I

1.1 Introducción

Desde finales de los años 80 hasta el día de hoy, el crecimiento de la flota vehicular y el consecuente congestionamiento de nuestras vías le han dado gran importancia a la Ingeniería de Tránsito.

Por ser Costa Rica un país de recursos limitados, se deben tener prioridades para las inversiones. Los proyectos en el campo del transporte son de los que más recursos exigen por lo que se deben estudiar con detenimiento para lograr su optimización.

En nuestro país se espera que el automóvil continúe dominando la forma de transporte en las áreas urbanas durante los próximos años. La cantidad de personas que trabajan lejos de su casa ha crecido en los últimos años y esto ha provocado un incremento de los recorridos entre las ciudades.

En el capítulo II se expone la relación fundamental del flujo vehicular, relación entre las tres variables principales que lo componen, velocidad, volumen o flujo y densidad. Además se muestran los modelos básicos de tránsito.

En el capítulo III se muestra la distribución probabilística del flujo vehicular y la distribución de Poisson, tan importante en los estudios de tránsito.

En el capítulo IV se introducen los conceptos fundamentales de lo que es una autopista, sus características y elementos principales. Se destacan las características que deben cumplir los segmentos básicos de autopistas.

En el capítulo V se define la metodología empleada en los estudios de campo y en el manejo de los datos obtenidos.

En el capítulo VI se analizan los resultados de las características de cada una de las tres autopistas estudiadas.

Finalmente en el capitulo VII se dan las conclusiones y recomendaciones relacionadas con cada una de las tres vías que se analizaron en el trabajo.

1.2 El proyecto específico y su importancia

En el caso de nuestras autopistas, no sólo los viajes de vehículos livianos han aumentado, sino también los de vehículos pesados que transportan los productos de importación y de exportación, así como el transporte público. Tomando en cuenta estos factores se hace necesario conocer el comportamiento del tránsito vehicular del país en las carreteras.

Las tres características más importantes del tránsito son el flujo, la velocidad y la densidad. Estas tres variables se relacionan para mostrar el comportamiento del flujo vehicular en determinada carretera. Con las relaciones obtenidas de estas variables es posible conocer datos tan importantes como capacidades de las vías y los niveles de servicio con los que operan, conocidos estos datos es posible

determinar el efecto de los niveles de servicio y las medidas compensatorias a aplicar. Por otra parte conocer que el flujo sigue una distribución Poisson nos permite aplicar procesos aleatorios y análisis probabilísticos.

Mediante el análisis de los elementos del flujo vehicular se pueden entender las características y el comportamiento del tránsito, requisitos básicos para el planeamiento, proyecto y operación de carreteras, calles y sus obras complementarias dentro del sistema de transporte. Con la aplicación de las leyes de la física y las matemáticas, el análisis del flujo vehicular describe la forma como circulan los vehículos en cualquier tipo de carretera, lo que permite determinar el nivel de eficiencia con que funcionan.

Uno de los resultados más útiles del análisis del flujo vehicular es el desarrollo de modelos microscópicos y macroscópicos que relacionan sus diferentes variables: el flujo, la velocidad, la densidad y el espaciamiento e intervalo entre vehículos.

En el sistema de carreteras, las autopistas son las vías más relevantes por su capacidad de llevar grandes flujos de tránsito. Desde este punto de vista es importante investigar su funcionamiento y los parámetros que lo determinan con el fin de dar las pautas para el desarrollo de proyectos. Por la importancia que tienen para nuestro país se seleccionaron las autopistas General Cañas, Florencio del Castillo y la autopista Próspero Fernández.

La evaluación de la situación del tránsito en Costa Rica se ha basado en el uso de métodos desarrollados en otros países, entre ellos, Estados Unidos y México. Es importante mencionar que las condiciones que se dan en nuestro país son muy

diferentes. La principal diferencia es la mayor agresividad del conductor costarricense. y para esto es primordial la caracterización del flujo de nuestras autopistas y su modelación estadística, que se relaciona indirectamente con la conducta de quien maneja el vehículo.

1.3 Objetivos, alcances y limitaciones

El objetivo general de este trabajo es el de representar las relaciones de las variables principales del flujo vehicular en las autopistas Florencio del Castillo, General Cañas y Próspero Fernández. Las relaciones son velocidad-volumen, volumen-densidad y velocidad-densidad; además las relaciones se ajustan a curvas representativas.

Otro fin importante de este estudio consiste en comparar las relaciones y curvas obtenidas en campo y las relaciones teóricas esperadas.

Asimismo, se pretende verificar el tipo de flujo presente en las autopistas; ya sea aleatorio, en cuyo caso los procesos de análisis son de tipo estocástico o bien con patrones establecidos, con lo que los análisis son de tipo determinístico. Las condiciones prevalecientes se dan con diferentes volúmenes: bajos, medios y altos. Con estos datos se pretende obtener, de forma aproximada, una comparación entre las capacidades de cada una de las tres autopistas seleccionadas.

Para este estudio de flujo vehicular en autopistas no se consideró el efecto de los vehículos pesados, únicamente se tomaron en cuenta los vehículos livianos. Por otra parte, no se presenta una distribución por carril porque al no incluir los pesados en la composición vehicular el efecto es casi nulo.

El estudio se limita a las condiciones y a la información recolectada en los tramos seleccionados y se utiliza la información que se considere representativa, además los resultados son representativos de las condiciones que imperen en el momento del estudio.

1.4 Antecedentes

Los estudios existentes en el campo del comportamiento del tránsito en autopistas se refieren a la capacidad y factores que la afectan. Estos estudios se realizaron para autopistas y para carreteras de dos carriles en los años ochenta. Cada uno de estos estudios hace referencia a métodos de medición de velocidad y flujos de tránsito.

El Ing. Fernando Miranda presenta en su tesis de grado una metodología para la determinación de la capacidad en carreteras urbanas. En este estudio se presentan las curvas que relacionan las variables del flujo vehicular para radiales y para un segmento de la autopista General Cañas, todo realizado en 1984.

El Ing. Arturo Muñoz realizó un estudio sobre el efecto de las pendientes en las autopista. En esta tesis muestra la metodología para el levantamiento de datos en campo, la velocidad y el flujo. Además muestra los modelos que caracterizan el flujo vehicular. El trabajo lo realizó en 1987.

Estudios que se refieran específicamente a modelar el comportamiento del flujo vehicular en nuestras autopistas no se han realizado.

Capítulo II

2.1 Introducción

La demanda de tráfico es muy variable, ella cambia según el mes del año, el día de la semana, la hora del día y hasta en los intervalos subhorarios de una misma hora. Estas variaciones son importantes si se pretende que las carreteras soporten de forma eficaz las demandas pico sin que se produzca su colapso.

Las tres características más importantes del tránsito son el flujo o volumen, la velocidad y la densidad o concentración. Antes de intentar modelar estas características es esencial definirlas sin que queden dudas. Sin embargo, las definiciones están muy relacionadas con el método de medición, así como con la forma en que se promedian las mediciones.

Los únicos instrumentos que tenían los primeros estudiantes del comportamiento del tránsito eran cronómetros y contadores manuales. Por esto, flujos en un punto e intersecciones eran las medidas importantes. Estos datos se suplementaban con mediciones de velocidad que se hacían tomando el tiempo que tardaba un vehículo en recorrer un tramo específico. Conforme han evolucionado los métodos de medición, se ha hecho evidente que los resultados numéricos dependen del método de medición.

2.2 Medidas en un punto

Por las limitaciones que enfrentaban los primeros ingenieros de tránsito, de equipo principalmente, las medidas puntuales que ellos obtenían eran las más importantes y con las únicas que se contaba para tomar las decisiones. Aún hoy muchas decisiones se basan en datos obtenidos en un punto. Para que los datos recogidos en un punto sean utilizables deben tomarse por largos periodos de tiempo, por lo tanto todas las características se expresan en promedios.

2.2.1 Flujo

El ingeniero de tránsito ha utilizado la medida de volumen o flujo como la primera variable para tener idea de la condición existente del tráfico. Esto ha sido así porque el flujo o volumen es la característica más sencilla de obtener. La siguiente ecuación describe al flujo

$$q = N / T$$

donde N es el número de automóviles que pasan por una línea imaginaria en un tiempo T.

En la práctica de ingeniería de tránsito es común que se inicie el conteo en intervalos enteros, como al inicio de una hora o bien al inicio de un periodo de 15 minutos.

De manera general los datos de volúmenes de tránsito se utilizan mayormente en los siguientes campos:

1. Planeación: clasificación de redes de carreteras, estimación de cambios de volúmenes, modelos de distribución de tránsito, análisis económicos y estimaciones de consumo de combustibles.
2. Proyecto: aplicación a normas de proyecto geométrico, requerimientos de nuevas carreteras, análisis estructurales de superficies de rodamiento.
3. Ingeniería de tránsito: Análisis de capacidad y niveles de servicio, caracterización de flujos vehiculares, zonificación de velocidades y ubicación de dispositivos de control.
4. Seguridad: cálculo de índices de accidentes y evaluación de mejoras por seguridad.
5. Investigación: nuevas metodologías sobre capacidad y estudios sobre medio ambiente y energía.

2.2.2 Velocidad

La velocidad se define como la relación entre el espacio recorrido y el tiempo que se tarda en recorrerlo y para un vehículo representa su relación de movimiento. La velocidad promedio es una medida importante del comportamiento del tránsito en un punto particular o a lo largo de una ruta específica, además es una de las características fundamentales del flujo vehicular. Existen dos velocidades promedio principales, velocidad promedio en el tiempo y velocidad promedio en el espacio. Desafortunadamente, en los inicios de la ingeniería de tránsito existió confusión en el uso de estas dos velocidades promedio.

Velocidad promedio en el tiempo (Velocidad puntual)

Generalmente se acostumbra reportar la velocidad puntual de un sitio particular. Esto se calcula como la media aritmética para las velocidades observadas:

$$u_t = u_{punt} = 1/N \sum u_i$$

Velocidad promedio en el espacio

Se puede considerar una situación en la que tres autos recorren una distancia D a 20 KPH, a 40 KPH y a 60 KPH. En algún punto a lo largo de D la velocidad puntual sería el promedio de las tres, es decir, 40 KPH. En este caso nos interesa la velocidad calculada a partir del tiempo promedio de viaje. El tiempo promedio de viaje es:

$$t = 1/3 \, (D/20 + D/40 + D/60) = 1/N \sum D/u_i$$

La velocidad que representa este tiempo de viaje es:

$$u_s = D/t = 1 \, / \, (1/N \sum 1/u_i)$$

La velocidad promedio para los tres autos sería:

$$1/(1/3 \, (1/20 + 1/40 + 1/60)) = 32.7 \text{ KPH}$$

Se nota que la velocidad promedio en el espacio es menor que la velocidad promedio en el tiempo.

2.2.3 Densidad en el punto de medición

La densidad significa la cantidad de vehículos que se encuentran en determinado momento a lo largo de cierta distancia. Esta característica del tránsito es muy difícil de medir por lo que normalmente se estima usando la relación fundamental del flujo.

Otras variables complementarias que ayudan a caracterizar el flujo son:

Velocidad media instantánea (v_t): es el promedio de las velocidades de los vehículos que atraviesan una determinada sección en un intervalo dado de tiempo, denominado intervalo de muestreo.

El intervalo entre vehículos (τ): se expresa en forma bruta o neta dependiendo de si se considera al vehículo como punto o si se toma en cuenta su longitud. Se expresa en unidades de tiempo.

La separación entre vehículos (δ): puede medirse en forma bruta o neta, se expresa en unidades de longitud.

Tiempo de recorrido (t_r): es el tiempo que se requiere para recorrer una distancia determinada pero relativamente grande, del orden del kilómetro.

Tiempo unitario de recorrido (t_u): es el tiempo que el vehículo consume en recorrer una distancia unitaria, que puede ser un metro o un kilómetro por ejemplo.

Longitud del recorrido (x): distancia seleccionada de recorrido. Una variable de referencia.

Recientemente se ha introducido una variable nueva, la ocupancia, que se puede relacionar aproximadamente con la densidad. La ocupancia es una medida relativa de la porción del tiempo en que un tramo determinado está ocupado por los vehículos.

2.3 Modelos básicos del flujo vehicular

(Tomado de Ingeniería de Tránsito, Rafael Cal y Mayor, ref. 2)

La ecuación fundamental del flujo vehicular es

$$q = v * k$$

donde q es el flujo, v es la velocidad y k es la concentración o densidad.

Si se establece una relación entre dos de estas tres variables, la relación de esas dos con la tercera determina la ecuación anterior. Evidentemente las posibles combinaciones son velocidad-densidad, flujo-densidad y velocidad-flujo. La variable más fácil de determinar es el volumen o flujo, luego la velocidad y finalmente la densidad. Por esta razón se considera usualmente a la densidad como la variable dependiente.

Uno de los objetivos que busca el ingeniero de tránsito es el de optimizar la operación de los sistemas de tránsito existentes y el de intervenir en el desarrollo de eficientes sistemas viales futuros. Entonces la optimización de tránsito significa la selección de las mejores condiciones de operación, sujeto a las habilidades del sistema o recursos y a las restricciones del usuario y del ambiente.

En general los modelos del flujo vehicular se clasifican en dos grandes clases: microscópicos y macroscópicos. Los modelos microscópicos consideran los espaciamientos y las velocidades individuales de los vehículos, con base en la teoría del seguimiento vehicular. Los modelos macroscópicos describen la operación vehicular en términos de sus variables de flujo, generalmente tomadas como promedios.

Los esfuerzos en tratar de relacionar las distintas parejas de variables principales del flujo vehicular se han basado en tomas de datos y ajuste simple a curvas o regresión, en métodos deductivos a partir de condiciones límite o de frontera y en analogías físicas. Estas formas de aproximar el fenómeno del tránsito han dado como resultado el desarrollo de modelos macroscópicos los que suponen un movimiento homogéneo o condiciones de flujo estacionario y describen las características generales de la corriente vehicular.

2.3.1 Modelo Lineal

B.D. Greenshields realizó una de las primeras investigaciones sobre el comportamiento del flujo vehicular donde estudió la relación entre la velocidad y la

densidad. Utilizó un conjunto de datos de velocidades y densidades (v,k) para diferentes condiciones del tránsito y propuso una relación lineal entre las dos variables. Con ajuste por el método de mínimos cuadrados llegó al modelo lineal siguiente:

$$\mathbf{V_e = V_l - (V_l/k_c) * k}$$

Donde V_e es la velocidad espacial (km./h)

k es la densidad (veh/km./carril)

V_l es la velocidad media espacial a flujo libre (km./h)

k_c es la densidad de congestionamiento (veh/km./carril)

En general, la velocidad disminuye al aumentar la densidad, desde un valor máximo o velocidad de flujo libre, hasta un valor mínimo donde la densidad alcanza valor máximo o de congestionamiento.

En la práctica la densidad nunca toma el valor de cero, por lo que para que se dé la velocidad a flujo libre debe haber al menos un vehículo sobre la carretera circulando a esa velocidad. En esta condición la densidad es muy baja porque el vehículos o los vehículos circulan libremente a la velocidad límite o a la que les permita la carretera. El caso contrario es cuando se presenta el congestionamiento, los vehículos están detenidos unos detrás de los otros y la densidad adquiere sus valores máximos.

En el diagrama de velocidad-densidad el flujo q se puede representar como el producto de la velocidad por la densidad, y es el área del rectángulo que tiene como base la densidad y como altura la velocidad.

La relación entre el flujo y la densidad se obtiene así:

$$q = V * k = (V_l - (V_l/k_c) * k) * k$$

$$q = V_l * k - (V_l/k_c) * k^2$$

Esta expresión muestra al flujo q como una función parabólica de la densidad k, por lo tanto la ecuación es la de una parábola.

Por definición se quiere que cuando la densidad sea cercana a cero el flujo o volumen también se aproxime a cero, lo que representa las condiciones de operación a flujo libre. De la misma forma, cuando la densidad es máxima los vehículos están unos tras de otros, de manera que no avanzan y el flujo tiende a cero.

Entre los dos puntos extremos existen muchos intermedios de los que destacan el punto de flujo máximo y el de densidad máxima y flujo cero que indica que no hay velocidad porque los vehículos están totalmente detenidos en congestionamiento total. En el gráfico la velocidad se representa por la pendiente del vector dirigido desde el origen hasta cualquier punto sobre la curva. El valor de la velocidad de

flujo libre depende de las características del conductor, del tipo de automóvil, de la geometría de la vía y de factores como la iluminación, el estado del tiempo y del estado de la carretera.

La relación entre la velocidad y el flujo se obtiene de la siguiente expresión:

$$k = k_c - (k_c/V_l) * V_e$$

$$V_e = V_l/2 \pm ((V_l^2 - 4 * (V_l/k_c) * q)^{1/2})/2$$

Esta última ecuación indica que la relación que existe entre la velocidad y el flujo es parabólica, donde un valor del flujo tiene asociados dos valores de velocidad. A medida que el flujo aumenta a velocidad de flujo libre la velocidad va disminuyendo. Entonces conforme el flujo se aproxime a la capacidad, la dinámica del flujo vehicular causa que se reduzca por debajo de la capacidad con velocidades correspondientes a la parte inferior de la curva, indicando así que la operación ocurre en un nivel de congestión.

Un diagrama fundamental es donde aparecen las tres relaciones básicas que permite rescatar la interrelación de cada una de ellas, en la práctica cada una tiene un uso particular.

La relación velocidad-densidad es el punto de partida de la mayoría de los modelos o enfoques teóricos del flujo vehicular porque para un valor de densidad existe un único valor de velocidad, esto no ocurre con las otras dos relaciones.

La relación flujo-densidad es la base para el control del tránsito en autopistas, porque la densidad se expresa en términos del porcentaje de ocupación de tramos específicos en determinado momento.

La relación velocidad-flujo se utiliza principalmente para estimar los niveles de servicio, según la velocidad.

2.3.2 Modelos no lineales

Estudios relacionados con el flujo vehicular han revelado que no siempre existe una correlación lineal entre la velocidad y la densidad. En casos de este tipo es necesario hacer los ajustes con otros modelos que tomen en cuenta la línea de tendencia de los datos. Para esto se mencionan los modelos macroscópicos clásicos con sus respectivas ecuaciones que relacionan las tres variables, el flujo, la velocidad y la densidad.

2.3.2.1 Modelo logarítmico

Este modelo se apoya en la analogía hidrodinámica, H. Greenberg combina las ecuaciones de movimiento y continuidad de los fluidos compresibles y cuando las aplica al flujo vehicular obtiene las siguientes relaciones:

$$V_e = V_m * \ln (k_c/k)$$

$$q = V_m * k * \ln (k_c/k)$$

Este modelo se ajusta bien especialmente a flujos congestionados, pero no funciona bien a bajas densidades, esto porque cuando la densidad k tiende a cero la velocidad puede ser tan grande que puede llegar a ser infinita, que sería la condición a flujo libre.

2.3.2.2 Modelos exponenciales

Interesado por el análisis del tránsito a flujo libre, R. T. Underwood formuló el siguiente modelo exponencial.

$$V_e = V_l * e^{-k/km}$$

$$q = V_l * k * e^{-k/km}$$

El modelo no representa la situación donde la velocidad es igual a cero para altas densidades, que es la condición de congestionamiento. Entonces los parámetros del modelo son la densidad a flujo máximo y la velocidad a flujo libre.

Para las condiciones de flujo máximo tenemos:

$$V_m = V_l * e^{-Km/km}$$

Donde

$$V_m = V_l/e$$

El valor de flujo máximo es:

$$q_m = V_m * k_m = V_l * k_m/e$$

2.3.2.3 Otros modelos

L. A. Pipes y P. K. Munjal obtuvieron modelos de la forma siguiente:

$$V_e = V_l * ((1 - (k/kc)^n)$$

Donde n es un número real mayor que cero. Cuando n es uno obtenemos el modelo lineal. D. R. Drew propuso este modelo parabólico:

$$V_e = V_l * ((1 - (k/kc)^{0.5})$$

Capítulo III

3.1 Descripción Probabilística del Flujo Vehicular
(Basado en Ingeniería de Tránsito, Rafael Cal y Mayor, ref.2)

Si los vehículos que circulan por una carretera se encontraran siempre espaciados uniformemente sería muy fácil determinar el flujo y los distintos niveles de congestionamiento. Sin embargo los vehículos normalmente no circulan a intervalos uniformes, sino que viajan en grupos o pelotones con intervalos promedio para cada uno, reflejando concentraciones vehiculares que se mueven en forma de ondas a lo largo del tiempo. En situaciones más cercanas a la realidad los vehículos viajan en forma completamente dispersa.

Todos los enfoques que intentan tener en cuenta la heterogeneidad del flujo suponen que el patrón de paso de los vehículos es un proceso aleatorio. Para muchos problemas de ingeniería de tránsito es útil describir el flujo vehicular conservando algunas de sus características discretas, considerando así los aspectos probabilísticos de su comportamiento.

Para determinar la distribución de probabilidad que representa mejor un flujo vehicular es necesario que cumpla tres condiciones:

1. Cada conductor sitúa su vehículo independientemente de los demás, excepto cuando su espaciamiento es muy pequeño.

2. Para cualquier flujo el número de vehículos que pasan por un punto en un intervalo de tiempo es independiente del número de vehículos que pasan por otro punto durante el mismo intervalo de tiempo.
3. El número de vehículos que pasan por un punto dado en un intervalo de tiempo dado es independiente del número de vehículos que pasan por ese mismo punto en otro intervalo de tiempo.

Los supuestos anteriores son los que utiliza la distribución de Poisson, que tiene aplicación para volúmenes bajos y medios.

3.1.1 Distribución de Poisson

Tradicionalmente los ingenieros han usado fórmulas o leyes para describir comportamiento de los sistemas físicos. Aunque todos los sistemas físicos presentan aleatoriedad en su comportamiento, los análisis de los ingenieros tratan al sistema como determinístico, no aleatorio. En la situación de tráfico de automóviles, es muy importante el comportamiento individual, que de por si es el que el observador cuantifica, y se debe poner especial atención a las propiedades aleatorias.

Los ingenieros usan las distribuciones de probabilidad de dos formas: análisis de datos en comportamientos observados y predicción del comportamiento futuro. El análisis de los datos se realiza ajustándolos a una distribución. Cuando la experiencia ha mostrado que determinada distribución es aplicable a un fenómeno físico particular entonces esa distribución puede ser usada para predecir las frecuencias de varias condiciones futuras.

Un estudio teórico de las condiciones que afectan el tránsito de vehículos en una autopista requiere el uso constante de la teoría de probabilidad. Por un lado la distribución de los vehículos en un carril es al azar, por otro lado cuando se estudia el comportamiento de un gran número de individuos se parte de leyes que se aplican a su totalidad y son encontradas por análisis estadísticos que siguen ciertos patrones empíricos y relativamente estables.

Una herramienta para manejar las condiciones del tránsito es la distribución de Poisson, llamada así por Simeón Denis Poisson, un matemático francés que realizó los primeros estudios sobre probabilidad. Como todas las distribuciones, Poisson tiene limitaciones en su aplicación y otras distribuciones pueden proporcionar mayor exactitud en algunos casos. La distribución de Poisson se puede aplicar a poblaciones con las siguientes propiedades:

1. La probabilidad de ocurrencia de los individuos con una característica particular es baja
2. La característica particular es una variable discreta

La ley de Poisson ha sido el principal instrumento para lidiar con los problemas de tránsito en autopistas de dos y tres carriles, especialmente en problemas de la distribución del tránsito en el tiempo y en el espacio.

Los resultados que se obtienen usando esta distribución concuerdan con las observaciones reales cuando la concentración vehicular es baja, por ejemplo unas

cuantas decenas de vehículos, pero varían de la realidad cuando los valores de concentración de vehículos es mayor.

3.1.1.1 Cálculo de la distribución de Poisson

El siguiente es un procedimiento por pasos para la determinación de las probabilidades para la distribución de Poisson.

1. Determinación del parámetro m. este valor es el número promedio de ocurrencias. Se pueden determinar de datos observados o de datos asumidos.

   M = Total de eventos observados / Total de intervalos de tiempo

2. Una vez calculado m, la probabilidad de que **x** eventos ocurran durante un intervalo de tiempo se calcula así:

$$\mathbf{P(x) = m^x e^{-m}/x!}$$

A cada uno de los eventos le corresponderá una probabilidad de ocurrencia.

Capítulo IV

4.1 AUTOPISTAS

Se puede definir una autopista como una infraestructura vial que consta de calzadas separadas cada una con dos o más carriles dedicada exclusivamente al tráfico de automóviles y teniendo un control total de acceso y salida.

La autopista es el único tipo de carretera que proporciona un flujo totalmente continuo. No existen interrupciones externas a la circulación, como intersecciones con semáforos o controladas con alto. El acceso y salida desde la carretera se producen únicamente en los ramales, que están generalmente proyectados para permitir las maniobras de confluencia y bifurcación a altas velocidades, evitando o minimizando las alteraciones al tráfico de la vía principal.

Debido a estas características las condiciones operativas se deben fundamentalmente a la interacción de los vehículos de la corriente, entre los vehículos de la corriente y las características geométricas de la vía. Las operaciones también quedan afectadas por las condiciones ambientales, clima, condiciones del pavimento y la presencia de incidentes de tránsito.

4.1.1 Componentes principales de una autopista (según Manual de Capacidad de Carreteras, ref. 3)

En general una autopista se compone de tres tipos diferentes de secciones:

1. Segmentos básicos de autopista: son secciones de la autopista que no son afectados por ni por los movimientos de confluencia o bifurcación en ramales cercanos ni por movimientos de trenzado.

2. Áreas de trenzado: son secciones de la autopista donde dos o más corrientes de tránsito deben cruzarse entre sí a lo largo de un tramo de ella. Las áreas de trenzado se forman normalmente cuando las zonas de confluencia van seguidas a corta distancia por zonas de divergencia. También se forman cuando un ramal de entrada a la autopista va seguido por un ramal de salida y los dos quedan conectados por un carril auxiliar continuo.

3. Intersecciones con ramal: son puntos en los que los ramales de entrada o de salida se unen con la autopista. La unión formada en este punto es un área turbulenta debido a las concentraciones de vehículos que confluyen o divergen ahí.

Los segmentos básicos de autopista están situados fuera del área de influencia de los ramales y áreas de trenzado. El área de influencia de una unión con ramal o un área de trenzado puede definirse así:

1. Ramales de entrada: 150 metros corriente arriba y 750 metros corriente abajo de la unión con el ramal.

2. Ramales de salida: 750 metros corriente arriba y 150 metros corriente abajo de la unión con el ramal.

3. Áreas de trenzado: 150 metros corriente arriba del punto de confluencia que marca el inicio del área de trenzado y 150 metros corriente abajo de punto de divergencia formado por el final del área de trenzado.

4.1.2 Tramos básicos de autopistas (Según Manual de Capacidad de Carreteras, ref. 3)

4.1.2.1 Características básicas

Los tramos básicos de autopistas son secciones de dos o más carriles por sentido con control total de accesos que no son afectados ni por los movimientos de convergencia o divergencia en rampas de enlace cercanas ni por movimientos de entrecruzamientos. Además que no son afectados por paradas de buses ni peajes.

Las características básicas se estiman para estas condiciones ideales:

- Carriles con anchura mínima de 3,60 metros.
- Distancias laterales libres de obstáculos de 1,80 metros como mínimo, medidas desde el borde de la calzada hasta el obstáculo u objeto. Ciertos tipos de

barreras situadas en la faja separadora no representan un obstáculo aunque estén a una distancia del borde del pavimento inferior a 1,80 metros.

- Todos los vehículos de la corriente de tránsito son vehículos livianos (automóviles).
- El conductor característico es el de un día laborable.

Cualquier condición prevaleciente (real) que difiera de la ideal ocasionará cambios en la capacidad y los niveles de servicio. Los factores que afectan a la circulación en condiciones ideales son:

1. Anchura de carril y obstáculos laterales: cuando las anchuras son inferiores a 3,60 metros los conductores se ven forzados a viajar guardando entre ellos una distancia lateral inferior a la deseada. Los conductores tienden a compensar el problema dejando espacios mayores entre los vehículos del mismo carril. De la misma forma, cuando existen obstáculos laterales demasiado cercanos al borde de la calzada los conductores tienden a alejarse de ellos, esto tiene el mismo efecto que el de un carril estrecho, obligando a los conductores a viajar uno más cerca del otro en sentido lateral y más alejados con respecto a los demás en el mismo carril. Cuando los espaciamientos e intervalos entre vehículos son mayores para una velocidad dada, la tasa de flujo y la capacidad decrecen.

2. Velocidad de proyecto reducida: la reducción de la velocidad de proyecto a valores inferiores a 112 KPH tiene un gran impacto en la operación del tránsito. Como los trazados más restrictivos requieren una mayor atención por pare del conductor las velocidades reales para cualquier volumen serán generalmente

inferiores a las existentes en segmentos similares con velocidad de proyecto de 112 KPH.

3. Camiones, autobuses y vehículos recreativos: la presencia de otros vehículos diferentes a los vehículos livianos afecta el flujo de dos maneras, estos vehículos son más grandes que los livianos, y por lo tanto ocupan más espacio y las características de operación, aceleración, desaceleración posibilidad de mantener una velocidad, etc., son generalmente inferiores a las de los vehículos livianos.

4. Características de la población de conductores: cualquier otro tipo de conductor que no viaje habitualmente en días laborales, no presentan las mismas características. Esto significa, conductores que viajan los domingos en plan de recreación, operan con menos eficiencia.

Capítulo V

5.1 Tramos representativos

Para iniciar el estudio del flujo vehicular en las autopistas primero se deben establecer los sitios más convenientes para levantar la información respectiva. Con este fin se recorren cada una de las tres autopistas seleccionadas, Florencio del Castillo, General Cañas y Próspero Fernández. Los tramos seleccionados presentan condiciones similares, como mínima pendiente y número y ancho de carril. Los tramos se seleccionaron tomando en cuenta las condiciones ideales mencionadas en el Capítulo IV. Además los tramos elegidos presentan pendientes muy bajas y un trazado muy regular.

5.1.1 Descripción de los tramos

En la autopista Florencio del Castillo el tramo escogido va desde el puente peatonal en San Diego de Tres Ríos hasta la rampa de salida en Lomas de Ayarco. Este tramo es de aproximadamente 2,0 kilómetros de longitud, a lo largo de la sección se encuentra solamente una parada de autobuses que no afecta considerablemente el flujo de los vehículos.

En la autopista General Cañas el tramo elegido va desde el puente del Conservatorio Castella hasta el puente Francisco J. Orlich en el cruce a San Antonio de Belén. El

tramo es de aproximadamente 2,5 kilómetros de longitud y existe una parada de autobuses a lo largo del recorrido que no afecta el flujo en mayor grado.

En la autopista Próspero Fernández el tramo seleccionado va desde la intersección de Multiplaza hasta el peaje. El recorrido es de aproximadamente 2 kilómetros. En dicha sección hay una parada de autobuses que cuenta con el espacio suficiente para no interferir el paso de los demás vehículos.

Los tramos en cada una de las autopistas presentan características similares para efectos de comparaciones posteriores.

5.2 Métodos de medición

Los métodos de medición de las variables fundamentales del flujo vehicular fueron diferentes para la autopista Florencio del Castillo y las autopistas General Cañas y Próspero Fernández. En cuanto al conteo de vehículos livianos la metodología fue la misma, pero para estimar la velocidad se utilizó el vehículo flotante para la autopista Florencio del Castillo y el radármetro para las autopistas General Cañas y Próspero Fernández.

5.2.1 Determinación de la Velocidad

Para cada grupo de vehículos se asigna una velocidad promedio determinada por uno de los siguientes métodos.

5.2.1.1 Método del Vehículo Flotante

Se utiliza un vehículo de prueba dentro de la corriente a lo largo del tramo seleccionado. El recorrido se hace siguiendo el comportamiento de los vehículos que rodean al de prueba, es decir, que el vehículo de prueba debe realizar las mismas maniobras que realicen los demás vehículos.

El método consiste en tomar el tiempo que tarda el vehículo en recorrer el tramo elegido, la longitud del tramo se divide por el tiempo de recorrido y obtenemos así la velocidad en ese tramo de autopista.

5.2.1.2 Método del Radármetro

Este instrumento indica directamente la velocidad del vehículo por medio del principio Doppler, aplicado a las ondas de radio. Las ondas emitidas por el instrumento son reflejadas por los vehículos a diferente frecuencia hasta el receptor. Este cambio de frecuencia es proporcional a la velocidad y se lee directamente en la pantalla del radar. El radar se debe colocar formando el menor ángulo posible entre la línea imaginaria de la dirección del vehículo y la recta que sale desde el instrumento.

El radar proporciona una gran precisión en la medida de la velocidad pero deben tomarse precauciones para que la posición del equipo no inquiete a los conductores, alterando así su comportamiento.

Cuando las mediciones se hacen en vías de carriles múltiples con altos volúmenes de tránsito el radar presenta dificultades para detectar un vehículo en particular.

5.2.1.3 Determinación del flujo

El flujo es la característica más sencilla de obtener en campo. En este estudio el flujo se determinó en intervalos de 15 minutos, se contó el número de vehículos livianos que pasaban por la sección de control durante ese lapso.

5.2.1.4 Determinación de la densidad

La densidad es la variable más difícil de cuantificar en campo por lo que se obtiene a partir de las otras dos variables, el flujo y la velocidad. Entonces la densidad es considerada como una variable dependiente.

5.2.1.5 Prueba de χ^2 (Chi Cuadrado)

Para determinar si el flujo en la autopista se ajusta a alguna distribución aleatoria se utiliza un estudio de probabilidades de Poisson y la prueba de Chi cuadrado. Para aplicar esta prueba se debe determinar el número de vehículos livianos que pasan en intervalos de 30 segundos durante una hora. Una vez recolectados los datos se determina la cantidad de intervalos en que pasaron igual número de automóviles y se aplica la fórmula de Poisson para obtener la probabilidad de cada evento:

$$P(x) = m^x e^{-m}/x!$$

En caso de que no hayan al menos cinco intervalos donde hayan pasado un número igual de autos, esta cantidad se suma al siguiente grupo hasta que hayan al menos cinco intervalos, las probabilidades también se deben sumar. Utilizando una tabla de valores de Chi cuadrado, o bien un gráfico, se determina la confiabilidad de los resultados con el grado de significancia escogido, en este caso un nivel de confianza del 95%.

De no cumplir con la prueba entonces el flujo se considera continuo y se deben aplicar otros modelos probabilísticos o distribuciones aleatorias que determinen su comportamiento.

5.3 Determinación de las curvas características

Para representar el comportamiento del flujo vehicular en las autopistas las relaciones fundamentales del tránsito se ajustan a curvas lineales, logarítmicas, exponenciales o cuadráticas. Este ajuste se realiza utilizando el programa estadístico SPSS para Windows. Para cada autopista se obtiene la curva que representa cada relación, flujo-densidad, velocidad-densidad y velocidad-flujo. Para algunos casos es posible representar la relación por medio de más de una curva porque tienen un R^2 (coeficiente de correlación) similar o porque representan mejor lo que se da en realidad y lo que se vio en el campo.

Capítulo VI

6.1 Autopista General Cañas

La autopista General Cañas es la carretera que soporta el mayor volumen en el país. En la hora pico de la mañana y en la de la tarde presenta congestionamientos que indican que la vía se encuentra operando a su capacidad máxima. Este comportamiento se refleja en las curvas obtenidas con base en el estudio de velocidades y flujos. Además el flujo en esta autopista es continuo aleatorio para volúmenes bajos, esto se desprende de los estudios de aleatoriedad con probabilidad de Poisson y pruebas de Chi cuadrado. A continuación el cuadro 6.1 muestra una prueba de Chi cuadrado para un volumen bajo de vehículos livianos en esta autopista, el volumen es de 268 vehículos livianos en una hora, con un m = 2.233 vehículos livianos.

Cuadro 6.1.1 Prueba de Chi cuadrado para un volumen bajo.

K	fo	Fo	P(n)	P(n)	Fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	17	**17**	0.107	**0.107**	12.865	4.135	17.100	1.329
1	26	**26**	0.239	**0.239**	28.727	-2.727	7.437	0.259
2	35	**35**	0.267	**0.267**	32.074	2.926	8.563	0.267
3	21	**21**	0.199	**0.199**	23.874	-2.874	8.257	0.346
4	12	**12**	0.111	**0.111**	13.327	-1.327	1.762	0.132
5	3		0.050					
6	3		0.018					
7	1		0.006					
8	1		0.002					
10	1	**9**	0.000	**0.076**	9.082	-0.082	0.007	0.001
	120							**2.334**

De este cuadro apreciamos que predominan los intervalos de treinta segundos con cuatro o menos vehículos, la mayoría de intervalos con uno y dos vehículos. Para este volumen tan pequeño la prueba indica que el comportamiento se ajusta a la distribución de Poisson y el flujo se considera aleatorio.

En los siguientes gráficos se muestra la curva de Poisson real obtenida y la curva de Poisson teórica correspondientes a esta prueba con un m = 2.233 vehículos livianos.

Gráfico 6.1.1 Curva real obtenida en la Autopista General Cañas.

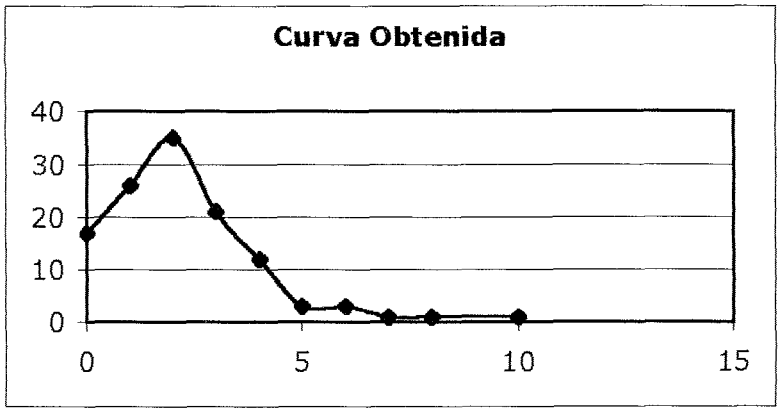
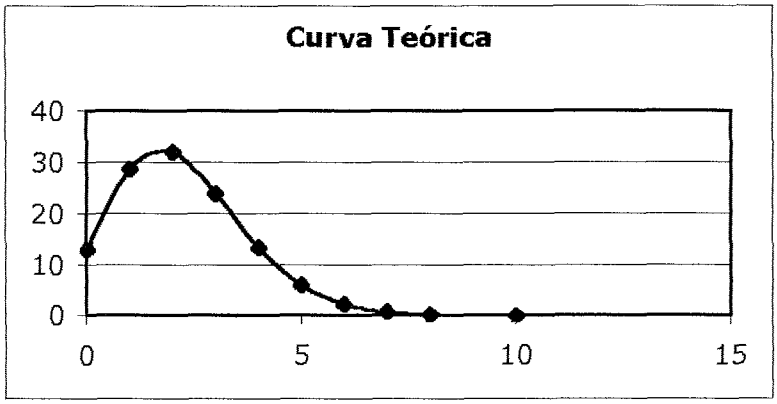


Gráfico 6.1.2 Curva teórica para un volumen de 268 vehículos livianos.



Comparando las dos curvas se observa una gran similitud entre ellas, lo que indica que el comportamiento real es muy parecido al teórico.

En la Autopista General Cañas también se realizaron pruebas para volúmenes medios y aquí se muestra la información obtenida de una de esas pruebas. El volumen es 978 vehículos livianos y su correspondiente m es 8,15 vehículos livianos.

Para este volumen la prueba indica que no se ajusta a la distribución de Poisson por lo que el flujo se considera continuo no aleatorio, en el cuadro 6.1.2 se muestra el detalle de la prueba.

Cuadro 6.1.2 Prueba de Chi Cuadrado para un volumen medio.

K	Fo	Fo	P(n)	P(n)	Fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	1		0.002					
2	2		0.010					
3	4	**7**	0.026	**0.038**	4.559	2.441	5.958	1.307
4	7	**7**	0.053	**0.053**	6.369	0.631	0.398	0.062
5	6	**6**	0.087	**0.087**	10.382	-4.382	19.203	1.850
6	21	**21**	0.118	**0.118**	14.102	6.898	47.576	3.374
7	13	**13**	0.137	**0.137**	16.419	-3.419	11.691	0.712
8	15	**15**	0.139	**0.139**	16.727	-1.727	2.983	0.178
9	15	**15**	0.126	**0.126**	15.147	-0.147	0.022	0.001
10	9	**9**	0.103	**0.103**	12.345	-3.345	11.190	0.906
11	7	**7**	0.076	**0.076**	9.147	-2.147	4.608	0.504
12	6	**6**	0.052	**0.052**	6.212	-0.212	0.045	0.007
13	10		0.032					
14	0		0.019					
15	4	**14**	0.010	**0.043**	5.126	8.874	78.743	15.361
16			0.005					
17			0.003					
18			0.001					
19			0.000					
	120							**24.262**

Los cuadros 6.3 y 6.4 muestran las curvas real y teórica respectivamente, para esta prueba.

Gráfico 6.1.3 Curva teórica para un volumen medio.

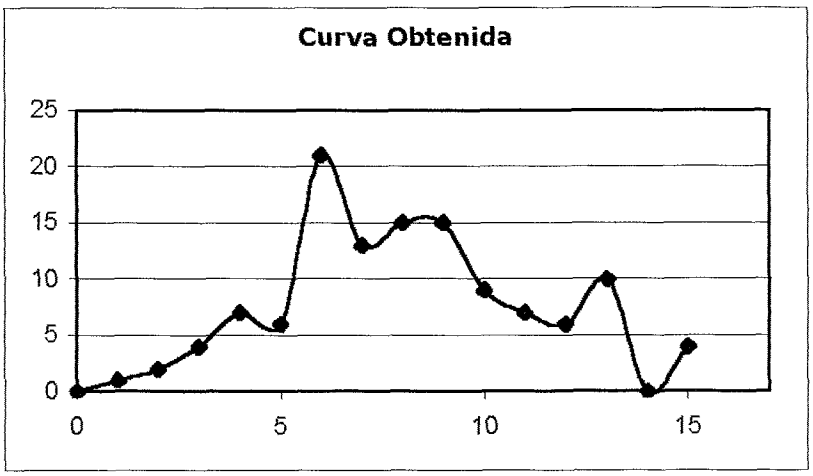
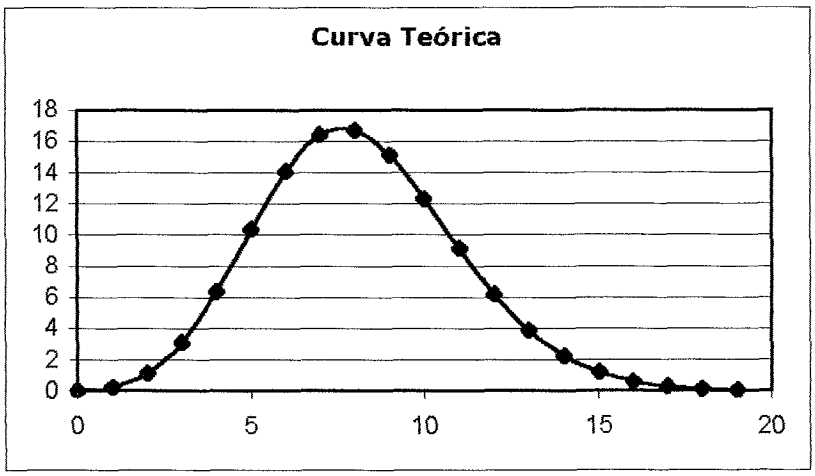


Gráfico 6.1.4 Curva teórica para un volumen de 978 vehículos livianos.



La curva obtenida no tiene la forma de la curva teórica con lo que verificamos que este volumen no se ajusta a la distribución de Poisson.

El siguiente cuadro muestra el detalle de la prueba de Chi cuadrado para un volumen alto en la autopista general Cañas, el volumen es de 1479 vehículos livianos y su m correspondiente es de 12,325 vehículos livianos.

Cuadro 6.1.3 Prueba de Chi cuadrado para un volumen alto.

K	fo	Fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	0		0.000					
2	1		0.000					
3	2		0.001					
4	4	**7**	0.004	**0.006**	0.719	6.281	39.452	54.879
5	3		0.011					
6	7	**10**	0.022	**0.032**	3.856	6.144	37.748	9.789
7	6	**6**	0.038	**0.022**	2.594	3.406	11.604	4.474
8	6	**6**	0.059	**0.059**	7.080	-1.080	1.166	0.165
9	6	**6**	0.080	**0.080**	9.600	-3.600	12.960	1.350
10	7	**7**	0.099	**0.099**	11.880	-4.880	23.814	2.005
11	12	**12**	0.111	**0.111**	13.320	-1.320	1.742	0.131
12	11	**11**	0.114	**0.114**	13.680	-2.680	7.182	0.525
13	10	**10**	0.108	**0.108**	12.960	-2.960	8.762	0.676
14	5	**5**	0.095	**0.095**	11.400	-6.400	40.960	3.593
15	10	**10**	0.078	**0.078**	9.360	0.640	0.410	0.044
16	8	**8**	0.060	**0.060**	7.200	0.800	0.640	0.089
17	3		0.044					
18	3	**6**	0.030	**0.0735**	8.817	-2.817	7.938	0.900
19	3		0.019					
20	5	**8**	0.012	**0.0313**	3.757	4.243	18.001	4.791
21	1		0.007					
22	5		0.004					
23	1		0.002					
24	1	**8**	0.001	**0.0141**	1.694	6.306	39.768	23.478
	120							**106.889**

Del valor total de la suma del valor de Chi cuadrado es muy alto y se aleja mucho del valor teórico, por lo que este volumen de 1479 vehículos livianos no se ajusta a Poisson. Este comportamiento lo verificamos en las curvas real y teórica de esta prueba. Dichas curvas se presentan a continuación.

Gráfico 6.1.5 Curva real para un volumen alto.

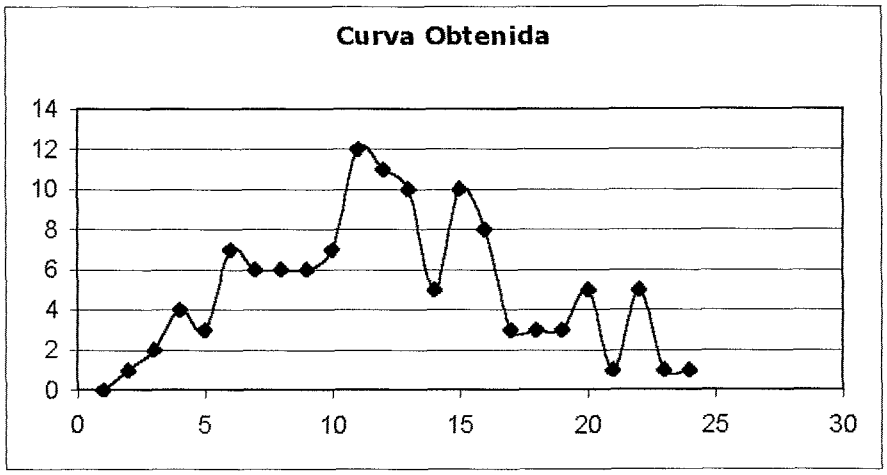
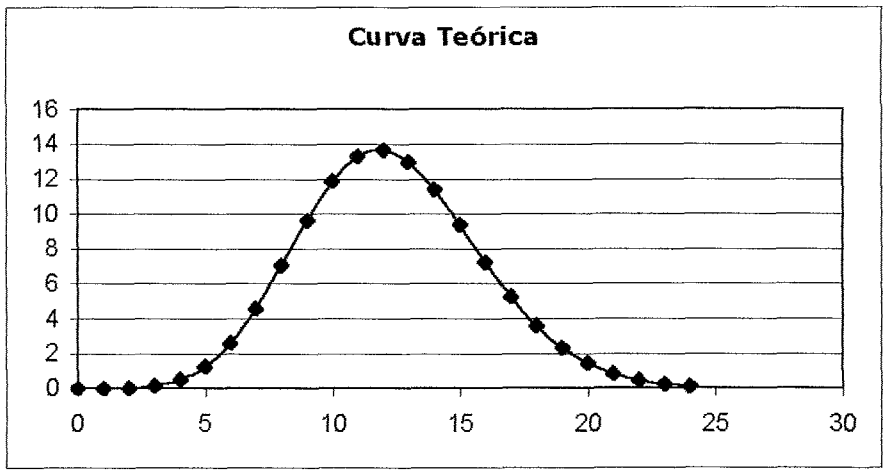


Gráfico 6.1.6 Curva teórica para un volumen de 1479 vehículos livianos.



Las pruebas en la Autopista General Cañas se realizaron para distintos volúmenes y a distintas horas del día diferentes días de la semana. Los resultados de ellas se presentan en el cuadro 6.1.4.

Cuadro 6.1.4 Pruebas de Chi cuadrado en autopista General Cañas.

Volumen	m	v	χ^2 real	χ^2 teórico
268	2.233	4	1.005	9.488
389	3.24	6	8.616	12.592
453	3.775	7	18.345	14.067
497	4.142	8	10.888	15.507
978	8.15	9	24.262	16.919
987	8.255	11	72.279	19.675
1479	12.325	13	106.889	22.362

El detalle de todas las pruebas realizadas en la Autopista General Cañas con su respectiva curva teórica y real se muestra en la sección de Anexos.

Los volúmenes bajos, 268, 389 y 497, son los que se ajustan a la distribución de Poisson. El volumen de 453 no cumple, pero se acerca bastante por lo que se considera dentro del intervalo de cumplimiento.

6.1.2 Curvas características

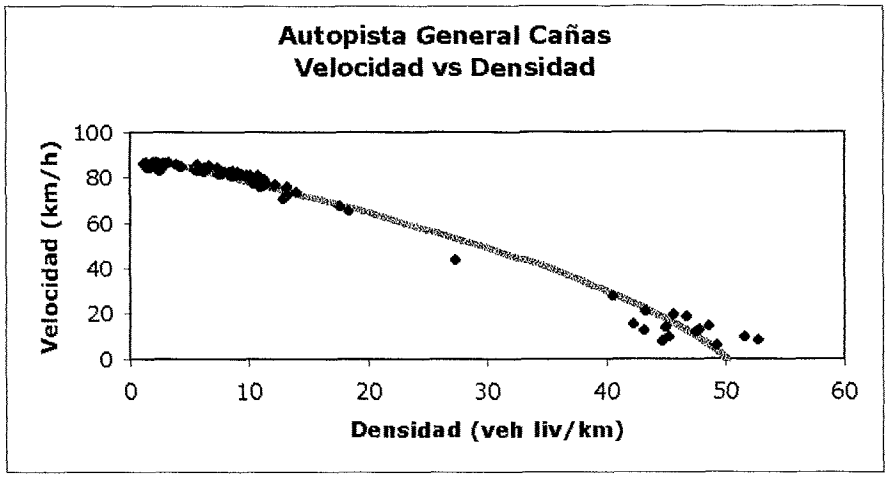
Las curvas de las relaciones estudiadas que describen el comportamiento del flujo vehicular en la autopista General Cañas se enuncian en seguida. Los datos recolectados se ubicaron en un gráfico como nube de puntos, luego con el paquete estadístico para Windows SPSS se realizaron los ajustes lineal, exponencial, logarítmico y cuadrático para seleccionar la curva que mejor caracteriza la relación correspondiente del flujo.

Las curvas elegidas son las siguientes:

Relación velocidad-densidad

$D = 50,144 - 0,2246*V - 0,0037*V^2$ $R^2 = 0,983$

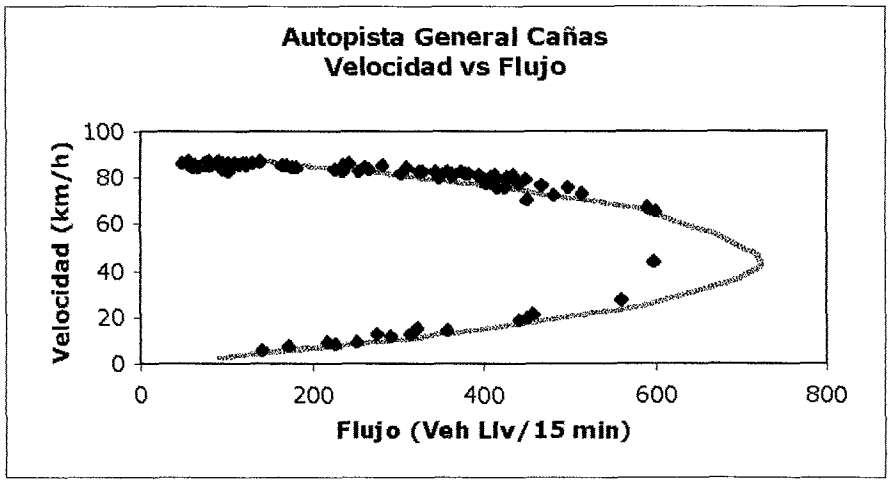
Gráfico 6.1.2.1 Relación Velocidad vs Densidad.



Relación velocidad-flujo

$V = 31,731*q - 0,3461*q^2$ $R^2 = 0,942$

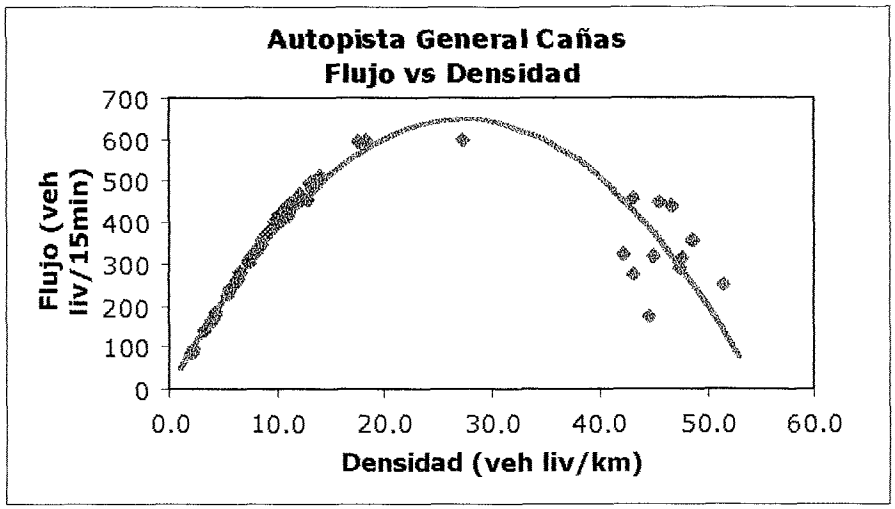
Gráfico 6.1.2.2 Relación Velocidad vs Flujo.



Relación flujo-densidad

$q = 47{,}44*D - 0{,}868*D^2$ **$R^2 = 0{,}978$**

Gráfico 6.1.2.3 Relación Flujo vs Densidad.



Con los ajustes de las curvas para la autopista General Cañas se obtienen valores máximos para cada variable, así: el flujo máximo para intervalos de 15 minutos es de 725 vehículos livianos, una densidad máxima de 145 vehículos y una velocidad máxima de 91 km./h. De estos datos resulta una capacidad de alrededor de los 700 vehículos livianos para intervalos de 15 minutos, alrededor de 2800 vehículos livianos por hora. Los datos se presentan como promedio en toda la vía, no por carril. No se consideró el efecto de los vehículos pesados.

Los gráficos de nube de puntos y de cada una de las curvas obtenidas del programa SPSS se presentan en la sección de anexos.

6.2 Autopista Florencio del Castillo

En la autopista Florencio del Castillo se realizaron conteos y mediciones de velocidad para verificar el tipo de flujo, volúmenes bajos, medios y altos a diferentes horas y distintos días de la semana.

La prueba para un volumen bajo, 244 vehículos livianos y correspondiente m de 2,033 vehículos livianos, se muestra en el cuadro 6.2.1, la información obtenida indica que se ajusta a la distribución de Poisson.

Cuadro 6.2.1 Prueba de Chi cuadrado para flujo bajo.

K	Fo	Fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	18	**18**	0.131	**0.131**	15.713	2.287	5.230	0.333
1	29	**29**	0.266	**0.266**	31.945	-2.945	8.671	0.271
2	35	**35**	0.271	**0.271**	32.472	2.528	6.392	0.197
3	20	**20**	0.183	**0.183**	22.005	-2.005	4.020	0.183
4	9	**9**	0.093	**0.093**	11.184	-2.184	4.770	0.427
5	7		0.038					
6	1		0.013					
7	1	**9**	0.004	**0.054**	6.536	-5.536	30.645	4.689
	120							**6.099**

En la tabla se destaca una mayoría de intervalos con pocos automóviles como era de esperarse para un volumen de vehículos livianos pequeño.

Las curvas que describen la distribución de Poisson obtenida y la teórica se muestran seguidamente.

Gráfico 6.2.1 Curva real obtenida para un volumen bajo.

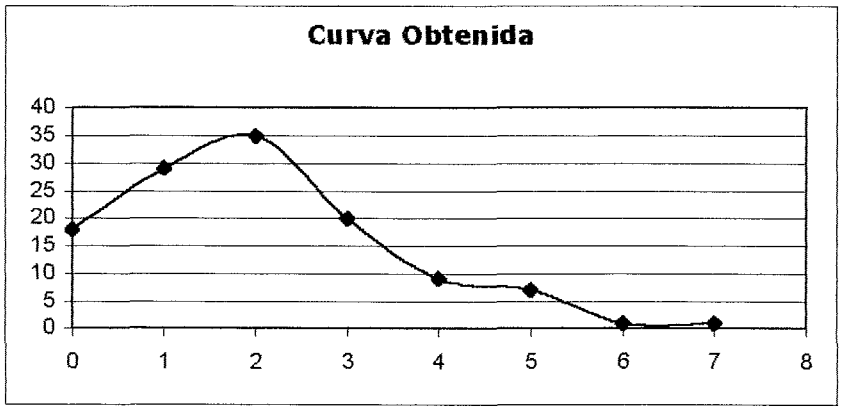
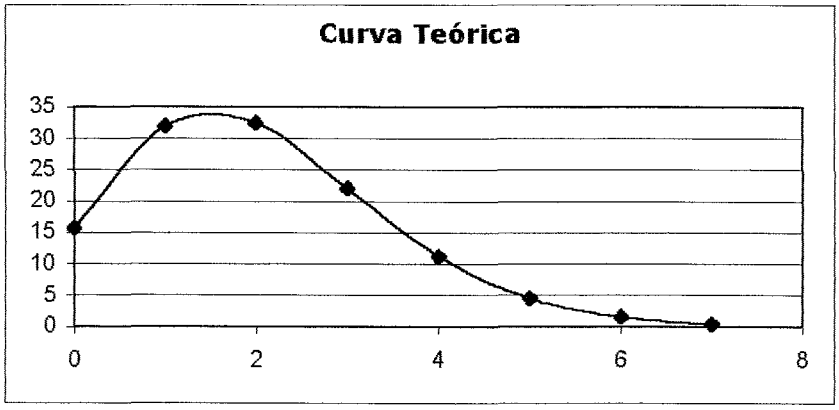


Gráfico 6.2.2 Curva teórica para m = 2,033 vehículos livianos.



La prueba para un volumen medio, 711 vehículos livianos y m de 5,925 vehículos livianos, arrojó la siguiente información.

Cuadro 6.2.2 Prueba de Chi Cuadrado para un volumen medio.

K	Fo	Fo	P(n)	P(n)	fe	Fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.003					
1	3		0.016					
2	12	**15**	0.047	**0.063**	7.527	7.473	55.840	7.4182
3	15	**15**	0.093	**0.093**	11.115	3.885	15.095	1.3581
4	16	**16**	0.137	**0.137**	16.464	-0.464	0.215	0.0131
5	14	**14**	0.163	**0.163**	19.510	-5.510	30.355	1.5559
6	16	**16**	0.161	**0.161**	19.266	-3.266	10.665	0.5536

7	7	**7**	0.136	**0.136**	16.307	-9.307	86.620	5.3119
8	12	**12**	0.101	**0.101**	12.077	-0.077	0.006	0.0005
9	9	**9**	0.066	**0.066**	7.951	1.049	1.101	0.1384
10	5	**5**	0.039	**0.039**	4.711	0.289	0.084	0.0177
11	5	**5**	0.021	**0.021**	2.537	2.463	6.064	2.3898
12	2		0.010					
13	2		0.005					
14	2	**6**	0.002	**0.017**	2.066	3.934	15.480	7.4942
	120							**26.251**

Gráfico 6.2.3 Curva real para un volumen medio.

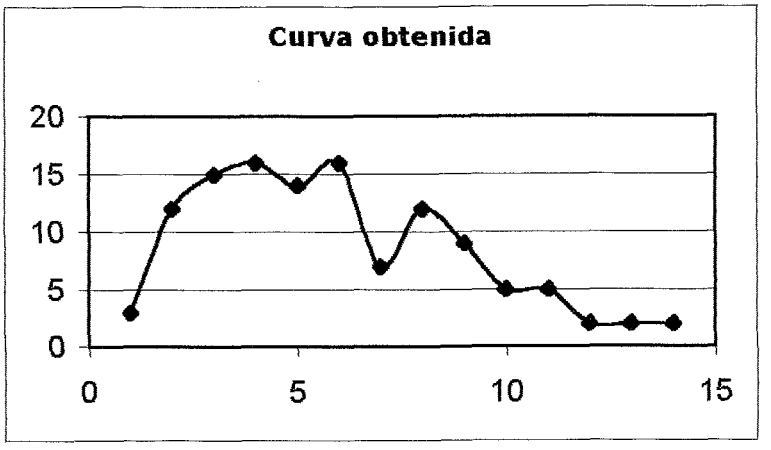
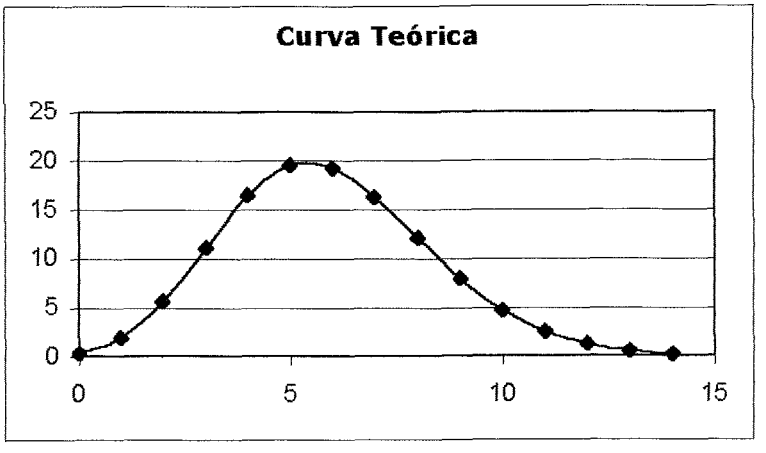


Gráfico 6.2.4 Curva teórica para m de 5,925 vehículos livianos.



Las curvas muestran claramente que no hay correspondencia entre los datos reales y los teóricos y por lo tanto este volumen medio no se ajusta a Poisson.

Los volúmenes altos en la autopista Florencio del Castillo no se ajustan a la distribución de Poisson, la prueba para un volumen alto, 1560 vehículos livianos con m de 13,0 es la siguiente:

Cuadro 6.2.3 Prueba de Chi cuadrado para un volumen alto.

K	Fo	Fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	0		0.000					
2	1		0.000					
5	3		0.007					
6	4	**8**	0.015	**0.022**	2.681	5.319	28.297	10.556
7	8	**8**	0.028	**0.028**	3.377	4.623	21.372	6.329
8	7	**7**	0.046	**0.046**	5.488	1.512	2.287	0.417
9	9	**9**	0.066	**0.066**	7.926	1.074	1.152	0.145
10	11	**11**	0.086	**0.086**	10.304	0.696	0.484	0.047
11	6	**6**	0.101	**0.101**	12.178	-6.178	38.167	3.134
12	9	**9**	0.110	**0.110**	13.193	-4.193	17.579	1.333
13	9		0.110					
14	3	**12**	0.102	**0.212**	25.443	-13.443	180.720	7.103
15	15	**15**	0.088	**0.088**	10.617	4.383	19.210	1.809
16	6	**6**	0.072	**0.072**	8.626	-2.626	6.898	0.800
17	8	**8**	0.055	**0.055**	6.597	1.403	1.969	0.299
18	4		0.040					
19	3	**7**	0.027	**0.067**	8.024	-1.024	1.048	0.131
20	7	**7**	0.018	**0.018**	2.119	4.881	23.826	11.245
21	1		0.011					
22	4		0.006					
23	1		0.004					
25	1	**7**	0.001	**0.022**	2.648	4.352	18.938	7.151
	120							**50.498**

Gráfico 6.2.5 Curva real obtenida para un volumen alto.

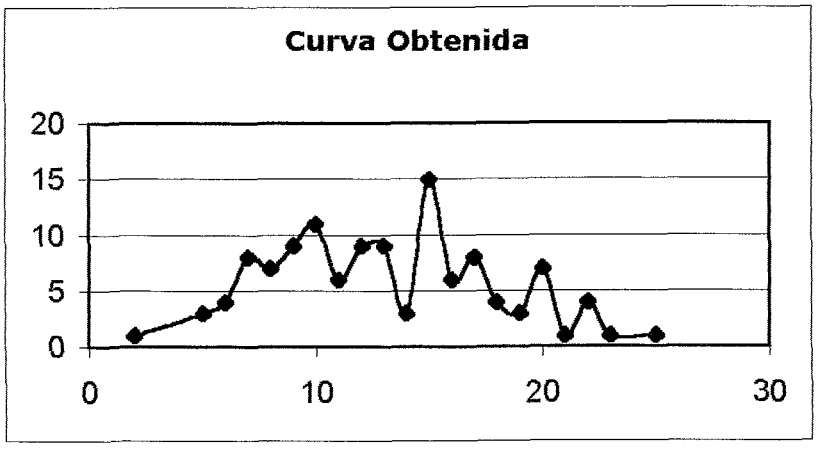
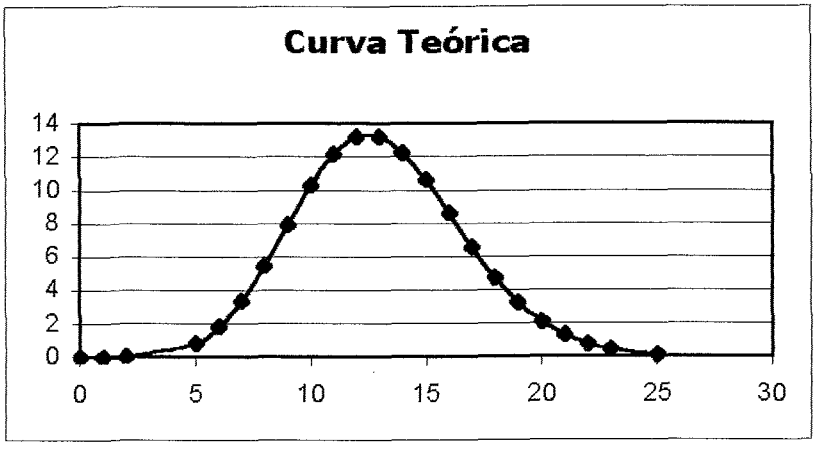


Gráfico 6.2.6 Curva teórica para m de 13 vehículos livianos.



Las curvas no presentan similitud por lo que se verifica un flujo continuo para volúmenes altos en la autopista Florencio del Castillo que no corresponde a la distribución de Poisson.

El siguiente cuadro muestra los resultados de todas las pruebas de Chi cuadrado realizadas en la autopista Florencio del Castillo.

Cuadro 6.2.4 Pruebas de Chi cuadrado en autopista Florencio del Castillo.

Volumen	m	v	χ^2 real	χ^2 teórico
244	2.033	4	2.338	9.488
348	2.9	6	15.489	12.592
687	5.725	9	36.8	16.919
711	5.925	9	26.341	16.919
716	5.97	8	27.781	15.507
748	6.233	9	7.811	16.919
1560	13	12	50.438	21.026

El detalle de las pruebas con su respectiva curva teórica y real se muestra en la sección de Anexos.

6.2.1 Curvas características

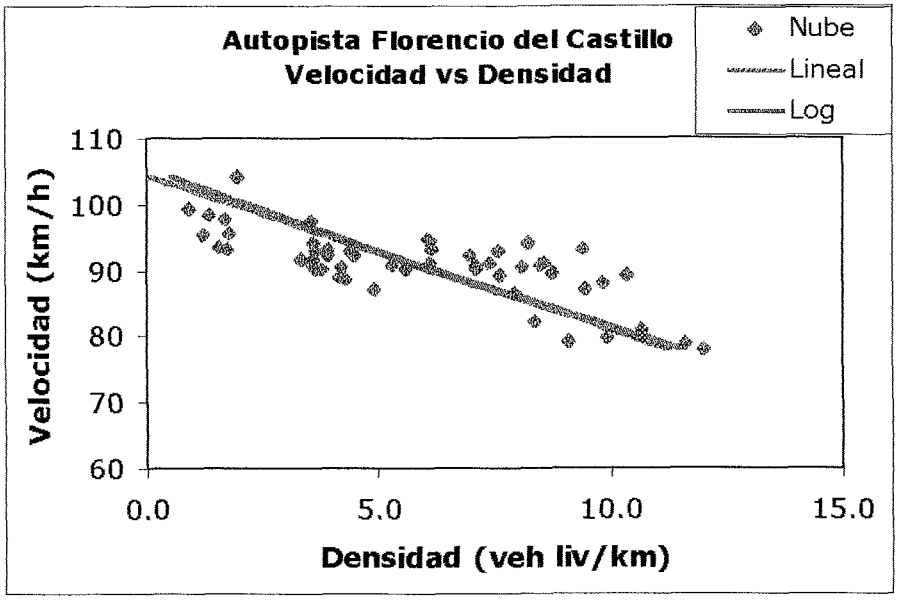
Las curvas representativas derivadas de SPSS para la autopista Florencio del Castillo son las siguientes:

Relación velocidad-densidad

$D = 44{,}61 - 0{,}427 * V$ **$R^2 = 0{,}539$**

$D = 176{,}69 - 37.9 * \ln(V)$ **$R^2 = 0{,}538$**

Gráfico 6.2.1.1 Relación Velocidad vs Densidad.



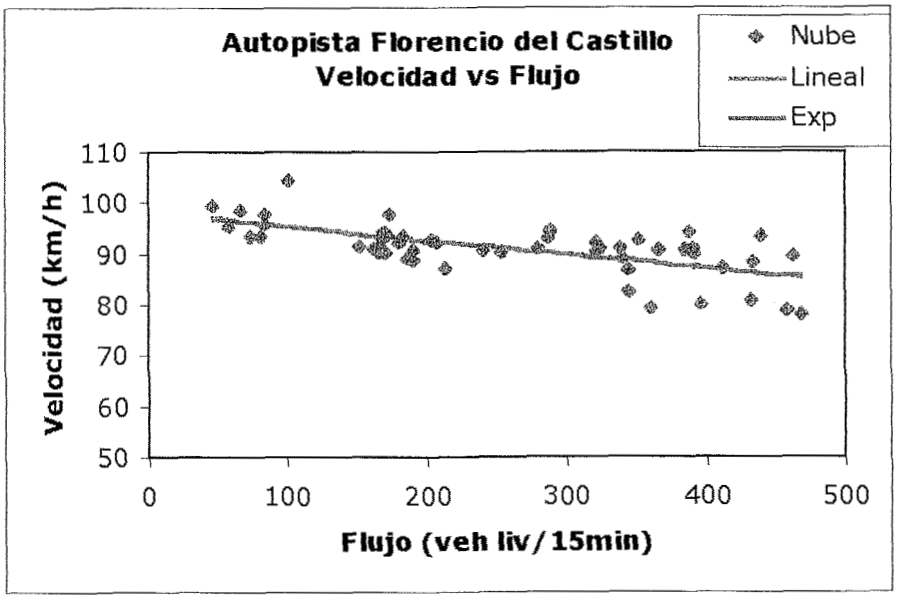
Las dos ajustes de curva, lineal y logarítmico, describen comportamientos muy parecidos para esta relación en el intervalo de estudio.

Relación velocidad-flujo

$V = 97.98-0,0273*q$ $R^2 = 0,432$

$V = 98.23*e^{-0,0003*q}$ $R^2 = 0,427$

Gráfico 6.2.1.2 Relación Velocidad vs Flujo.



Las curvas exponencial y lineal para esta relación en el intervalo mostrado presentan comportamientos idénticos.

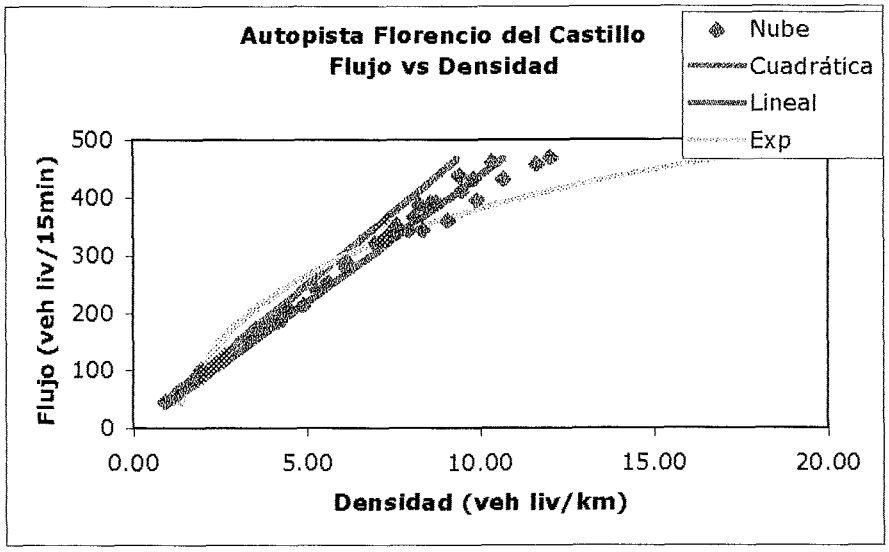
Relación flujo-densidad

$D = 8*E-10*q^2+0,0199*q$ $R^2 = 0,997$

$D = 0,0227*q$ $R^2 = 0,996$

$D = e^{0,0060*q}$ $R^2 = 0,983$

Gráfico 6.2.1.3 Relación Flujo vs Densidad.



Estas tres últimas ecuaciones presentan R^2 (coeficiente de correlación) muy cercano a uno y describen curvas muy parecidas al comportamiento esperado de las variables, por lo que el uso de ellas se podrá hacer en el orden que se presentan.

Las relaciones para la autopista Florencio del Castillo nos muestran una velocidad máxima de 104 km./h y una densidad máxima de 65 vehículos. El flujo máximo por 15 minutos no se determina por que la vía no llega a congestionarse, de la misma forma que no podemos tener un valor para la capacidad, pero debería ser mayor a la de la autopista General Cañas. Los datos obtenidos son para los dos carriles en conjunto y no se considera el efecto de los vehículos pesados.

Los gráficos de nube de puntos y de cada una de las curvas obtenidas del programa SPSS se presentan en la sección de anexos.

6.3 Autopista Próspero Fernández

La autopista próspero Fernández muestra un comportamiento totalmente distinto a las otras dos autopistas, los flujos bajos, medios y altos se ajustan a la distribución de Poisson.

El siguiente cuadro muestra los resultados de las pruebas de Chi cuadrado para un volumen bajo, 183 vehículos livianos y m de 1,525 vehículos livianos realizadas en la autopista Próspero Fernández.

Cuadro 6.3.1 Prueba de Chi cuadrado para un volumen bajo.

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	30	**30**	0.218	**0.218**	26.115	3.885	15.097	0.578
1	38	**38**	0.332	**0.332**	39.825	-1.825	3.329	0.084
2	28	**28**	0.253	**0.253**	30.366	-2.366	5.599	0.184
3	15	**15**	0.129	**0.129**	15.436	-0.436	0.190	0.012
4	4		0.049					
5	2		0.015					
6	3	**9**	0.004	**0.068**	8.136	0.864	0.746	0.092
7	0		0.001					
8			0.000					
9			0.000					0.000
	120							**0.950**

Gráfico 6.3.1 Curva real obtenida para un volumen bajo.

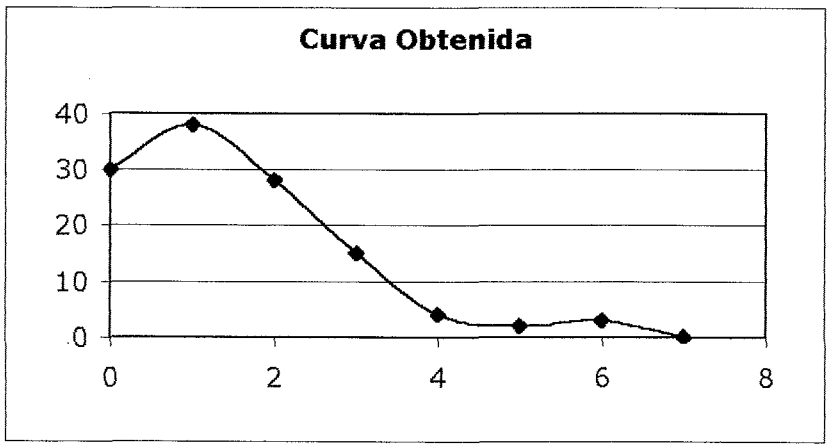
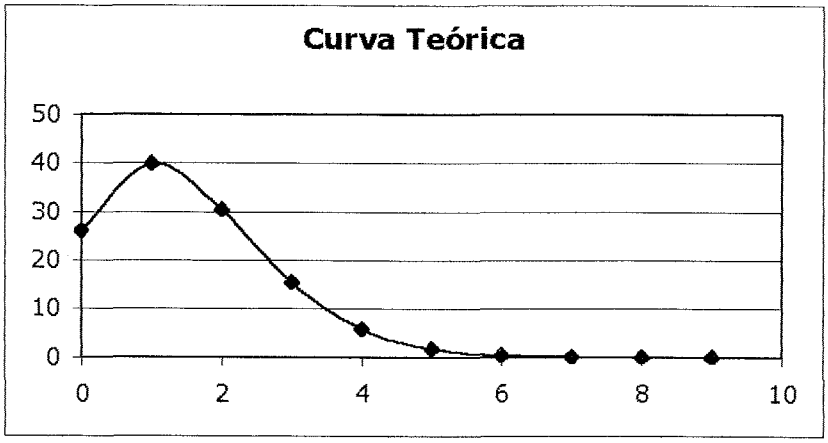


Gráfico 6.3.2 Curva teórica para m de 1,525 vehículos livianos.



Las curvas real y teórica son prácticamente iguales lo que indica una correspondencia entre la teoría y el trabajo de campo.

Cuadro 6.3.2 Prueba de Chi cuadrado para un volumen medio.

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.001					
1	1		0.004					
2	0		0.016					
3	4	**5**	0.039	**0.043**	5.220	-0.220	0.048	0.009
4	13	**13**	0.073	**0.073**	8.820	4.180	17.476	1.982
5	13	**13**	0.110	**0.110**	13.199	-0.199	0.040	0.003
6	16	**16**	0.137	**0.137**	16.462	-0.462	0.213	0.013
7	23	**23**	0.147	**0.147**	17.598	5.402	29.185	1.658
8	13	**13**	0.137	**0.137**	16.460	-3.460	11.975	0.727
9	12	**12**	0.114	**0.114**	13.686	-1.686	2.842	0.208
10	7	**7**	0.085	**0.085**	10.241	-3.241	10.505	1.026
11	6	**6**	0.058	**0.058**	6.967	-0.967	0.935	0.134
12	6	**6**	0.036	**0.036**	4.344	1.656	2.741	0.631
13	2		0.021					
14	0		0.011					
15	2		0.006					
16	1		0.003					
17	0		0.001					
18	0		0.000					
19	1	**6**	0.000	**0.0292**	3.502	2.498	6.241	1.782
	120							**8.173**

Gráfico 6.3.3 Curva real obtenida para un volumen medio.

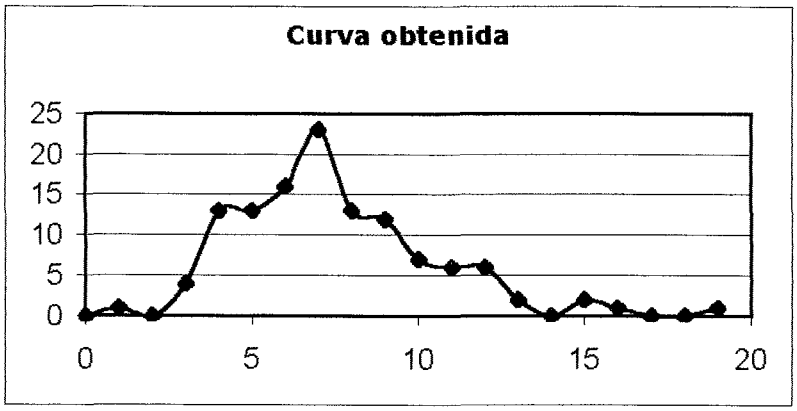
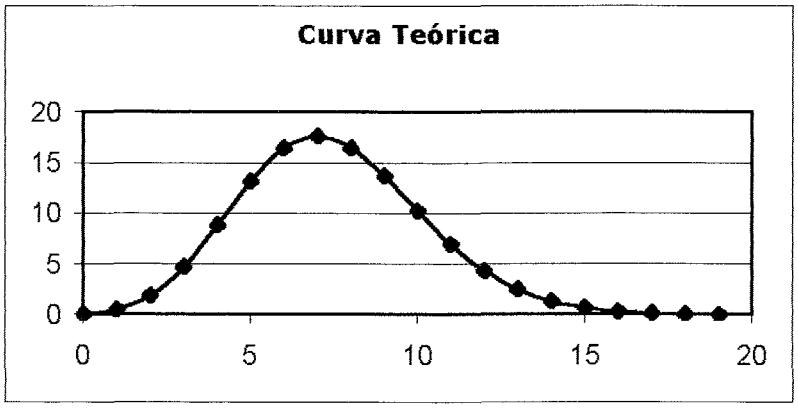


Gráfico 6.3.4 Curva teórica para un m de 7,483 vehículos livianos.



Una muestra de una prueba para un volumen de 1515 vehículos livianos con un m de 12,625 vehículos livianos se presenta a continuación.

Cuadro 6.3.3 Prueba de Chi cuadrado para un volumen alto.

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	0		0.000					
2	0		0.000					
3	0		0.001					
4	1		0.003					
5	2		0.009					
6	5	**8**	0.018	**0.031**	3.692	4.308	18.557	5.026
7	4		0.033					
8	6	**10**	0.053	**0.086**	10.321	-0.321	0.103	0.010
9	6	**6**	0.074	**0.074**	8.862	-2.862	8.191	0.924
10	13	**13**	0.093	**0.093**	11.188	1.812	3.282	0.293
11	12	**12**	0.107	**0.107**	12.841	-0.841	0.707	0.055
12	15	**15**	0.113	**0.113**	13.510	1.490	2.220	0.164
13	9	**9**	0.109	**0.109**	13.120	-4.120	16.976	1.294
14	10	**10**	0.099	**0.099**	11.832	-1.832	3.355	0.284
15	9	**9**	0.083	**0.083**	9.958	-0.958	0.918	0.092
16	10	**10**	0.065	**0.065**	7.858	2.142	4.589	0.584

17	7	**7**	0.049	**0.049**	5.836	1.164	1.356	0.232
18	1		0.034					
19	3		0.023					
20	2	**6**	0.014	**0.071**	8.529	-2.529	6.398	0.750
21	2		0.009					
22	1		0.005					
23	0		0.003					
24	1		0.001					
25	1	**5**	0.001	**0.016**	1.882	3.118	9.723	5.167
26	0		0.000					
	120							**14.876**

Gráfico 6.3.5 Curva real obtenida para un volumen alto.

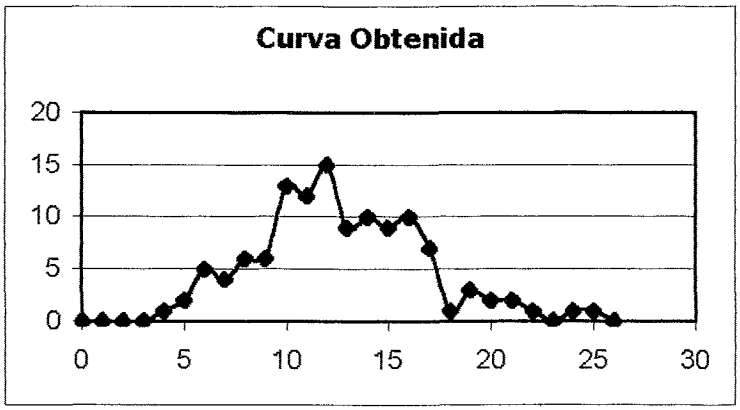
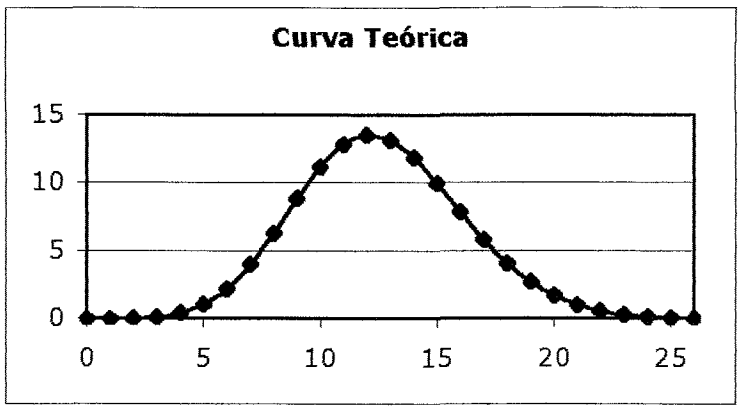


Gráfico 6.3.6 Curva teórica para un m de 12,625 vehículos livianos.



La tendencia de la curva real es parecerse a la curva teórica cumpliendo así con Poisson.

El siguiente cuadro muestra el resumen de las pruebas de Chi cuadrado realizadas en la autopista próspero Fernández.

Cuadro 6.3.4 Pruebas de Chi cuadrado en autopista Próspero Fernández.

Volumen	m	v	χ^2 real	χ^2 teórico
183	1.525	3	0.95	7.815
267	2.225	4	0.719	9.488
468	3.9	6	21.216	12.592
592	4.933	6	1.594	12.592
720	6	9	111.216	16.919
751	6.26	10	649.247	18.307
898	7.483	9	8.173	16.919
979	8.158	12	37.469	21.026
1048	8.733	11	67.343	19.675
1062	8.85	10	47.248	18.307
1515	12.625	11	14.876	19.675
1618	13.483	12	15.575	21.026

En la tabla se aprecia como muestras de volúmenes bajos, medios y altos cumplen con la distribución de Poisson.

El detalle de las pruebas con su respectiva curva teórica y real se muestra en la sección de Anexos.

6.3.1 Curvas características.

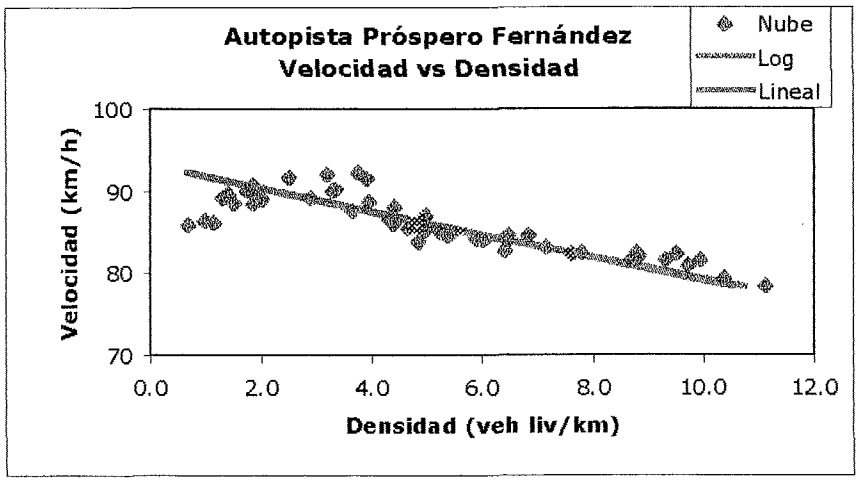
Las curvas representativas derivadas de SPSS para la autopista Próspero Fernández son las siguientes:

Relación velocidad-densidad

$D = 278,5 - 61,39*\ln(V)$ **$R^2 = 0,735$**

$D = 66,16 - 0,71*V$ **$R^2 = 0,725$**

Gráfico 6.3.2.1 Relación Velocidad vs Densidad.



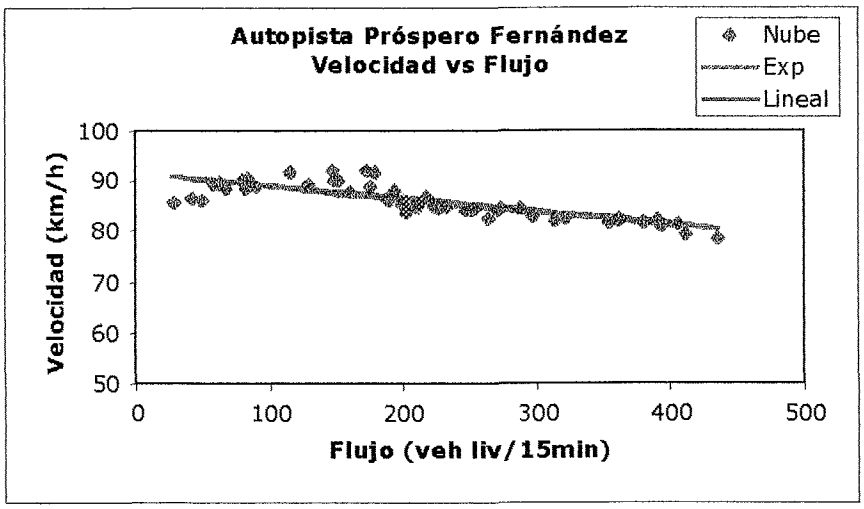
Para esta relación en la autopista Próspero Fernández los ajustes lineal y logarítmico son prácticamente iguales.

Relación velocidad-flujo

$V = 91,641*e^{-0,0003*q}$ **$R^2 = 0,701$**

$V = 91,49 - 0,0251*q$ **$R^2 = 0,692$**

Gráfico 6.3.2.2 Relación Velocidad vs Flujo.



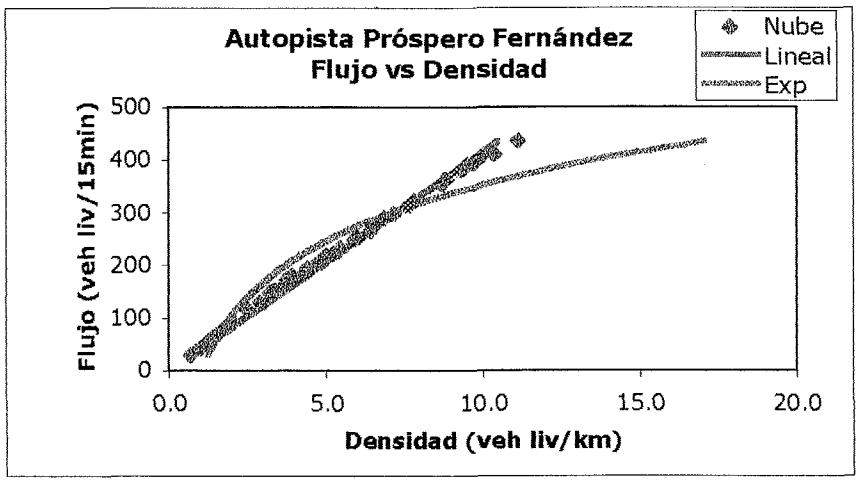
En el cuadro se aprecia que los dos ajustes, exponencial y lineal, son idénticos en el intervalo de estudio.

Relación flujo-densidad

$D = 0{,}0240*q$ **$R^2 = 0{,}999$**

$D = e^{0{,}0065*q}$ **$R^2 = 0{,}981$**

Gráfico 6.3.2.3 Relación Flujo vs Densidad.



Ambos ajustes de curva, lineal y exponencial, describen satisfactoriamente la relación flujo-densidad en el intervalo de estudio.

Las relaciones para la autopista Próspero Fernández nos muestran una velocidad máxima de 94 km./h y una densidad máxima de 65 vehículos. El flujo máximo por 15 minutos no se determina por que la vía no llega a congestionarse, no se obtiene un valor específico para la capacidad pero es posible que sea mucho mayor a las otras dos autopistas estudiadas según los resultados de pruebas de aleatoriedad. Los datos obtenidos son para los dos carriles en conjunto y no se considera el efecto de los vehículos pesados.

Los gráficos de nube de puntos y de cada una de las curvas obtenidas del programa SPSS se presentan en la sección de anexos.

6.4 Resumen de las pruebas de Chi cuadrado en las tres autopistas

El comportamiento en las tres autopistas estudiadas nos completamente similar porque en la General Cañas tenemos que se presenta flujo aleatorio para volúmenes bajos, no superiores a 500 vehículos livianos, en la Florencio del Castillo ocurre algo similar pero el flujo es aleatorio para volúmenes menores a 750 vehículos livianos y

en la Próspero Fernández se presenta comportamiento aleatorio con volúmenes altos, medios y bajos. El resumen de pruebas de Chi cuadrado en orden ascendente de volumen para las tres autopistas.

Cuadro 6.4.1 Resumen de pruebas de Chi cuadrado.

Volumen	m	v	χ^2 real	χ^2 teórico	
183	1.525	3	0.95	7.815	*******
244	2.033	4	6.099	9.488	*******
267	2.225	4	0.719	9.488	*******
268	2.233	4	1.005	9.488	*******
348	2.9	6	15.489	12.592	
389	3.24	6	8.616	12.592	*******
453	3.775	7	18.345	14.067	
468	3.9	6	21.216	12.592	
497	4.142	8	10.888	15.507	*******
592	4.933	6	1.594	12.592	*******
687	5.725	9	36.8	16.919	
711	5.925	9	26.341	16.919	
716	5.97	8	27.781	15.507	
720	6	9	111.216	16.919	
748	6.233	8	5.862	15.507	*******
751	6.26	10	649.247	18.307	
898	7.483	9	8.173	16.919	*******
978	8.15	9	24.262	16.919	
979	8.158	12	37.469	21.026	
987	8.255	11	72.279	19.675	
1048	8.733	11	67.343	19.675	
1062	8.85	10	47.248	18.307	
1479	12.325	13	106.889	22.362	
1515	12.625	11	14.876	19.675	*******
1560	13	12	50.438	21.026	
1618	13.483	12	15.575	21.026	*******

****** Cumplen con la prueba de Chi cuadrado.

Capítulo VII

Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con el análisis de los resultados de la investigación se concluye lo siguiente:

Por las condiciones en que se encuentra el pavimento de cada una de las tres autopistas analizadas no es conveniente asumir un comportamiento igual del tránsito en cada una de ellas. En el momento del estudio la capa de rodamiento de la autopista General Cañas se encontraba en muy mal estado. En la autopista Florencio del Castillo el pavimento también esta en mal estado pero en especial el del carril derecho. El pavimento de la autopista Próspero Fernández se encuentra en muy buen estado. Se deben tener las relaciones de las variables principales del flujo vehicular para cada una de ellas.

El flujo en la autopista General Cañas se considera continuo y se ajusta a la distribución de Poisson para valores de volumen menores a los 500 vehículos livianos por hora. Para valores mayores el flujo tiene otro comportamiento.

El flujo en la autopista Florencio del Castillo se puede considerar aleatorio. Cumple con la distribución de Poisson, para valores menores de 750 vehículos livianos por hora. Para valores mayores el flujo sigue otra distribución.

El flujo en la autopista Próspero Fernández se comporta de forma aleatorio, siguiendo la distribución de Poisson, para muestras bajas (cercanas a los 200 vehículos livianos), medias (alrededor de 1000 autos livianos) y altas (hasta 1600 vehículos livianos). Se puede esperar que para volúmenes horarios mayores a los 1600 vehículos livianos el flujo siga otro tipo de distribución. Este comportamiento se da por la condición de esta carretera, es una autopista diseñada como tal y se mantiene en buen estado.

No se puede decir que para un valor específico de volumen nuestras autopistas presenten un flujo aleatorio, debido a que los resultados para tres de ellas son diferentes en este aspecto y no mantienen un patrón definido entre cada una de ellas.

A partir de las pruebas con la fórmula de Poisson y los resultados obtenidos con la distribución de los distintos tamaños de volúmenes vehiculares en el tiempo, la autopista General Cañas es la que presenta una capacidad menor, seguida de la autopista Florencio del Castillo y con una capacidad mayor la autopista Próspero Fernández. Esta diferencia de capacidad observada se debe a factores como el mal estado del pavimento de la autopista General Cañas en el momento del estudio y al mayor porcentaje de vehículos pesados, camiones y autobuses, que circulan por esa vía principalmente.

Las relaciones entre las variables del flujo, velocidad, volumen y densidad, en la autopista General Cañas presentan comportamientos muy similares a los definidos por la teoría, es decir, un comportamiento parabólico para las relaciones de

velocidad-volumen y volumen-densidad y un comportamiento cercano a la linealidad para la relación velocidad-densidad.

Por la gran cantidad de vehículos que circulan por la autopista General Cañas diariamente y a su consecuente congestionamiento se hace necesario la ampliación de esta vía en la mayoría de su trayecto, o al menos en segmentos donde existan pendientes.

La operación en las autopistas Florencio del Castillo y Próspero Fernández se da a mayor velocidad que en la General Cañas debido al estado del pavimento, al porcentaje de vehículos pesados y al diseño geométrico de la carretera. El promedio de las velocidades máximas en la autopista Florencio del Castillo son cercanas a 95 km./h, en la autopista Próspero Fernández son de alrededor de 90 km./h y en la autopista General Cañas son cercanas a los 85 km./h.

La cantidad de vehículos que circulan en las autopistas Próspero Fernández y Florencio del Castillo hace que las relaciones entre las variables sean muy parecidas por lo que se podrían usar indistintamente.

Para algunas relaciones es conveniente utilizar más de una curva, esto por cuanto ninguna representa fielmente el comportamiento del tránsito en la autopista y más bien, es recomendable usar más de un modelo. La variable que difiere en mayor grado es la densidad, para la cual el ajuste de las curvas correspondientes en la autopista General Cañas, no alcanzaron valores mayores de 60 vehículos livianos por

kilómetro. No obstante, en el campo se observaron valores sustancialmente mayores, de hasta 200 vehículos livianos por kilómetro.

Para el caso de las autopistas Florencio del Castillo y Próspero Fernández, se presentan dos posibles curvas representativas para las relaciones de velocidad-flujo y velocidad-densidad, que en el intervalo de datos obtenidos describen trayectorias indistintas, por lo que el uso de cualquiera de ellas sería apropiado, mientras que esas mismas relaciones en la autopista General Cañas se caracterizan con curvas únicas y específicas.

El comportamiento del flujo para volúmenes bajos es muy similar en las tres autopistas, pero empieza a diferenciarse conforme los volúmenes se incrementan. Se aprecia esta diferencia, especialmente, comparando la autopista General Cañas con la Florencio del Castillo y Próspero Fernández. Estas dos últimas mantienen un comportamiento similar hasta volúmenes medios.

Se observa en los gráficos de las relaciones principales, una diferencia importante entre las velocidades en la autopista Florencio del Castillo y las autopistas General Cañas y Próspero Fernández, debido básicamente a la diferencia del método de medición. En Florencio del Castillo se utilizó el vehículo flotante, el cual limita su comportamiento en carretera a los pocos vehículos que los rodean, mientras que en las dos autopistas restantes se utilizó el radar, instrumento que toma en cuenta las velocidades de todos los vehículos livianos que pasaron por el punto de medición, en el intervalo de tiempo establecido de 15 minutos.

Como recomendación sugiero que se analice también la autopista Braulio Carrillo, para así contar con información de todas las autopistas más importantes del país, asimismo se podría analizar la autopista Bernardo Soto, aunque esta se reconstruirá en los próximos años.

Para ampliar este estudio recomiendo que se tomen en cuenta flujos en intervalos mayores y el total de la composición vehicular para obtener datos aún mejores, además obtener los datos por carril y no solamente los dos carriles en conjunto como se presenta en este trabajo.

Bibliografía y Referencias

1. Asociación Mexicana de Caminos. **Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito.** México D. F.

2. Cal y Mayor R., Rafael. **Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones.** Sétima edición. Editorial Alfaomega. México, 1994.

3. Gardeta-Oliveros. **Manual de Capacidad de Carreteras (Highway Capacity Manual).** Asociación Técnica de carreteras, Comité Español de la A.I.P.C.R. Madrid, España. 1987. Traducción.

4. Gerlough y Barnes. **The Poisson and Other Probability Distributions in Highway Traffic.** Eno Foundation for Transportation Inc. Connecticut, USA, 1971.

5. Gerlough y Huber. **Traffic Flow Theory.** Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C. 1975.

6. L.C.R. Logística, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. **Estudio de Factibilidad para la Ampliación y Mejoramiento de la Autopista General Cañas. Informe Final.** San José, Costa Rica, 1997.

7. Martínez M., Alejandro. **Control de Tránsito Urbano.** Asociación Mexicana de Caminos, A. C.. Asociación Mexicana de Ingeniería de Tránsito y Transporte A. C. Editorial Limusa. México, 1979.

8. Miller R., Irwin, Freund, John y Johnson, Richard. **Probabilidad y Estadística para Ingenieros.** Prentice Hall. Cuarta edición, México, 1992.

9. Miranda C., Fernando. **Metodología para la determinación de la capacidad en carreteras urbanas.** Informe de proyecto final de graduación, Universidad de Costa Rica, San José, 1984.

10. Muñoz Q., Arturo. **Capacidad y efecto de las pendientes en las autopistas.** Informe de proyecto final de graduación, Universidad de Costa Rica, San José, 1987.

11. Schwar y Puy Huarte. **Métodos Estadísticos en Ingeniería de Tránsito.** Asociación Mexicana de Caminos. Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A. México D.F. 1975. Traducción.

Anexos

Tabla 1. Resumen de datos recolectados en la autopista Florencio del Castillo.

Densidad	Volumen	Velocidad	Densidad	Volumen	Velocidad
9.83	433	88.1	7.94	344	86.6
9.41	439	93.3	6.09	288	94.6
8.59	391	91.03	0.93	46	99.3
7.41	338	91.2	1.22	58	95.3
8.74	392	89.7	1.56	73	93.5
5.29	240	90.8	1.36	67	98.4
5.61	253	90.15	1.71	80	93.3
7.62	340	89.23	1.76	84	95.6
7.59	352	92.8	1.70	83	97.8
8.48	385	90.8	1.94	101	104.3
8.09	366	90.5	3.65	165	90.3
6.10	288	94.4	4.29	190	88.6
7.13	321	90.1	4.90	213	87
10.34	462	89.35	3.90	180	92.4
6.98	322	92.25	3.77	170	90.1
6.17	287	93.1	4.18	186	89.1
8.36	344	82.3	3.63	169	93
9.08	360	79.3	3.56	162	91
11.62	458	78.85	4.19	190	90.6
6.12	279	91.2	3.59	169	94.2
10.68	432	80.9	4.42	205	92.7
12.02	469	78.05	3.32	152	91.6
9.47	412	87	4.49	207	92.3
8.25	388	94.1	3.61	170	94.1
9.91	396	79.9	3.60	165	91.6
7.13	324	90.9	3.55	173	97.6
3.92	183	93.3	4.38	203	92.8

Tabla 2. Resumen de datos recolectados en la autopista Próspero fernández.

Densidad	Volumen	Velocidad	Densidad	Volumen	Velocidad
2.02	90	89	7.63	314	82.3
3.65	160	87.6	6.02	253	84
4.98	212	85.2	5.25	223	85
6.83	289	84.6	4.40	189	86
10.37	411	79.3	4.32	187	86.6
9.31	380	81.6	1.85	84	90.6
11.12	436	78.4	1.86	82	88.4
9.50	391	82.3	2.90	129	89.1
7.79	321	82.4	3.75	173	92.2
7.15	297	83.1	4.66	199	85.4
5.37	227	84.6	3.91	179	91.5
4.84	203	83.8	3.20	147	92
6.41	265	82.7	2.51	115	91.6
5.89	248	84.2	3.35	151	90.2
4.94	210	85.1	0.68	29	85.8
3.95	175	88.7	0.97	42	86.33
4.41	194	88	1.14	49	86.1
1.84	83	90	1.41	63	89.6
3.29	148	90	1.41	63	89.4
4.99	217	87	1.30	58	89.1
6.48	272	84	1.51	67	88.5
9.94	405	81.5	1.76	79	90
8.70	355	81.6	8.83	362	82
9.72	393	80.9	6.48	274	84.6
8.79	362	82.4	5.46	232	85

Tabla 3. Resumen de datos recolectados en la autopista General Cañas

Densidad	Volumen	Velocidad	Densidad	Volumen	Velocidad
4.21	178	84.6	11.18	426	76.2
6.39	266	83.3	10.72	427	79.7
10.22	410	80.2	10.40	407	78.3
13.17	499	75.8	45.56	451	19.8
18.32	601	65.6	9.77	395	80.9
27.37	598	43.7	7.99	329	82.4
12.21	469	76.8	7.45	304	81.6
42.22	323	15.3	2.22	96	86.3
48.57	357	14.7	2.06	89	86.2
10.99	417	75.9	3.25	141	86.7
10.23	407	79.6	4.02	171	85.1
10.34	414	80.1	3.87	166	85.7
9.00	366	81.3	5.45	228	83.6
8.66	348	80.4	6.62	282	85.2
8.65	349	80.7	7.37	311	84.4
10.75	435	80.9	5.69	236	82.9
11.34	449	79.2	6.25	263	84.2
8.65	358	82.8	5.66	243	85.9
7.88	325	82.5	5.54	236	85.2
8.84	362	81.9	1.31	57	86.8
9.06	374	82.6	1.76	76	86.4
10.69	428	80.1	1.45	61	84.3
8.35	344	82.4	1.73	74	85.7
9.29	379	81.6	1.82	79	86.7
10.17	413	81.2	2.39	103	86.1
43.13	276	12.8	2.43	103	84.6
44.96	317	14.1	2.44	104	85.1
51.63	253	9.8	2.25	95	84.6
47.48	292	12.3	2.75	119	86.4
47.73	315	13.2	2.67	114	85.4
6.21	256	82.4	2.90	125	86.1
4.31	183	84.9	1.14	49	86.2
10.15	403	79.4	1.83	78	85.2
10.25	412	80.4	1.59	67	84.5
13.97	514	73.6	1.48	63	85.4
17.59	592	67.3	1.94	83	85.6
12.82	452	70.5	2.51	106	84.6
44.68	172	7.7	2.32	97	83.5
43.21	458	21.2	2.46	102	82.9
46.67	441	18.9	2.12	92	86.7
11.48	443	77.2	2.88	123	85.4
10.44	404	77.4	2.54	109	85.9
9.39	383	81.6	3.04	131	86.3
10.44	415	79.5	49.31	143	5.8
13.23	481	72.7	45.21	217	9.6
52.79	227	8.6	40.58	562	27.7

Tabla 4. Prueba de Chi cuadrado en Autopista Florencio del Castillo.

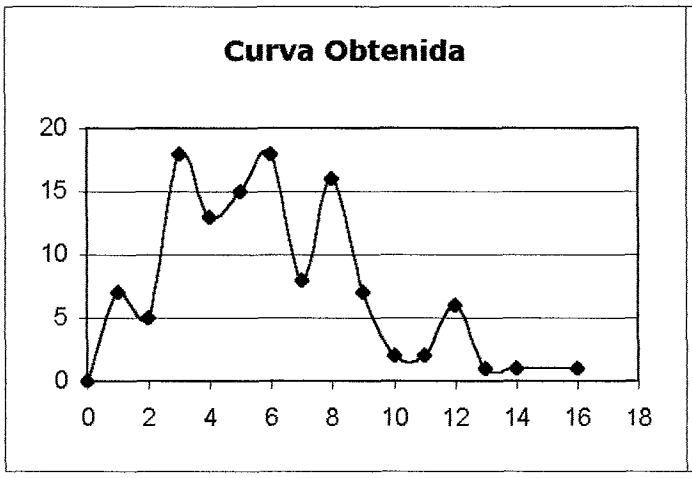
Lunes 10 am - 11 am

q = 716 vehículos livianos/hr

m=5.97 vehículos livianos

$$P(n)=m^k e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.003					
1	7	7	0.015	**0.015**	1.830	5.170	26.730	14.608
2	5	5	0.046	**0.046**	5.462	-0.462	0.214	0.039
3	18	18	0.091	**0.091**	10.870	7.130	50.842	4.677
4	13	13	0.135	**0.135**	16.223	-3.223	10.387	0.640
5	15	15	0.161	**0.161**	19.370	-4.370	19.098	0.986
6	18	18	0.161	**0.161**	19.273	-1.273	1.621	0.084
7	8	8	0.137	**0.137**	16.437	-8.437	71.190	4.331
8	16	16	0.102	**0.102**	12.266	3.734	13.940	1.136
9	7	7	0.068	**0.068**	8.137	-1.137	1.292	0.159
10	2		0.040					
11	2		0.022					
12	6		0.011					
13	1		0.005					
14	1		0.002					
16	1	13	0.000	**0.081**	9.703	3.297	10.871	1.120
	120							**27.781**



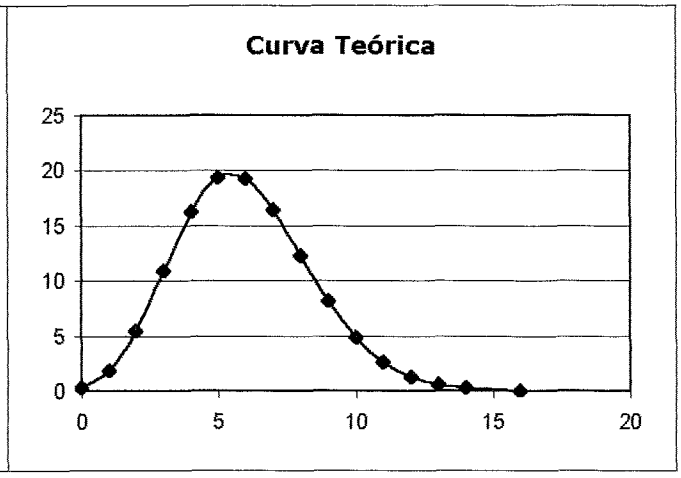


Tabla 5. Prueba Chi cuadrado Autopista Florencio del Castillo

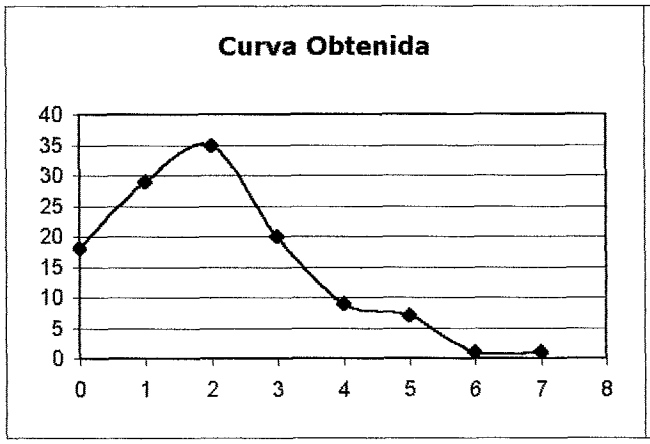
DOMINGO 7 am - 8 am

q = 244 vehículos livianos/hr

m= 2.033 vehículos livianos

$$P(n)=m^k e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	18	**18**	0.131	**0.131**	15.713	2.287	5.230	0.333
1	29	**29**	0.266	**0.266**	31.945	-2.945	8.671	0.271
2	35	**35**	0.271	**0.271**	32.472	2.528	6.392	0.197
3	20	**20**	0.183	**0.183**	22.005	-2.005	4.020	0.183
4	9	**9**	0.093	**0.093**	11.184	-2.184	4.770	0.427
5	7		0.038					
6	1		0.013					
7	1	**9**	0.004	**0.054**	6.536	-5.536	30.645	4.689
	120							**6.099**



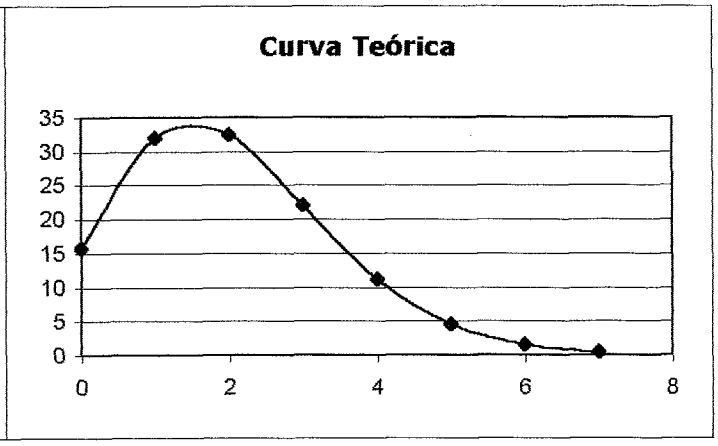


Tabla 6. Prueba Chi cuadrado Florencio del Castillo

DOMINGO 8 am - 9 am

q =348 vehículos livianos/hr

m= 2.9 vehículos livianos

$$P(n)=m^k e^{-m}/k!$$

K	fo	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	10	0.055	6.602	3.398	11.54	1.7484
1	24	0.160	19.152	4.848	23.50	1.2272
2	21	0.231	27.768	-6.768	45.81	1.6496
3	21	0.224	26.844	-5.844	34.15	1.2723
4	16	0.162	19.464	-3.464	12.00	0.6165
5	18	0.094	11.286	6.714	45.08	3.9941
6	5	0.024	2.833	2.167	4.70	1.6571
7	5	0.019	2.260	2.740	7.51	3.3235
	120					**15.4887**

Curva Obtenida

Curva Teórica

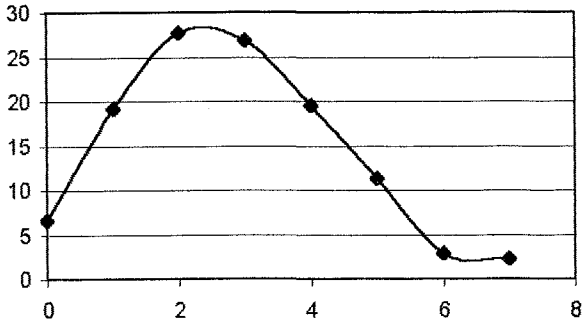


Tabla 7. Prueba en Florencio del Castillo

SÁBADO 7 am - 8 am

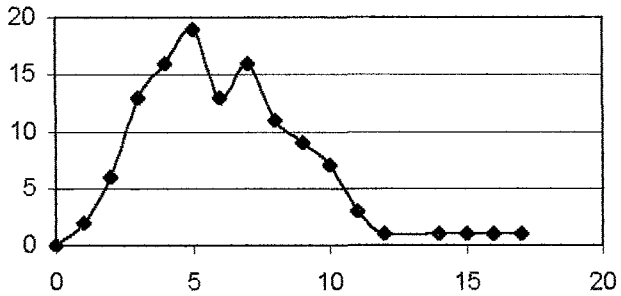
q = 748 vehículos livianos/hr

m= 6.233 vehículos livianos

$$P(n)=m^x e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.002					
1	2		0.012					
2	6	**8**	0.038	**0.050**	6.046	1.954	3.819	0.632
3	13	**13**	0.079	**0.079**	9.510	3.490	12.183	1.281
4	16	**16**	0.123	**0.123**	14.818	1.182	1.396	0.094
5	19	**19**	0.154	**0.154**	18.473	0.527	0.278	0.015
6	13	**13**	0.160	**0.160**	19.190	-6.190	38.316	1.997
7	16	**16**	0.142	**0.142**	17.087	-1.087	1.182	0.069
8	11	**11**	0.111	**0.111**	13.313	-2.313	5.351	0.402
9	9	**9**	0.077	**0.077**	9.220	-0.220	0.048	0.005
10	7	**7**	0.048	**0.048**	5.747	1.253	1.570	0.273
11	3		0.027					
12	1		0.014					
14	1		0.003					
15	1		0.001					
16	1		0.000					
17	1	**8**	0.000	**0.046**	5.539	2.461	6.058	1.094
	120	**120**						**5.862**

Curva obtenida



Curva Teórica

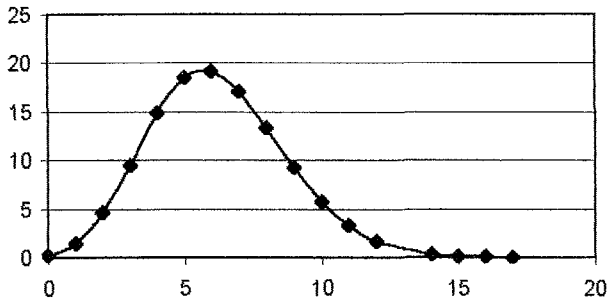


Tabla 8. Prueba en Florencio del Castillo

SÁBADO 8 am - 9 am

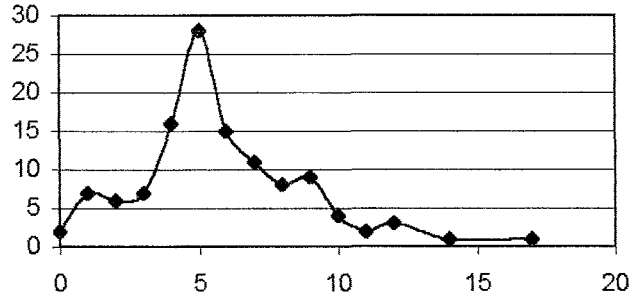
q = 687 vehículos livianos/hr

m= 5.725 vehículos livianos

$$P(n)=m^x e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	2		0.003					
1	7	**9**	0.019	**0.022**	2.634	6.366	40.532	15.391
2	6	**6**	0.053	**0.053**	6.418	-0.418	0.174	0.027
3	7	**7**	0.102	**0.102**	12.247	-5.247	27.528	2.248
4	16	**16**	0.146	**0.146**	17.528	-1.528	2.335	0.133
5	28	**28**	0.167	**0.167**	20.070	7.930	62.889	3.134
6	15	**15**	0.160	**0.160**	19.150	-4.150	17.221	0.899
7	11	**11**	0.131	**0.131**	15.662	-4.662	21.733	1.388
8	8	**8**	0.093	**0.093**	11.208	-3.208	10.291	0.918
9	9	**9**	0.059	**0.059**	7.130	1.870	3.499	0.491
10	4		0.034					
11	2	**6**	0.018	**0.052**	6.206	-0.206	0.042	0.007
12	3		0.008					
14	1		0.002					
17	1	**5**	0.000	**0.01**	1.204	3.796	14.407	11.962
	120	**120**						**36.597**

Curva obtenida



Curva Teórica

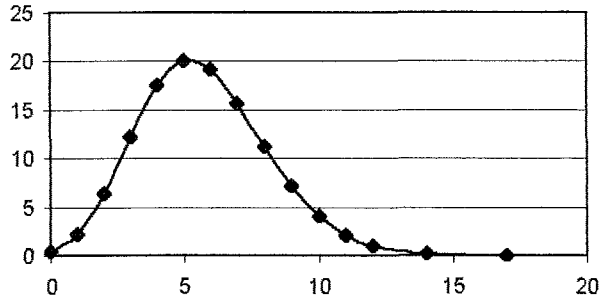


Tabla 9. Prueba en Florencio del Castillo

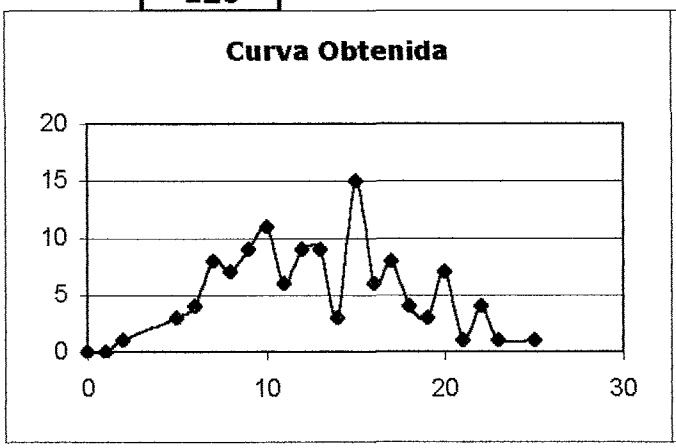
Miércoles 7 am - 8 am

q = 1560 vehículos livianos/hr

m= 13 vehículos livianos

$$P(n)=m^x e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	0		0.000					
2	1		0.000					
5	3		0.007					
6	4	**8**	0.015	**0.022**	2.681	5.319	28.297	10.556
7	8	**8**	0.028	**0.028**	3.377	4.623	21.372	6.329
8	7	**7**	0.046	**0.046**	5.488	1.512	2.287	0.417
9	9	**9**	0.066	**0.066**	7.926	1.074	1.152	0.145
10	11	**11**	0.086	**0.086**	10.304	0.696	0.484	0.047
11	6	**6**	0.101	**0.101**	12.178	-6.178	38.167	3.134
12	9	**9**	0.110	**0.110**	13.193	-4.193	17.579	1.333
13	9		0.110					
14	3	**12**	0.102	**0.212**	25.443	-13.443	180.720	7.103
15	15	**15**	0.088	**0.088**	10.617	4.383	19.210	1.809
16	6	**6**	0.072	**0.072**	8.626	-2.626	6.898	0.800
17	8	**8**	0.055	**0.055**	6.597	1.403	1.969	0.299
18	4		0.040					
19	3	**7**	0.027	**0.067**	8.024	-1.024	1.048	0.131
20	7	**7**	0.018	**0.018**	2.119	4.881	23.826	11.245
21	1		0.011					
22	4		0.006					
23	1		0.004					
25	1	**7**	0.001	**0.022**	2.648	4.352	18.938	7.151
	120							**50.498**



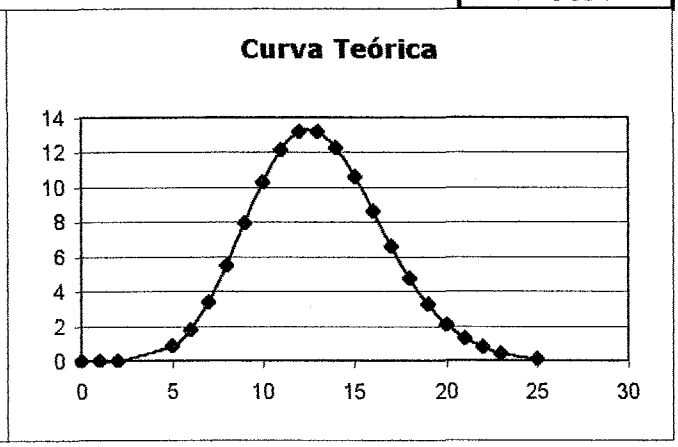


Tabla 10. Prueba en Florencio del Castillo

Miércoles 2 pm - 3 pm

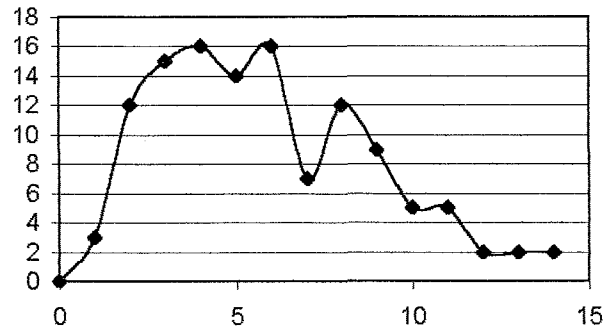
q = 711 vehículos livianos/hr

m= 5.925 vehículos livianos

$$P(n)=m^x e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.003					
1	3		0.016					
2	12	**15**	0.047	**0.063**	7.527	7.473	55.840	7.4182
3	15	**15**	0.093	**0.093**	11.115	3.885	15.095	1.3581
4	16	**16**	0.137	**0.137**	16.464	-0.464	0.215	0.0131
5	14	**14**	0.163	**0.163**	19.510	-5.510	30.355	1.5559
6	16	**16**	0.161	**0.161**	19.266	-3.266	10.665	0.5536
7	7	**7**	0.136	**0.136**	16.307	-9.307	86.620	5.3119
8	12	**12**	0.101	**0.101**	12.077	-0.077	0.006	0.0005
9	9	**9**	0.066	**0.066**	7.951	1.049	1.101	0.1384
10	5	**5**	0.039	**0.039**	4.711	0.289	0.084	0.0177
11	5	**5**	0.021	**0.021**	2.537	2.463	6.064	2.3898
12	2		0.010					
13	2		0.005					
14	2	**6**	0.002	**0.017**	2.066	3.934	15.480	7.4942
	120							**26.251**

Curva obtenida



Curva Teórica

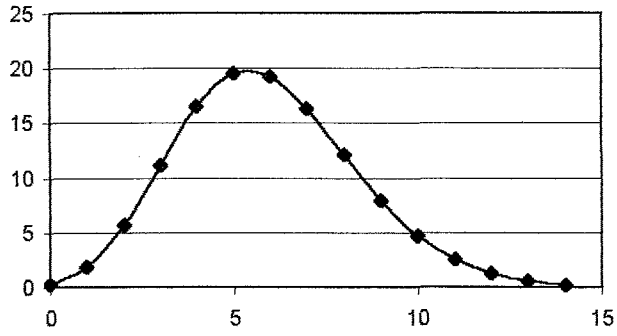


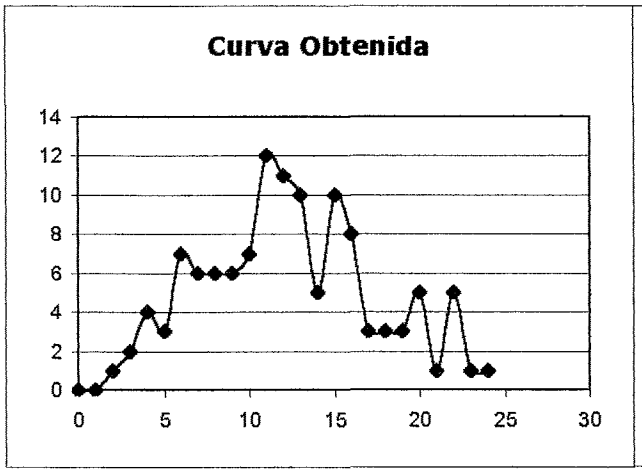
Tabla 11. Prueba de Chi cuadrado en Autopista General Cañas.

Viernes 8 am - 9 am

q = 1479 vehículos livianos/hr
m= 12.325 vehículos livianos

$$P(n)=m^k e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	0		0.000					
2	1		0.000					
3	2		0.001					
4	4	**7**	0.004	**0.006**	0.719	6.281	39.452	54.879
5	3		0.011					
6	7	**10**	0.022	**0.032**	3.856	6.144	37.748	9.789
7	6	**6**	0.038	**0.022**	2.594	3.406	11.604	4.474
8	6	**6**	0.059	**0.059**	7.080	-1.080	1.166	0.165
9	6	**6**	0.080	**0.080**	9.600	-3.600	12.960	1.350
10	7	**7**	0.099	**0.099**	11.880	-4.880	23.814	2.005
11	12	**12**	0.111	**0.111**	13.320	-1.320	1.742	0.131
12	11	**11**	0.114	**0.114**	13.680	-2.680	7.182	0.525
13	10	**10**	0.108	**0.108**	12.960	-2.960	8.762	0.676
14	5	**5**	0.095	**0.095**	11.400	-6.400	40.960	3.593
15	10	**10**	0.078	**0.078**	9.360	0.640	0.410	0.044
16	8	**8**	0.060	**0.060**	7.200	0.800	0.640	0.089
17	3		0.044					
18	3	**6**	0.030	**0.0735**	8.817	-2.817	7.938	0.900
19	3		0.019					
20	5	**8**	0.012	**0.0313**	3.757	4.243	18.001	4.791
21	1		0.007					
22	5		0.004					
23	1		0.002					
24	1	**8**	0.001	**0.0141**	1.694	6.306	39.768	23.478
	120							**106.889**



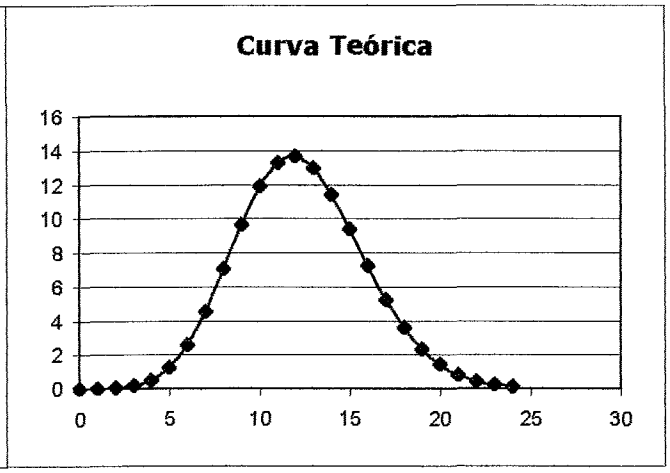


Tabla 12. Prueba de Chi cuadrado en Autopista General Cañas.

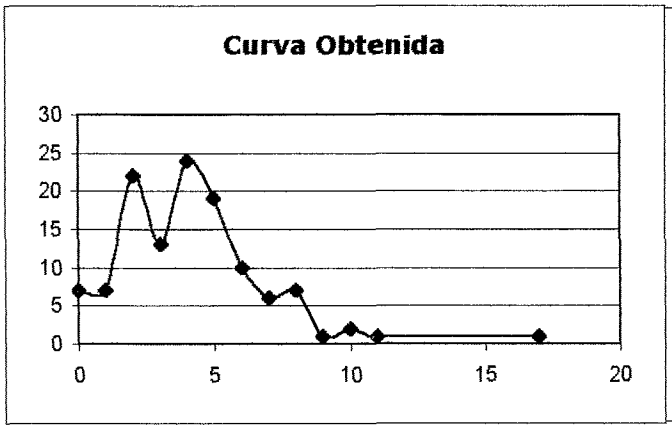
Sábado 6 am - 7 am

q = 497 vehículos livianos/hr

m= 4.142 vehículos livianos

$$P(n)=m^k e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	7	**7**	0.016	**0.066**	7.914	-0.914	0.835	0.105
1	7	**7**	0.066	**0.066**	7.914	-0.914	0.835	0.105
2	22	**22**	0.136	**0.136**	16.320	5.680	32.262	1.977
3	13	**13**	0.188	**0.188**	22.560	-9.560	91.394	4.051
4	24	**24**	0.195	**0.195**	23.400	0.600	0.360	0.015
5	19	**19**	0.161	**0.161**	19.320	-0.320	0.102	0.005
6	10	**10**	0.111	**0.111**	13.320	-3.320	11.022	0.828
7	6	**6**	0.066	**0.066**	7.920	-1.920	3.686	0.465
8	7	**7**	0.034	**0.034**	4.080	2.920	8.526	2.090
9	1		0.016		0.000	0.000	0.000	
10	2		0.007		0.000	0.000	0.000	
11	1		0.002		0.000	0.000	0.000	
17	1	**5**	0.000	**0.025**	2.961	2.039	4.158	1.404
	120							**11.047**



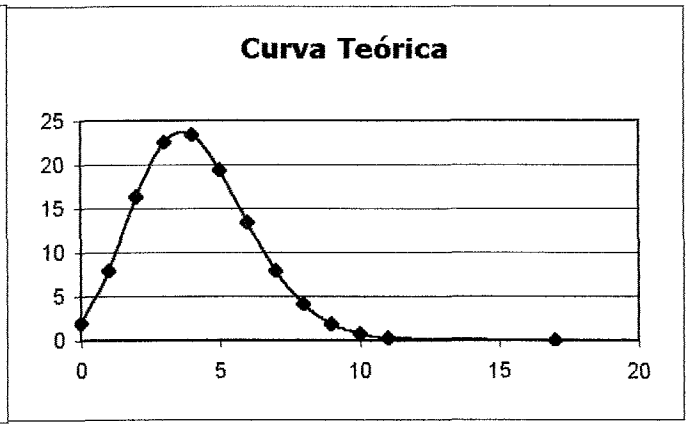


Tabla 13. Prueba de Chi cuadrado en Autopista General Cañas.

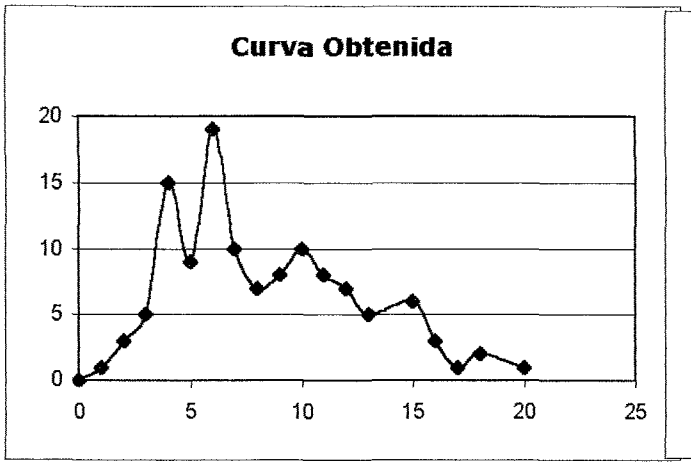
Sábado 7 am - 8 am

q = 987 vehículos livianos/hr

m= 8.255 vehículos livianos

$$P(n)=m^k e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	1		0.002		0.000			
2	3		0.009		0.000			
3	5	**8**	0.024	**0.035**	4.245			
4	15	**15**	0.050	**0.050**	6.000	9.000	81.000	13.500
5	9	**9**	0.083	**0.083**	9.960			
6	19	**19**	0.114	**0.114**	13.680	5.320	28.302	2.069
7	10	**10**	0.135	**0.135**	16.200	-6.200	38.440	2.373
8	7	**7**	0.139	**0.139**	16.680	-9.680	93.702	5.618
9	8	**8**	0.128	**0.128**	15.360	-7.360	54.170	3.527
10	10	**10**	0.105	**0.105**	12.600	-2.600	6.760	0.537
11	8	**8**	0.079	**0.079**	9.480	-1.480	2.190	0.231
12	7	**7**	0.054	**0.054**	6.480	0.520	0.270	0.042
13	5	**5**	0.035	**0.035**	4.200	0.800	0.640	0.152
15	6	**6**	0.011	**0.011**	1.320	4.680	21.902	16.593
16	3		0.006		0.000	0.000	0.000	
17	1		0.003		0.000			
18	2		0.001		0.000	0.000	0.000	
20	1	**7**	0.000	**0.0101**	1.212	5.788	33.500	27.639
	120							**72.279**



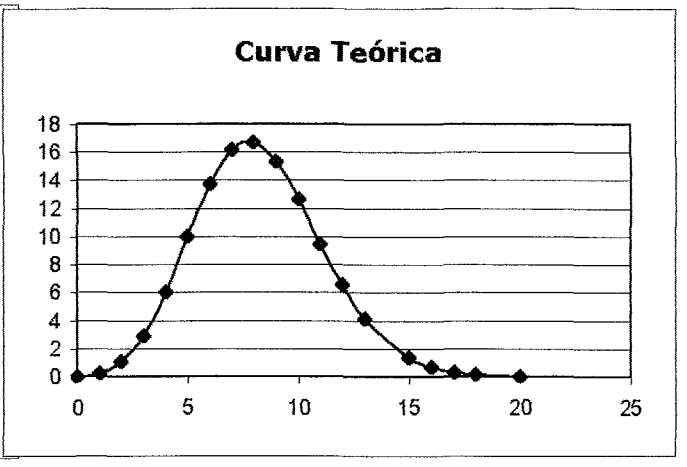


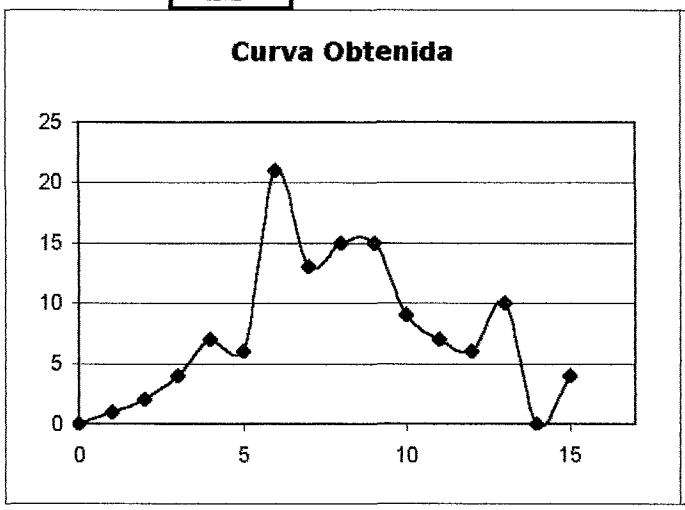
Tabla 14. Prueba de Chi cuadrado en Autopista General Cañas.

Sábado 8 am - 9 am

q = 978 vehículos livianos/hr $\mathbf{P(n)=m^k e^{-m}/k!}$

m= 8.15 vehículos livianos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	1		0.002					
2	2		0.010					
3	4	**7**	0.026	**0.038**	4.559	2.441	5.958	1.307
4	7	**7**	0.053	**0.053**	6.369	0.631	0.398	0.062
5	6	**6**	0.087	**0.087**	10.382	-4.382	19.203	1.850
6	21	**21**	0.118	**0.118**	14.102	6.898	47.576	3.374
7	13	**13**	0.137	**0.137**	16.419	-3.419	11.691	0.712
8	15	**15**	0.139	**0.139**	16.727	-1.727	2.983	0.178
9	15	**15**	0.126	**0.126**	15.147	-0.147	0.022	0.001
10	9	**9**	0.103	**0.103**	12.345	-3.345	11.190	0.906
11	7	**7**	0.076	**0.076**	9.147	-2.147	4.608	0.504
12	6	**6**	0.052	**0.052**	6.212	-0.212	0.045	0.007
13	10		0.032					
14	0		0.019					
15	4	**14**	0.010	**0.043**	5.126	8.874	78.743	15.361
16			0.005					
17			0.003					
18			0.001					
19			0.000					
	120							**24.262**



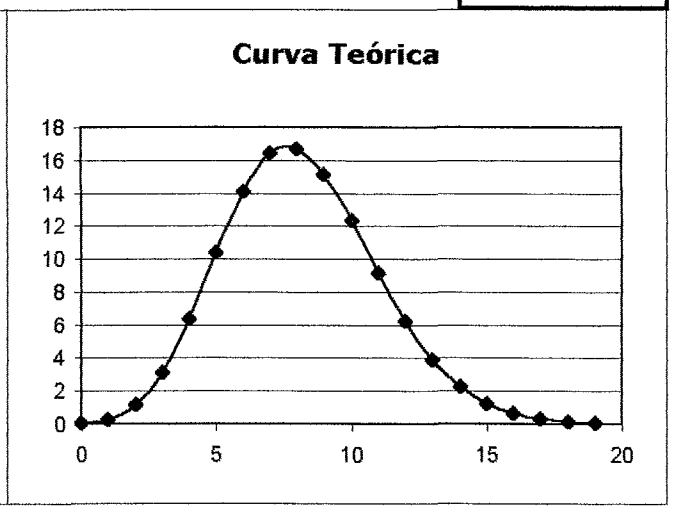


Tabla 15. Prueba de Chi cuadrado en Autopista General Cañas.

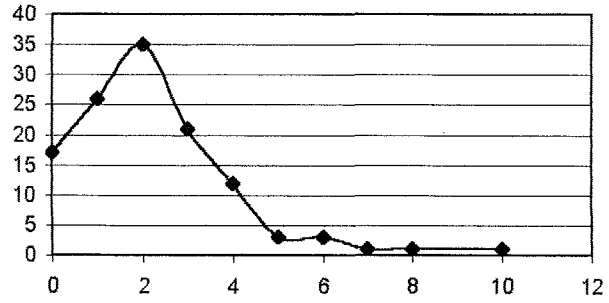
Domingo 6 am - 7 am

q = 268 vehículos livianos/hr
m=2.233 vehículos livianos

$$P(n)=m^k e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	17	**17**	0.107	**0.107**	12.865	4.135	17.100	1.329
1	26	**26**	0.239	**0.239**	28.727	-2.727	7.437	0.259
2	35	**35**	0.267	**0.267**	32.074	2.926	8.563	0.267
3	21	**21**	0.199	**0.199**	23.874	-2.874	8.257	0.346
4	12	**12**	0.111	**0.111**	13.327	-1.327	1.762	0.132
5	3		0.050					
6	3		0.018					
7	1		0.006					
8	1		0.002					
10	1	**9**	0.000	**0.076**	9.082	-0.082	0.007	0.001
	120							**2.334**

Curva Obtenida



Curva Teórica

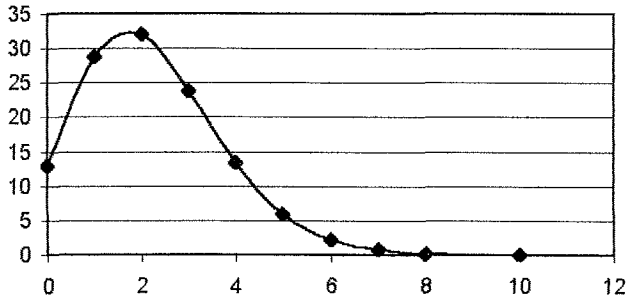


Tabla 16. Prueba de Chi cuadrado en Autopista General Cañas.

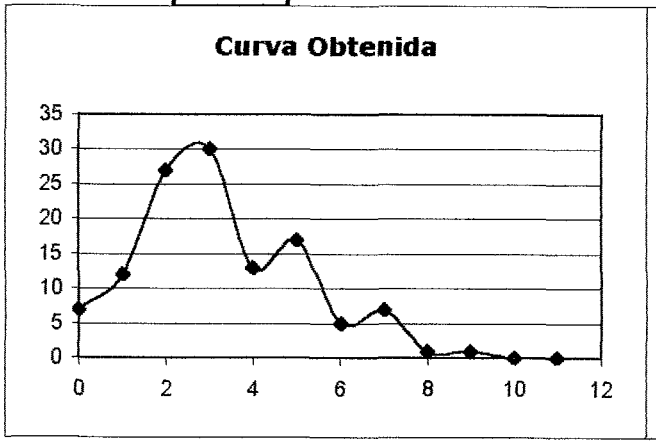
Domingo 7 am - 8 am

q = 389 vehículos livianos/hr

m=3.24 vehículos livianos

$$P(n)=m^k e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	7	7	0.039	**0.0392**	4.700	2.300	5.292	1.126
1	12	12	0.127	**0.1269**	15.227	-3.227	10.413	0.684
2	27	27	0.206	**0.206**	24.668	2.332	5.440	0.221
3	30	30	0.222	**0.222**	26.641	3.359	11.283	0.424
4	13	13	0.180	**0.180**	21.579	-8.579	73.603	3.411
5	17	17	0.117	**0.117**	13.983	3.017	9.100	0.651
6	5	5	0.063	**0.063**	7.551	-2.551	6.508	0.862
7	7		0.029					
8	1		0.012					
9	1	9	0.004	**0.045**	5.400	3.600	12.960	2.400
10	0		0.001					
11	0	9	0.000					
	120							**8.651**



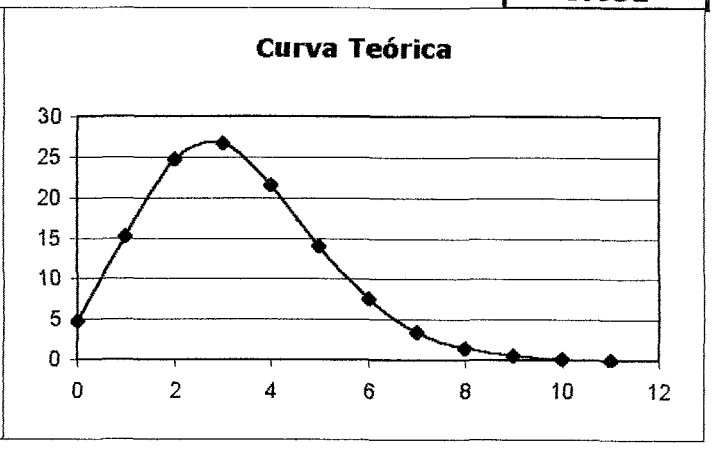


Tabla 17. Prueba de Chi cuadrado en Autopista General Cañas.

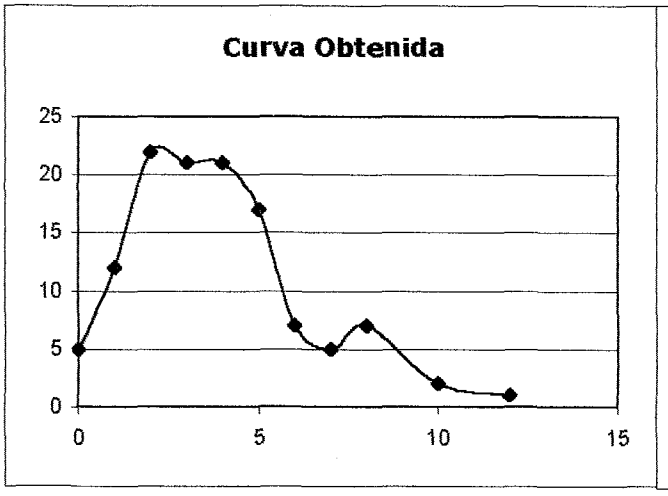
Domingo 8 am - 9 am

q = 453 vehículos livianos/hr

m= 3.775 vehículos livianos

$$P(n)=m^k e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	5	5	0.023	**0.023**	2.752	2.248	5.051	1.835
1	12	12	0.087	**0.0866**	10.391	1.609	2.590	0.249
2	22	22	0.163	**0.163**	19.612	2.388	5.702	0.291
3	21	21	0.206	**0.206**	24.679	-3.679	13.532	0.548
4	21	21	0.194	**0.194**	23.290	-2.290	5.246	0.225
5	17	17	0.147	**0.147**	17.584	-0.584	0.341	0.019
6	7	7	0.092	**0.092**	11.063	-4.063	16.511	1.492
7	5	5	0.050	**0.050**	5.966	-0.966	0.934	0.157
8	7		0.023					
10	2		0.004					
12	1	10	0.000	**0.028**	3.309	6.691	44.766	13.527
	120							**18.345**



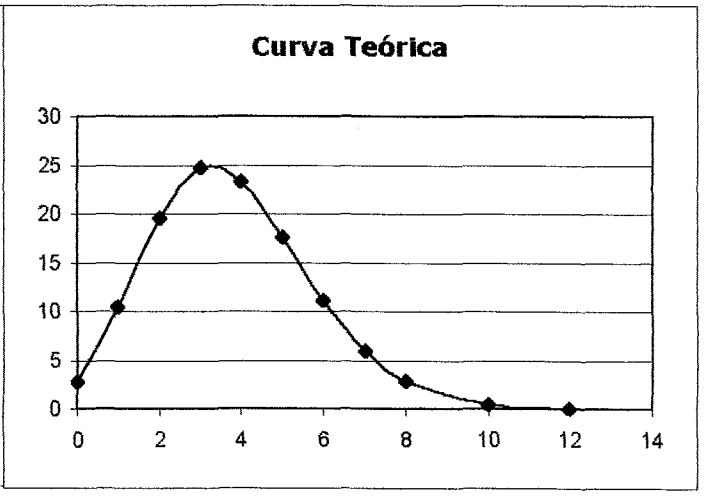


Tabla 18. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.

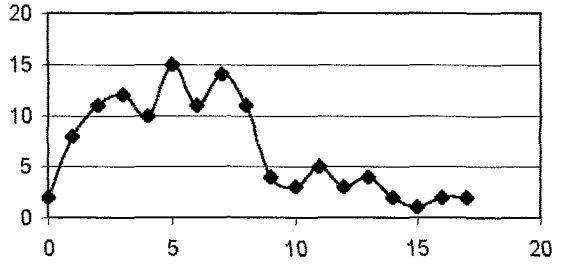
Lunes 6 am - 7 am

q = 751 vehículos livianos/hr $\mathbf{P(n)=m^k e^{-m}/k!}$

m= 6.26 vehículos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	2		0.002					
1	8	**10**	0.012	**0.014**	1.665	8.335	69.471	41.722
2	11	**11**	0.037	**0.037**	4.494	6.506	42.330	9.420
3	12	**12**	0.078	**0.078**	9.377	2.623	6.879	0.734
4	10	**10**	0.122	**0.122**	14.675	-4.675	21.857	1.489
5	15	**15**	0.153	**0.153**	18.373	-3.373	11.379	0.619
6	11	**11**	0.160	**0.160**	19.170	-8.170	66.741	3.482
7	14	**14**	0.143	**0.143**	17.143	-3.143	9.879	0.576
8	11	**11**	0.112	**0.112**	13.414	-2.414	5.829	0.435
9	4		0.078					
10	3	**7**	0.049	**0.126**	15.171	-8.171	66.771	4.401
11	5	**5**	0.028	**0.111**	13.320	-8.320	69.222	5.197
12	3		0.014					
13	4	**7**	0.007	**0.021**	2.569	4.431	19.634	7.643
14	2		0.003					
15	1		0.001					
16	2		0.001					
17	2	**7**	0.000	**0.0051**	0.613	6.387	40.799	66.601
	120							**142.318**

Curva Obtenida



Curva Teórica

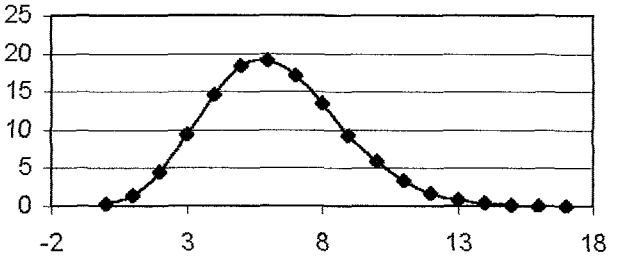


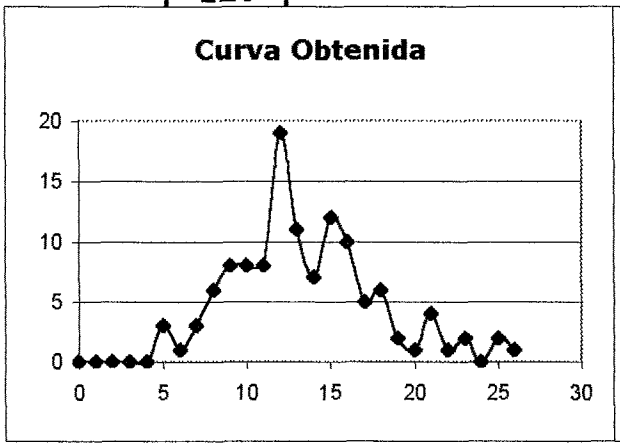
Tabla 19. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.

Lunes 7 am - 8 am

q = 1618 vehículos livianos/hr $\mathbf{P(n)=m^k e^{-m}/k!}$

m= 13.483 vehículos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	0		0.000					
2	0		0.000					
3	0		0.001					
4	0		0.002					
5	3		0.005					
6	1		0.012					
7	3	**7**	0.022	**0.042**	5.023	1.977	3.907	0.778
8	6	**6**	0.038	**0.038**	4.533	1.467	2.153	0.475
9	8	**8**	0.057	**0.057**	6.791	1.209	1.463	0.215
10	8	**8**	0.076	**0.076**	9.156	-1.156	1.336	0.146
11	8	**8**	0.094	**0.094**	11.222	-3.222	10.384	0.925
12	19	**19**	0.105	**0.105**	12.609	6.391	40.841	3.239
13	11	**11**	0.109	**0.109**	13.078	-2.078	4.317	0.330
14	7	**7**	0.105	**0.105**	12.595	-5.595	31.302	2.485
15	12	**12**	0.094	**0.094**	11.321	0.679	0.461	0.041
16	10	**10**	0.080	**0.080**	9.540	0.460	0.211	0.022
17	5	**5**	0.063	**0.0631**	7.566	-2.566	6.587	0.871
18	6	**6**	0.047	**0.0472**	5.668	0.332	0.110	0.019
19	2		0.034					
20	1		0.023					
21	4	**7**	0.015	**0.0706**	8.474	-1.474	2.173	0.256
22	1		0.009					
23	2		0.005					
24	0		0.003					
25	2		0.002					
26	1	**6**	0.001	**0.0194**	2.331	3.669	13.458	5.772
	120							**15.575**



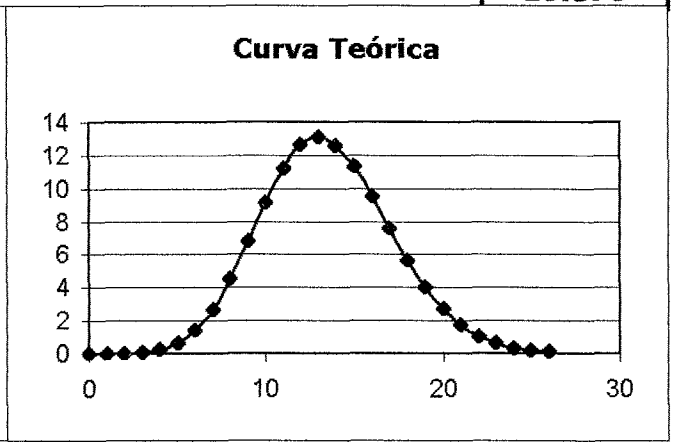


Tabla 20. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.

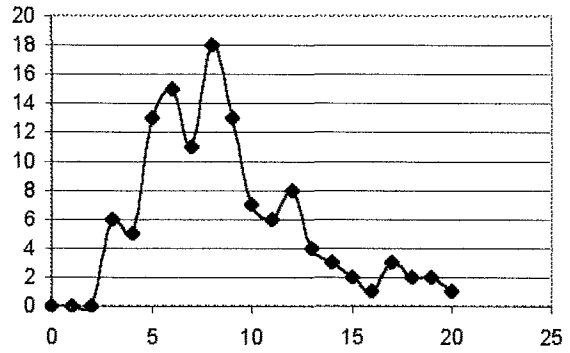
Lunes 8 am - 9 am

q = 1048 vehículos livianos/hr $\mathbf{P(n)=m^k e^{-m}/k!}$

m= 8.733 vehículos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	0		0.001					
2	0		0.006					
3	6	**6**	0.018	**0.018**	2.147	3.853	14.846	6.915
4	5	**5**	0.039	**0.039**	4.687	0.313	0.098	0.021
5	13	**13**	0.068	**0.068**	8.187	4.813	23.165	2.830
6	15	**15**	0.099	**0.099**	11.916	3.084	9.510	0.798
7	11	**11**	0.124	**0.124**	14.866	-3.866	14.948	1.005
8	18	**18**	0.135	**0.135**	16.228	1.772	3.139	0.193
9	13	**13**	0.131	**0.131**	15.747	-2.747	7.546	0.479
10	7	**7**	0.115	**0.115**	13.752	-6.752	45.587	3.315
11	6	**6**	0.091	**0.091**	10.918	-4.918	24.183	2.215
12	8	**8**	0.066	**0.066**	7.945	0.055	0.003	0.000
13	4		0.044					
14	3	**7**	0.028	**0.072**	8.667	-1.667	2.778	0.321
15	2		0.016					
16	1		0.009					
17	3	**6**	0.005	**0.0295**	3.540	2.460	6.052	1.710
18	2		0.002					
19	2		0.001					
20	1	**5**	0.000	**0.0036**	0.438	4.562	20.814	47.541
	120							**67.343**

Curva Obtenida



Curva Teórica

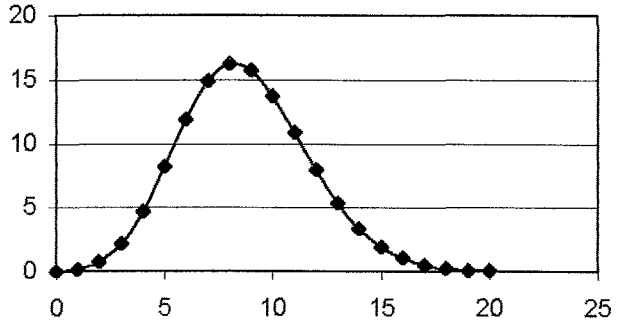


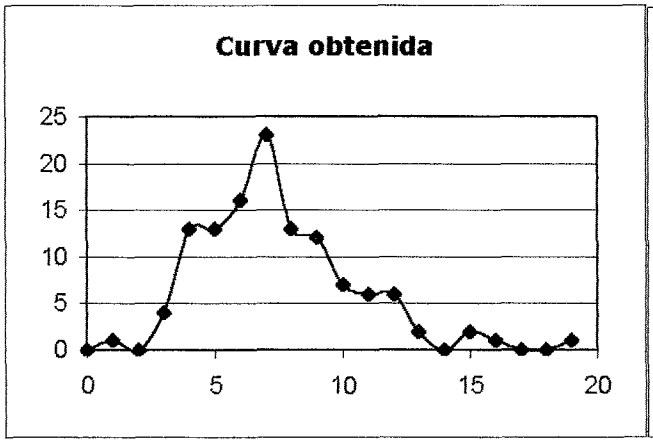
Tabla 21. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.

Martes 8 am - 9 am

q = 898 vehículos livianos/hr $\mathbf{P(n)=m^k e^{-m}/k!}$

m= 7.483 vehículos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.001					
1	1		0.004					
2	0		0.016					
3	4	**5**	0.039	**0.043**	5.220	-0.220	0.048	0.009
4	13	**13**	0.073	**0.073**	8.820	4.180	17.476	1.982
5	13	**13**	0.110	**0.110**	13.199	-0.199	0.040	0.003
6	16	**16**	0.137	**0.137**	16.462	-0.462	0.213	0.013
7	23	**23**	0.147	**0.147**	17.598	5.402	29.185	1.658
8	13	**13**	0.137	**0.137**	16.460	-3.460	11.975	0.727
9	12	**12**	0.114	**0.114**	13.686	-1.686	2.842	0.208
10	7	**7**	0.085	**0.085**	10.241	-3.241	10.505	1.026
11	6	**6**	0.058	**0.058**	6.967	-0.967	0.935	0.134
12	6	**6**	0.036	**0.036**	4.344	1.656	2.741	0.631
13	2		0.021					
14	0		0.011					
15	2		0.006					
16	1		0.003					
17	0		0.001					
18	0		0.000					
19	1	**6**	0.000	**0.0292**	3.502	2.498	6.241	1.782
	120							**8.173**



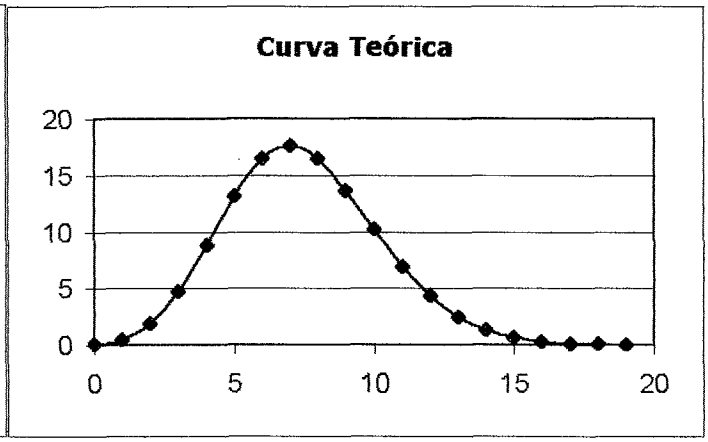


Tabla 22. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.

Miércoles 6 am - 7 am

q =720 vehículos livianos/hr $\mathbf{P(n)=m^k e^{-m}/k!}$

m= 6.00 vehículos livianos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	2		0.002					
1	9	**11**	0.015	**0.017**	2.082	8.918	79.528	38.195
2	10	**10**	0.045	**0.045**	5.354	4.646	21.584	4.031
3	9	**9**	0.089	**0.089**	10.708	-1.708	2.918	0.272
4	19	**19**	0.134	**0.134**	16.062	2.938	8.630	0.537
5	14	**14**	0.161	**0.161**	19.275	-5.275	27.823	1.444
6	13	**13**	0.161	**0.161**	19.275	-6.275	39.373	2.043
7	10	**10**	0.138	**0.138**	16.521	-6.521	42.527	2.574
8	4		0.103					
9	10	**14**	0.069	**0.172**	20.652	-6.652	44.243	2.142
10	6	**6**	0.041	**0.041**	4.956	1.044	1.089	0.220
11	4		0.023					
12	1	**5**	0.011	**0.034**	4.055	0.945	0.893	0.220
13	3		0.005					
14	3		0.002					
15	1		0.001					
16	1		0.000					
17	0		0.000					
18	0		0.000					
19	0		0.000					
20	1	**9**	0.000	**0.0088**	1.059	7.941	63.058	59.537
	120							**111.216**

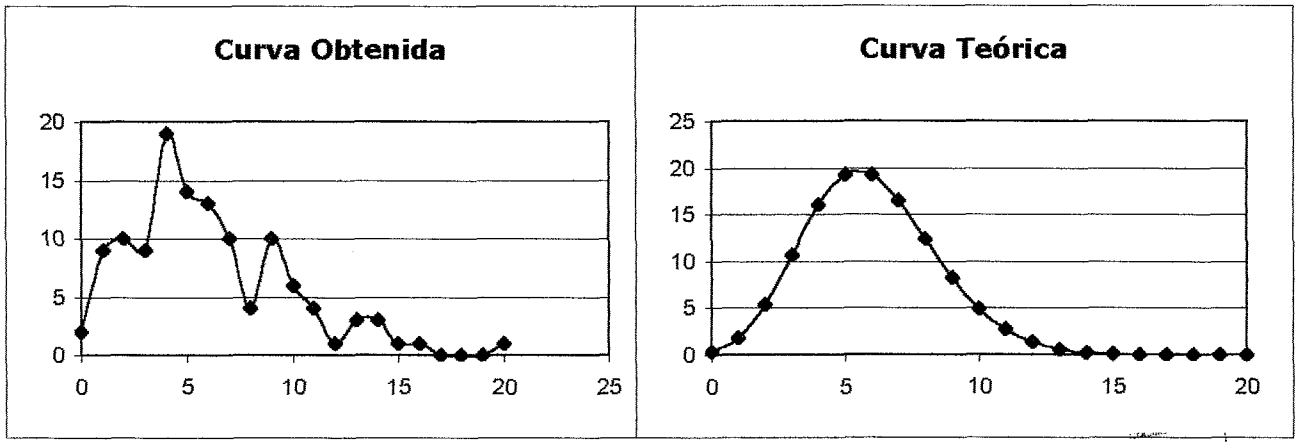


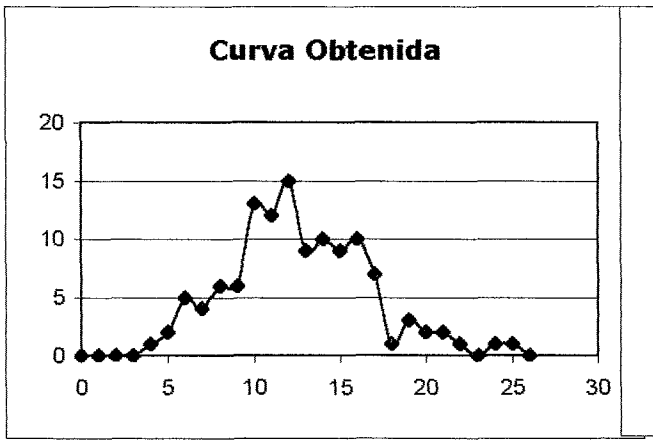
Tabla 23. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.

Miércoles 7 am - 8 am

q =1515 vehículos livianos/hr $\mathbf{P(n)=m^k e^{-m}/k!}$

m= 12.625 vehículos livianos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	0		0.000					
2	0		0.000					
3	0		0.001					
4	1		0.003					
5	2		0.009					
6	5	**8**	0.018	**0.031**	3.692	4.308	18.557	5.026
7	4		0.033					
8	6	**10**	0.053	**0.086**	10.321	-0.321	0.103	0.010
9	6	**6**	0.074	**0.074**	8.862	-2.862	8.191	0.924
10	13	**13**	0.093	**0.093**	11.188	1.812	3.282	0.293
11	12	**12**	0.107	**0.107**	12.841	-0.841	0.707	0.055
12	15	**15**	0.113	**0.113**	13.510	1.490	2.220	0.164
13	9	**9**	0.109	**0.109**	13.120	-4.120	16.976	1.294
14	10	**10**	0.099	**0.099**	11.832	-1.832	3.355	0.284
15	9	**9**	0.083	**0.083**	9.958	-0.958	0.918	0.092
16	10	**10**	0.065	**0.065**	7.858	2.142	4.589	0.584
17	7	**7**	0.049	**0.049**	5.836	1.164	1.356	0.232
18	1		0.034					
19	3		0.023					
20	2	**6**	0.014	**0.071**	8.529	-2.529	6.398	0.750
21	2		0.009					
22	1		0.005					
23	0		0.003					
24	1		0.001					
25	1	**5**	0.001	**0.016**	1.882	3.118	9.723	5.167
26	0		0.000					
	120							**14.876**



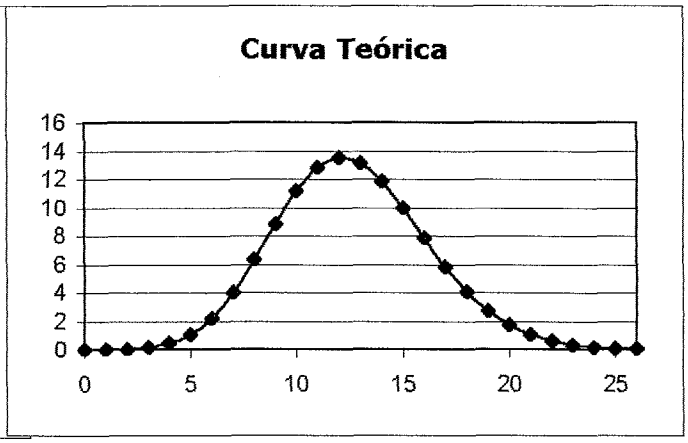


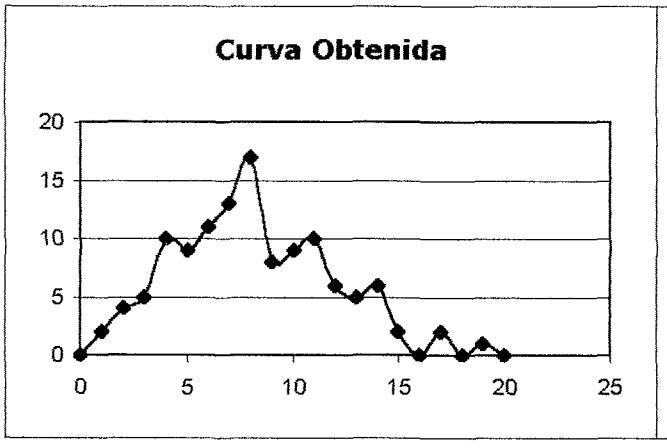
Tabla 24. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.

Miércoles 8 am - 9 am

q =979 vehículos livianos/hr $\mathbf{P(n)=m^k e^{-m}/k!}$

m= 8.158 vehículos livianos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	2		0.002					
2	4	**6**	0.010	**0.012**	1.424	4.576	20.938	14.702
3	5	**5**	0.026	**0.026**	3.110	1.890	3.571	1.148
4	10	**10**	0.053	**0.053**	6.344	3.656	13.370	2.108
5	9	**9**	0.086	**0.086**	10.350	-1.350	1.823	0.176
6	11	**11**	0.117	**0.117**	14.073	-3.073	9.441	0.671
7	13	**13**	0.137	**0.137**	16.401	-3.401	11.565	0.705
8	17	**17**	0.139	**0.139**	16.725	0.275	0.076	0.005
9	8	**8**	0.126	**0.126**	15.160	-7.160	51.265	3.382
10	9	**9**	0.103	**0.103**	12.367	-3.367	11.340	0.917
11	10	**10**	0.076	**0.076**	9.172	0.828	0.685	0.075
12	6	**6**	0.052	**0.052**	6.236	-0.236	0.055	0.009
13	5	**5**	0.033	**0.033**	3.913	1.087	1.181	0.302
14	6	**6**	0.019	**0.019**	2.280	3.720	13.837	6.068
15	2		0.010					
16	0		0.005					
17	2		0.003					
18	0		0.001					
19	1	**5**	0.000	**0.013**	1.603	3.397	11.542	7.202
20	0		0.000					
	120							**37.469**



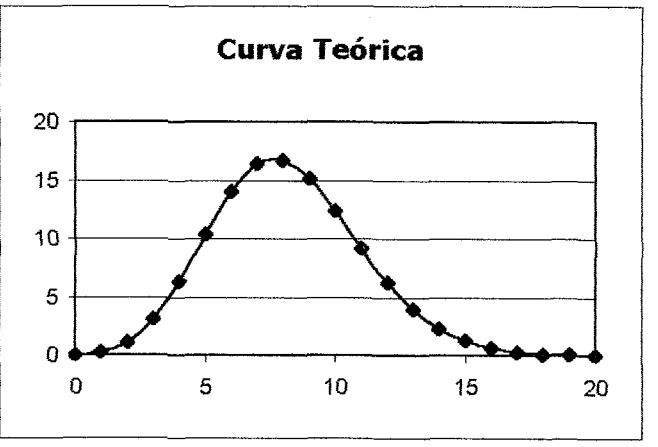


Tabla 25. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.

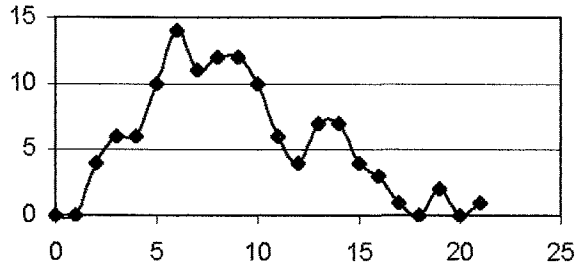
Viernes 8 am - 9 am

q = 1062 vehículos livianos/hr
m= 8.85 vehículos livianos

$$P(n)=m^k e^{-m}/k!$$

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.000					
1	0		0.001					
2	4		0.006					
3	6	**10**	0.017	**0.022**	2.662	7.338	53.853	20.234
4	6	**6**	0.037	**0.037**	4.398	1.602	2.567	0.584
5	10	**10**	0.065	**0.065**	7.784	2.216	4.910	0.631
6	14	**14**	0.096	**0.096**	11.520	2.480	6.150	0.534
7	11	**11**	0.121	**0.121**	14.520	-3.520	12.390	0.853
8	12	**12**	0.134	**0.134**	16.080	-4.080	16.646	1.035
9	12	**12**	0.132	**0.132**	15.840	-3.840	14.746	0.931
10	10	**10**	0.116	**0.116**	13.920	-3.920	15.366	1.104
11	6	**6**	0.094	**0.094**	11.280	-5.280	27.878	2.471
12	4		0.069					
13	7	**11**	0.047	**0.116**	13.937	-2.937	8.625	0.619
14	7		0.030					
15	4	**11**	0.018	**0.047**	5.674	5.326	28.369	5.000
16	3		0.010					
17	1		0.005					
18	0		0.002					
19	2		0.001					
20	0		0.001					
21	1	**7**	0.000	**0.0161**	1.935	5.065	25.649	13.252
	120							**47.248**

Curva Obtenida



Curva Teórica

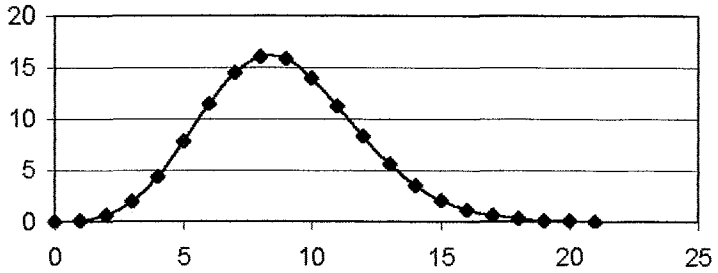


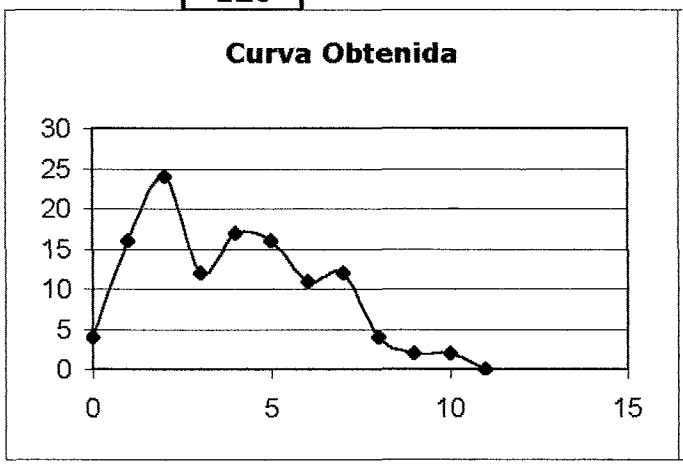
Tabla 26. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.

Sábado 7 am - 8 am

q = 468 vehículos livianos/hr $\mathbf{P(n)=m^k e^{-m}/k!}$

m= 3.9 vehículos livianos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	4		0.020					
1	16	**20**	0.079	**0.099**	11.902	8.098	65.574	5.509
2	24	**24**	0.154	**0.154**	18.473	5.527	30.550	1.654
3	12	**12**	0.200	**0.200**	24.015	-12.015	144.351	6.011
4	17	**17**	0.195	**0.195**	23.414	-6.414	41.142	1.757
5	16	**16**	0.152	**0.152**	18.263	-2.263	5.122	0.280
6	11	**11**	0.099	**0.099**	11.871	-0.871	0.759	0.064
7	12	**12**	0.055	**0.055**	6.614	5.386	29.011	4.386
8	4		0.027					
9	2		0.012					
10	2	**8**	0.005	**0.043**	5.166	2.834	8.030	1.554
11	0		0.002					
12	0		0.001					
13	0		0.000					
	120							**21.216**



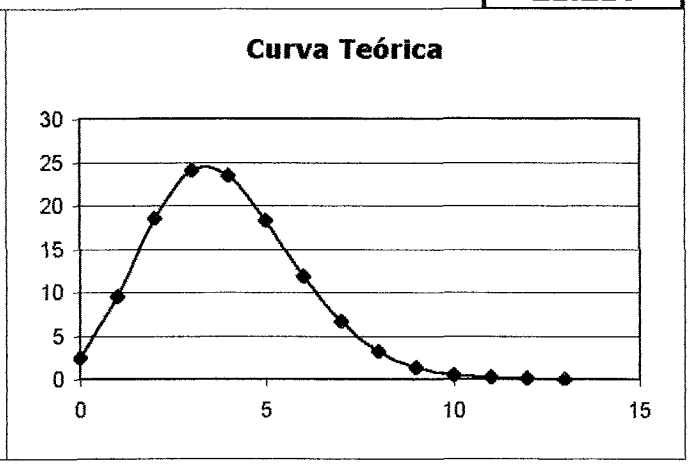


Tabla 27. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.

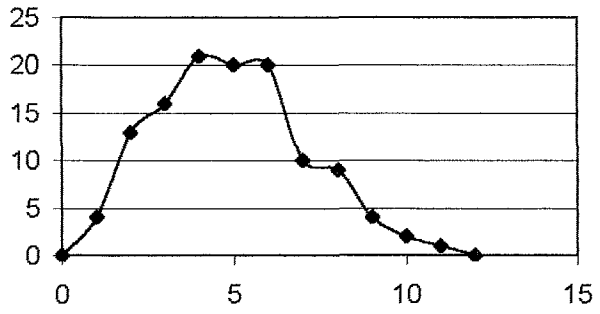
Sábado 8 am - 9 am

q = 592 vehículos livianos/hr $\mathbf{P(n)=m^k e^{-m}/k!}$

m= 4.933 vehículos livianos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	0		0.007					
1	4		0.036					
2	13	**17**	0.088	**0.123**	14.785	2.215	4.908	0.332
3	16	**16**	0.144	**0.144**	17.298	-1.298	1.684	0.097
4	21	**21**	0.178	**0.178**	21.332	-0.332	0.110	0.005
5	20	**20**	0.175	**0.175**	21.047	-1.047	1.095	0.052
6	20	**20**	0.144	**0.144**	17.304	2.696	7.270	0.420
7	10	**10**	0.102	**0.102**	12.194	-2.194	4.815	0.395
8	9	**9**	0.063	**0.063**	7.519	1.481	2.193	0.292
9	4		0.034					
10	2		0.017					
11	1	**7**	0.008	**0.059**	7.066	-0.066	0.004	0.001
12	0		0.003					
13			0.001					
14			0.000					
	120							**1.594**

Curva Obtenida



Curva Teórica

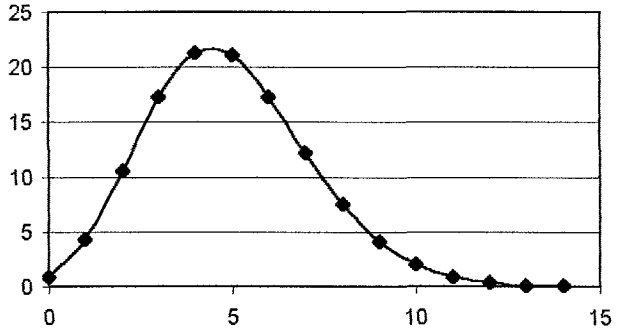
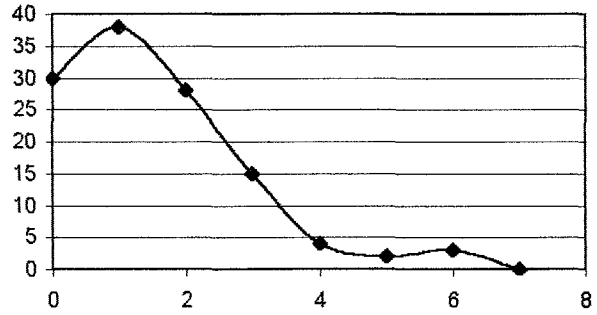


Tabla 28. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.
Domingo 7 am - 8 am
q = 183 vehículos livianos/hr **$P(n)=m^k e^{-m}/k!$**
m=1.525 vehículos livianos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	30	**30**	0.218	**0.218**	26.115	3.885	15.097	0.578
1	38	**38**	0.332	**0.332**	39.825	-1.825	3.329	0.084
2	28	**28**	0.253	**0.253**	30.366	-2.366	5.599	0.184
3	15	**15**	0.129	**0.129**	15.436	-0.436	0.190	0.012
4	4		0.049					
5	2		0.015					
6	3	**9**	0.004	**0.068**	8.136	0.864	0.746	0.092
7	0		0.001					
8			0.000					
9			0.000					0.000
	120							**0.950**

Curva Obtenida



Curva Teórica

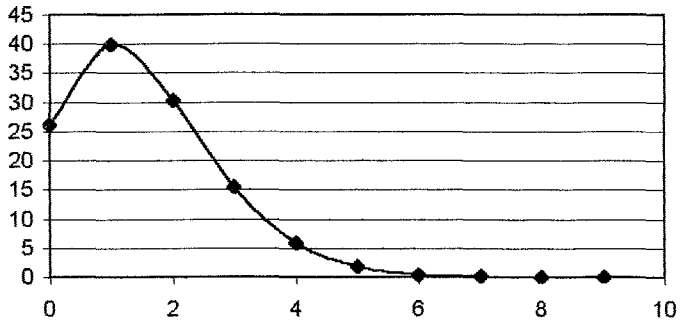
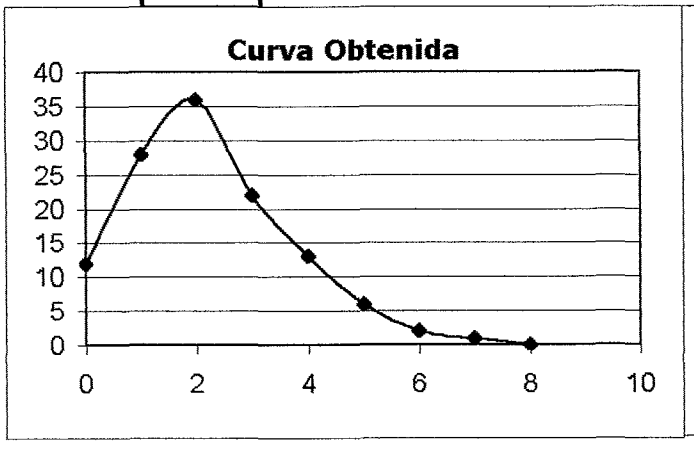


Tabla 29. Prueba de Chi cuadrado en la autopista Próspero Fernández.
Domingo 8 am - 9 am
q = 267 vehículos livianos/hr **$P(n)=m^k e^{-m}/k!$**
m=2.225 vehículos livianos

K	fo	fo	P(n)	P(n)	fe	fo-fe	$(fo-fe)^2$	$(fo-fe)^2/fe$
0	12	**12**	0.108	**0.108**	12.968	-0.968	0.937	0.072
1	28	**28**	0.240	**0.240**	28.854	-0.854	0.729	0.025
2	36	**36**	0.268	**0.268**	32.100	3.900	15.209	0.474
3	22	**22**	0.198	**0.198**	23.808	-1.808	3.267	0.137
4	13	**13**	0.110	**0.110**	13.243	-0.243	0.059	0.004
5	6		0.049					
6	2		0.018					
7	1	**9**	0.006	**0.073**	8.773	0.227	0.051	0.006
8	0		0.002					
9			0.000					0.000
	120							**0.719**



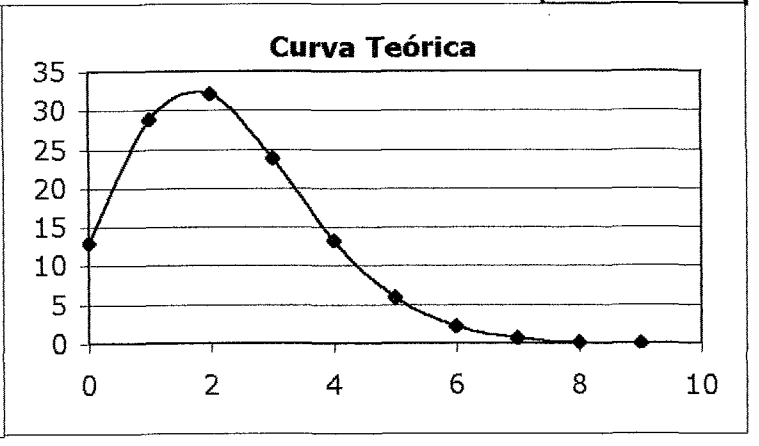


Tabla 30. Resumen de las pruebas de Chi cuadrado

AUTOPISTA FLORENCIO DEL CASTILLO

Día	Hora	Volumen	m	v	χ^2 real	χ^2 teórico	
Domingo	7 a 8	244	2.033	4	6.099	9.488	******
Domingo	8 a 9	348	2.9	6	15.489	12.592	
Sábado	8 a 9	687	5.725	9	36.8	16.919	
Miércoles	14 a 15	711	5.925	9	26.341	16.919	
Lunes	10 a 11	716	5.97	8	27.781	15.507	
Sábado	7 a 8	748	6.233	8	5.862	15.507	******
Miércoles	7 a 8	1560	13	12	50.438	21.026	

AUTOPISTA GENERAL CAÑAS

Día	Hora	Volumen	m	v	χ^2 real	χ^2 teórico	
Domingo	6 a 7	268	2.233	4	2.334	9.488	******
Domingo	7 a 8	389	3.24	6	8.616	12.592	******
Domingo	8 a 9	453	3.775	7	18.345	14.067	
Sábado	6 a 7	497	4.142	8	10.888	15.507	******
Sábado	8 a 9	978	8.15	9	24.262	16.919	
Sábado	7 a 8	987	8.255	11	72.279	19.675	
Viernes	8 a 9	1479	12.325	13	142.318	22.362	

AUTOPISTA PRÓSPERO FERNÁNDEZ

Día	Hora	Volumen	m	v	χ^2 real	χ^2 teórico	
Domingo	7 a 8	183	1.525	3	0.95	7.815	*******
Domingo	8 a 9	267	2.225	4	0.719	9.488	*******
Sábado	7 a 8	468	3.9	6	21.216	12.592	
Sábado	8 a 9	592	4.933	6	1.594	12.592	*******
Miércoles	6 a 7	720	6	9	111.216	16.919	
Lunes	6 a 7	751	6.26	10	649.247	18.307	
Martes	8 a 9	898	7.483	9	8.173	16.919	*******
Miércoles	8 a 9	979	8.158	12	37.469	21.026	
Lunes	8 a 9	1048	8.733	11	67.343	19.675	
Viernes	8 a 9	1062	8.85	10	47.248	18.307	
Miércoles	7 a 8	1515	12.625	11	14.876	19.675	*******
Lunes	7 a 8	1618	13.483	12	15.575	21.026	*******

******* Se ajustan a la distribución de Poisson

Tabla 31. Resumen de las pruebas de Chi cuadrado
en las tres autopistas estudiadas para un 95% de confiabilidad.

Volumen	m	v	χ^2 real	χ^2 teórico	
183	1.525	3	0.95	7.815	*******
244	2.033	4	6.099	9.488	*******
267	2.225	4	0.719	9.488	*******
268	2.233	4	2.334	9.488	*******
348	2.9	6	15.489	12.592	
389	3.24	6	8.616	12.592	*******
453	3.775	7	18.345	14.067	
468	3.9	6	21.216	12.592	
497	4.142	8	10.888	15.507	*******
592	4.933	6	1.594	12.592	*******
687	5.725	9	36.8	16.919	
711	5.925	9	26.341	16.919	
716	5.97	8	27.781	15.507	
720	6	9	111.216	16.919	
748	6.233	8	5.862	15.507	*******
751	6.26	10	142.318	18.307	
898	7.483	9	8.173	16.919	*******
978	8.15	9	24.262	16.919	
979	8.158	12	37.469	21.026	
987	8.255	11	72.279	19.675	
1048	8.733	11	67.343	19.675	
1062	8.85	10	47.248	18.307	
1479	12.325	13	106.889	22.362	
1515	12.625	11	14.876	19.675	*******
1560	13	12	50.438	21.026	
1618	13.483	12	15.575	21.026	*******

******* Se ajustan a la distribución de Poisson

Gráfico 1.
Autopista Próspero Fernández
Velocidad vs Flujo

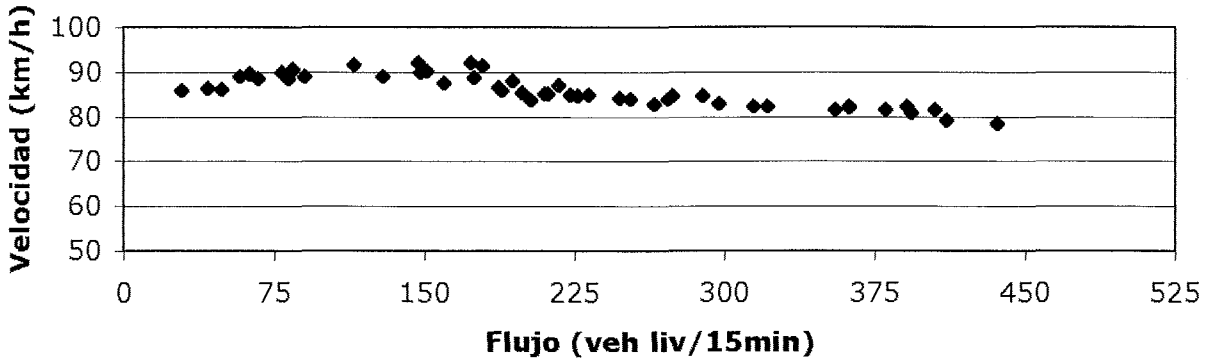


Gráfico 2.
Autopista Próspero Fernández
Velocidad vs Densidad

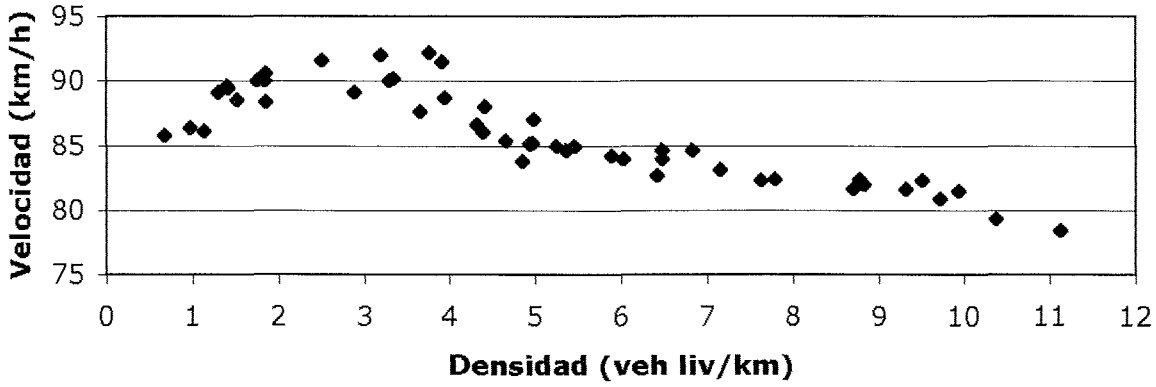


Gráfico 3.
Autopista Próspero Fernandez
Flujo vs Densidad

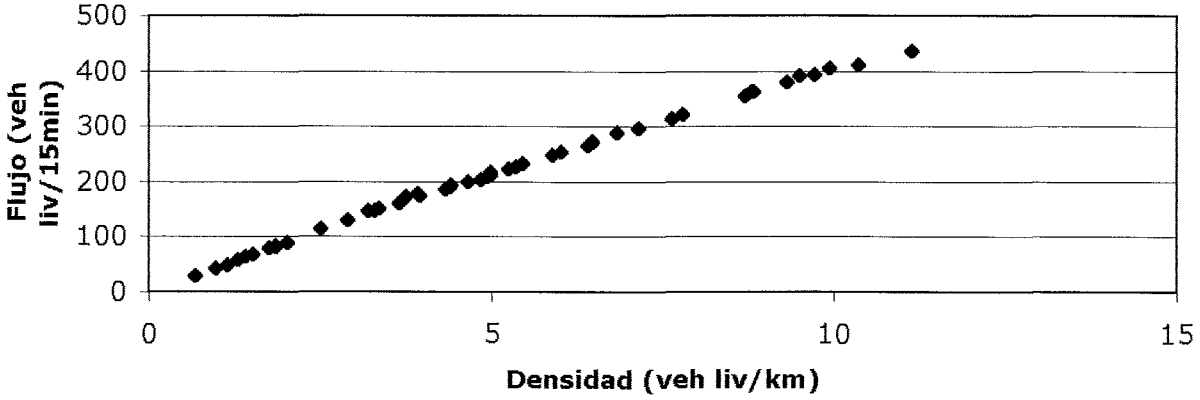


Gráfico 4.
Autopista General Cañas
Velocidad vs Flujo

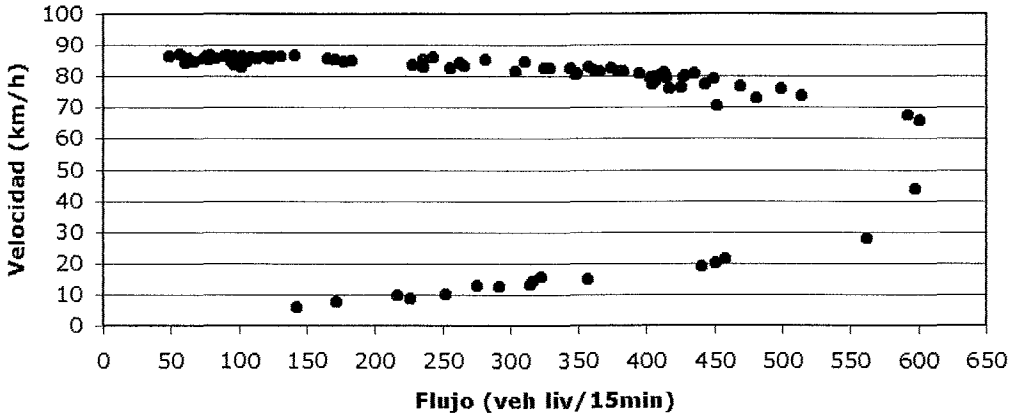


Gráfico 5.
Autopista General Cañas
Flujo vs Densidad

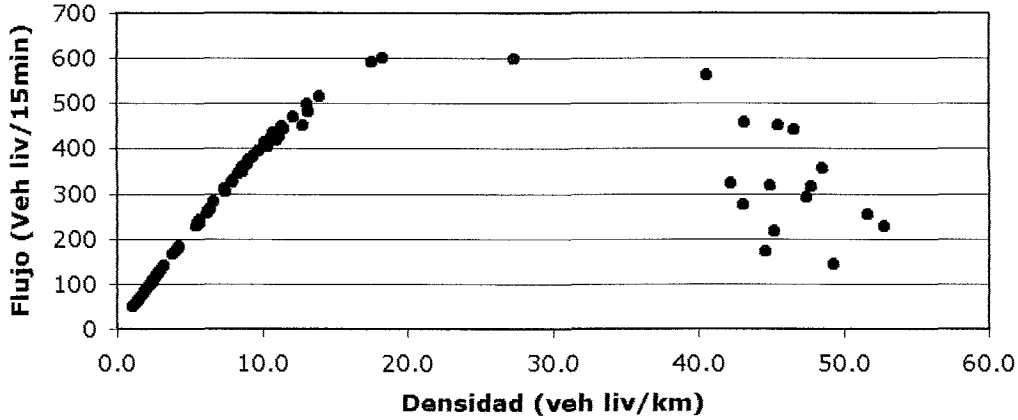


Gráfico 6.
Autopista General Cañas
Velocidad vs Densidad

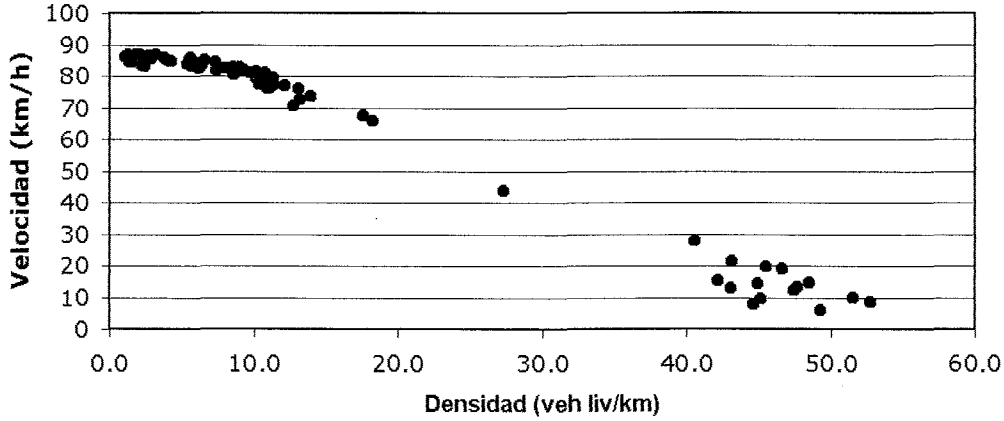


Gráfico 7.
Autopista Florencio del Castillo
Volumen vs Densidad

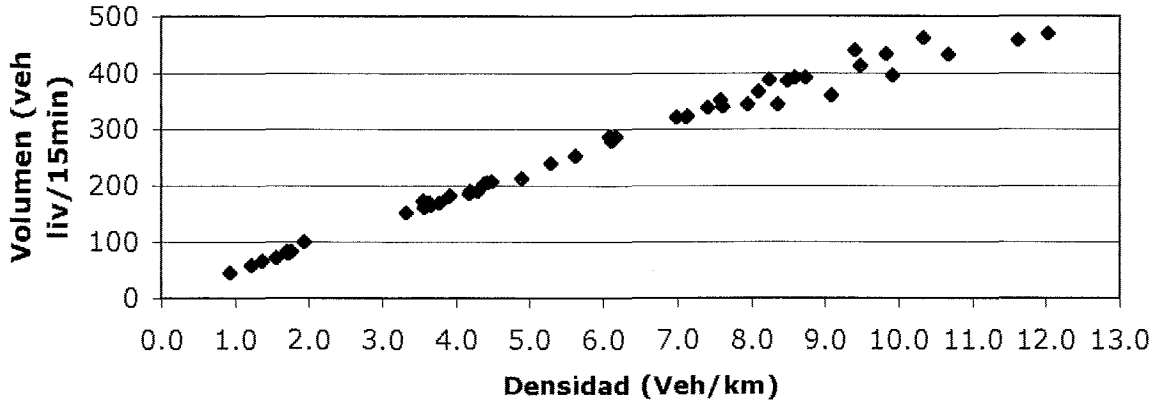


Gráfico 8.
Autopista Florencio del Castillo
Velocidad vs Densidad

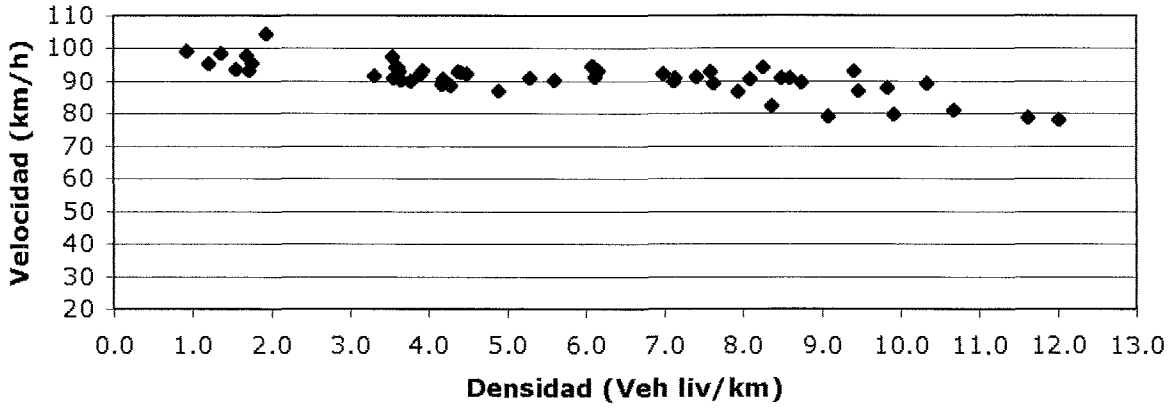
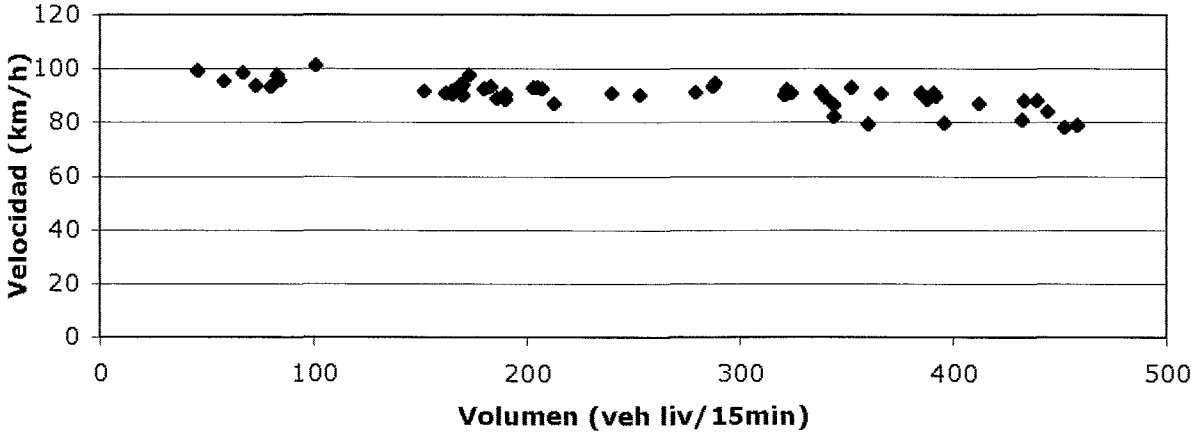


Gráfico 9.
Autopista Florencio del Castillo
Velocidad vs Volumen



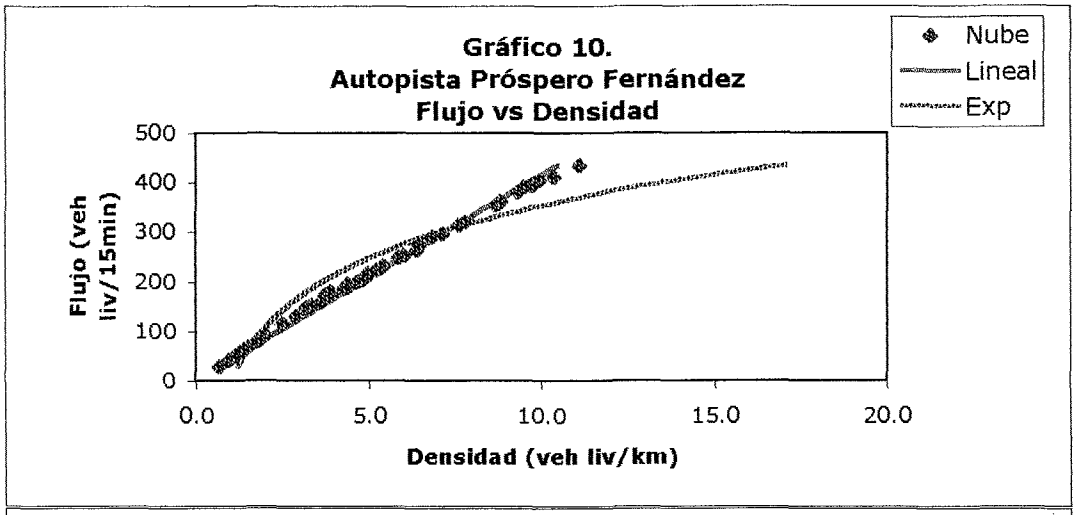


Gráfico 10.
Autopista Próspero Fernández
Flujo vs Densidad
Nube
Lineal
Exp
Flujo (veh liv/15min)
500
400
300
200
100
0
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
Densidad (veh liv/km)

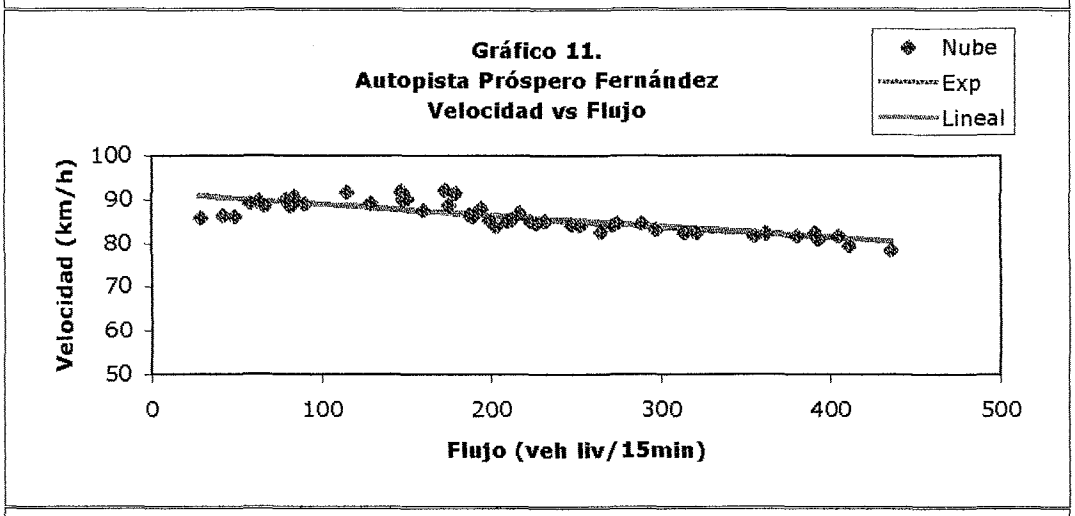


Gráfico 11.
Autopista Próspero Fernández
Velocidad vs Flujo
Nube
Exp
Lineal
Velocidad (km/h)
100
90
80
70
60
50
0
100
200
300
400
500
Flujo (veh liv/15min)

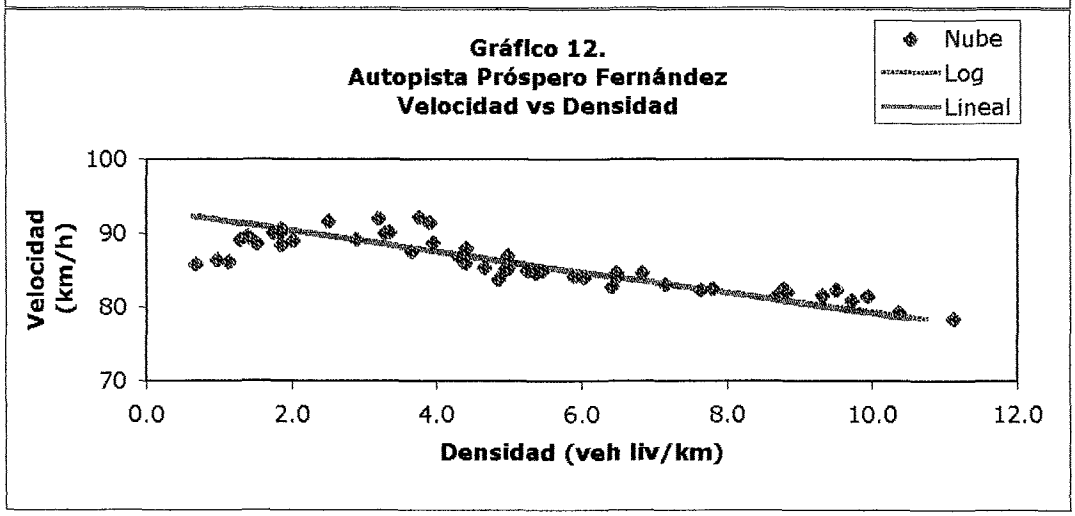


Gráfico 12.
Autopista Próspero Fernández
Velocidad vs Densidad
Nube
Log
Lineal
Velocidad (km/h)
100
90
80
70
0.0
2.0
4.0
6.0
8.0
10.0
12.0
Densidad (veh liv/km)

Gráfico 13.
Autopista General Cañas
Velocidad vs Flujo

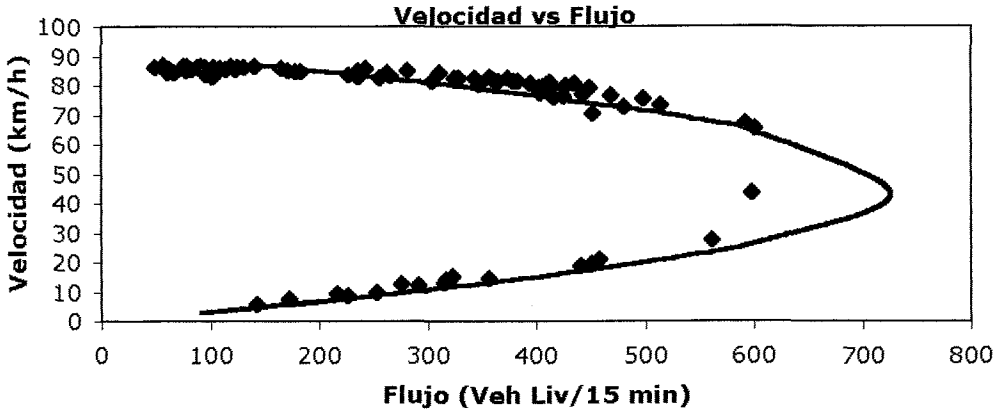


Gráfico 14.
Autopista General Cañas
Velocidad vs Densidad

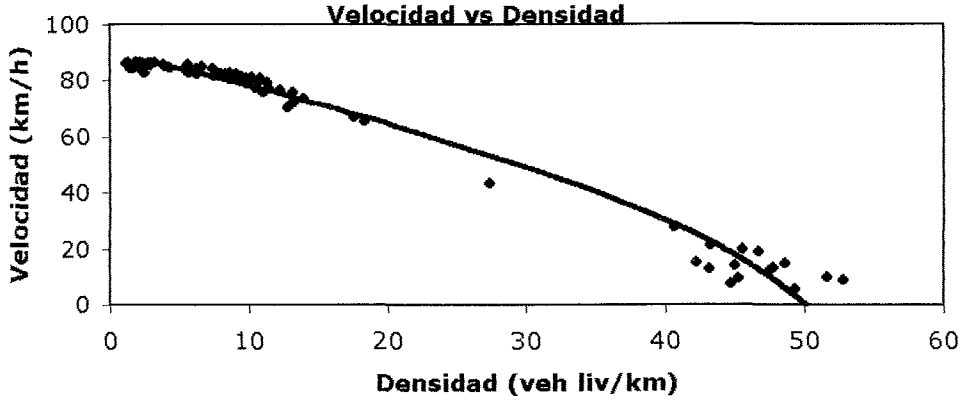
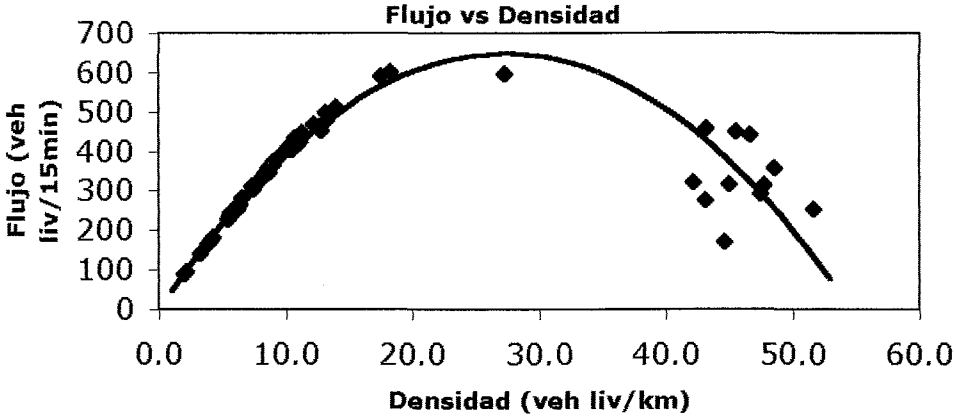


Gráfico 15.
Autopista General Cañas
Flujo vs Densidad



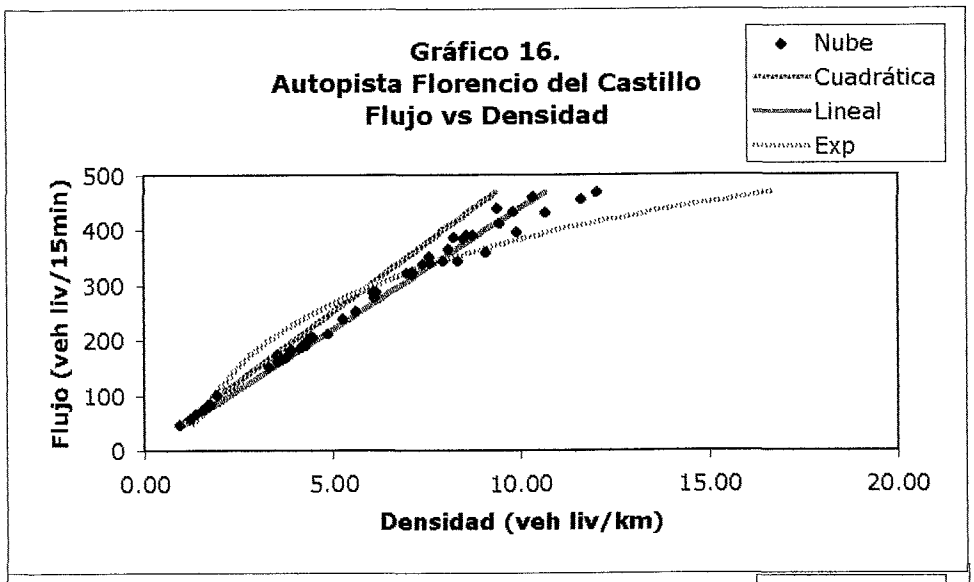


Gráfico 16.
Autopista Florencio del Castillo
Flujo vs Densidad
Nube
Cuadrática
Lineal
Exp
Flujo (veh liv/15min)
500
400
300
200
100
0
0.00
5.00
10.00
15.00
20.00
Densidad (veh liv/km)

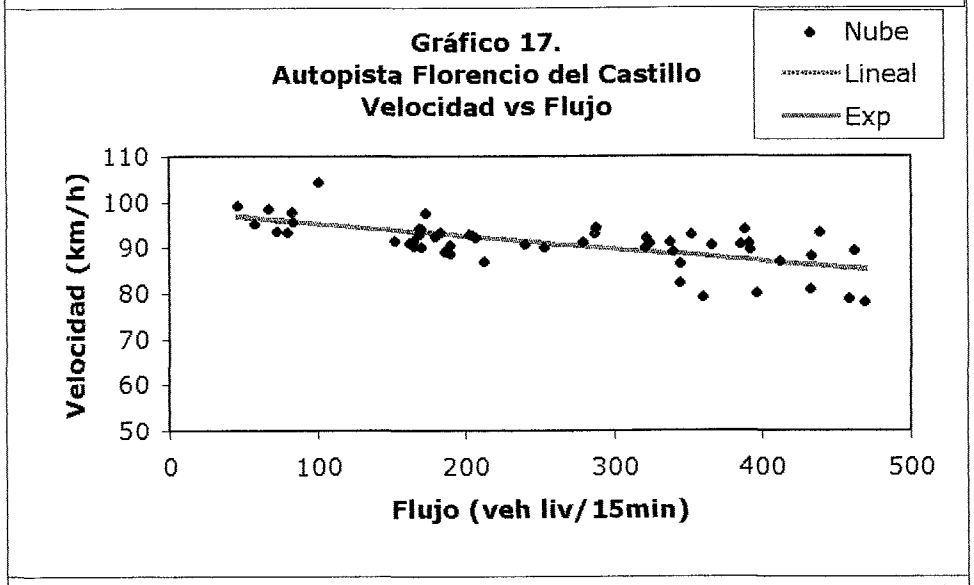


Gráfico 17.
Autopista Florencio del Castillo
Velocidad vs Flujo
Nube
Lineal
Exp
Velocidad (km/h)
110
100
90
80
70
60
50
0
100
200
300
400
500
Flujo (veh liv/15min)

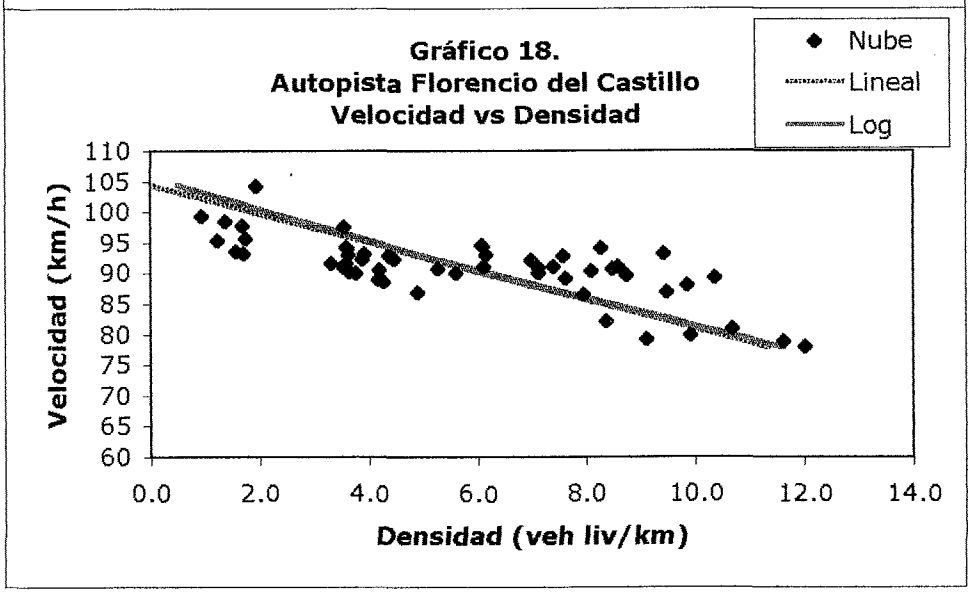


Gráfico 18.
Autopista Florencio del Castillo
Velocidad vs Densidad
Nube
Lineal
Log
Velocidad (km/h)
110
105
100
95
90
85
80
75
70
65
60
0.0
2.0
4.0
6.0
8.0
10.0
12.0
14.0
Densidad (veh liv/km)