

**CAPÍTULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

El transporte es una demanda derivada, originada por la necesidad de las personas de trasladarse o de transportar sus bienes de un lugar a otro. Asimismo, es una condición necesaria para la interacción humana y la supervivencia económica. Sin un buen transporte, ninguna nación o región puede alcanzar el uso óptimo de sus recursos naturales o la máxima productividad de su población. El progreso del transporte no está exento de costos en ocasiones lamentablemente en vidas humanas, así como en daños al medio ambiente y es responsabilidad del ingeniero de transporte que trabaja con el público desarrollar un sistema de transporte de alta calidad y que sea consistente con la ciudad.

El comportamiento está relacionado a la manera en la que se desarrolla el flujo vehicular en una determinada vía, expresada en sus variables representativas que describen este flujo. Por medio del análisis de los elementos del flujo vehicular se pueden entender las características y el comportamiento del tráfico, requisitos básicos para el planeamiento, proyecto y operación de carreteras y calles. El análisis del flujo vehicular hace posible describir la forma como circulan los vehículos en cualquier tipo de vialidad, lo cual permite establecer el nivel de eficiencia de funcionalidad.

Los modelos matemáticos de tráfico que se abordan en el presente trabajo, son de carácter macroscópicos, los cuales, consideran el flujo vehicular y desarrolla algoritmos que relacionen el flujo, con la densidad y con las velocidades medias de espacio.

El obtener estos elementos del flujo vehicular y sus respectivas relaciones serán un aporte necesario a cualquier ingeniero interesado en hacer la planeación, el diseño y la implementación de las medidas de control vial, que contribuyan a lograr el uso eficiente de las vías urbanas en la zona. Para lograr que se haga uso de manera eficiente de cualquier sistema de carreteras, se requiere que el sistema tenga capacidad de flujo del mayor volumen de tránsito, sin causar una demora excesiva del tránsito e incomodidades para el

conductor. Por tanto, es esencial que el ingeniero de tránsito conozca las características básicas de los elementos de un flujo de tránsito.

En la ciudad, de Tarija, se ha desarrollado este tipo de estudio a nivel académico dando lugar, a resultados positivos tales como, el de la Avenida Alto De La Alianza y su extensión desarrollados por el ingeniero, Jorge Mauricio Rodríguez (2006). El cual, concluye que no todos los modelos matemáticos de flujo vehicular son apropiados para la zona en cuestión, esto dependerá de muchos factores los cuales hacen únicos a la zona de estudio tanto en el tiempo que se desarrolla como, en el lugar del estudio (p.189).

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

El barrio torrecillas y sus alrededores han desarrollado en los últimos años un enorme cambio en su comportamiento vehicular, esto debido principalmente a la construcción y posterior funcionamiento de la nueva terminal de la ciudad de cercado. A su vez se observó un incremento en la densidad poblacional de la zona, los cuales son usuarios del transporte público y privado, aumentando así la demanda de transporte en el lugar y con ello el flujo vehicular en la zona. Por lo tanto, será necesario desarrollar un estudio del comportamiento vehicular, la cual determinará los elementos primarios del flujo vehicular. Existe pues una demanda de un estudio minucioso del comportamiento vehicular en la zona. Las avenidas Nro. 177, 178, 179, 180, serán objeto de estudio, en siete diferentes puntos. Los cuales son puntos clave para el ingreso y salida de la nueva terminal de Tarija. Estas avenidas son muy concurridas en horas pico causando demoras, atascos y conflictos entre los conductores, parte del problema, es la completa ausencia de semáforos y personal de tránsito, dando lugar a todos estos problemas sobre todo en horas pico.

Por lo tanto, es evidente la necesidad de realizar un estudio previo que pueda ser útil a los ingenieros interesados en realizar la implementación de medidas de control vial, como ser semáforos. Lo cual mejorara en gran medida el tráfico vehicular en el lugar de estudio. Con ello se desea realizar el estudio y análisis de los modelos matemáticos que más se ajuste a la realidad del comportamiento vehicular de la zona, y de esta forma, poder ser un punto de partida para estudios posteriores referentes a la seguridad vial del lugar.

Los modelos matemáticos son un instrumento para este tipo de estudios, al final desea determinar cuál de los modelos macroscópicos que se emplearan en el presente estudio, se acomoda mejor a las necesidades de la zona en estudio.

Al poner a prueba estos modelos en nuestro ámbito local y si se demuestra su aplicabilidad y fidelidad representativa del flujo vehicular en la zona, se podrá utilizar de manera similar en otros puntos estratégicos de la ciudad, que afronten condiciones similares.

Se debe tomar en cuenta que un estudio de comportamiento vehicular, representa una herramienta útil para los ingenieros de tránsito que deseen planificar o evaluar medidas de control, con el fin de alargar el tiempo de calidad de servicio de la vía en el futuro. Aportando de esta manera al desarrollo de la ciudad.

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

#### **Situación problemica**

El comportamiento vehicular, entrelaza el desarrollo de las relaciones matemáticas, con los elementos primarios de un flujo vehicular tales como flujo, densidad y velocidad.

Actualmente, la zona del barrio de Torrecillas ha sufrido un gran cambio en su comportamiento vehicular, esto debido a la construcción y puesta en marcha de la nueva terminal, dando lugar, a un cambio importante del flujo de tránsito en la zona. Los cuales contribuyen a este flujo son los buses, micros, autos privados y de servicio público en general que ingresan a la zona.

Las relaciones de los elementos primarios de un flujo, ayudan al ingeniero de tránsito, para la futura planificación, diseño y evaluación, de la efectividad de la implementación de las medidas de ingeniería de tránsito.

#### **Problema**

Los importantes cambios que se han suscitado en la zona, están causando de forma cotidiana caos vehicular, sobre todo en horas pico. Dando lugar a aumento del ruido, grandes demoras y embotellamientos, lo cual nos conlleva a preguntar:

¿De qué manera el empleo de modelos matemáticos en la zona de la nueva terminal, puede representar un verdadero comportamiento vehicular de la zona?

## **1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

### **Objetivo general**

Analizar en la zona de la nueva terminal el comportamiento vehicular mediante modelos matemáticos, de enfoque macroscópico, para establecer los elementos primarios del flujo vehicular presentes en la zona de estudio.

### **Objetivos específicos**

- Recopilar datos de aforo necesarios en la zona de estudio para su posterior análisis y desarrollo en gabinete.
- Identificar el modelo matemático más adecuado producto de un tratamiento estadístico.
- Aplicar los modelos de tráfico vehicular de Greenshields, Greenberg y Underwood para la zona de estudio
- . Aplicar las ecuaciones de velocidad media-densidad de los modelos para determinar las gráficas de comportamiento de cada modelo.
- Ajustar las curvas de relación velocidad media espacial-densidad de tendencias lineales, logarítmicas y exponenciales.
- Realizar el marco teórico sobre los modelos de enfoque macroscópicos a estudiar.
- Desarrollar las conclusiones y recomendaciones acerca de la utilización de estos modelos de tráfico en la zona de estudio.

## **1.5 ALCANCE**

En el presente trabajo pretende al principio del mismo establecer de forma clara y concisa la situación problemática, el problema y los objetivos. Tanto generales como específicos, de un estudio de tráfico, como ser el comportamiento vehicular en la zona de la nueva terminal.

Se desea desarrollar la fundamentación teórica del tema, tocando aspectos generales de la ingeniería de tráfico, tales como, los componentes del transporte vial (conductor, peatón, vehículo, camino), y elementos del flujo de tránsito (flujo, densidad y velocidad). De forma paralela se desarrollara la teoría que compone el flujo del tránsito, respecto al

comportamiento de los vehículos, como ser, los respectivos modelos a emplear en el trabajo de gabinete. Se pretende realizar una introducción acerca de los modelos de tráfico macroscópicos, y una clasificación general de los modelos matemáticos de tráfico.

Posteriormente, se establecerá claramente los métodos y técnicas a emplear, considerando de manera científica, todos los parámetros que estas conllevan.

Dentro de la aplicación práctica, en la zona de estudio se realizara los correspondientes aforos y mediciones de tiempo respectivos, para la obtención de datos de intensidad y velocidad. Se empleara para la recopilación de datos de intensidad de flujo vehicular el método de aforo manual, y para la recopilación de tiempos de velocidades de punto, el método de medición de tiempo con cronometro.

Posteriormente, a la recopilación de datos en campo se realizara un análisis estadístico a los datos de tiempos y a los de intensidad. Para luego realizar la respectiva depuración de datos.

Luego, se calculará las variables fundamentales de tráfico, a partir de los datos se obtendrán de la intensidad vehicular y velocidad de punto, mediante la ecuación general de tráfico se calculará la densidad, en base a la intensidad y la velocidad media de punto previamente calculadas.

A partir de los modelos matemáticos macroscópicos, se determinara los gráficos de comportamiento de cada modelo.

Al final, se elegirá el modelo que más se ajuste a la realidad del flujo vehicular de la vía de estudio, y la obtención de sus indicadores. Posteriormente, se valorará el comportamiento del tráfico a partir del modelo elegido.

Por último, se busca establecer las conclusiones y recomendaciones, sobre el desarrollo del trabajo establecido.

## **1.6 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO**

El aspecto fundamental para la elaboración del presente trabajo, es lo referente, al procedimiento a realizar para la obtención de los datos, su tratamiento estadístico y su

posterior aplicación. La metodología general del estudio se propone en un capítulo posterior, pero de manera resumida se pretende realizar los siguientes pasos:

Recopilación de datos de intensidades de flujo vehicular, por el método de aforo manual, y recopilación de tiempos para velocidades de punto por el método de medición de tiempo con cronometro. La obtención de datos se desarrollará en ambos carriles de la vía, en siete puntos de la zona de estudio, en tres horas pico de circulación y durante un periodo de un mes.

Un análisis estadístico se practicará a los datos de velocidad y a los de intensidad. Se realizará la depuración de datos, para alcanzar un rango de datos representativos y lo menos disperso posible.

Se calculará las variables fundamentales del tráfico, a partir de los datos se obtendrá intensidad vehicular y velocidad de punto, con esta velocidad se podrá calcular la velocidad media espacial. La densidad se determinara mediante la ecuación fundamental del tráfico, empleando para ello la intensidad y la velocidad media espacial.

Para obtener los parámetros de los modelos, se efectuara un ajuste de las variables a curvas velocidad media espacial-densidad, debido a que los modelos parten de esta relación. Se debe realizar un ajuste lineal para el modelo de Greenshields, logarítmico para el modelo de Greenberg y exponencial para el modelo Underwood.

Una vez obtenidos los parámetros, se aplicaran a las ecuaciones velocidad media espacial-densidad de los modelos, para que a partir de estas, se determinen las gráficas de comportamiento para cada modelo.

Para validar los modelos, se debe realizar un análisis de tendencias de las gráficas, tomando en cuenta la correlación que existe en el ajuste a las curvas velocidad media-densidad. A partir de los modelos que más se ajustan a la realidad de los datos obtenidos, se determinaran los indicadores de comportamiento vehicular.

Se valorará del comportamiento vehicular, en función a los resultados que se obtengan de la aplicación de los modelos. En función, al modelo de mejor ajuste a la realidad del flujo vehicular en el área de estudio, se realizara un análisis de comportamiento, para establecer

las características del comportamiento vehicular y soluciones que puedan plantearse para mejorar el comportamiento.



**CAPÍTULO II**  
**ASPECTOS GENERALES**

## **CAPÍTULO 2**

### **ASPECTOS GENERALES**

#### **2.1 INGENIERÍA DE TRANSPORTE**

El ingeniero de transporte es un profesional que se ocupa de la planificación, el diseño, la construcción, las operaciones y la administración de un sistema de transporte. Como profesional debe tomar decisiones críticas acerca del sistema que va a afectar a los miles de personas que lo usen. El trabajo depende de los resultados de la experiencia y de la investigación y es un desafío siempre cambiante a medida que surgen nuevas necesidades y las nuevas tecnologías reemplazan a las del pasado. El desafío de la profesión de la ingeniería de transporte es ayudar a la sociedad a seleccionar el sistema de transporte adecuado, consistente con su desarrollo económico, con sus recursos y con los objetivos, así como el construir y administrar el sistema de una manera segura y eficiente. Las oportunidades dentro de la ingeniería de transporte son apasionantes. En el pasado, los ingenieros de transporte planificaron y construyeron los caminos, las carreteras, los sistemas de transporte masivo, los aeropuertos y las tuberías de la nación. En las décadas por venir se requerirán elementos adicionales del sistema, así como esfuerzos para mantener y operar de una manera segura y económica el sistema que ya está en funcionamiento.

#### **2.2 EL TRANSPORTE**

Desde que existe la raza humana, el transporte ha constituido y consumido una parte considerable de su tiempo y de sus recursos. La necesidad primordial de transportarse es fundamentalmente económica, ya que implica viajes personales en busca de comida o trabajo, viajes de negocios o comerciales, realización personal, así como viajes para mejorar el nivel personal de vida. El movimiento de personas y bienes es lo que entiende por transporte, y se lleva a cabo para alcanzar objetivos o tareas como las anteriores, que son básicos y requieren el desplazamiento de una localidad a otra. El sistema de transporte de la ciudad de Tarija, como en cualquier otra ciudad consta de

una red de carreteras que han evolucionado en el transcurso de varios años. Por este sistema transitan vehículos, guías, instalaciones y sistemas de control, estos operan de acuerdo con procedimientos e itinerarios establecidos. El sistema también requiere la interacción con el usuario, el operador, y el medio ambiente. Los sistemas que están instalados reflejan la multiplicidad de decisiones que toman los remitentes, los transportistas, el gobierno, los viajeros individuales y los no usuarios afectados por la inversión en o por el uso del transporte. El sistema de transporte que ha evolucionado ha producido diferentes modalidades que se complementan entre sí.

Se habla de transporte público, para hacer referencia a los autobuses, taxis y otras unidades móviles que sirven para la movilización de los ciudadanos de una comunidad y que está solventado y manejado por el estado vigente. Cabe señalar que, en algunos casos, dichos coches pertenecen a empresas privadas, que tienen algún tipo de acuerdo con el gobierno y han asumido la responsabilidad de brindar un servicio determinado a la comunidad. El transporte privado, en cambio, es el que pertenece a individuos o empresas particulares. En este caso los responsables de la manutención de dichos vehículos son sus dueños, al igual que serán quienes respondan por ellos en caso de accidente.

## **2.3 COMPONENTES DEL TRANSPORTE VIAL**

Los cuatro componentes principales de la modalidad de transporte por carretera son el conductor, el peatón, el vehículo y el camino. También la bicicleta se está convirtiendo en un componente importante en el diseño de carreteras y calles urbanas. Para suministrar un transporte por carretera, que sea, eficiente y seguro, es esencial un conocimiento de las características y de las limitaciones de cada uno de estos componentes. También es importante considerar las interrelaciones que existen entre estos componentes, con objeto de determinar los efectos, si los hay, que ejercen entre sí.

### **2.3.1 Conductor**

Entendemos por la palabra conductor como una persona capacitada para conducir un vehículo de motor, la cual puede transportar personas o mercancías. Un desafío que enfrenta los ingenieros de transporte y de tránsito cuando considera las características del conductor durante el diseño, son las diversas habilidades, y la capacidad de

percepción de los conductores en las carreteras. Esto se demuestra por el amplio rango de habilidades que tiene las personas para oír, ver, evaluar y reaccionar a la información. Algunos estudios han demostrado que estas habilidades también pueden variar en una persona bajo diferentes condiciones, tales como la influencia del alcohol, el cansancio y la hora del día. Los movimientos de los vehículos en la carretera dependen fundamentalmente de ellos, y la calidad de circulación es el resultado de su mayor o menor habilidad para adaptar el movimiento, de sus vehículos, a las características de la carretera y de la circulación.

### **2.3.2 Peatón**

Se refiere a la persona que camina a pie por espacios públicos. Hasta el siglo pasado, los peatones hacían uso de las calles libremente. Luego, con la aparición del automóvil, tuvieron que adaptarse a medidas de tránsito y circulación para que ambas formas de traslado pudieran organizarse y complementarse. Debido a la notable diferencia entre la velocidad media de los peatones y de los vehículos, es necesario que circulen por zonas separadas. Esto se logra asignando a los peatones una zona separada físicamente de la destinada a los vehículos. Debido a que, en las intersecciones, los peatones, tienen que cruzar la calzada destinadas a los vehículos, es donde se producen zonas de conflicto.

Muchas de las características, del peatón, influyen en el diseño y la ubicación de los dispositivos de control de tránsito. Estos dispositivos de control incluyen señales especiales para peatones, zonas de seguridad e islas en las intersecciones, pasos a desnivel para peatones, pasarelas elevadas y cruces de peatones.

### **2.3.3 Vehículo**

Un vehículo es una máquina que permite desplazarse de un sitio a otro. Los vehículos no solo pueden transportar personas, sino también animales y cualquier otro tipo de objetos. Los automóviles, los camiones, las camionetas, los cuatriciclos y las motocicletas son vehículos a motor: se movilizan por la acción de un motor que funciona con algún tipo de combustible.

Ya casi todas las carreteras alojan tanto automóviles particulares, como tránsito de camiones, es esencial que los criterios de diseño consideren las características de los diferentes tipos de vehículos. Un conocimiento completo de estas características, va a

ayudar al ingeniero de carreteras, de tránsito o ambos para el diseño de carreteras y de sistema de control de tránsito, que permitan la operación segura y sin contratiempos de un vehículo en movimiento.

La forma de clasificar la variedad de vehículos que circulan por las vías de estudio, se basa en el agrupamiento de vehículos que tienen comportamiento similar en las vías públicas y se detallan a continuación:

Vehículos livianos, son destinados al transporte de no más de ocho personas por lo común. Este tipo de vehículos comprende los automóviles o coches tipo jeeps, vagonetas, camionetas pequeñas y vehículos generalmente de 4 ruedas.

Vehículos medianos, son vehículos destinados al transporte de más de ocho personas o para transportar carga. En este tipo se incluye los microbuses, camionetas, vehículos generalmente de 6 ruedas

Vehículos pesados, se refiere a vehículos destinados al transporte de una importante cantidad de personas o el transporte de grandes cargas, es decir, son vehículos de gran envergadura. Este tipo de vehículo incluye los autobuses (flotas), camiones grandes o combinados son vehículos que tienen generalmente 6, 10 o 14 ruedas.

#### **2.3.4 Camino**

Se entiende por vía o camino, aquella faja de terreno acondicionada para la circulación de vehículos. Existen diversos tipos de caminos, las cuales dependen del servicio que proporcionan transitando en ellas vehículos de mayor o menor peso. En áreas urbanas los caminos divergen a través de la ciudad y se les llama calles teniendo un papel doble, como vía de acceso y ruta.

En términos generales, las vías urbanas pueden clasificarse funcionalmente en tres grandes grupos. Calles principales (arterias) que permiten el movimiento del tránsito entre zonas o partes de la ciudad, secundarias (colectoras) que resultan ser las calles alimentadoras del flujo vehicular a las arterias, y locales que proporcionan acceso directo a las propiedades.

## 2.4 ELEMENTOS DEL FLUJO DEL TRÁNSITO

El comportamiento del tráfico se estudia por medio de unas variables que recogen los aspectos más importantes del mismo. Entre las del tipo macroscópicas las empleadas con más frecuencia son el volumen de tráfico, la velocidad media de los vehículos y la densidad de tráfico; estas son llamadas también variables fundamentales del tráfico.

### 2.4.1 Volumen de tráfico

Es la tasa horaria equivalente a la cual transitan los vehículos por un punto en una carretera durante un periodo determinado de tiempo. Se formula de la siguiente forma:

$$Q = \frac{n}{t} \quad (2.1)$$

Donde:

$n$  = Número de vehículos que transitan por un punto (veh)

$t$  = Periodo determinado (h)

$Q$  = Vehículos que pasan por unidad de tiempo (veh/h)

Los estudios de volumen de tránsito se realizan cuando se requieren ciertas características de volumen, como:

**Tránsito diario promedio anual (TDPA)** Es un promedio de los conteos de 24 horas recolectados todos los días del año. Los TDPA se usan en varios análisis de tránsito y de transporte:

**Tránsito diario promedio (TDP)** Es el promedio de los conteos de 24 horas recolectados, en un número de días mayor que 1, pero menor que un año.

**Volumen de la hora pico (VHP)** Es el número máximo de vehículos que pasan por un punto en una carretera durante un periodo de 60 minutos consecutivos.

La intensidad ( $q$ ), llamada también tasa de flujo, es la frecuencia con la cual pasan los vehículos por un punto o sección transversal de un carril o calzada. Es pues, el número de vehículos ( $n$ ) que pasan durante un intervalo de tiempo específico ( $t$ ). No obstante, la intensidad, puede ser expresada en vehículos por hora, teniendo cuidado de su

interpretación, pues no se trata del número de vehículos que efectivamente pasan durante una hora completa o volumen horario (Q).

La intensidad es una de las variables más importantes de la circulación vial, ya que las demás pueden relacionarse con ella más o menos fácilmente. Proporciona una descripción muy intuitiva del comportamiento del tráfico en cada momento y demás, al haber sido una de las variables más empleadas por la ingeniería de tráfico, existe una gran cantidad de datos y estudios de la misma.

Un volumen horario de máxima demanda, a menos que tenga una distribución uniforme, no forzosamente significa que el flujo sea constante durante toda la hora. Eso significa que existen periodos cortos dentro de la hora con tasa de flujo o intensidades muchos mayores a las de la hora misma.

#### **2.4.2 Densidad**

Algunas veces denominada concentración, es el número de vehículos que viajan sobre una longitud unitaria de carretera para un instante de tiempo. En general la longitud unitaria es 1 kilómetro, por lo que la unidad de densidad es el número de vehículos por kilómetro (vehículos/km), referido a un solo o a todos los carriles de la calzada. La densidad se expresa de la siguiente forma:

$$k = \frac{n}{d} \quad (2.2)$$

Donde:

$n$  = Número de vehículos que transitan un tramo unitario (veh)

$d$  = Longitud unitaria de un tramo de carretera (km)

Mediante una fotografía aérea de un tramo de carretera y contando los vehículos que existen en él, se puede medir la densidad de la misma. Pero en la práctica esta magnitud rara vez se mide, ya que es posible calcularla fácilmente a partir de medidas de velocidad e intensidad. El valor de la densidad es en sí un valor medio que depende del tramo considerado, del momento y de los factores de regulación.

Se puede observar a simple vista que la densidad influye de forma directa en la calidad de la circulación, al aumentar la densidad en un tramo resultará más difícil para el

conductor mantener una única velocidad y se verá por momentos en la necesidad de realizar maniobras (cambios de carril, aceleraciones y frenados), lo cual se traduce en una calidad de conducción incomoda.

Existe un valor máximo de la densidad de tráfico, que se obtiene cuando todos los vehículos están en fila, sin huecos entre ellos. Esta densidad máxima o densidad de congestión será igual al producto de la inversa de la longitud media de los vehículos por el número de carriles.

### 2.4.3 Velocidad

Es la distancia recorrida por un vehículo durante una unidad de tiempo. La velocidad se ha mostrado desde siempre como una respuesta al deseo del hombre de comunicarse rápidamente desde el momento en que se crearon los medios de transporte. Por consiguiente, la velocidad se ha convertido en uno de los principales indicadores utilizados para medir la calidad de la operación a través de un sistema de transporte. Es decir, para un vehículo representa su relación de movimiento, generalmente expresada en kilómetros por hora (km/h). Esta se define como una función lineal de la distancia y el tiempo, expresada por la fórmula:

$$v = \frac{d}{t} \quad (2.3)$$

Donde:

$v$  = Velocidad constante (km/h)

$d$  = Distancia recorrida (km)

$t$  = Tiempo recorrido (h)

#### 2.4.3.1 Tipos de velocidad

La velocidad en un tramo de vía varía mucho, de unos vehículos a otros. Incluso cuando se estudia la velocidad de un solo vehículo, se ve que esta no permanece constante, aun cuando el conductor procure mantener una velocidad fija. Los valores medios de la velocidad pueden, en mucho de los casos, ser más importantes a estudiar, estos son obtenidos de diferentes formas, con resultados diferentes, por lo que conviene especificar claramente como se ha obtenido la velocidad de la que se trate.



Velocidades en función de su aspecto estadístico

Velocidad media en el tiempo

Es la media aritmética de las velocidades de los vehículos que transitan por un punto, en una carretera durante un intervalo de tiempo. La velocidad media en el tiempo se calcula mediante.

$$v_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (2.4)$$

Donde:

$n$  = Número de vehículos que transitan por un punto de la carretera

$v_i$  = Velocidad del vehículo  $i$ ésimo (m/s)

$v_t$  = Velocidad media temporal (m/s)

Velocidad media en el espacio

Es la media armónica de las velocidades de los vehículos que transitan por un punto, de una carretera durante un intervalo de tiempo. Se obtiene al dividir la distancia total recorrida por dos o más vehículos en un tramo de la carretera, entre el tiempo total requerido por esos vehículos para que recorran esa distancia. Esta es la velocidad que interviene en las relaciones de flujo-densidad. La velocidad media en el espacio se calcula mediante.

$$\bar{v}_s = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{v_i}\right)} = \frac{n * L}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2.5)$$

Donde:

$\bar{v}_s$  = Velocidad media en el espacio (m/s)

$n$  = Número de vehículos

$t_i$  = Tiempo que toma al vehículo  $i$ ésimo recorrer un tramo de la carretera (s)

$v_i$  = Velocidad del vehículo *i*ésimo (m/s)

$L$  = longitud del tramo de carretera (m).

Velocidades en función de la forma de cronometraje

Velocidad de proyecto

es la velocidad que permite definir las características geométricas mínimas de los elementos del trazado bajo condiciones de seguridad y comodidad, elementos que solo podrán ser empleados en la medida que estén precedidos por otros (en ambos sentidos del tránsito), que anticipen al usuario que se está encontrando a un tramo de características geométricas mínimas, el que además deberá estar debidamente señalizado.

Velocidad de punto

Es la velocidad de un vehículo a su paso por un determinado punto de una carretera o una calle. Como dicha velocidad se toma en el preciso instante de paso del vehículo por el punto, también a esta se le llama velocidad instantánea.

La velocidad de punto no es una velocidad de diseño ni en calles ni en carreteras, pero es una velocidad cual referencia nos da las velocidades máximas posibles que se puedan presentar tanto en calles como en carreteras.

Al ser una velocidad que se considere en un flujo libre eso no sería posible en espacios o distancias largas, por ello se definen espacios o distancias pequeñas, en el caso de ciudades los espacios serán de 25, 50 o 100 metros y en el caso de carreteras los espacios serán de 100 metros siempre y cuando no hayan accesos de entrada y de salida.

Velocidad de recorrido total

Desde el punto de vista conceptual la velocidad de recorrido total es aquella velocidad que se asemeja más al comportamiento real del vehículo en circulación, si bien también es una relación de espacio sobre tiempo para el caso de velocidades de recorrido total el espacio que se toma en cuenta debe ser más grande debido a que se quiere reflejar todas las restricciones a las maniobras de velocidad y todas las causas de demora que pudiesen presentarse, para ello se requiere de una distancia relativamente grande. En el caso de

ciudades urbanas estas distancias de recorrido total son elegidas en función de la dirección de los flujos direccionales más importantes; en carreteras se toman tramos experimentales que reflejan el comportamiento real de la carretera.

#### Velocidad de crucero

La velocidad de crucero es una velocidad que se determina analíticamente en base a la relación de una distancia recorrida entre un tiempo neto de circulación. El mismo estudio de las velocidades de recorrido total puede servir de información para determinar las velocidades de crucero tomando en cuenta solo los tiempos de circulación y no así los tiempos de demora.

Esta velocidad de crucero nos permite hacer una comparación y análisis con las velocidades de punto ya que ambos tienen la misma concepción, son velocidades de vehículos en movimiento, su diferencia está que el uno tiene un entorno de flujo libre y el otro tiene un entorno de vehículos en un flujo de circulación.

#### Velocidad de diseño

La velocidad de diseño es un valor tanto en carreteras como en calles urbanas, la velocidad de diseño no es resultado de un aforamiento más bien es de concepto, la cual indica la velocidad de diseño que debe ser aquella con la cual el 80% o más de los vehículos que circulan deben tener esa velocidad.

La velocidad de diseño es un valor adoptado tanto en carreteras como en calles. En el caso de carreteras existe tablas de velocidades de diseño recomendables en función al tipo de carretera.

### **2.4.4 Intervalo entre vehículos**

#### **2.4.4.1 Intervalo entre vehículos en el tiempo**

Es la diferencia, entre el instante, para el cual, el frente de un vehículo llega a un punto de la carretera y el instante, para el cual, llega el frente del siguiente vehículo al mismo punto. El intervalo entre vehículos en el tiempo se expresa en segundos. Por ejemplo, en el diagrama espacio-tiempo de la Figura 2.1.

El intervalo promedio ( $\bar{h}$ ) es el promedio de todos los intervalos simples ( $h_i$ ), existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vía. Por tratarse de un promedio se expresa en segundos por vehículo (seg/veh) y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{n - 1} \quad (2.6)$$

Donde:

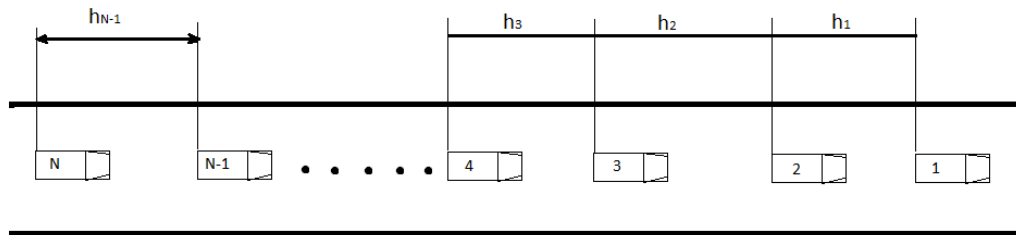
$\bar{h}$  = Intervalo de tiempo promedio ( $\frac{seg}{veh}$ )

$n$  = Número de vehículos (veh)

$n-1$  = Número de intervalos (veh)

$h_i$  = Intervalo simple entre el vehículo  $i$  y el vehículo  $i+1$

Figura 2.1 intervalo entre vehículos



Fuente: ingeniería de tránsito, (Reyes Espíndola, Y Otros, 2007).

#### 2.4.4.2 Intervalo entre vehículos en el espacio

Es la distancia entre el paso de dos vehículos consecutivos, por lo general expresada en metros y medida entre sus parachoques traseros, es decir, es la distancia entre dos vehículos sumada a la longitud del vehículo.

El espaciamiento promedio ( $\bar{s}$ ) es el promedio de todos los espaciamientos simples ( $s_i$ ), existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en metros por vehículo (m/veh) y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} s_i}{n - 1} \quad (2.7)$$

Donde:

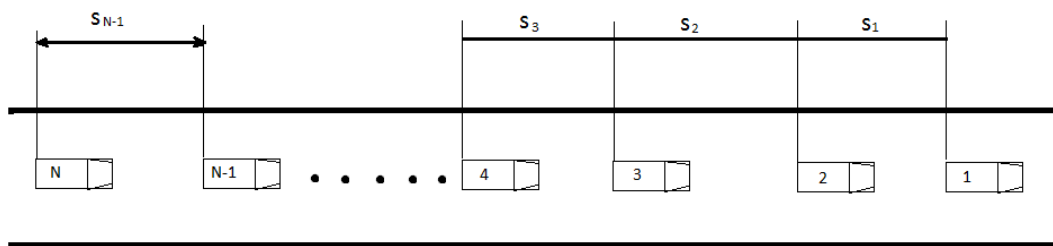
$\bar{s}$  = Espaciamiento promedio (veh/m)

$n$  = Número de vehículos (veh)

$n-1$  = Número de espaciamento (veh)

$s_i$  = Espaciamiento simple entre el vehículo  $i$  y el vehículo  $i + 1$

Figura 2.2 espaciamento entre vehículos



Fuente: ingeniería de tránsito, (Reyes Espíndola, Y Otros, 2007).

Puede observarse que las unidades del espaciamento promedio (m/veh) son las unidades inversas de la densidad (veh/m), por lo que se puede establecer una relación inversa entre el espaciamento promedio y la densidad.

$$\bar{d} = \frac{1}{k} \quad (2.8)$$

Donde:

$\bar{d}$  = Espaciamento promedio (m/veh)

$k$  = Densidad (veh/m)

## 2.5 ECUACIÓN FUNDAMENTAL DEL FLUJO VEHICULAR

La ecuación general que relaciona el flujo, la densidad y la velocidad media está dada como:

$$q = k * v \quad (2.9)$$

Donde:

$q$  = Intensidad (veh/h)

$k$  = Densidad (veh/km)

$v$  = Velocidad (km/h)

Cada una de las variables de la ecuación también depende de otros factores, incluyen las características del camino, del vehículo y del conductor, así como de los factores de medio ambiente como el estado de tiempo.

## **2.6 DIAGRAMA FUNDAMENTAL DEL FLUJO DEL TRÁNSITO**

Un diagrama fundamental del flujo de tránsito, reporta la relación entre la densidad (veh/km), y el flujo del tránsito correspondiente para una carretera. Se ha postulado la siguiente teoría respecto de la forma de la curva que representa a esta relación.

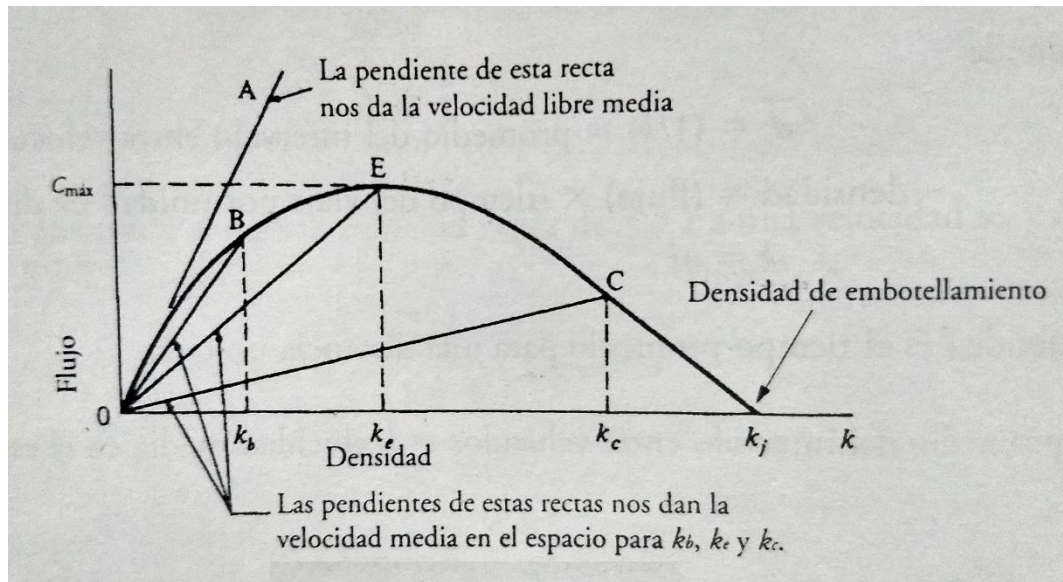
Cuando la densidad en la carretera es cero, el flujo también es cero porque no hay vehículos en la carretera.

A medida que aumente la densidad, el flujo también aumenta.

Sin embargo, cuando la densidad alcanza su máximo, denominado la densidad de embotellamiento ( $k_j$ ), el flujo debe ser cero porque los vehículos tenderán a alinearse extremo con extremo.

Se concluye que a medida que la densidad aumenta desde cero, el flujo también aumentará inicialmente desde cero hasta un valor máximo. Un incremento continuo adicional de la densidad, conducirá entonces a una reducción continua del flujo, el cual finalmente será cero cuando la densidad sea igual a la densidad de embotellamiento. Por la forma de la curva que adopta la geometría mostrada en la Figura 2.3a.

Figura 2.3a flujo vs densidad



Fuente: ingeniería de tránsito y carreteras (Nicholas J. Garber, 2006)

Figura 2.3b velocidad vs densidad

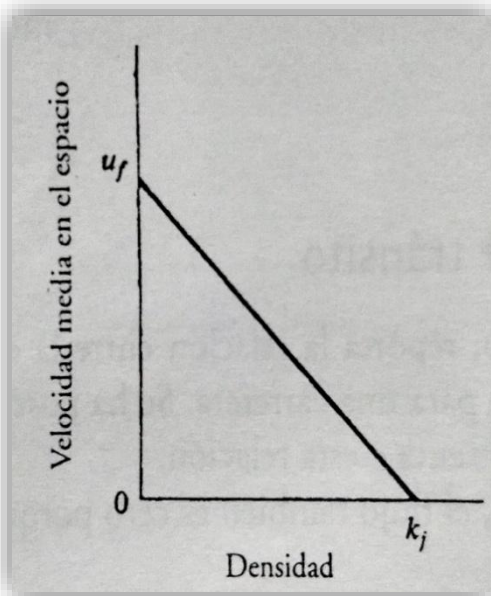
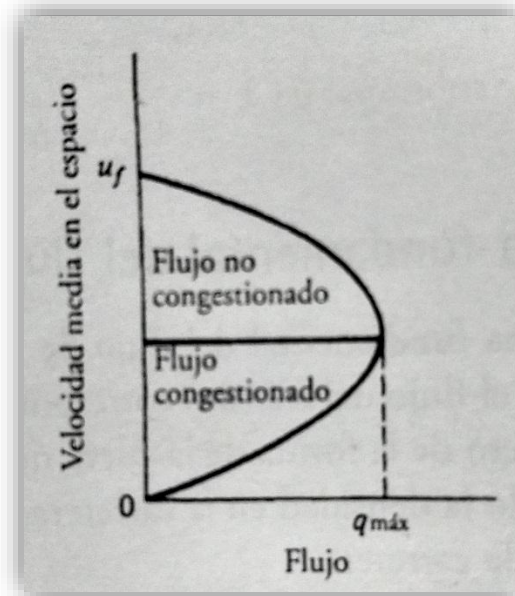


Figura 2.3c velocidad vs intensidad



Fuente: ingeniería de tránsito y carreteras (Nicholas J. Garber, 2006)

Cuando el flujo es muy bajo existe poca interacción entre los vehículos individuales. Por tanto, los conductores tienen la libertad de viajar a la máxima velocidad posible. La

velocidad máxima absoluta se obtiene a medida que el flujo tiende a cero, y se le conoce como la velocidad libre media ( $v_l$ ). La magnitud de la velocidad libre media, depende de las características físicas de la carretera. Un incremento continuo del flujo, resultara en un decremento continuo de la velocidad. Sin embargo, se va a alcanzar un punto para el cual un mayor número de vehículos resultará en la reducción del número verdadero de vehículos que transitan por un punto en la carretera (es decir, una reducción de flujo). Esto conduce a un congestionamiento, y finalmente tanto la velocidad como el flujo se hacen cero.

## **2.7 RELACIONES ENTRE INTENSIDAD, VELOCIDAD Y DENSIDAD**

### **2.7.1 Relación fundamental**

En lo que sigue se supone que los vehículos se mueven a lo largo de un tramo de carretera, sin interrupciones a la circulación. Por consiguiente, si los vehículos llegan a detenerse, será debido a las propias circunstancias del tráfico y no a medidas exteriores, como pueden ser las indicaciones de un semáforo o de un agente de la circulación.

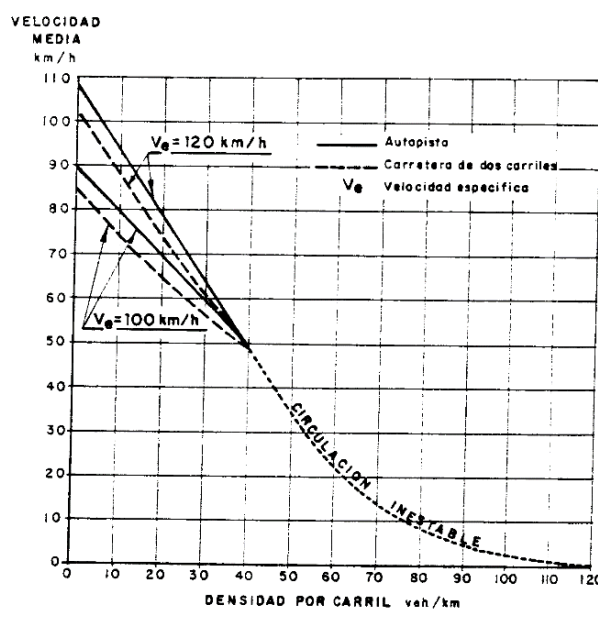
### **2.7.2 Relación velocidad-densidad**

Es claro evidenciar que, si la densidad fuera muy pequeña, casi nula, los pocos vehículos que circularan en la carretera, circularían de forma muy separada y podrían llevar la velocidad que quisieran sin que ningún otro les interfiriera. Con densidades mayores, los vehículos tendrían más dificultades para mantener la velocidad deseada porque encontrarían con cierta frecuencia vehículos más lentos delante de ellos que les impedirían mantener su velocidad. Por tanto, al aumentar la densidad de tráfico, la velocidad media disminuye. En el límite, cuando se alcance la densidad máxima (es decir, cuando la carretera esté totalmente ocupada por vehículos, parachoques contra parachoques), será absolutamente imposible, mover un vehículo sin golpear al que le precede, y la velocidad de todos los vehículos será igual a cero. La velocidad media resulta así una función de la densidad, que alcanza un valor máximo, cuando la densidad es casi cero, y disminuye constantemente al aumentar la densidad, hasta llegar, a anularse cuando la densidad de tráfico alcanza su valor máximo. Hablaremos de zonas, curvas o regiones de circulación inestable cuando tengan altas densidades y bajas velocidades, mientras que será estable en caso contrario.



Esta función variará de unas carreteras a otras, pero indudablemente la influencia del tipo de carretera será mayor cuando la densidad es baja; en estas condiciones la velocidad no depende de otros vehículos, sino exclusivamente de las características de la carretera. Por el contrario, cuando la densidad es alta, los conductores deben preocuparse principalmente de los vehículos que les preceden, por lo que, la velocidad dependerá más de las condiciones del tráfico que de las de la carretera. Si se representa la variación de la velocidad media en función de la densidad de tráfico (midiéndola en vehículos por Km y carril), se obtienen curvas como las de la figura 2.4, en las que las mayores variaciones entre tipos de carretera se producen en las zonas de baja densidad.

Figura 2.4 diagramas relación velocidad-densidad



Fuente: elementos de la teoría del tráfico (Rodrigo Fernández A., 1988)

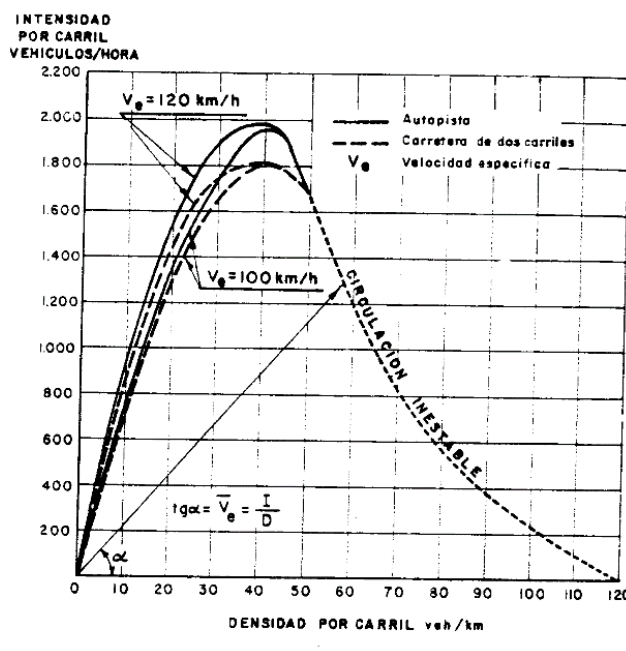
### 2.7.3 Relación intensidad-densidad

Cuando la densidad sea nula, también lo será la intensidad y cuando la densidad alcance su valor máximo, por anularse la velocidad media, se anulará también la intensidad. Entre ambos extremos, la intensidad tendrá valores positivos, y por consiguiente debe alcanzarse un valor máximo de la intensidad. Representando la intensidad en función de la densidad resultan funciones convexas con un máximo para un cierto valor de la densidad, como las representadas en la Figura 2.5, Como en el caso de la relación

velocidad densidad, estas curvas serán diferentes para las distintas carreteras, presentándose mayores diferencias en la zona de baja densidad, mientras que serán similares en la zona cercana a la densidad máxima.

El valor máximo de la intensidad para un tramo de carretera se conoce como capacidad de la carretera, y la densidad para la que se obtiene se llama densidad crítica. Cuando la densidad es menor que la crítica, el tráfico se mantiene relativamente fluido y estable, en el sentido que si se produce alguna pequeña perturbación que aumente momentáneamente la densidad de tráfico, tiende a disiparse y volver a la anterior. Por el contrario, cuando la densidad es superior a la crítica, las perturbaciones tienden a producir un empeoramiento de la situación que puede llegar a la detención total del tráfico. Por ello, los puntos de la rama ascendente del diagrama corresponden a condiciones de tráfico que se pueden considerar aceptables, ya que los vehículos se mantienen moviéndose a una velocidad que, aunque no sea la deseable, no sufrirá excesivas variaciones. Por el contrario, los puntos de la rama descendente corresponden a una circulación inestable en que se producen constantemente paradas y avances y las velocidades oscilan entre cero y valores siempre reducidos.

Figura 2.5 relación intensidad-densidad



Fuente: elementos de la teoría del tráfico (Rodrigo Fernández A., 1988)

El diagrama que representa la intensidad en función de la densidad se conoce como diagrama fundamental del tráfico, y en él puede obtenerse para cualquier punto la intensidad (ordenada), densidad (abscisa) y velocidad media (pendiente de la recta que une el origen con el punto en cuestión).

Se estima que la densidad crítica suele ser del orden del 30% al 40% de la densidad máxima.

#### **2.7.4 Relación velocidad-intensidad**

Mientras la intensidad de tráfico es baja, los conductores pueden mantener la velocidad que ellos juzgan más adecuada, mientras que cuando aumenta la intensidad, la velocidad de cada conductor viene determinada en gran parte por la de los demás, produciéndose una disminución de la velocidad media. Cuando esta intensidad es muy alta, y la carretera llega a estar congestionada, la velocidad resulta poco influida por otros factores, como las características de la carretera o el tipo de vehículo.

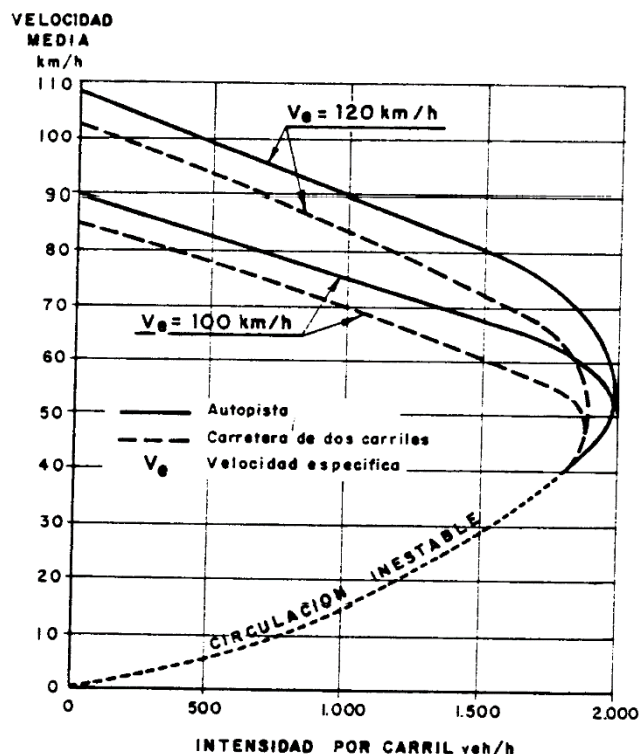
Esta relación es mucho más sencilla de obtener en la práctica, ya que es más fácil medir velocidades e intensidades que densidades. Además, la intensidad de tráfico es una magnitud que define la demanda de tráfico en la carretera, y es, por tanto, un dato básico, mientras que la velocidad, es la magnitud que mejor define el funcionamiento de la circulación, desde el punto de vista de los conductores.

Como en el caso de la curva intensidad densidad, se presentan dos velocidades distintas, para cada valor de la intensidad, una relativamente elevada, y otra menor, de la figura 2.6 la parte superior de la curva, corresponde a una circulación libre y estable, mientras que la parte inferior, corresponde a una circulación congestionada e inestable.

Comparando las curvas correspondientes a distintas carreteras, se observa que difieren apreciablemente en la parte superior (velocidades altas), mientras que son parecidas en la parte inferior. La rama superior de la curva, que es la más interesante a efectos prácticos, ya que la rama inferior corresponde a condiciones inaceptables, puede considerarse aproximadamente lineal, variando de unas carreteras a otras su inclinación y ordenada en el origen.

Se han realizado numerosos estudios para determinar cómo depende la relación velocidad intensidad, de la composición del tráfico (porcentaje de vehículos pesados), y características de la carretera (sección transversal, pendiente, etc.). Dichos estudios forman la base de los procedimientos, para determinar, la capacidad de las carreteras.

Figura 2.6 relación velocidad-intensidad



Fuente: elementos de la teoría del tráfico (Rodrigo Fernández A., 1988)

## 2.8 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Mediante las relaciones entre velocidad, intensidad y densidad se pudo apreciar que, un flujo vehicular funciona aceptablemente bien, cuando el volumen, que circula a una velocidad razonable, es menor que la capacidad de la vía. Cuando los valores de los flujos vehiculares están cercanos al valor de la intensidad máxima o capacidad, el flujo vehicular estará cercano al valor de la intensidad máxima o capacidad, el flujo se hace inestable, ante cualquier perturbación. Peor aún, cuando el flujo vehicular presenta valores lejanos a la capacidad que presenta densidades altas y velocidades bajas, el flujo

se hace forzado existiendo detenciones del tráfico por algunos momentos, reduciendo la calidad de la circulación de gran manera.

Estudios realizados sobre las relaciones entre velocidad, intensidad y densidad, se llegó a la conclusión de que el flujo de tráfico puede encontrarse en tres situaciones distintas: flujo estable, inestable y forzado. Pudiendo definirse cada zona en términos de la densidad, la cual se considera que mide la mayor dificultad que supone la conclusión al aumentar el número de vehículos en la calzada.

Es por ello que la densidad es una variable que puede limitar características generales de operación de un sistema vial. Pueden definirse condiciones de operación en función de la densidad de congestionamiento ( $k_c$ ), para conocer la calidad del flujo vehicular que perciben los conductores y pasajeros durante el viaje; estas zonas en las que puede encontrarse el flujo de tráfico serán:

$$0.00 \leq k \leq 0.40k_c \quad \text{operacion a flujo estable}$$

$$0.40k_c \leq k \leq 0.60k_c \quad \text{operacion a flujo inestable}$$

$$0.60k_c \leq k \leq 1.00k_c \quad \text{operacion a flujo forzado}$$

Flujo estable: esta zona corresponde a un flujo de carácter normal o estable. Un aumento del volumen de tráfico, produce una relación de la velocidad media. La densidad es relativamente baja, y mientras no se alcance la densidad crítica, la curva velocidad-intensidad es generalmente, una línea recta, según se ha comprobado empíricamente. Si los volúmenes de la vía son bajos, la curva correspondiente a un flujo estable, resulta de mayor pendiente, llegándose a la inestabilidad con flujos menores.

El rango de flujo estable abarca desde que la circulación se realiza a flujo libre, donde cada usuario se encuentra aparentemente exento de los efectos de la presencia de otros en la circulación, poseen una altísima libertad, para seleccionar sus velocidades deseadas y maniobrar dentro del tráfico, y la comodidad y convivencia que proporciona el flujo vehicular al conductor y pasajeros es excelente.

Flujo inestable: en esta zona, la curva representativa velocidad-intensidad experimenta mayores inflexiones, debido a que el funcionamiento está cerca o en el límite de la capacidad o intensidad máxima. La velocidad de todos se ve reducida a un valor bajo

bastante uniforme, la libertad de maniobra para circular es extremadamente difícil, y se consigue forzada a un vehículo a ceder el paso; la comodidad y convivencia son enormemente bajos, siendo muy elevada la frustración de los conductores.

La circulación es inestable, debido a que los pequeños aumentos del flujo o ligeras perturbaciones del tráfico producen colapsos.

Flujo forzado: en esta zona en que las velocidades medias son bajas, se tiende al congestionamiento. El flujo forzado o de congestionamiento, se produce cuando la cantidad de tráfico que se acerca a un punto, excede la cantidad que puede pasar por él. En estos lugares se forman colas, donde la operación se caracteriza por la existencia de ondas de parada y arranque, extremadamente inestable.

## **2.9 MODELOS MATEMÁTICOS DE COMPORTAMIENTO VEHICULAR**

Los anteriores conceptos y relaciones fundamentales, constituyen el punto de partida para analizar aún más las características del flujo vehicular, a través de, sus tres variables principales: flujo ( $q$ ), velocidad ( $v$ ) y densidad ( $k$ ), relacionadas mediante la ecuación fundamental del flujo vehicular, que como se demostró, su forma general es:

$$q = v \cdot k \quad (2.10)$$

Donde:

$q$  = Flujo (veh/h)

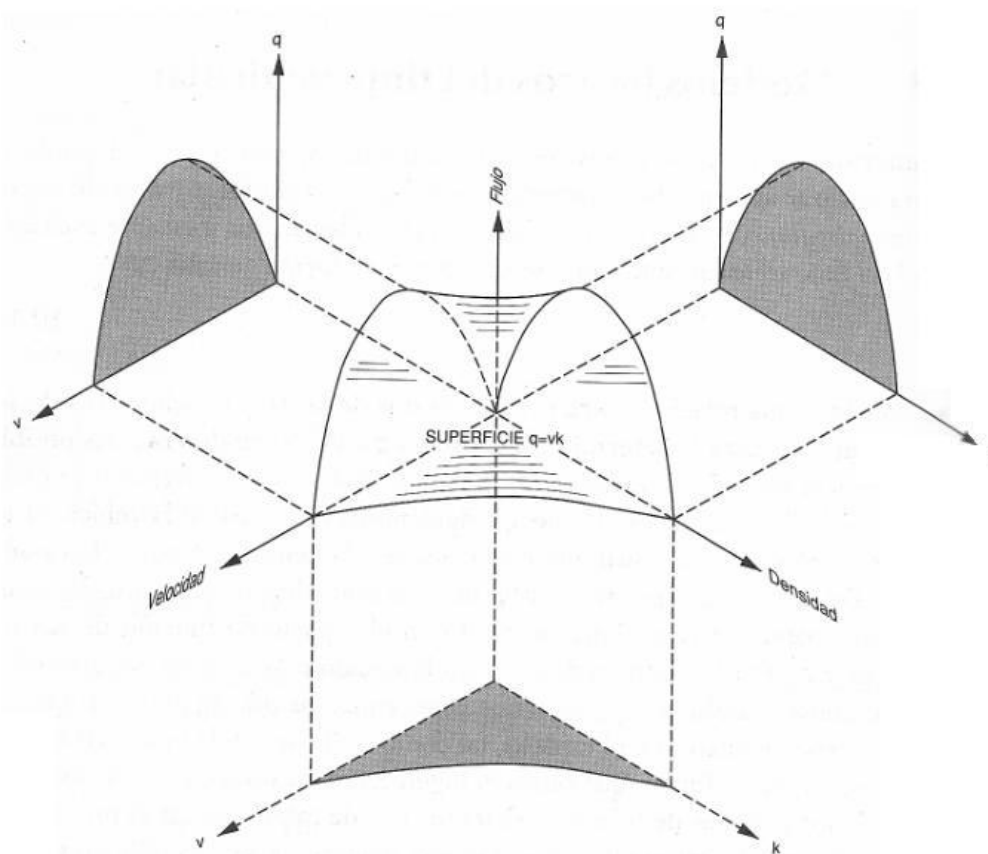
$v$  = Velocidad (km/h)

$k$  = Densidad (veh/h)

Si se establece una relación entre cualquiera dos de las tres variables, la relación de estas dos con la tercera, la determina la ecuación  $q = v \cdot k$ . Naturalmente, las posibles combinaciones son velocidad-densidad ( $v, k$ ), flujo-densidad ( $q, k$ ) y velocidad-flujo ( $v, q$ ). La variable más fácil de medir es el flujo  $q$ , siguiéndole en su orden la velocidad  $v$  y la densidad  $k$ . por esta razón, usualmente se considera la densidad  $k$  como la variable dependiente. De todas maneras, no existe una variable dependiente aislada, como tampoco existe cuando se representa un punto en el espacio en función de sus tres coordenadas ( $x, y, z$ ). Por lo tanto, es de gran ayuda visualizar la *ecuación fundamental*

del flujo vehicular, considerando la superficie que representa, cuando se grafica sobre ejes mutuamente perpendiculares en el espacio, tal como se ilustra en la figura 2.7.

Figura 2.7 relación fundamental del flujo vehicular



Fuente: ingeniería de tránsito, fundamentos (Reyes Espíndola, 2007).

En los modelos determinísticos, los cuales otorgan un valor preciso para cada medida de efectividad, definida al tomar ciertos valores específicos las variables de decisión, aplicados a problemas de tránsito, se supone que las relaciones funcionales entre las variables de entrada y los parámetros que miden la efectividad son constantes. Esto es, solo ocurrirá a un valor de la función objetivo para cualquier conjunto dado de valores de las variables de entrada.

Los empeños realizados en buscar relaciones entre las diferentes parejas de las tres variables principales del flujo vehicular ( $q$ ,  $v$ ,  $k$ ) están basados en la toma de datos y ajuste simple a curvas a regresión, en métodos deductivos a partir de condiciones límite

o de frontera y en analogías físicas. Estas tres formas de aproximarse al fenómeno del tráfico, dieron como resultado el desarrollo de modelos macroscópicos, los cuales suponen un movimiento homogéneo o condiciones de flujo estacionario y describen las características generales o globales de la corriente vehicular.

Los modelos macroscópicos son aptos para grandes escalas, en aplicaciones donde las características macroscópicas del flujo sean de principal interés. Se ha sugerido que deban usarse los modelos macroscópicos cuando el tiempo de desarrollo del modelo disponible y recursos sean demasiado limitados para el desarrollo de un modelo microscópico. Se debe tomar en cuenta que, los modelos macroscópicos generalmente tienen un bajo nivel para describir detalles microscópicos e impactos correctamente, por ejemplo, causados por los cambios en la geometría de la carretera.

### **2.9.1 Clasificación de los modelos de tráfico**

Los modelos matemáticos han demostrado ser más satisfactorios que los modelos físicos, los cuales permiten hacer una relación del cálculo con el comportamiento real del tráfico dentro de un grado de perfección bastante alto. En esta forma, se analizarán solamente modelos de naturaleza matemática, realizando primeramente una breve exposición de los diferentes tipos de modelos matemáticos de tráfico.

Desde el punto de vista de su naturaleza matemática, los modelos pueden ser:

**Modelos estadísticos:** se aplican cuando los fenómenos a estudiar son de naturaleza aleatoria, en flujos relativamente libres. En las condiciones generales de fluidez, el tráfico se caracteriza por sus propiedades estadísticas, interpretando por sus variables más importantes: intensidad, velocidad, separación vehicular expresada en espacio o en tiempo.

**Modelos hidrodinámicos:** se basan en una analogía entre el flujo vehicular y el movimiento de los fluidos, es decir, tratan al flujo vehicular como un medio continuo, y por lo tanto es más útil para estudiar el comportamiento del tráfico como un todo, que para estudiar el específico de un vehículo particular.

Desde el punto de vista del número de valores que una variable puede adquirir, los modelos pueden ser:



Modelos determinísticos: son aquellos en los cuales los valores de sus variables se restringen a un conjunto innumerable finito o infinito. Aquí se permite que las relaciones entre estas variables sean exactas o sea que no entren en ellas funciones de probabilidad.

Modelos estocásticos: son aquellos en los cuales los valores de sus variables se encuentran en un rango continuo y puede ser representado por cualquier número entero o decimal. Las relaciones entre variables se toman por medio de funciones probabilísticas, sirven por lo general para realizar grandes series de muestreos.

Desde el punto de vista de la magnitud del universo considerado, los modelos pueden ser:

Modelos macroscópicos: el enfoque macroscópico considera flujos vehiculares y desarrolla algoritmos que relacionan el flujo, con las velocidades medias en el espacio. Los modelos macroscópicos más empleados son los modelos de Greenshields, Greenberg y Underwood.

Modelos microscópicos: describen la operación vehicular en términos de sus variables de flujo, generalmente tomadas como promedios para representar el comportamiento del conjunto. Este número de variables es relativamente pequeño, además de fácil observar y medir. Los vehículos se consideran colectivamente en su acción mutua a lo largo de una vía y generalmente estos modelos, se derivan de la analogía del flujo vehicular y el flujo de medios continuos como los fluidos.

Modelos mesoscópicos: describen el movimiento de pelotones de vehículos, incorporando ecuaciones para indicar como estos actúan recíprocamente. Con este fin el tráfico se representa por (pequeños) grupos de tráfico, las interacciones que describen son un nivel de detalle bajo. Algunos modelos mesoscópicos derivan de la analogía cinética.

### **2.9.2 Modelos básicos del flujo vehicular**

Uno de los objetivos finales que busca el ingeniero de tránsito es el de optimizar la operación de los sistemas de tránsito existentes y el de intervenir en el proyecto de sistemas viales futuros bastante eficientes. De esta manera, la *optimización* en tránsito

indica la selección de las mejores condiciones de operación, sujeto a las habilidades del sistema o recursos y a las restricciones del usuario y del medio ambiente.

Los esfuerzos en tratar de relacionar las diferentes parejas de las tres variables principales de flujo vehicular ( $q$ ,  $v$ ,  $k$ ) se han basado en toma 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 tres formas de aproximarse al fenómeno del tránsito, han dado como resultado el desarrollo de modelos macroscópicos, los cuales suponen un movimiento homogéneo o condiciones de *flujo estacionario* y describen las características generales o globales de la corriente vehicular.

### 2.9.2.1 Modelo lineal de Greenshields.

Una de las primeras investigaciones para determinar el comportamiento del flujo vehicular la realizó B. D. Greenshields, en el cual, se realizó un análisis de la relación que existe entre la velocidad y la densidad.

Greenshields consideró que la densidad máxima o de congestiónamiento  $k_c$  se presentaría cuando los vehículos estuvieran con los parachoques en contacto, es decir, que el espaciamiento medio inter-vehicular fuese idéntico a la longitud media de los vehículos; en estas circunstancias los vehículos estarían detenidos  $\bar{v}_e = 0$  y  $q = 0$ .

Tomando una longitud media del vehículo de 5 metros,  $k_c$  sería:  $k_c = 200\text{veh}/\text{km}$ , la cual puede variar según la longitud media de los vehículos de cada país. El valor  $k_c$  es un valor límite, siendo el de colapso real, un valor algo menor al dejar entre vehículos pequeños huecos.

Sin embargo, es un valor sin mucha utilidad práctica pues los puntos de interés son los que caracterizan al tráfico en movimiento que es lo usual y conflictivo.

En condiciones de tráfico a baja concentración e intensidad aceptables, tomo muestras de diversos vehículos, los cuales quedaron representados por una nube de datos ( $k$ ,  $v$ ). asumió la hipótesis de que el mejor ajuste era de tipo lineal entre la velocidad y la densidad, y mediante el método de los mínimos cuadrados, pasando obligatoriamente por  $k_c$ , no hizo medidas en otras condiciones de tráfico. Aceptó y propuso pues, la relación lineal velocidad-densidad de la siguiente forma:

$$\bar{v}_e = a + b \cdot k \quad (2.11)$$

De acuerdo con la tercera restricción atrás enunciada, resulta:

$$v_l = a + b \cdot 0 \quad \rightarrow \quad a = v_l$$

Como resultado de la segunda restricción, la velocidad es nula cuando la densidad es máxima:

$$0 = a + b \cdot k_c \quad \rightarrow \quad b = -\frac{a}{k_c} \quad \rightarrow \quad b = -\frac{v_l}{k_c}$$

El modelo lineal estará dado según Greenshields, por:

$$\bar{v}_e = v_l - \frac{v_l}{k_c} \cdot k \quad (2.12)$$

Donde:

$\bar{v}_e$  = Velocidad media espacial (km/h)

$v_l$  = Velocidad media espacial a flujo libre (km/h)

$k$  = Densidad (veh/km/carril)

$k_c$  = Densidad de congestionamiento (veh/km/carril)

Cualquier vía se comporta de forma algo diferente a la realidad. Cuando mejor es la vía en cuanto a trazado y estado, mayores son las velocidades alcanzadas para cada densidad. Esta representación tiene el inconveniente de no presentar directamente el valor de la intensidad. Si se necesita este dato, es preciso acudir a la ecuación fundamental o de la continuidad.

### 2.9.2.2 Modelo logarítmico de Greenberg

Varios investigadores han utilizado la analogía del flujo de fluidos, para desarrollar relaciones macroscópicas, para el flujo del tránsito. Greenberg desarrollo una de las principales contribuciones en que se emplea la siguiente analogía.

Otras investigaciones, relacionadas con el comportamiento del flujo vehicular, han llegado a la conclusión de que no existe siempre una buena correlación lineal entre la velocidad y la densidad. En estos casos se logra un mejor ajuste mediante otros modelos, los cuales toman más en cuenta la curvatura de los datos.

Las investigaciones de Greenberg estaban encaminadas al análisis del régimen a flujo congestionado, por ello formuló una relación logarítmica velocidad-densidad de la siguiente forma:

$$\bar{v}_e = a \cdot \ln(b \cdot k) \quad (2.13)$$

El modelo de Greenberg incumple una de las restricciones indicadas anteriormente, ya que para densidad nula le corresponde una velocidad infinita.

De acuerdo con la segunda restricción, la velocidad es nula cuando la densidad es máxima:

$$0 = a \cdot \ln(b \cdot k_c) \quad \rightarrow \quad \ln(b \cdot k_c) = 0 \quad \rightarrow \quad b \cdot k_c = e^0$$

$$b \cdot k_c = 1 \quad \rightarrow \quad b = \frac{1}{k_c}$$

La ecuación (2.13) queda de la siguiente manera:

$$\bar{v}_e = a \cdot \ln\left(\frac{k}{k_c}\right)$$

Escrita de otra forma:

$$k = k_c \cdot e^{\frac{\bar{v}_e}{a}}$$

En base a la relación anterior, se puede determinar la velocidad para la cual ocurre la intensidad máxima o capacidad:

$$q = \bar{v}_e \cdot k \quad \rightarrow \quad q = \bar{v}_e \cdot k_c \cdot e^{\frac{\bar{v}_e}{a}}$$

$$\frac{dq}{d\bar{v}_e} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{dq}{d\bar{v}_e} = \frac{d}{d\bar{v}_e} \left( \bar{v}_e \cdot k_c \cdot e^{\frac{\bar{v}_e}{a}} \right) = 0$$

Se aprecia que la velocidad correspondiente a la intensidad máxima es igual, cambiando de signo, al parámetro  $a$  de la relación logarítmica de la ecuación (2.13). El modelo logarítmico estará dado según Greenberg por:

$$\bar{v}_e = -v_m \cdot \ln\left(\frac{k}{k_c}\right) \quad \rightarrow \quad \bar{v}_e = v_m \cdot \ln\left(\frac{k}{k_c}\right)^{-1}$$

$$\bar{v}_e = v_m \cdot \ln\left(\frac{k_c}{k}\right) \quad (2.14)$$

Donde:

$\bar{v}_e$  = Velocidad media espacial (km/h)

$v_m$  = Velocidad a intensidad máxima (km/h)

$k$  = Densidad (veh/km/carril)

$k_c$  = Densidad de congestionamiento (veh/km/carril)

### 2.9.2.3 Modelo exponencial de Underwood

El modelo de R. T. Underwood es del tipo macroscópico clásico de tráfico, con sus respectivas ecuaciones que relacionan la intensidad, la velocidad y la densidad.

Las investigaciones de Underwood estaban encaminadas al análisis del régimen a flujo libre, por ello formuló la siguiente relación exponencial negativa entre la velocidad y densidad:

$$\bar{v}_e = ae^{-bk} \quad (2.15)$$

Como se puede observar, el modelo de Underwood también incumple una de las restricciones indicadas anteriormente en el párrafo, ya que, en este caso, a velocidad nula le corresponde una densidad infinita.

De acuerdo con la tercera restricción, la velocidad es libre cuando la densidad es nula:

$$v_l = ae^{-b \cdot 0} \quad \rightarrow \quad v_l = a \cdot 1 \quad \rightarrow \quad a = v_l$$

La ecuación 2.15 queda de la siguiente manera:

$$\bar{v}_e = v_l e^{-bk} \quad (2.16)$$

En base a la relación anterior, se puede determinar la densidad para la cual ocurre la intensidad máxima o capacidad:

$$q = \bar{v}_e k \quad \rightarrow \quad q = v_l k e^{-bk}$$

Desarrollando estas ecuaciones obtendremos:

$$1 - k_m b = 0 \quad \rightarrow \quad k_m = \frac{1}{b}$$

Se observa que la densidad correspondiente a la intensidad máxima es igual al inverso del parámetro  $b$  de la relación exponencial de la ecuación (2.16). El promedio exponencial estará dado según Underwood por

$$\bar{v}_e = v_l e^{\frac{k}{k_m}} \quad (2.17)$$

Donde:

$\bar{v}_e$  = Velocidad media espacial (km/h)

$v_l$  = Velocidad media espacial a flujo libre (km/h)

$e$  = Base de los logaritmos naturales ( $e = 2.718282$ )

$k$  = Densidad (veh/km/carril)

$k_m$  = Densidad a intensidad máxima (veh/km/carril).

## 2.10 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO

Se pretende dar a conocer la metodología planteada de aplicación de los modelos matemáticos descritos anteriormente, así como las variables de comportamiento empleada en el análisis, los indicadores de comportamiento y principalmente en los aspectos referidos a la valoración del comportamiento vehicular a partir de los modelos matemáticos.

### 2.10.1 Metodología de análisis

Primeramente, se desarrolla la obtención de datos de aforo de intensidades de flujo vehicular y obtención de velocidades de punto, por alguno de los métodos señalados en el capítulo 2.

Desarrollaremos un análisis estadístico, de los datos de intensidad y velocidad. Bajo la premisa de todos los días debe existir un comportamiento no diferenciado, y para evitar variaciones notables en los datos, es que se debe proceder a la depuración de los mismos empleado los conceptos de la estadística, de esta manera poder obtener un conjunto de datos representativos y lo menos dispersos posibles.

Obtención de las variables fundamentales del tráfico, mediante aforos se obtiene la intensidad vehicular y los tiempos para la velocidad de punto, esta velocidad permite calcular la velocidad media espacial. Como la densidad es una variable complicada de medir, se calcula mediante la ecuación fundamental del tráfico, empleando para ello la intensidad y la velocidad media espacial.

Ajustes de las variables a curvas velocidad media espacial-densidad, debido a que los modelos parten de esta relación. Se debe realizar un ajuste lineal para el modelo de Greenshields, logarítmico para el modelo de Greenberg y exponencial para el modelo de Underwood.

Desarrollar los modelos, una vez obtenidos los parámetros se aplican a las ecuaciones velocidad media espacial-densidad de los modelos, para que de esta manera se determinen las gráficas de comportamiento para cada modelo.

Análisis de tendencia de las gráficas con el fin de validar los modelos, tomando en cuenta la correlación que existe en el ajuste a las curvas velocidad media-densidad, valorando el ajuste y la racionalidad de los resultados obtenidos para la aceptación de un determinado modelo.

Se elige un modelo que se ajuste a los valores reales de la carretera en estudio para posteriormente determinar los indicadores de comportamiento vehicular a partir de este modelo válido.

### **2.10.2 Variables de comportamiento**

La intensidad ( $q$ ), la velocidad ( $v$ ) y la densidad ( $k$ ) son las variables de comportamiento vehicular más importantes, dentro de los modelos macroscópicos planteados estas vienen a ser las variables de comportamiento vehicular.

La intensidad ( $q$ ) también conocida como tasa de flujo o flujo, es la frecuencia con la cual pasan los vehículos por un punto o sección transversal de un carril o calzada. Es pues, el número de vehículos que pasan durante un intervalo de tiempo específico, inferior a una hora en unidades de minuto o segundo.

La velocidad ( $v$ ) se define como el espacio recorrido y el tiempo que se tarda en recorrerlo, expresado comúnmente para un vehículo, en kilómetros por hora (km/h).

La densidad ( $k$ ), también conocida como concentración de tráfico, es el número de vehículos que ocupan una longitud determinada de una vía en un determinado momento. Generalmente es expresada en vehículos por kilómetro (veh/km) referido a un solo carril o a todos los carriles de la calzada.

### **2.10.3 Indicadores de comportamiento**

Conocidos también como cuantificadores que establecen la calidad de circulación en la vía, así como las condiciones más críticas de esta circulación. Los indicadores relacionados con las variables empleadas para describir el comportamiento del flujo vehicular son: densidad máxima o de congestiónamiento, intensidad máxima o capacidad, velocidad a intensidad máxima, densidad crítica o densidad a intensidad máxima, intervalo promedio a intensidad máxima, espaciamiento promedio a intensidad máxima, velocidad a flujo libre.

Velocidad a flujo libre es la velocidad máxima o límite establecida para la vía con la que un vehículo circula libremente, sin restricciones debido a otros vehículos. Depende del conductor, de las características de su vehículo, de las características geométricas de la velocidad, etc.

Cuando existen pocos vehículos circulando por la vía, el conductor toma una velocidad con la que se siente cómodo y seguro de llegar a su destino en el tiempo previsto, es decir, a cualquier conductor le gustaría desarrollar esta velocidad en todo su recorrido.

Densidad máxima o de congestiónamiento es el número máximo de vehículos que ocupan una longitud determinada de una vía en un determinado momento. Cuando se llega a esta condición, los vehículos estarán parados, ya que les resultaría imposible moverse, incluso a pequeñas velocidades, sin golpearse unos con otros.

Si aumenta el número de vehículos en una vía gradualmente, llega un momento en que hay tan poco espacio para circular que se detienen uno tras otro formando colas, esta cantidad de vehículos que se encuentran parados a lo largo de un tramo de la vía vienen a constituir la densidad vehicular máxima en ese tramo.

Intensidad máxima o capacidad es el máximo número de vehículos que pasan por una sección de vía, durante un intervalo de tiempo específico inferior a una hora, para



condiciones prevalecientes de la vía y del tráfico. En esta condición la intensidad de tráfico iguala a la capacidad de la vía considerada.

A medida que aumenta la cantidad de vehículos que circulan por la vía aumenta la intensidad, pero existe un punto en el que a medida que siguen aumentando los vehículos, se tienen problemas de maniobrabilidad, lo que reduce la velocidad de los vehículos y por tanto la intensidad. Este punto antes de que la intensidad comience a reducirse se denomina intensidad máxima, y expresa la mayor cantidad de vehículos que puede soportar la vía en un determinado tiempo, antes de que se presenten problemas en la circulación

Como es de gran importancia conocer que existe un valor máximo de la intensidad que puede circular por una vía, es que a partir de este indicador se definen otros que nos ayudan a entender el comportamiento del tráfico.

Velocidad a intensidad máxima es la velocidad promedio de los vehículos cuando circulan a intensidad máxima.

La velocidad se reduciendo a medida que la intensidad aumenta. Debido a que existe menor espacio en la vía para realizar maniobras de aceleración. Al presentarse la intensidad máxima de circulación, la velocidad se reduce de tal forma que se convierte en una velocidad mínima de circulación, antes que el flujo vehicular se vuelva inestable debido a mayor cantidad de vehículos que se encuentran en la vía.

Densidad crítica o densidad a intensidad máxima es la densidad de tráfico cuando los vehículos circulan a la máxima intensidad que permite la vía.

La densidad se incrementa a medida que la intensidad aumenta, pues a mayor cantidad de vehículos que circulan por una sección de vía, habrá mayor cantidad de vehículos en el tramo de vía. Al presentarse la intensidad máxima de circulación, la densidad comienza a incrementarse rápidamente, debido a que los vehículos reducen su velocidad al presentarse ya problemas en la circulación. Este punto antes de que la densidad comienza a incrementarse rápidamente, debido a que los vehículos reducen su velocidad al presentarse ya problemas en la circulación. Este punto antes de que la densidad comience a aumentar de forma más acelerada se denomina densidad crítica, y se expresa

la mayor cantidad de vehículos para una longitud de vía en un determinado tiempo, antes de que se presente una circulación vehicular inestable debido a la poca maniobrabilidad.

Intervalo promedio o intensidad máxima es el intervalo de tiempo promedio entre el paso de vehículos consecutivos, medido entre puntos homólogos (por ejemplo, los parachoques delanteros) de los vehículos, que circulan por una vialidad en condiciones de intensidad máxima. El intervalo de tiempo está íntimamente ligado a la intensidad máxima. El intervalo de tiempo que pasen por la sección dada de una vía en un determinado tiempo, menor será el intervalo de tiempo entre vehículos consecutivos, es decir, al mínimo, antes que el flujo vehicular se vuelva inestable debido a mayor cantidad de vehículos que se encuentran en la vía.

Espaciamiento promedio a intensidad máxima es la distancia promedio entre el paso de vehículos consecutivos, medida entre sus parachoques traseros, que circulan por una vialidad en condiciones de intensidad máxima. El espaciamiento entre vehículos consecutivos, es decir, al presentarse la intensidad máxima, el espaciamiento entre vehículos se reducirá al mínimo, antes que el flujo vehicular se vuelva inestable debido a mayor cantidad de vehículos que se encuentran en la vía.

#### **2.10.4 Relación entre indicadores de comportamiento**

Existen ciertas relaciones entre los indicadores, que permiten entender el comportamiento del flujo vehicular de manera más sencilla y comprensible.

Para una intensidad máxima se presenta una densidad crítica. Cuando la intensidad iguala a la capacidad, es decir, cuando la vía se encuentra repleta al tope de vehículos que todavía circulan sin ningún tipo de problema, se presenta esta densidad que es la mayor cantidad de vehículos en ese tramo determinado de la vía, que circulan de manera fluida y estable.

Para una densidad máxima o de congestionamiento se tiene una velocidad de flujo nula, y por ende una intensidad nula también. Cuando se presenta la condición de densidad máxima, los vehículos se encuentran detenidos formando colas y al encontrarse tan juntos uno del otro (parachoques contra parachoques), no pueden moverse al no existir espacio entre ellos, lo que indica que su velocidad de circulación es cero.

Para una densidad máxima se tiene un espaciamiento promedio entre vehículos coincidente a la longitud promedio de los vehículos en cuestión. Como se indicó anteriormente el espaciamiento es medido entre parachoques traseros de vehículos consecutivos, al estar los vehículos detenidos y sin huecos entre ellos, este espaciamiento coincide con la longitud del vehículo.

Para una densidad máxima se tiene un intervalo promedio entre vehículos que tiende a infinito. Al estar los vehículos detenidos por no existir espacio entre ellos para la circulación, el tiempo desde que pasa un vehículo hasta que pasa el siguiente se hace tan grande que tiende a infinito.

Para que exista una velocidad a flujo libre la densidad debe ser nula, en consecuencia, la intensidad será nula también. En la realidad la densidad nunca toma el valor de cero, es decir, para que exista velocidad a flujo libre, debe haber por lo menos un vehículo sobre la calle o carretera circulando a esa velocidad. Al existir pocos vehículos en la vía el conductor tiene la libertad de circular a la velocidad máxima que le permita su vehículo y las características de la vía.

#### **2.10.5 Valoración del comportamiento**

Para obtener un mayor beneficio de los estudios realizados a través de modelos de tráfico se efectuará la valoración del comportamiento, tomando en cuenta los datos iniciales aforados como datos básicos para introducir a los modelos de tráfico, de la valoración de los resultados de ajuste de los modelos propiamente estudiados y finalmente a partir de los indicadores que se obtengan del modelo elegido como modelo de mejor ajuste al comportamiento del tráfico estudiado.

Inicialmente se debe hacer una valoración de los datos disponibles para la aplicación de los modelos de tráfico, resulta que es de singular importancia conocer la cantidad y calidad de los modelos, en ese sentido debe hacerse un análisis de la cantidad de datos que se han obtenido:

Los datos disponibles deben ser representativos del comportamiento del lugar de estudio.

Las horas aforadas son las suficientes para representar al comportamiento en todas las horas del día o por lo menos de representar las horas de mayor volumen de tráfico en los tramos de estudio.

Observar si existe la confiabilidad en los datos de entrada para los modelos, cuál es ese grado de confiabilidad dependiendo de la forma, metodología y personal dispuesto en la obtención de esos datos.

El siguiente paso es hacer una valoración del comportamiento de los modelos matemáticos de tráfico que están siendo utilizados en el estudio ya en forma específica para el análisis del comportamiento del tráfico en un determinado tramo tomando en cuenta lo siguiente:

Cuando son los modelos de tráfico que se utilizara para analizar el comportamiento del tráfico en un tramo determinado y cuáles son los principios de cada modelo de manera que estos puedan compararse con las características del tráfico en estudio.

Definir en forma valorativa cuales son las expectativas esperadas para cada uno de los modelos en el comportamiento del tráfico, de manera que se identifique claramente si todos los modelos tienen las mismas posibilidades o existe algunos modelos con mayor posibilidad de acomodarse al comportamiento del tráfico en estudio.

Realizar un análisis del manejo de datos de entrada que realiza cada modelo, de manera que se pueda correlacionar la calidad de los datos con los resultados del modelo, que de alguna manera pueden hacer diferenciar a los diferentes modelos a emplearse en el estudio de un tramo determinado

Análisis de los resultados entregados del ajuste que se obtiene en cada uno de los modelos de tráfico, la aceptación de los valores de correlación, la valoración del coeficiente de correlación y los rangos numéricos posibles de aceptación de un determinado modelo y sus resultados.

## **2.11 TÉCNICAS DE AFORO Y DE MEDICIÓN DE VELOCIDADES**

La obtención de datos de campo correspondientes a volúmenes de tráfico y a velocidades de circulación, puede realizarse por medios mecánicos o de forma manual, dependiendo del equipo que se posea y los fines que persiga el estudio.

### **2.11.1 Estudio de velocidad en el sitio**

Los estudios de velocidad en el sitio se realizan para estimar la distribución de la velocidad de los vehículos en un flujo vehicular y en un lugar específico en una carretera. La velocidad de un vehículo, se define, como la rapidez de movimiento del vehículo; se expresa en kilómetros por hora (km/h). Un estudio de velocidad en el sitio consiste en registrar la velocidad de una muestra de vehículos en un lugar específico. Las características de velocidad identificadas serán válidas solamente para las condiciones de tránsito y de medio ambiente que existan en el momento del estudio. Las características de velocidad que se determinan en el sitio pueden usarse para:

- Establecer parámetros para la operación y el control del tránsito, tales como zonas de velocidad, o las restricciones de paso.
- Evaluar la efectividad de los dispositivos de control de tránsito, tales como los señalamientos de mensajes variables en las zonas de trabajo.
- Verificar el efecto de los programas en vigor que monitorean de la velocidad, tales como el uso del radar sonoro y de límites diferenciados de velocidad para automóviles y camiones.
- Evaluar y/o determinar lo adecuado de las características geométricas de la carretera, tales como estudios horizontales de las curvas y las longitudes verticales de las mismas.
- Evaluar el efecto de la velocidad en la seguridad de las carreteras mediante el análisis de los datos de accidentes para diferentes características de velocidad.
- Determinar las tendencias de velocidad.
- Determinar si son válidas las quejas acerca de incidentes de exceso de velocidad.

#### **2.11.1.1 Ubicaciones de sitios para los estudios de velocidad**

Las ubicaciones de los sitios para los estudios de velocidad dependen del uso anticipado de los resultados. En general se emplean las siguientes ubicaciones.

Las ubicaciones que representen condiciones diferentes de tráfico en una carretera o carreteras que se emplean para la correlación básica de datos.

Los lugares a la mitad de la cuadra en vialidades urbanas rectas y en secciones planas de carreteras rurales son sitios que se determinan para los análisis de tendencia de velocidad.

Cualquier ubicación puede usarse para la solución de un problema específico de ingeniería de tránsito.

### **2.11.1.2 Hora del día y la duración de los estudios**

La hora del día para realizar un estudio de velocidad, depende del propósito del estudio. Si la finalidad del estudio es establecer límites de velocidad visibles, observar tendencias de velocidad, o recolectar datos básicos, se recomienda que sea realizado, cuando el tránsito está fluyendo libremente durante las horas no pico. Sin embargo, cuando se realiza un estudio de velocidad como respuesta a las quejas de los usuarios, este es útil si el periodo de tiempo seleccionado para el estudio refleja la naturaleza de las quejas.

La duración del estudio deberá ser tal que registre el número mínimo de registros requeridos para el análisis estadístico. Comúnmente, es de una hora y el tamaño de la muestra de al menos 30 vehículos.

### **2.11.1.3 Métodos para realizar los estudios de velocidad**

Los métodos empleados para realizar los estudios de velocidad en el sitio pueden ser: manuales o automáticos.

En la actualidad se disponen de varios dispositivos automáticos que pueden emplearse para obtener las velocidades instantáneas de los vehículos en una ubicación de una carretera. Entre los principales se encuentra: 1) detectores de camino 2) medidores con el principio Doppler (del tipo radar) 3) dispositivos electrónicos

El método del cronometro es el más antiguo y probablemente el más económico para medir las velocidades de los vehículos. En una distancia determinada de 20 a 100 metros que se ha marcado en el pavimento con dos rayas de pintura, se mide el tiempo que tardan los vehículos en recorrerla. El cronometro se coloca en marca cuando un vehículo entra en la distancia marcada en el pavimento, y se detiene cuando el mismo vehículo sale de ella. La velocidad será igual al espacio recorrido entre el tiempo empleado en recorrerlo.

Los detectores de camino se clasifican en: tubos neumáticos para camino y espirales inductoras. Estos dispositivos pueden usarse para recolectar datos acerca de velocidades, al mismo tiempo que se obtienen datos de volumen. Los detectores de camino deben ser instalados de tal modo que se reduzcan al mínimo la probabilidad de que un vehículo que transita cierre la conexión del medidor durante la medición de velocidad. Esto se logra separando los detectores de camino a una distancia de 2 a 10 metros.

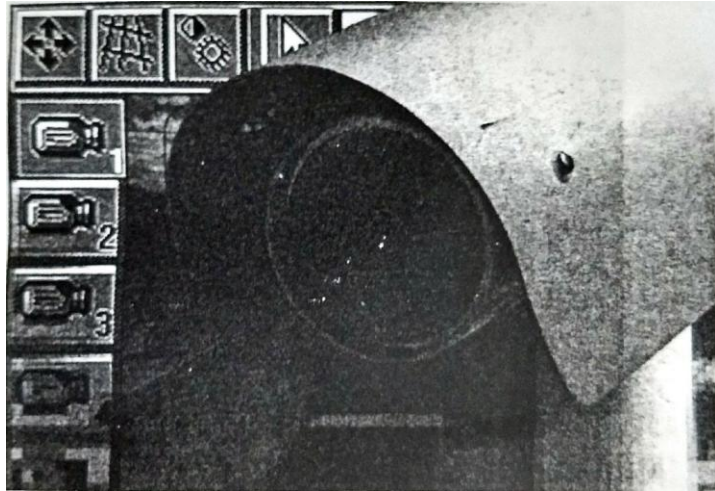
Una ventaja de los detectores de medición es que la probabilidad de error se reduce. Sus desventajas: 1) los dispositivos son costosos 2) cuando se usan tubos neumáticos (como son muy obvios), pueden afectar el comportamiento del conductor, y producir una distorsión de la distribución de velocidades.

Los detectores electrónicos son dispositivos que detectan la presencia de los vehículos por medios electrónicos, y con base en la información obtenida se calculan las características del tránsito, tales como velocidad, volumen, colas, y los intervalos de tiempo entre dos vehículos que viajan en la misma dirección y en la misma ruta. La ventaja de estos dispositivos respecto del uso de los detectores de camino es que no es necesario instalar (físicamente) circuitos o ningún otro tipo de detector. La tecnología más avanzada que emplea electrónica es el procesamiento de imágenes de video, algunas veces denominada sistema de visión de máquina. Consiste en una cámara electrónica que domina una sección grande del camino y un microprocesador. La cámara electrónica recibe las imágenes del camino; el microprocesador determina la presencia o el paso del vehículo. La información obtenida se usa para determinar las características del tránsito en tiempo real. Ejemplo de este sistema es el autoscopio.

En la figura 2.8a se ilustra en forma esquemática la configuración del autoscopio. Tienen una gran ventaja respecto de los circuitos, y puede detectar el tránsito en muchos lugares dentro del campo de visión de la cámara. El usuario selecciona las localidades que se van a monitorear mediante gráficos interactivos, lo que normalmente toma solo algunos minutos. Esta flexibilidad se logra colocando sobre el monitor que muestra el tránsito líneas de detección a lo largo o a través de los carriles del camino. De esta forma las líneas del detector no quedan fijas (físicamente) sobre el camino. La señal de detección

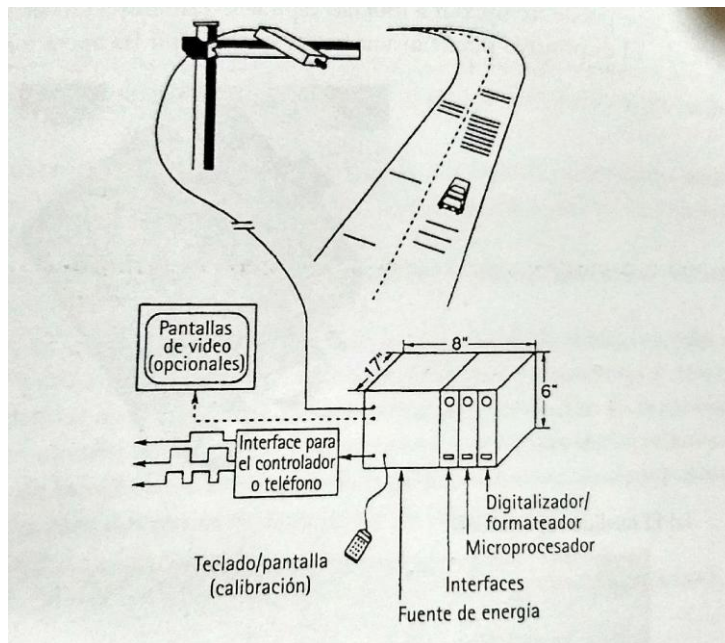
que se genera cuando un vehículo cruza las líneas del detector es similar a la producida por las espirales, e indica la presencia o el paso del vehículo.

Figura 2.8a autoscopio instalado



Fuente: ingeniería de tránsito y carreteras (Nicholas J. Garber, 2006)

Figura 2.8b ilustración esquemática del autoscopio



Fuente: ingeniería de tránsito y carreteras (Nicholas J. Garber, 2006)



### **2.11.2 Estudios de volumen de tráfico**

Se realizan estudios de volumen de tránsito para recolectar datos del número de vehículos y/o peatones que pasan por un punto en una instalación de una carretera durante un periodo específico de tiempo. Este periodo de tiempo varía de 15 minutos hasta un año, dependiendo del uso anticipado de los datos.

Los objetivos que se pretenden generalmente mediante los aforos, todos ellos encaminados a conocer aspectos importantes de la demanda de tráfico, como son su volumen y composición, se sintetiza en los siguientes:

- Justificar económicamente las inversiones en las que el tráfico puede intervenir como variable.
- Determinar las características físicas de las vías, especialmente en los cruces, de acuerdo con las necesidades del tráfico.
- Establecer de la señalización fija o automática.
- Asignar las nuevas vías de tráfico.
- Desarrollar elementos de investigación.

De los datos de aforo de una calle o carretera, convenientemente elaborados, se puede obtener el volumen de tráfico promedio anual TPDA, los volúmenes horarios, la composición del tráfico, la distribución por sentidos, los movimientos de giro y el volumen de tráfico de peatones. En cuanto a duración, los aforos denominados breves se refieren por lo general a periodos de 15, 30 o 60 minutos de distribución constituyen aforos extensos.

Los aforos manuales son aquellos que se realizan utilizando personal humano para la contabilización de los vehículos; de manera que se establezcan puntos de aforo y en dichos puntos se coloque personal necesario en uno o varios turnos, dependiendo de las horas de aforo, para establecer el conteo correspondiente.

La ventaja de los aforos manuales es que estos se pueden realizar con objetivos irrestrictos, es decir, cualesquiera sean estos objetivos, se diseñaran planillas de aforo correspondientes para proceder al conteo por los aforadores manuales. La desventaja de estos aforos es el costo, ya que se requiere de mucho personal en proporción a la complejidad de los objetivos del estudio y la duración de los conteos.

El método automático emplea un método de conteo que requiere la instalación en el camino de detectores de superficie (como los tubos neumáticos de camino) o detectores debajo de la superficie (como los aparatos magnéticos de camino). Los cuales detectan el vehículo que pasa y transmiten la información a un registrador, que se conecta a un lado del camino. Un ejemplo de contadores que usan tubos neumáticos de camino es el clasificador de tránsito de vehículos phonix.

**CAPÍTULO III**  
**APLICACIÓN DEL ESTUDIO**

# CAPÍTULO 3

## APLICACIÓN DEL ESTUDIO

### 3.1 UBICACIÓN

El presente trabajo se desarrolló a lo largo de vías de gran concurrencia en la ciudad de Tarija, como ser la avenida número 177, las avenidas paralelas y laterales a las instalaciones de la nueva terminal, en lado izquierdo de la nueva terminal se encuentra la avenida número 178 y en el lado derecho la avenida número 179, la avenida número 180 que se encuentra justo atrás de las instalaciones de la nueva terminal. Todas estas avenidas se encuentran en el barrio torrecillas todas ellas dan acceso de entrada como de salida a las instalaciones de la nueva terminal.

Imagen 3.1 barrio Torrecillas



Fuente: Google Earth

El estudio se desarrolló en siete puntos a lo largo de estas cuatro avenidas, las avenidas durante el estudio estuvieron ya asfaltadas y la terminal estuvo en completo funcionamiento, con un ancho de calzada promedio de aproximadamente 12 metros y con una pendiente longitudinal variable.

Para la obtención de tiempos para velocidades se decidió ubicarse en tramos largos y rectos al medio de dichas avenidas, evitando zonas de estacionamiento o parada de micros para que no influyan en la recolección de datos. Cuando realizamos el estudio en el sitio, fue importante obtener datos sin sesgo. Esto requiere que los conductores no se percaten de la realización del estudio. Por lo tanto, el personal empleado se ubicó en lugares no muy visibles para el conductor, los observadores que realizaron el estudio pasaron desapercibidos.

El punto 1 de aforo de vehículos se ubicó en la avenida número 177 a aproximadamente 30 metros antes de llegar a la avenida número 178. Se desarrollaron tanto los aforos de intensidad como la recolección de tiempos para velocidades en el mismo punto, puesto que cumple con los criterios de ubicación para este objetivo.

Imagen 3.2 punto número 1 de aforo avenida 177



Fuente: Elaboración propia

El punto número 2 de aforo de vehículos se encuentra sobre la avenida número 178 pasando 40 metros de la avenida número 177 justo al lado izquierdo de las instalaciones



de la nueva terminal. Tanto los aforos de intensidades como la recolección de tiempos para velocidades se realizaron en el mismo punto, puesto que cumple con los criterios de ubicación.

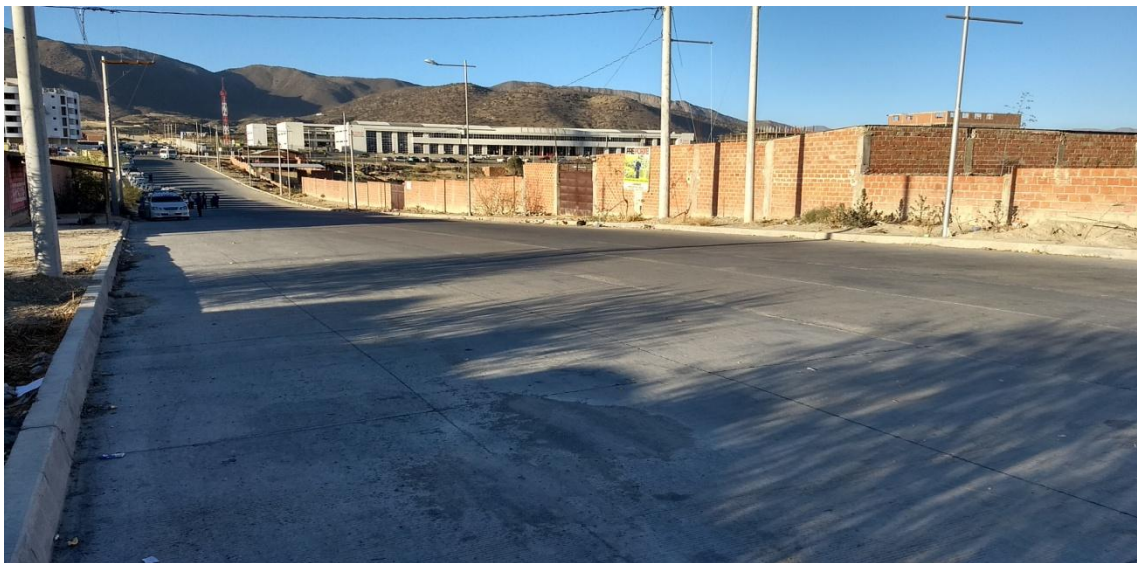
Imagen 3.3 punto número 2 de aforo avenida 178



Fuente: Elaboración propia

El punto número 3 de aforo de vehículos se ubicó sobre la avenida número 178 pasando unos 50 metros de la avenida Panamericana debido a su larga extensión de la avenida se desarrollaron sin ningún problema tanto los aforos de intensidades como la recolección de tiempos para velocidades, debido a que también cumplen con los criterios de ubicación.

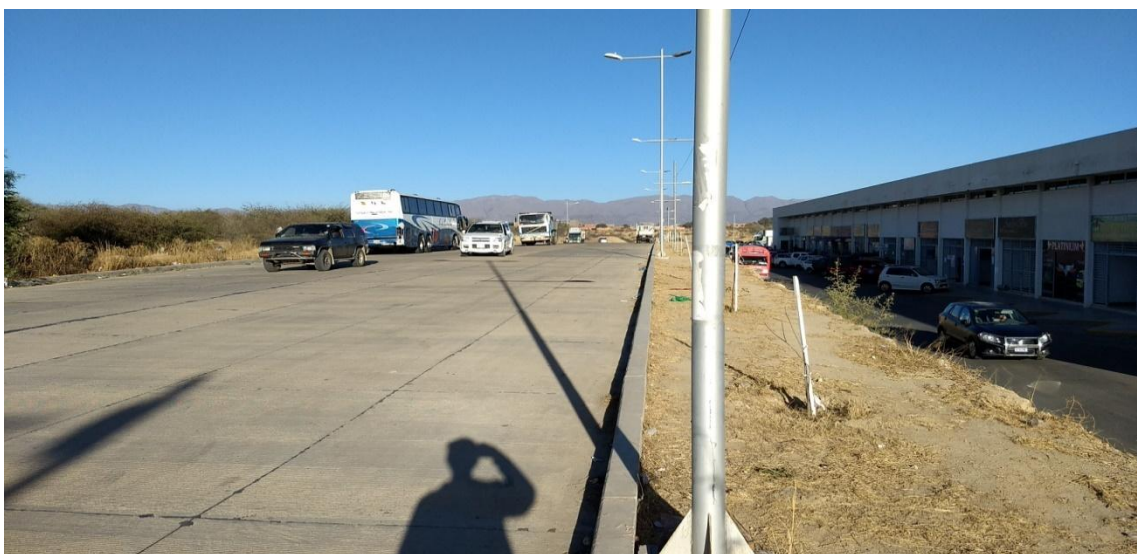
Imagen 3.4 punto número 3 de aforo avenida 178



Fuente: Elaboración propia

El punto número 4 de aforo de vehículos se encuentra sobre la avenida número 180 entre las avenidas número 178 y 179, justo en la parte de atrás de las instalaciones de la nueva terminal. Tanto los aforos de intensidades como la recolección de tiempos para velocidades se desarrollaron en el mismo punto, puesto que cumple con los criterios de ubicación de aforos.

Imagen 3.5 punto número 4 de aforo avenida 180



Fuente: Elaboración propia



El punto número 5 de aforo de vehículos se encuentra sobre la avenida número 177 justo al frente de las instalaciones de la nueva terminal sobre el carril de libre circulación. Tanto los aforos de intensidades como la recolección de tiempos para velocidades se desarrollaron en el mismo lugar, puesto que cumple con los criterios de ubicación.

Imagen 3.6 punto número 5 de aforo avenida 177



Fuente: Elaboración propia

El punto número 6 de aforo de vehículos se encuentra sobre la avenida número 179 pasando 30 metros de la avenida número 177 justo al lado derecho de las instalaciones de la nueva terminal. Tanto los aforos de intensidades como la recolección de tiempos para velocidades se realizaron en el mismo punto, puesto que cumple con los criterios de ubicación.



Imagen 3.7 punto número 8 de aforo avenida 179



Fuente: Elaboración propia

El punto número 7 de aforo de vehículos se encuentra sobre la avenida número 179 pasando unos 100 metros de la avenida panamericana debido a su larga extensión de la avenida se desarrollaron sin ningún problema tanto los aforos de intensidades como la recolección de tiempos para velocidades, debido a que también cumplen con los criterios de ubicación.

Imagen 3.8 punto número 7 de aforo avenida 179



Fuente: Elaboración propia

### 3.2 aforo vehicular

La obtención de datos los cuales parten de la relación velocidad media espacial-densidad por lo que se debe obtener datos de velocidad de punto y densidad de flujo. La densidad de tráfico vehicular es más práctica calcularla a partir de la ecuación fundamental del tráfico la cual se relaciona con la velocidad y la intensidad de flujo; debido a ello se obtuvo como datos de partida a los tiempos de circulación de los vehículos para el cálculo de velocidades y los datos de intensidad de flujo.

Para la obtención de datos se realizó un muestreo aleatorio simple, cada elemento tuvo igual oportunidad de ser seleccionado y cada combinación de los elementos muestrales tuvo igual oportunidad de seleccionarse, es decir, la elección del vehículo a registrarse fue según el orden de llegada a los puntos de aforo.

El aforo de intensidad de vehículos en los puntos consistió en simplemente registrar el número de vehículos livianos, medianos y pesados que circulan por los puntos designados de aforos durante una hora durante la hora de máxima demanda u hora pico.

La obtención de tiempos de circulación de vehículos se realizó mediante el método de cronometro. Los cuales nos darán información relativa de la velocidad prevaleciente en la zona de estudio. Los tiempos medios correspondientes a las velocidades de punto, fue el tiempo que tarda un vehículo en recorrer dos líneas previamente marcadas en el pavimento con una distancia entre ellos de 25 metros y 50 metros, el cual el vehículo circula sin interrupciones o disminución aparente de velocidad, en cada punto se definió dos líneas sobre la calzada a distancias requeridas. El observador se ubicó entre las dos marcas, de manera que pueda accionar el cronometro cuando las ruedas delanteras del vehículo aforado pisan la primera marca, para posteriormente detener el cronometro cuando las ruedas delanteras pisan la segunda marca en el pavimento.

La recopilación de datos de campo se realizó de la siguiente manera:

El periodo de obtención de datos fue de un mes.

Los aforos tanto de intensidades como la medición de tiempos se realizaron de lunes a domingo.

Se designaron siete puntos de aforo distribuidos en la zona de estudio, que se encuentran dos puntos sobre la avenida 177 dos puntos de aforo sobre la avenida 178 dos puntos de aforo sobre la avenida 179 y un punto de aforo sobre la avenida 180.

Todos los días se recolectaban datos de intensidad y tiempos dentro de las 3 horas de máxima demanda (7:00–8:00, 11:00–12:00, 18:00–19:00). Se detalla mejor en la siguiente tabla, la cual parte de los histogramas de frecuencia desarrollados en el apéndice E.

Tabla 3.1 periodos de aforo de vehículos y medición de tiempos

	Intensidad			Velocidad		
	Mañana	Medio día	Noche	Mañana	Medio día	Noche
<b>Carril de entrada</b>	7:00 - 8:00	11:00 - 12:00	18:00 - 19:00	7:00 - 8:00	11:00 - 12:00	18:00 - 19:00
<b>Carril de salida</b>	7:00 - 8:00	11:00 - 12:00	18:00 - 19:00	7:00 - 8:00	11:00 - 12:00	18:00 - 19:00

Fuente: Elaboración propia a partir de los histogramas de frecuencia

A pesar de los días festivos durante el periodo de aforo se registraron con total normalidad el tráfico vehicular en la zona de estudio obteniendo todos los días del mes.

El detalle de la recopilación de datos de campo correspondientes a aforos de vehículos y medición de tiempos se encuentran en el anexo A del presente trabajo.

### 3.3 ANÁLISIS DE DATOS

Transcritos los datos de tiempo e intensidad recopilados, se continuó con la depuración de datos extremos, es decir con datos registrados que están muy dispersos de su media respectiva. Estos se deben ya sea por ser causado por el conductor o por errores del observador en la medición; para esto se debe efectuar previamente un ordenamiento de los datos.

### **Tabulación y resumen de los datos:**

Posterior a ello se desarrolló para poder condensar y resumir los datos de las tablas de frecuencia. El número adecuado de clases por lo general fluctúa entre 5 y 25. En el estudio de gabinete se utiliza la siguiente ecuación para determinar el número de clases:

$$NC = 1 + 3.322 * \text{Log}N \quad (3.1)$$

Donde:

NC = Número de intervalos de clases

N = Tamaño de la muestra.

Hay varias medidas promedio que se pueden usar para describir la tendencia central de un conjunto de observaciones. La media aritmética o media es la depuración de los datos extremos.

Una vez definidos los valores que representan al conjunto de observaciones (media y desviación estándar), se procedió a la depuración de los datos extremos. Si la forma de los datos es aproximadamente, la de una distribución normal, entonces se puede adoptar el criterio que para un rango o intervalo de dos veces la desviación estándar a ambos lados de la media ( $\bar{x} \pm 2s$ ), puede esperarse que aproximadamente el 95.5% de las observaciones de la muestra se encuentren en este rango. Una confiabilidad del 95%, proporciona una estimación conveniente del rango, para la mayoría de los propósitos.

El desarrollo del análisis estadístico con su respectiva tabulación de los datos de campo correspondientes a intensidades y velocidades se encuentra en el anexo D del presente trabajo. Los datos depurados se presentan en el anexo A en color rojo para poder distinguir del restante de datos. El tamaño mínimo de aforo se encuentra en el anexo C

Tamaño de la muestra:

Para el estudio de velocidad de punto, se requiere un tamaño adecuado de la muestra, para satisfacer consideraciones estadísticas. La siguiente ecuación puede ser usada para calcular el número de velocidades que deben medirse:

$$n = \left(\frac{sk}{e}\right)^2 \quad (3.2)$$

Dónde:

$n$  = Tamaño mínimo de la muestra

$s$  = Desviación estándar de la muestra (km/h)

$k$  = Constante correspondiente al nivel de confiabilidad deseado

$e$  = Error permitido en la estimación de la velocidad de punto (km/h)

En todo caso, deben medirse no menos de 30 velocidades de vehículos, si se quiere desarrollar el estudio.

El uso de la constante  $k$ , depende del nivel de confianza deseado. Con frecuencia se utiliza el valor 2.00 que proporciona un nivel de confiabilidad del 95.5%. Otros valores de esta constante y los niveles de confianza correspondiente se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.2 constante correspondiente al nivel de confianza

<b>K</b>	<b>Nivel de confiabilidad (%)</b>
<b>1.00</b>	<b>68.3</b>
<b>1.50</b>	<b>86.6</b>
<b>1.64</b>	<b>90.0</b>
<b>1.96</b>	<b>95.0</b>
<b>2.00</b>	<b>95.5</b>
<b>2.50</b>	<b>98.8</b>
<b>2.58</b>	<b>99.0</b>
<b>3.00</b>	<b>99.7</b>

Fuente: Ingeniería de tránsito y carreteras (Nicholas J. Garber, 2006)

El error permitido en la estimación de la velocidad depende de la precisión requerida en la estimación de su valor medio. El error puede fluctuar de  $\pm 8.0$  km/h a  $\pm 1.5$  km/h o menos aún. Este error  $e$  es denominado error estándar de la media, y es un parámetro estadístico que indica la confianza con la cual puede suponerse que la media de la muestra corresponde a la media de todo el tráfico, viene dado por la fórmula:

$$e = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

Donde:

$e$  = Error permitido en la estimación de la velocidad de punto (km/h)

$s$  = Desviación estándar de la muestra (km/h)

$n$  = Tamaño de la muestra.

Con ello se puede suponer con cierto nivel de confianza (al que corresponde la constante  $k$ ), que la media real para todo el tráfico, quedara comprendida en el rango  $\bar{x} \pm ke$  el error fuera demasiado grande para la precisión que se desea, es necesario hacer más observaciones.

### 3.4 OBTENCIÓN DE LAS VARIABLES DE TRAFICO

Las variables básicas del tráfico son la intensidad, la velocidad, la densidad, el intervalo de tiempo y el espaciamiento entre vehículos.

La recopilación de datos en la zona de estudio consistió en aforos de vehículos para intensidad y la recolección de tiempos de los vehículos para la velocidad de los mismos. La densidad, el intervalo de tiempo y el espaciamiento entre vehículos se determinó a partir de la ecuación fundamental del tráfico y otras relaciones entre las variables.

La velocidad media espacial es la empleada en los modelos planteados, las cuales resulta la media aritmética de las velocidades de punto. Para las distancias dadas de 25 metros y 50 metros, la velocidad media espacial se calcula dividiendo la distancia por de los tiempos empleados por los vehículos en recorrerla, ver el anexo B; esto es:

$$\bar{v}_e = \frac{d}{\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}}$$

Donde:

$\bar{v}_e$  = Velocidad media de punto (m/s)

$d$  = Distancia recorrida (m)

$n$  = Número de vehículos aforados

$t_i$  = Tiempo medio de todos los vehículos aforados (s)

Las intensidades recolectadas en campo fueron para periodos de una hora. Ver el anexo A

La densidad se la calculo a partir de la ecuación fundamental del tráfico, empleando la velocidad media espacial y la intensidad.

$$k = \frac{q}{\bar{v}_e}$$

Donde:

$k$  = Densidad (veh/km)

$q$  = Intensidad (veh/h)

$\bar{v}_e$  = Velocidad de punto (km/h)

El intervalo promedio de tiempo entre vehículos se determinó mediante la relación inversa entre este intervalo promedio y la intensidad:

$$\bar{h} = \frac{1}{q}$$

Donde:

$\bar{h}$  = Intervalo de tiempo promedio (s/veh)

$q$  = Intensidad (veh/h)

El espaciamiento promedio entre vehículos se definió mediante la relación inversa entre este espaciamiento y la densidad:

$$\bar{s} = \frac{1}{k}$$

Donde:

$\bar{s}$  = Espaciamiento promedio entre vehículos (m/veh)

$k$  = Densidad (veh/km)



Tabla 3.3 variables de tráfico

punto 1 - carril de entrada

Hora	Velocidad (km/h)	Intensidad (veh/h)	Densidad (veh/km)	Intervalo (seg/veh)	Espaciamiento (m/veh)
07:00	41.21	322	7.81	11.18	127.98
11:00	41.34	320	7.74	11.25	129.18
18:00	41.62	317	7.61	11.36	131.41

punto 1 - carril de salida

Hora	Velocidad (km/h)	Intensidad (veh/h)	Densidad (veh/km)	Intervalo (seg/veh)	Espaciamiento (m/veh)
07:00	42.10	304	7.22	11.84	138.49
11:00	42.94	297	6.92	12.12	144.59
18:00	40.90	315	7.70	11.43	129.85

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4 variables de tráfico

punto 2 - carril de salida

Hora	Velocidad (km/h)	Intensidad (veh/h)	Densidad (veh/km)	Intervalo (seg/veh)	Espaciamiento (m/veh)
07:00	42.60	368	8.64	9.78	115.76
11:00	43.01	361	8.39	9.97	119.14
18:00	42.20	374	8.86	9.63	112.83

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5 variables de tráfico

punto 4 - carril de salida

Hora	Velocidad (km/h)	Intensidad (veh/h)	Densidad (veh/km)	Intervalo (seg/veh)	Espaciamiento (m/veh)
07:00	44.25	285	6.44	12.63	155.28
11:00	44.57	283	6.35	12.72	157.48
18:00	43.47	292	6.72	12.33	148.88

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 variables de tráfico

punto 5 - carril de entrada

Hora	Velocidad (km/h)	Intensidad (veh/h)	Densidad (veh/km)	Intervalo (seg/veh)	Espaciamiento (m/veh)
07:00	43.18	334	7.74	10.78	129.28
11:00	42.28	348	8.23	10.34	121.49
18:00	42.75	341	7.98	10.56	125.37

punto 5 - carril de salida

Hora	Velocidad (km/h)	Intensidad (veh/h)	Densidad (veh/km)	Intervalo (seg/veh)	Espaciamiento (m/veh)
07:00	41.71	313	7.50	11.50	133.26
11:00	42.05	307	7.30	11.73	136.97
18:00	42.81	300	7.01	12.00	142.70

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 variables de tráfico

punto 6 - carril de entrada

Hora	Velocidad (Km/h)	Intensidad (Veh/h)	Densidad (Veh/Km)	Intervalo (Seg/veh)	Espaciamiento (m/veh)
07:00	42.24	361	8.54	9.98	117.10
11:00	42.51	362	8.52	9.94	117.37
18:00	42.20	362	8.57	9.95	116.69

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8 variables de tráfico

punto 7 - carril de entrada

Hora	Velocidad (km/h)	Intensidad (veh/h)	Densidad (veh/km)	Intervalo (seg/veh)	Espaciamiento (m/veh)
07:00	63.76	543	8.52	6.63	117.42
11:00	64.89	523	8.06	6.88	124.07
18:00	62.93	558	8.87	6.45	112.78

punto 7 - carril de salida

Hora	Velocidad (km/h)	Intensidad (veh/h)	Densidad (veh/km)	Intervalo (seg/veh)	Espaciamiento (m/veh)
07:00	64.05	513	8.01	7.02	124.85
11:00	65.42	496	7.58	7.26	131.90
18:00	63.38	536	8.46	6.72	118.25

Fuente: Elaboración propia

### 3.5 AJUSTE DE CURVAS

Los ajustes de curvas para las variables velocidad media espacial-densidad, fueron desarrollados para los tres distintos modelos que se estudian en el presente, siendo el ajuste lineal para el modelo de Greenshields, logarítmico para el modelo de Greenberg y exponencial para el modelo de Underwood, en base a ellos se podrá obtener los parámetros de velocidad de flujo libre ( $v_l$ ), densidad de congestión ( $k_c$ ), velocidad a intensidad máxima ( $v_m$ ) y densidad a intensidad máxima ( $k_m$ ).

El análisis estadístico para poder determinar las curvas de tendencia de cada uno de los modelos en estudio fue desarrollado en base a un software de computación dirigido a la manipulación de grandes datos y desarrollo estadístico llamado STATGRAPHICS. Este paquete computacional sirvió como herramienta auxiliar para la realización del ajuste de curvas requeridas.

Incluye funciones estadísticas avanzadas, capaces de proporcionar rigurosos análisis propios de los profesionales estadísticos más exigentes y experimentados, y al mismo tiempo ofrece una interface muy intuitiva, con funciones de asistencia exclusivas, de tal forma que proporciona la simplicidad suficiente para permitir a un analista inexperto realizar procedimientos complejos.

El ajuste a la nube de puntos muestrales que efectuó el programa, siguió el criterio conocido por el nombre de mínimos cuadrados. Este criterio toma como el mejor ajuste aquel que minimiza la suma de las desviaciones entre los valores predichos y los observados tan cercana a cero como sea posible.

Tabla 3.9 Statgraphics relación lineal de las variables - carril de entrada - punto 1

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Lineal:  $Y = a + b * X$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	57.317	0.58	98.11	0.0065
Pendiente	-2.063	0.08	-27.26	0.0233

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0877	1.00	0.0877	743.31	0.023
Residuo	0.0001	1.00	0.0001		
Total (Corr.)	0.0878	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999328

R-cuadrada = 99.8656 por ciento

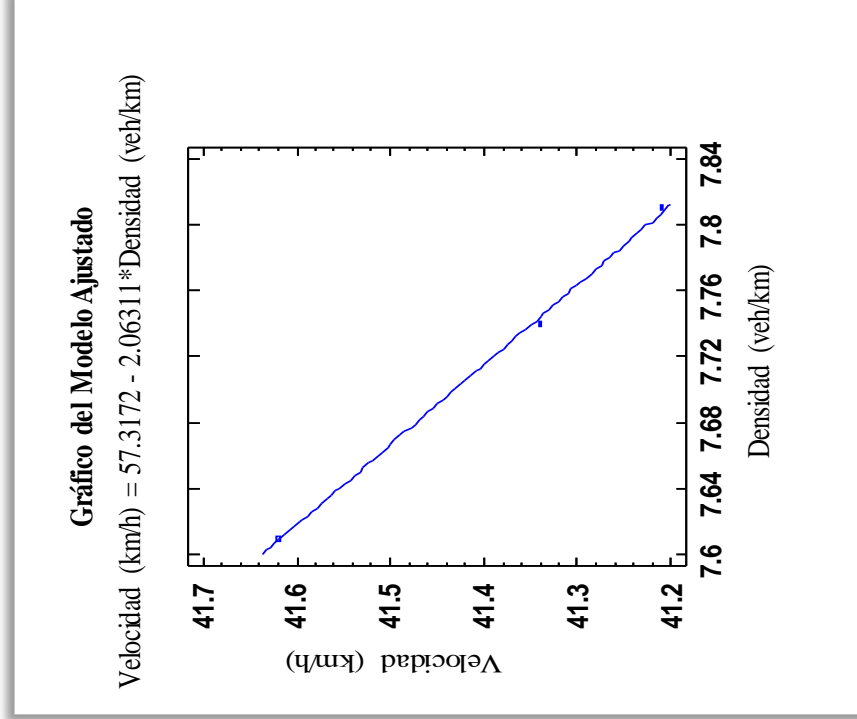
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.7313 por ciento

Error estándar del est. = 0.010861

Error absoluto medio = 0.00582524

Estadístico Durbin-Watson = 2.94175 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.647249



Fuente: Elaboración propia



Tabla 3.10 Statgraphics relación logarítmico de las variables - carril de entrada - punto 1

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Log-X:  $Y = a + b \cdot \ln(X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	73.882	1.08	68.12	0.0093
Pendiente	-15.898	0.53	-29.96	0.0212

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0877	1.00	0.0877	897.64	0.021
Residuo	0.0001	1.00	0.0001		
Total (Corr.)	0.0878	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999443

R-cuadrada = 99.8887 por ciento

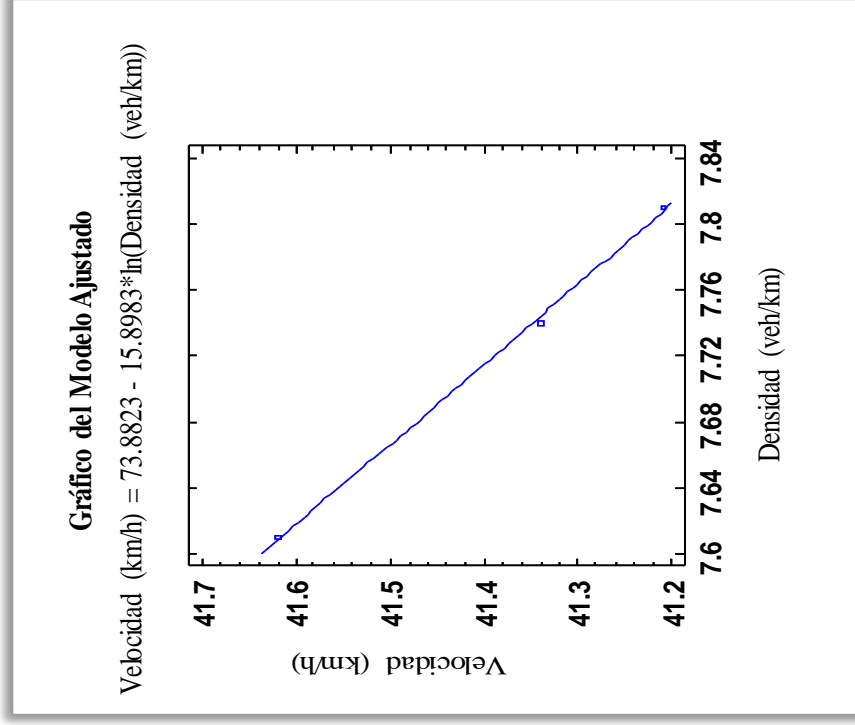
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.7774 por ciento

Error estándar del est. = 0.00988448

Error absoluto medio = 0.00529844

Estadístico Durbin-Watson = 2.93951 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.646503



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1.1 Statgraphics relación exponencial de las variables - carril de entrada - punto 1

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Exponencial:  $Y = \exp(a + b * X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	4.108	0.01	300.99	0.0021
Pendiente	-0.050	0.00	-28.18	0.0226

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0001	1.00	0.00005	793.91	0.023
Residuo	0.0000	1.00	0.00000		
Total (Corr.)	0.0001	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999371

R-cuadrada = 99.8742 por ciento

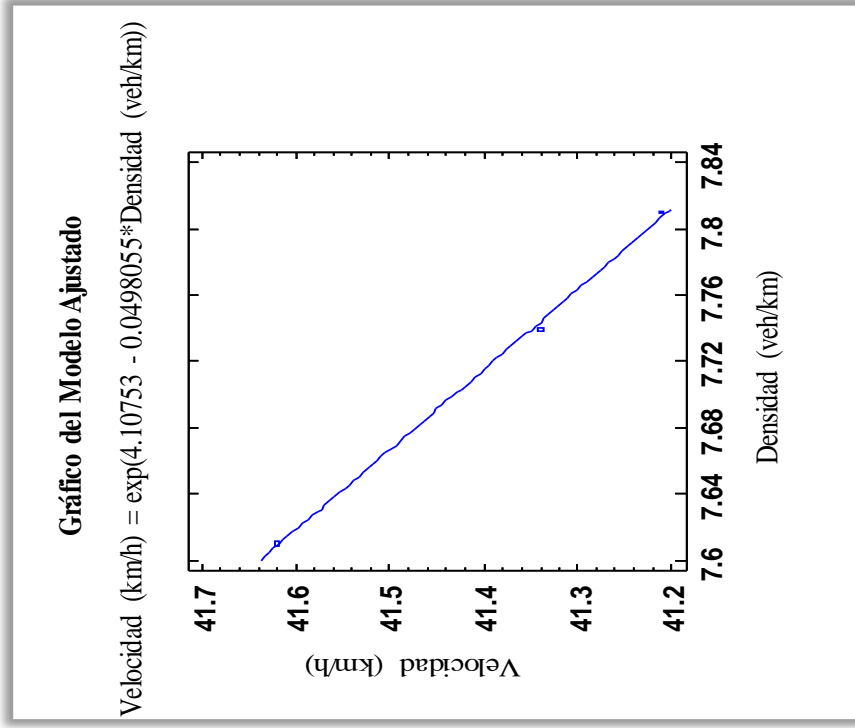
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.7484 por ciento

Error estándar del est. = 0.000253703

Error absoluto medio = 0.000136072

Estadístico Durbin-Watson = 2.94175 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.647249



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12 Statgraphics relación lineal de las variables - Carril de salida - Punto 1

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Lineal:  $Y = a + b \cdot X$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	60.942	0.59	103.81	0.0061
Pendiente	-2.605	0.08	-32.33	0.0197

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2.1004	1.00	2.1004	1045.33	0.020
Residuo	0.0020	1.00	0.0020		
Total (Corr.)	2.1024	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999522

R-cuadrada = 99.9044 por ciento

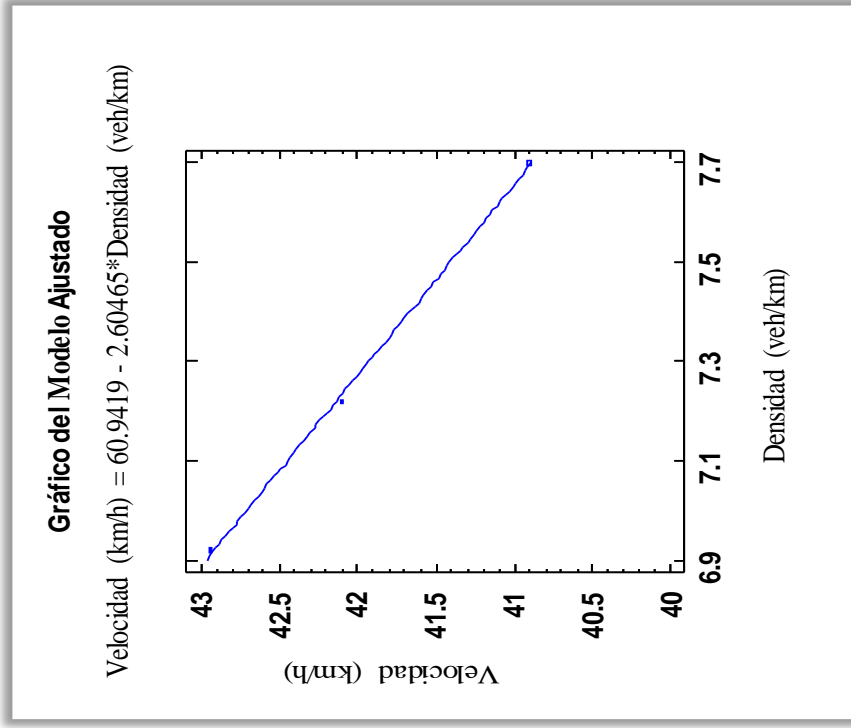
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.8089 por ciento

Error estándar del est. = 0.0448252

Error absoluto medio = 0.024186

Estadístico Durbin-Watson = 1.74419 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.248062



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.13 Statgraphics relación logarítmico de las variables - carril de salida - punto 1

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Log-X:  $Y = a + b \cdot \ln(X)$

**Coefficientes**

Parámetro	Mínimos cuadrados	Estándar Error	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	79.804	0.62	128.29	0.0050
Pendiente	-19.063	0.31	-60.82	0.0105

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2.1018	1.00	2.1018	3699.11	0.011
Residuo	0.0006	1.00	0.0006		
Total (Corr.)	2.1024	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999865

R-cuadrada = 99.973 por ciento

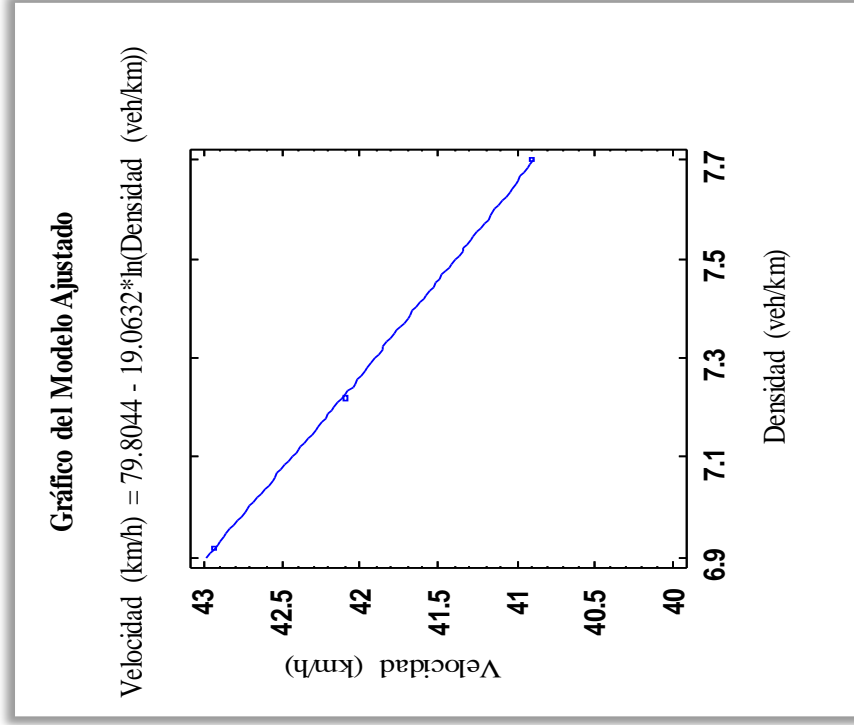
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9459 por ciento

Error estándar del est. = 0.0238369

Error absoluto medio = 0.012885

Estadístico Durbin-Watson = 1.7163 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.238767



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14 Statgraphics relación exponencial de las variables - Carril de salida - Punto 1

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Exponencial:  $Y = \exp(a + b * X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	4.190	0.01	381.77	0.0017
Pendiente	-0.062	0.00	-41.30	0.0154

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0012	1.00	0.00120	1705.81	0.015
Residuo	0.0000	1.00	0.00000		
Total (Corr.)	0.0012	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999707

R-cuadrada = 99.9414 por ciento

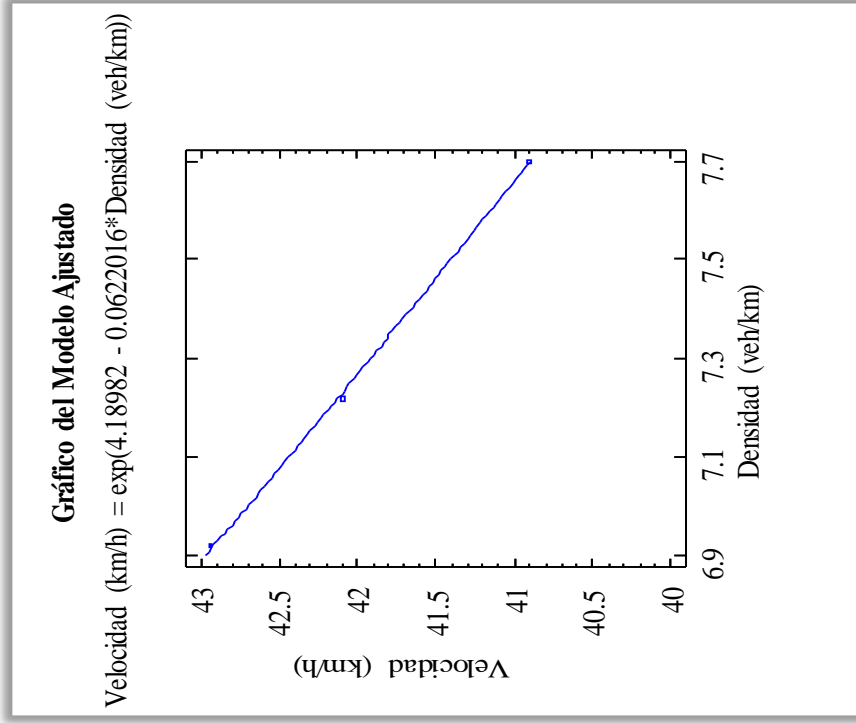
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.8828 por ciento

Error estándar del est. = 0.000837985

Error absoluto medio = 0.000452146

Estadístico Durbin-Watson = 1.74419 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.248062



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15 Statgraphics relación lineal de las variables - carril de salida - punto 2

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Lineal:  $Y = a + b * X$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	57.460	0.44	130.12	0.0049
Pendiente	-1.722	0.05	-33.65	0.0189

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.3278	1.00	0.3278	1132.41	0.019
Residuo	0.0003	1.00	0.0003		
Total (Corr.)	0.3281	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999559

R-cuadrada = 99.9118 por ciento

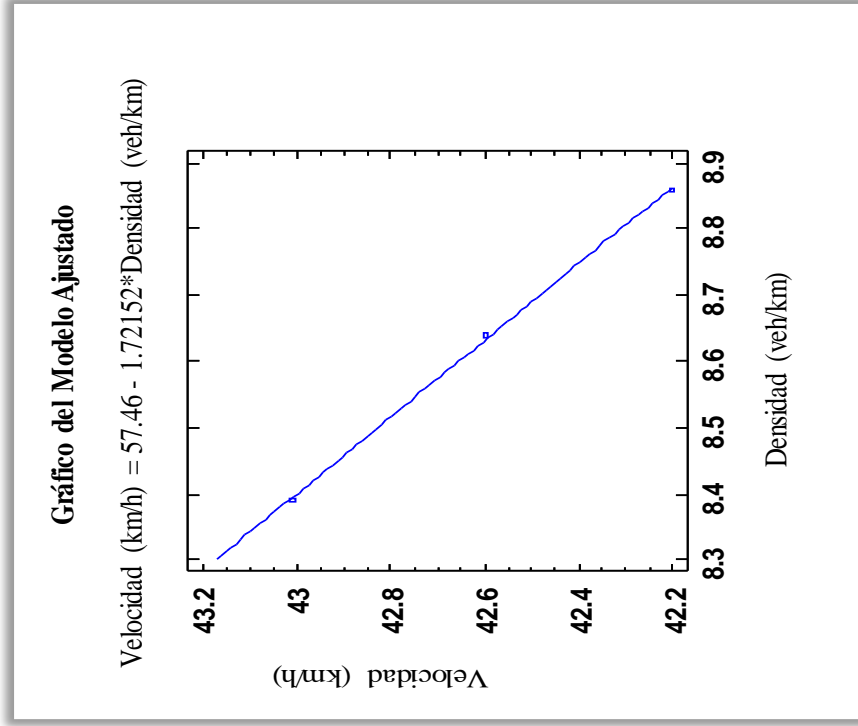
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.8235 por ciento

Error estándar del est. = 0.0170133

Error absoluto medio = 0.00925457

Estadístico Durbin-Watson = 1.43761 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.145871



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16 Statgraphics relación logarítmico de las variables - carril de salida - punto 2

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Log-X:  $Y = a + b \cdot \ln(X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	74.574	1.20	62.14	0.0102
Pendiente	-14.836	0.56	-26.64	0.0239

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.3276	1.00	0.3276	709.69	0.024
Residuo	0.0005	1.00	0.0005		
Total (Corr.)	0.3281	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999296

R-cuadrada = 99.8593 por ciento

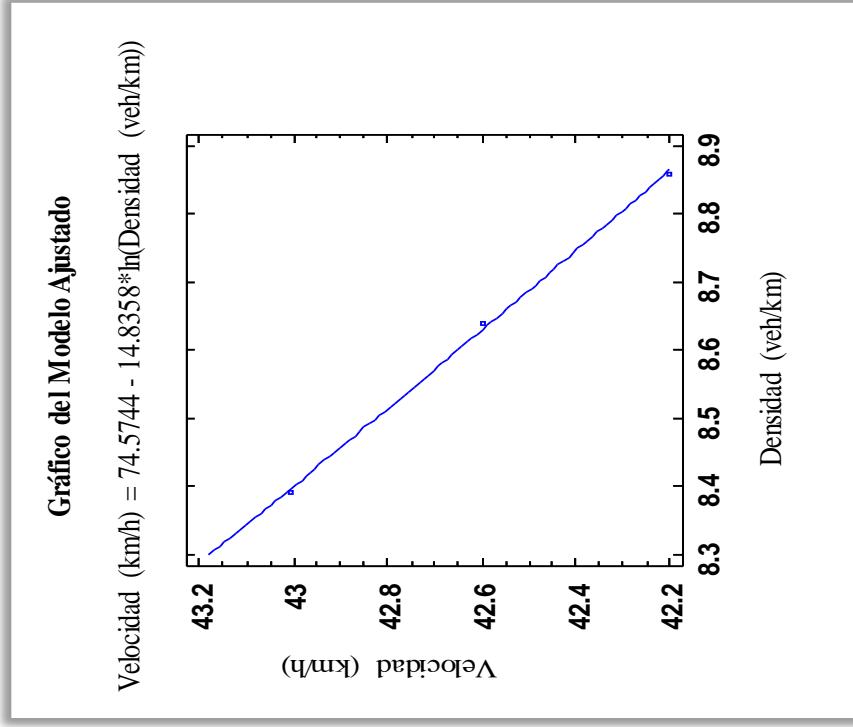
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.7186 por ciento

Error estándar del est. = 0.0214853

Error absoluto medio = 0.0116835

Estadístico Durbin-Watson = 1.42476 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.141588



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17 Statgraphics relación exponencial de las variables - carril de salida - punto 2

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Exponencial:  $Y = \exp(a + b * X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	Valor-P
Parámetro	Estimado	Error	T	
Intercepto	4.101	0.01	362.17	0.0018
Pendiente	-0.040	0.00	-30.80	0.0207

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0002	1.00	0.00018	948.90	0.021
Residuo	0.0000	1.00	0.00000		
Total (Corr.)	0.0002	2.00			

R-cuadrada = 99.8947 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.7895 por ciento

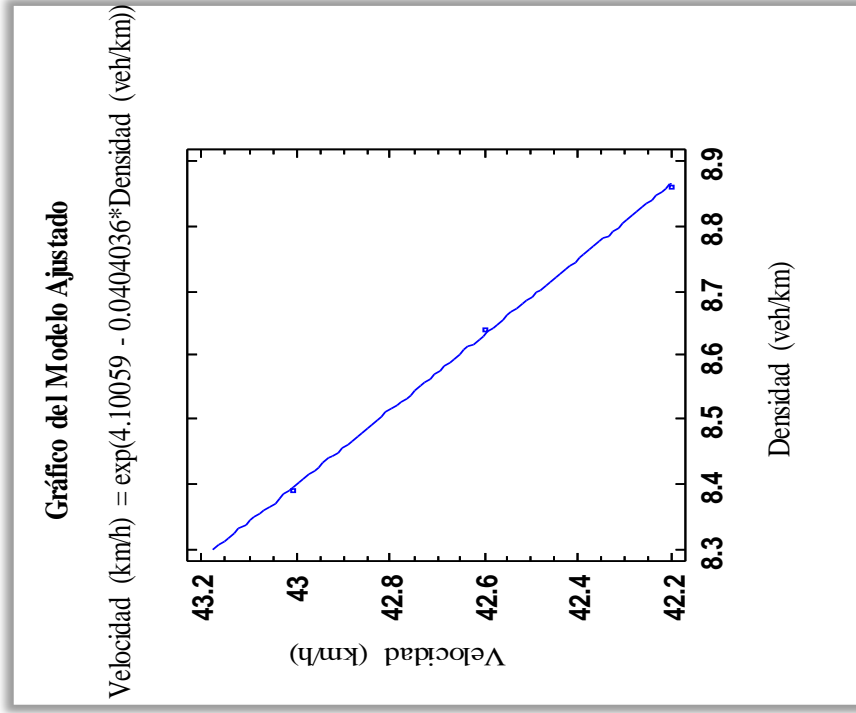
Error estándar del est. = 0.000436202

Error ab Coeficiente de Correlación = -0.999473

solutio medio = 0.000237277

Estadístico Durbin-Watson = 1.43761 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.145871



Fuente: Elaboración propia



Tabla 3.18 Statgraphics relación lineal de las variables - carril de salida - punto 4

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Lineal:  $Y = a + b \cdot X$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	63.141	0.98	64.53	0.0099
Pendiente	-2.928	0.15	-19.47	0.0327

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.6386	1.00	0.6386	379.05	0.033
Residuo	0.0017	1.00	0.0017		
Total (Corr.)	0.6403	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.998684

R-cuadrada = 99.7369 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.4738 por ciento

Error estándar del est. = 0.041045

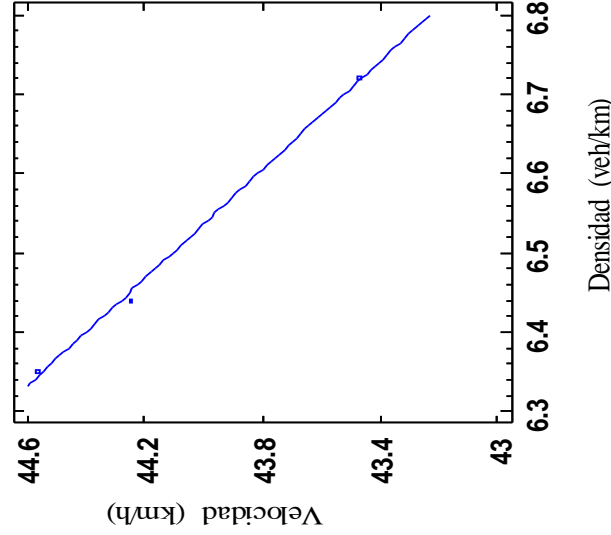
Error absoluto medio = 0.0214205

Estadístico Durbin-Watson = 2.05282 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.35094

**Gráfico del Modelo Ajustado**

Velocidad (km/h) =  $63.1409 - 2.92838 \cdot \text{Densidad (veh/km)}$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19 Statgraphics relación logarítmico de las variables - carril de salida - punto 4

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Log-X:  $Y = a + b \cdot \ln(X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	79.981	1.64	48.71	0.0131
Pendiente	-19.169	0.88	-21.86	0.0291

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.6389	1.00	0.6389	477.67	0.029
Residuo	0.0013	1.00	0.0013		
Total (Corr.)	0.6403	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.998955

R-cuadrada = 99.7911 por ciento

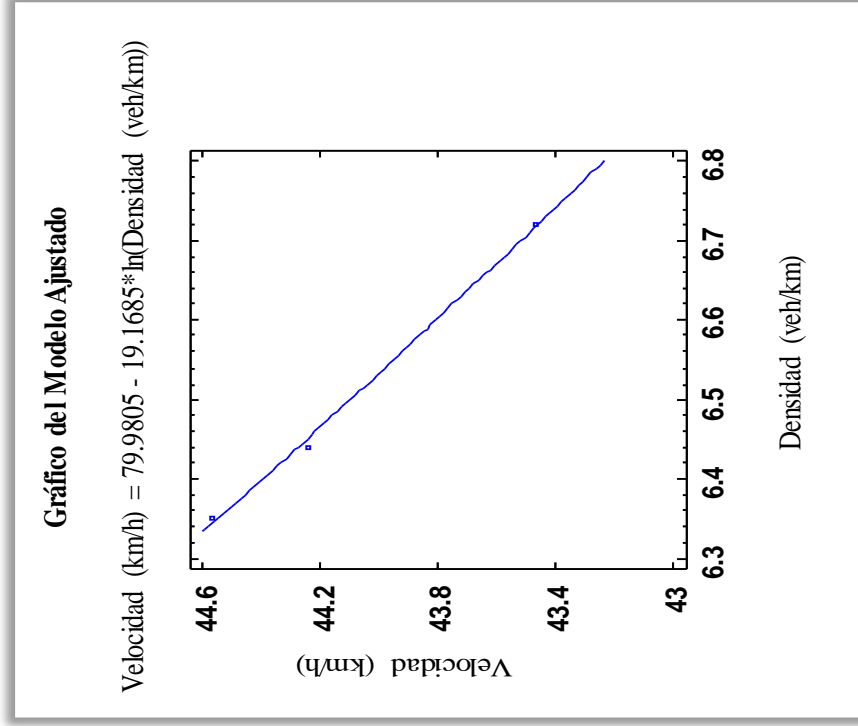
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.5822 por ciento

Error estándar del est. = 0.0365732

Error absoluto medio = 0.0191181

Estadístico Durbin-Watson = 2.04164 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.347214



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20 Statgraphics relación exponencial de las variables - carril de salida - punto 4

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Exponencial:  $Y = \exp(a + b * X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	4.219	0.02	200.63	0.0032
Pendiente	-0.067	0.00	-20.59	0.0309

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0003	1.00	0.00033	424.15	0.031
Residuo	0.0000	1.00	0.00000		
Total (Corr.)	0.0003	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.998823

R-cuadrada = 99.7648 por ciento

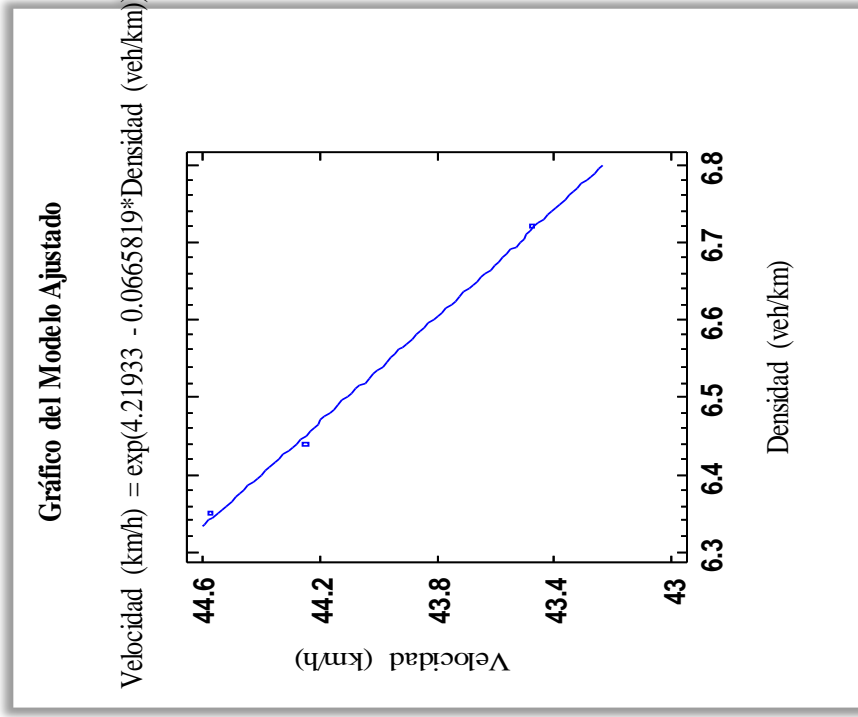
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.5296 por ciento

Error estándar del est. = 0.00088222

Error absoluto medio = 0.000460411

Estadístico Durbin-Watson = 2.05282 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.35094



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21 Statgraphics relación lineal de las variables - carril de entrada - punto 5

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Lineal:  $Y = a + b * X$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	57.402	0.20	282.04	0.0023
Pendiente	-1.837	0.03	-72.08	0.0088

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.4052	1.00	0.4052	5195.76	0.009
Residuo	0.0001	1.00	0.0001		
Total (Corr.)	0.4053	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999904

R-cuadrada = 99.9808 por ciento

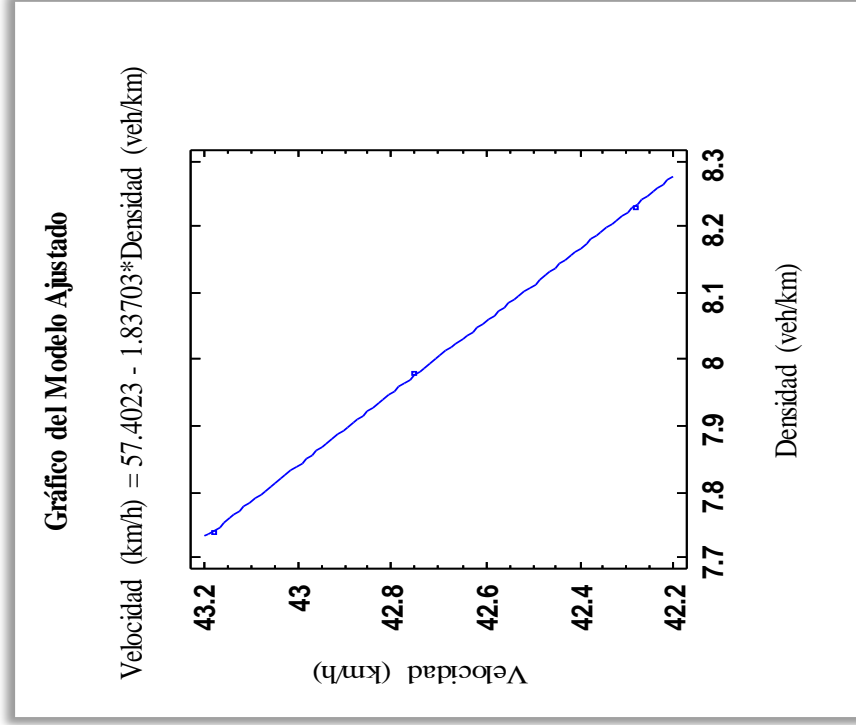
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9615 por ciento

Error estándar del est. = 0.00883088

Error absoluto medio = 0.00480659

Estadístico Durbin-Watson = 1.47973 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.159911



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.22 Statgraphics relación logarítmico de las variables - carril de entrada - punto 5

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Log- X:  $Y = a + b \cdot \ln(X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	73.192	0.69	105.70	0.0060
Pendiente	-14.663	0.33	-43.99	0.0145

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.4051	1.00	0.4051	1934.80	0.015
Residuo	0.0002	1.00	0.0002		
Total (Corr.)	0.4053	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999742

R-cuadrada = 99.9483 por ciento

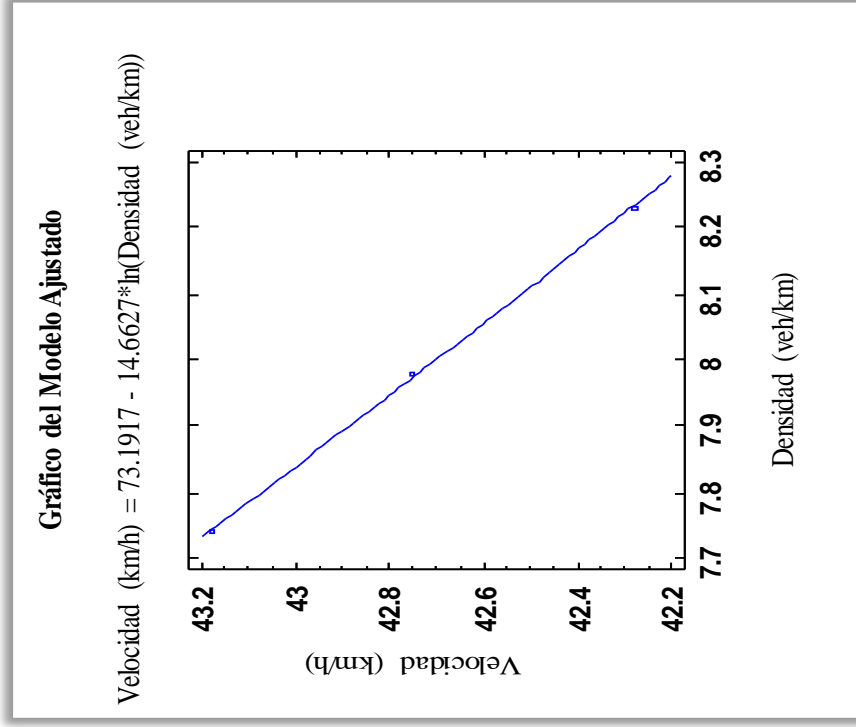
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.8967 por ciento

Error estándar del est. = 0.0144691

Error absoluto medio = 0.00787593

Estadístico Durbin-Watson = 1.49494 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.164981



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.23 Statgraphics relación exponencial de las variables - carril de entrada - punto 5

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Exponencial:  $Y = \exp(a + b * X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	4.098	0.01	706.08	0.0009
Pendiente	-0.043	0.00	-59.15	0.0108

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0002	1.00	0.00022	3499.27	0.011
Residuo	0.0000	1.00	0.00000		
Total (Corr.)	0.0002	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999857

R-cuadrada = 99.9714 por ciento

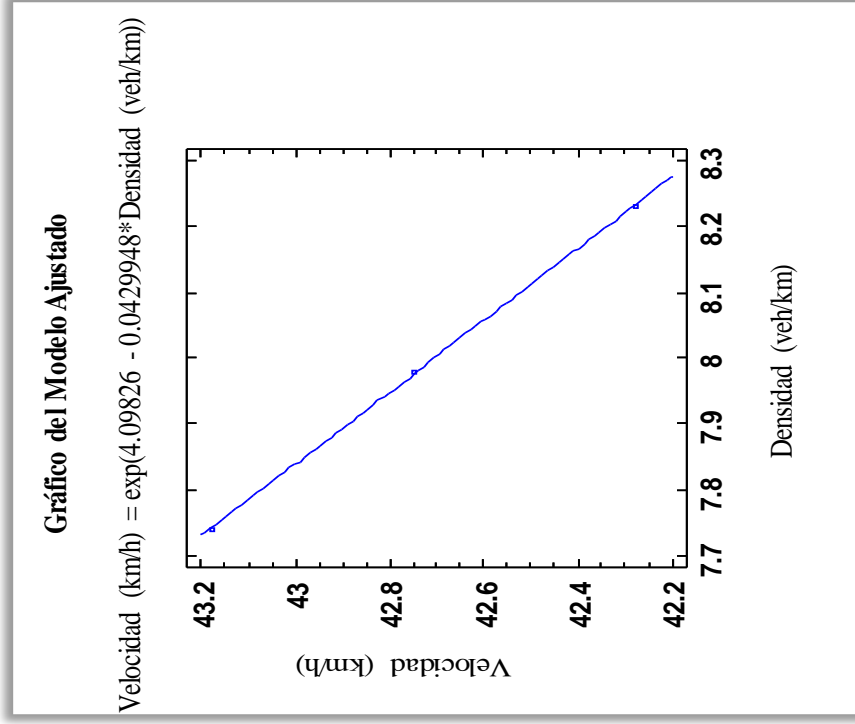
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9429 por ciento

Error estándar del est. = 0.000251848

Error absoluto medio = 0.000137079

Estadístico Durbin-Watson = 1.47973 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.159911



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.24 Statgraphics relación lineal de las variables - carril de salida - punto 5

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Lineal:  $Y = a + b * X$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	58.706	1.85	31.78	0.0200
Pendiente	-2.272	0.25	-8.95	0.0709

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.6266	1.00	0.6266	80.03	0.071
Residuo	0.0078	1.00	0.0078		
Total (Corr.)	0.6344	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.99381

R-cuadrada = 98.7658 por ciento

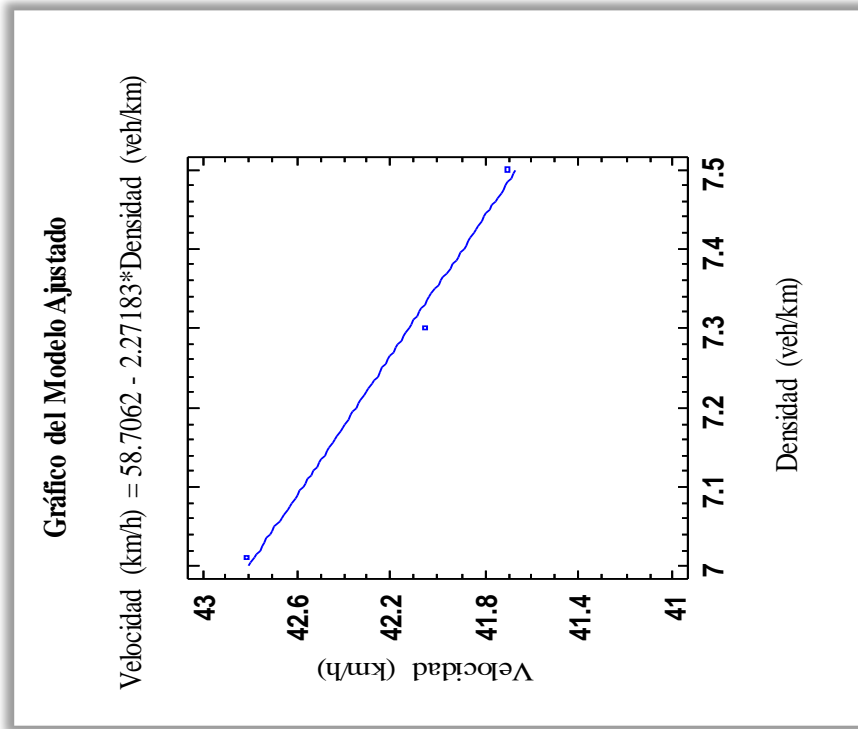
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97.5316 por ciento

Error estándar del est. = 0.0884853

Error absoluto medio = 0.0478968

Estadístico Durbin-Watson = 2.97776 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.659253



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.25 Statgraphics relación logarítmico de las variables - carril de salida - punto 5

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Log-X:  $Y = a + b \cdot \ln(X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	74.867	3.35	22.37	0.0284
Pendiente	-16.475	1.69	-9.76	0.0650

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.6278	1.00	0.6278	95.35	0.065
Residuo	0.0066	1.00	0.0066		
Total (Corr.)	0.6344	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.994797

R-cuadrada = 98.9621 por ciento

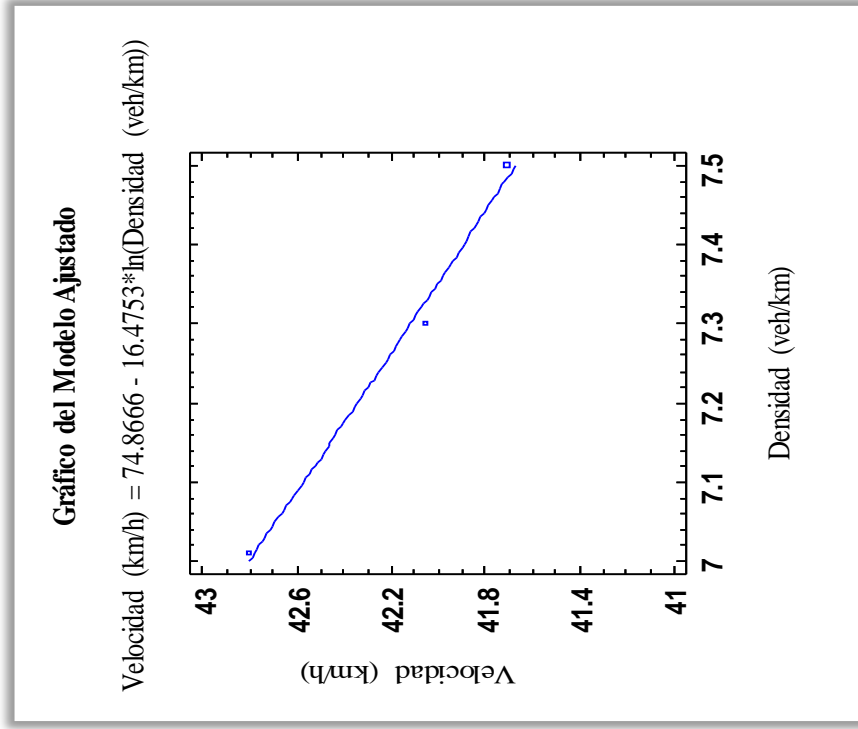
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97.9242 por ciento

Error estándar del est. = 0.0811447

Error absoluto medio = 0.0438783

Estadístico Durbin-Watson = 2.9737 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.657901



Fuente: Elaboración propia



Tabla 3.26 Statgraphics relación exponencial de las variables - carril de salida - punto 5

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Exponencial:  $Y = \exp(a + b * X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	4.133	0.04	97.30	0.0065
Pendiente	-0.054	0.01	-9.20	0.0689

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0004	1.00	0.00035	84.67	0.069
Residuo	0.0000	1.00	0.00000		
Total (Corr.)	0.0004	2.00			

Coefficiente de Correlación = -0.994147

R-cuadrada = 98.8327 por ciento

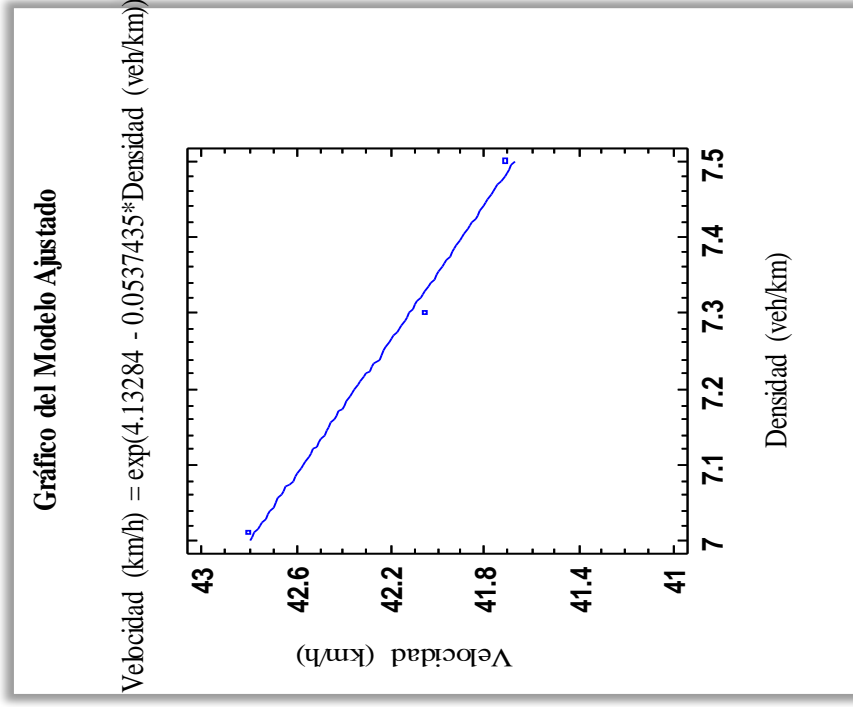
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97.6655 por ciento

Error estándar del est. = 0.00203501

Error absoluto medio = 0.00110154

Estadístico Durbin-Watson = 2.97776 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.659253



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.27 Statgraphics relación lineal de las variables - carril de entrada - punto 6

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Lineal:  $Y = a + b \cdot X$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	92.003	28.43	3.24	0.1908
Pendiente	-5.816	3.33	-1.75	0.3308

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0428	1.00	0.0428	3.06	0.331
Residuo	0.0140	1.00	0.0140		
Total (Corr.)	0.0569	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.867982

R-cuadrada = 75.3394 por ciento

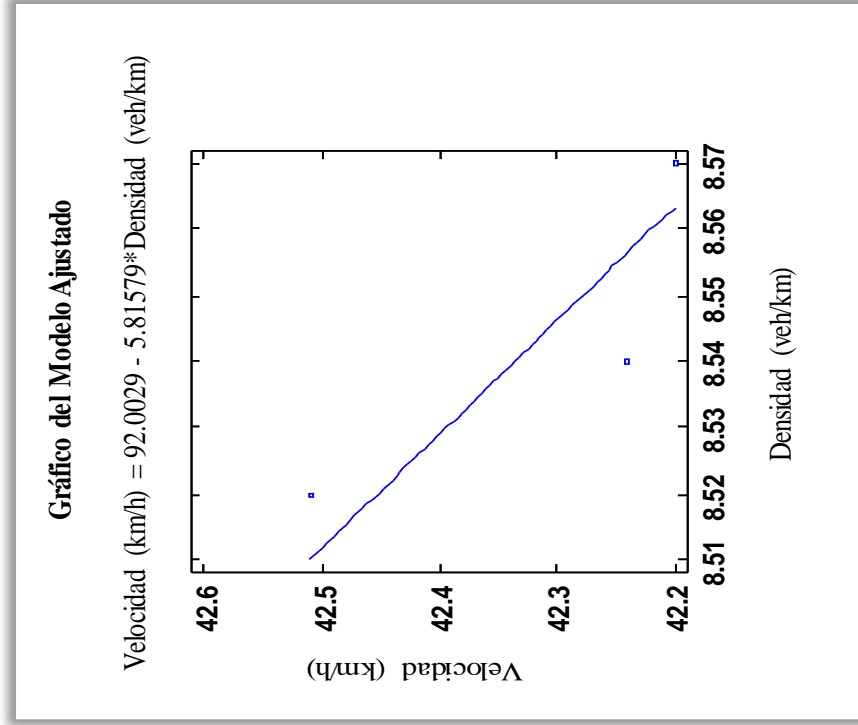
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 50.6787 por ciento

Error estándar del est. = 0.118422

Error absoluto medio = 0.0640351

Estadístico Durbin-Watson = 1.71053 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.236842



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.28 Statgraphics relación logarítmico de las variables - carril de entrada - punto 6

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Log-X:  $Y = a + b \cdot \ln(X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	148.980	60.91	2.45	0.2471
Pendiente	-49.723	28.40	-1.75	0.3303

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0429	1.00	0.0429	3.07	0.330
Residuo	0.0140	1.00	0.0140		
Total (Corr.)	0.0569	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.86838

R-cuadrada = 75.4083 por ciento

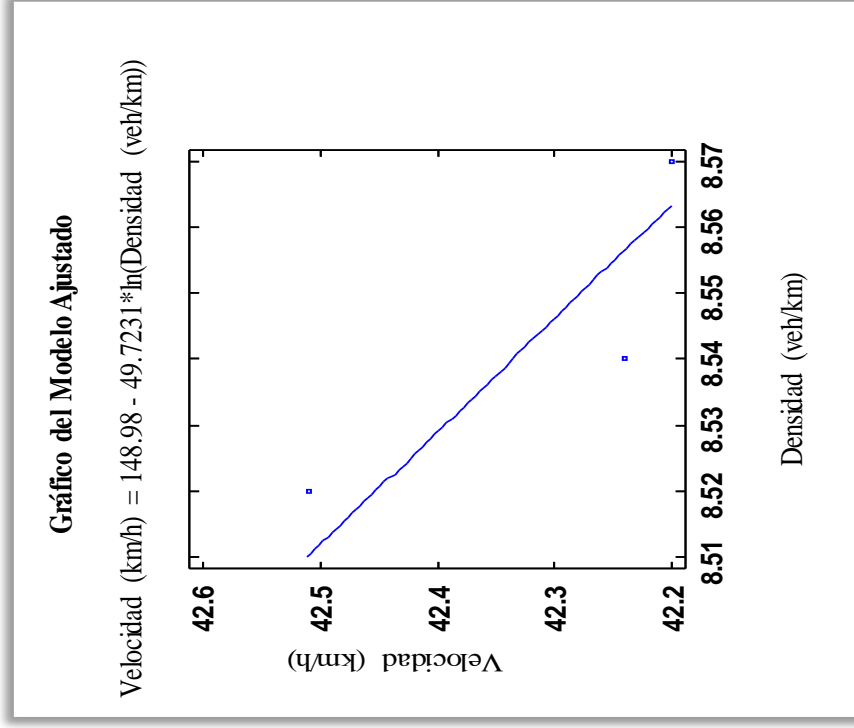
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 50.8167 por ciento

Error estándar del est. = 0.118256

Error absoluto medio = 0.0639514

Estadístico Durbin-Watson = 1.70899 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.236331



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.29 Statgraphics relación exponencial de las variables - carril de entrada - punto 6

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Exponencial:  $Y = \exp(a + b * X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	4.918	0.67	7.33	0.0863
Pendiente	-0.137	0.08	-1.75	0.3306

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.000024	1.00	0.00002	3.06	0.331
Residuo	0.000008	1.00	0.00001		
Total (Corr.)	0.000032	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999857

R-cuadrada = 99.9714 por ciento

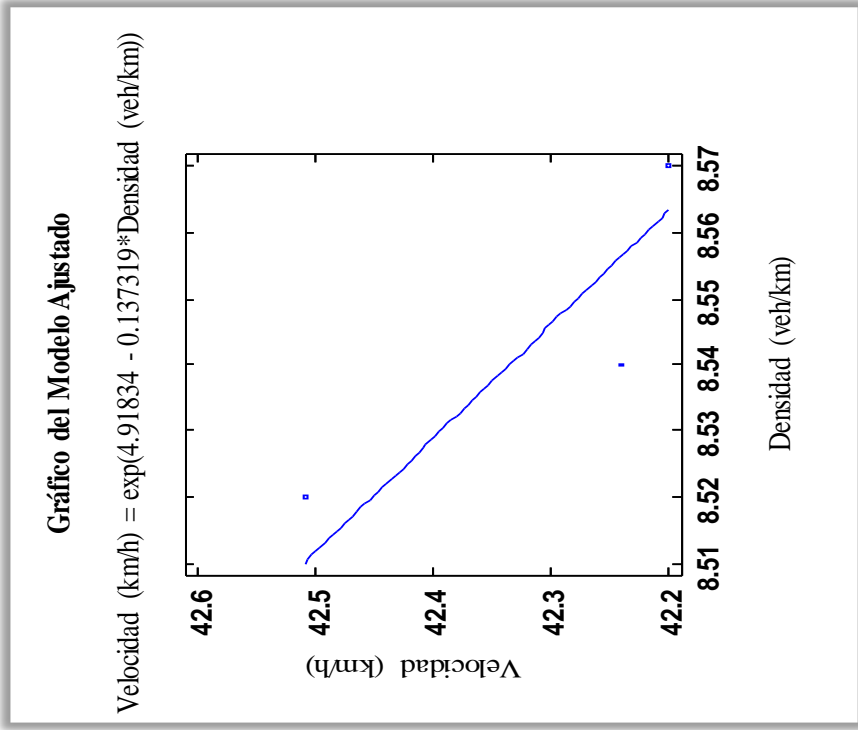
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9429 por ciento

Error estándar del est. = 0.000251848

Error absoluto medio = 0.000137079

Estadístico Durbin-Watson = 1.47973 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.159911



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.30 Statgraphics relación lineal de las variables - carril de entrada - punto 7

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Lineal:  $Y = a + b \cdot X$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	84.404	0.20	414.86	0.0015
Pendiente	-2.422	0.02	-101.05	0.0063

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1.9356	1.00	1.9356	10211.74	0.006
Residuo	0.0002	1.00	0.0002		
Total (Corr.)	1.9358	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999951

R-cuadrada = 99.9902 por ciento

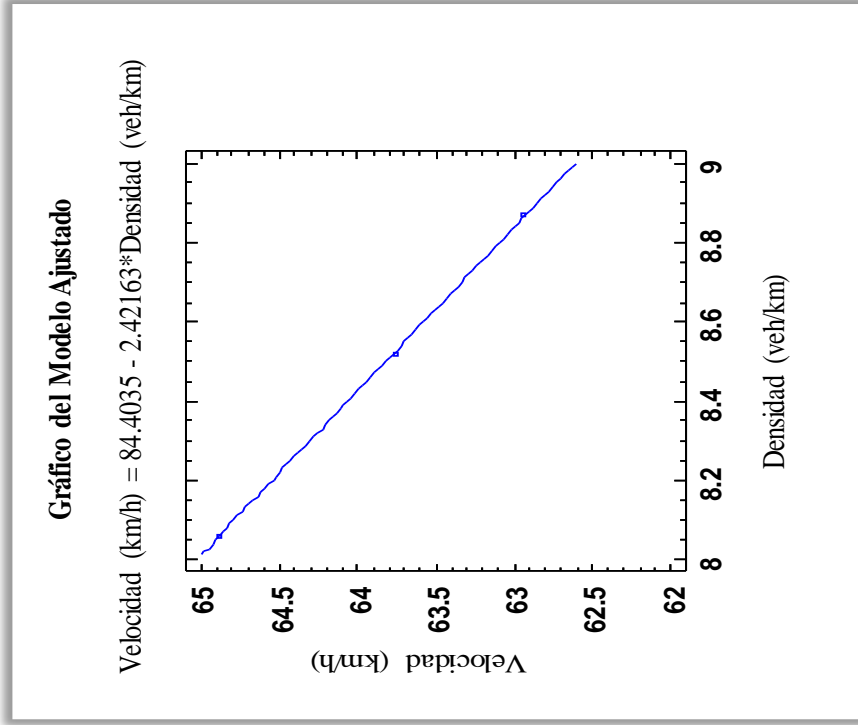
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9804 por ciento

Error estándar del est. = 0.0137676

Error absoluto medio = 0.00747122

Estadístico Durbin-Watson = 1.37114 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.123712



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.31 Statgraphics relación logarítmico de las variables - carril de entrada - punto 7

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Log-X:  $Y = a + b \cdot \ln(X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	107.592	0.15	700.71	0.0009
Pendiente	-20.461	0.07	-284.86	0.0022

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	1.9358	1.00	1.9358	81143.99	0.002
Residuo	0.0000	1.00	0.0000		
Total (Corr.)	1.9358	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.999994

R-cuadrada = 99.9988 por ciento

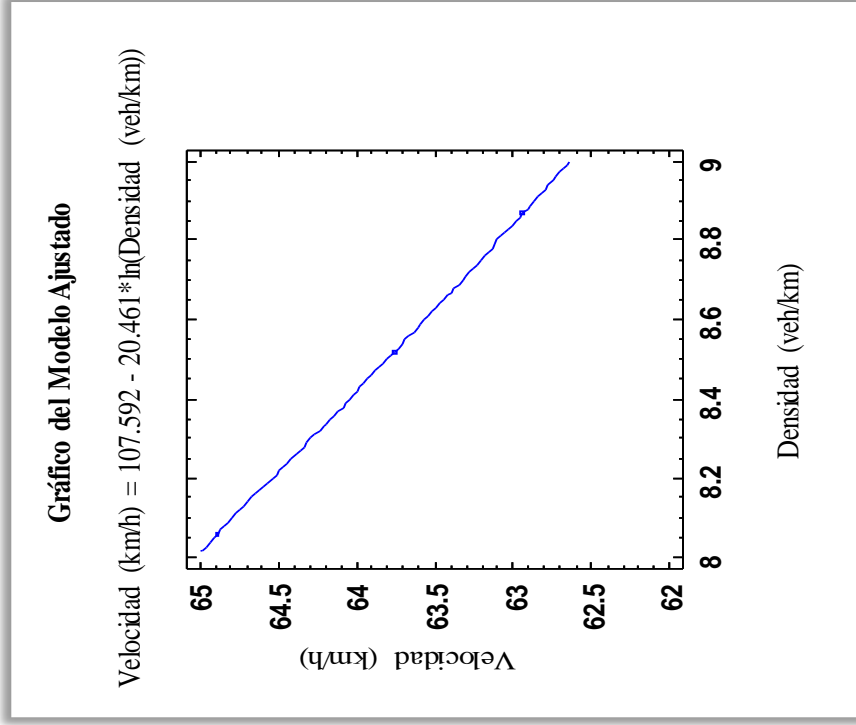
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9975 por ciento

Error estándar del est. = 0.00488427

Error absoluto medio = 0.0026475

Estadístico Durbin-Watson = 1.35052 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.11684



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.32 Statgraphics relación exponencial de las variables - carril de entrada - punto 7

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Exponencial:  $Y = \exp(a + b * X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	4.478	0.00	2487.43	0.0003
Pendiente	-0.038	0.00	-178.65	0.0036

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.00047	1.00	0.00047	31914.44	0.004
Residuo	0.00000	1.00	0.00000		
Total (Corr.)	0.00047	2.00			

Coefficiente de Correlación = -0.999984

R-cuadrada = 99.9969 por ciento

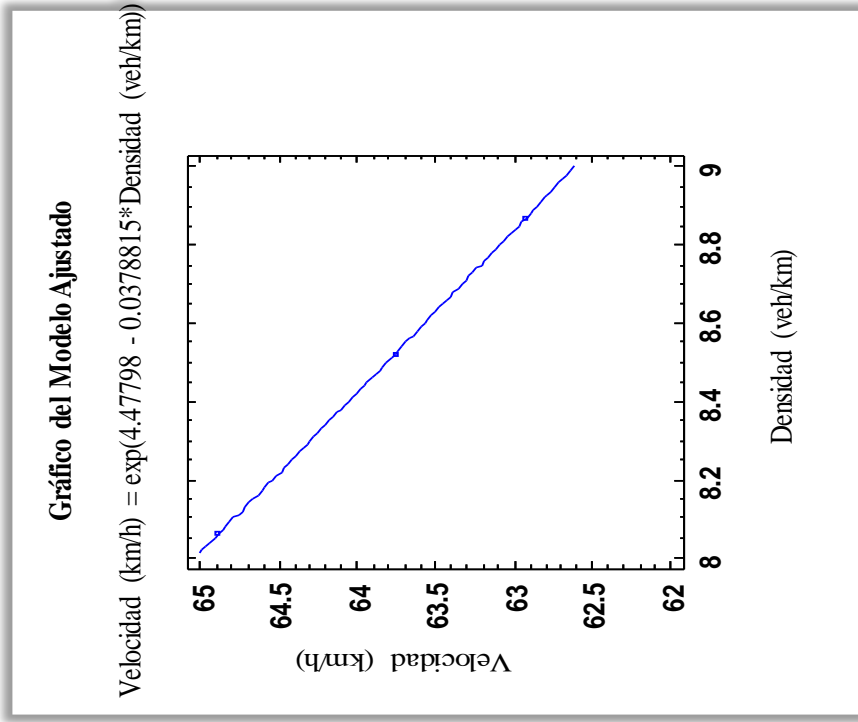
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 99.9937 por ciento

Error estándar del est. = 0.000121824

Error absoluto medio = 0.0000661099

Estadístico Durbin-Watson = 1.37114 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.123712



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.33 Statgraphics relación lineal de las variables - carril de salida - punto 7

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Lineal:  $Y = a + b \cdot X$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	82.816	3.93	21.08	0.0302
Pendiente	-2.312	0.49	-4.72	0.1329

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2.0696	1.00	2.0696	22.30	0.133
Residuo	0.0928	1.00	0.0928		
Total (Corr.)	2.1625	2.00			

Coefficiente de Correlación = -0.978301

R-cuadrada = 95.7073 por ciento

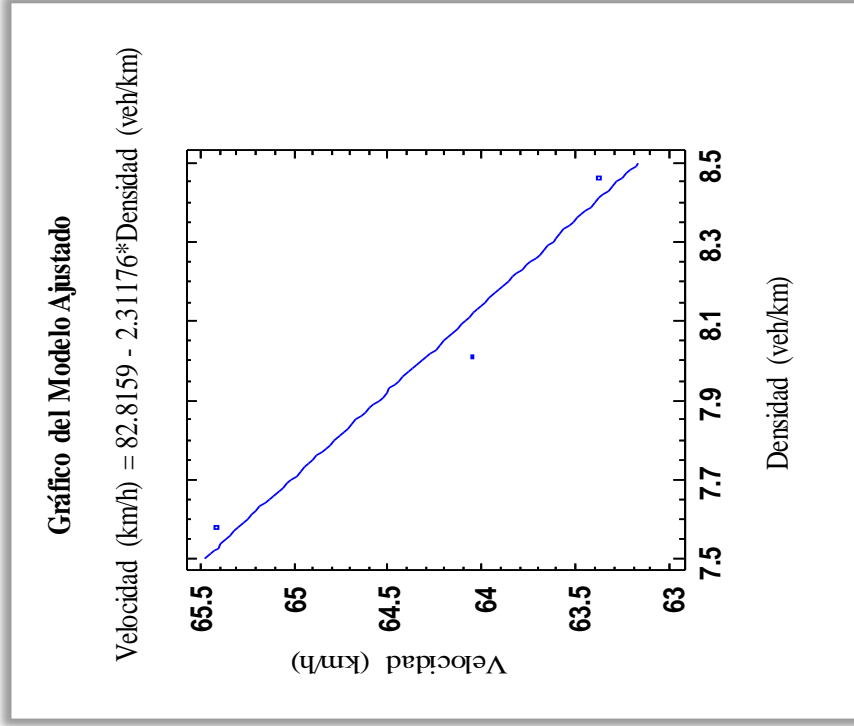
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 91.4147 por ciento

Error estándar del est. = 0.304675

Error absoluto medio = 0.16583

Estadístico Durbin-Watson = 1.5229 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.174299



Fuente: Elaboración propia



Tabla 3.34 Statgraphics relación logarítmico de las variables - carril de salida - punto 7

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Log-X:  $Y = a + b \cdot \ln(X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	102.946	7.55	13.63	0.0466
Pendiente	-18.583	3.63	-5.12	0.1228

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2.0830	1.00	2.0830	26.22	0.123
Residuo	0.0794	1.00	0.0794		
Total (Corr.)	2.1625	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.981462

R-cuadrada = 96.3268 por ciento

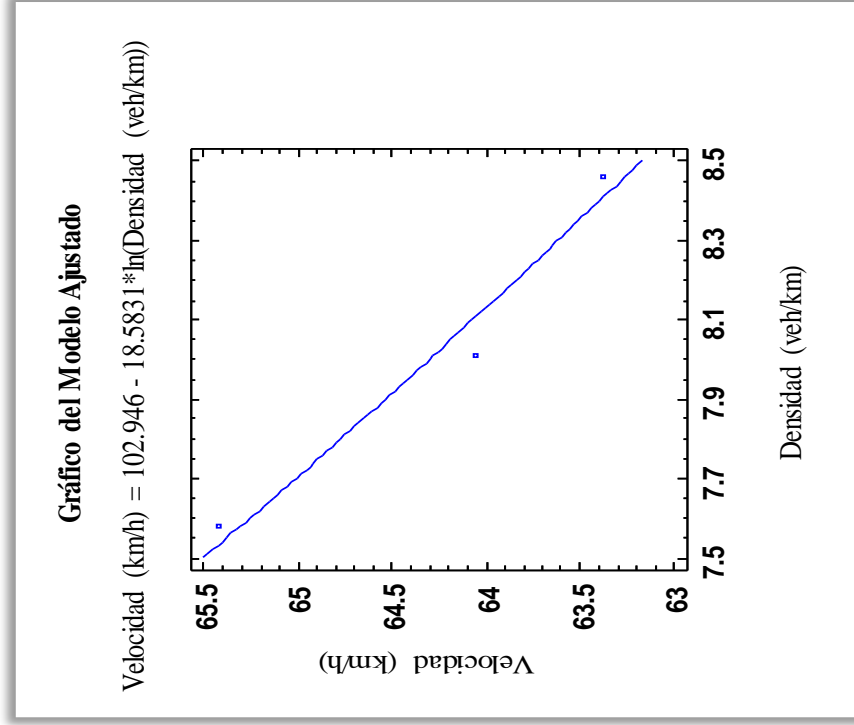
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92.6536 por ciento

Error estándar del est. = 0.281836

Error absoluto medio = 0.153412

Estadístico Durbin-Watson = 1.49528 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.165094



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.35 Statgraphics relación exponencial de las variables - carril de salida - punto 7

Regresión Simple - volumen vs. densidad

Variable dependiente: volumen ((km/hr))

Variable independiente: densidad ((veh/km))

Exponencial:  $Y = \exp(a + b * X)$

**Coefficientes**

	Mínimos cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	4.451	0.06	74.38	0.0086
Pendiente	-0.036	0.01	-4.81	0.1304

**Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.0005	1.00	0.00050	23.18	0.130
Residuo	0.0000	1.00	0.00002		
Total (Corr.)	0.0005	2.00			

Coefficiente de correlación = -0.979102

R-cuadrada = 95.864 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 91.728 por ciento

Error estándar del est. = 0.00464069

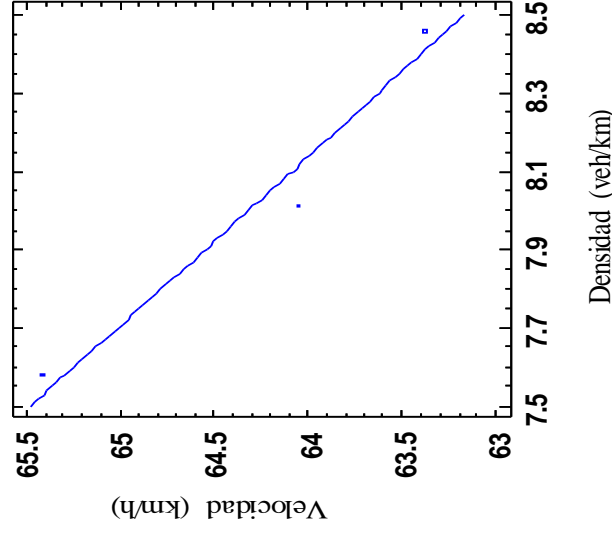
Error absoluto medio = 0.00252586

Estadístico Durbin-Watson = 1.5229 (P=)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.174299

**Gráfico del Modelo Ajustado**

Velocidad (km/h) =  $\exp(4.45103 - 0.0359018 * \text{Densidad (veh/km)})$



Fuente: Elaboración propia

### 3.6 DESARROLLO DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

El ajuste lineal se realizó de un análisis de regresión de la forma  $\bar{v}_e = a + b * k$ , equivalente a la forma original del modelo lineal  $\bar{v}_e = v_l - \frac{v_l}{k_c} k$ , donde el valor de a corresponde a  $v_l$ , y el valor de b corresponde a  $-v_l/k_c$ .

Para el ajuste logarítmico se realizó un análisis de regresión de la forma  $\bar{v}_e = a + b * \ln(k)$ , equivalente a la forma original del modelo logarítmico

$\bar{v}_e = v_m \ln\left(\frac{k_c}{k}\right)$ , donde el valor de a corresponde al producto  $v_m * \ln(k_c)$ , y el valor de b corresponde a  $-v_m$ .

El ajuste exponencial se desarrolló bajo un análisis de regresión de la siguiente forma

$\bar{v}_e = v_l e^{-\frac{k}{k_m}}$ , donde el valor de a corresponde a  $\ln(v_l)$ , y el valor de b corresponde a la relación  $-\frac{1}{k_m}$ .

Posterior de obtener los parámetros se aplicaron a las ecuaciones velocidad media espacial-densidad de los modelos, para determinar las gráficas de comportamiento para cada modelo.

Tabla 3.36 curvas velocidad media – densidad - punto 1 - carril de entrada

Modelo lineal de Greensields		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.81	41.33
11:00 - 12:00	7.74	41.47
18:00 - 19:00	7.61	41.74

$$\bar{v}_e = 57.32 - 2.06 * k$$

$$v_l = 57.32 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 28.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 57.32 - \frac{57.32}{28} * k$$

Modelo logarítmico de Greenberd		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.81	41.16
11:00 - 12:00	7.74	41.30
18:00 - 19:00	7.61	41.57

$$\bar{v}_e = 73.88 - 15.89 * \ln(k)$$

$$v_m = 15.89 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 104.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 15.89 * \ln\left(\frac{104}{k}\right)$$

Modelo exponencial de Underwood		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.81	41.12
11:00 - 12:00	7.74	41.27
18:00 - 19:00	7.61	41.54

$$\bar{v}_e = e^{(4.11 - 0.05 * k)}$$

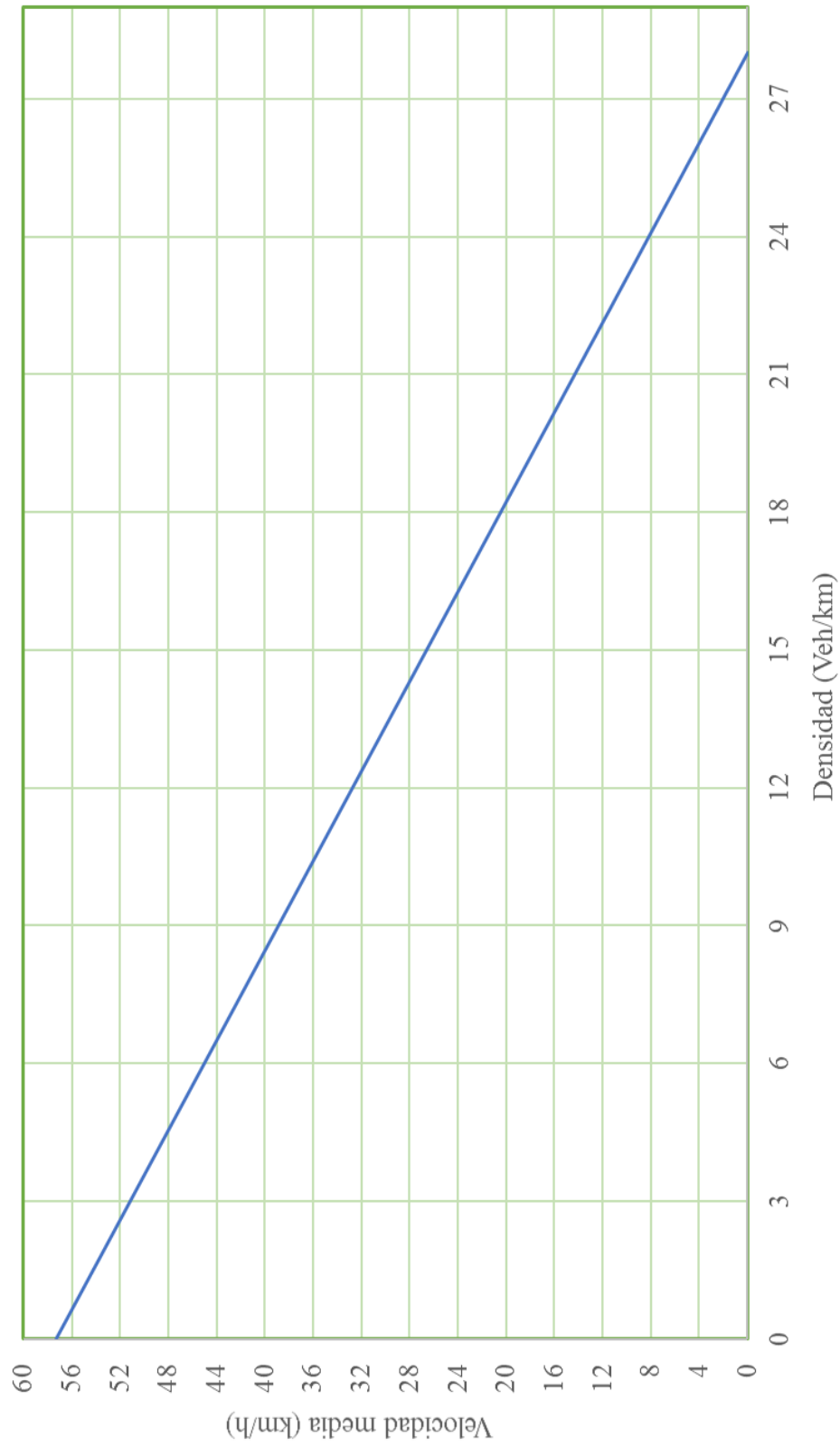
$$v_l = 60.77 \text{ (km/h)}$$

$$k_m = 20.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 60.77 * e^{-\frac{k}{20}}$$

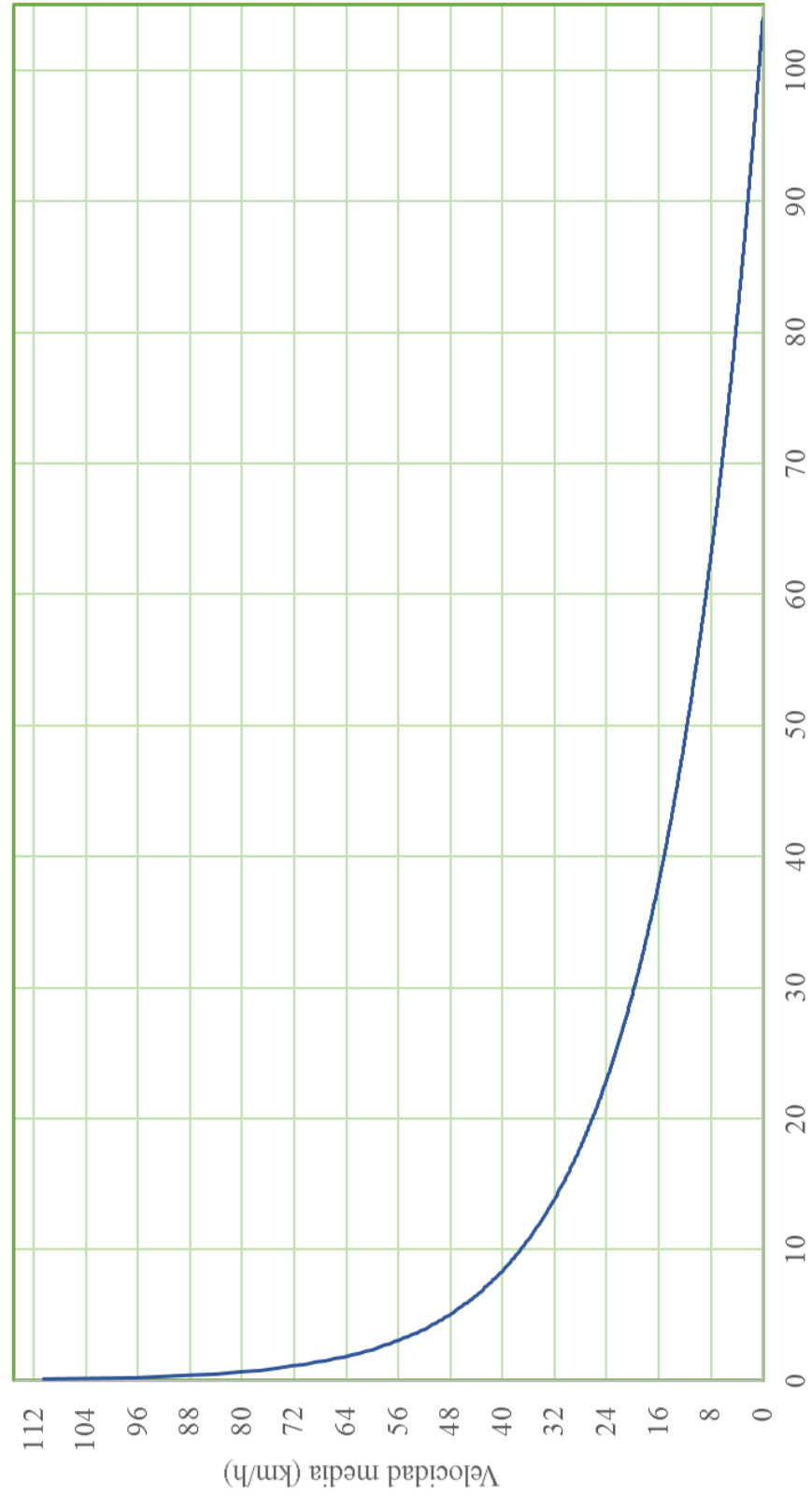
Fuente: Elaboración propia a partir del análisis con Statgraphics

Figura 3.1 modelo lineal  $v_e-k$  - punto 1 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 57.32 - 2.06 * k$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.2 modelo logarítmico ve-k - punto 1 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 73.88 - 15.89 \cdot \ln(k)$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.3 modelo exponencial ve-k - punto 1 - carril de entrada

$$\bar{v}_e = e^{((4.11 - 0.05 * k))}$$

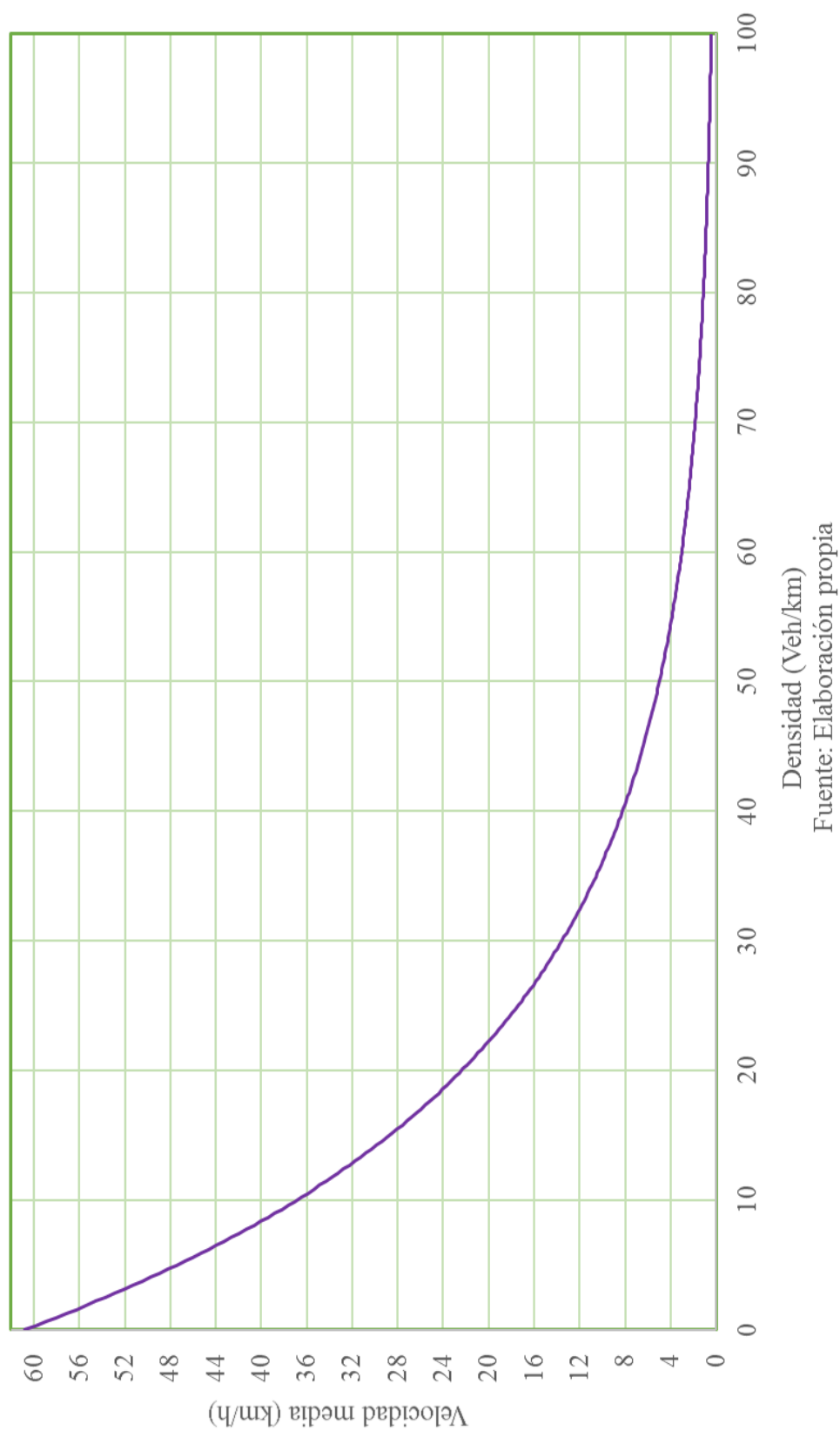


Tabla 3.37 curvas velocidad media – densidad - punto 1 - carril de salida

Modelo lineal de Greensields		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.22	41.81
11:00 - 12:00	6.92	42.61
18:00 - 19:00	7.70	40.54

$$\bar{v}_e = 60.94 - 2.61 * k$$

$$v_l = 60.94 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 23.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 60.94 - \frac{60.94}{23} * k$$
  

Modelo logarítmico de Greenberd		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.22	42.18
11:00 - 12:00	6.92	42.99
18:00 - 19:00	7.70	40.96

$$\bar{v}_e = 79.80 - 19.06 * \ln(k)$$

$$v_m = 19.06 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 66 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 19.06 * \ln\left(\frac{66}{k}\right)$$
  

Modelo exponencial de Underwood		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.22	42.02
11:00 - 12:00	6.92	42.81
18:00 - 19:00	7.70	40.78

$$\bar{v}_e = e^{(4.19 - 0.06 * k)}$$

$$v_l = 65.98 \text{ (km/h)}$$

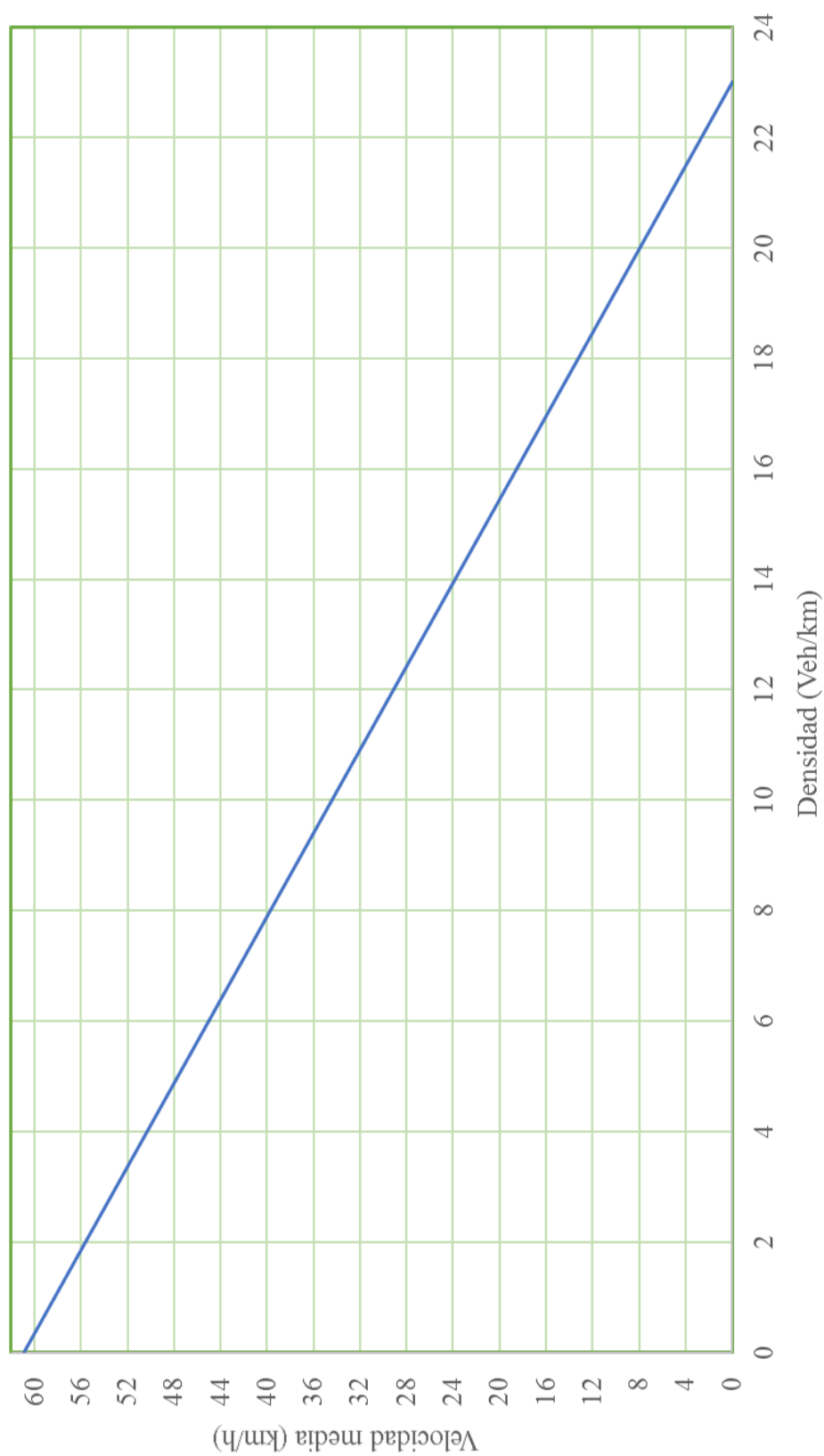
$$k_m = 16.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 65.98 * e^{-\frac{k}{16}}$$

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis con Statgraphics

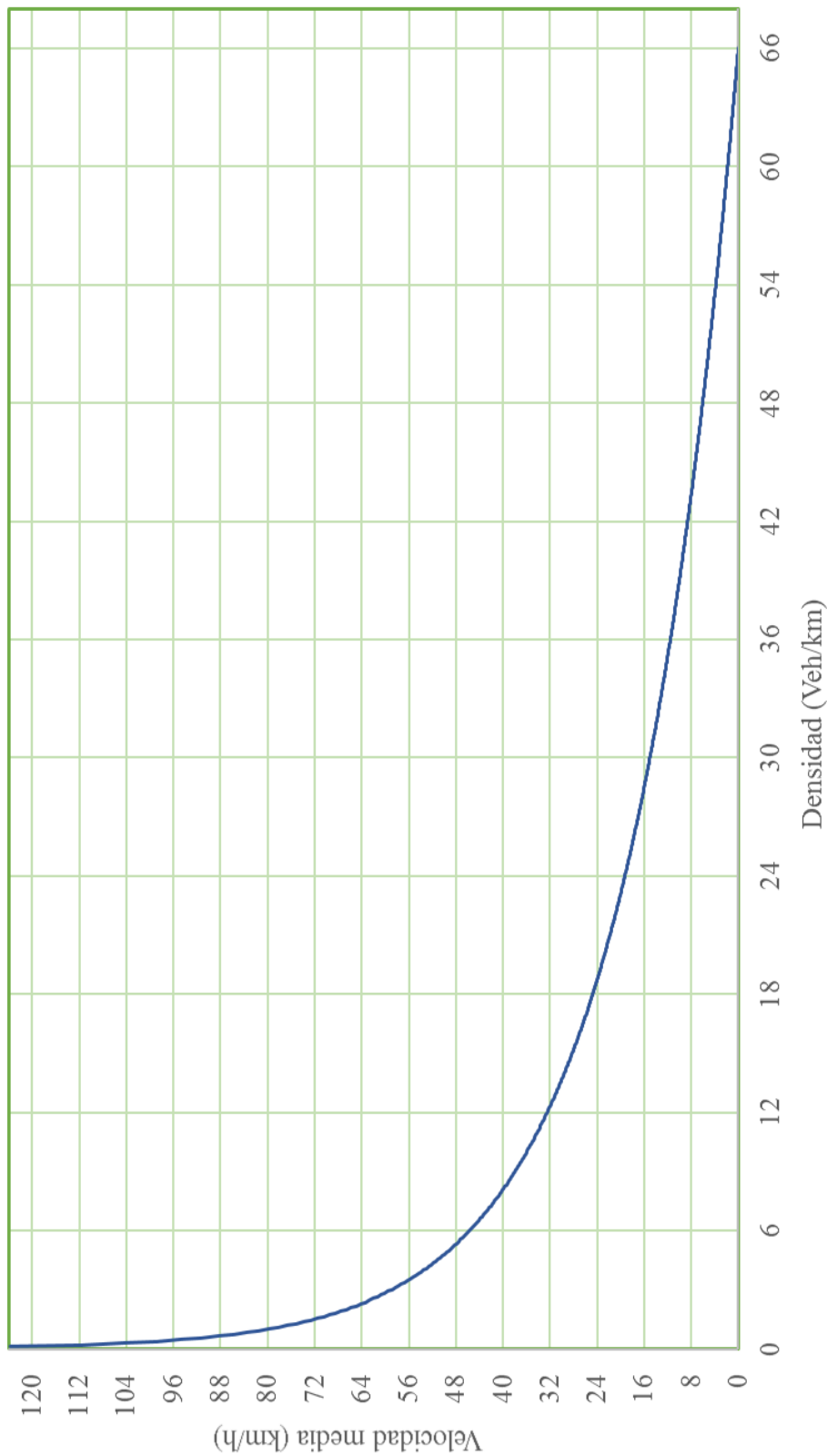


Figura 3.4 modelo lineal  $v_e-k$  - punto 1 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 60.94 - 2.61 * k$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.5 modelo logarítmico ve-k - punto 1 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 79.80 - 19.06 * \ln(k)$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.6 modelo exponencial ve-k - punto 1 - carril de salida

$$\bar{v}_e = e^{(4.19 - 0.06 * k)}$$

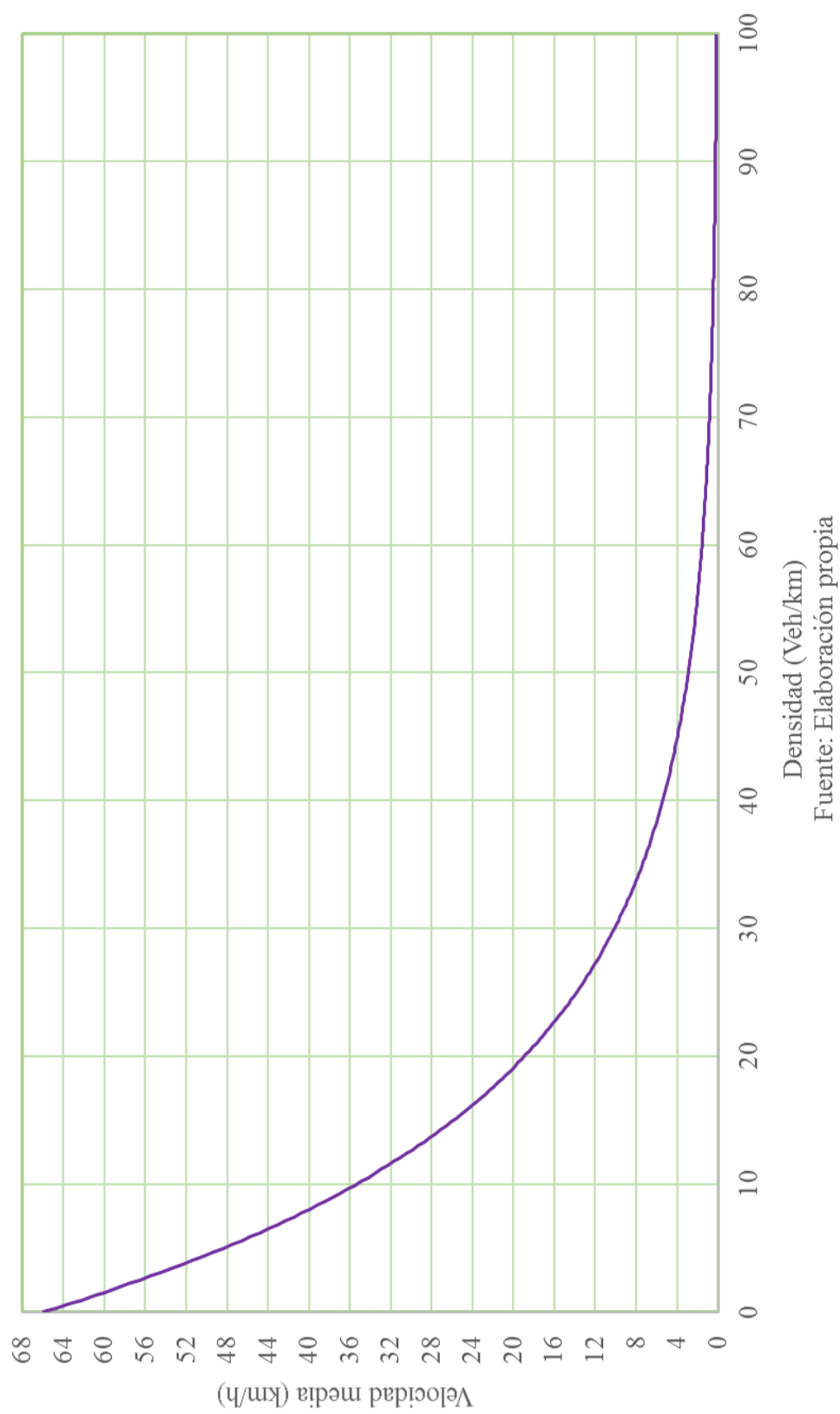


Tabla 3.38 curvas velocidad media – densidad – punto 2 - carril de salida

Modelo lineal de Greenslieds

Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.64	42.42
11:00 - 12:00	8.39	42.85
18:00 - 19:00	8.86	42.03

$$\bar{v}_e = 57.46 - 1.72 * k$$

$$v_l = 57.46 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 33.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 57.46 - \frac{57.46}{33} * k$$

Modelo logarítmico de Greenberd

Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.64	42.54
11:00 - 12:00	8.39	42.98
18:00 - 19:00	8.86	42.17

$$\bar{v}_e = 74.57 - 14.84 * \ln(k)$$

$$v_m = 14.84 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 152 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 14.84 * \ln\left(\frac{152}{k}\right)$$

Modelo exponencial de Underwood

Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.64	42.72
11:00 - 12:00	8.39	43.14
18:00 - 19:00	8.86	42.34

$$\bar{v}_e = e^{(4.10 - 0.04 * k)}$$

$$v_l = 60.35 \text{ (km/h)}$$

$$k_m = 25.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 60.35 * e^{-\frac{k}{25}}$$

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis con Statgraphics

Figura 3.7 modelo lineal  $v_e-k$  - punto 2 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 57.46 - 1.72 * k$

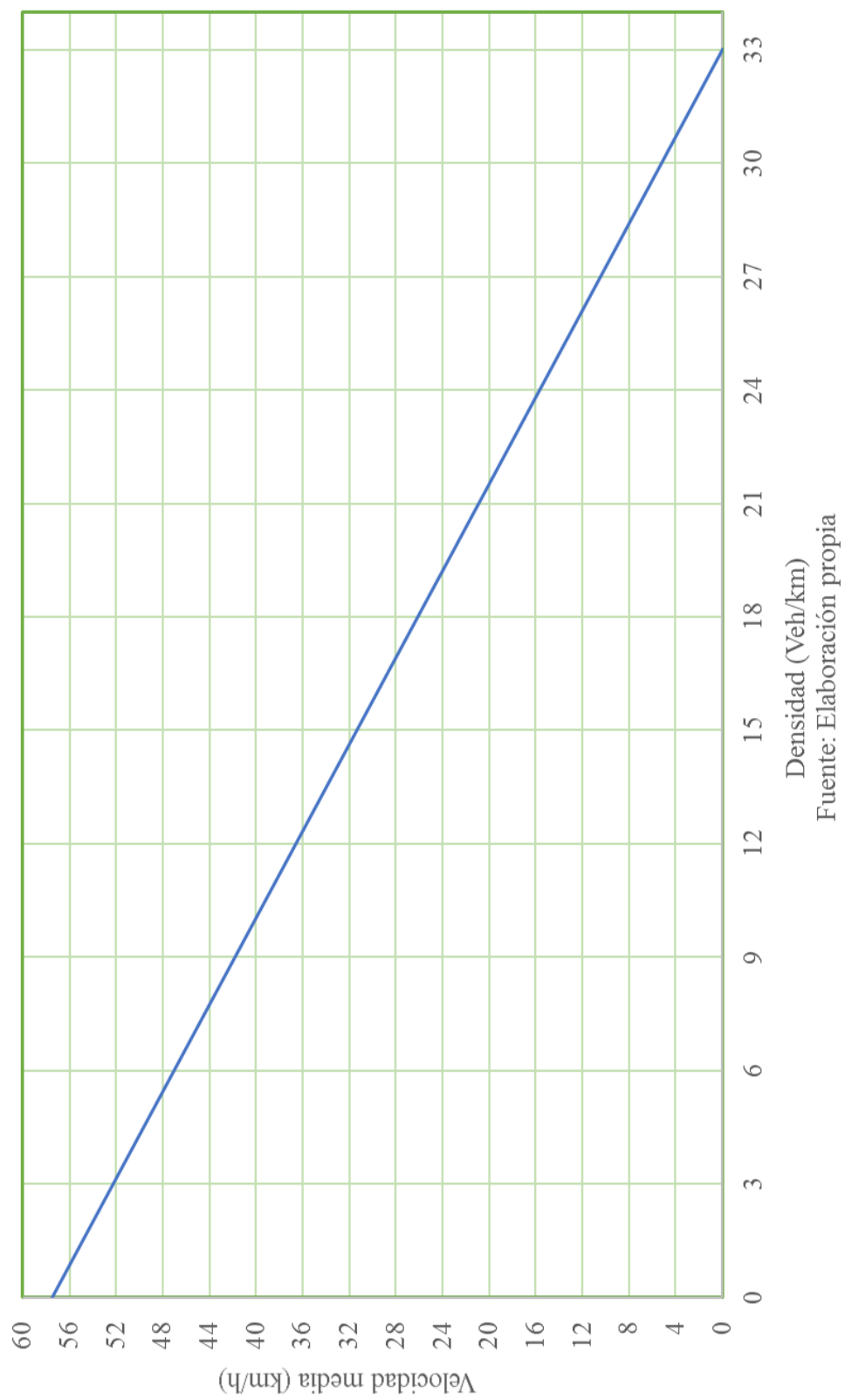
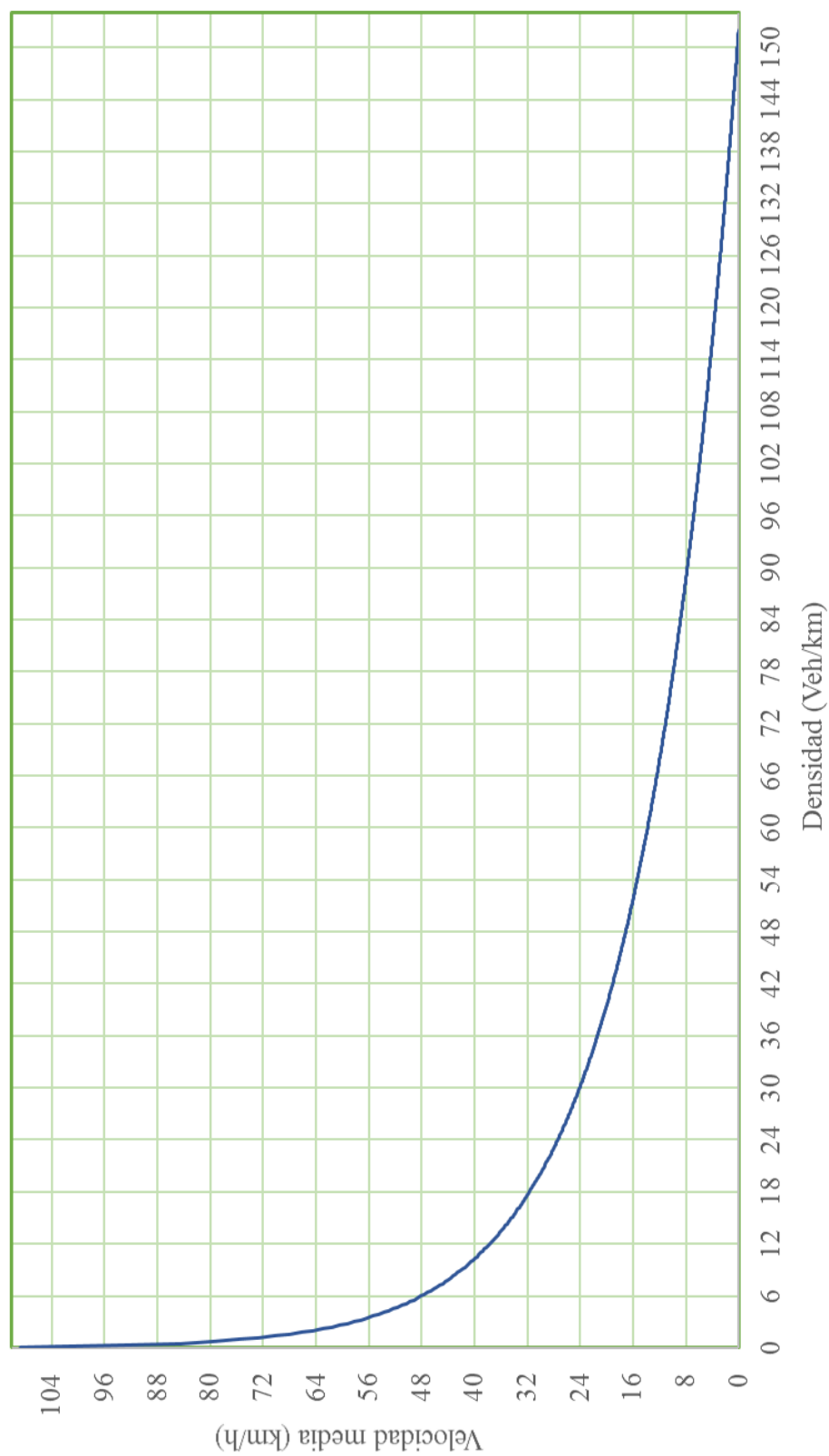


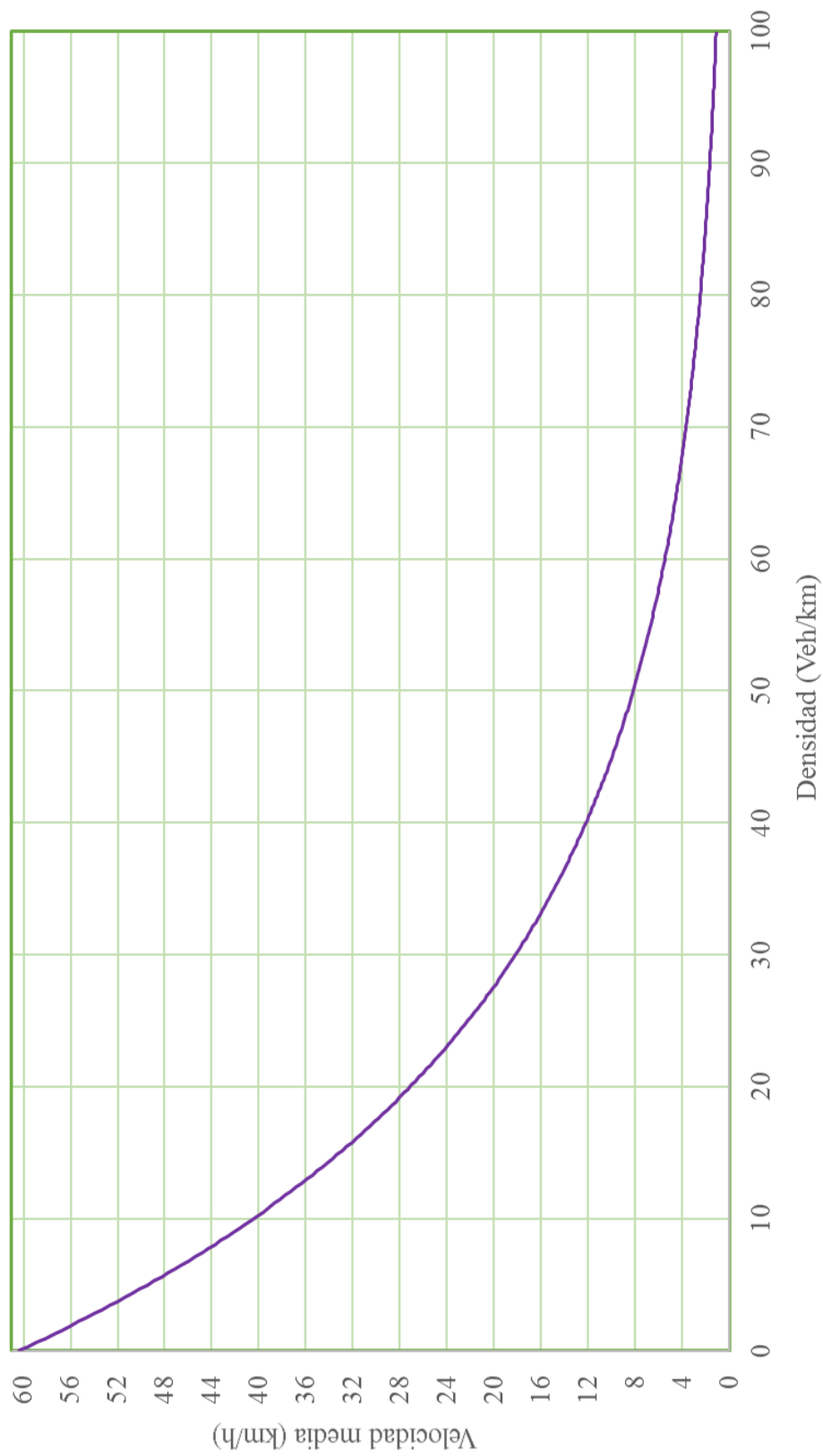
Figura 3.8 modelo logarítmico ve-k - punto 2 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 74.57 - 14.84 * \ln(k)$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.9 modelo exponencial ve-k - punto 2 - carril de salida

$$\bar{v}_e = e^{-(4.10 - 0.04 * k)}$$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.39 curvas velocidad media – densidad – punto 4 - carril de salida

Modelo lineal de Greensields		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	6.44	44.66
11:00 - 12:00	6.35	44.92
18:00 - 19:00	6.72	43.85

$$\bar{v}_e = 63.14 - 2.93 * k$$

$$v_l = 63.14 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 22.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 63.14 - \frac{63.14}{22} * k$$
  

Modelo logarítmico de Greenberd		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	6.44	44.31
11:00 - 12:00	6.35	44.58
18:00 - 19:00	6.72	43.50

$$\bar{v}_e = 79.98 - 19.17 * \ln(k)$$

$$v_m = 19.17 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 65 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 19.17 * \ln\left(\frac{65}{k}\right)$$
  

Modelo exponencial de Underwood		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	6.44	44.24
11:00 - 12:00	6.35	44.50
18:00 - 19:00	6.72	43.42

$$\bar{v}_e = e^{(4.22 - 0.07 * k)}$$

$$v_l = 67.96 \text{ (km/h)}$$

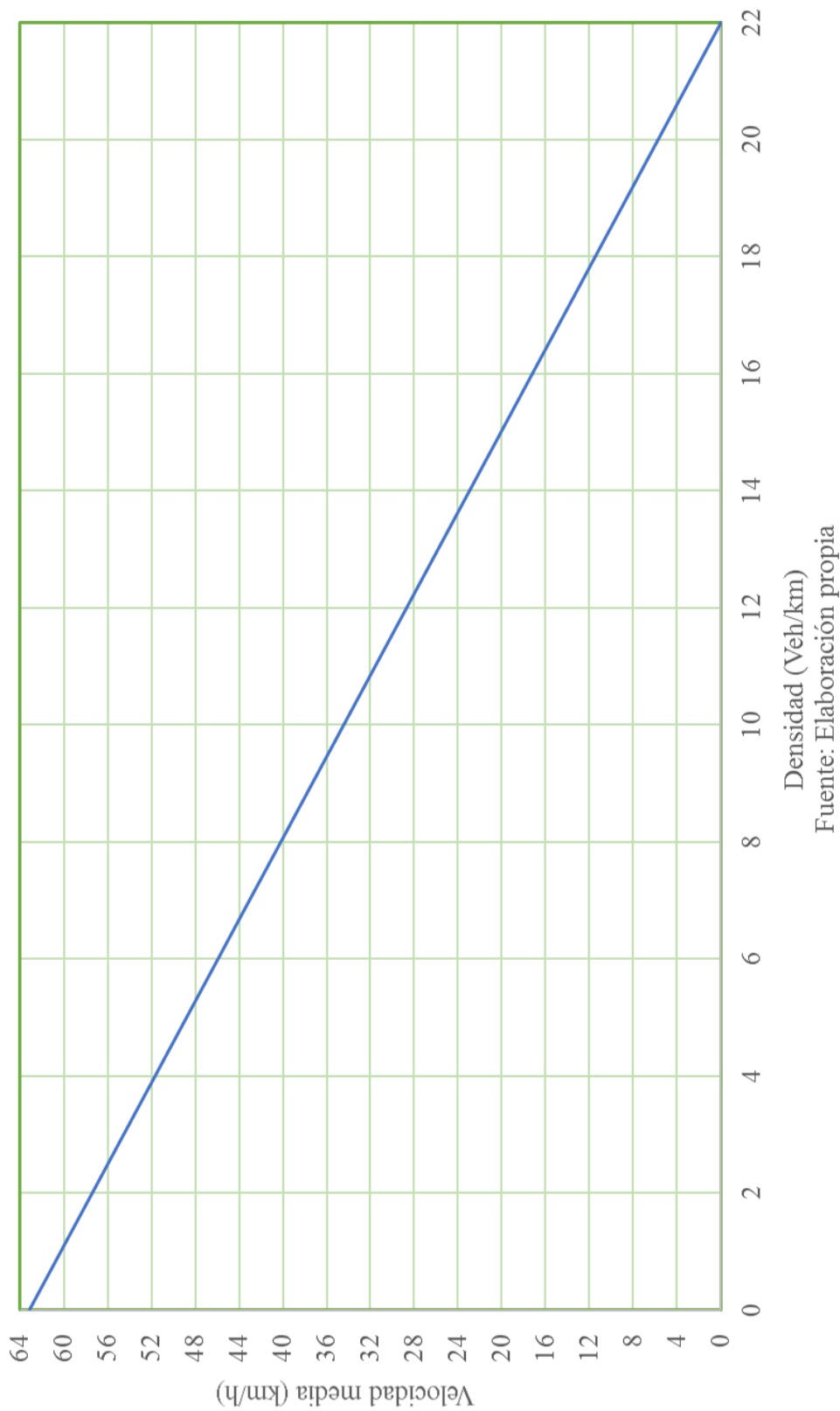
$$k_m = 15.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 67.96 * e^{-\frac{k}{15}}$$

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis con Statgraphics

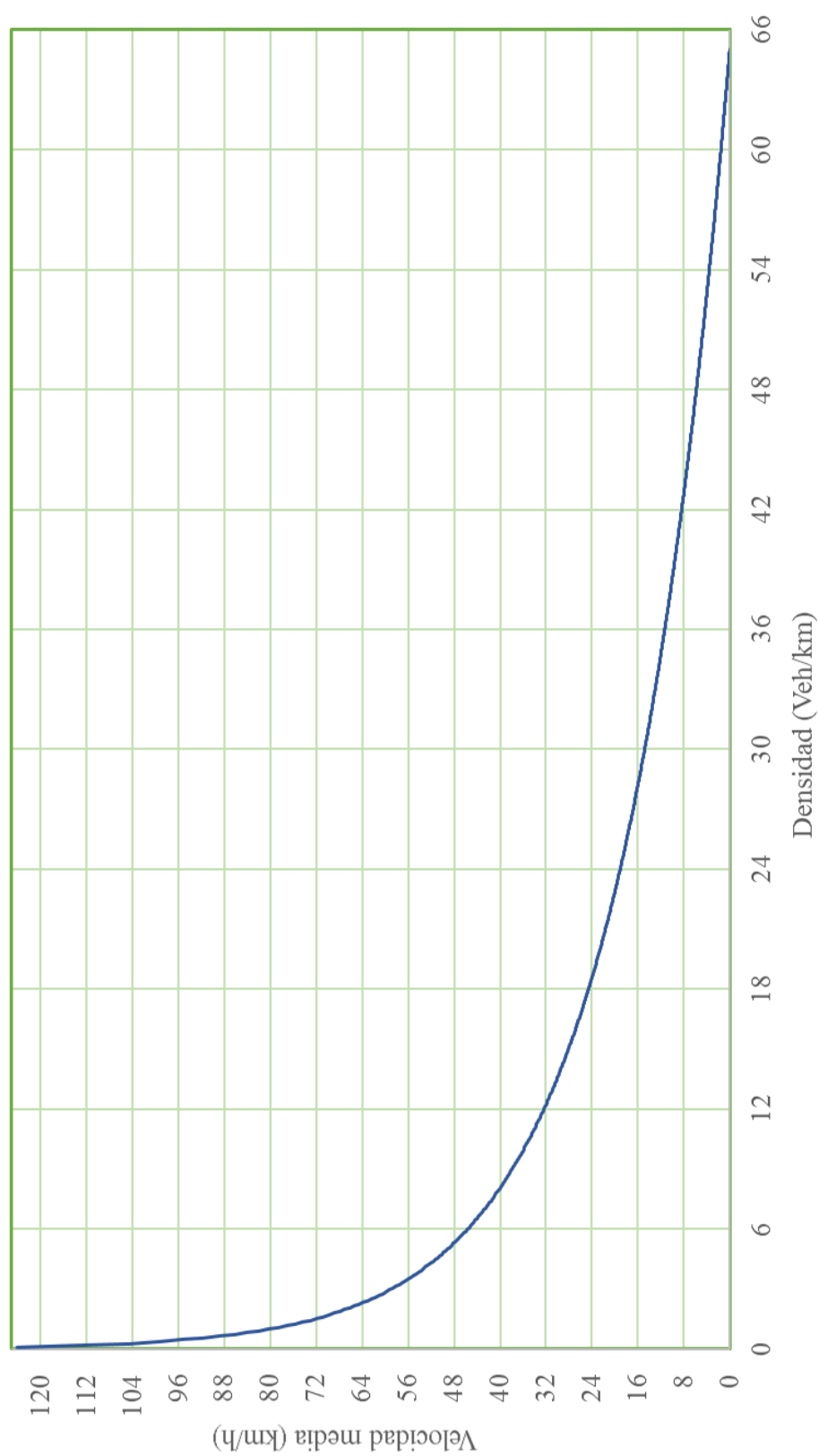


Figura 3.10 modelo lineal ve-k - punto 4 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 63.14 - 2.93 * k$



Fuente: Elaboración propia

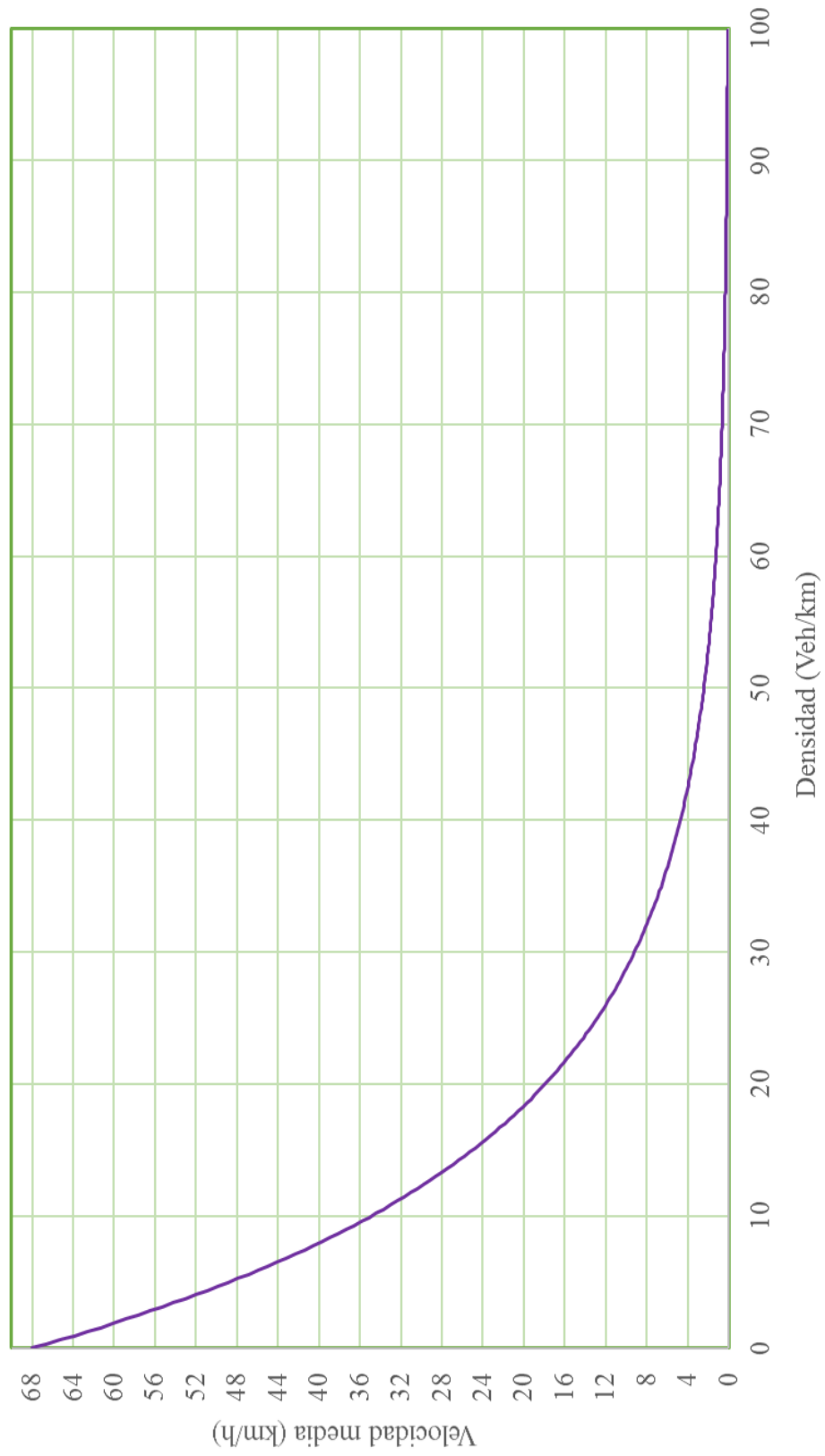
Figura 3.11 modelo logarítmico  $v_e-k$  - punto 4 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 79.98 - 19.17 * \ln(k)$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12 modelo exponencial ve-k - punto 4 - carril de salida

$$\bar{v}_e = e^{(4.22 - 0.07 * k)}$$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.40 curvas velocidad media – densidad - punto 5 - carril de entrada

Modelo lineal de Greensields		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.74	43.07
11:00 - 12:00	8.23	42.16
18:00 - 19:00	7.98	42.63

$$\bar{v}_e = 57.40 - 1.84 * k$$

$$v_l = 57.40 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 31.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 57.40 - \frac{57.40}{31} * k$$

Modelo logarítmico de Greenberd		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.74	43.17
11:00 - 12:00	8.23	42.27
18:00 - 19:00	7.98	42.72

$$\bar{v}_e = 73.19 - 14.66 * \ln(k)$$

$$v_m = 14.66 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 147.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 14.66 * \ln\left(\frac{147}{k}\right)$$

Modelo exponencial de Underwood		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.74	43.00
11:00 - 12:00	8.23	42.10
18:00 - 19:00	7.98	42.56

$$\bar{v}_e = e^{(4.098 - 0.04 * k)}$$

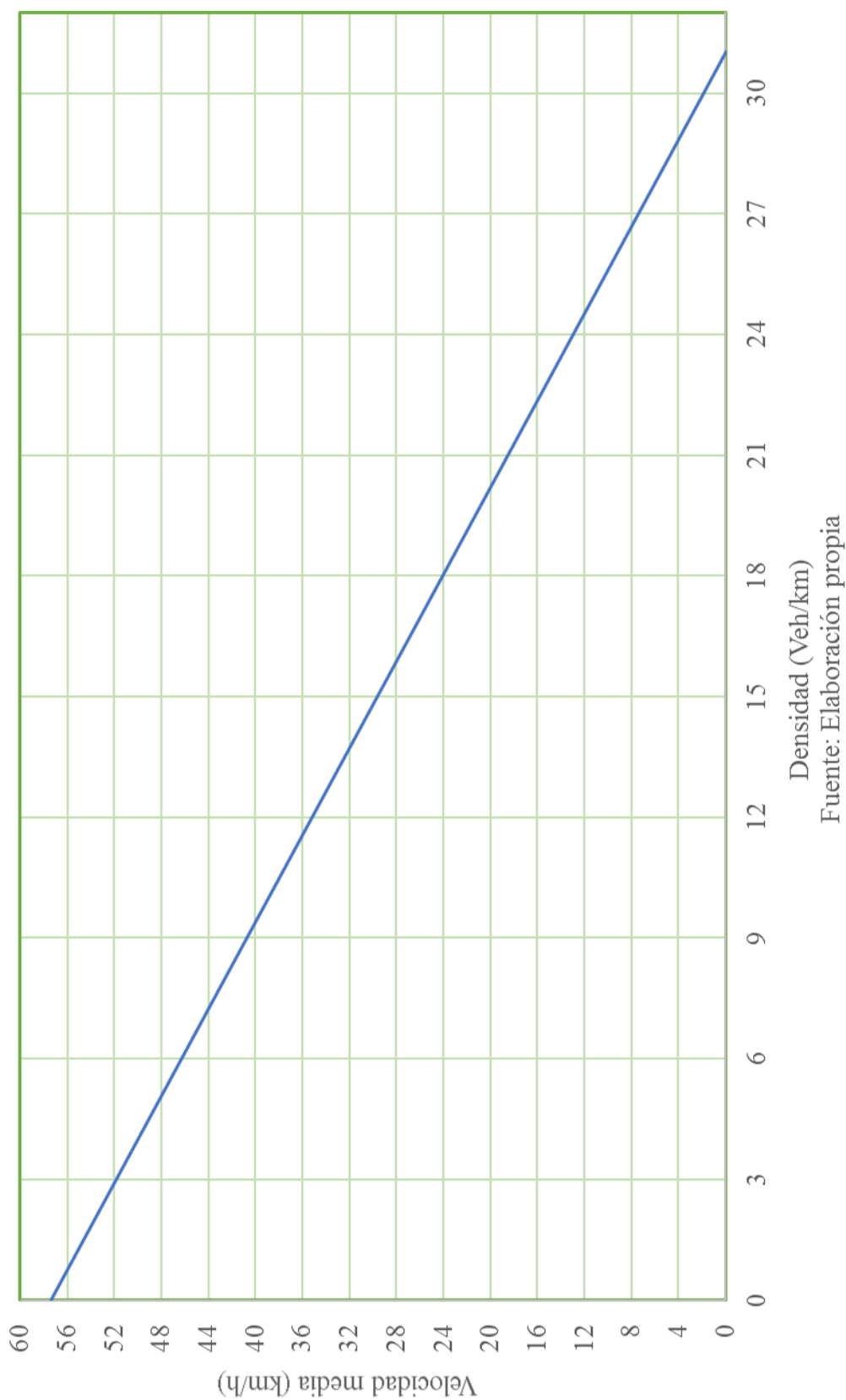
$$v_l = 60.21 \text{ (km/h)}$$

$$k_m = 23.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 60.21 * e^{-\frac{k}{23}}$$

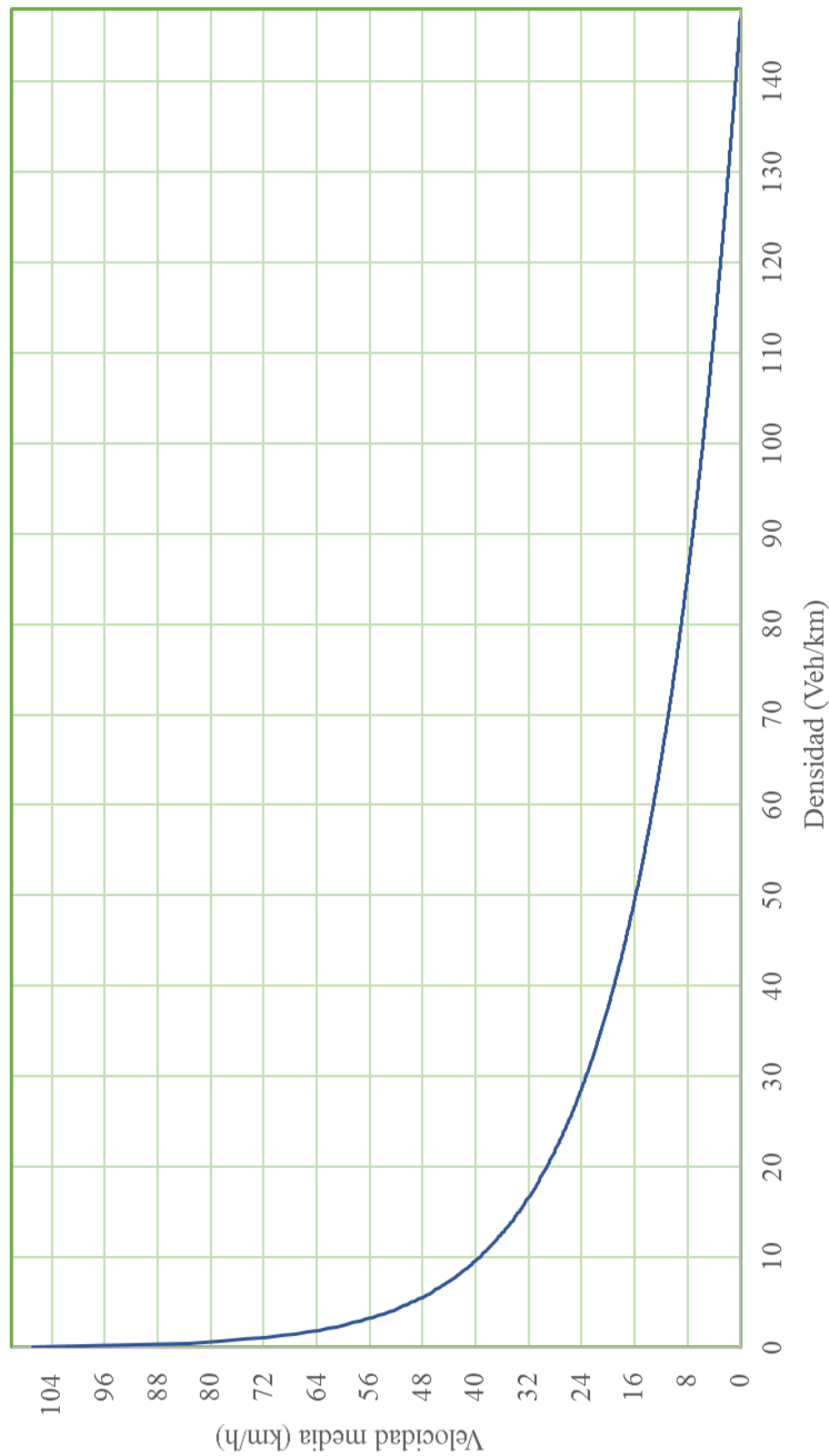
Fuente: Elaboración propia a partir del análisis con Statgraphics

Figura 3.13 modelo lineal  $v_e-k$  - punto 5 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 57.40 - 1.84 * k$



Fuente: Elaboración propia

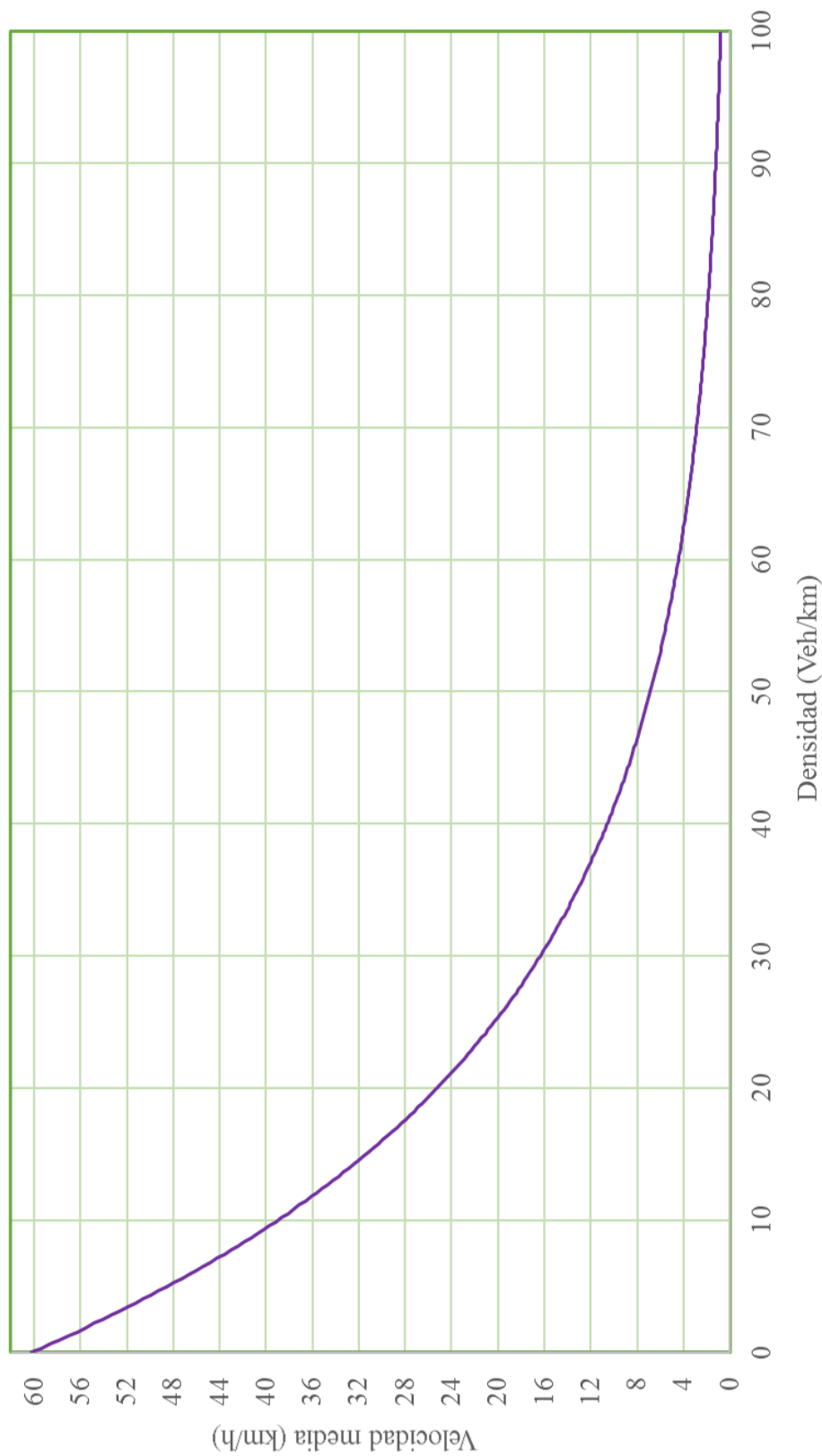
Figura 3.14 modelo logarítmico ve-k - punto 5 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 73.19 - 14.66 * \ln(k)$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15 modelo exponencial ve-k - punto 5 - carril de entrada

$$\bar{v}_e = e^{((4.098 - 0.04 * k))}$$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.41 curvas velocidad media – densidad – punto 5 - carril de salida

Modelo lineal de Greenslieds		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.50	41.77
11:00 - 12:00	7.30	42.22
18:00 - 19:00	7.01	42.88
Modelo logarítmico de Greenberd		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.50	41.66
11:00 - 12:00	7.30	42.10
18:00 - 19:00	7.01	42.77
Modelo exponencial de Underwood		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	7.50	42.00
11:00 - 12:00	7.30	42.44
18:00 - 19:00	7.01	43.10

$$\bar{v}_e = 58.71 - 2.27 * k$$

$$v_l = 58.71 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 26.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 58.71 - \frac{58.71}{26} * k$$

$$\bar{v}_e = 74.87 - 16.48 * \ln(k)$$

$$v_m = 16.48 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 94.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 16.48 * \ln\left(\frac{94}{k}\right)$$

$$\bar{v}_e = e^{(4.13 - 0.05 * k)}$$

$$v_l = 62.33 \text{ (km/h)}$$

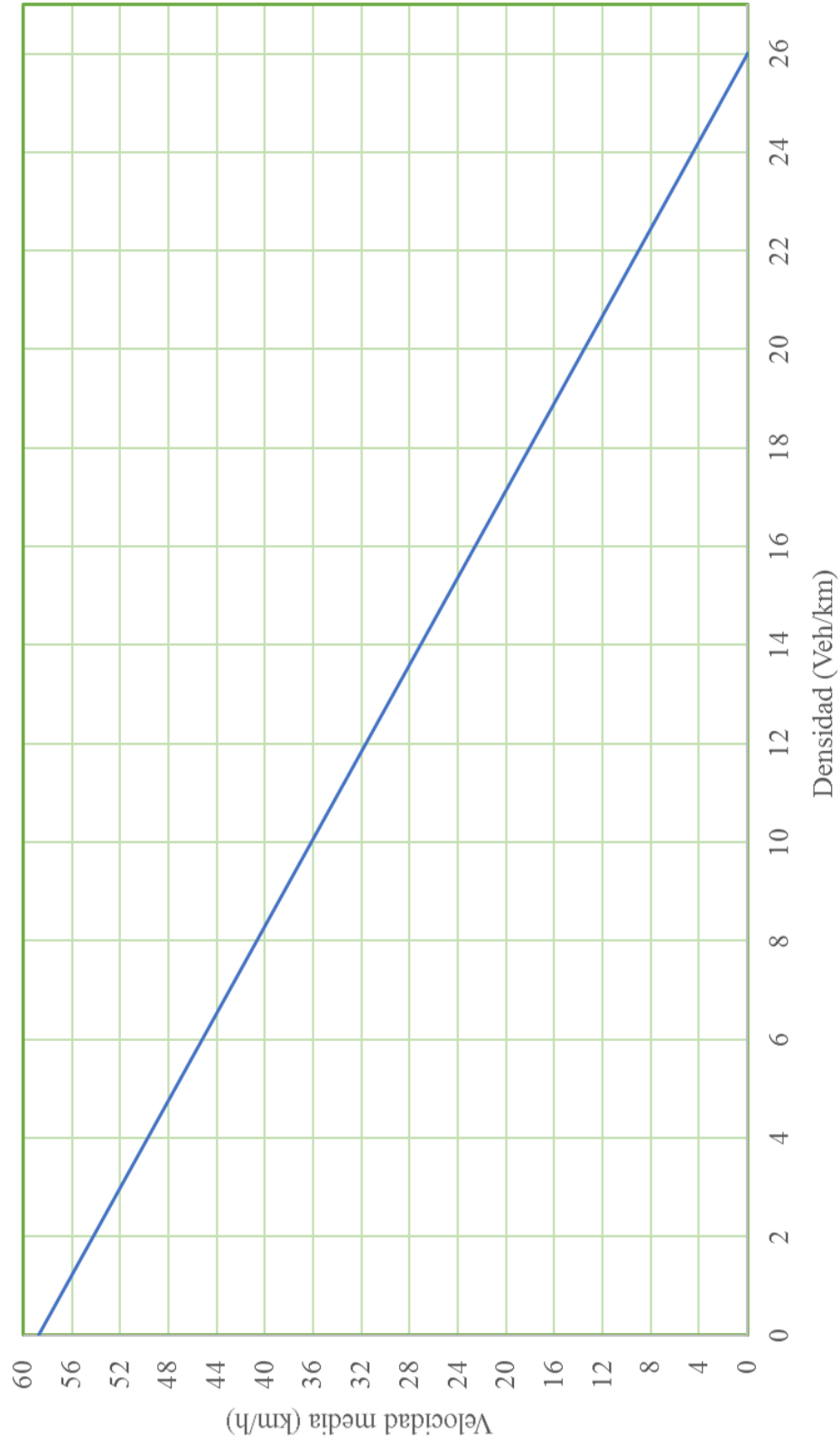
$$k_m = 19.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 62.33 * e^{-\frac{k}{19}}$$

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis con Statgraphics

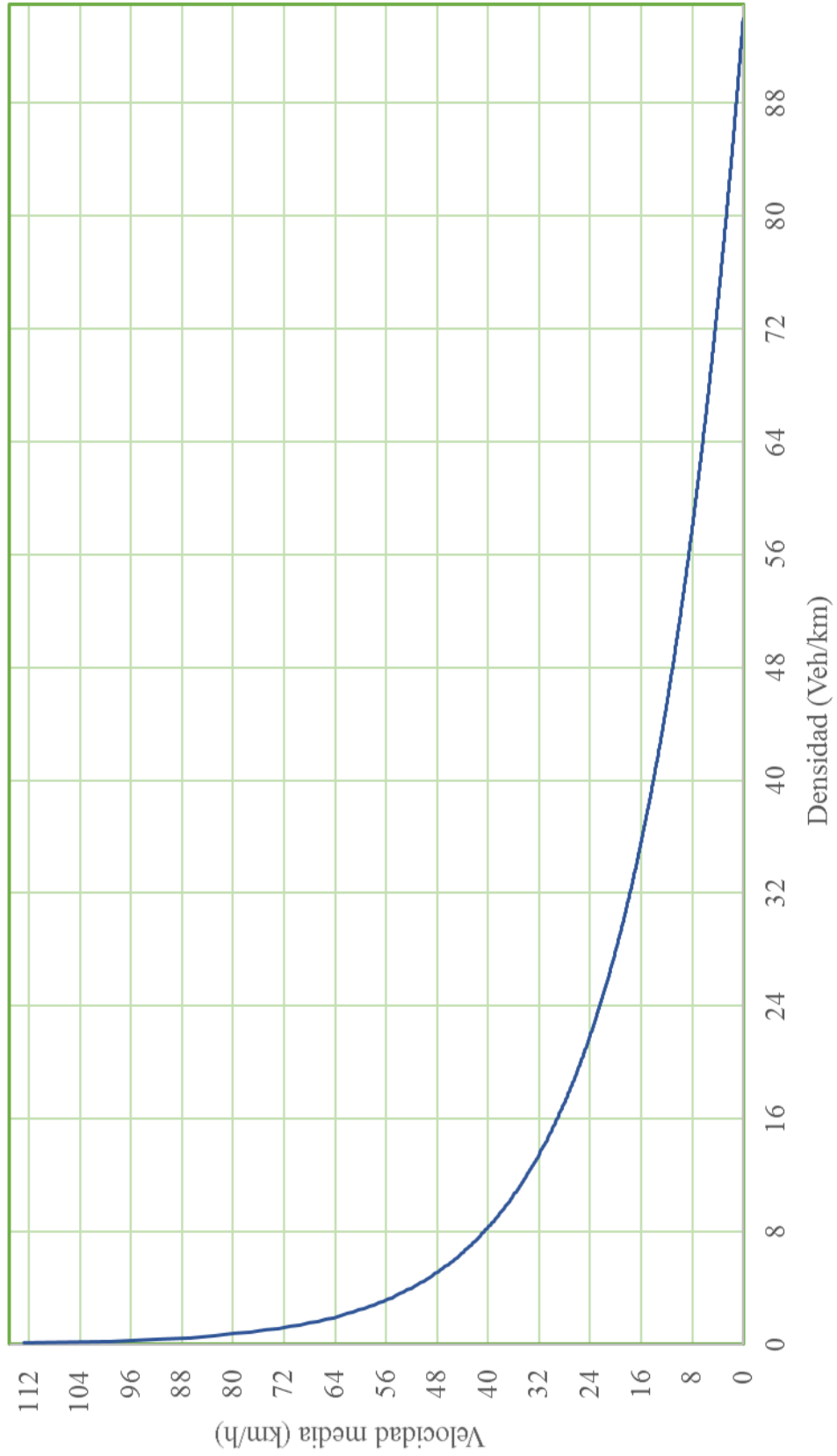


Figura 3.16 modelo lineal ve-k - punto 5 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 58.71 - 2.27 * k$



Fuente: Elaboración propia

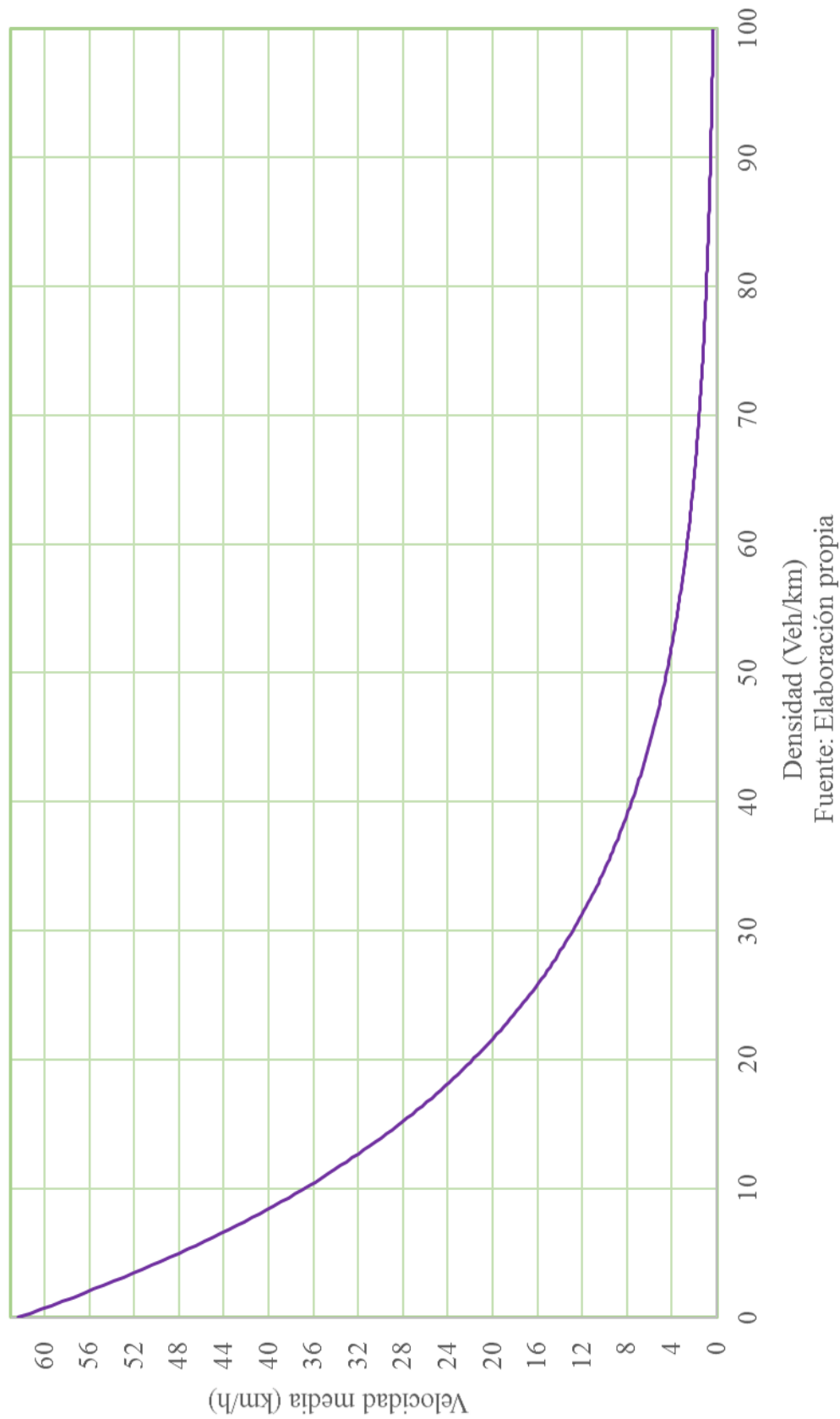
Figura 3.17 modelo logarítmico ve-k - punto 5 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 74.87 - 16.48 * \ln(k)$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.18 modelo exponencial ve-k - punto 5 - carril de salida

$$\bar{v}_e = e^{((4.13 - 0.05 * k))}$$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.42 curvas velocidad media – densidad - punto 6 - carril de entrada

Modelo lineal de Greensields		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.54	42.90
11:00 - 12:00	8.52	43.01
18:00 - 19:00	8.57	42.72

$$\bar{v}_e = 92.00 - 5.82 * k$$

$$v_l = 92.00 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 16.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 92.00 - \frac{92.00}{16} * k$$

Modelo logarítmico de Greenberd		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.54	42.31
11:00 - 12:00	8.52	42.43
18:00 - 19:00	8.57	42.14

$$\bar{v}_e = 148.98 - 49.72 * \ln(k)$$

$$v_m = 49.72 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 20.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 49.72 * \ln\left(\frac{20}{k}\right)$$

Modelo exponencial de Underwood		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.54	40.36
11:00 - 12:00	8.52	40.48
18:00 - 19:00	8.57	40.19

$$\bar{v}_e = e^{(4.92 - 0.14 * k)}$$

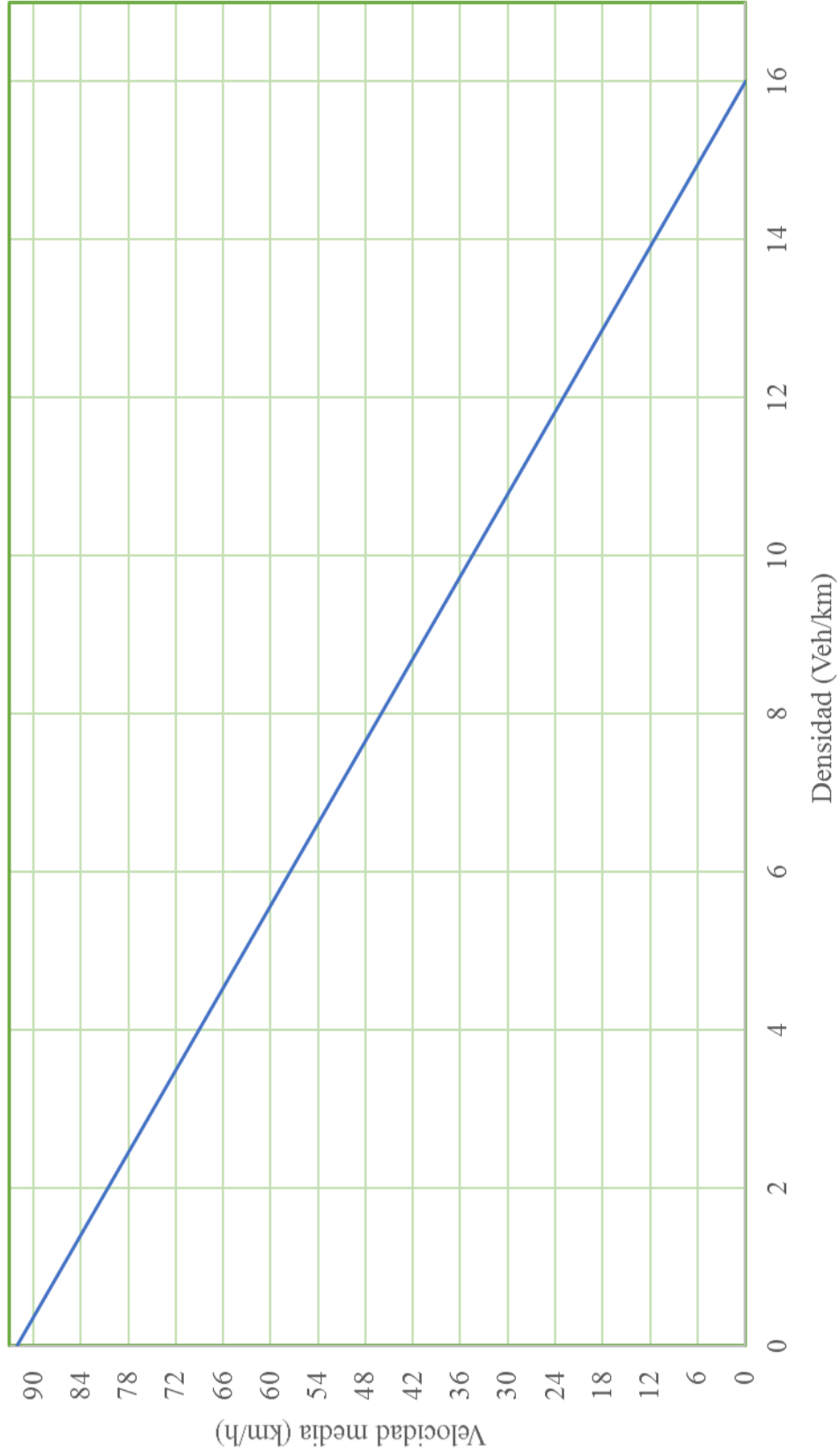
$$v_l = 136.71 \text{ (km/h)}$$

$$k_m = 7.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 136.71 * e^{-\frac{k}{7}}$$

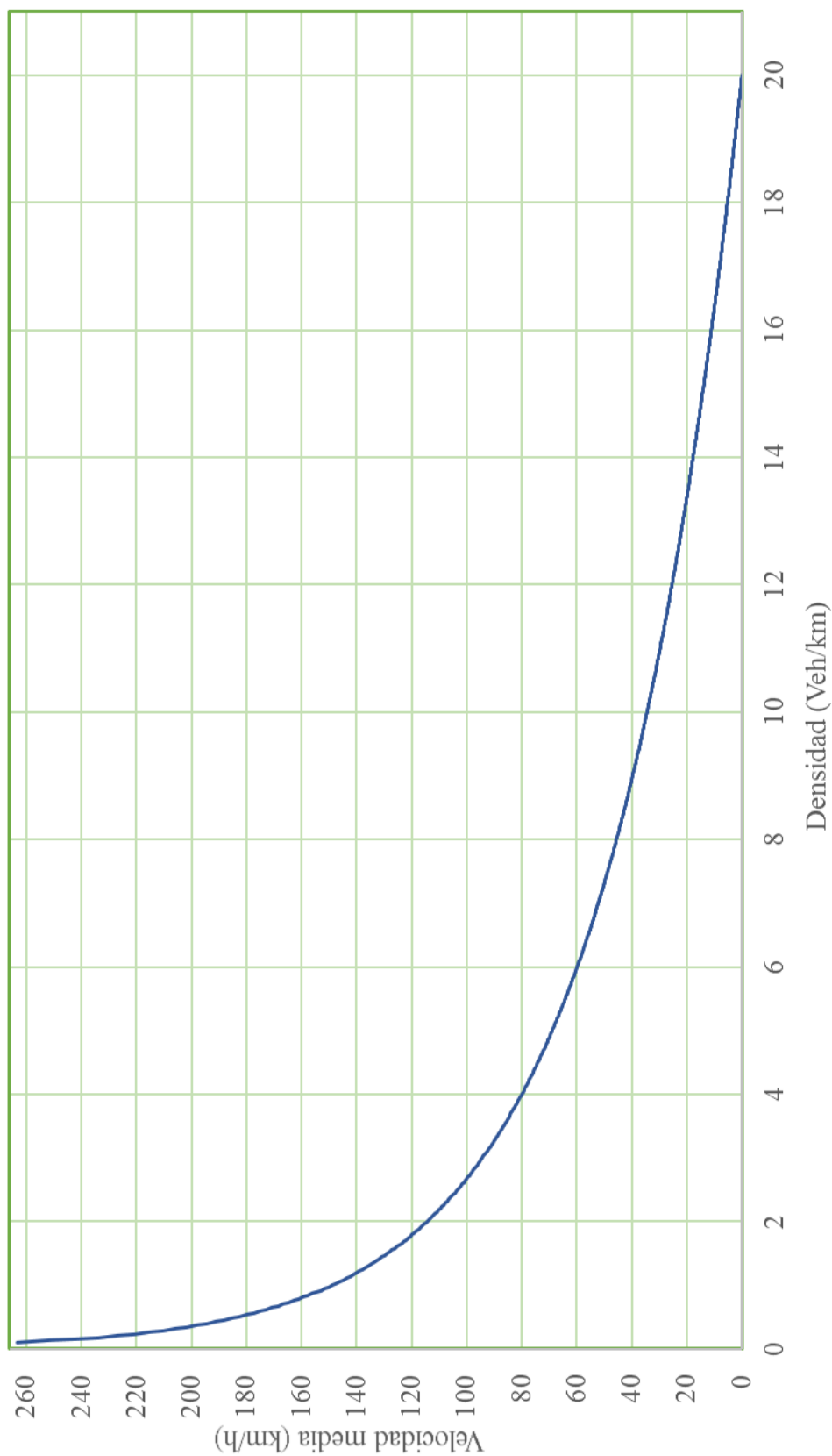
Fuente: Elaboración propia a partir del análisis con Statgraphics

Figura 3.19 modelo lineal  $v_e-k$  - punto 6 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 92.00 - 5.82 * k$



Fuente: Elaboración propia

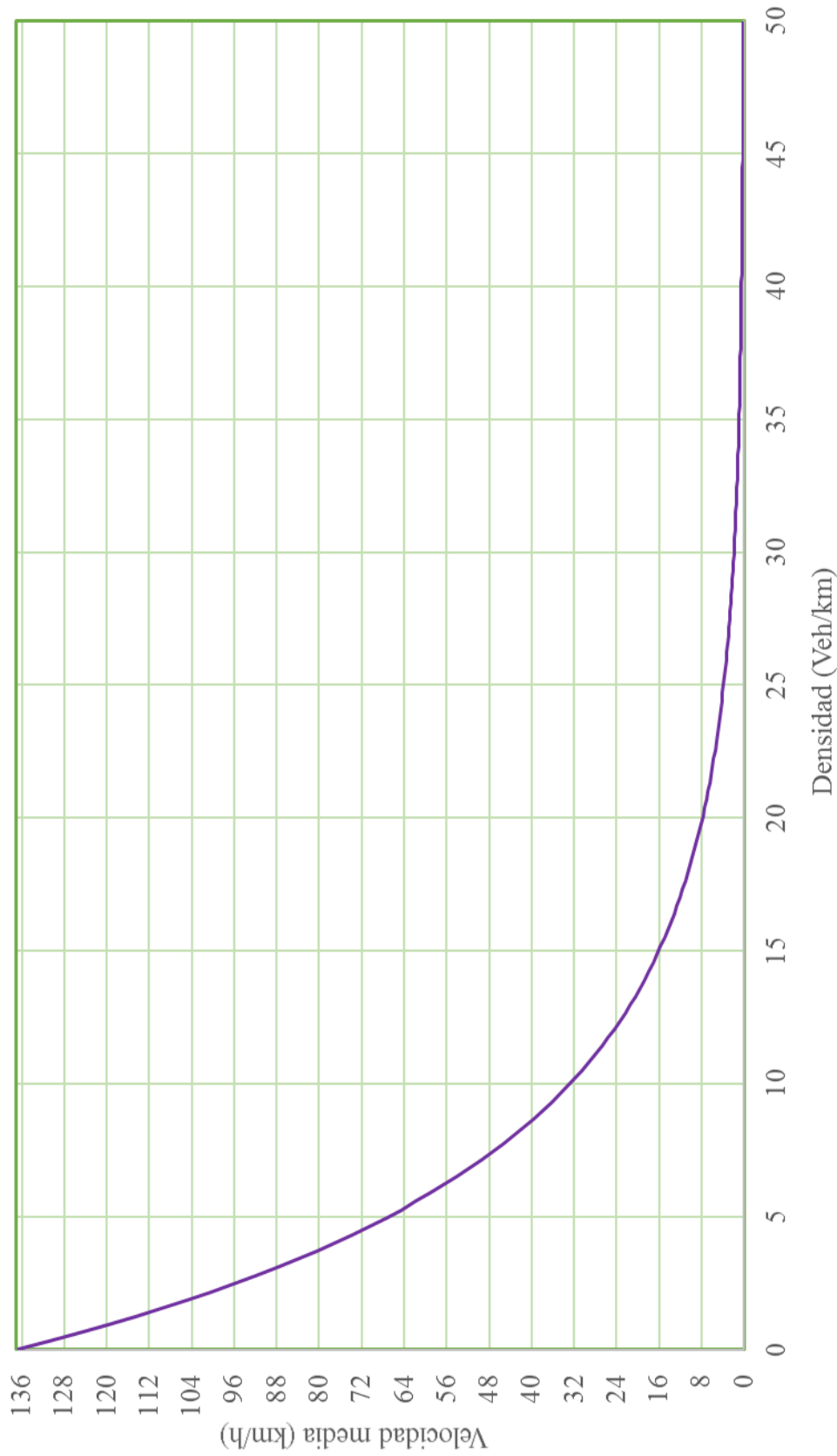
Figura 3.20 modelo logarítmico ve-k - punto 6 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 148.98 - 49.72 * \ln(k)$



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.21 modelo exponencial ve-k - punto 6 - carril de entrada

$$\bar{v}_e = e^{(4.92 - 0.14 * k)}$$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.43 curvas velocidad media – densidad - punto 7 - carril de entrada

Modelo lineal de Greensields		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.52	63.86
11:00 - 12:00	8.06	64.97
18:00 - 19:00	8.87	63.01

$$\bar{v}_e = 84.40 - 2.42 * k$$

$$v_l = 84.40 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 35.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 84.40 - \frac{84.40}{35} * k$$
  

Modelo logarítmico de Greenberd		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.52	63.74
11:00 - 12:00	8.06	64.87
18:00 - 19:00	8.87	62.91

$$\bar{v}_e = 107.59 - 20.46 * \ln(k)$$

$$v_m = 20.46 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 192.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 20.46 * \ln\left(\frac{192}{k}\right)$$
  

Modelo exponencial de Underwood		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.52	63.42
11:00 - 12:00	8.06	64.55
18:00 - 19:00	8.87	62.57

$$\bar{v}_e = e^{(4.48 - 0.04 * k)}$$

$$v_l = 88.02 \text{ (km/h)}$$

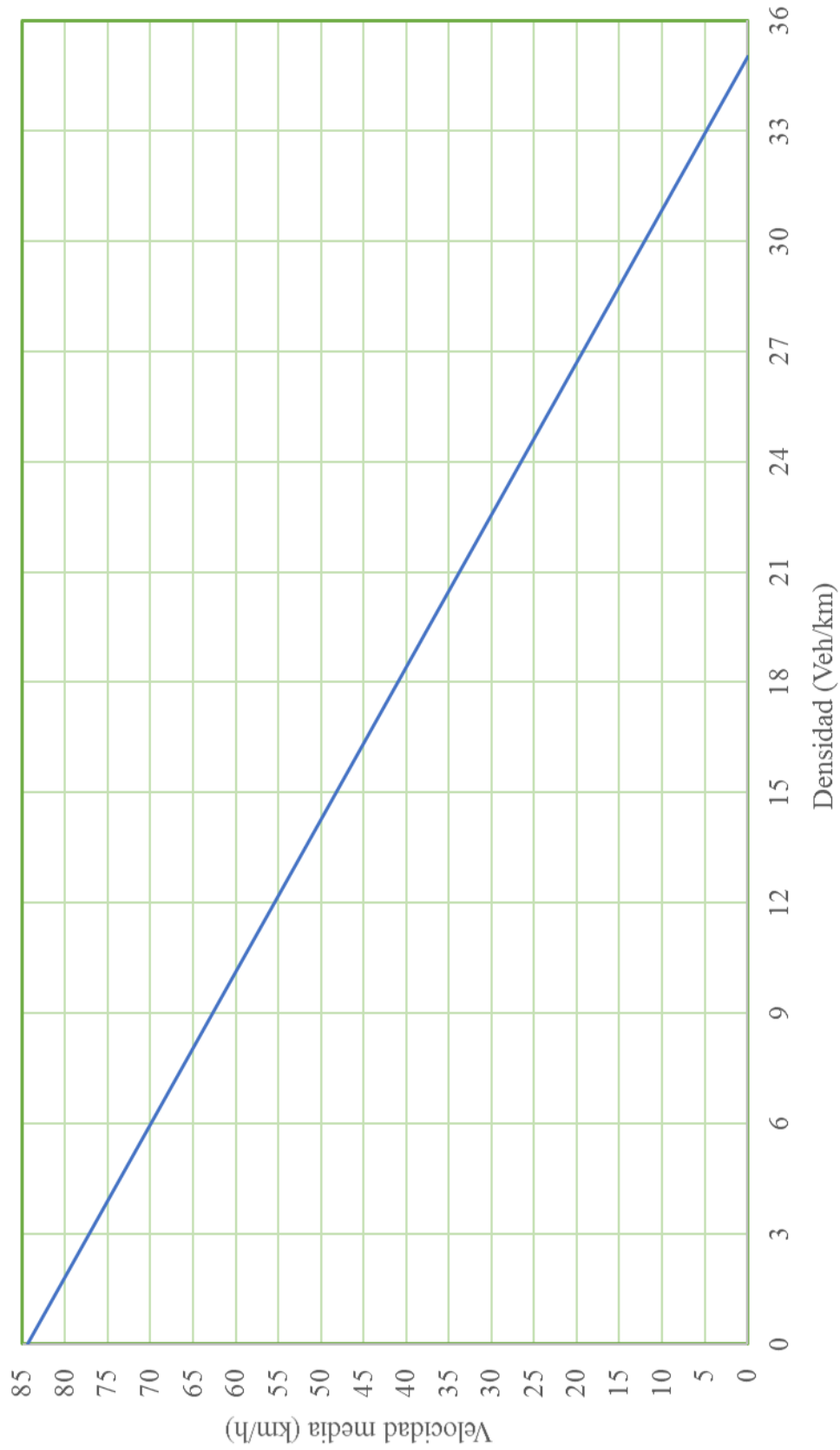
$$k_m = 26.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 88.02 * e^{-\frac{k}{26}}$$

Fuente: Elaboración propia a partir del análisis con Statgraphics

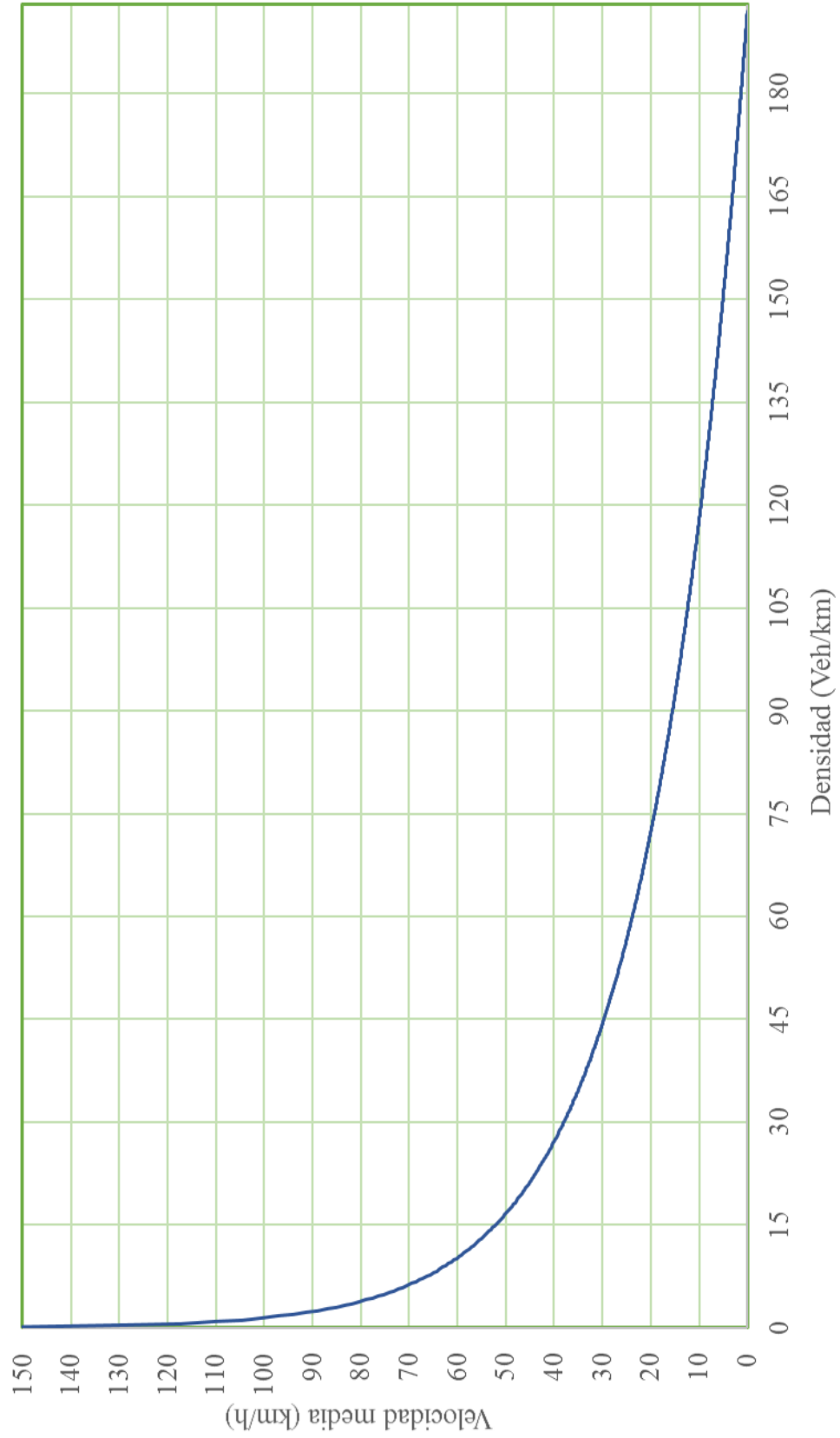


Figura 3.22 modelo lineal  $v_e-k$  - punto 7 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 84.40 - 2.42 * k$



Fuente: Elaboración propia

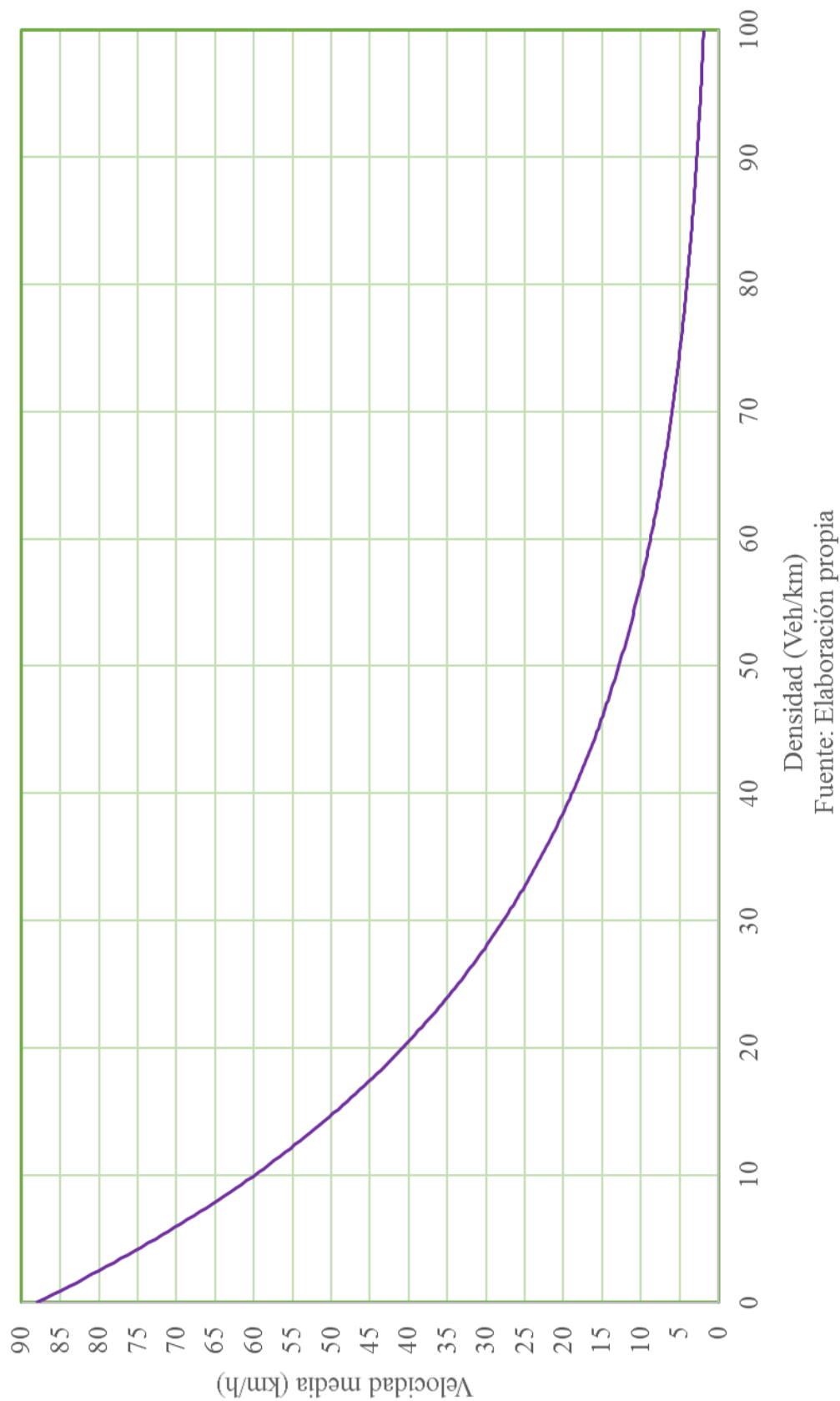
Figura 3.23 modelo logarítmico ve-k - punto 7 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 107.59 - 20.46 * \ln(k)$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.24 modelo exponencial ve-k - punto 7 - carril de entrada

$$\bar{v}_e = e^{(4.48 - 0.04 * k)}$$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.44 curvas velocidad media – densidad – punto 7 - carril de salida

Modelo lineal de Greensields		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.01	64.39
11:00 - 12:00	7.58	65.38
18:00 - 19:00	8.46	63.35

$$\bar{v}_e = 82.82 - 2.31 * k$$

$$v_l = 82.82 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 36.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 82.82 - \frac{82.82}{36} * k$$
  

Modelo logarítmico de Greenberd		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.01	64.31
11:00 - 12:00	7.58	65.33
18:00 - 19:00	8.46	63.29

$$\bar{v}_e = 102.95 - 18.58 * \ln(k)$$

$$v_m = 18.58 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 255.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 18.58 * \ln\left(\frac{255}{k}\right)$$
  

Modelo exponencial de Underwood		
Hora	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
07:00 - 8:00	8.01	64.36
11:00 - 12:00	7.58	65.36
18:00 - 19:00	8.46	63.33

$$\bar{v}_e = e^{(4.45 - 0.04 * k)}$$

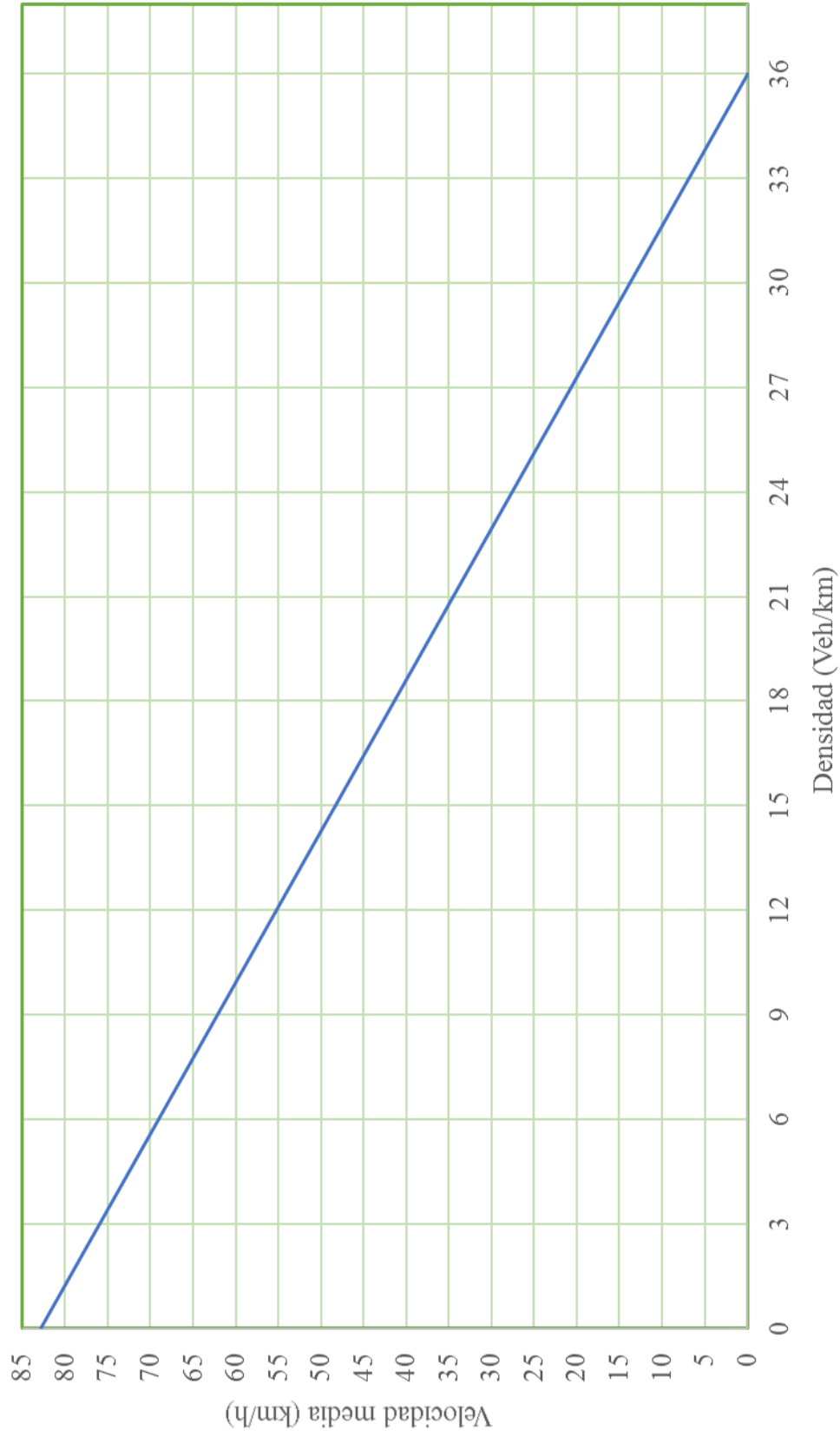
$$v_l = 85.68 \text{ (km/h)}$$

$$k_m = 28.00 \text{ (veh/km)}$$

$$\bar{v}_e = 85.68 * e^{-\frac{k}{28}}$$

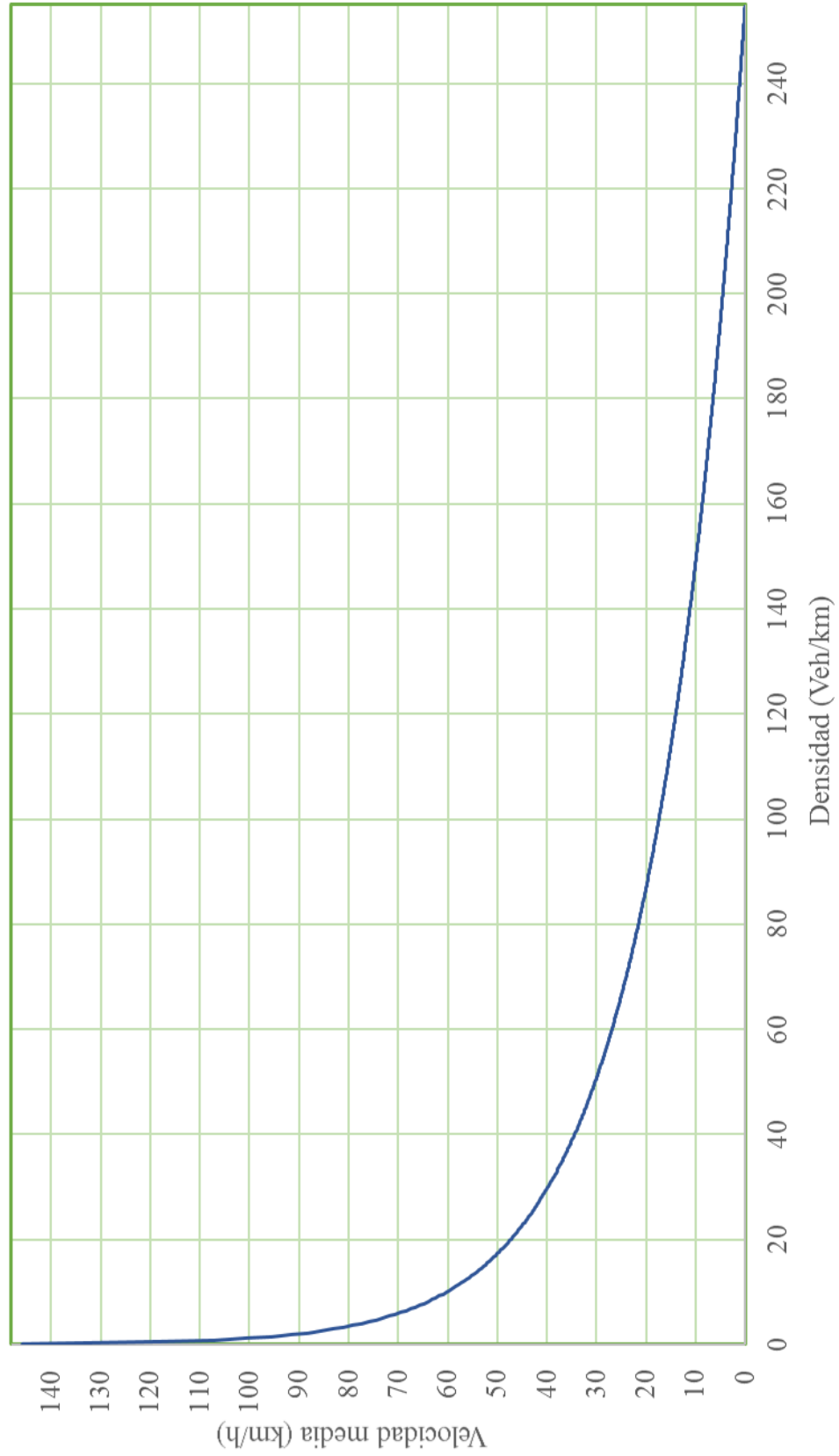
Fuente: Elaboración propia a partir del análisis con Statgraphics

Figura 3.25 modelo lineal ve-k - punto 7 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 82.82 - 2.31 * k$



Fuente: Elaboración propia

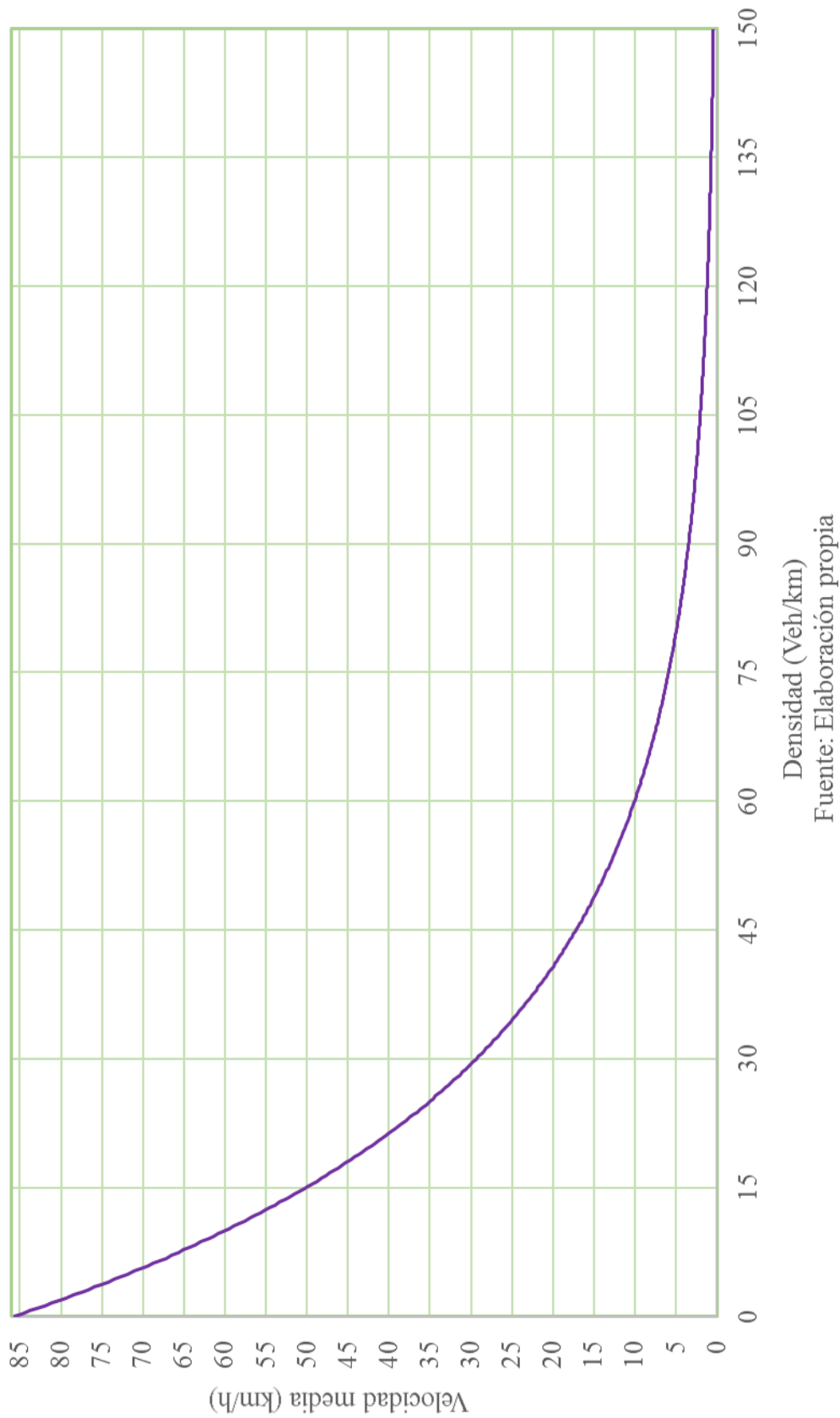
Figura 3.26 modelo logarítmico ve-k - punto 7 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 102.95 - 18.58 * \ln(k)$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.27 modelo exponencial ve-k - punto 7 - carril de salida

$$\bar{v}_e = e^{((4.45 - 0.04 * k))}$$



Fuente: Elaboración propia

### 3.7 ANÁLISIS DE VARIABLES DEL TRÁFICO VEHICULAR

Después de obtener las ecuaciones se realizó un análisis sobre cada uno de ellos para poder determinar cuál de las curvas se ajusta a cada uno de los tramos.

En el punto 1 tanto en el carril de entrada como de salida se observó que los valores de la curva logarítmica son racionales, pero al tener valores muy bajos de velocidad media espacial se descartó esta curva. Para la curva exponencial se observó que desarrolla valores irracionales en cuestión de la velocidad de flujo libre, llegando a valores nunca registrados de  $v_l$  durante el estudio por lo tanto también se descartó, los valores entregados por las ecuaciones de Greenshields son los más ajustados para el punto 1, dando valores de  $v_l$  y  $k_c$  más coherentes a la dinámica del tramo.

En el punto dos se observó que los valores de la curva logarítmica tanto de entrada como de salida no corresponde al comportamiento del tramo con respecto a la intensidad de congestión, pasan lo mismo con las curvas de Underwood

Llegando a intensidades de congestión de más de 2000 veh/km lo cual es improbable, mientras tanto las ecuaciones de Greenshields son los más coherentes a los carriles del punto.

Nuevamente se observó en el punto 3 que los valores de intensidad de congestión, son bastante alejados de la realidad. Tanto para el ajuste de la curva logarítmica como para el ajuste de la curva exponencial, dando lugar a una mejor representación al modelo lineal.

En el caso del punto 4 se observó valores muy bajos de velocidad de flujo libre en el modelo logarítmico, y valores muy altos de densidad de congestión del modelo exponencial. El modelo lineal tiene valores más coherentes tanto en la velocidad de flujo libre como en la densidad de congestión.

Para el punto 5 tanto para el modelo de Greenberg como para el modelo de Underwood se observó que los valores de la densidad de congestión son bastante alejados de la realidad, mientras que para el modelo de Greenshields los valores son más racionales.

Para el punto 6 se observó que los valores registrados de velocidad de flujo libre en el modelo logarítmico son irracionales, mientras que los valores registrados para la



densidad de congestión para el modelo exponencial también registran valores irracionales, mientras que el modelo lineal representa mucho mejor los valores del punto 6 de estudio.

En el punto 7 quedó claro que tanto los valores de velocidad de flujo libre, como la densidad de congestión, en el modelo logarítmico como exponencial no representa la dinámica del comportamiento vehicular del punto. En tanto los valores registrados en el modelo lineal son más representativos del punto de estudio.

El punto 8 registra valores de densidad de congestión bastante alejados de la realidad tanto para el modelo logarítmico como para el modelo exponencial, mientras que para el modelo lineal presenta valores racionales tanto en velocidad como para intensidad.

En conclusión, después de realizar el análisis de tendencias y el análisis de los indicadores de los modelos, podemos indicar que el modelo lineal es el más representativo del comportamiento del tráfico vehicular en la zona de estudio, dando indicadores más aproximados a la realidad en todos los puntos de estudio para ambos carriles. En este análisis se concluye que el modelo de Greenshields conocido como el modelo lineal es el que se enmarca a los valores de tráfico de comportamiento vehicular a las inmediaciones de la nueva terminal.

A continuación, se muestra la aplicación del modelo lineal para determinar el comportamiento de tráfico en el tramo de estudio.

Tabla 3.45 curvas modelo matemático lineal - punto 1 - carril de entrada

Relación velocidad media – densidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	57.32
B	7.00	42.99
C	14.00	28.66
D	21.00	14.33
E	28.00	0.00

$$\bar{v}_e = 57.32 - \frac{57.32}{28} * k$$

$$v_l = 57.32 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 28.00 \text{ (veh/km)}$$

Relación intensidad - densidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	0.00
B	7.00	300.93
C	14.00	401.24
D	21.00	300.93
E	28.00	0.00

$$q = 57.32 * k - \frac{57.32}{28} * k^2$$

Relación velocidad media - intensidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	57.32
B	300.93	42.99
C	401.24	28.66
D	300.93	14.33
E	0.00	0.00

$$q = 28 * \bar{v}_e - \frac{28}{57.32} * \bar{v}_e^2$$

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo seleccionado

Figura 3.28 relación velocidad – densidad - punto 1 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 57.32 - (57.32/28) * k$

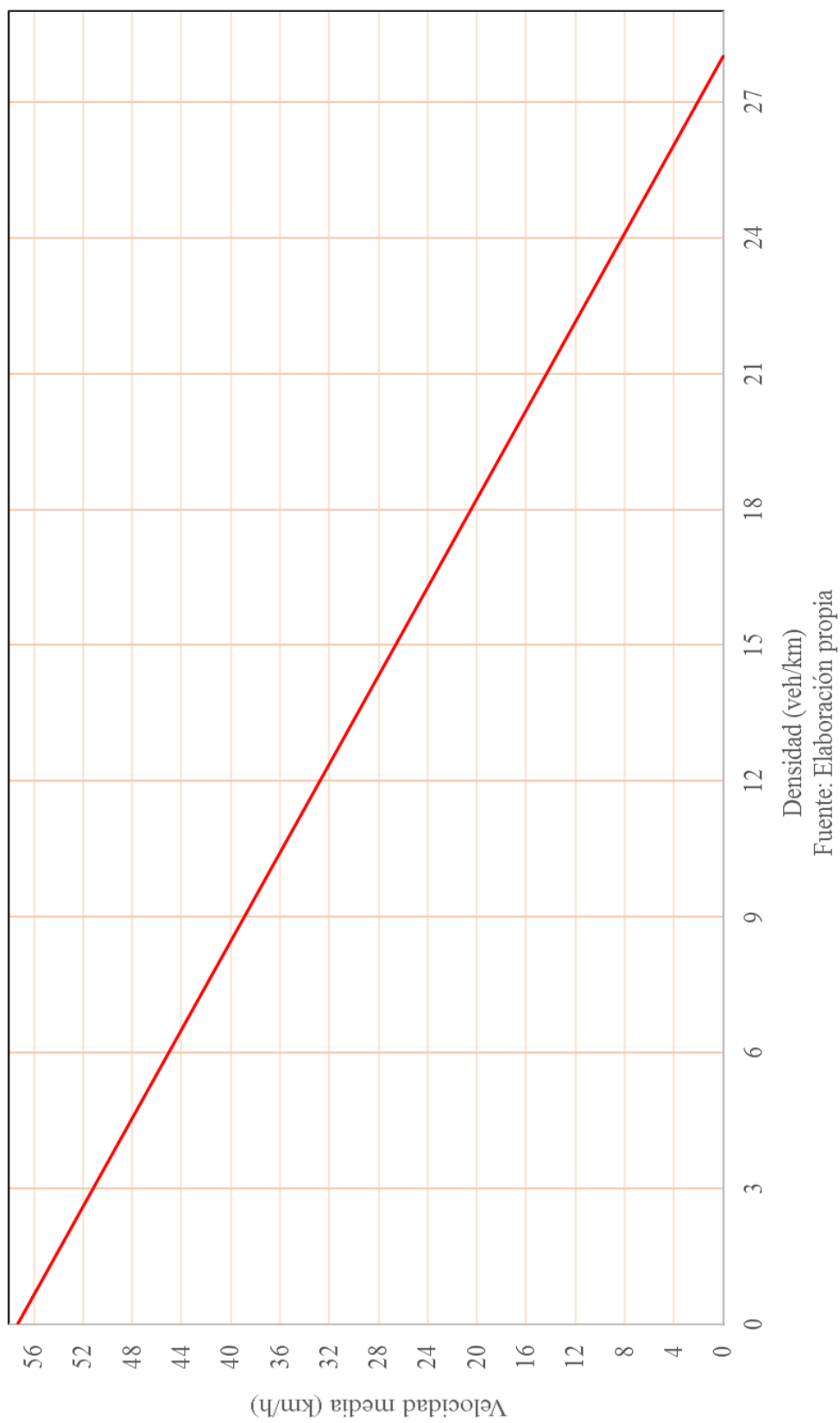
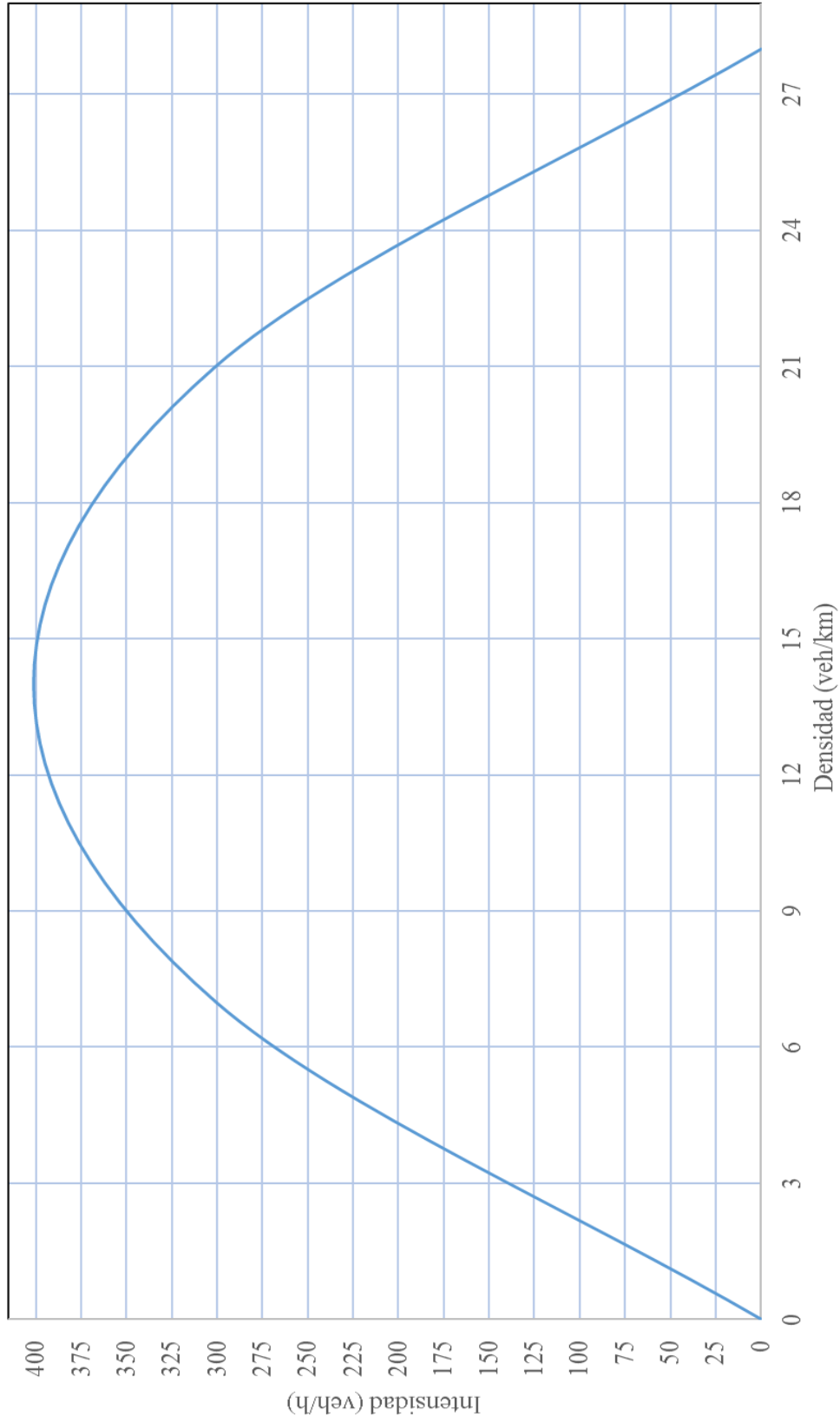


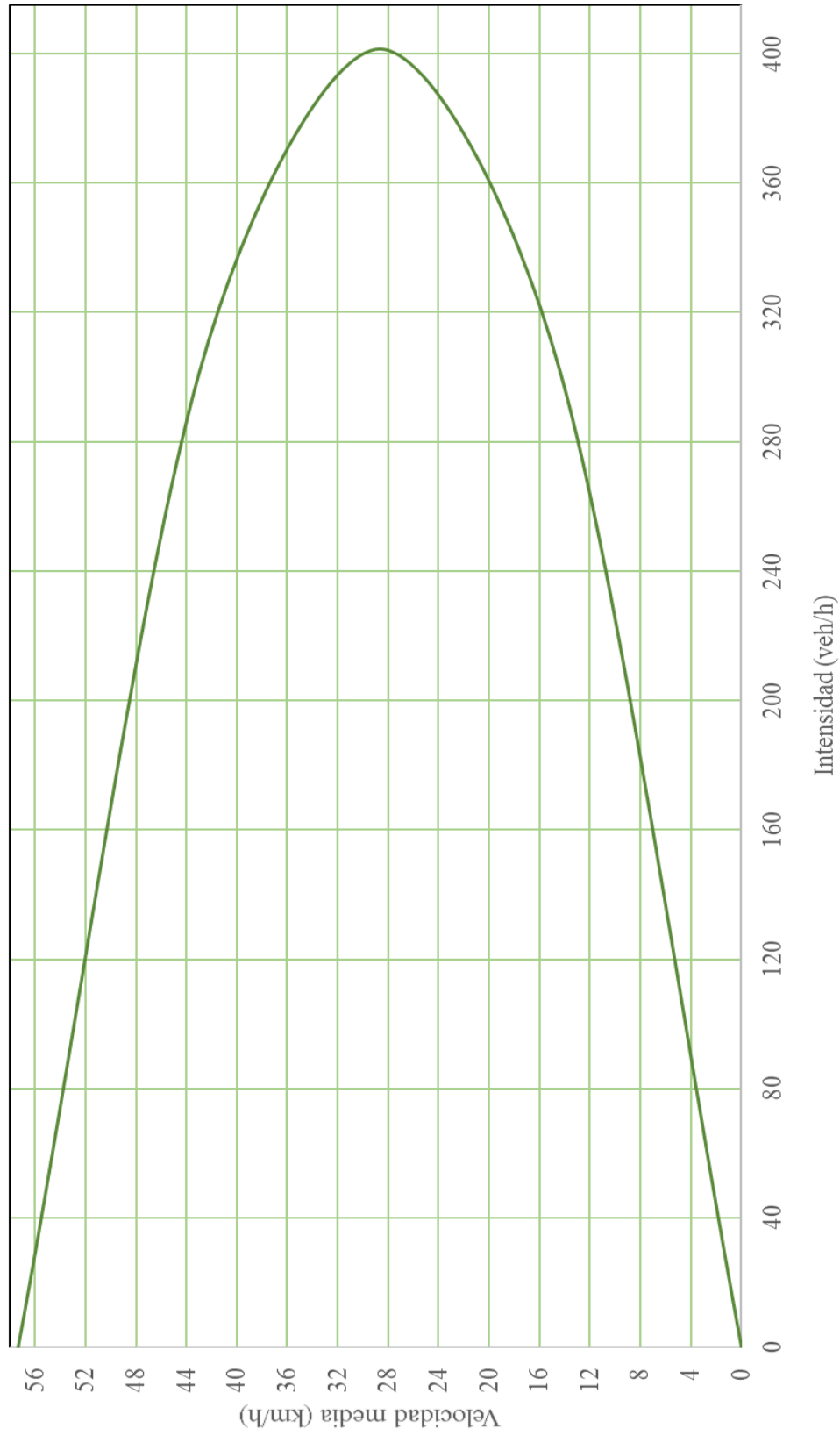
Figura 3.29 relación intensidad – densidad - punto 1 - carril de entrada  
 $q = 57.32*k - (57.32/28)*k^2$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.30 relación velocidad – intensidad - punto 1 - carril de entrada

$$q = 28 * \bar{v}_e - (28/57.32) * \bar{v}_e^2$$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.46 indicadores de comportamiento para el modelo matemático lineal - punto 1 - carril de entrada

Los indicadores de comportamiento obtenidos ya en las ecuaciones del modelo lineal son los siguientes:	
Velocidad a flujo libre	$v_l = 57.32$ (Km/h)
Densidad de congestión :	$k_c = 28.00$ (veh/Km)
Los indicadores de comportamiento restantes se obtienen a partir de los anteriores	
Intensidad máxima	$q_m = \frac{v_l k_c}{4} \rightarrow 401$ (veh/h)
Velocidad a intensidad máxima	$v_m = \frac{v_l}{2} \rightarrow 28.66$ (km/h)
Densidad a intensidad máxima	$k_m = \frac{k_c}{2} \rightarrow 14.00$ (veh/km)
Intervalo promedio a intensidad máxima	$\bar{h}_m = \frac{1}{q_m} \rightarrow 0.0025$ (h/veh) $\rightarrow \bar{h}_m = 8.97$ (seg/veh)
Espaciamiento promedio a intensidad máxima	$\bar{s}_m = \frac{1}{k_m} \rightarrow 0.0714$ (km/veh) $\rightarrow \bar{s}_m = 71.43$ (m/veh)
Fuente: Elaboración propia	

Tabla 3.47 condiciones de operación - punto 1 - carril de entrada

Definimos características de circulación en función de la densidad de congestionamiento, para determinar las condiciones de operación de la vía y la calidad de servicio que ofrece.

- $0.00 \leq k \leq 0.40 k_c$  (flujo estable )
- $0.40 k_c \leq k \leq 0.60 k_c$  (flujo inestable)
- $0.60 k_c \leq k \leq 1.00 k_c$  (flujo forzado)

Si la densidad de congestionamiento es  $kc = 64$  (veh/km) las densidades que limitan cada una de las condiciones de operación son :

- $0.4 K_c = 11.20$  (veh/km)
- $0.6 K_c = 16.80$  (veh/km)
- $1.00 K_c = 28.00$  (veh/km)

Las velocidades que corresponden a estas densidades están dadas por el modelo lineal

- $V_{0.40} = 34.39$  (Km/h)
- $V_{0.60} = 22.93$  (Km/h)
- $V_{1.00} = 0.00$  (Km/h)

$$\bar{v}_e = 57.32 - \frac{57.32}{28} * k$$

Las intensidades que corresponden a estas densidades y velocidades se calculan mediante la ecuación fundamental  $q = v * k$

- $q_{0.40} = 385$  (veh/h)
- $q_{0.60} = 385$  (veh/h)
- $q_{1.00} = 0.00$  (veh/h)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.48 curvas modelo matemático lineal - punto 1 - carril de salida

Relación velocidad media - densidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	60.94
B	5.75	45.71
C	11.50	30.47
D	17.25	15.24
E	23.00	0.00

$$\bar{v}_e = 60.94 - \frac{60.94}{23} * k$$

$$v_l = 60.94 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 23.00 \text{ (veh/km)}$$

Relación intensidad - densidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	0.00
B	5.75	262.80
C	11.50	350.41
D	17.25	262.80
E	23.00	0.00

$$q = 60.94 * k - \frac{60.94}{23} * k^2$$

Relación velocidad media - intensidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	60.94
B	262.80	45.71
C	350.41	30.47
D	262.80	15.24
E	0.00	0.00

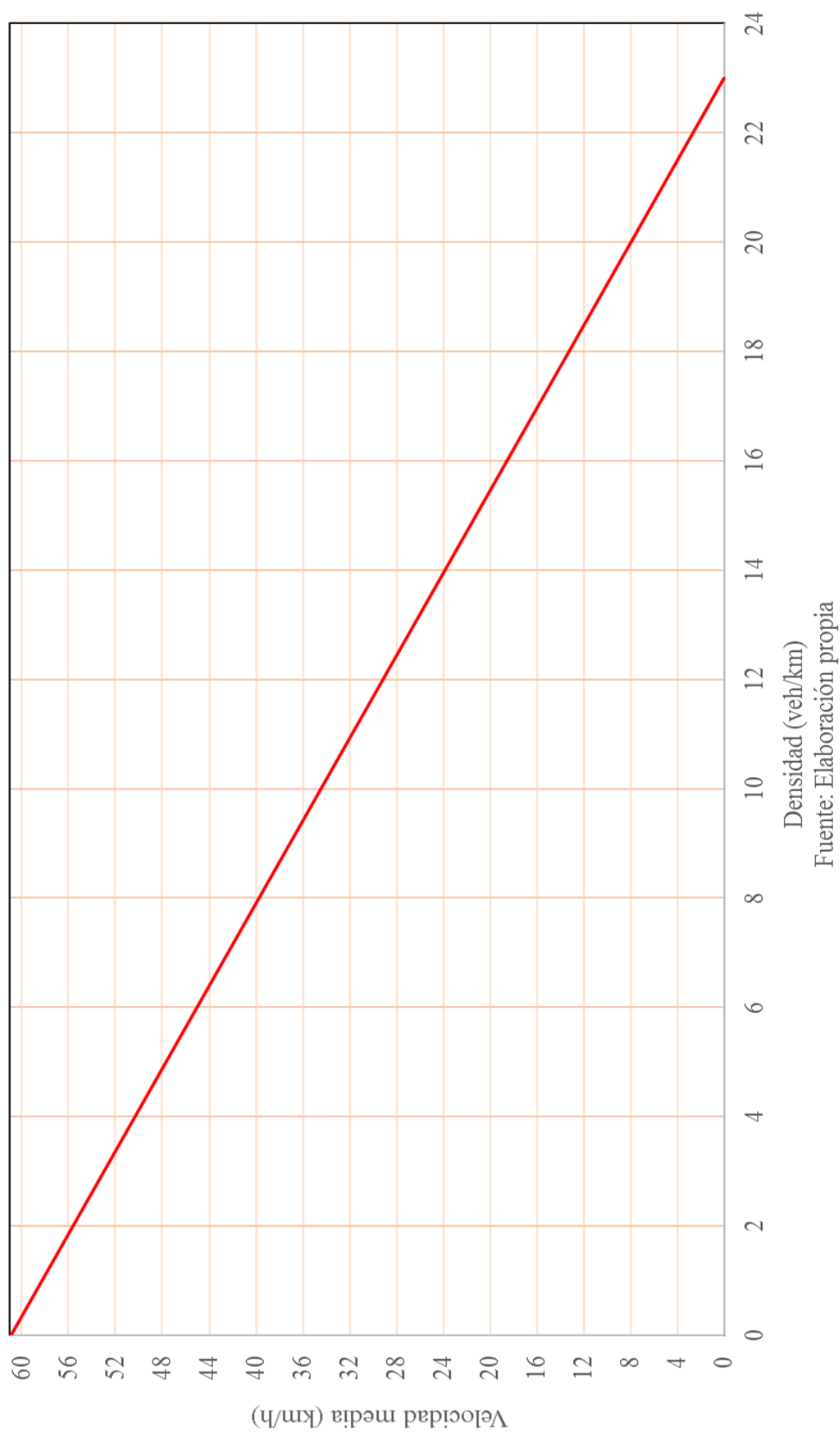
$$q = 23 * \bar{v}_e - \frac{23}{60.94} * \bar{v}_e^2$$

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo seleccionado



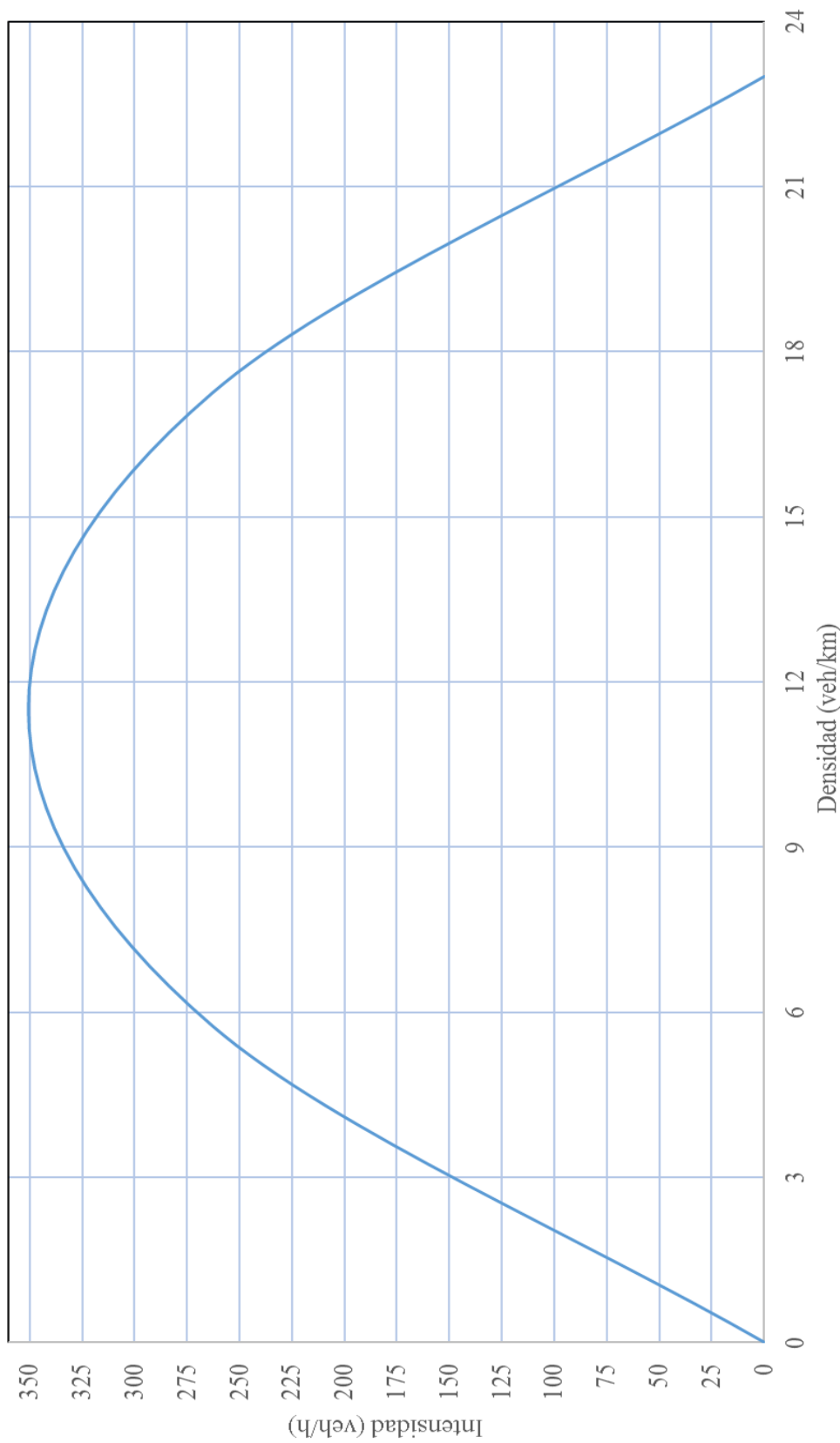
Figura 3.31 relación velocidad – densidad - punto 1 - carril de salida

$$\bar{v}_e = 60.94 - (60.94/23)*k$$



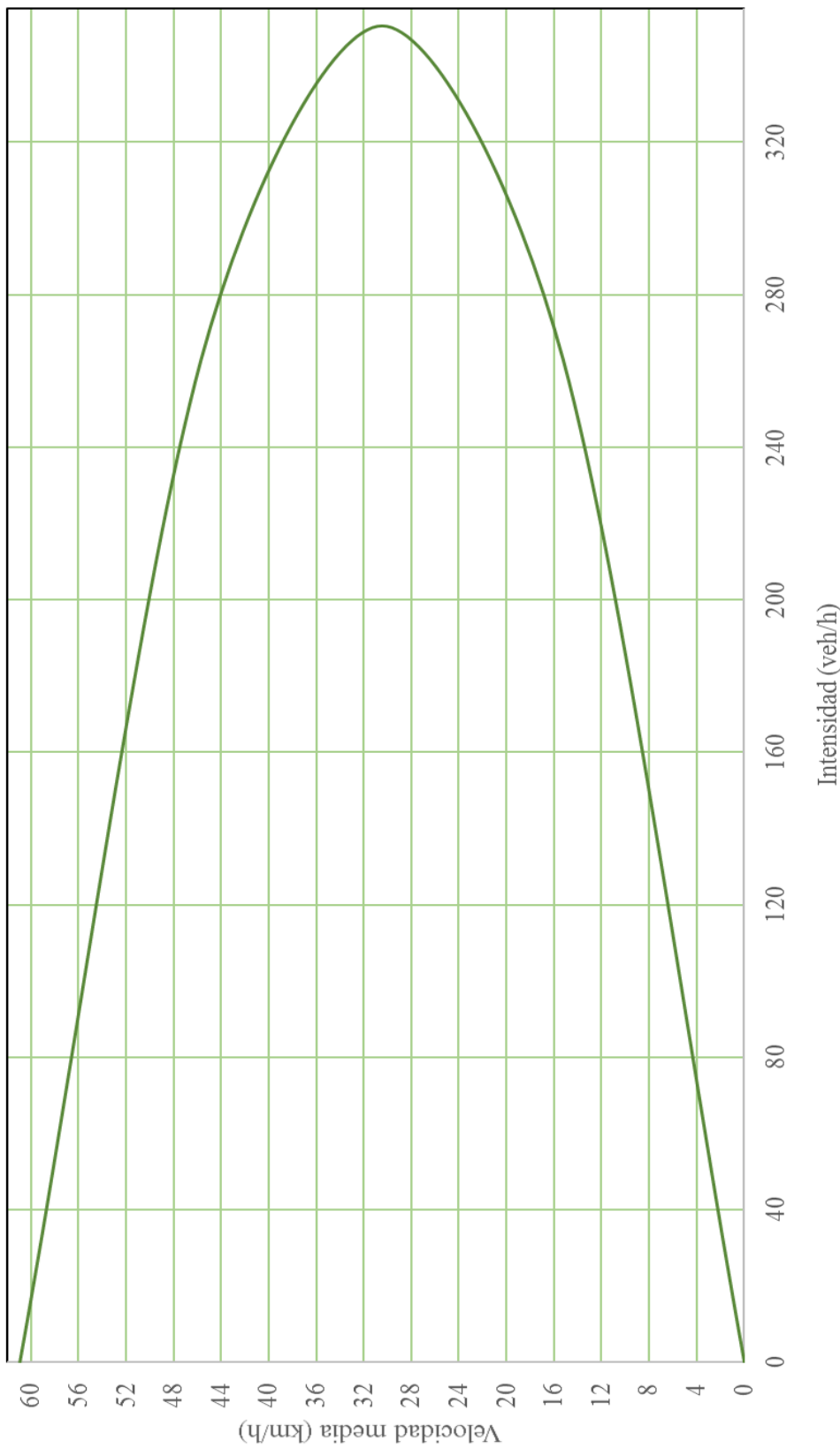
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.32 relación intensidad – densidad - punto 1 - carril de salida  
 $q = 60.94 * k - (60.94/23) * k^2$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.33 relación velocidad – intensidad - punto 1 - carril de salida  
 $q = 23 * \bar{v}e - (23/60.94) * \bar{v}e^2$



Intensidad (veh/h)  
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.49 indicadores de comportamiento para el modelo matemático lineal - punto 1 - carril de salida

Los indicadores de comportamiento obtenidos ya en las ecuaciones del modelo lineal son los siguientes:	
Velocidad a flujo libre	$v_l = 60.94 \text{ (Km/h)}$
Densidad de congestión :	$k_c = 23.00 \text{ (veh/Km)}$
Los indicadores de comportamiento restantes se obtienen a partir de los anteriores	
Intensidad máxima	$q_m = \frac{v_l k_c}{4} \rightarrow 350 \text{ (veh/h)}$
Velocidad a intensidad máxima	$v_m = \frac{v_l}{2} \rightarrow 30.47 \text{ (km/h)}$
Densidad a intensidad máxima	$k_m = \frac{k_c}{2} \rightarrow 11.50 \text{ (veh/km)}$
Intervalo promedio a intensidad máxima	$\bar{h}_m = \frac{1}{q_m} \rightarrow 0.0029 \text{ (h/veh)}$
Espaciamiento promedio a intensidad máxima	$\bar{s}_m = \frac{1}{k_m} \rightarrow 0.0870 \text{ (km/veh)}$
	$\bar{h}_m = 10.27 \text{ (seg/veh)}$
	$\bar{s}_m = 86.96 \text{ (m/veh)}$
Fuente: Elaboración propia	

Tabla 3.50 condiciones de operación - punto 1 - carril de salida

Definimos características de circulación en función de la densidad de congestamiento, para determinar las condiciones de operación de la vía y la calidad de servicio que ofrece.

- $0.00 \leq k \leq 0.40 k_c$  (flujo estable )
- $0.40 k_c \leq k \leq 0.60 k_c$  (flujo inestable)
- $0.60 k_c \leq k \leq 1.00 k_c$  (flujo forzado)

Si la densidad de congestamiento es  $kc = 64$  (veh/km) las densidades que limitan cada una de las condiciones de operación son :

- $0.4 K_c = 9.20$  (veh/km)
- $0.6 K_c = 13.80$  (veh/km)
- $1.00 K_c = 23.00$  (veh/km)

Las velocidades que corresponden a estas densidades están dadas por el modelo lineal

- $V_{0.40} = 36.56$  (Km/h)
- $V_{0.60} = 24.38$  (Km/h)
- $V_{1.00} = 0.00$  (Km/h)

$$\bar{v}_e = 60.94 - \frac{60.94}{23} * k$$

Las intensidades que corresponden a estas densidades y velocidades se calculan mediante la ecuación fundamental  $q = v * k$

- $q_{0.40} = 336$  (veh/h)
- $q_{0.60} = 336$  (veh/h)
- $q_{1.00} = 0.00$  (veh/h)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.51 curvas modelo matemático lineal - punto 2 - carril de salida

Relación velocidad media – densidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (K m/h)
A	0.00	57.46
B	8.25	43.10
C	16.50	28.73
D	24.75	14.37
E	33.00	0.00

Relación intensidad - densidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (K m/h)
A	0.00	0.00
B	8.25	355.53
C	16.50	474.05
D	24.75	355.53
E	33.00	0.00

Relación velocidad media - intensidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (K m/h)
A	0.00	57.46
B	355.53	43.10
C	474.05	28.73
D	355.53	14.37
E	0.00	0.00

$$\bar{v}_e = 57.46 - \frac{57.46}{33} * k$$

$$v_l = 57.46 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 33.00 \text{ (veh/km)}$$

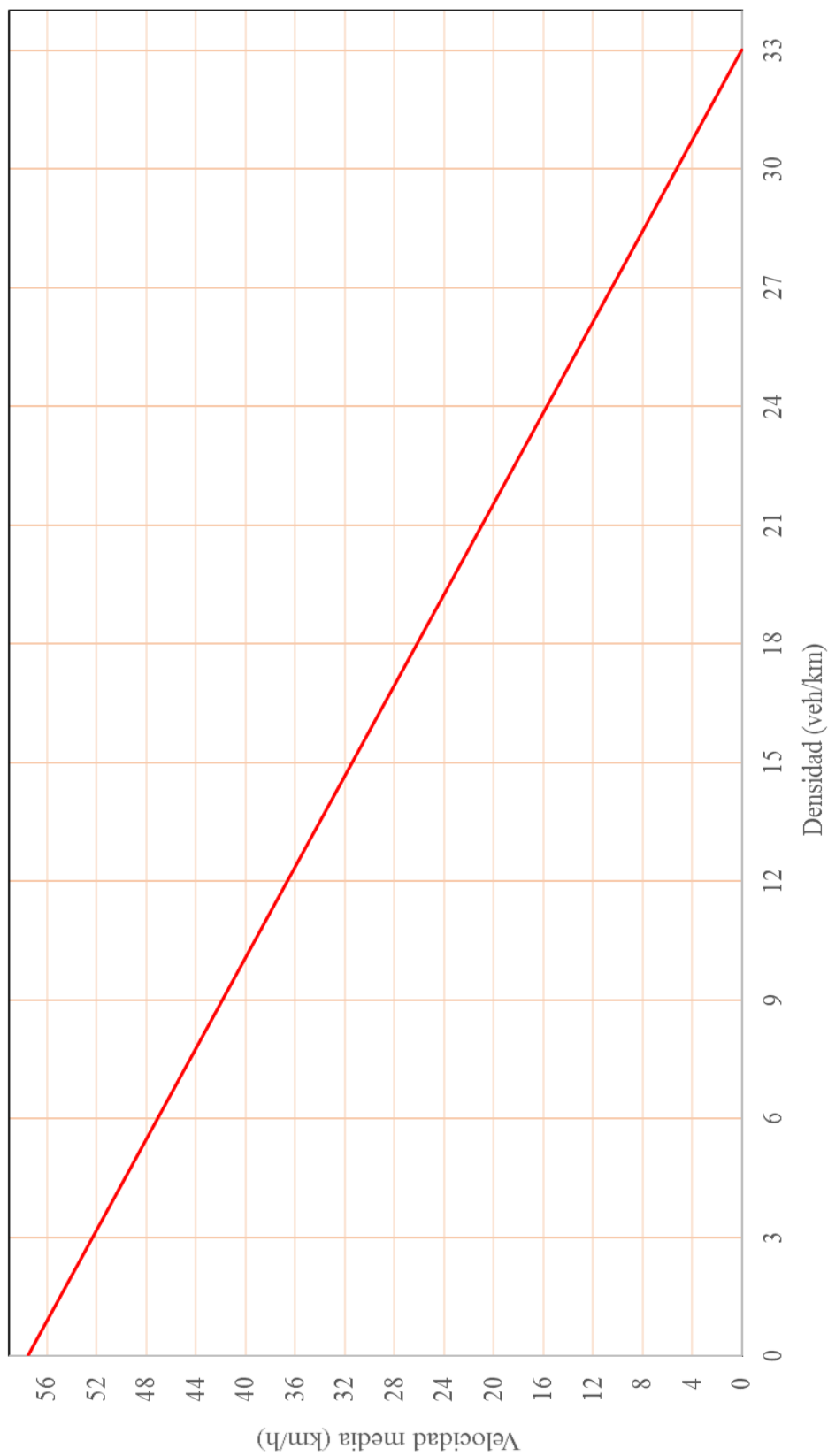
$$q = 57.46 * k - \frac{57.46}{33} * k^2$$

$$q = 33 * \bar{v}_e - \frac{33}{57.46} * \bar{v}_e^2$$

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo seleccionado

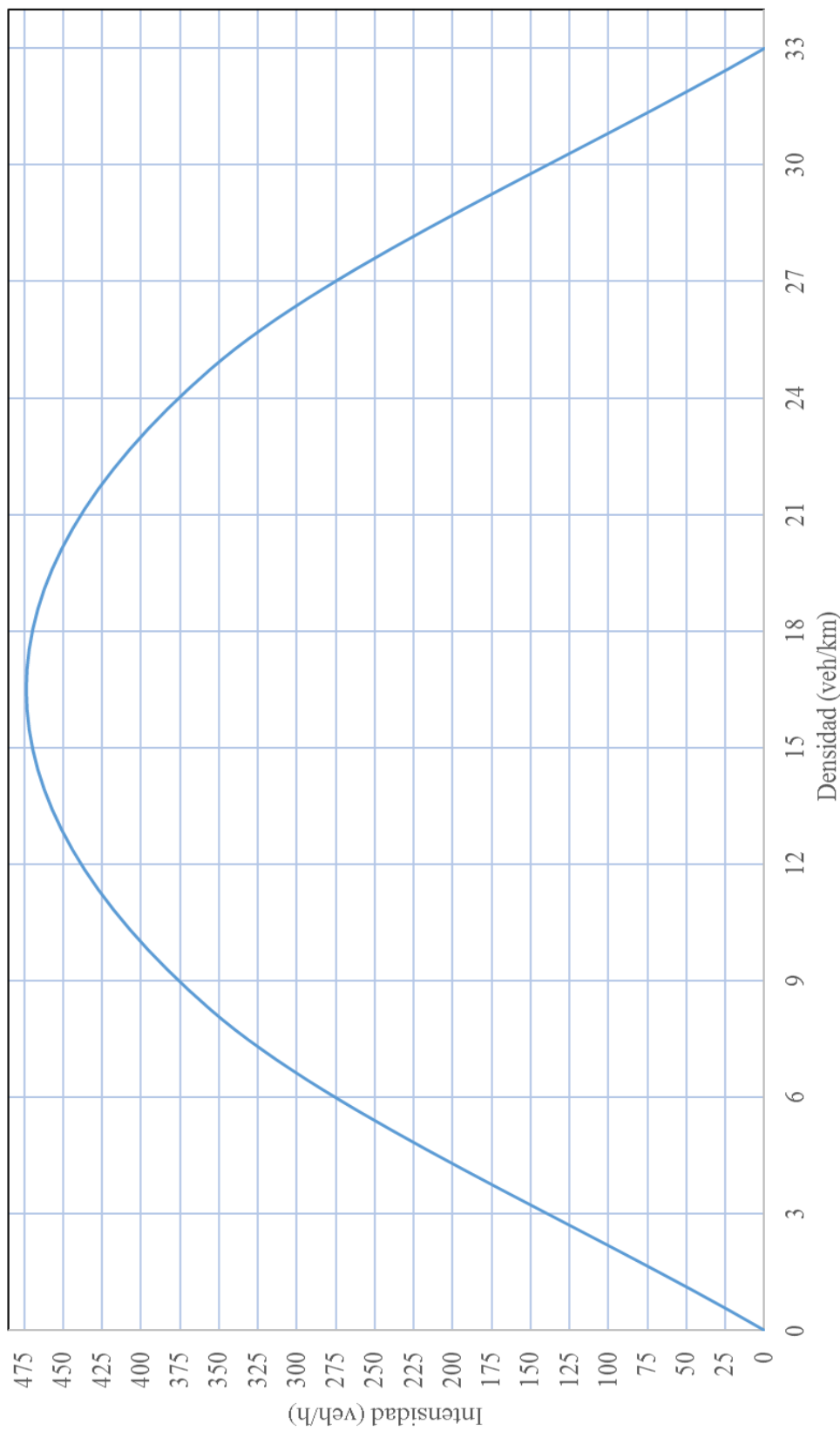
Figura 3.34 relación velocidad – densidad - punto 2 - carril de salida

$$\bar{v}_e = 57.46 - (57.46/33)*k$$



Fuente: Elaboración propia

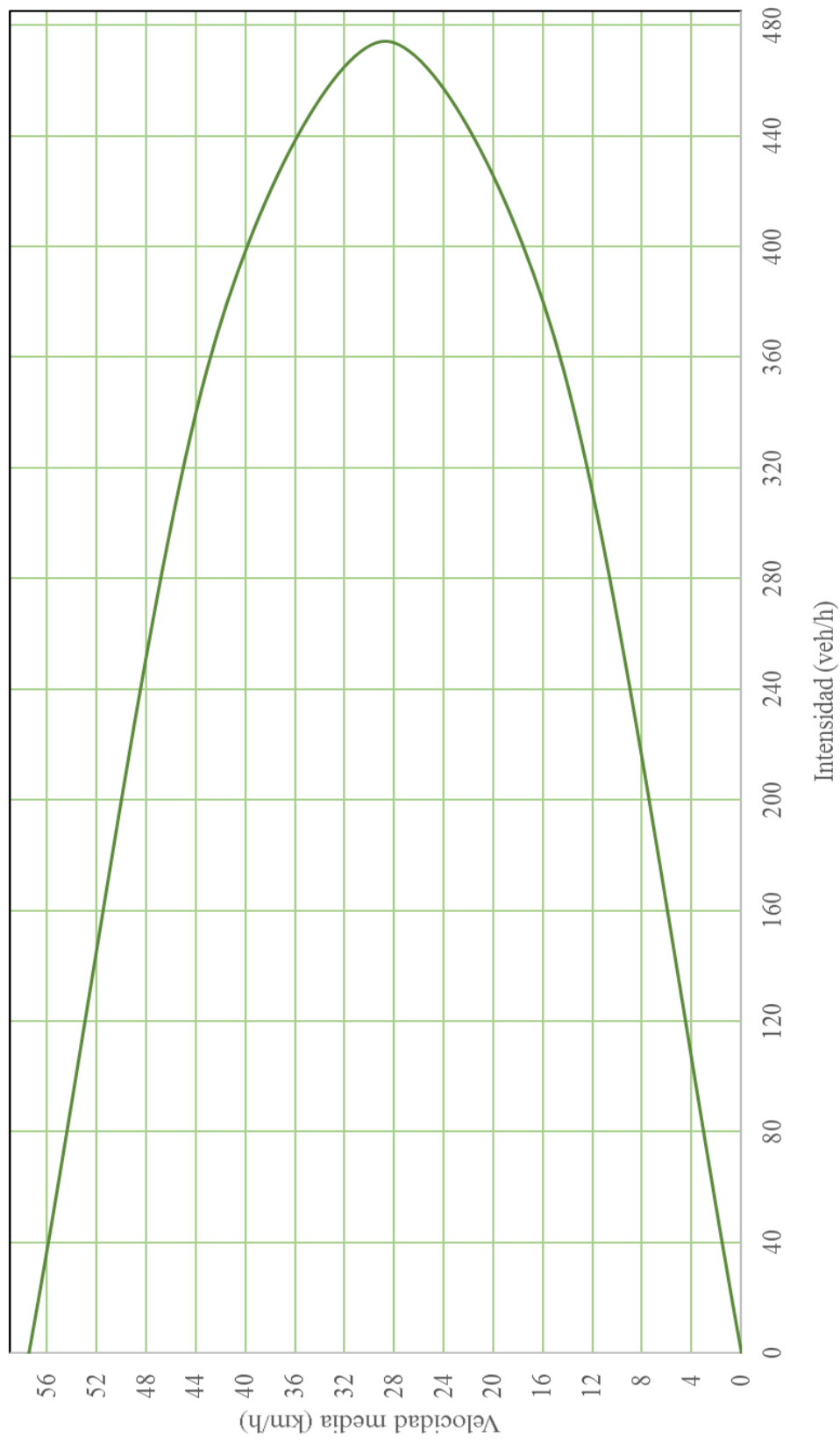
Figura 3.35 relación intensidad – densidad - punto 2 - carril de salida  
 $q = 57.46 * k - (57.46/33) * k^2$



Fuente: Elaboración propia



Figura 3.36 relación velocidad – intensidad - punto 2 - carril de salida  
 $q = 33 \cdot \bar{v} - (33/57.46) \cdot \bar{v}^2$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.52 indicadores de comportamiento para el modelo matemático lineal - punto 2 - carril de salida

Los indicadores de comportamiento obtenidos ya en las ecuaciones del modelo lineal son los siguientes:	
Velocidad a flujo libre	$v_l = 57.46 \text{ (Km/h)}$
Densidad de congestión :	$k_c = 33.00 \text{ (veh/Km)}$
Los indicadores de comportamiento restantes se obtienen a partir de los anteriores	
Intensidad máxima	$q_m = \frac{v_l k_c}{4} \rightarrow 474 \text{ (veh/h)}$
Velocidad a intensidad máxima	$v_m = \frac{v_l}{2} \rightarrow 28.73 \text{ (km/h)}$
Densidad a intensidad máxima	$k_m = \frac{k_c}{2} \rightarrow 16.50 \text{ (veh/km)}$
Intervalo promedio a intensidad máxima	$\bar{h}_m = \frac{1}{q_m} \rightarrow 0.0021 \text{ (h/veh)}$
Espaciamiento promedio a intensidad máxima	$\bar{s}_m = \frac{1}{k_m} \rightarrow 60.61 \text{ (m/veh)}$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.53 condiciones de operación - punto 2 - carril de salida

Definimos características de circulación en función de la densidad de congestamiento, para determinar las condiciones de operación de la vía y la calidad de servicio que ofrece.

- $0.00 \leq k \leq 0.40 k_c$  (flujo estable )
- $0.40 k_c \leq k \leq 0.60 k_c$  (flujo inestable)
- $0.60 k_c \leq k \leq 1.00 k_c$  (flujo forzado)

Si la densidad de congestamiento es  $kc = 64$  (veh/km) las densidades que limitan cada una de las condiciones de operación son :

- $0.4 K_c = 13.20$  (veh/km)
- $0.6 K_c = 19.80$  (veh/km)
- $1.00 K_c = 33.00$  (veh/km)

Las velocidades que corresponden a estas densidades estan dadas por el modelo lineal

$$\bar{v}_e = 57.46 - \frac{57.46}{33} * k$$

- $V_{0.40} = 34.48$  (Km/h)
- $V_{0.60} = 22.98$  (Km/h)
- $V_{1.00} = 0.00$  (Km/h)

Las intensidades que corresponden a estas densidades y velocidades se calculan mediante la ecuación fundamental  $q = v * k$

- $q_{0.40} = 455$  (veh/h)
- $q_{0.60} = 455$  (veh/h)
- $q_{1.00} = 0.00$  (veh/h)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.54 curvas modelo matemático lineal - punto 4 - carril de salida

Relación velocidad media - densidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	63.14
B	5.50	47.36
C	11.00	31.57
D	16.50	15.79
E	22.00	0.00

$$\bar{v}_e = 63.14 - \frac{63.14}{22} * k$$

$$v_l = 63.14 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 22.00 \text{ (veh/km)}$$

Relación intensidad - densidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	0.00
B	5.50	260.45
C	11.00	347.27
D	16.50	260.45
E	22.00	0.00

$$q = 63.14 * k - \frac{63.14}{22} * k^2$$

Relación velocidad media - intensidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	63.14
B	260.45	47.36
C	347.27	31.57
D	260.45	15.79
E	0.00	0.00

$$q = 22\bar{v}_e - \frac{22}{63.14} * \bar{v}_e^2$$

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo seleccionado

Figura 3.37 relación velocidad – densidad - punto 4 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 63.14 - (63.14/22)*k$

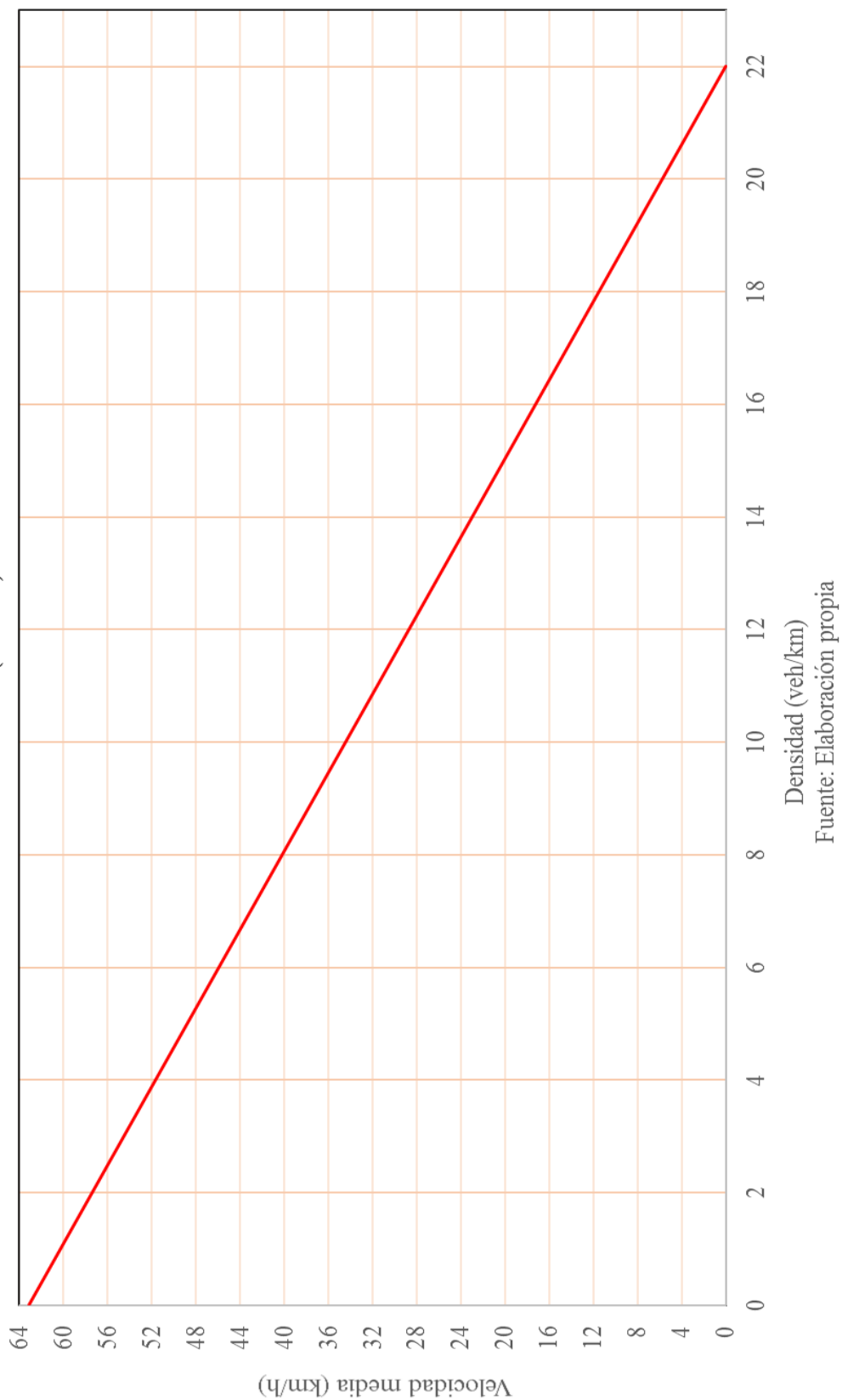
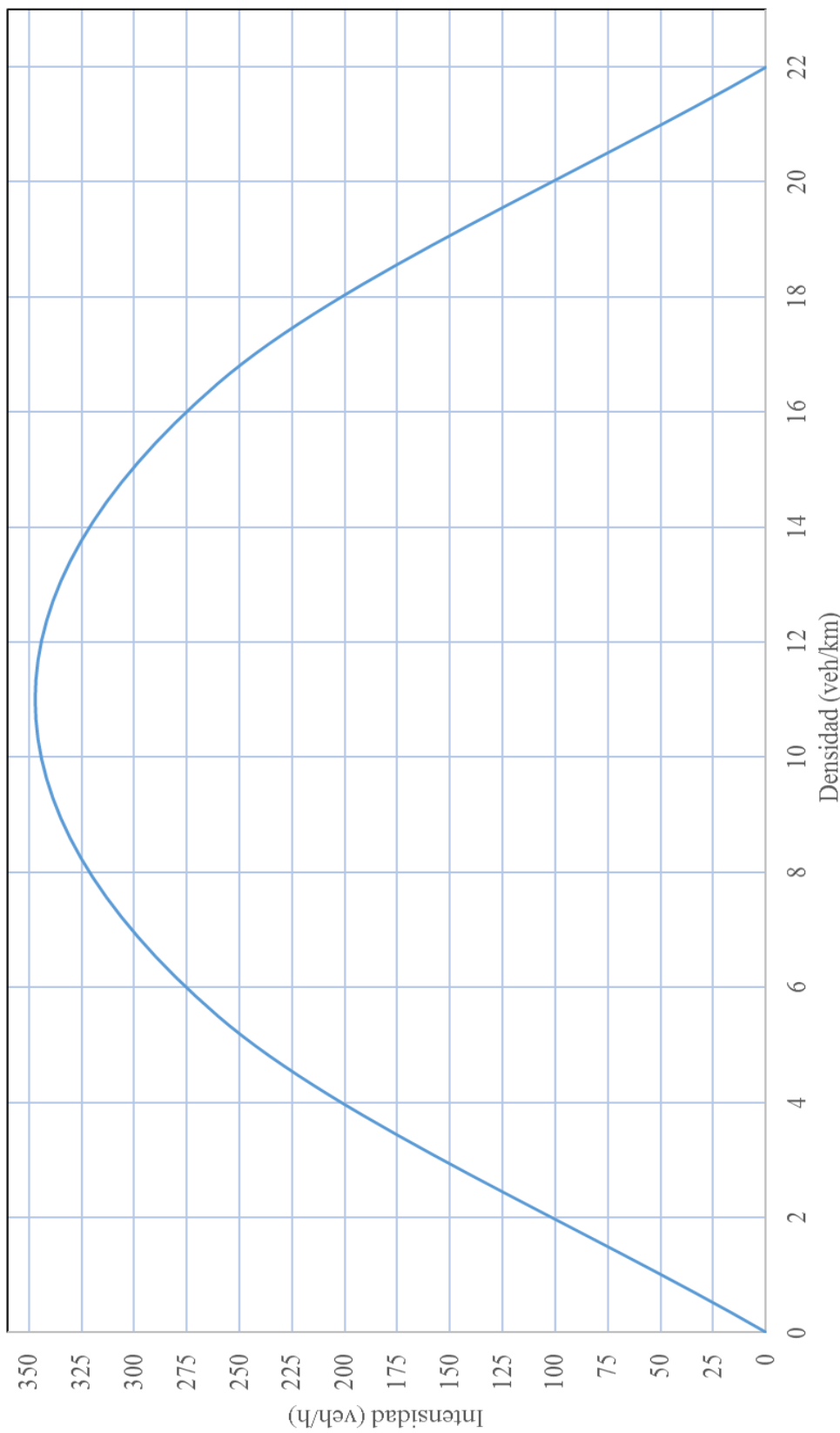


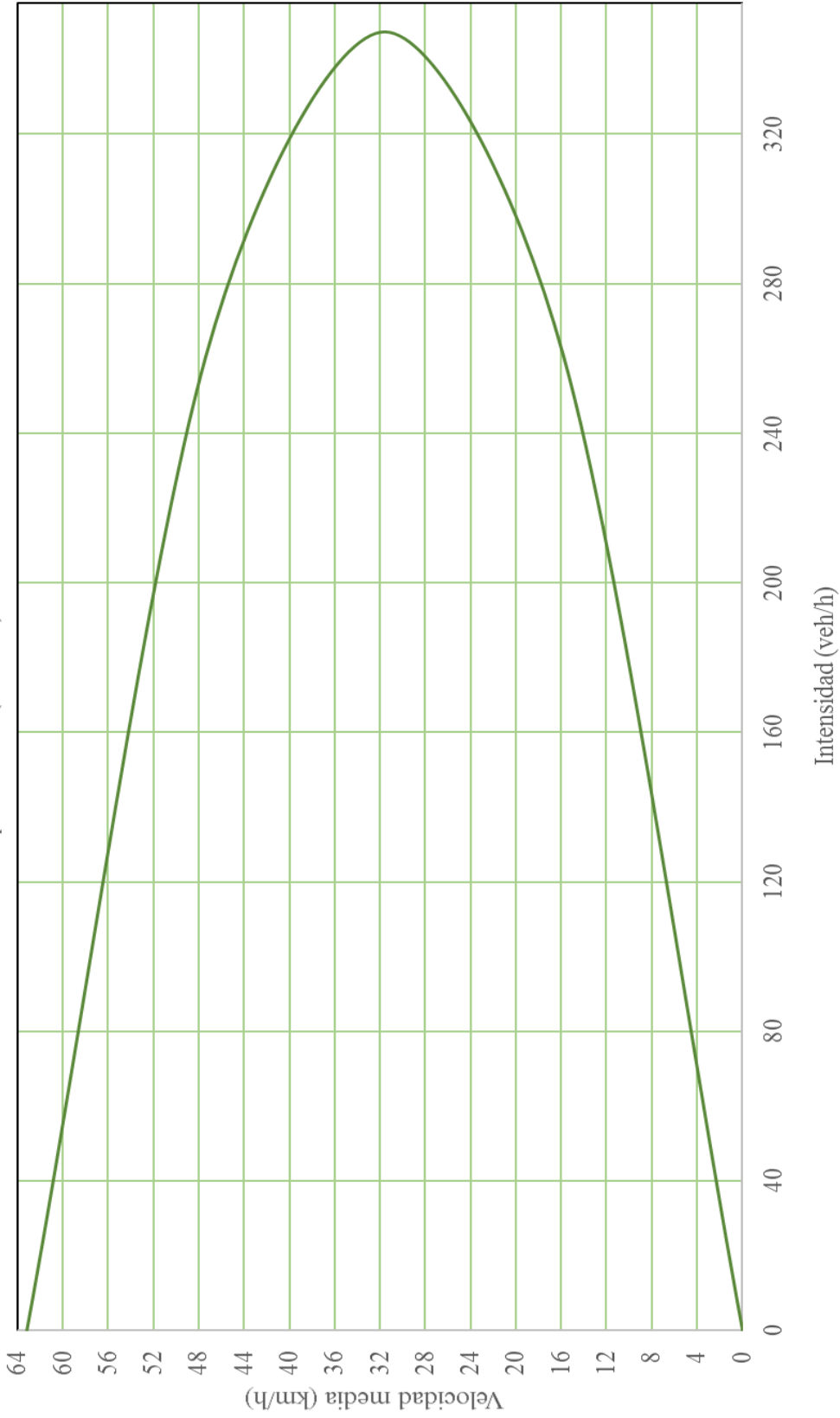
Figura 3.38 relación intensidad – densidad - punto 4 - carril de salida  
 $q = 63.14 * k - (63.14/22) * k^2$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.39 relación velocidad – intensidad - punto 4 - carril de salida

$$q = 22 * v_e - (22/63.14) * v_e^2$$



Intensidad (veh/h)  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.55 indicadores de comportamiento para el modelo matemático lineal - punto 4 - carril de salida

Los indicadores de comportamiento obtenidos ya en las ecuaciones del modelo lineal son los siguientes:	
Velocidad a flujo libre	$v_l = 63.14 \text{ (Km/h)}$
Densidad de congestión :	$k_c = 22.00 \text{ (veh/Km)}$
Los indicadores de comportamiento restantes se obtienen a partir de los anteriores	
Intensidad máxima	$q_m = \frac{v_l k_c}{4} \rightarrow 347 \text{ (veh/h)}$
Velocidad a intensidad máxima	$v_m = \frac{v_l}{2} \rightarrow 31.57 \text{ (km/h)}$
Densidad a intensidad máxima	$k_m = \frac{k_c}{2} \rightarrow 11.00 \text{ (veh/km)}$
Intervalo promedio a intensidad máxima	$\bar{h}_m = \frac{1}{q_m} \rightarrow 0.0029 \text{ (h/veh)}$
Espaciamento promedio a intensidad máxima	$\bar{s}_m = \frac{1}{k_m} \rightarrow 0.0909 \text{ (km/veh)}$
	$\bar{h}_m = 10.37 \text{ (seg/veh)}$
	$\bar{s}_m = 90.91 \text{ (m/veh)}$
Fuente: Elaboración propia	



Tabla 3.56 condiciones de operación - punto 4 - carril de salida

Definimos características de circulación en función de la densidad de congestionamiento, para determinar las condiciones de operación de la vía y la calidad de servicio que ofrece.

- $0.00 \leq k \leq 0.40 k_c$  (flujo estable )
- $0.40 k_c \leq k \leq 0.60 k_c$  (flujo inestable)
- $0.60 k_c \leq k \leq 1.00 k_c$  (flujo forzado)

Si la densidad de congestionamiento es  $kc = 64$  (veh/km) las densidades que limitan cada una de las condiciones de operación son :

- $0.4 K_C = 8.80$  (veh/km)
- $0.6 K_C = 13.20$  (veh/km)
- $1.00 K_C = 22.00$  (veh/km)

Las velocidades que corresponden a estas densidades estan dadas por el modelo lineal

$$\bar{v}_e = 63.14 - \frac{63.14}{22} * k$$

- $V_{0.40} = 37.88$  (Km/h)
- $V_{0.60} = 25.26$  (Km/h)
- $V_{1.00} = 0.00$  (Km/h)

Las intensidades que corresponden a estas densidades y velocidades se calculan mediante la ecuación fundamental  $q = v * k$

- $q_{0.40} = 333$  (veh/h)
- $q_{0.60} = 333$  (veh/h)
- $q_{1.00} = 0.00$  (veh/h)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.57 curvas modelo matemático lineal - punto 5 - carril de entrada

Relación velocidad media – densidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	57.40
B	7.75	43.05
C	15.50	28.70
D	23.25	14.35
E	31.00	0.00

$$\bar{v}_e = 57.40 - \frac{57.40}{31} * k$$

$v_l = 57.40$  (km/h)  
 $k_c = 31.00$  (veh/km)

Relación intensidad - densidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	0.00
B	7.75	333.64
C	15.50	444.85
D	23.25	333.64
E	31.00	0.00

$$q = 57.40 * k - \frac{57.40}{31} * k^2$$

Relación velocidad media - intensidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	57.40
B	333.64	43.05
C	444.85	28.70
D	333.64	14.35
E	0.00	0.00

$$q = 31 * \bar{v}_e - \frac{31}{57.40} * \bar{v}_e^2$$

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo seleccionado

Figura 3.40 relación velocidad – densidad - punto 5 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 57.40 - (57.40/31)*k$

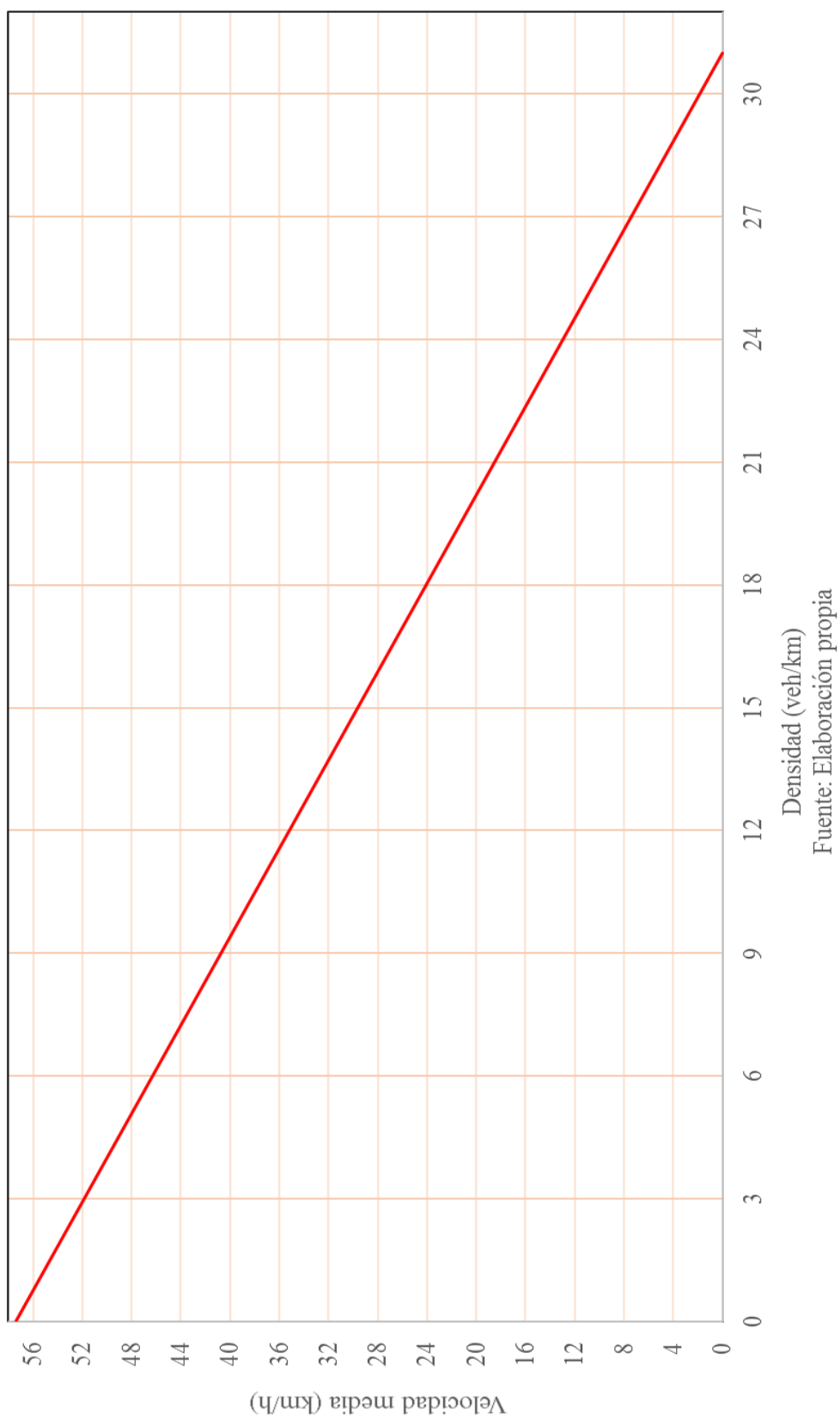
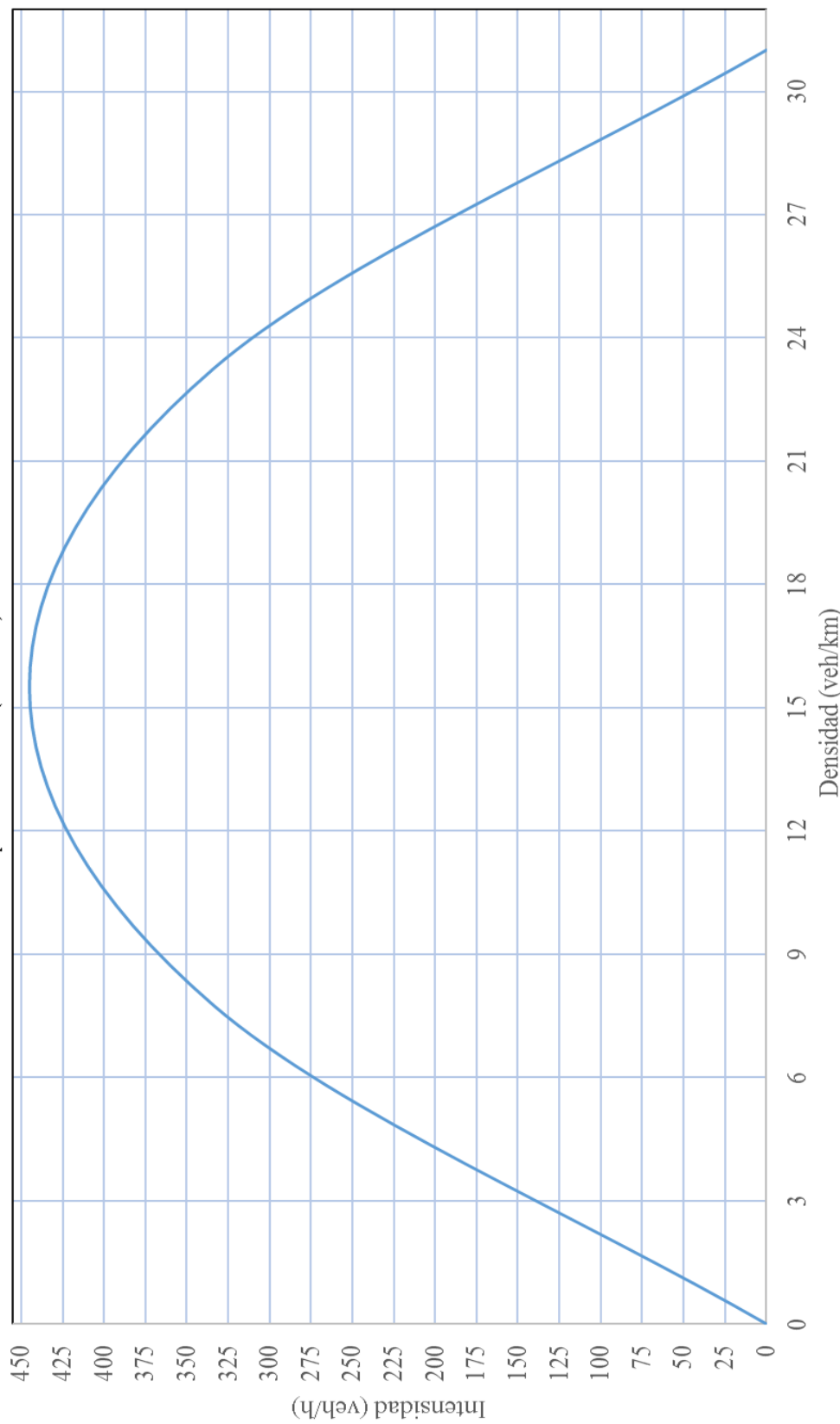


Figura 3.41 relación intensidad – densidad - punto 5 - carril de entrada

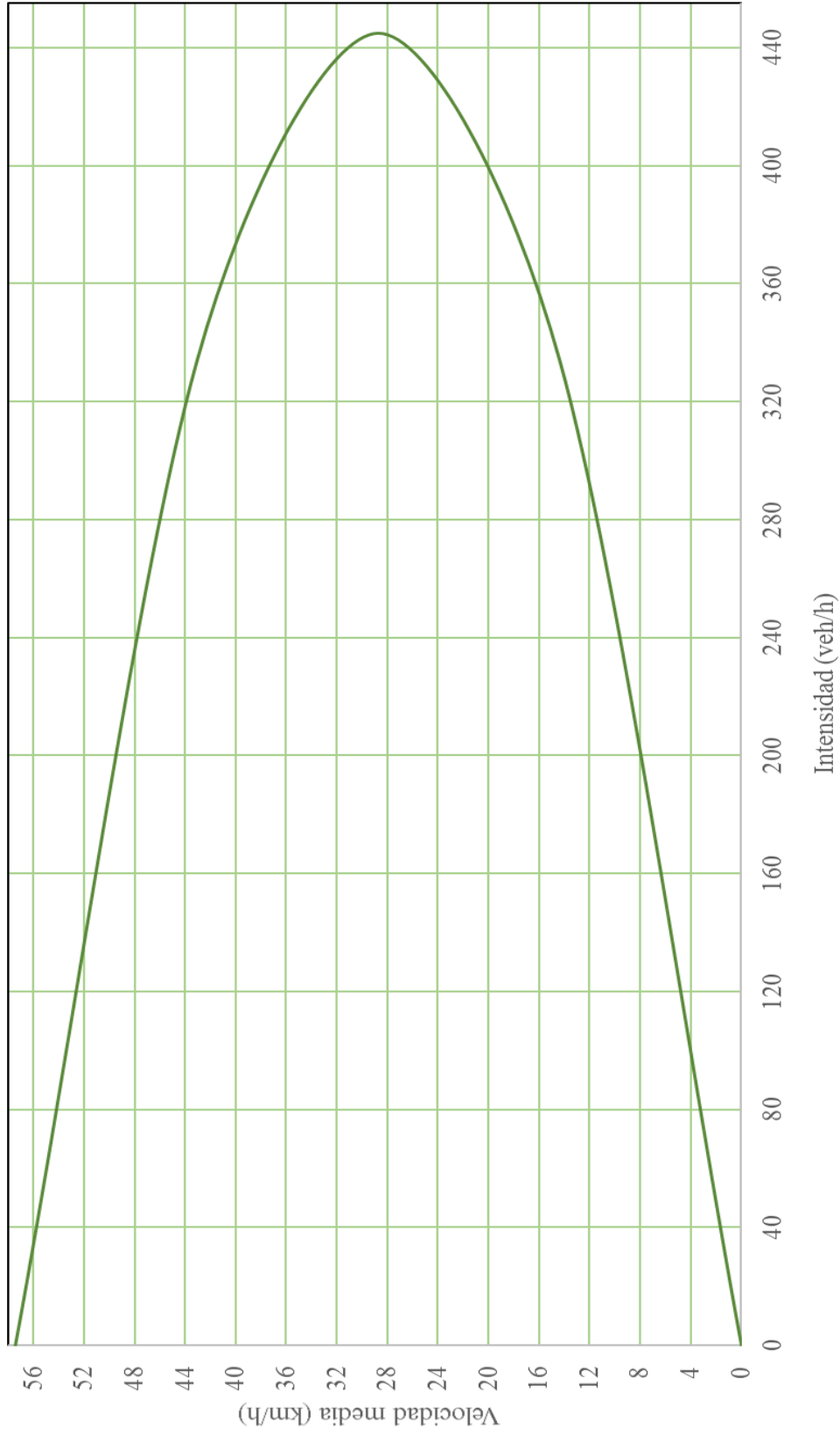
$$q = 57.40 * k - (57.40/31) * k^2$$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.42 relación velocidad – intensidad - punto 5 - carril de entrada

$$q = 31 \cdot v - (31/57.40) \cdot v^2$$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.58 indicadores de comportamiento para el modelo matemático lineal - punto 5 - carril de entrada

Los indicadores de comportamiento obtenidos ya en las ecuaciones del modelo lineal son los siguientes:	
Velocidad a flujo libre	$v_l = 57.40 \text{ (Km/h)}$
Densidad de congestión :	$k_c = 31.00 \text{ (veh/Km)}$
Los indicadores de comportamiento restantes se obtienen a partir de los anteriores	
Intensidad máxima	$q_m = \frac{v_l k_c}{4} \rightarrow 445 \text{ (veh/h)}$
Velocidad a intensidad máxima	$v_m = \frac{v_l}{2} \rightarrow 28.70 \text{ (km/h)}$
Densidad a intensidad máxima	$k_m = \frac{k_c}{2} \rightarrow 15.50 \text{ (veh/km)}$
Intervalo promedio a intensidad máxima	$\bar{h}_m = \frac{1}{q_m} \rightarrow 0.0022 \text{ (h/veh)}$
Espaciamiento promedio a intensidad máxima	$\bar{s}_m = \frac{1}{k_m} \rightarrow 0.0645 \text{ (km/veh)}$
	$\bar{h}_m = 8.09 \text{ (seg/veh)}$
	$\bar{s}_m = 64.52 \text{ (m/veh)}$
Fuente: Elaboración propia	

Tabla 3.59 condiciones de operación - punto 5 - carril de entrada

Definimos características de circulación en función de la densidad de congestamiento, para determinar las condiciones de operación de la vía y la calidad de servicio que ofrece.

- $0.00 \leq k \leq 0.40 k_c$  (flujo estable )
- $0.40 k_c \leq k \leq 0.60 k_c$  (flujo inestable)
- $0.60 k_c \leq k \leq 1.00 k_c$  (flujo forzado)

Si la densidad de congestamiento es  $kc = 64$  (veh/km) las densidades que limitan cada una de las condiciones de operación son :

- $0.4 K_c = 12.40$  (veh/km)
- $0.6 K_c = 18.60$  (veh/km)
- $1.00 K_c = 31.00$  (veh/km)

Las velocidades que corresponden a estas densidades estan dadas por el modelo lineal

- $V_{0.40} = 34.44$  (Km/h)
- $V_{0.60} = 22.96$  (Km/h)
- $V_{1.00} = 0.00$  (Km/h)

$$\bar{v}_e = 57.40 - \frac{57.40}{31} * k$$

Las intensidades que corresponden a estas densidades y velocidades se calculan mediante la ecuación fundamental  $q = v * k$

- $q_{0.40} = 427$  (veh/h)
- $q_{0.60} = 427$  (veh/h)
- $q_{1.00} = 0.00$  (veh/h)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.60 curvas modelo matemático lineal - punto 5 - carril de salida

Relación velocidad media – densidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	58.71
B	6.50	44.03
C	13.00	29.36
D	19.50	14.68
E	26.00	0.00

$$\bar{v}_e = 58.71 - \frac{58.71}{26} * k$$

$$v_l = 58.71 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 26.00 \text{ (veh/km)}$$

Relación intensidad - densidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	0.00
B	6.50	286.21
C	13.00	381.62
D	19.50	286.21
E	26.00	0.00

$$q = 58.71 * k - \frac{58.71}{26} * k^2$$

Relación velocidad media - intensidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	58.71
B	286.21	44.03
C	381.62	29.36
D	286.21	14.68
E	0.00	0.00

$$q = 26 \cdot \bar{v}_e - \frac{26}{58.71} * \bar{v}_e^2$$

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo seleccionado



Figura 3.43 relación velocidad – densidad - punto 5 - carril de salida  
 $\bar{v}_e = 58.71 - (58.71/26)*k$

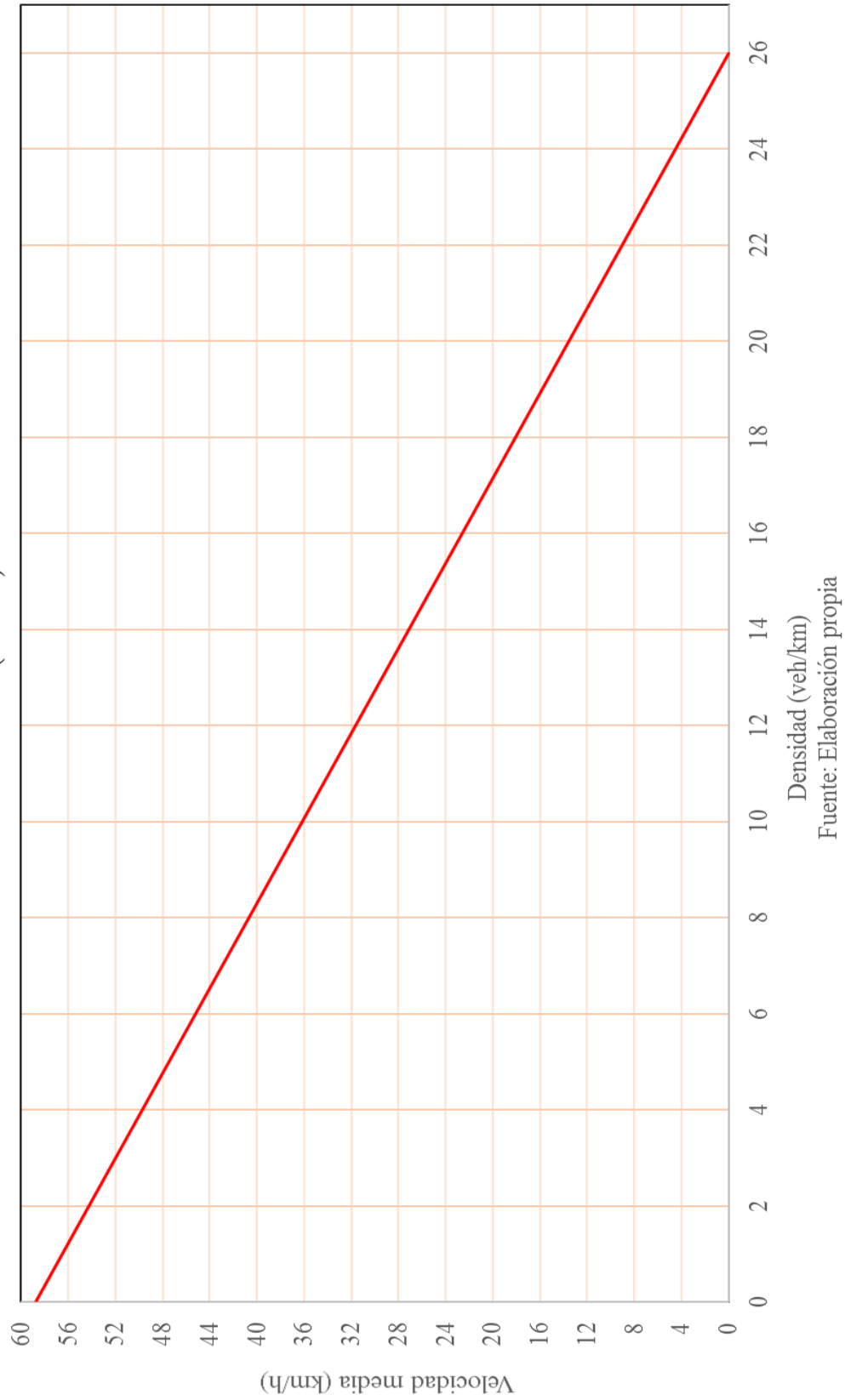
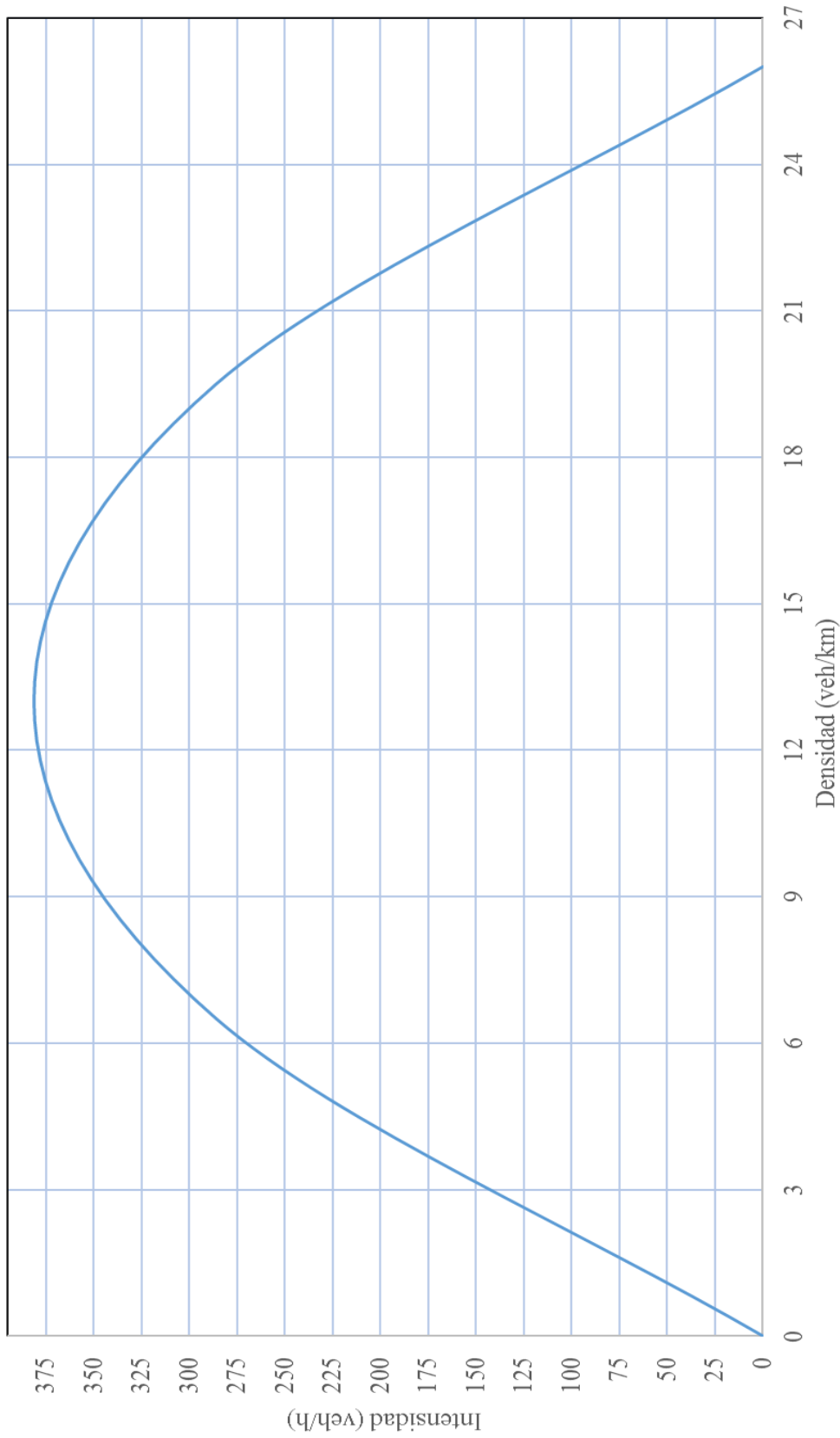


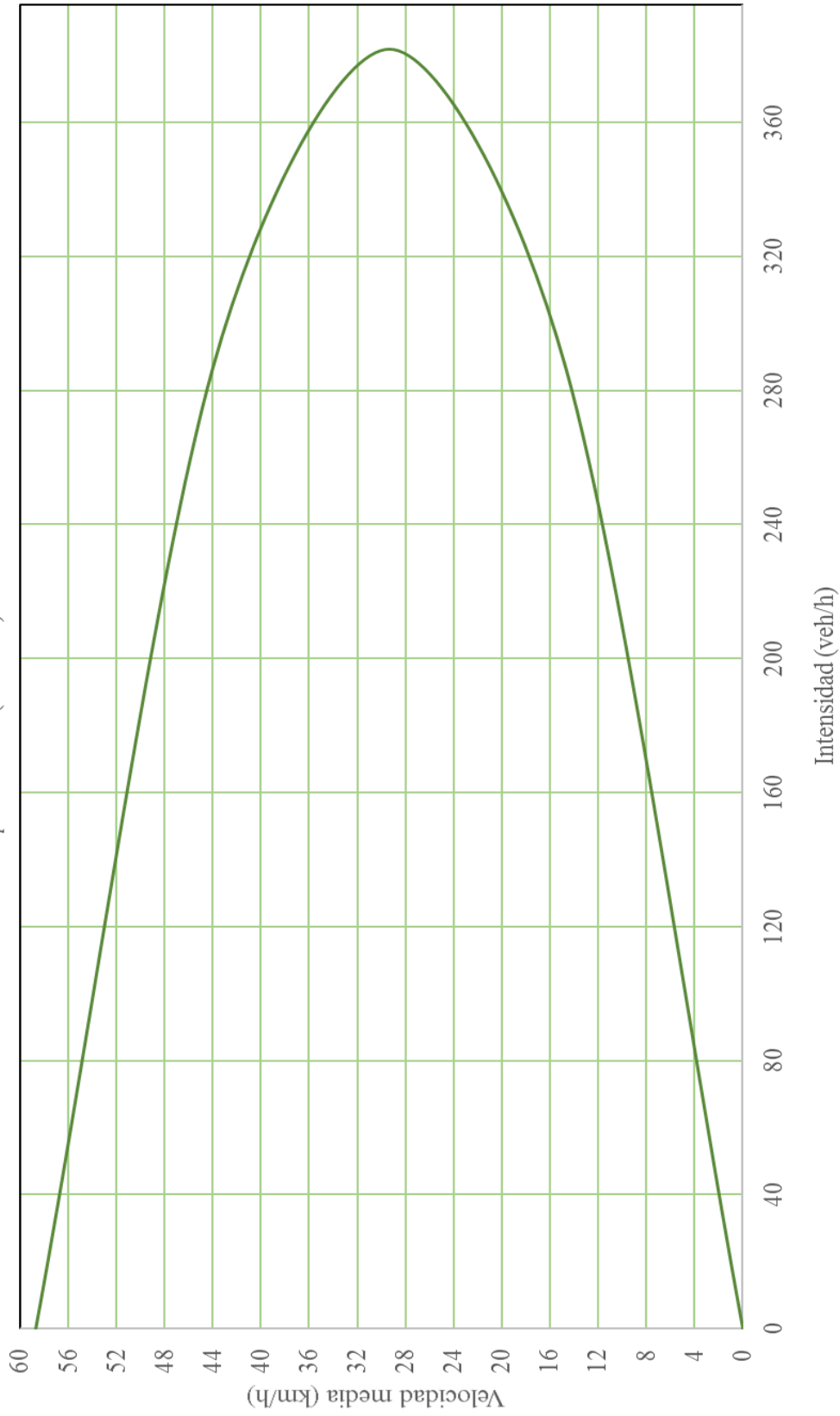
Figura 3.44 relación intensidad – densidad - punto 5 - carril de salida  
 $q = 58.71 * k - (58.71/26) * k^2$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.45 relación velocidad – intensidad - punto 5 - carril de salida

$$q = 26 * \bar{v}e - (26/58.71) * \bar{v}e^2$$



Intensidad (veh/h)  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.61 indicadores de comportamiento para el modelo matemático lineal - punto 5 - carril de salida

Los indicadores de comportamiento obtenidos ya en las ecuaciones del modelo lineal son los siguientes:	
Velocidad a flujo libre	$v_l = 58.71 \text{ (Km/h)}$
Densidad de congestión :	$k_c = 26.00 \text{ (veh/Km)}$
Los indicadores de comportamiento restantes se obtienen a partir de los anteriores	
Intensidad máxima	$q_m = \frac{v_l k_c}{4} \rightarrow 382 \text{ (veh/h)}$
Velocidad a intensidad máxima	$v_m = \frac{v_l}{2} \rightarrow 29.36 \text{ (km/h)}$
Densidad a intensidad máxima	$k_m = \frac{k_c}{2} \rightarrow 13.00 \text{ (veh/km)}$
Intervalo promedio a intensidad máxima	$\bar{h}_m = \frac{1}{q_m} \rightarrow 0.0026 \text{ (h/veh)}$
Espaciamiento promedio a intensidad máxima	$\bar{s}_m = \frac{1}{k_m} \rightarrow 0.0769 \text{ (km/veh)}$
	$\bar{h}_m = 9.43 \text{ (seg/veh)}$
	$\bar{s}_m = 76.92 \text{ (m/veh)}$
Fuente: Elaboración propia	

Tabla 3.62 condiciones de operación - punto 5 - carril de salida

Definimos características de circulación en función de la densidad de congestamiento, para determinar las condiciones de operación de la vía y la calidad de servicio que ofrece.

- $0.00 \leq k \leq 0.40 k_c$  (flujo estable )
- $0.40 k_c \leq k \leq 0.60 k_c$  (flujo inestable)
- $0.60 k_c \leq k \leq 1.00 k_c$  (flujo forzado)

Si la densidad de congestamiento es  $kc = 64$  (veh/km) las densidades que limitan cada una de las condiciones de operación son :

- $0.4 K_c = 10.40$  (veh/km)
- $0.6 K_c = 15.60$  (veh/km)
- $1.00 K_c = 26.00$  (veh/km)

Las velocidades que corresponden a estas densidades están dadas por el modelo lineal

$$\bar{v}_e = 58.71 - \frac{58.71}{26} * k$$

- $V_{0.40} = 35.23$  (Km/h)
- $V_{0.60} = 23.48$  (Km/h)
- $V_{1.00} = 0.00$  (Km/h)

Las intensidades que corresponden a estas densidades y velocidades se calculan mediante la ecuación fundamental  $q = v * k$

- $q_{0.40} = 366$  (veh/h)
- $q_{0.60} = 366$  (veh/h)
- $q_{1.00} = 0.00$  (veh/h)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.63 curvas modelo matemático lineal - punto 6 - carril de entrada

Relación velocidad media - densidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	49.72
B	5.00	37.29
C	10.00	24.86
D	15.00	12.43
E	20.00	0.00

$$\bar{v}_e = 49.72 - \frac{49.72}{20} * k$$

$$v_l = 49.72 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 20.00 \text{ (veh/km)}$$

Relación intensidad - densidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	0.00
B	5.00	186.45
C	10.00	248.60
D	15.00	186.45
E	20.00	0.00

$$q = 49.72 * k - \frac{49.72}{20} * k^2$$

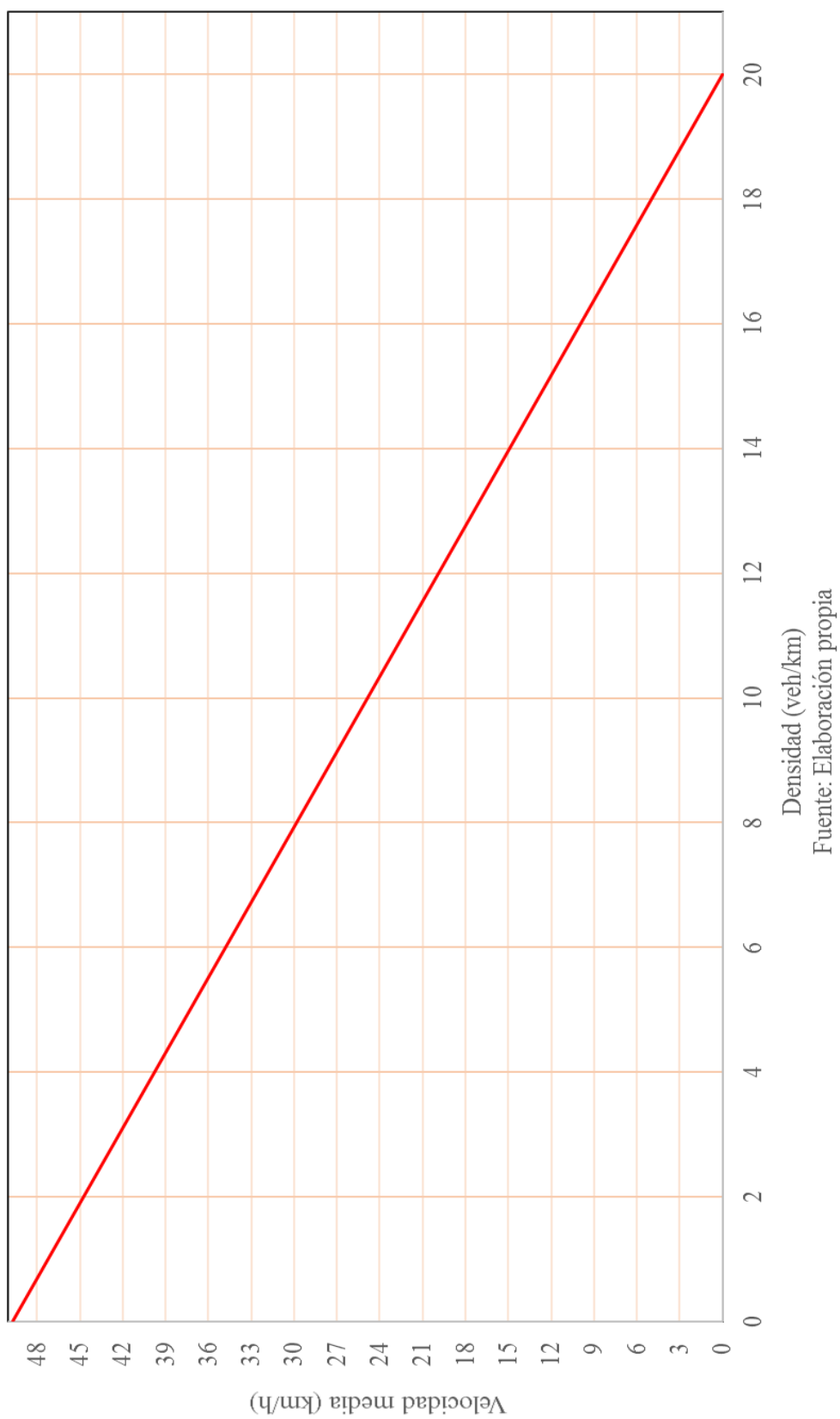
Relación velocidad media - intensidad

Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	49.72
B	186.45	37.29
C	248.60	24.86
D	186.45	12.43
E	0.00	0.00

$$q = 20 * \bar{v}_e - \frac{20}{49.72} * \bar{v}_e^2$$

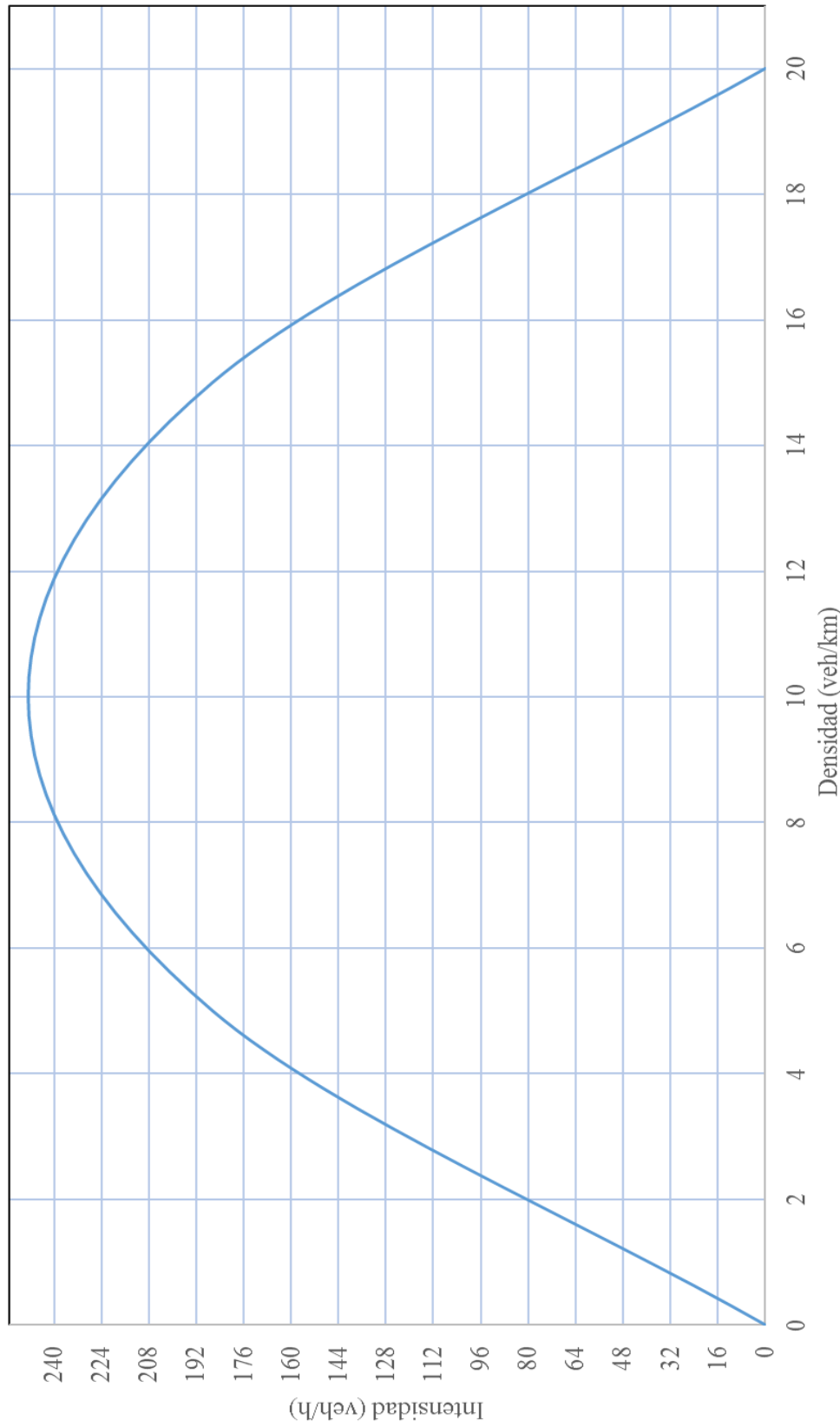
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo seleccionado

Figura 3.46 relación velocidad – densidad - punto 6 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 49.72 - (49.72/20)*k$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.47 relación intensidad – densidad - punto 6 - carril de entrada  
 $q = 49.72 * k - (49.72/20) * k^2$

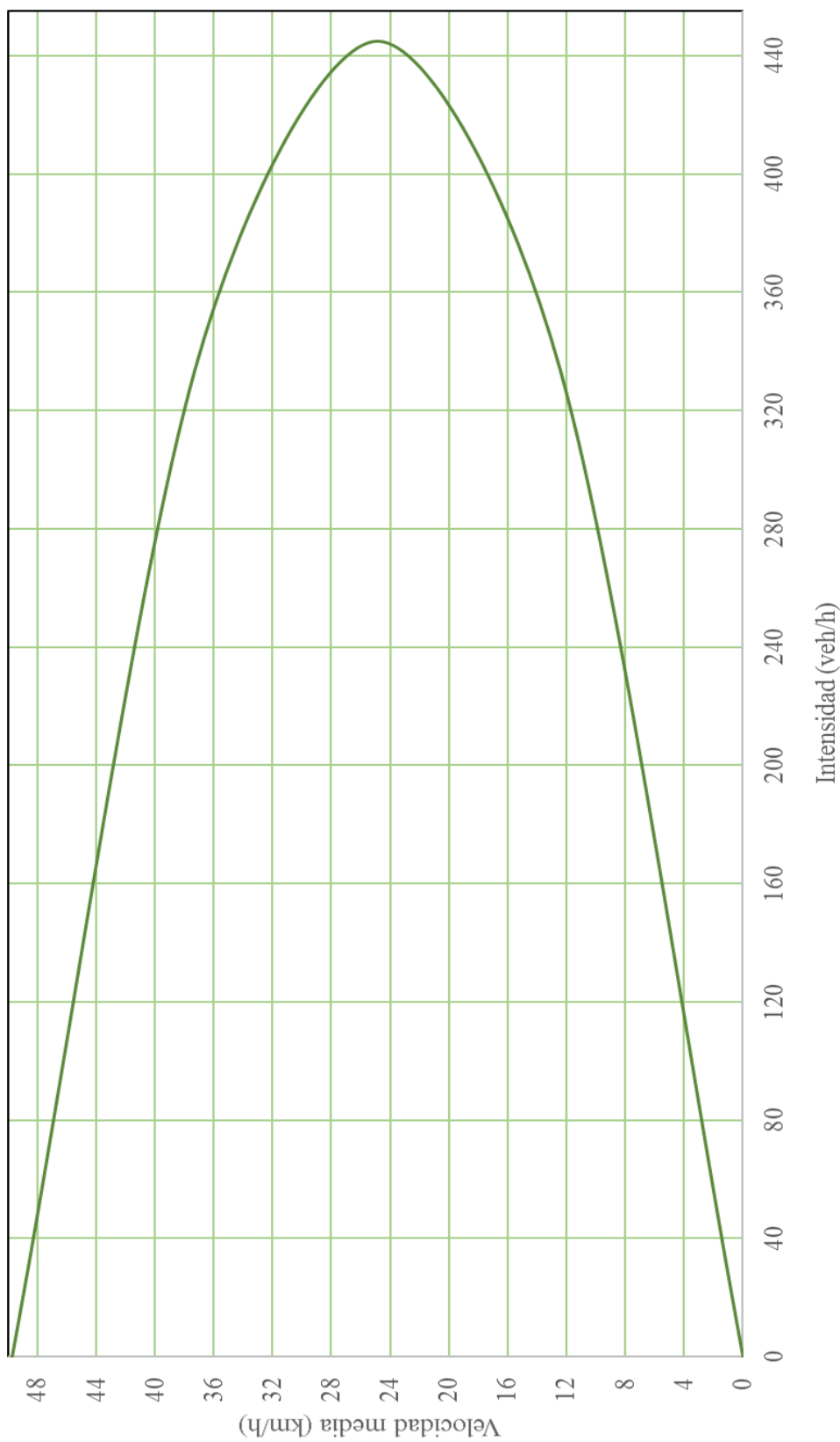


Fuente: Elaboración propia



Figura 3.48 relación velocidad – intensidad - punto 6 - carril de entrada

$$q = 20 \cdot \bar{v}e - (20/49.72) \cdot \bar{v}e^2$$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.64 indicadores de comportamiento para el modelo matemático lineal - punto 6 - carril de entrada

Los indicadores de comportamiento obtenidos ya en las ecuaciones del modelo lineal son los siguientes:	
Velocidad a flujo libre	$v_l = 49.72$ (Km/h)
Densidad de congestión :	$k_c = 20.00$ (veh/Km)
Los indicadores de comportamiento restantes se obtienen a partir de los anteriores	
Intensidad máxima	$q_m = \frac{v_l k_c}{4} \rightarrow 249$ (veh/h)
Velocidad a intensidad máxima	$v_m = \frac{v_l}{2} \rightarrow 24.86$ (km/h)
Densidad a intensidad máxima	$k_m = \frac{k_c}{2} \rightarrow 10.00$ (veh/km)
Intervalo promedio a intensidad máxima	$\bar{h}_m = \frac{1}{q_m} \rightarrow 0.0040$ (h/veh)
Espaciamiento promedio a intensidad máxima	$\bar{s}_m = \frac{1}{k_m} \rightarrow 0.1000$ (km/veh)
	$\bar{h}_m = 14.48$ (seg/veh)
	$\bar{s}_m = 100.00$ (m/veh)
Fuente: Elaboración propia	

Tabla 3.65 condiciones de operación - punto 6 - carril de entrada

Definimos características de circulación en función de la densidad de congestionamiento, para determinar las condiciones de operación de la vía y la calidad de servicio que ofrece.

- $0.00 \leq k \leq 0.40 k_c$  (flujo estable )
- $0.40 k_c \leq k \leq 0.60 k_c$  (flujo inestable)
- $0.60 k_c \leq k \leq 1.00 k_c$  (flujo forzado)

Si la densidad de congestionamiento es  $kc = 64$  (veh/km) las densidades que limitan cada una de las condiciones de operación son :

- $0.4 K_c = 8.00$  (veh/km)
- $0.6 K_c = 12.00$  (veh/km)
- $1.00 K_c = 20.00$  (veh/km)

Las velocidades que corresponden a estas densidades estan dadas por el modelo lineal

- $V_{0.40} = 29.83$  (Km/h)
- $V_{0.60} = 19.89$  (Km/h)
- $V_{1.00} = 0.00$  (Km/h)

$$\bar{v}_e = 49.72 - \frac{49.72}{20} * k$$

Las intensidades que corresponden a estas densidades y velocidades se calculan mediante la ecuación fundamental  $q = v * k$

- $q_{0.40} = 239$  (veh/h)
- $q_{0.60} = 239$  (veh/h)
- $q_{1.00} = 0.00$  (veh/h)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.66 curvas modelo matemático lineal - punto 7 - carril de entrada

Relación velocidad media - densidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	84.40
B	8.75	63.30
C	17.50	42.20
D	26.25	21.10
E	35.00	0.00

$$\bar{v}_e = 84.40 - \frac{84.40}{35} * k$$

$$v_l = 84.40 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 35.00 \text{ (veh/km)}$$

Relación intensidad - densidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	0.00
B	8.75	553.88
C	17.50	738.50
D	26.25	553.88
E	35.00	0.00

$$q = 84.40 * k - \frac{84.40}{35} * k^2$$

Relación velocidad media - intensidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	84.40
B	553.88	63.30
C	738.50	42.20
D	553.88	21.10
E	0.00	0.00

$$q = 35 * \bar{v}_e - \frac{35}{35} * \bar{v}_e^2$$

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo seleccionado

Figura 3.49 relación velocidad – densidad - punto 7 - carril de entrada  
 $\bar{v}_e = 84.40 - (84.40/35)*k$

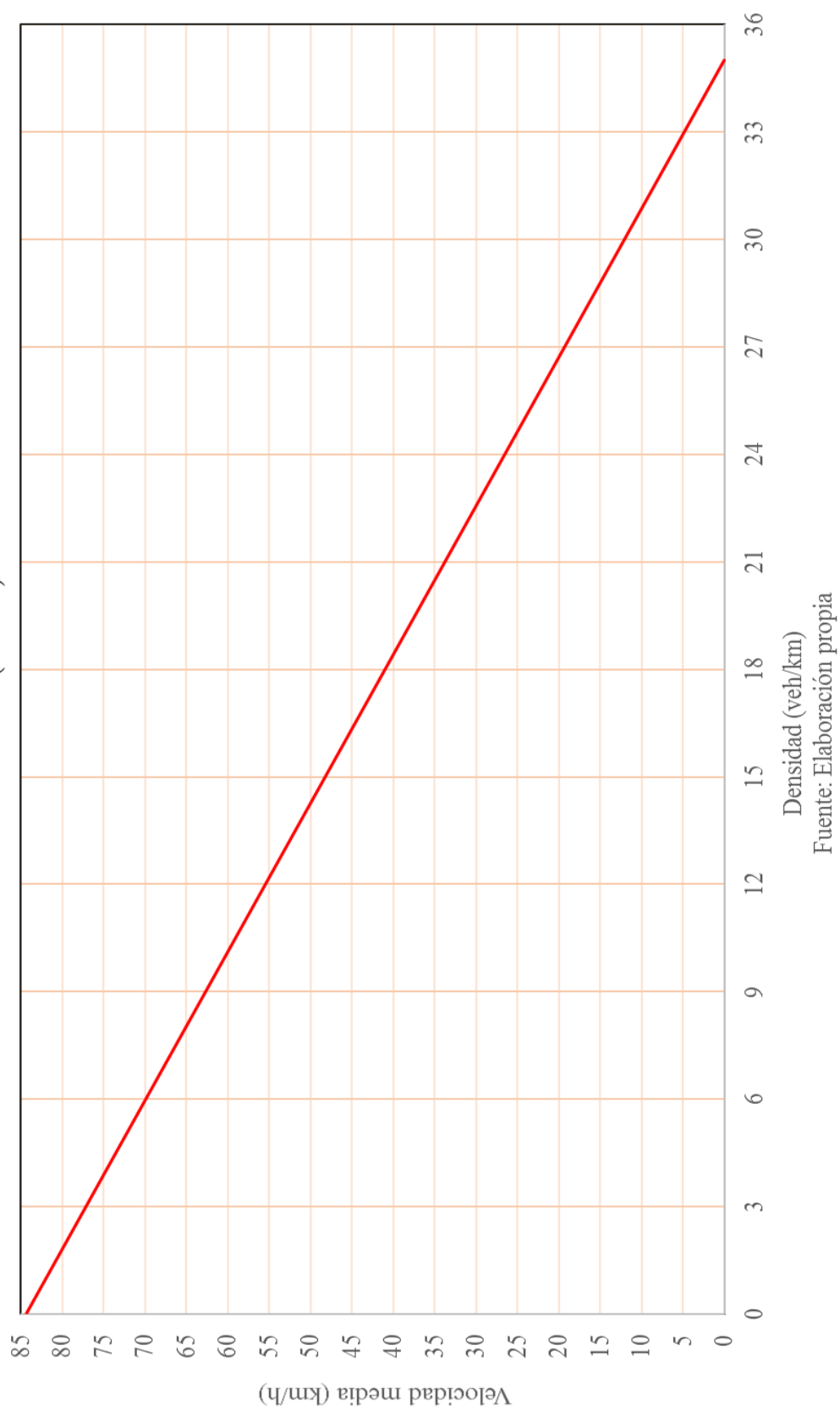
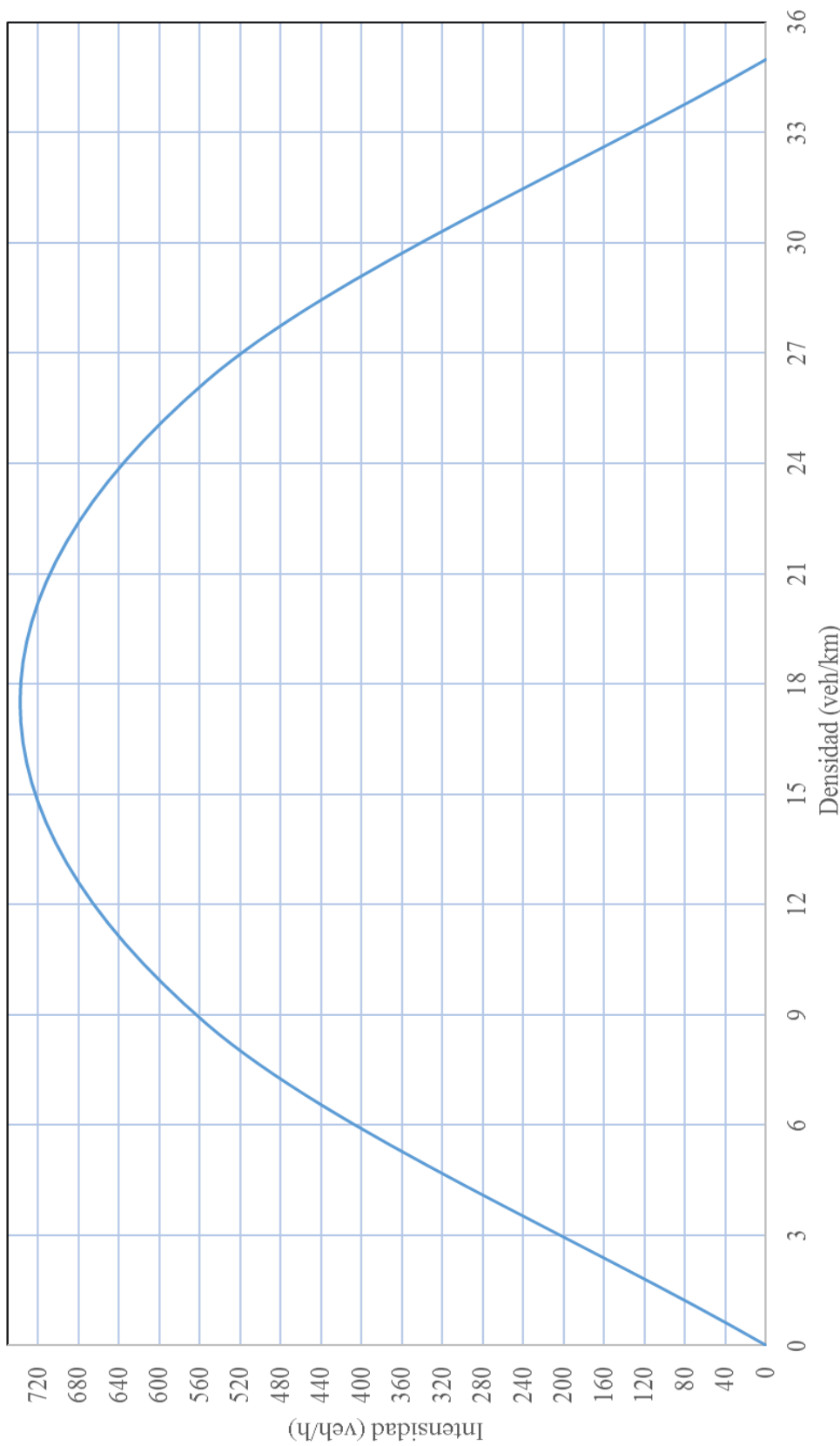


Figura 3.50 relación intensidad – densidad - punto 7 - carril de entrada  
 $q = 84.40 * k - (84.40/35) * k^2$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.51 relación velocidad – intensidad - punto 7 - carril de entrada

$$q = 35 * v_e - (35/84.40) * v_e^2$$

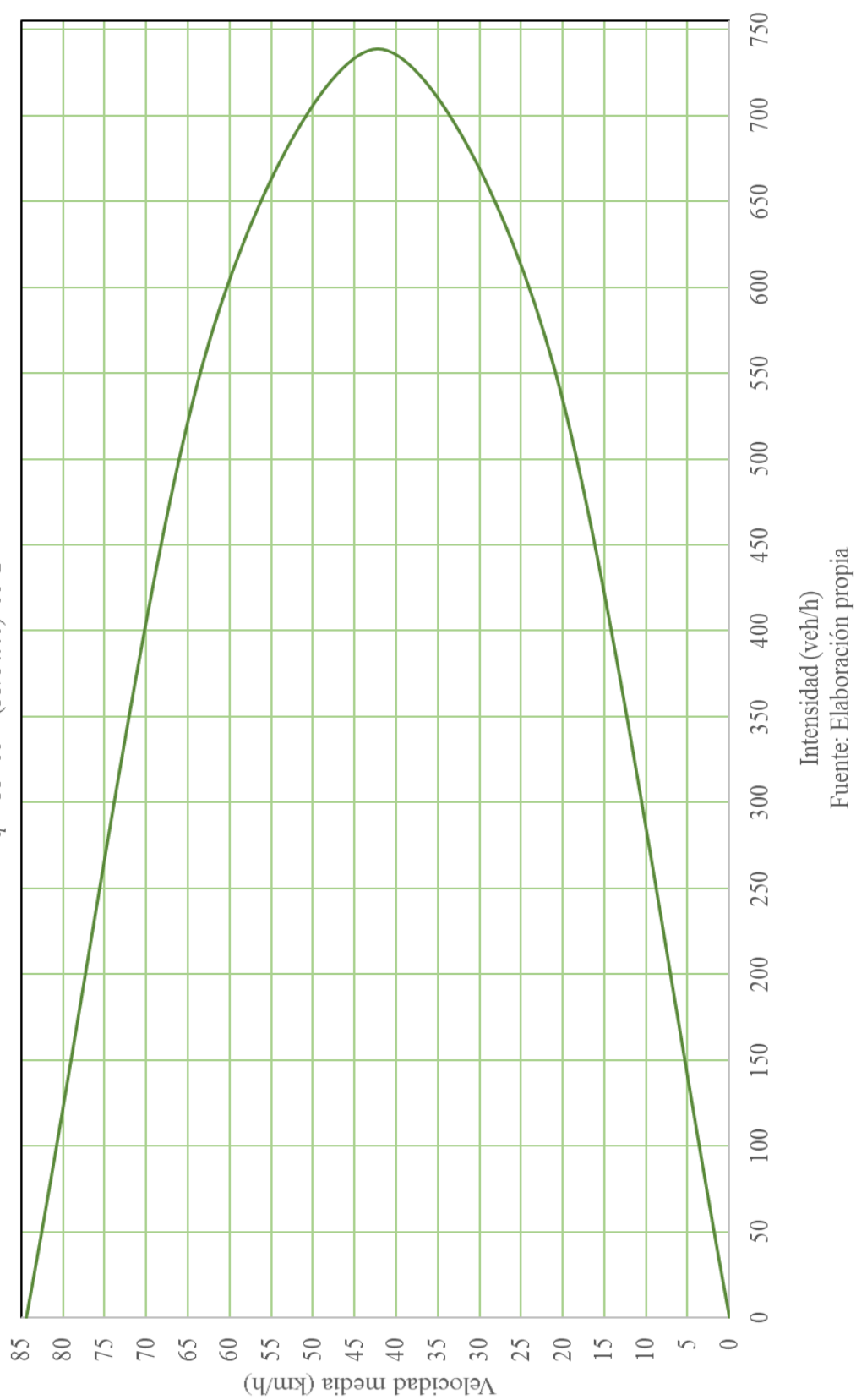


Tabla 3.67 indicadores de comportamiento para el modelo matemático lineal - punto 7 - carril de entrada

Los indicadores de comportamiento obtenidos ya en las ecuaciones del modelo lineal son los siguientes:

Velocidad a flujo libre

$$v_l = 84.40 \text{ (Km/h)}$$

Densidad de congestión :

$$k_c = 35.00 \text{ (veh/Km)}$$

Los indicadores de comportamiento restantes se obtienen a partir de los anteriores

Intensidad máxima

$$q_m = \frac{v_l k_c}{4} \rightarrow$$

$$q_m = 739 \text{ (veh/h)}$$

Velocidad a intensidad máxima

$$v_m = \frac{v_l}{2} \rightarrow$$

$$v_m = 42.20 \text{ (km/h)}$$

Densidad a intensidad máxima

$$k_m = \frac{k_c}{2} \rightarrow$$

$$k_m = 17.50 \text{ (veh/km)}$$

Intervalo promedio a intensidad máxima

$$\bar{h}_m = \frac{1}{q_m} \rightarrow$$

$$\bar{h}_m = 0.0014 \text{ (h/veh)}$$

$$\bar{h}_m = 4.87 \text{ (seg/veh)}$$

Espaciamiento promedio a intensidad máxima

$$\bar{s}_m = \frac{1}{k_m} \rightarrow$$

$$\bar{s}_m = 0.0571 \text{ (km/veh)}$$

$$\bar{s}_m = 57.14 \text{ (m/veh)}$$

Fuente: Elaboración propia



Tabla 3.68 condiciones de operación - punto 7 - carril de entrada

Definimos características de circulación en función de la densidad de congestamiento, para determinar las condiciones de operación de la vía y la calidad de servicio que ofrece.

- $0.00 \leq k \leq 0.40 k_c$  (flujo estable )
- $0.40 k_c \leq k \leq 0.60 k_c$  (flujo inestable)
- $0.60 k_c \leq k \leq 1.00 k_c$  (flujo forzado)

Si la densidad de congestamiento es  $kc = 64$  (veh/km) las densidades que limitan cada una de las condiciones de operación son :

- $0.4 K_c = 14.00$  (veh/km)
- $0.6 K_c = 21.00$  (veh/km)
- $1.00 K_c = 35.00$  (veh/km)

Las velocidades que corresponden a estas densidades están dadas por el modelo lineal

- $V_{0.40} = 50.64$  (Km/h)
- $V_{0.60} = 33.76$  (Km/h)
- $V_{1.00} = 0.00$  (Km/h)

$$\bar{v}_e = 84.40 - \frac{84.40}{35} * k$$

Las intensidades que corresponden a estas densidades y velocidades se calculan mediante la ecuación fundamental  $q = v * k$

- $q_{0.40} = 709$  (veh/h)
- $q_{0.60} = 709$  (veh/h)
- $q_{1.00} = 0.00$  (veh/h)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.69 curvas modelo matemático lineal - punto 7 - carril de salida

Relación velocidad media - densidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	82.82
B	9.00	62.12
C	18.00	41.41
D	27.00	20.71
E	36.00	0.00

$$\bar{v}_e = 82.82 - \frac{82.82}{36} * k$$

$$v_l = 82.82 \text{ (km/h)}$$

$$k_c = 36.00 \text{ (veh/km)}$$

Relación intensidad - densidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	0.00
B	9.00	559.04
C	18.00	745.38
D	27.00	559.04
E	36.00	0.00

$$q = 82.82 * k - \frac{82.82}{36} * k^2$$

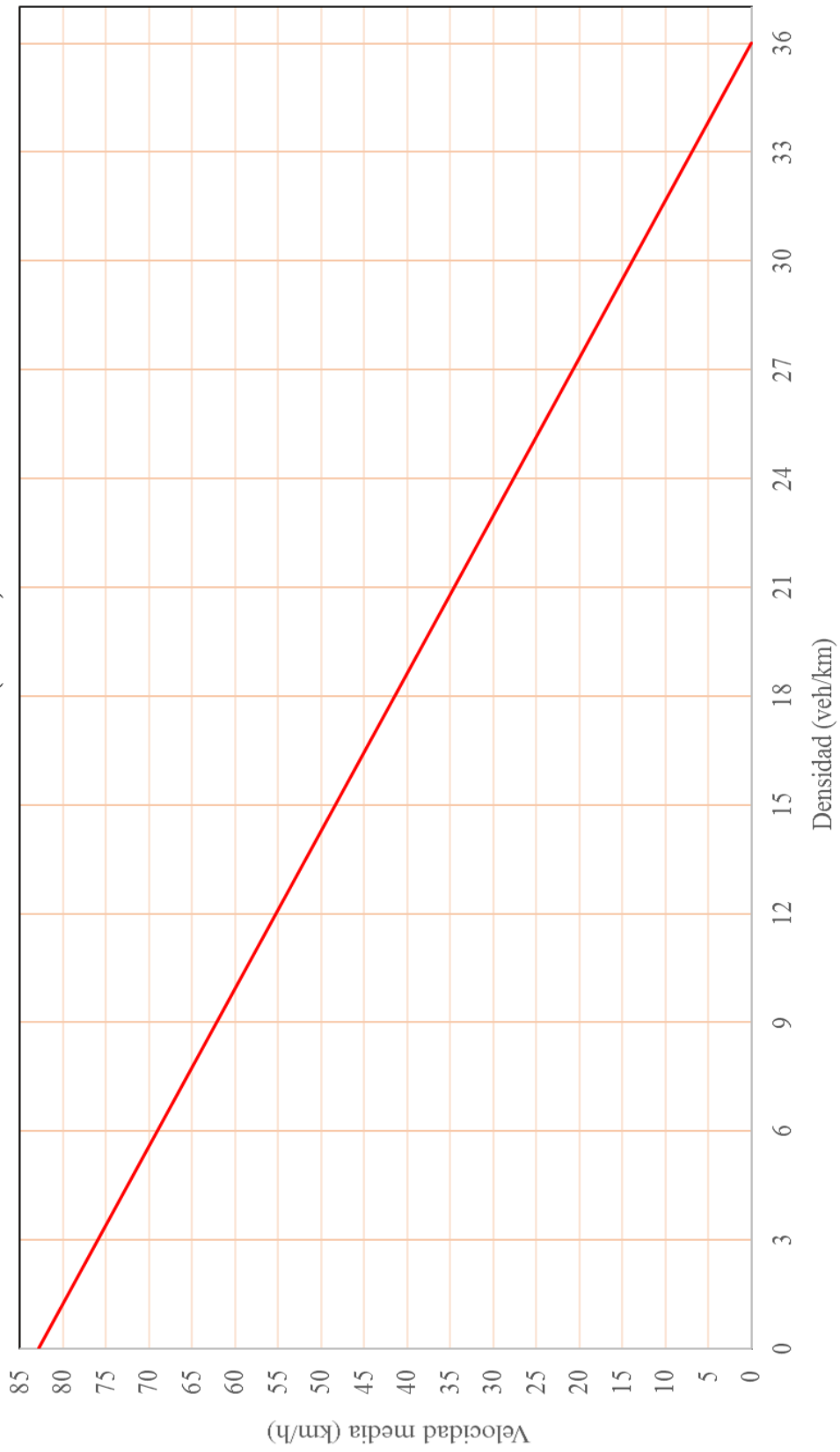
Relación velocidad media - intensidad		
Punto	Densidad (Veh/Km)	Velocidad (Km/h)
A	0.00	82.82
B	559.04	62.12
C	745.38	41.41
D	559.04	20.71
E	0.00	0.00

$$q = 36 \cdot \bar{v}_e - \frac{36}{82.82} * \bar{v}_e^2$$

Fuente: Elaboración propia a partir del modelo seleccionado

Figura 3.52 relación velocidad – densidad - punto 7 - carril de salida

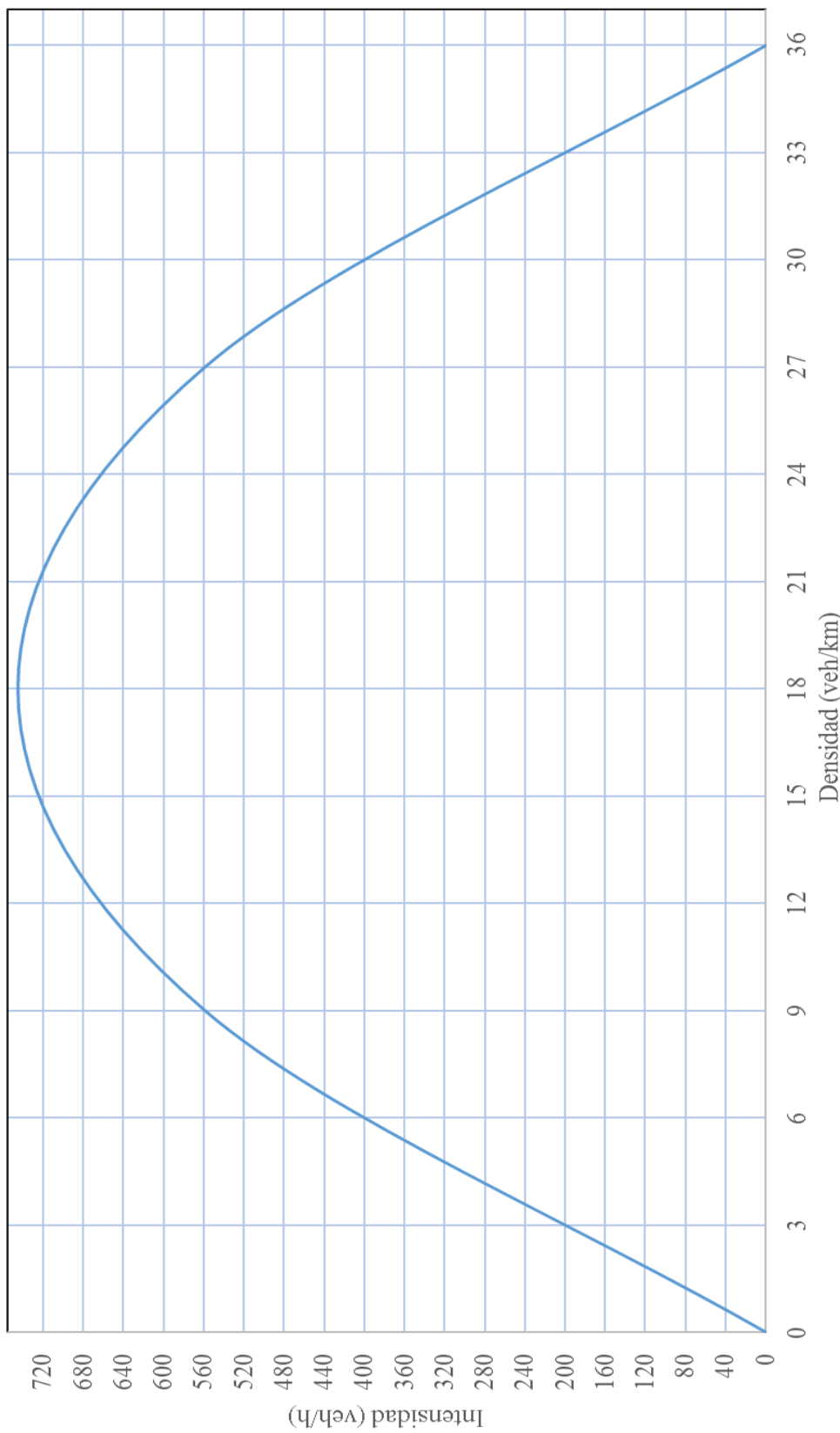
$$\bar{v}_e = 82.82 - (82.82/36)*k$$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.53 relación intensidad – densidad - punto 7 - carril de salida

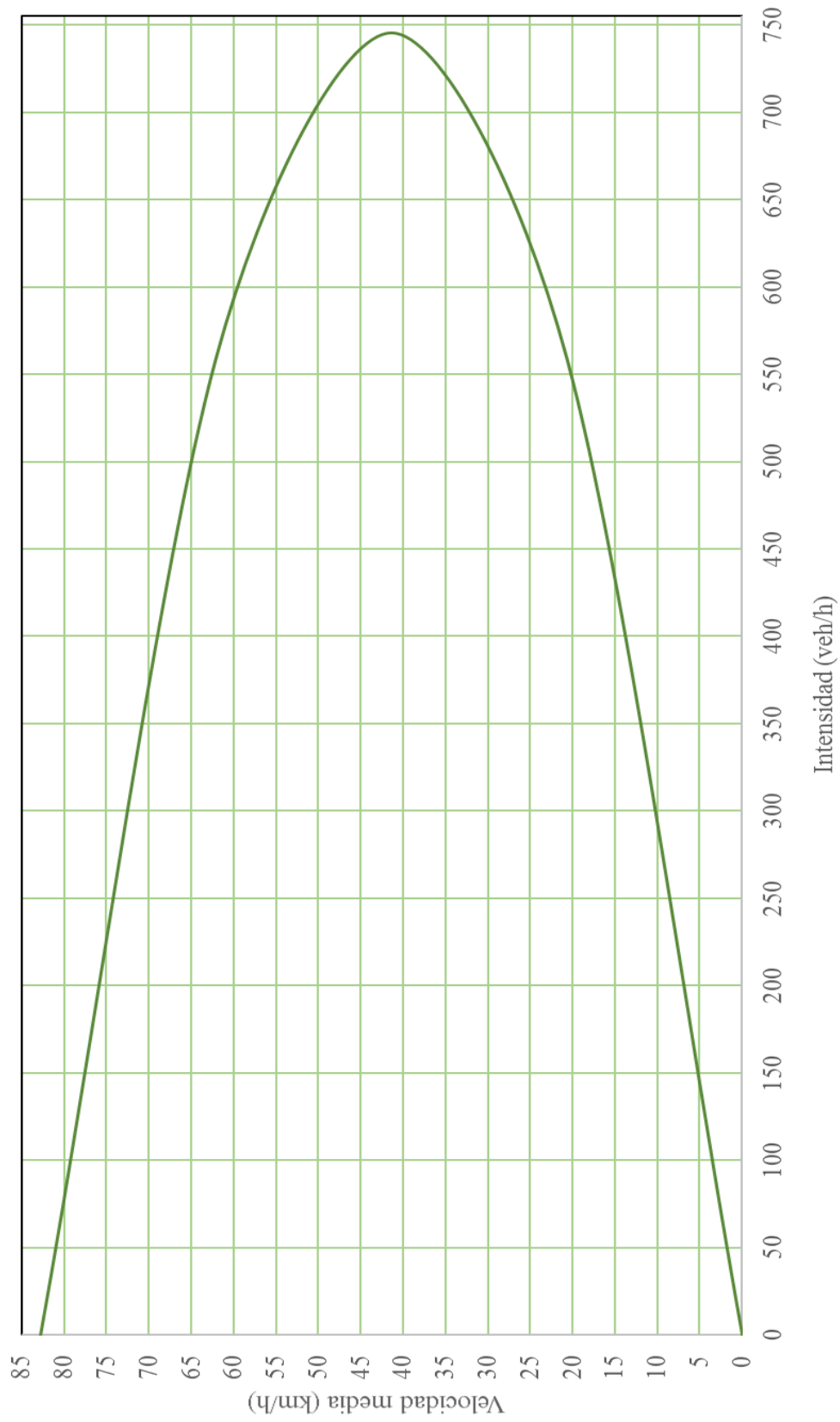
$$q = 82.82 * k - (82.82/36) * k^2$$



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.54 relación velocidad – intensidad - punto 7 - carril de salida

$$q = 36 \cdot \bar{v}e - (36/82.82) \cdot \bar{v}e^2$$



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.70 indicadores de comportamiento para el modelo matemático lineal - punto 7 - carril de salida

Los indicadores de comportamiento obtenidos ya en las ecuaciones del modelo lineal son los siguientes:	
Velocidad a flujo libre	$v_l = 82.82 \text{ (Km/h)}$
Densidad de congestión :	$k_c = 36.00 \text{ (veh/Km)}$
Los indicadores de comportamiento restantes se obtienen a partir de los anteriores	
Intensidad máxima	$q_m = \frac{v_l k_c}{4} \rightarrow q_m = 745 \text{ (veh/h)}$
Velocidad a intensidad máxima	$v_m = \frac{v_l}{2} \rightarrow v_m = 41.41 \text{ (km/h)}$
Densidad a intensidad máxima	$k_m = \frac{k_c}{2} \rightarrow k_m = 18.00 \text{ (veh/km)}$
Intervalo promedio a intensidad máxima	$\bar{h}_m = \frac{1}{q_m} \rightarrow \bar{h}_m = 0.0013 \text{ (h/veh)} \rightarrow \bar{h}_m = 4.83 \text{ (seg/veh)}$
Espaciamiento promedio a intensidad máxima	$\bar{s}_m = \frac{1}{k_m} \rightarrow \bar{s}_m = 0.0556 \text{ (km/veh)} \rightarrow \bar{s}_m = 55.56 \text{ (m/veh)}$
Fuente: Elaboración propia	

Tabla 3.71 condiciones de operación - punto 7 - carril de salida

Definimos características de circulación en función de la densidad de congestionamiento, para determinar las condiciones de operación de la vía y la calidad de servicio que ofrece.

- $0.00 \leq k \leq 0.40 k_c$  (flujo estable )
- $0.40 k_c \leq k \leq 0.60 k_c$  (flujo inestable)
- $0.60 k_c \leq k \leq 1.00 k_c$  (flujo forzado)

Si la densidad de congestionamiento es  $kc = 64$  (veh/km) las densidades que limitan cada una de las condiciones de operación son :

- $0.4 K_c = 14.40$  (veh/km)
- $0.6 K_c = 21.60$  (veh/km)
- $1.00 K_c = 36.00$  (veh/km)

Las velocidades que corresponden a estas densidades estan dadas por el modelo lineal

- $V_{0.40} = 49.69$  (Km/h)
- $V_{0.60} = 33.13$  (Km/h)
- $V_{1.00} = 0.00$  (Km/h)

$$\bar{v}_e = 82.82 - \frac{82.82}{36} * k$$

Las intensidades que corresponden a estas densidades y velocidades se calculan mediante la ecuación fundamental  $q = v * k$

- $q_{0.40} = 716$  (veh/h)
- $q_{0.60} = 716$  (veh/h)
- $q_{1.00} = 0.00$  (veh/h)

Fuente: Elaboración propia

### 3.7.1 Análisis del comportamiento de tráfico

Se considera que los datos de origen son suficientes para dar validez al modelo elegido, pues para que un estudio de tráfico sea confiable, mínimamente la recolección de datos debe de ser de un mes.

Sobre la avenida numero 177 pasando la avenida panamericana se designó el punto 1 de aforo mediante el modelo Greenshields se calculó, una velocidad de flujo libre de 57.32 km/h y una velocidad a intensidad máxima de 28.66 km/h, la densidad de congestionamiento calculada es de 28.00 vehículos por kilómetro considerando el ancho de calzada y que no tiene intersecciones a lo largo de tal avenida es razonable dicha velocidad a flujo libre.

Para el mismo punto, pero para el carril de salida, se calculó una velocidad de flujo libre de 60.94 kilómetros por hora, mientras que para la velocidad a intensidad máxima se calculó una velocidad de 30.47 kilómetros por hora. En tanto la densidad de congestionamiento se calculó 23.00 vehículos por kilómetro mientras que para la densidad a intensidad máxima fue de 12.00 vehículos por kilómetro, se observa que en tanto la densidad de congestionamiento disminuye, mayor será la velocidad de flujo libre.

Sobre la avenida 178 pasando la avenida 177 se designó el punto número 2 de aforo, ofreciendo los siguientes datos calculados a partir del modelo de Greenshields, una velocidad a flujo libre de 57.46 kilómetros por hora y una velocidad a intensidad máxima de 28.73 kilómetros por hora, mientras que la densidad de congestionamiento es de 33.00 vehículos por kilómetro

Se puede observar un leve aumento de las velocidades del punto 2 al punto 1, debido inicialmente que al llegar al punto dos, los vehículos estarán cerca de una de las intersecciones más concurridas de la zona.

En la parte de atrás de las instalaciones de la nueva terminal sobre la avenida número 180, se designó el punto número 4 de aforo. Este registro una velocidad a flujo libre de 63.14 kilómetros por hora y una velocidad a intensidad máxima de 31.57 kilómetros por hora. En tanto el flujo sea libre el conductor podrá imprimir la mayor velocidad posible,



por otro lado, mientras que sea mayor la cantidad de vehículos transitando en el punto, menor será su velocidad.

Sobre la avenida número 177 entre la avenida número 178 y la avenida número 179 justo frente a las instalaciones de la nueva terminal sobre la calzada de libre circulación se designó el punto número 5, en esta se calculó una velocidad de flujo libre de 57.40 km/h y una velocidad a intensidad máxima de 28.70 km/h, la densidad de congestión calculada es de 31.00 vehículos por kilómetro. Se observa que las velocidades a flujo libre y a intensidad máxima del punto 1 y del punto 5 son casi similares esto debido a que dichos puntos son concurrentes, en tanto la densidad disminuye en el punto 5, esto debido a que no todos los vehículos que ingresan por el punto 1 necesariamente irán al punto 5.

Para el mismo punto, pero para el carril de salida, se calculó una velocidad de flujo libre de 58.71 kilómetros por hora, mientras que para la velocidad a intensidad fue de 29.36 kilómetros por hora. En tanto la densidad de congestión es de 26.00 vehículos por kilómetro mientras que para la densidad a intensidad máxima fue de 13.00 vehículos por kilómetro, el espaciamiento de los vehículos registrado a intensidad máxima fue de 42.6 metros entre vehículos. Los vehículos que salen por el punto 5 normalmente optan por el carril sobre el punto 1, se observa, que, ya en el punto uno, los vehículos aumentan su velocidad a flujo libre, pero la densidad a intensidad máxima no varía mucho entre ambos puntos de aforo.

En la avenida 179 sobre el carril izquierdo de la nueva terminal se designó el punto número 6 de aforo, ofreciendo los siguientes datos calculados a partir del modelo de Greenberg, una velocidad a flujo libre de 49.72 kilómetros por hora y una velocidad a intensidad máxima de 24.86 kilómetros por hora, mientras que la densidad de congestión es de 20.00 vehículos por kilómetro. Nótese que las velocidades disminuyen en este punto, lo cual es debido, a que este punto de aforo desemboca al ingreso principal y a la zona de carga y descarga de la terminal

Se observa que la avenida número 180 es la menos concurrida, debido a ello se registran velocidades tan altas y densidades como la de congestión baja.

Sobre la avenida 179 pasando la avenida panamericana, se designó el punto número 7 de aforo. Sobre la cual se calculó una velocidad a flujo libre de 84.40 kilómetros por hora y una velocidad a intensidad máxima de 42.20 kilómetros por hora. La densidad de congestionamiento fue de 35.00 vehículos por cada kilómetro y la densidad a intensidad máxima fue de 18.00 vehículos por kilómetro. Ambas velocidades tanto de flujo libre como de congestionamiento son las más altas registradas, en la zona, esta es la vía principal de acceso para los vehículos como para los buses.

Sobre el mismo punto, pero para el carril de salida se calculó una velocidad a flujo libre de 82.82 kilómetros por hora y una velocidad a intensidad máxima de 41.41 kilómetros por hora. La densidad de congestionamiento fue de 36.00 vehículos por cada kilómetro y la densidad a intensidad máxima fue de 18.00 vehículos por kilómetro.

**CAPÍTULO IV**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 10.1 CONCLUSIONES

Como indica en la página 78 del libro INGENIERÍA DE TRÁNSITO Y CARRETERAS escrito por NICHOLAS J. GARBER los aforos se realizaron según las necesidades para recolectar densidades de congestionamiento y velocidades a intensidad máxima los cuales únicamente se podrá determinar en horas pico de tránsito. Que en el caso de este trabajo cumple con las normativas indicadas en la Aashto-93.

Para la recopilación de datos en campo, se debe tomar en cuenta de forma previa al aforo todos los problemas que este conlleva, tales como el sesgo, localización correcta del personal durante el aforo, problemas de visibilidad, etc.

El modelo lineal de todos los puntos de aforo, represento los valores de sus parámetros más acordes con la realidad, de flujo vehicular en la zona, tanto, para la velocidad, como para la densidad. Dicho modelo fue elegido para representar en todas las vías de la zona de estudio. Esto fue claramente debido a las características geométricas de la zona. Ya que el conductor tiene restringido las velocidades máximas, sus pendientes de velocidades y densidades serán lineales, a mayor velocidad imprima el conductor menor será la densidad vehicular, y de forma linealmente proporcional entre menor sea la velocidad mayor la densidad vehicular.

Las velocidades a flujo libre registradas para los carriles 1, 2 y 5 son bastante correlativas debido a que están conectadas entre ellas registrando valores de 57.32 a 57.46 y 57.40 km/h. El punto 7 de aforo registro densidades a intensidad máxima bajas, se espera aumente con el paso del tiempo debido también a las construcciones que se desarrollan en el lugar. Para los puntos 6 y 7 las densidades obtenidas son relativamente bajas.

## 10.2 RECOMENDACIONES

En base al estudio realizado en la zona de la nueva terminal, se puede recomendar lo siguiente:

Será necesario un sistema de control de tráfico tal como un semáforo, en la intersección entre las avenidas 177 y 178 debido a que las velocidades registradas en el punto 1 son bastante altas con respecto a sus propias densidades, lo cual, si esto se incrementa tendera a ser un punto de conflicto, dando lugar a atascos o accidentes. Mientras que para la intersección entre las avenidas 179 y 177 bastara con señalizaciones puesto que sus densidades registradas en al punto 7 de aforo son bajas a pesar de sus altas velocidades a flujo libre.

Es necesario que, para el uso de modelos matemáticos, no se anticipe una hipótesis de cualquiera de los modelos. Después del desarrollo de cada modelo recién se podrá emitir un análisis de valor, y como conclusión del mismo análisis, realizar la elección del modelo que mejor se ajusta a la realidad de la zona de estudio.

En necesario desarrollar esta clase de estudios, para poder motivar a los ingenieros de tráfico vehicular desarrollar medidas de seguridad vial, puesto que se puede observar que la población urbana de la ciudad de Tarija va en aumento cada año. También será necesario crear una concientización para la población en general a cerca de la educación vial, de manera que tantos conductores y peatones puedan usar las carreteras de forma segura y sin contratiempos.

La valoración planteada del comportamiento vehicular tiene el objetivo de mostrar las características del tráfico, las cuales pueden ser base de datos y de estudio para mejorar las condiciones del flujo vehicular en la zona.