



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería.

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado.

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA HISTÉRESIS DEL  
TRÁFICO EN UN TRAMO DE LA AUTOPISTA  
MÉXICO-ORIZABA**

**TESIS**

Que para obtener el grado de  
**MAESTRO EN INGENIERÍA DE TRÁNSITO Y TRANSPORTE**

Presenta:

**CARLOS ALEJANDRO MARTÍNEZ GUZMÁN**

Asesor de tesis:

**DR. OSCAR LUIS SÁNCHEZ FLORES**



**BUAP**

OFICIO SIEP No. 0673/ 2016

**ING. CARLOS ALEJANDRO MARTÍNEZ GUZMÁN**

Maestría en Ingeniería, opción terminal  
Tránsito y Transporte.  
Presente.

El suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de tema de tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **“Análisis del efecto de la histéresis del tráfico en un tramo de la autopista México-Orizaba”**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal Tránsito y Transporte. Asignándose como Director de tesis al Dr. Oscar Luis Sánchez Flores.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

“Pensar bien, para vivir mejor”

Puebla, Pue., a 16 de mayo de 2016

**M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ**

Director de la Facultad de Ingeniería

C.c.p. Dr. Oscar Luis Sánchez Flores. Director de tesis.

C.c.p. Archivo.

ABH/JCI/dsm.

**60**  
AÑOS DE  
**AUTONOMÍA**  
UNIVERSITARIA

Facultad  
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

**ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN**

**M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ**  
**DIRECTOR DE LA FACULTAD INGENIERIA**  
**PRESENTE**

El suscrito: **DR. OSCAR LUIS SANCHEZ FLORES**, conforme al oficio No 0673/2015, asesor del tema de tesis denominado:

**"ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA HISTÉRESIS DEL TRÁFICO EN UN TRAMO DE LA AUTOPISTA MÉXICO-ORIZABA"**

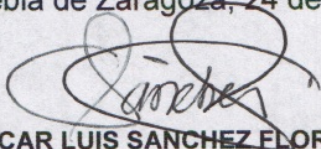
del alumno de la maestría en Ingeniería opción Tránsito y Transporte de la Facultad de Ingeniería **CARLOS ALEJANDRO MARTÍNEZ GUZMÁN**

me permito informarle que **después de haber revisado cuidadosamente** el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Se hace de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

**ATENTAMENTE**

H. Puebla de Zaragoza, 24 de mayo de 2016.



**DR. OSCAR LUIS SANCHEZ FLORES**

**ASESOR DE TESIS**

Ccp. Interesado

Expediente



---

# Agradecimientos

Al Dr. Oscar Luis Sánchez Flores por su apoyo y asesoría constantes para la realización de este trabajo.

A mi familia por su interés en mi superación académica y en especial a mi madre por brindarme en todo momento su apoyo ilimitado e incondicional y ejemplo de superación en la vida.

---

# Índice

Agradecimientos .....	i
Índice .....	ii
Introducción .....	v
Hipótesis .....	viii
Objetivo general .....	viii
Objetivos específicos .....	viii
Alcances .....	ix
Metodología .....	x
Estructura del documento .....	xii
<b>1 Marco Teórico .....</b>	<b>1</b>
1.1 Teoría macroscópica del flujo vehicular .....	1
1.1.1 Ecuación fundamental de la Ingeniería de Tránsito .....	1
1.1.2 Diagramas fundamentales de la ingeniería de tránsito .....	6
1.2 Enfoques empleados para el análisis de la histéresis .....	12
1.2.1 Macroscópico: Treiterer y Myers (1974) .....	12
1.2.2 Mesoscópico: Zhang H. M. (1998) .....	17
1.2.3 Macroscópico y analítico, Oscar Sánchez (2003) .....	18
1.2.4 Microscópico: Hao Xu, Hongchao Liu, Huaxin Gong (2013) .....	22
<b>2 Análisis de las variables macroscópicas en el tramo de análisis .....</b>	<b>24</b>
2.1 Información colectada en campo .....	24
2.2 Características geométricas de los tramos analizados .....	25
2.2.1 Características de la sección transversal Estación 1 .....	26
2.2.2 Características de la sección transversal Estación 2 .....	26
2.2.3 Características de la sección transversal Estación 3 .....	26
2.3 Características operativas de demanda del tráfico de los tramos y estaciones de análisis 30	
2.3.1 Datos históricos .....	30
2.3.2 Comparativa de Capacidad Teórica vs Flujo en hora de máxima demanda .....	31
2.3.3 Análisis de aforos automáticos vehiculares .....	32
2.4 Diagrama concentración (k) – flujo (q) .....	40
2.4.1 Tramos sin histéresis .....	40
2.4.2 Tramo con histéresis .....	41

2.4.3	Diagrama flujo (q) - velocidad (v).....	41
2.4.4	Diagrama concentración (k) – velocidad (v).....	43
2.4.5	Regímenes de flujo de tránsito. Teoría complementaria.....	44
2.5	Análisis de la histéresis de tráfico en el Tramo 2 sentido México-Puebla .....	47
2.6	Efecto de nocturnidad.....	49
2.6.1	Identificación del fenómeno de histéresis en Tramo T2, sentido México-Puebla (26-09). 50	
<b>3</b>	<b>Caracterización del fenómeno de histéresis en el tramo de análisis .....</b>	<b>52</b>
3.1	Estimación de parámetros con base en el diagrama concentración (k) – flujo (q).....	52
3.1.1	Régimen a flujo libre .....	53
3.1.2	Régimen a flujo forzado .....	55
3.1.3	Régimen de transición.....	57
3.1.4	Régimen de saturación.....	60
3.2	Estimación de parámetros con base en el diagrama flujo (q) – velocidad (v) .....	64
3.3	Pronóstico .....	65
<b>4</b>	<b>Análisis de resultados.....</b>	<b>67</b>
4.1	Validación del enfoque utilizado.....	67
4.2	Extensiones del modelo .....	67
4.2.1	Parametrización dinámica con base en estación de aforos permanentes (por periodos) 67	
4.2.2	Caracterización por tipo de día .....	68
4.2.3	Comportamiento no lineal entre segmentos de carga y descarga. ....	69
4.3	Aplicaciones relevantes.....	70
4.3.1	Detección automática de cuellos de botella .....	70
4.3.2	Predicción de tiempos de recorrido .....	70
	<b>Conclusiones .....</b>	<b>72</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>74</b>
	<b>Anexo 1.....</b>	<b>75</b>
	Estación 1 .....	77
	Sentido México-Puebla .....	77
	Sentido Puebla-México .....	78
	Ambos sentidos .....	79
	Estación 2 .....	80
	Sentido México-Puebla .....	80
	Sentido Puebla-México .....	81

---

Ambos sentidos .....	82
Estación 3 .....	83
Sentido México-Puebla .....	83
Sentido Puebla-México .....	84
Ambos sentidos .....	85
<b>Anexo 2.....</b>	<b>86</b>
Estación 1 .....	88
Sentido México-Puebla .....	88
Sentido Puebla-México .....	89
Estación 2 .....	90
Sentido México-Puebla .....	90
Sentido Puebla-México .....	91
Estación 3 .....	95
Sentido México-Puebla .....	95
Sentido Puebla-México .....	102
<b>Anexo 3.....</b>	<b>107</b>
Estación 1 .....	109
Sentido México-Puebla .....	109
Sentido Puebla-México .....	110
Estación 2 .....	112
Sentido México-Puebla .....	112
Sentido Puebla-México .....	113
Estación 3 .....	120
Sentido México-Puebla .....	120
Sentido Puebla-México .....	130

---

# Introducción

A través de los años, en México se ha construido infraestructura carretera principalmente con el fin de disminuir los tiempos de recorrido entre orígenes y destinos importantes en toda la República y así generar mejores condiciones de operación para los usuarios. Sin embargo, existen carreteras libres o inclusive de cuota en donde los tiempos de recorrido y la operación se ven afectados por congestionamientos recurrentes o no recurrentes. En el caso particular, de tramos carreteros que atraviesan zonas urbanas, se identifican otros factores que afectan las condiciones de circulación de manera importante dado el volumen de vehículos implicado:

- la sobrecarga de flujo en carreteras donde se combina tránsito urbano con tránsito de paso (tránsito que realizan viajes de largo recorrido).
- maniobras de entrada y salida e intercambio de vehículos que realizan desplazamientos urbanos y de largo recorrido, es decir el paso de un flujo totalmente continuo a uno semicontinuo por todas las maniobras de dichos accesos y salidas.
- las características geométricas de las secciones que en muchos casos no son homogéneas debido a la invasión del derecho de vía, accesos a comercios o instalaciones entre otros.

Las variaciones en las condiciones de circulación se hacen más notables cuando las vialidades operan a volúmenes de tránsito que están cercanos a su capacidad, causando sobresaturación. Con ello, se genera las condiciones para que se presenten problemas serios de congestionamiento, afectando de manera directa las condiciones de circulación en la carretera. Los efectos más relevantes son:

- aumento considerable en los tiempos de recorrido, ya sea en viajes de corto y largo itinerario.
- Formación de filas de espera y cambio drástico de las velocidades de los vehículos.
- Mayor consumo de combustible y emisiones contaminantes de los vehículos generando con ello una degradación mayor a la calidad del aire y medio ambiente.

Por lo tanto, es de suma importancia analizar estos procesos para entender, por un lado, la relación entre estos factores y las variables de tránsito que afectan el flujo continuo de los vehículos. Por otro lado, analizar las consecuencias directas que estas relaciones causan sobre las condiciones de circulación. Ambos aspectos son necesarios para prever acciones que permitan mitigar los efectos negativos sobre la circulación. En efecto, al conocer las causas se puede intervenir para mejorar las condiciones de circulación para los usuarios y por consecuencia aminorar los costos sociales previamente referidos.

---

Desde hace tiempo, se ha evidenciado empíricamente (Thryterer y Mayers, 1970 entre otros) y formalizado teóricamente (Zhang, 1996 entre otros) que cuando existen volúmenes de tránsito en el entorno o superiores a la capacidad de la vialidad, se presentan comportamientos inestables, no lineales, en las relaciones entre las variables relacionadas al tránsito. Estos efectos se deben a la interacción entre los vehículos que al estar tan cercanos se propagan hacia las unidades que se encuentran en el entorno. Estas interacciones se trasladan a las variables macroscópicas del tránsito (flujo, velocidad media y concentración) con lo que se determina que existe inestabilidad considerable en las condiciones de circulación. Un fenómeno que se presenta bajo estas condiciones es la histéresis de tráfico. Ésta tiene lugar cuando las condiciones de circulación se van degradando conforme aumenta la carga de vehículos (aumento de flujo y de concentración vehicular) volviéndose inestables tanto en la vecindad de la capacidad como durante la etapa de descarga de vehículos (disminución del flujo y de la concentración). Lo anterior implica que las trayectorias de las variables macroscópicas son distintas durante la fase de carga y descarga o entre el paso del régimen fluido al congestionado conformando este efecto de histéresis del tránsito. Durante el periodo de histéresis las condiciones de circulación son inestables motivado principalmente por el tiempo de reacción de los usuarios para frenar o acelerar debido a la cercanía de los vehículos que se encuentran ya sea haciendo una fila ya sea moviéndose a velocidades muy bajas. Durante el periodo de mayor volumen de usuarios en el día y hora pico, este comportamiento suele presentarse de manera cíclica (la cantidad de vehículos varía y se reduce) por lo que las trayectorias de las relaciones entre las variables macroscópicas conforman una nube de puntos en forma de especial lo que se manifiesta en la circulación como cambios drásticos en la velocidad, concentración y flujo.

Por consiguiente, existe una relación entre el nivel de saturación de la infraestructura y las condiciones inestables de circulación que puede analizarse a través de la presencia y caracterización del fenómeno de la histéresis del tráfico. En esta tesis, se realiza una investigación aplicada de estas relaciones. En primer lugar, dado una sección transversal de una carretera con flujo continuo con variaciones notables en las condiciones de circulación, se analizan las relaciones macroscópicas del tránsito con la finalidad de identificar rasgos que pongan en evidencia la presencia del fenómeno de la histéresis. Una vez identificadas las secciones en las que este fenómeno tiene lugar, se procede a seleccionar un método para caracterizar la presencia de este fenómeno. Una vez caracterizado, se procede a identificar las condiciones en que este fenómeno tiene lugar a fin de proponer alternativas para reducir, aminorar o eliminar su presencia.

Si bien, la investigación empírica se focaliza a un tramo de la autopista México-Orizaba, el tema aporta elementos para entender mejor este fenómeno, evidenciarlo y caracterizarlo a fin de disponer de nuevos elementos que permitan atender los problemas de congestión en tramos carreteros en donde se mezclan tránsitos locales con tránsitos de paso o largo recorrido. Este tipo de condiciones tienen lugar en la mayoría de las zonas urbanas y metropolitanas de nuestro país dado que el desarrollo de las carreteras se planteó para interconectar zonas urbanas descontando de esta planeación el proceso de desarrollo

---

horizontal, expansión urbana y metropolización que se ha agudizado en los últimos años por diversas circunstancias. Es por ello, que ahora se requieren acciones como las siguientes:

- plantear diseños geométricos de las vialidades adecuados y con visión a largo plazo.
- contar con mediciones constantes de los volúmenes de tránsito que permitan tener un panorama actual de las condiciones.
- Generar políticas públicas adecuadas de tránsito que permitan mitigar realmente los problemas de congestionamiento tomando en cuenta los diversos tipos de automóviles que circulan en las vialidades.

---

# Hipótesis

La variabilidad de las condiciones de circulación en el régimen de circulación continuo está asociada a factores externos que inciden en la capacidad de la infraestructura como también a la interacción de los vehículos cuando se encuentran muy cerca o se mezclan con flujos locales. El análisis y caracterización del fenómeno de la histéresis del tránsito es una alternativa para entender este tipo de relaciones y una herramienta para pronosticar los efectos sobre la variabilidad de las condiciones de circulación. Lo anterior con la finalidad de identificar las causas de esta variabilidad y proponer medidas que aminoren o eliminen este fenómeno.

## Objetivo general

A través de la teoría macroscópica del flujo vehicular y de datos de circulación empíricos, analizar las condiciones de circulación en un tramo carretero con flujo vehicular continuo en el que se presenten problemas de congestión con la finalidad de identificar la presencia del fenómeno de histéresis del tránsito. Una vez evidenciado la presencia del fenómeno, seleccionar un marco teórico que permita caracterizarlo a fin de cuantificar sus efectos, conocer las causas y realizar pronósticos. Finalmente, emplear dichos análisis para proponer medidas que reduzcan la variabilidad de las condiciones de circulación cuando este fenómeno tiene lugar.

## Objetivos específicos

Analizar la relación de las variables macroscópicas del tránsito (flujo, concentración y velocidad media) en tres tramos de la Autopista México-Orizaba, del PK 111+000 al 138+000, en el que se tienen problemas de congestión notables, con la finalidad de:

Analizar el comportamiento de las relaciones macroscópicas en diversos tramos de una sección carretera en la que se mezcla el tránsito urbano y el de largo recorrido con condiciones de operación cercanas a la capacidad de la infraestructura.

Verificar si en los tramos de análisis se presenta el fenómeno de histéresis como un elemento para analizar la variabilidad de los tiempos de recorrido y en general de la variabilidad de las condiciones de circulación cuantificadas a través de la velocidad media de recorrido.

---

Analizar el fenómeno de la histéresis del tránsito, en caso de que se presente, a fin de identificar un marco teórico que permita su caracterización a partir de datos macroscópicos.

Caracterizar el fenómeno de histéresis y obtener el pronóstico para una sección determinada del segmento carretero de estudio.

## Alcances

El presente es un trabajo analítico que explora, con base en la teoría fundamental del flujo de tránsito, las relaciones de las variables macroscópicas en tres tramos de análisis de la autopista México-Orizaba. Por lo tanto, con apoyo de datos recopilados directamente en campo, como las características geométricas de la vialidad, el aforo clasificado en tres estaciones y el marco teórico apropiado se obtuvieron:

El análisis del perfil de demanda del flujo vehicular en la vialidad.

El análisis de las características geométricas y sus efectos en el flujo vehicular en los tramos de análisis.

Los diagramas fundamentales a un nivel de detalle de cada minuto, por estación de aforo y por sentido de circulación.

La caracterización y evidencia del fenómeno de histéresis, en el tramo en donde se presentó dicho fenómeno, considerando un período de tiempo en específico.

Un pronóstico del comportamiento del flujo en un período determinado, con base en su caracterización.

Si bien este análisis permitió la caracterización y evidencia de la histéresis del tráfico en un tramo de la vialidad, se limita a que la información obtenida es del año 2012.

Por otro lado, el fenómeno de la histéresis se analiza desde un enfoque macroscópico. La información obtenida por medio de los aforos de tipo neumático es utilizada esencialmente para obtener los valores de volumen vehicular clasificado, flujo vehicular y velocidad, en tanto que la densidad se estima de manera implícita a través de la teoría macroscópica utilizando la ecuación fundamental.

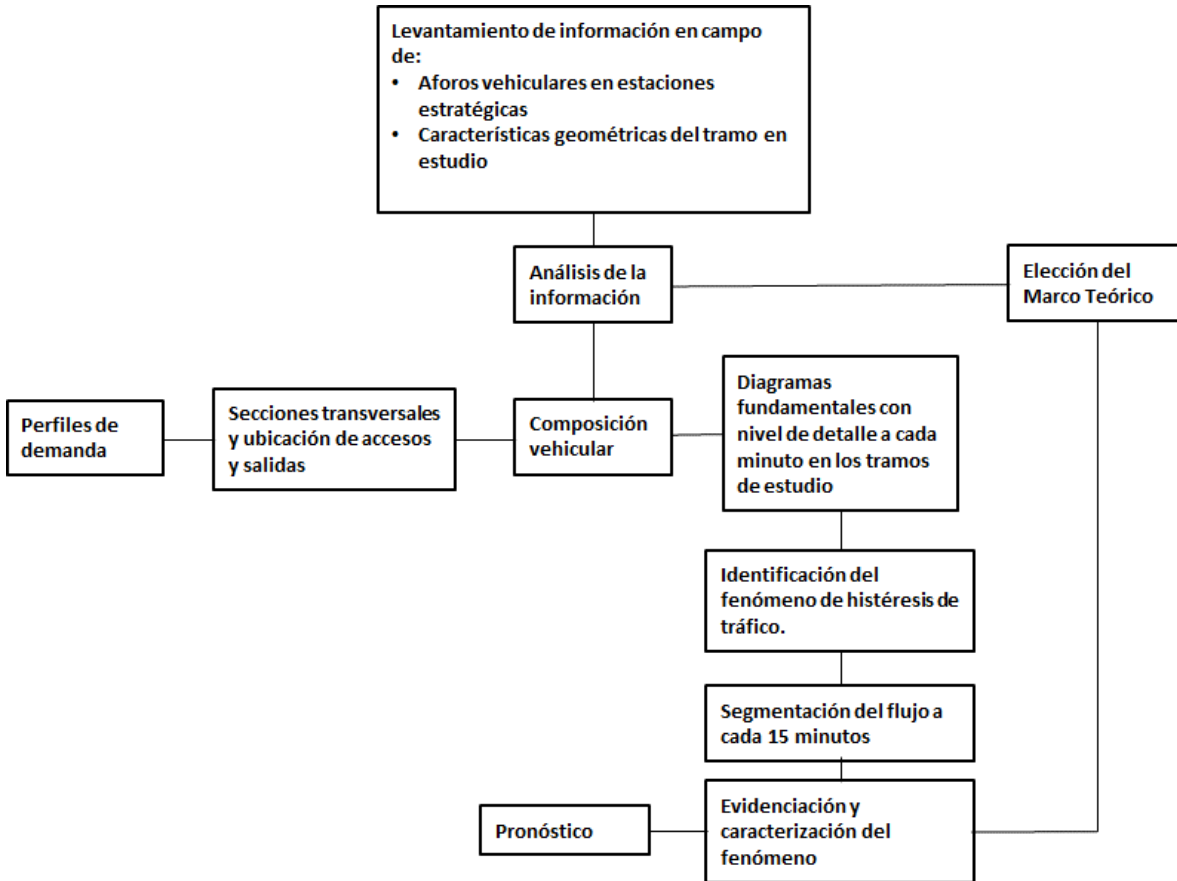
El modelo que caracteriza la histéresis es muy básico ya que no considera el efecto de las entradas y salidas del tramo en estudio. Asimismo, no se considera la distribución del volumen vehicular de largo y corto recorrido, ya que esto requiere de aplicación de encuestas origen-destino u otros métodos.

Este trabajo considera un comportamiento lineal de cada una de las fases que se pueden presentar en el flujo vehicular (flujo libre, forzado, de transición y saturado) y por lo tanto su caracterización es básica.

Asimismo no se considera la modelación de la presencia cíclica de la histéresis, la cual resulta compleja y puede ser motivo de futuros trabajos con base en la información presentada en este trabajo.

# Metodología

Este trabajo se basó en un proceso de análisis que permitiera la identificación y caracterización del fenómeno de histéresis bajo un marco teórico determinado. En la figura siguiente se presenta a manera de esquema la metodología que ejemplifica este proceso.



Elaboración propia

El proceso comienza a partir de una campaña de trabajos de campo que permitió obtener la información requerida. Tal información fue la recopilación de aforos vehiculares clasificados y características geométricas de la vialidad tales como número de carriles, ancho de carril, ancho de acotamientos, etc. Esto se realizó de manera directa en campo con equipo y personal adecuado. Los aforos vehiculares clasificados se obtuvieron mediante equipos de tipo neumático, los cuales tienen la capacidad de registrar tipo de vehículo (Vehicle), la clasificación correspondiente del vehículo (CI), velocidad puntual (Speed), hora de registro (hh:mm:ss), dirección (Dr), distancia entre ejes del vehículo (Wb), el tiempo de separación entre un automóvil y el que le sigue (Hdwy), número de ejes (Ax) y número de grupos de ejes (Gp).

Una vez que se recopiló la información, esta permitió obtener una base de datos lo suficientemente extensa (540,566 registros) para obtener:

- 
- Los perfiles de demanda en cada una de las estaciones de aforo y por sentido de circulación
  - La composición vehicular de la demanda en cada estación, por sentido de circulación y en ambos sentidos.
  - Estimación de los valores de las variables macroscópicas, tales como el flujo, la velocidad y la concentración a un nivel de detalle de un minuto y 15 minutos.
  - Estimación de los diagramas fundamentales al mismo nivel de detalle del punto anterior.

Asimismo se obtuvieron las características geométricas de las secciones transversales de los tramos en estudio y se ubicaron los accesos y salidas principales a lo largo del tramo.

Se revisó el marco teórico relativo al fenómeno de la histéresis de tráfico considerando trabajos de investigación importantes que abordan el estudio del fenómeno desde el punto de vista macroscópico y microscópico. Particularmente se revisó la teoría de Sánchez (2003), que propone la caracterización de los regímenes de tránsito con enfoque macroscópico-analítico.

Una vez seleccionado este método de análisis y con apoyo de los diagramas fundamentales con nivel de detalle de un minuto, se realizó la identificación del fenómeno de la histéresis de los tramos en estudio. Una vez identificado el fenómeno en el determinado tramo, se utilizó el diagrama concentración-flujo ( $q$ ) a un nivel de detalle de 15 minutos para su evidenciación y caracterización con base en el marco teórico previamente seleccionado.

Posteriormente se realizó un pronóstico con el fin de ver el comportamiento del flujo en un determinado período de análisis.

---

# Estructura del documento

El presente trabajo contempla aspectos teóricos fundamentales del flujo vehicular con enfoque macroscópico, así como el concepto del fenómeno de la histéresis del tráfico y su caracterización con base en la teoría presentada en Sánchez (2003) a un caso de estudio en particular.

En el capítulo 1 se documenta el marco teórico que se empleó para analizar los datos obtenidos de forma empírica y posteriormente identificar el fenómeno de la histéresis del tránsito. En primer lugar, se presenta la teoría macroscópica del flujo vehicular, posteriormente se explican las relaciones teóricas de las variables macroscópicas a través de los diagramas: flujo-velocidad, velocidad-concentración y concentración velocidad. Tomando como base estas relaciones se introduce el concepto de histéresis. Este concepto se ilustra a través de los trabajos de Treiterer y Myers (1974), Zhang H.M.(1998) y Sánchez (2003) con un enfoque macroscópico y en el trabajo de Hao Xu, et. al. (2013) se aborda el concepto desde un punto de vista microscópico.

Posteriormente en el Capítulo 2 se presenta el tramo del PK 111+000 al 138+000 de la autopista México-Orizaba como caso de estudio en donde se muestran las características geométricas, ubicación de accesos y salidas principales y demanda y composición vehicular en tres subtramos de estudio con base en aforos realizados en cada subtramo. Posteriormente se realizó un análisis de las relaciones macroscópicas de los tramos de estudio, con base en los diagramas fundamentales, identificando y haciendo una comparativa entre ellos en los tres tramos de análisis. Posteriormente, una vez identificado el fenómeno en uno de los tramos, se realizó un análisis a detalle del mismo en el tramo identificado.

Una vez identificado el tramo en donde se presentó el fenómeno de histéresis, en el Capítulo 3 se identificaron las fases de (a flujo libre, flujo forzado, de transición y de saturación-histéresis), vinculados con las etapas de formación de la histéresis, para posteriormente caracterizarlas con base en la teoría macroscópica-analítica de Sánchez (2003) para un período determinado utilizando el diagrama concentración-flujo.

En el Capítulo 4 se hace una validación de los modelos obtenidos con base en el marco teórico utilizado. Posteriormente se presentan las diversas extensiones de los modelos obtenidos, tales como parametrización dinámica basada en estaciones permanentes, caracterización de los modelos de acuerdo al tipo de día y el análisis bajo un enfoque no lineal del comportamiento del flujo y la presencia de la histéresis. Para cerrar el capítulo, se presentan las aplicaciones relevantes que pudieran tener los modelos, tales como la detección automática de cuellos de botella y predicción de tiempos de recorrido, entre otros.

Asimismo, se emiten conclusiones y recomendaciones que contribuyan a mitigar la presencia de la histéresis de tráfico y sus consecuencias, así como los posibles escenarios una vez que se concluya la construcción del segundo piso.

---

# I Marco Teórico

La teoría del flujo vehicular ha sido estudiada desde hace décadas con el fin de comprender el su comportamiento y las variables que la componen. Esto ha llevado a la elaboración de múltiples trabajos e investigaciones que han aportado y estudiado la problemática del tránsito desde varios enfoques y puntos de vista. En esta sección se presentan solo algunos de estos trabajos y la base fundamental de la Ingeniería de tránsito.

## 1.1 Teoría macroscópica del flujo vehicular

Uno de los enfoques mediante el cual se ha estudiado el comportamiento del flujo vehicular es el enfoque macroscópico, el cual considera como variables principales a la velocidad y la concentración generalmente consideradas como promedios. En esta sección se estudiará el fundamento de la ingeniería de tránsito bajo este enfoque.

### 1.1.1 Ecuación fundamental de la Ingeniería de Tránsito

Como lo define Cal y Mayor, et. al.(2007) la ingeniería de tránsito “es aquella fase de ingeniería de transporte que tiene que ver con la planeación, el proyecto geométrico y la operación del tránsito por calles y carreteras, sus redes, terminales, tierras adyacentes y su relación con otros modelos de transporte. Lo anterior no es fácil, ya que las variables involucradas para llevar a cabo estos objetivos son cuantiosas y algunas veces pueden resultar difíciles de medir. Tales variables esencialmente son:

- Flujos vehiculares que transitan por una determinada vía en un determinado período.
- Diversos tipos de vehículos que componen el total del flujo vehicular
- Características geométricas de las vialidades formadas por número de carriles, ancho de carriles, la existencia de fajas separadoras, etc.
- Velocidad de circulación de los vehículos en función del flujo, tipo, etc.
- Existencia de dispositivos del control del tránsito conformado por señalamiento vertical, horizontal, y dispositivos diversos de alta tecnología.

La velocidad tiene diversas definiciones y conceptos dependiendo de su tipo. En la siguiente sección se explican cada una de ellas, así como el concepto de la densidad y el flujo tomando como referencia fundamental a Cal y Mayor, et. al.(2007).

### 1.1.1.1 Diversos conceptos de velocidad

**Velocidad puntual:** Es la velocidad que tiene un determinado vehículo al pasar en un determinado punto o sección transversal de una vialidad. Sus unidades de medida son (km/h).

$$v_i = \frac{km}{h}$$

**Velocidad instantánea:** Es la velocidad que tiene un determinado vehículo al circular por un determinado tramo de una vialidad en un instante dado. Sus unidades de medida son (km/h).

**Velocidad media espacial:** Es la media aritmética de las velocidades instantáneas de todos los vehículos que circulan a través de una vialidad en una determinada longitud de tramo. Generalmente se denota por  $\bar{v}_e$  y se calcula como:

$$\bar{v}_e = \frac{\sum_{i=1}^n v_{ei}}{n}$$

en donde:

$\bar{v}_e$  = Velocidad media espacial de los vehículos  $\left(\frac{km}{h}\right)$ .

n = número de vehículos que circulan en el tramo de la vía determinada (veh).

$v_{ei}$  = Velocidad instantánea del vehículo i  $\left(\frac{km}{h}\right)$ .

Puesto que en el cálculo de esta velocidad se considera a la distancia ( $d$ ) como un valor que no cambia en el tiempo, contrario a lo que ocurre con el tiempo ( $t_i$ ), entonces también se puede expresar como:

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

Considerando que  $v_i = \frac{d}{t_i} \Rightarrow d = v_i t_i$ ; entonces sustituyendo en la ecuación anterior tenemos que:

$$\bar{v}_e = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{v_i t_i}\right)} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{v_i}\right)}$$

en donde:

---

$\bar{v}_e$  = Velocidad media espacial de los vehículos  $\left(\frac{km}{h}\right)$ .

n = número de vehículos que circulan en el tramo de la vía (veh).

d = distancia del tramo recorrido de la vía (km).

$t_i$  = tiempo de recorrido de la distancia d del vehículo i (h).

$v_i$  = velocidad i obtenida en el tiempo, es decir, velocidad de punto del vehículo i  $\left(\frac{km}{h}\right)$ .

**Velocidad media temporal:** Es la media aritmética de todas las velocidades de punto de los vehículos que circulan a través de la vía en una sección transversal.

$$\bar{v}_t = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}$$

Donde

$\bar{v}_t$  = Velocidad media temporal de los vehículos  $\left(\frac{km}{h}\right)$ .

n = número de vehículos que circulan en el tramo de la vía determinada (veh).

$v_{ti}$  = Velocidad temporal del vehículo i  $\left(\frac{km}{h}\right)$ .

**Velocidad de marcha:** Velocidad representativa tomando solo en cuenta el tiempo en que el vehículo se encuentre en movimiento, es decir, no se considera el tiempo en que el vehículo permanece estático debido a congestión, demoras en semáforos, falla mecánica, etc. Entonces:

$$v_m = \frac{d}{t_{tot} - t_d}$$

Donde:

$v_m$  = Velocidad de marcha del vehículo que circula en la vía  $\left(\frac{km}{h}\right)$ .

t = distancia total del tramo (km).

$t_{tot}$  = tiempo total de recorrido del tramo (h).

$t_d$  = tiempo total en que el vehículo permaneció estático (h).

Como se presentó, la velocidad no se limita a un solo concepto sino que presenta diversos fundamentos y significados. A continuación se presenta el concepto de concentración y las variables involucradas.

---

### 1.1.1.2 Concentración

Esta se define como el número de vehículos,  $N$ , que ocupan una longitud específica,  $d$ , de una vialidad en un momento dado. Generalmente se expresa en vehículos por kilómetro. Se calcula como:

$$k = \frac{N}{d}$$

Donde:

$N$ =número de vehículos que ocupan la vialidad (veh);

$d$ =distancia, generalmente en (km).

En las secciones siguientes se presentan las variables que se relacionan con el flujo y la densidad.

### 1.1.1.3 Variables relacionadas con el flujo

Las variables relacionadas con el flujo son la tasa de flujo, el volumen, el intervalo simple entre vehículos consecutivos y el intervalo promedio entre varios vehículos.

#### **Tasa de flujo ( $q$ ) y volumen ( $Q$ )**

La tasa de flujo  $q$  es la frecuencia a la cual pasan los vehículos por un punto o sección transversal de un carril o calzada. Por lo tanto, la tasa de flujo es el número de vehículos  $N$  que pasan durante un intervalo de tiempo específico,  $T$ . No obstante, la tasa de flujo,  $q$ , también puede ser expresada en vehículos por hora (veh/h), teniendo cuidado de su interpretación, pues no se trata del número de vehículos que efectivamente pasan durante una hora completa o volumen horario  $Q$ . Entonces la tasa de flujo  $q$  se calcula como

$$q = \frac{N}{T}$$

#### **Intervalo simple ( $h_i$ )**

Es el intervalo de tiempo entre el paso de dos vehículos consecutivos, generalmente expresado en segundos y medido entre puntos homólogos del par de vehículos.

#### **Intervalo promedio ( $\bar{h}$ )**

Es el promedio de todos los intervalos simples,  $h_i$ , existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en segundos por vehículo (s/veh) y se calcula mediante la expresión:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{N-1}$$

Donde

$\bar{h}$ =intervalo promedio (s/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

Se puede observar que las unidades del intervalo promedio  $\bar{h}$  (s/veh) son las unidades inversas de la tasa de flujo q (veh/s), por lo que también puede plantearse la siguiente relación:

$$\bar{h} = \frac{1}{q} \text{-----} (A)$$

#### 1.1.1.4 Variables relacionadas con la densidad

##### Espaciamiento simple ( $s_i$ )

Es la distancia entre el paso de dos vehículos consecutivos, usualmente expresada en metros y medida entre sus defensas traseras.

##### 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:

$$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} s_i}{N-1}$$

Donde

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

N=número de vehículos (veh);

N-1=número de espaciamientos (veh);

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

Se puede observar que las unidades del espaciamiento promedio  $\bar{s}$  (m/veh) son las unidades inversas de la concentración k (veh/m), por lo que también puede plantearse la siguiente relación:

$$\bar{s} = \frac{1}{k} \text{-----} (B)$$

---

Considerando un grupo vehicular que se mueve a una velocidad ( $\bar{v}_e$ ) aproximadamente constante, su intervalo promedio ( $\bar{h}$ ) y espaciamiento promedio ( $\bar{s}$ ) se pueden relacionar como:

Espacio=(Velocidad)(Tiempo)

$$\bar{s} = \bar{v}_e \bar{h} \text{ --- (C)}$$

Como se puede ver en la expresión anterior, para un grupo de vehículos, el intervalo promedio y el espaciamiento promedio se relacionan a través de la velocidad media espacial. Igualmente, como cualquier otro fluido, el flujo de la corriente de tránsito puede definirse en términos de sus tres variables principales: la tasa de flujo  $q$ , la velocidad  $v$  y la densidad  $k$ .

Reemplazando las ecuaciones (A) y (B) en (C) se tiene:

$$\frac{1}{k} = \bar{v}_e \left( \frac{1}{q} \right)$$

De donde

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

Que en su forma general se expresa como

$$q = vk$$

A la anterior ecuación se le conoce como la **ecuación fundamental del flujo vehicular**.

### 1.1.2 Diagramas fundamentales de la ingeniería de tránsito

Una vez medidas las variables y determinados sus valores correspondientes, es posible establecer relaciones entre ellas o (construir) diagramas fundamentales de manera gráfica y así, tener un panorama amplio del comportamiento del flujo vehicular. Tales diagramas, resultan ser de:

- Concentración ( $k$ ) - flujo ( $q$ )
- Velocidad ( $v$ ) - flujo ( $q$ )
- Concentración ( $k$ ) - velocidad ( $v$ )

Estos diagramas son comúnmente conocidos como **diagramas fundamentales**. A continuación se describe cada uno de ellos con base en Cal y Mayor, et. al. (2007)

### 1.1.2.1 Diagrama concentración (k) - velocidad (v)

Fue B.D. Greenshields en realizar una de las primeras investigaciones sobre el comportamiento del flujo vehicular relacionando la concentración con la velocidad. A partir de un conjunto de datos (k, v), para diferentes condiciones del tránsito, propuso una relación lineal entre la velocidad v y la concentración k, utilizando un ajuste por mínimos cuadrados, obteniendo el modelo lineal siguiente:

$$\bar{v}_e = v_l - \left(\frac{v_l}{k_c}\right)k \text{ ----- (D)}$$

Donde:

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

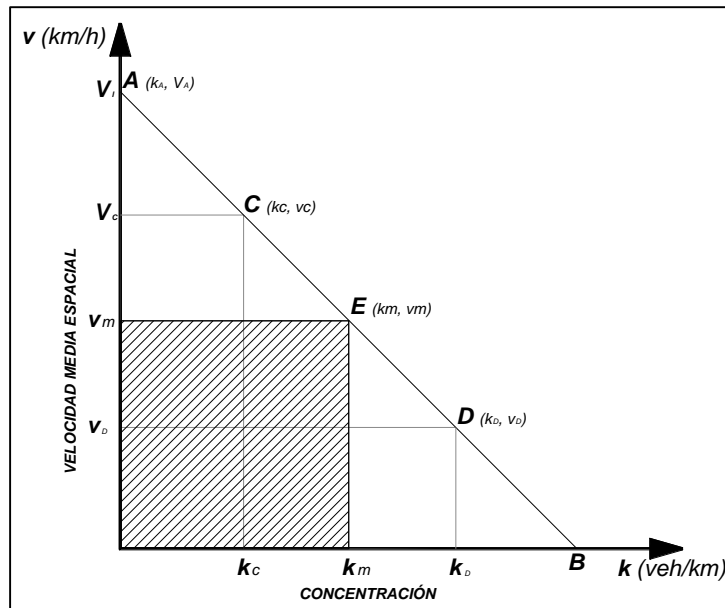
K=densidad (veh/km/carril);

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

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

En la Figura 1 se muestra la gráfica que representa el modelo lineal

**Figura 1 Diagrama concentración (k) - flujo (q)**



Fuente: Elaboración propia con base en "Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones". Cal y Mayor, Rafael, 2007

El flujo q, se puede representar en el diagrama concentración-velocidad a través de la ecuación fundamental  $q = vk$ , donde para cualquier punto sobre la recta de coordenadas (k, v), el producto vk es el área de un rectángulo cuyo lado horizontal es la concentración k y cuyo lado vertical es la velocidad v.

Así por ejemplo, para los puntos C y D, los flujos asociados a las densidades y velocidades correspondientes son:

$$q_C = v_C k_C$$

$$q_D = v_D k_D$$

El rectángulo del área máxima corresponde al punto E, que está ubicada exactamente a la mitad de la recta. Su área sombreada representa el flujo máximo  $q_m$  el cual se obtiene

$$q_m = v_m k_m$$

### 1.1.2.2 Diagrama concentración (k) - flujo (q)

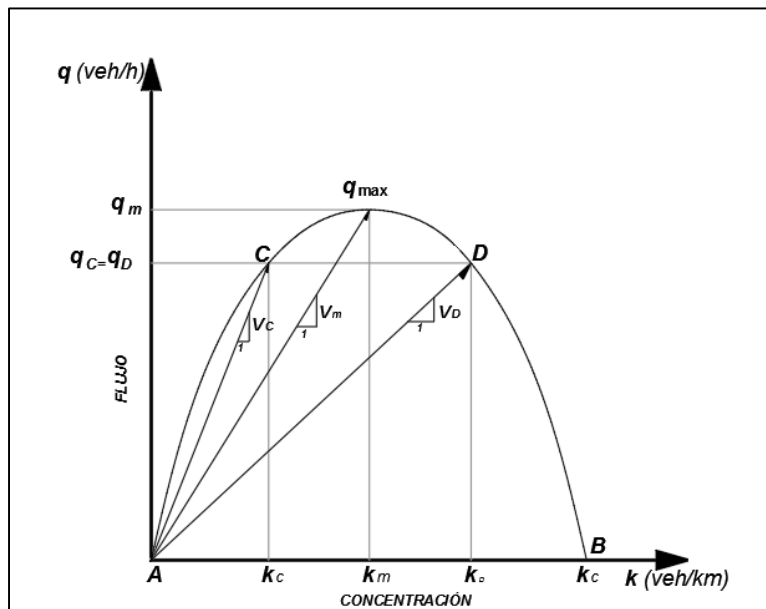
La relación entre la concentración k y el flujo q se obtiene reemplazando la ecuación (D) en la ecuación fundamental, de tal manera que se obtiene la expresión:

$$q = vk = \left[ v_l - \left( \frac{v_l}{k_c} \right) k \right] k$$

$$q = v_l k - \left( \frac{v_l}{k_c} \right) k^2$$

En la Figura 2 se presenta la gráfica que representa la ecuación anterior.

**Figura 2 Diagrama concentración (k) – flujo (q)**



Fuente: Elaboración propia con base en "Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones". Cal y Mayor, Rafael, 2007

Como se observa, el flujo está expresado como una función parabólica de la concentración k, por lo tanto, la forma de la curva es una parábola. Por definición se requiere que cuando la densidad se aproxime a cero, el flujo también se aproxime a cero, lo cual representa condiciones de operación

a flujo libre (punto A). Igualmente, cuando la densidad es la máxima,  $k = k_c$ , los vehículos se detienen uno tras otro, de manera tal que no avanzan, es decir,  $q=0$  (punto B).

Entre los dos extremo anteriores, existe una diversidad de condiciones del flujo vehicular, identificadas por los puntos C, D y E, reflejando este último características de operación a flujo máximo o capacidad,  $q = q_m$ .

La velocidad  $v$ , se puede también representar en el diagrama flujo-concentración, simplemente despejándola de la ecuación fundamental, entonces:

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

Esta expresión representa la pendiente del vector dirigido desde el origen A a cualquier punto sobre la curva. Así, para los puntos C, D y E, se tiene:

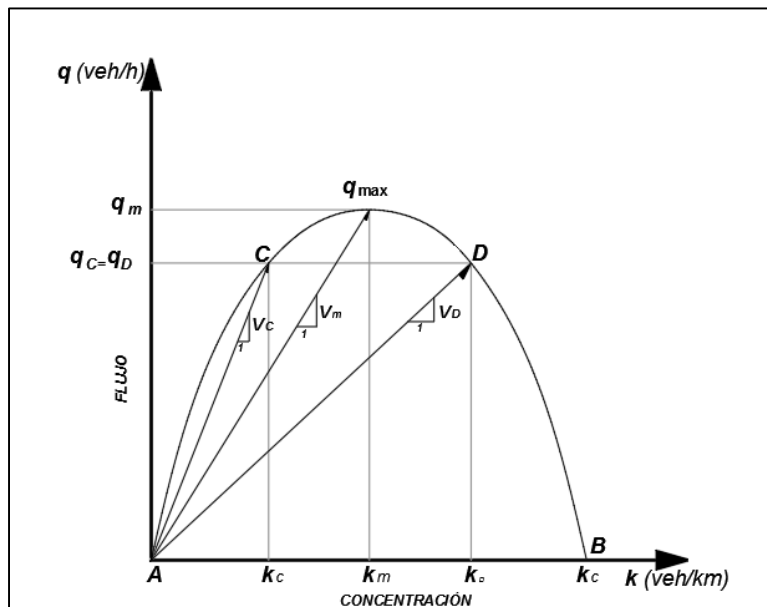
$$\text{Pendiente de AC} = v_c = \frac{q_c}{k_c}$$

$$\text{Pendiente de AD} = v_D = \frac{q_D}{k_D}$$

$$\text{Pendiente de AE} = v_m = \frac{q_m}{k_m}$$

Obsérvese que a la densidad de congestión,  $k = k_c$  (punto B), le pendiente del vector AB es cero, indicando que no existe velocidad pues los vehículos están completamente detenidos o en congestión total. En la medida en que el flujo  $q$  y la densidad  $k$  se aproxima a cero, el vector tiende a ser tangente a la curva y su pendiente representa la velocidad a flujo libre  $v_l$ .

**Figura 3 Diagrama concentración (k) – flujo (q)**



Fuente: Elaboración propia con base en "Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones". Cal y Mayor, Rafael, 2007

### 1.1.2.3 Diagrama flujo (q) - velocidad (v)

La relación entre la velocidad  $v$  y el flujo  $q$  se obtiene despejando la concentración  $k$  de la ecuación (D) y sustituyendo su valor en la ecuación fundamental de la siguiente manera:

De la ecuación (D) se tiene:

$$k = k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right) \bar{v}_e$$

Reemplazando en la ecuación fundamental se tiene:

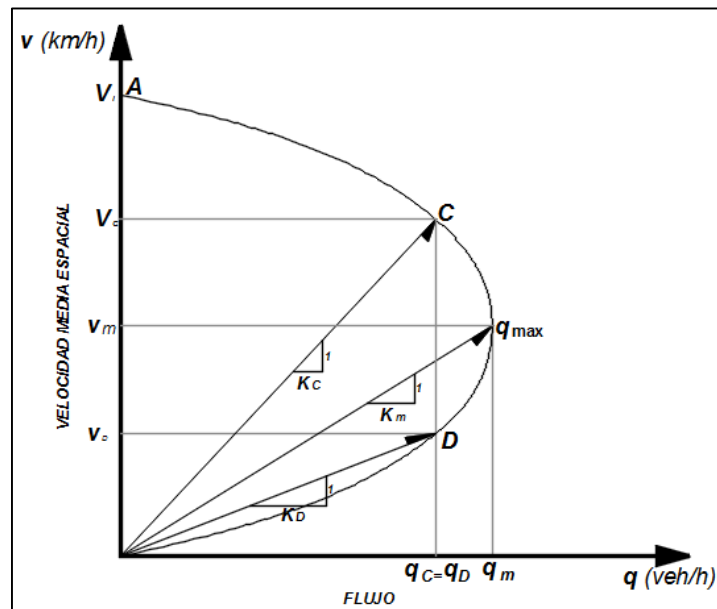
$$q = \bar{v}_e k = \bar{v}_e \left[ k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right) \bar{v}_e \right] = \bar{v}_e k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right) (\bar{v}_e)^2$$

Entonces

$$\bar{v}_e = \frac{v_l}{2} \mp \frac{\sqrt{v_l^2 - 4 \left(\frac{v_l}{k_c}\right) q}}{2}$$

En la siguiente figura se muestra la gráfica representada por la expresión anterior

**Figura 4 Diagrama (flujo (q) – velocidad (v))**



Fuente: Elaboración propia con base en "Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones". Cal y Mayor, Rafael, 2007

La expresión anterior indica que entre la velocidad y el flujo existe una relación parabólica, donde para un valor determinado del flujo ( $q = q_c = q_D$ ), hay asociados dos valores de la velocidad ( $v_c$  y  $v_D$ ). En la medida que el flujo  $q$  aumenta, desde el punto A a velocidad a flujo libre, la

---

velocidad  $v$  progresivamente disminuye. De manera que si para una determinada vialidad, el flujo de entrada  $q$  (demanda) se aproxima a la capacidad  $q_m$  (máxima oferta o servicio), la dinámica del flujo vehicular puede causar que éste se reduzca por debajo de la capacidad, con velocidades correspondientes a la porción inferior de la curva desde el punto E hasta el punto B, indicando que la operación ocurre a nivel de congestión.

La densidad  $k$  se puede también representar en el diagrama flujo-velocidad despejándola de la ecuación fundamental, obteniendo

$$k = \frac{q}{v} = \frac{1}{\frac{v}{q}}$$

En la expresión anterior, la pendiente del vector dirigido desde el origen B a cualquier punto sobre la curva, es el inverso de la densidad en ese punto. Así, para los puntos C, D y E, se tiene:

$$\text{Pendiente de BC} = \frac{1}{k_C} = \frac{v_C}{q_C}$$

$$\text{Pendiente de BD} = \frac{1}{k_D} = \frac{v_D}{q_D}$$

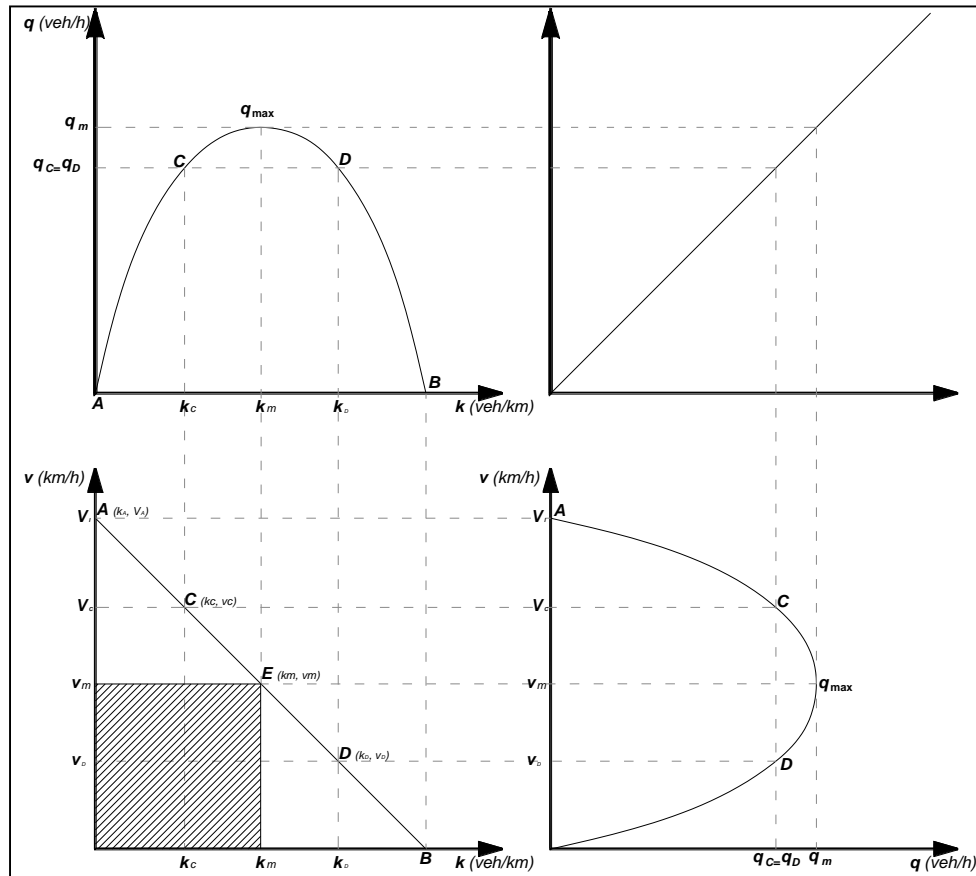
$$\text{Pendiente de BE} = \frac{1}{k_m} = \frac{v_m}{q_m}$$

Obsérvese que en los niveles de congestiónamiento total,  $q=0$  (punto B), la pendiente del vector en el punto B es casi cero, indicando que los vehículos están completamente detenidos, alcanzándose la velocidad máxima o de congestiónamiento  $k_C$ .

Por el contrario, a la velocidad a flujo libre,  $v = v_l$  (punto A), la pendiente del vector BA tiende a infinito, indicando que la concentración tiene a cero, es decir, hay pocos vehículos circulando a flujo libre.

En la Figura 5 se muestran los tres diagramas antes descritos y que permite ver la relación entre ellos.

**Figura 5 Diagramas fundamentales de la Ingeniería de Tránsito**



Fuente: "Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones". Cal y Mayor, Rafael, 2007

## 1.2 Enfoques empleados para el análisis de la histéresis

### 1.2.1 Macroscópico: Treiterer y Myers (1974)

El fenómeno de histéresis de tráfico vehicular ha sido documentado a lo largo de varios años y en trabajos de investigación específicos de gran importancia y con diversos puntos de vista. La trascendencia de estos trabajos ha permitido comprender de manera más amplia este fenómeno, puesto que presenta complejidades para ser representado de una forma general y única.

En este capítulo se hará una revisión de algunos de estos trabajos, los cuales han abordado el tema de histéresis del tráfico vehicular desde diferentes perspectivas y enfoques obteniendo resultados interesantes.

Uno de los primeros trabajos en los que se aborda el tema de la histéresis de tráfico vehicular es el de Treiterer y Myers (1974). Donde por medio de medición aérea con ayuda de cámaras fotográficas especiales, obtuvieron datos relacionados con el comportamiento del flujo vehicular, tomando en cuenta la llegada y salida de un pelotón de vehículos a una zona de *tumulto vehicular* ubicada en la

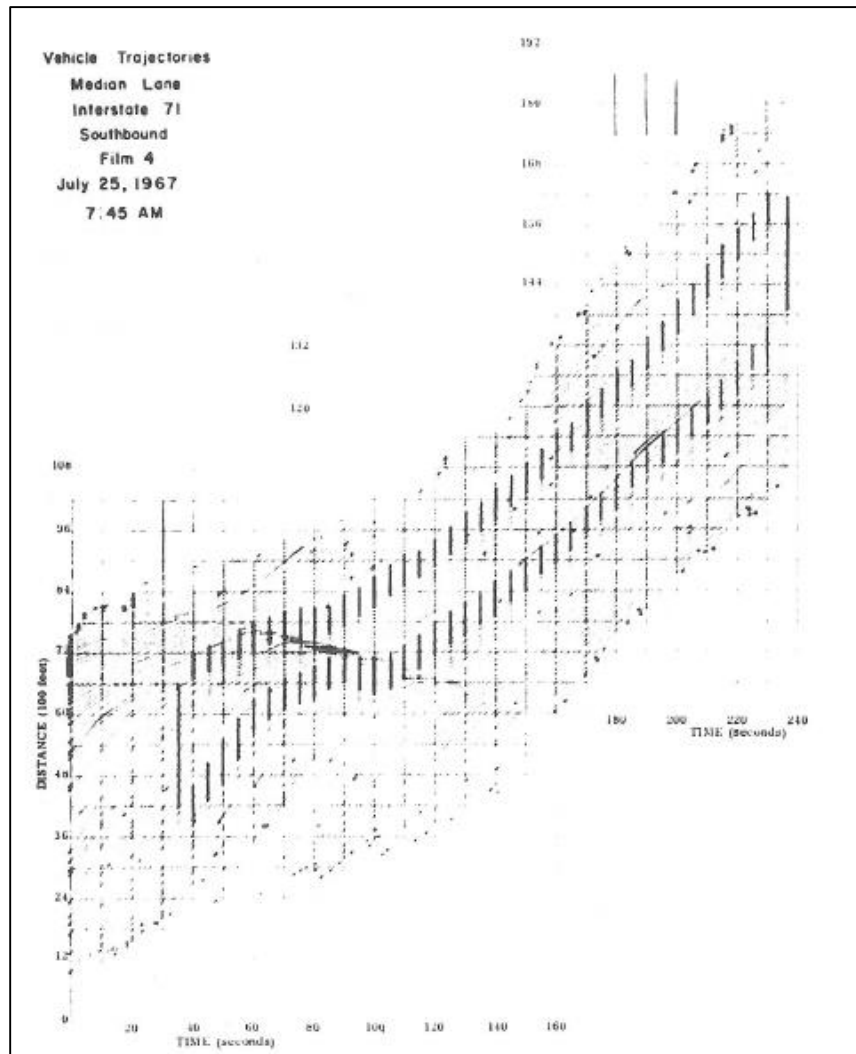
Interestatal 71, Columbus, Ohio, Estados Unidos y haciendo un seguimiento de los mismos durante un período de tiempo determinado.

Esto les permitió hacer un análisis del fenómeno desde un punto de vista macro y microscópico. Con base en la información recabada, obtuvieron los diagramas espacio-temporales del pelotón de vehículos observado obteniendo:

- La relación velocidad-concentración
- La relación concentración- flujo
- La relación energía (rendimiento)-concentración
- La relación espacio medio entre vehículos-concentración

En la Figura 6 se muestra el diagrama espacio-temporal obtenido.

**Figura 6 Diagrama espacio-temporal del pelotón de vehículos observado**



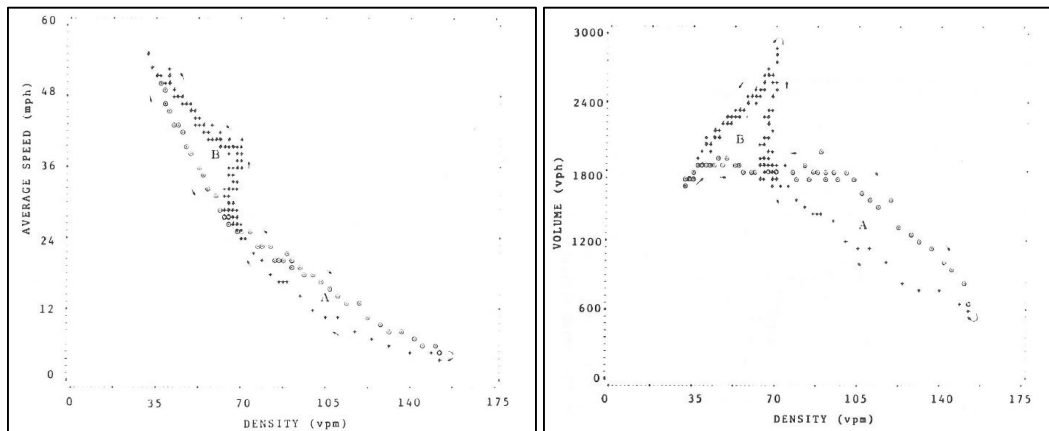
Fuente: Treiterer, Joseph y Myers, Jeffrey. "The Hysteresis Phenomenon in Traffic Flow". Proceedings of the sixth symposium on transportation and traffic theory, D.J. Buckley (Ed.), pp 13-38

Adicionalmente, obtuvieron los diagramas concentración-velocidad y concentración-flujo y con base en ellos poder (pudieron) observar, analizar e identificar el fenómeno de histéresis de tráfico.

En la Figura 7 se muestran los diagramas concentración-velocidad y concentración-flujo que obtuvieron con base en la información recabada.

Los círculos representan el período en el que el pelotón vehicular se acerca al tumulto y las cruces representan el período en el que el pelotón sale de la zona de congestión. La secuencia del comportamiento se muestra con flechas.

**Figura 7 Diagramas concentración-velocidad y concentración-flujo**



Fuente: Treiterer, Joseph y Myers, Jeffrey. "The Hysteresis Phenomenon in Traffic Flow". Proceedings of the sixth symposium on transportation and traffic theory, D.J. Buckley (Ed.), pp 13-38

Como los describen, en el diagrama concentración-velocidad, se observan dos espiras A y B con un incremento drástico en la velocidad pasando de 26 a 40 mi/h manteniendo una concentración más o menos constante de 66 veh/mi, llamando a este período como *fase de recuperación*. Después de dicha fase la concentración decrece conforme aumenta la velocidad, para después volver a disminuir conforme aumenta la densidad.

El diagrama concentración-flujo tiene un comportamiento similar, es decir, se pueden apreciar los dos espiras con la fase de recuperación presentándose con 70 veh/mi como valor más o menos constante.

De esta manera, definieron el fenómeno de histéresis de flujo vehicular como "la presencia de una demora de cierto pelotón vehicular debido a la entrada y salida de una zona de congestión y existiendo una fase recuperación y la formación de espiras en el tiempo". Adicionalmente, hicieron un análisis del fenómeno tomando en cuenta:

- La relación energía-concentración
- La asimetría de la aceleración y desaceleración vehicular
- El enfoque *car-following*

La relación energía-concentración fue un enfoque interesante que utilizaron para analizar la histéresis y en donde utilizaron la ecuación de la energía cinética expuesta a continuación:

$$\frac{1}{2}mv^2 = cku^2$$

En donde:

c=constante;

k=concentración de tráfico;

u=velocidad media espacial del pelotón de vehículos analizados

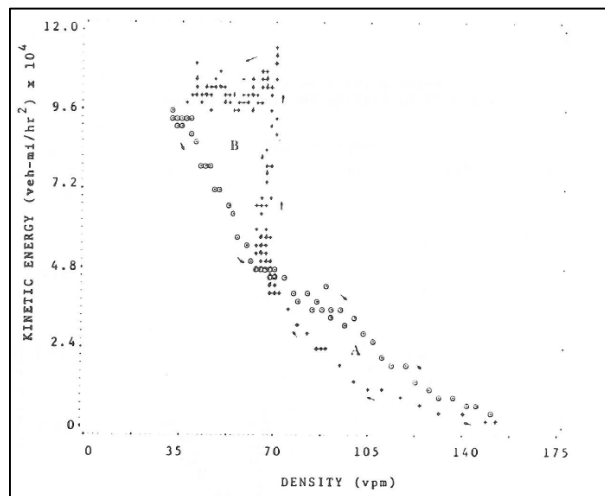
Podemos observar que la masa fue reemplazada por la concentración y la velocidad por la velocidad media espacial que al ser simplificadas, se expresan de la siguiente manera:

$$\left(\frac{\text{vehículos}}{\text{km}}\right) \times \left(\frac{\text{km}}{\text{hora}}\right)^2 = \frac{\text{vehículos}}{\text{hora}} \times \frac{\text{km}}{\text{hora}} = qu$$

La ecuación muestra compatibilidad de unidades en relación con la ecuación fundamental de la ingeniería de tránsito.

El gráfico obtenido por Treiterer y Myers con este enfoque se muestra en la Figura 8.

**Figura 8 Diagrama concentración-energía cinética**



Fuente: Treiterer, Joseph y Myers, Jeffrey. "The Hysteresis Phenomenon in Traffic Flow". Proceedings of the sixth symposium on transportation and traffic theory, D.J. Buckley (Ed.), pp 13-38

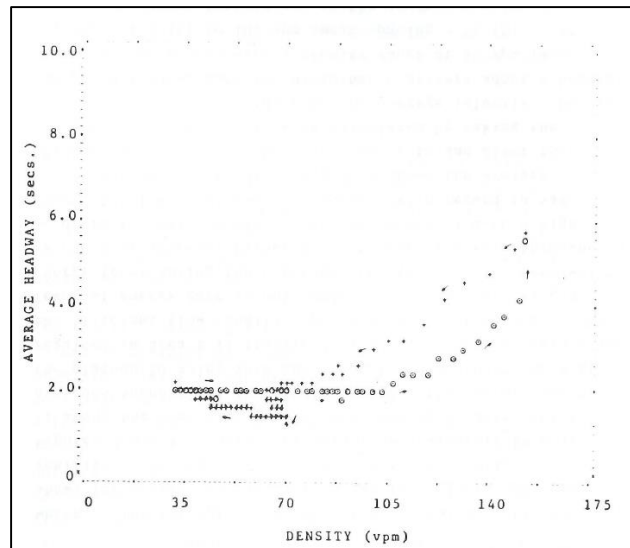
En el diagrama de la figura anterior se observa la pérdida y/o ganancia de energía en relación a la concentración vehicular. Siendo particularmente notable el aumento súbito de energía cuando se tiene una concentración de 70 veh/mi para después, disminuir levemente hasta aproximadamente 9.6 veh-mi/hr<sup>2</sup> x 10<sup>4</sup> y posteriormente disminuir gradualmente proporcional a la concentración.

Al medir el área formada por la espira A (aproximadamente 88 unidades) y el área formada por la espira B (93 unidades), se refuerza la hipótesis de que la energía perdida por el pelotón entrando y

atravesando la zona de congestión debe de ser recuperada en el área B si el flujo es capaz de regresar a la condición de flujo “eficiente” previo a la zona de congestión.

Asimismo, observaron el fenómeno utilizando un diagrama de concentración-tiempo de paso<sup>1</sup> entre vehículos. En la Figura 9 se muestra dicho diagrama previo a la zona de congestión y después de la misma.

**Figura 9 Diagrama concentración-tiempo de paso entre vehículos**



Fuente: Treiterer, Joseph y Myers, Jeffrey. “*The Hysteresis Phenomenon in Traffic Flow*”. Proceedings of the sixth symposium on transportation and traffic theory, D.J. Buckley (Ed.), pp 13-38

La utilidad de este diagrama radica en la representación de incrementos y disminución de tiempos de paso entre vehículos a través del tiempo. Cuando el pelotón de autos salen de la zona de congestión experimentan tiempos entre vehículos más largos hasta que se obtiene un tiempo entre vehículos con una concentración de 70 veh/mi.

Desde el punto de vista microscópico el trabajo consistió en una revisión de trabajos (con) la aceleración y desaceleración como principal característica del flujo vehicular en zonas de congestionamiento. Adicionalmente analizan el fenómeno desde el enfoque car-following, el cual no se discutirá en el presente trabajo.

De manera general, el trabajo de Treiterer y Myers es uno de los primeros trabajos que abordan el análisis del fenómeno de histéresis bajo diferentes puntos de vista y considera variables macroscópicas y microscópicas, siendo base fundamental para diversos trabajos posteriores.

Aunque en este trabajo no presentaron modelos matemáticos que representara este comportamiento, fue de gran utilidad y relevancia el hecho de que describieran de manera detallada el fenómeno, tomando en cuenta la metodología de medición y levantamiento de los datos.

<sup>1</sup> La determinación del tiempo de paso la obtuvieron dividiendo la distancia promedio entre vehículos entre la velocidad promedio.

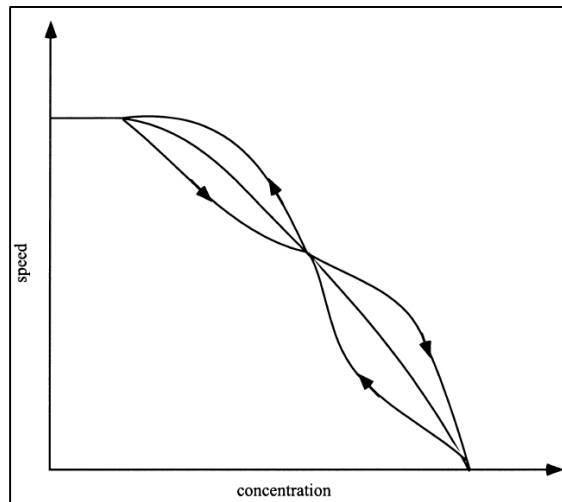
### 1.2.2 Mesoscópico: Zhang H. M. (1998)

Por otra parte, Zhang (1998) hace un razonamiento del comportamiento del tráfico vehicular a partir de la relación concentración-velocidad, obteniendo un modelo matemático para representar el flujo en su fase de transición asociado a ondas de viaje. Así, obtiene la ecuación

$$\frac{dv}{dt} = -\rho v'^2 \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

La expresión representa un modelo en desequilibrio con curvas concentración-velocidad colapsadas a la curva de equilibrio. Su representación gráfica se presenta en la Figura 10

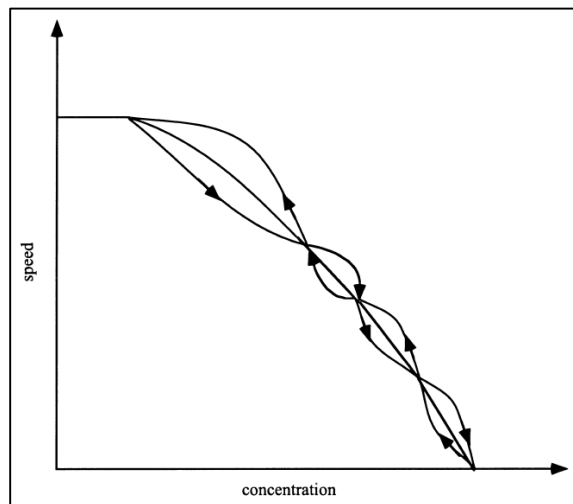
**Figura 10 Curvas concentración-velocidad obtenidas por la teoría. Dos espiras**



Fuente: "A mathematical theory of traffic hysteresis". Zhang, H.M. The University of Iowa, Iowa City. 1999

Como lo menciona Zhang(1998), este modelo no excluye la posibilidad de que pudieran existir más de dos *espiras* en el comportamiento del flujo, pudiendo analizar un flujo con el comportamiento mostrado en la Figura 11.

**Figura 11 Curvas concentración-velocidad obtenidas por la teoría. Múltiples espiras**



Fuente: "A mathematical theory of traffic hysteresis". Zhang, H.M. The University of Iowa, Iowa City. 1999

Sin embargo, el modelo de Zhang no tiene el alcance de poder identificar la ubicación exacta donde ocurre la transición.

Es así como el trabajo del autor, como lo menciona, ha demostrado que las predicciones de la teoría han concordado bien con ciertas observaciones empíricas. Aunque señala, que no pretende obtener fórmulas matemáticas para las curvas de transición sino que el trabajo está enfocado en tener un mejor entendimiento de las propiedades estructurales generales del fenómeno en el flujo de tráfico.

Asimismo, Zhang señala que conseguir una ecuación que unifique en conjunto las características de la histéresis de tráfico es una meta por mucho grande.

### 1.2.3 Macroscópico y analítico, Oscar Sánchez (2003)

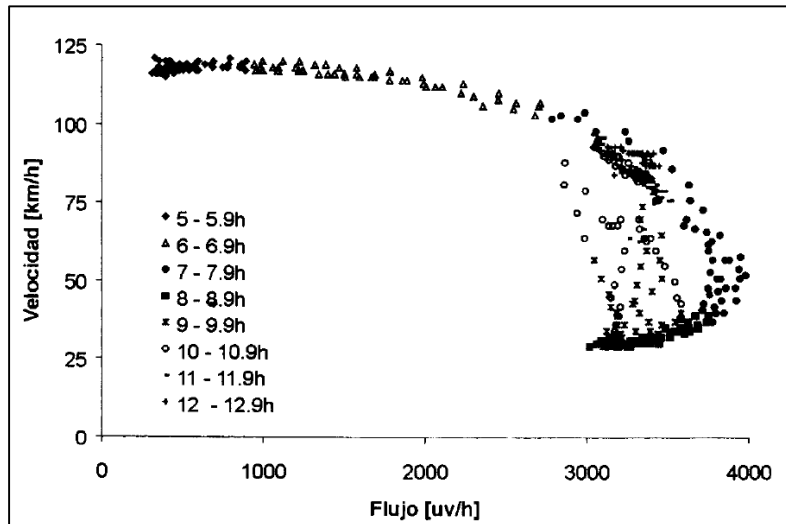
En su trabajo titulado "Modelación de la Histéresis del tráfico a partir de variables macroscópicas: teoría y aplicaciones" (2003), Sánchez explica el concepto de la histéresis de tráfico vehicular a partir del concepto de la histéresis en los materiales, particularmente en el metal y en el caucho. Así, explica de manera breve, que la histéresis en los materiales es la falta de coincidencia de las curvas de incremento y disminución del esfuerzo.

Asimismo, señala la existencia de la histéresis en las sustancias magnéticas y en el concreto, para después aplicar el concepto y fundamento a la histéresis del tráfico vehicular.

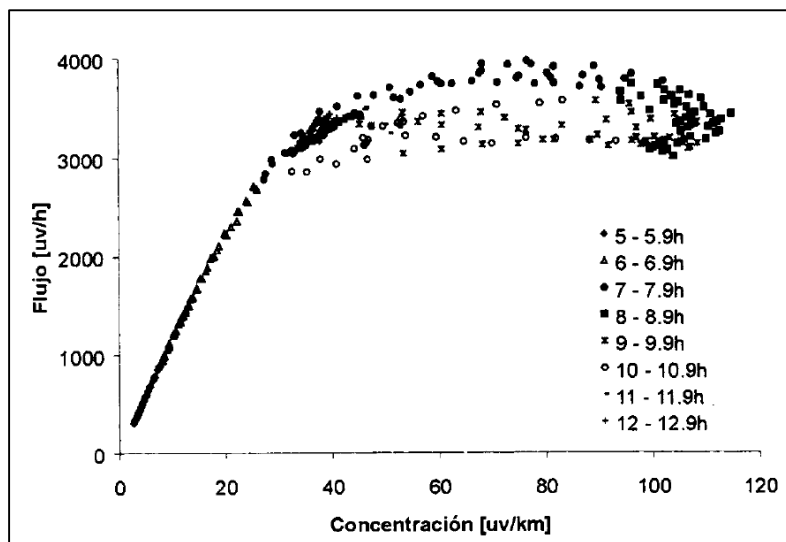
Posteriormente, explica de manera detallada el comportamiento del flujo a través de las principales variables macroscópicas, ya descritas, con datos reales en una vialidad al suroeste de París, Francia. Analizando el comportamiento del flujo a través del tiempo y su relación con la velocidad y la concentración, tal como se muestra en la Figura 12, donde se muestra el diagrama flujo ( $q$ ) – velocidad ( $v$ ) y concentración ( $k$ ) – flujo ( $q$ ) respectivamente que utilizó en su explicación.

Figura 12 Histéresis del tráfico en las relaciones flujo (q) – velocidad (v) (A) y concentración (k) – flujo (q) (B)

A)



B)



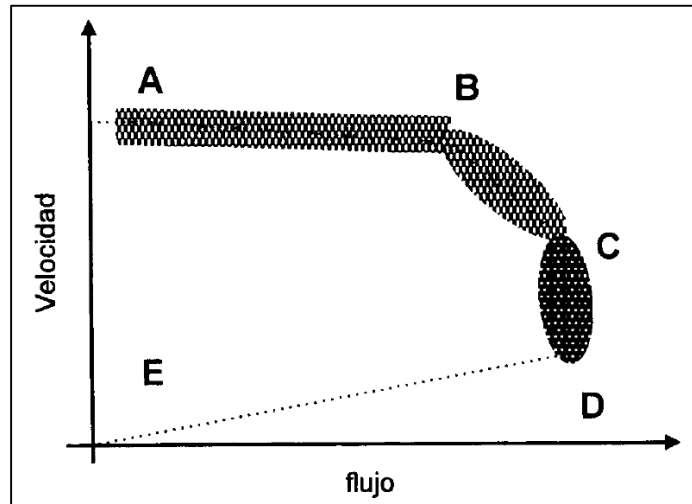
Fuente: SÁNCHEZ, Oscar "Modelación de la histéresis del tráfico a partir de las variables macroscópicas: teoría y aplicaciones. Revista Ideas. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. Agosto 2003.

De igual forma, identifica y muestra la existencia de los regímenes principales que se presentan en el tráfico vehicular, tales como:

- Régimen a flujo libre o fluido (segmento A-B-C)
- Régimen de transición (segmento C-D)
- Régimen de saturación (segmento D-E) y presencia de histéresis

En la Figura 13 se muestra la identificación de los regímenes en un diagrama flujo (q) – velocidad (v)

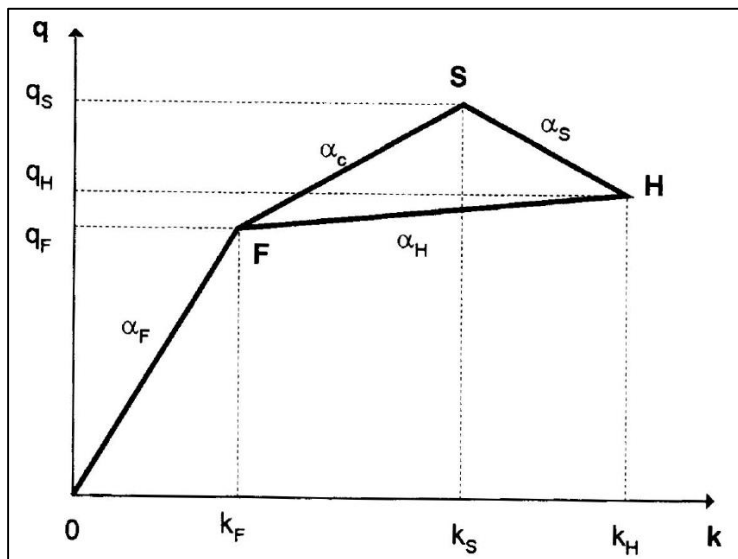
**Figura 13 Régimen de congestión clásico en la relación flujo (q) – velocidad (v)**



Fuente: SÁNCHEZ, Oscar "Modelación de la histéresis del tráfico a partir de las variables macroscópicas: teoría y aplicaciones. Revista Ideas. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. Agosto 2003.

Una vez explicado cada uno de ellos, definió con un enfoque lineal y con base en el diagrama concentración (k) – flujo (q) (cuyo), el modelo que representa cada uno de los regímenes de tránsito y los parámetros que caracterizan cada uno de ellos. En la Figura 14 se muestra de manera gráfica los modelos propuestos.

**Figura 14 Modelo propuesto para la caracterización de la histéresis de tráfico**



Fuente: SÁNCHEZ, Oscar "Modelación de la histéresis del tráfico a partir de las variables macroscópicas: teoría y aplicaciones. Revista Ideas. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. Agosto 2003.

Posteriormente determinó de manera analítica los modelos con base en parámetros fundamentales tales como la pendiente de cada una de las rectas y el flujo previo a cada fase. (Los resultados para cada fase en modo de carga y descarga vehicular se muestran en la Tabla 1 y la Tabla 2 respectivamente).

**Tabla 1 Valores analíticos de los parámetros del estado de carga vehicular**

Fase	Condición	Validez	Pendiente	Flujo Vehicular
Fluido (F)	$\frac{\Delta q(+)}{\Delta k(+)} > 0$	$0 \leq k_j \leq k_F$	$\alpha_F = \frac{q_F}{k_F}$	$q_j = u_F k_j$
Transición (T)	$\frac{\Delta q(+)}{\Delta k(+)} > 0$	$k_F < k_j \leq k_S$	$\alpha_C = \frac{q_S - q_F}{k_S - k_F}$	$q_j = q_F + \alpha_C(k_j - k_S)$
Saturado (S)	$\frac{\Delta q(-)}{\Delta k(+)} < 0$	$k_S < k_j \leq k_H$	$\alpha_S = \frac{q_H - q_S}{k_H - k_S}$	$q_j = q_H + \alpha_S(k_H - k_j)$

Fuente: SÁNCHEZ, Oscar "Modelación de la histéresis del tráfico a partir de las variables macroscópicas: teoría y aplicaciones. Revista Ideas. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. Agosto 2003.

**Tabla 2 Valores analíticos de los parámetros del estado de descarga vehicular**

Fase	Condición	Validez	Pendiente	Flujo Vehicular
Histéresis (F)	$\frac{\Delta q(+/-)}{\Delta k(-)} < 0$	$k_F < k_j \leq k_H$	$\alpha_H = \frac{ q_F - q_H }{k_H - k_F}$	Si $q_F > q_H$  $q_j = q_H + \alpha_H(k_H - k_j)$  Sino  $q_j = q_F + \alpha_H(k_j - k_F)$
Fluido (F)	$\frac{\Delta q(-)}{\Delta k(-)} > 0$	$0 \leq k_j \leq k_F$	$\alpha_F = \frac{q_F}{k_F}$	$q_j = u_F k_j$

Fuente: SÁNCHEZ, Oscar "Modelación de la histéresis del tráfico a partir de las variables macroscópicas: teoría y aplicaciones. Revista Ideas. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. Agosto 2003.

La columna llamada **Fase** se refiere a la fase en el que se encuentra el tránsito, en donde este puede ser, de régimen a flujo libre, forzado, en transición y de saturación. Es en los últimos dos mencionados en donde se presenta el fenómeno de la histéresis del tráfico por tener la característica de que el patrón de comportamiento del régimen fluido no es el mismo a estos.

La columna de **Condición** presenta una relación entre el incremento del flujo y la concentración. El signo se refiere a que si estos incrementan (signo positivo) o decrecientan (signo negativo). Esta condición es la pendiente de la recta de comportamiento de cada fase que caracteriza a la fase de tránsito en cuanto al incremento del flujo y la concentración.

La **Validez** se refiere al rango de valores que puede tener la concentración en la fase correspondiente. De tal manera que valida el comportamiento del flujo con base en los valores de a concentración (k) para cada una de las fases.

---

La **Pendiente** es la relación de incrementos o decrementos del flujo e incrementos o decrementos de la concentración. Es el “ritmo” de cambio del flujo en la fase correspondiente. Se puede observar que representa la velocidad media de los vehículos en la fase correspondiente y por lo tanto el valor puede ser tanto positivo como negativo.

El **Flujo vehicular** es la ecuación final o modelo de la recta que representa el comportamiento del flujo en términos de la velocidad (pendiente) y del flujo inicial de la determinada fase. Este modelo será representativo de la fase de tránsito solo para los valores de  $k_j$  que lo validan.

Se puede observar que este análisis analítico-empírico es una alternativa para caracterizar la operación de la vialidad a partir de datos provenientes de campo y que relaciona las variables macroscópicas del tráfico.

Por lo tanto, los parámetros y modelos lineales mostrados en la tabla anterior serán la base y fundamento de este trabajo, ya que a partir de la información recabada en campo se determinarán los modelos correspondientes al caso particular.

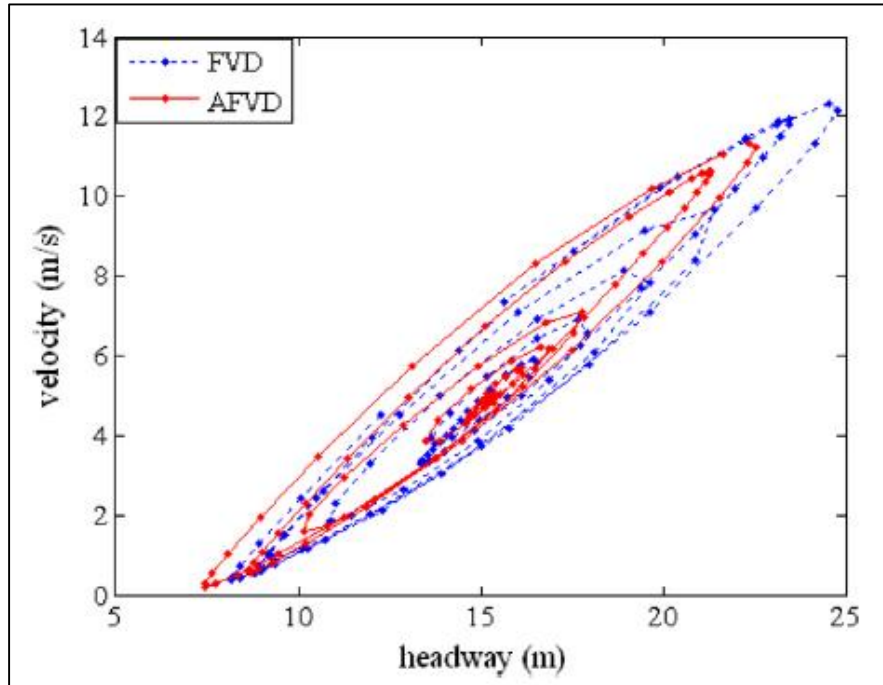
#### **1.2.4 Microscópico: Hao Xu, Hongchao Liu, Huaxin Gong (2013)**

El trabajo realizado en 2013 por Hao Xu, Hongchao Liu y Huaxin Gong titulado “*Modeling the asymmetry in traffic flow (a): Microscopic approach*” presenta un modelo microscópico de tipo car following en donde consideran la asimetría de la aceleración y desaceleración de los vehículos.

El trabajo toma en cuenta los *loops* que se pueden generar por el fenómeno de histéresis de tráfico en el modelo llamado Full Velocity Difference (FVD) y el llamado Asymmetric Full Velocity Difference (AFVD).

Así, pudieron hacer una comparación de los loops que presentan el fenómeno de histéresis en ambos casos con una simulación de 300 segundos. En la Figura 15 se muestran las gráficas obtenidas con la modelación.

**Figura 15 Comparación de loops obtenidos en el modelo FVD y AFVD**



Fuente: Hao Xu, Hongchao Liu, Huaxin Gong. Modeling the asymmetry in traffic flow (a): Microscopic approach, Appl. Math. Modell. 2013

Como lo comentan los autores, los loops de histéresis de ambos modelos son similares en forma pero ligeramente diferentes en tamaño y dimensión. Argumentan que esto implica que la diferencia de intensidades de la aceleración y desaceleración quizá resulte en una variación de la magnitud de los loops de histéresis, lo cual, a un nivel macroscópico quizá conduzca a patrones diferentes de formación de la congestión y propagación.

Es claro que las bases en cuanto al conocimiento de estos modelos deben ser sólidas. Igualmente, los conocimientos matemáticos deben ser de un nivel avanzado ya que el entendimiento de las teorías y desarrollo de ecuaciones presentadas en el artículo citado es fundamental.

---

# 2 Análisis de las variables macroscópicas en el tramo de análisis

## 2.1 Información colectada en campo

Para el levantamiento de la información, se hizo una campaña de trabajos de campo que esencialmente incluyó

- Aforos automáticos de 24 horas por los 7 días de la semana para cada uno de los sentidos de circulación<sup>2</sup>.
- Levantamiento de características físicas de la sección transversal en los puntos de aforo y tramos de análisis.
- Recorridos para visualizar tramos con presencia de congestión

Se seleccionaron de manera estratégica tres estaciones de aforo automático y en las cuales también se realizó el levantamiento de características físicas de la sección transversal<sup>3</sup>. Las estaciones de aforo se nombraron como E1, E2 y E3 y las cuales se ubicaron en los siguientes kilometrajes de la Autopista Méxco-Orizaba.

- E1, ubicada en el kilómetro 111+000
- E2, ubicada en el kilómetro 118+800
- E3, ubicada en el kilómetro 138+000

Adicionalmente, se seleccionaron de manera estratégica tres tramos de análisis, de tal manera que en cada tramo se encontrara una de las estaciones de aforo, con la finalidad de caracterizar dichos tramos en cuanto a su demanda y comportamiento vehicular y sus características geométricas que los describen. Estos tramos de análisis se nombraron como T1, T2 y T3 y los cuales se delimitaron de la siguiente manera:

- T1, comprendido entre San Miguel Xoxtla y Periférico Ecológico.
- T2, comprendido entre Periférico Ecológico y la Av. Carmen Serdán.
- T3, comprendido entre Av. Carmen Serdán y Amozoc.

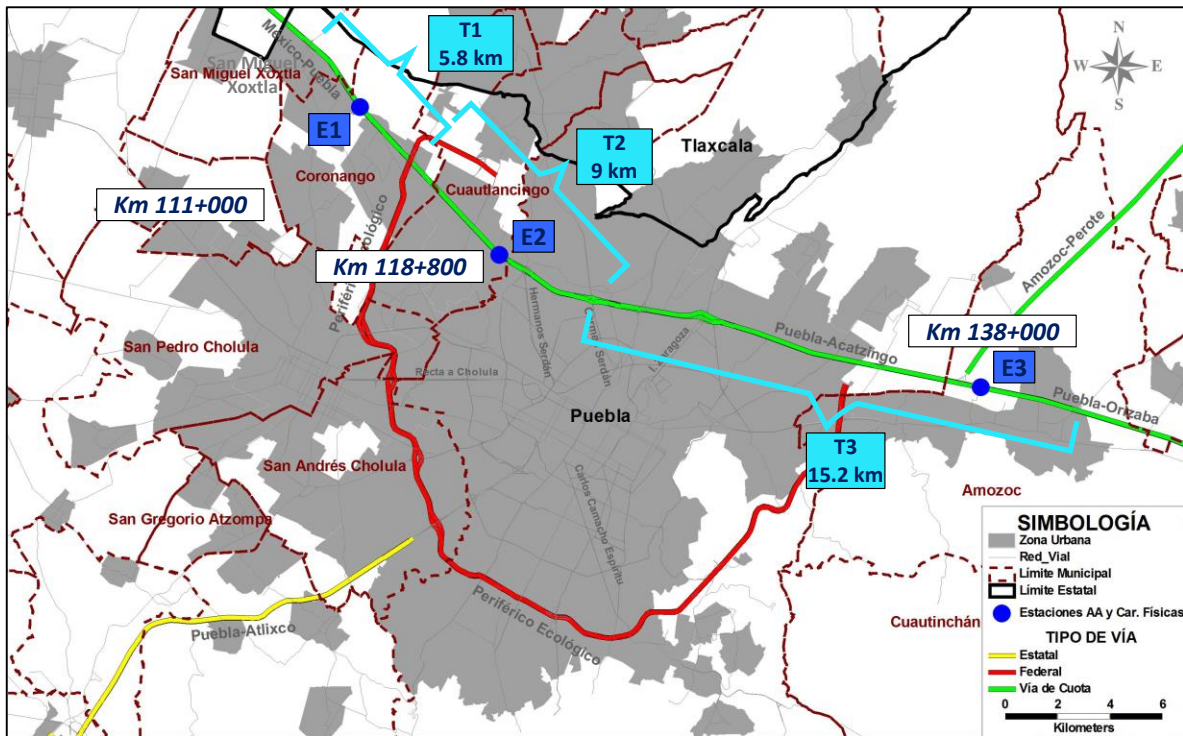
En la Figura 16 se muestra la ubicación de las estaciones de aforo automático y los tramos de análisis mencionados con la longitud de cada uno.

---

<sup>2</sup> Los aforos se realizaron con aforadores de tipo neumático capaces de registrar velocidad, tipo de vehículo, número de ejes, tiempo *headway*, hora de registro, etc.

<sup>3</sup> Asimismo se consideraron dos tramos para verificar la presencia de cuellos de botella.

Figura 16 Ubicación de trabajos de campo



Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestran las características geométricas de las secciones transversales en donde fueron ubicadas cada una de las estaciones de aforo.

Primero deberías describir la zona de estudio y sus características geométricas, después los aforos.

## 2.2 Características geométricas de los tramos analizados

Como se ha mencionado anteriormente, las características geométricas de las vialidades juegan un papel relevante en el comportamiento del tráfico vehicular, ya que estas pueden determinar en gran medida su comportamiento en el transcurso de un determinado tiempo. Los principales elementos que componen las características geométricas de una vialidad son:

- Número de carriles efectivos de circulación en la vialidad
- Ancho de carril
- Existencia de faja separadora central de sentidos de circulación
- Existencia de acotamientos

De tal manera que para este caso, se realizó un levantamiento de las características geométricas de las secciones transversales tomando en cuenta los elementos antes mencionados. Dichos levantamientos se realizaron en donde se ubicaron las estaciones aforo y que se muestran en las siguientes secciones.

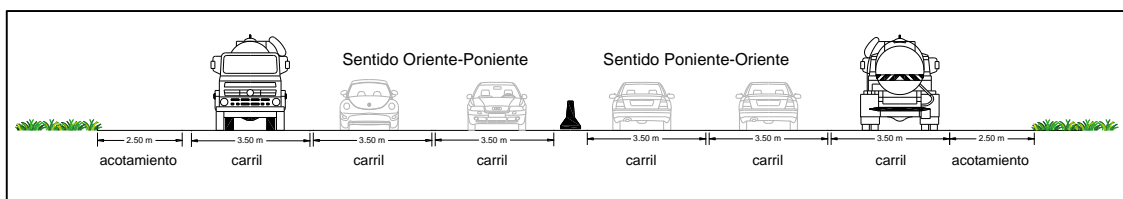
## 2.2.1 Características de la sección transversal Estación 1

La sección transversal de la vialidad en la ubicación de la Estación 1 se compone de:

- Doble sentido de circulación.
- 3 carriles por cada sentido de circulación con ancho de 3.50 m por carril.
- Acotamiento aproximado de 2.50 m por cada sentido de circulación.
- Barrera separadora de concreto como elemento separador de sentido de circulación.

En la Figura 17 se muestra de manera esquemática las características antes descritas.

**Figura 17 Características de sección transversal en Estación 1**



Fuente: Elaboración propia

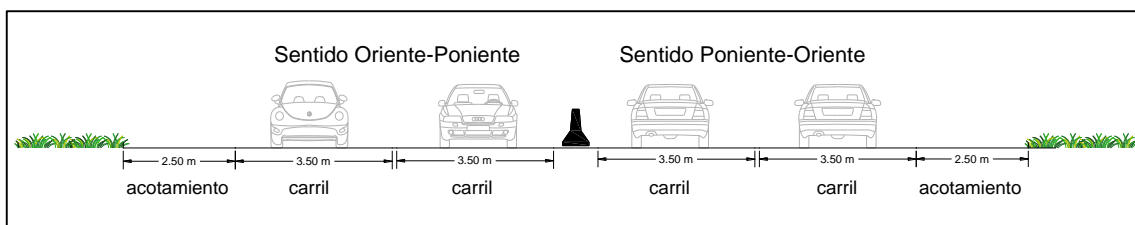
## 2.2.2 Características de la sección transversal Estación 2

La sección transversal de la vialidad en la ubicación de la Estación 2 se compone de:

- Doble sentido de circulación.
- 2 carriles por cada sentido de circulación con ancho de 3.50 m por carril.
- Acotamiento aproximado de 2.50 m por cada sentido de circulación.
- Barrera separadora de concreto como elemento separador de sentido de circulación.

En la Figura 18 se muestra de manera esquemática las características antes descritas.

**Figura 18 Características de sección transversal en Estación 2**



Fuente: Elaboración propia

## 2.2.3 Características de la sección transversal Estación 3

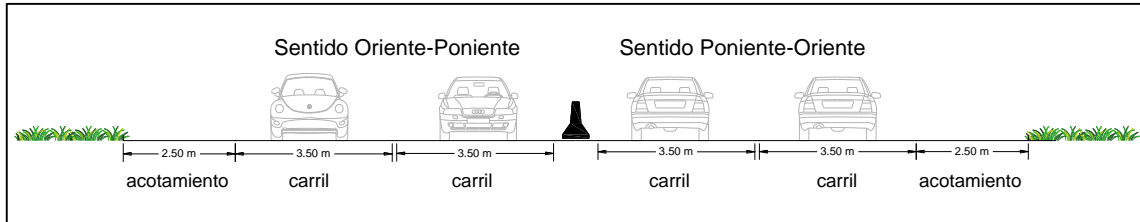
La sección transversal de la vialidad en la ubicación de la Estación 3 se compone de:

- Doble sentido de circulación.
- 2 carriles por cada sentido de circulación con ancho de 3.50 m por carril.
- Acotamiento aproximado de 2.50 m en ambos sentidos de circulación.

- Barreras separadoras de acero como faja separadora de aproximadamente 1.80 m.

En la Figura 19 se muestra de manera esquemática las características antes descritas.

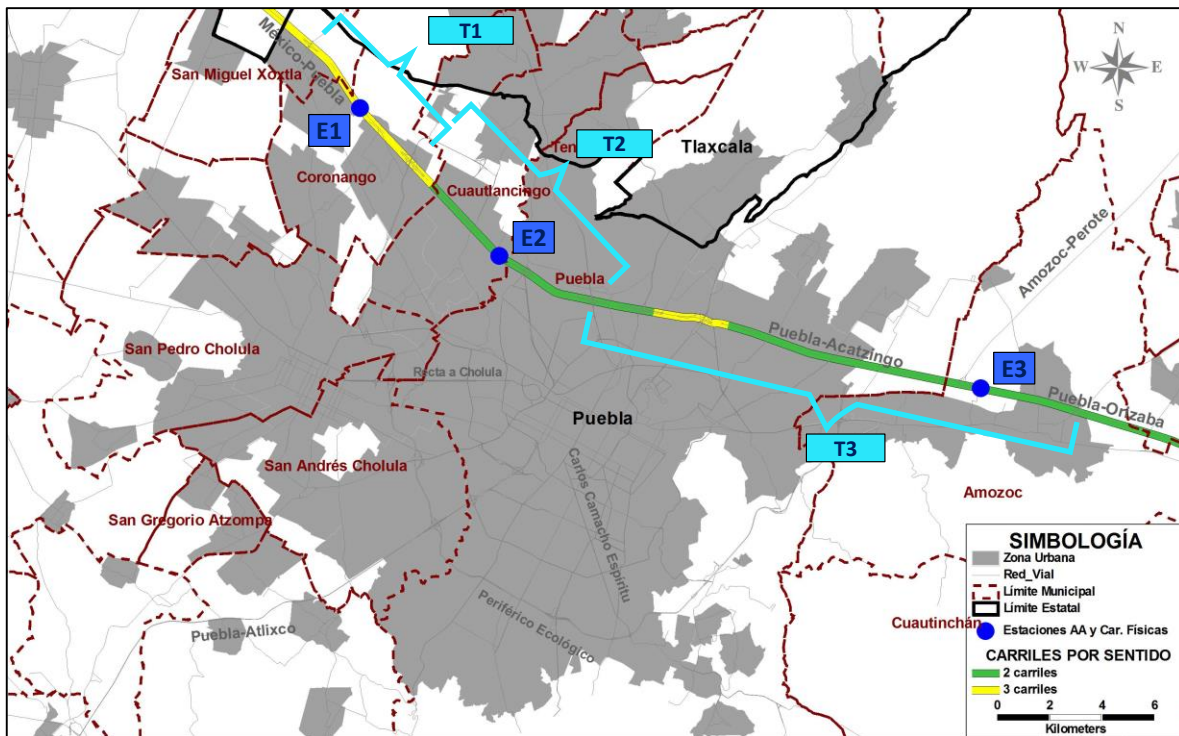
**Figura 19 Características de sección transversal en Estación 3**



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a las figuras anteriores, la sección transversal de las estaciones donde se ubicaron las estaciones de aforos automáticos presenta características similares. Con el fin de complementar la información anterior, en la siguiente figura se muestra un mapa temático de número de carriles por sentido de circulación con la ubicación de las estaciones de aforo y tramos de análisis.

**Figura 20 Número de carriles por sentido de circulación**

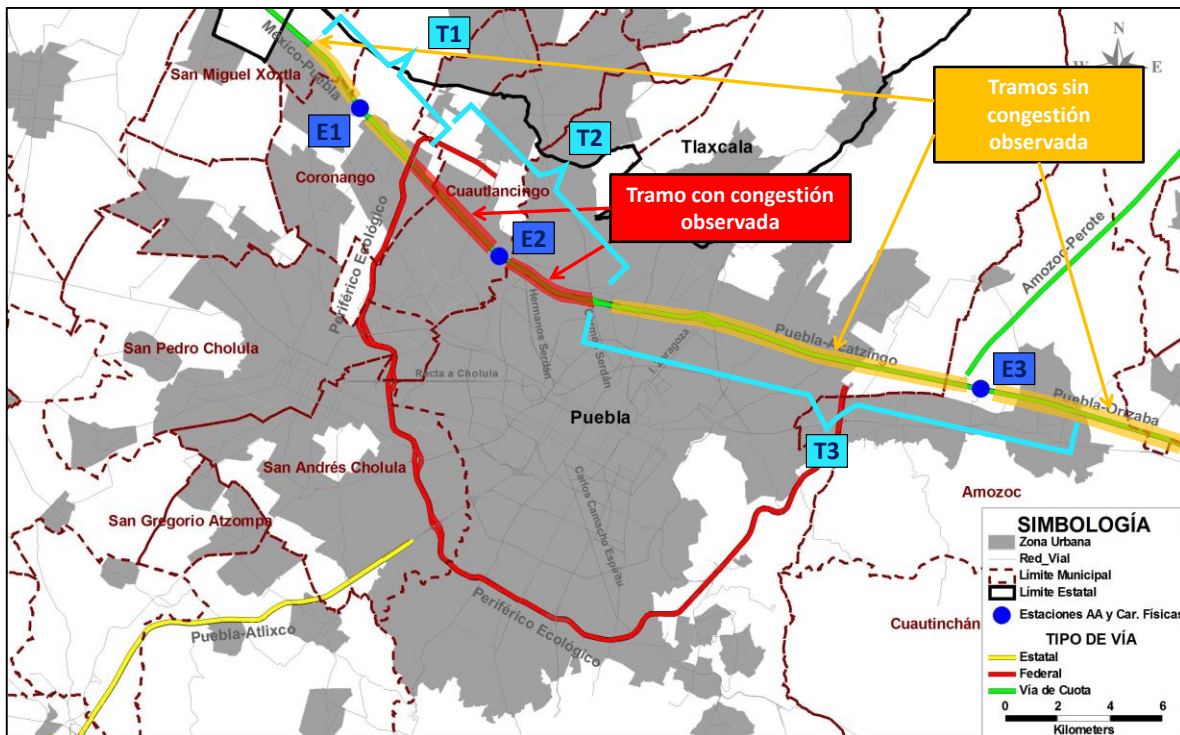


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura anterior, existe una reducción de 3 a 2 carriles entre la Estación 1 y Estación 2, en ambos sentidos. Debido a esto, se puede decir que se presenta un cuello de botella en el sentido México-Puebla, cuyo efecto en cuanto a disminución de velocidades y presencia de congestión, puede ser captado en la Estación 2, que pudiera observarse en los diagramas fundamentales y análisis posteriores.

Adicionalmente se consideró indispensable realizar una revisión visual de campo a lo largo de los tramos mostrados en la Figura 16. Con base en esta observación, producto de los recorridos, en la Figura 21 se muestra un mapa esquemático de la congestión observada en los tramos de análisis.

**Figura 21 Tramos en donde se detectó congestión vehicular**



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura anterior, el tramo en donde se observó congestión fue el tramo T2 en el sentido México-Puebla y que influye directamente en el aforo registrado en la Estación 2 de tal sentido de circulación. Lo observado de manera visual en el tramo T2, sentido México-Puebla, fue:

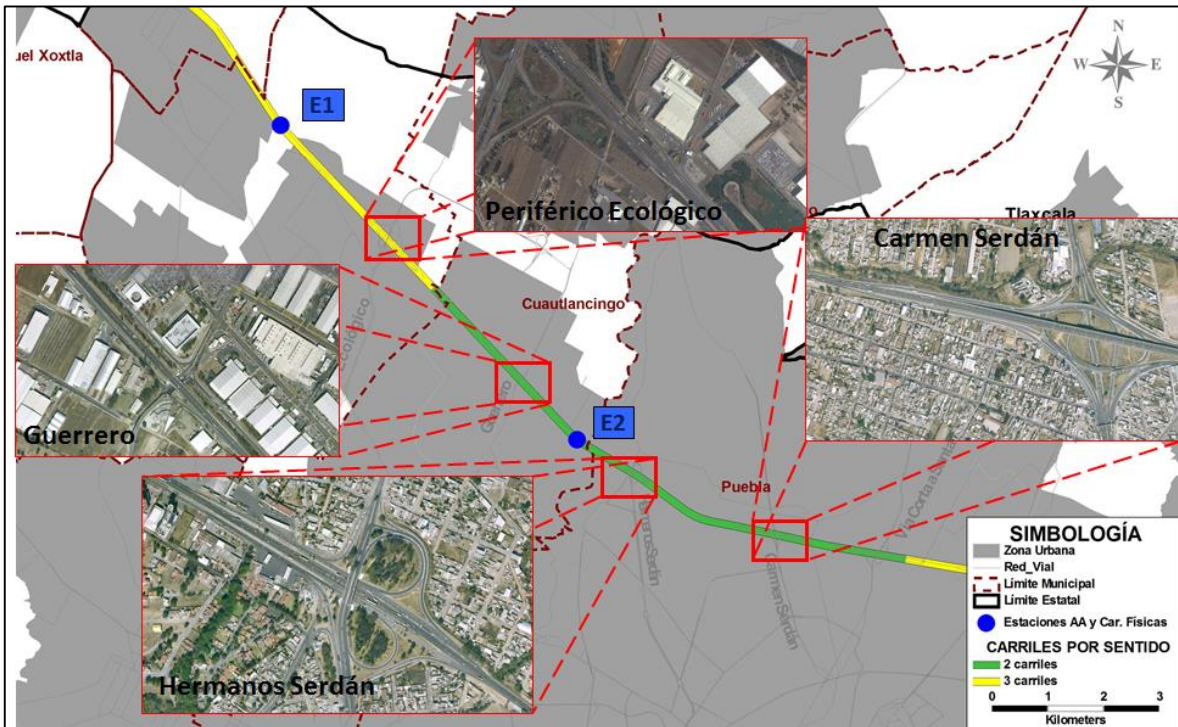
- Bajas velocidades a lo largo del recorrido.
- Demoras considerables del recorrido en ese tramo.

Las causas principales de la congestión detectada en este tramo fueron:

- Reducción de la velocidad principalmente por camiones de carga y por aproximación a la incorporación a la Avenida Hermanos Serdán.
- Reducción de la velocidad debida a aproximación de curva en pendiente hacia abajo en la dirección del flujo.

Para complementar lo observado en campo con respecto a este tramo, en la Figura 22 se muestra una vista en planta de los tres tramos y la ubicación de los accesos y salidas principales.

**Figura 22 Vista en planta de Entronques, accesos principales y cambios de número de carril en los tramos de análisis**



Fuente: Elaboración propia

En la imagen anterior se observa claramente los cambios de carril pasando de 3 a dos carriles y posteriormente nuevamente a 3, en ambos sentidos. Estos cambios de carril pueden ser determinantes para la generación de congestión notable, afectando directamente en los tiempos de recorrido, y velocidades.

Por lo tanto, este tramo será motivo de análisis a detalle debido principalmente a:

- Presencia de accesos y salidas importantes.
- Cambios de número de carriles.
- Flujo con mezcla importante de diversos tipos de automóviles.
- La existencia de automóviles de corto y largo recorrido.
- Existencia de congestión evidenciado por observación.

Como se ha mostrado a lo largo de esta sección, las características geométricas son de relevancia ya que su variación en el número de carriles y la existencia de accesos y salidas importantes es notable. Por tal motivo, pueden ser determinantes en el comportamiento del flujo vehicular, como se verá más adelante.

## 2.3 Características operativas de demanda del tráfico de los tramos y estaciones de análisis

En esta sección se realizan los análisis de los siguientes aspectos:

- Análisis de la demanda en los tres tramos
- Análisis de la composición vehicular en los tres tramos
- Homogenización a vehículos particulares
- Estimación de los valores de las variables para la obtención de los diagramas fundamentales
- Obtención de los diagramas fundamentales y su comparativa con y sin presencia del fenómeno de histéresis.

### 2.3.1 Datos históricos

De acuerdo a datos viales publicados por la Secretaria de Comunicaciones y Transportes (S.C.T) y tomando en cuenta los datos de aforo más cercanos a las estaciones de aforo que se consideraron en este trabajo, se tiene que de 2011 a 2015 se tuvo un crecimiento medio anual de 9.1% en el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) total en el sentido México Puebla. En el sentido Puebla México el crecimiento medio anual es de 7.2%. En la Tabla 3 y Tabla 4 se muestran los aforos históricos de 2011 a 2015 y las tasas de crecimiento media anual para cada sentido de circulación y por tipo de vehículo.

**Tabla 3 Crecimiento medio anual sentido México-Puebla**

SENTIDO MÉXICO-PUEBLA								
AÑO	LUGAR	TE	A	B	CU	CA1	CA2	TDPA
2011	Caseta de Cobro San Martín Texmelucan	2	14,366	1,603	1,883	1,523	661	20,036
2012	Caseta de Cobro San Martín Texmelucan	2	15,141	1,730	1,986	1,751	747	21,356
2013	Caseta de Cobro San Martín Texmelucan	2	15,300	1,597	2,028	1,877	777	21,579
2014	San Miguel Xoxtla	1	20,541	1,744	2,215	2,104	1,080	27,683
2015	X. C. Xoxtla - Huactzinco	1	20,988	1,761	2,357	2,272	1,022	28,400
		TCMA	9.9%	2.4%	5.8%	10.5%	11.5%	9.1%

Fuente: Elaboración propia con base en datos viales de la S.C.T.

**Tabla 4 Crecimiento medio anual sentido Puebla-México**

SENTIDO PUEBLA-MÉXICO								
AÑO	LUGAR	TE	A	B	CU	CA1	CA2	TDPA
2011	Caseta de Cobro San Martín Texmelucan	2.0	15065	1681	1975	1597	693	21,011
2012	Caseta de Cobro San Martín Texmelucan	2.0	15141	1730	1986	1751	747	21,355
2013	Caseta de Cobro San Martín Texmelucan	2.0	15300	1597	2028	1877	777	21,579
2014	San Miguel Xoxtla	1.0	19807	1813	2445	2308	1099	27,472
2015	X. C. Xoxtla - Huactzinco	1.0	19774	1888	2583	2333	1194	27,772
		TCMA	7.0%	3.0%	6.9%	9.9%	14.6%	7.2%

Fuente: Elaboración propia con base en datos viales de la S.C.T.

### 2.3.2 Comparativa de Capacidad Teórica vs Flujo en hora de máxima demanda

Con base en la Tabla 5 y tomando en cuenta que la velocidad máxima de flujo libre permitida es de 100 km/h en la vialidad, tenemos que la capacidad teórica  $C_T$  es de **2,200** veh/h/carril.

**Tabla 5 Capacidad para carreteras multicarril**

Free-Flow Speed (km/h)	PCE Capacity (pc/h/in)
100	2200
90	2100
80	2000
70	1900

Fuente: HCM 2000

Para poder comparar la capacidad teórica anteriormente indicada y el flujo en la hora de máxima demanda (HMD) de acuerdo a los aforos realizados, considerando el día 26 del 09 (día en que se presentó el fenómeno de histéresis) es necesario obtener el flujo equivalente de dicha hora. Haciendo un análisis tenemos que la hora de máxima demanda en ese día es a las 17:00 horas, en la Tabla 6 se muestra el aforo registrado.

**Tabla 6 Flujo HMD**

HORA	A	B	CU	CA1	CA2
17:00	138	407	31	24	18
17:15	146	450	29	23	10
17:30	303	304	35	46	28
17:45	388	220	37	50	36

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7 se muestran los factores de equivalencia a vehículos de pasajeros de acuerdo al tipo de terreno. Considerando un terreno a sinuoso, se tiene que el factor de equivalencia es 2.5 tanto para buses como para camiones.

**Tabla 7 Factores de equivalencia a vehículos de pasajeros**

Factor	Type of Terrain		
	Level	Rolling	Mountainous
$E_T$ (trucks and buses)	1.5	2.5	4.5
$E_R$ (RVs)	1.2	2.0	4.0

Fuente: HCM 2000

Realizando la conversión de los volúmenes de la Tabla 6 aplicando el factor de 2.5 tenemos los volúmenes mostrados en la Tabla 8

**Tabla 8 Vehículos equivalentes en HMD**

HORA	A	B	CU	CA1	CA2	total
17:00	138	1,017	78	60	44	1,337
17:15	146	1,124	73	57	26	1,426
17:30	303	760	88	114	70	1,336
17:45	388	550	93	125	91	1,247
					<b>total</b>	<b>5,346</b>

Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto el flujo total en vehículos equivalentes es

$$q_E = \frac{5,346}{N} = \frac{5,346}{2}$$
$$q_E = 2,673(\text{veh/h/carril})$$

Lo anterior indica que

$$q_E > C_T$$

Este resultado muestra que la capacidad de la vialidad fue rebasada en la hora de máxima demanda, es decir de las 17:00 a las 18:00 horas.

### **2.3.3 Análisis de aforos automáticos vehiculares**

De acuerdo a la información registrada de aforos automáticos en cada una de las estaciones correspondientes a cada tramo de análisis, se observó que hubo períodos de tiempo sin registro de información. En la Tabla 9 se muestra las horas de registro de aforo en cada una de las estaciones que se levantaron en campo, organizadas por día y sentido de circulación.

**Tabla 9 Resumen de horas registradas de aforo por estación, sentido y día.**

ESTACIÓN	SENTIDO	FECHA	HORAS AFORADAS
<b>T1</b>	<b>MEXICO-PUEBLA</b>	23/09/2012	9
		24/09/2012	24
		25/09/2012	23
		27/09/2012	1
	<b>PUEBLA-MEXICO</b>	23/09/2012	9
		24/09/2012	24
		25/09/2012	23
<b>T2</b>	<b>MEXICO-PUEBLA</b>	23/09/2012	8
		24/09/2012	19
		25/09/2012	1
		26/09/2012	24
		27/09/2012	12
	<b>PUEBLA-MEXICO</b>	20/09/2012	23
		21/09/2012	24
		22/09/2012	24
		23/09/2012	24
		24/09/2012	20
		25/09/2012	1
		26/09/2012	24
		27/09/2012	12
<b>T3</b>	<b>MEXICO-PUEBLA</b>	19/09/2012	22
		20/09/2012	24
		21/09/2012	24
		22/09/2012	24
		23/09/2012	24
		24/09/2012	24
		25/09/2012	24
		26/09/2012	24
		27/09/2012	11
			<b>PUEBLA-MEXICO</b>
20/09/2012	24		
21/09/2012	24		
22/09/2012	24		
23/09/2012	24		
24/09/2012	23		
25/09/2012	23		
26/09/2012	24		
		27/09/2012	11

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la tabla anterior, existen días en donde no se registraron las 24 horas del día, por lo tanto esos días no se consideraron para el análisis de identificación del fenómeno de histéresis, ya que para este caso se determinó que es más conveniente tener el registro de todo el día y así poder observar el comportamiento de todo el día.

Asimismo, se obtuvieron los perfiles de demanda por hora de cada una de las estaciones en ambos sentidos, así como también la composición vehicular en porcentaje. La clasificación vehicular se realizó con base en la Tabla 10.

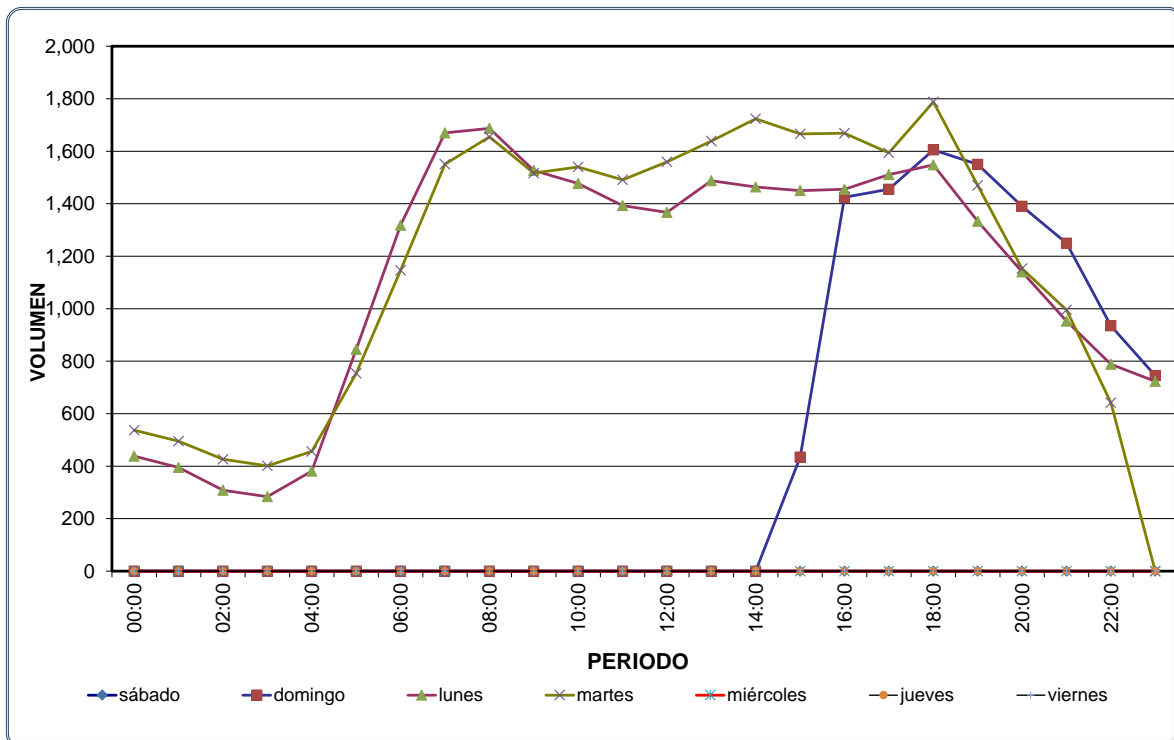
**Tabla 10 Composición vehicular de acuerdo al número de ejes**

CLASIFICACIÓN	NOMBRE	NÚMERO DE EJES
A	Autos	2
B	Buses	de 2 a 3
CU	Camiones Unitarios	de 2 a 4
CA-1	Camiones Articulados-1	de 5 a 6
CA-2	Camiones Articulados-2	más de 7

Fuente: Elaboración propia

De tal manera que en la Figura 23 se muestra el perfil de demanda horario de la estación E1.

**Figura 23 Perfil de demanda horario de la estación E1 sentido México-Puebla día**

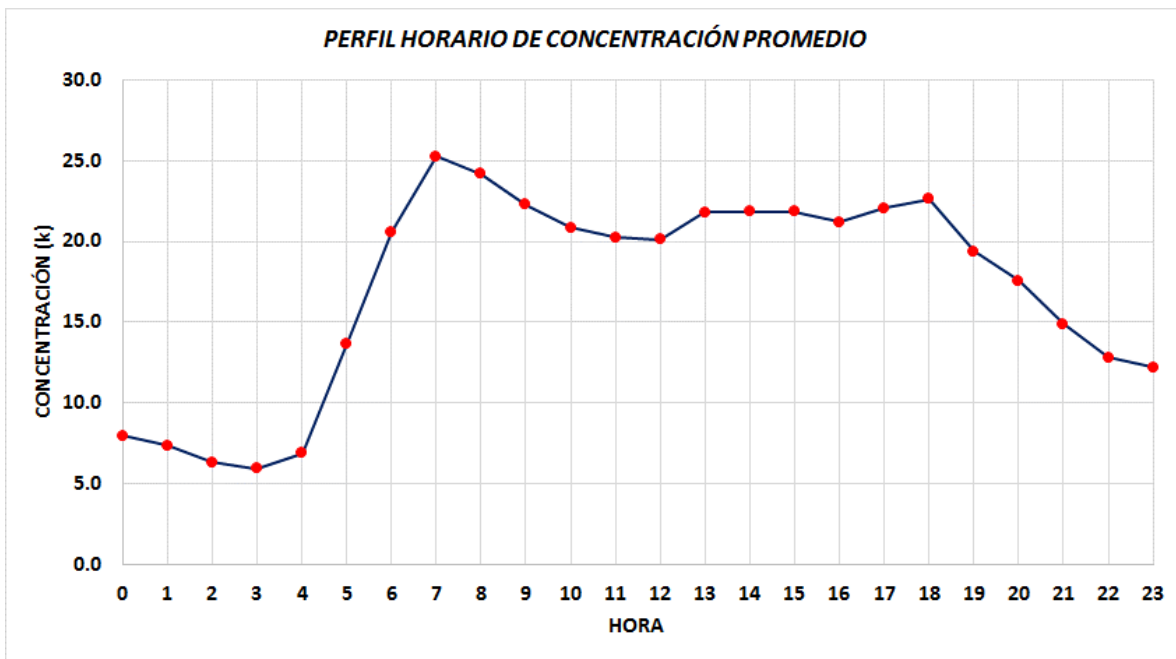


Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la Tabla 9 solo existe registro de 24 horas para el día lunes. En el Anexo 1 se muestran los perfiles para todas las estaciones de aforo. Adicionalmente se obtuvieron los perfiles horarios de las concentraciones y velocidades promedio en cada una de las estaciones, por sentido de circulación solo en los días con registro de 24 horas

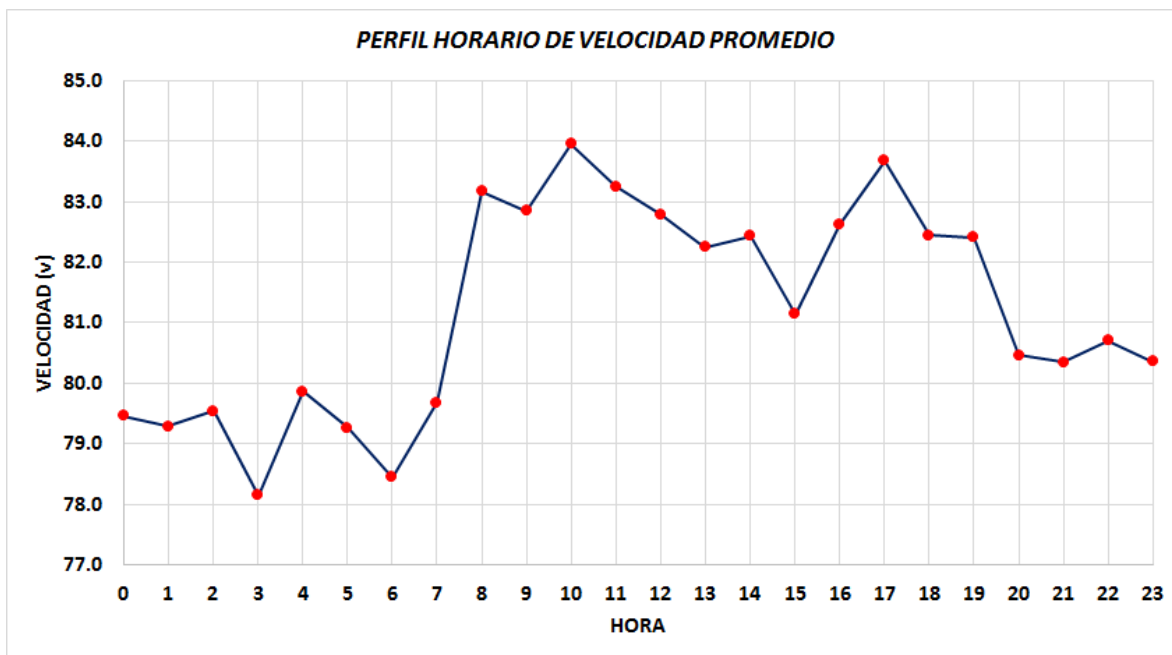
En la Figura 24 y Figura 25 se muestra el perfil horario de concentración y velocidad respectivamente.

**Figura 24 Perfil horario de concentración promedio, estación E1, sentido México-Puebla**



Fuente: Elaboración propia

**Figura 25 Perfil horario de velocidad promedio, estación E1, sentido México-Puebla**

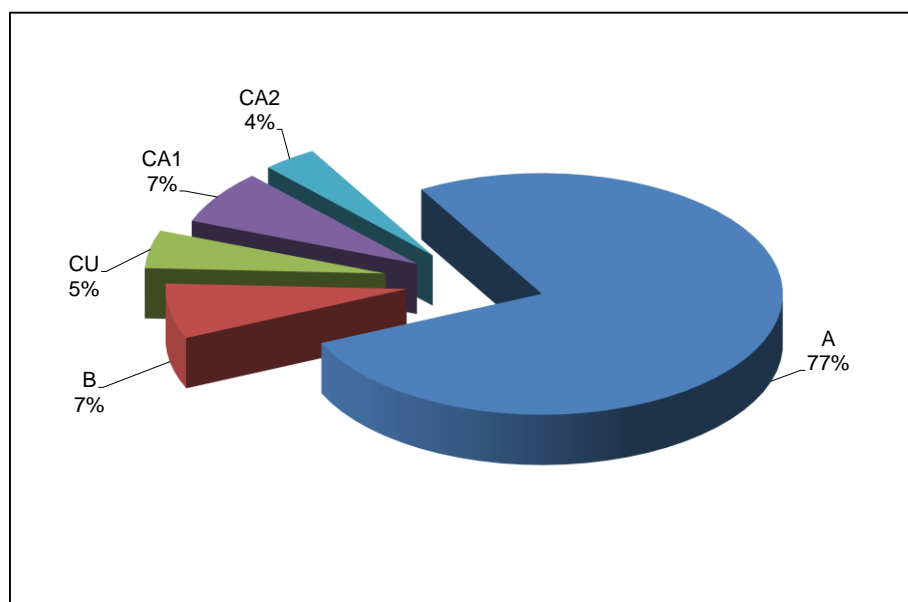


Fuente: Elaboración propia

Los perfiles horarios de concentración y velocidad promedio de los diferentes días de cada una de las estaciones y por sentido de circulación, se presentan en el Anexo 2

En la Figura 26 se muestra la composición vehicular, en porcentaje, registrado en la estación E1.

**Figura 26 Composición vehicular estación E1 sentido México-Puebla**



Fuente: Elaboración propia

En el Anexo 1 se muestran la composición vehicular de las demás estaciones por sentido y en ambos sentidos de circulación.

### 2.3.3.1 Homogenización de vehículos

La homogenización de los vehículos consistió en la transformación de los buses, camiones unitarios y articulado a su equivalente, en cantidad, de vehículos particulares. De tal manera que se consideró un **factor de equivalencia** (F.E.) que transformará tanto a los buses como a los camiones a autos particulares.

Los valores del factor de equivalencia para cada auto se determinaron consultando el Highway Capacity Manual 2000, (HCM 2000, por sus siglas en inglés). En la Tabla 11 se muestra dichos valores.

**Tabla 11 Factores de equivalencia para homogenización de vehículos**

TIPO_AUTO	F.E.
B	1.5
CU	1.5
CA1	2.5
CA2	3.5

Fuente: Elaboración propia

El factor de equivalencia F.E. se aplica simplemente multiplicando el volumen obtenido para cada tipo de vehículo por el factor de equivalencia correspondiente. Lo anterior se realiza para cada uno de los períodos de aforo considerados. La ecuación de conversión queda como se muestra a continuación.

$$V_{EQ} = V_A + V_B(1.5) + V_{CU}(1.5) + V_{CA1}(2.5) + V_{CA2}(3.5)$$

En donde:

$V_{EQ}$ =Volumen equivalente en autos particulares (veh);

$V_A$ =Volumen de autos particulares (veh);

$V_B$ =Volumen de Buses (veh);

$V_{CU}$ =Volumen de Camiones Unitarios (veh);

$V_{CA1}$ =Volumen de Camiones Articulado 1 (veh);

$V_{CA2}$ =Volumen de Camiones Articulado 2 (veh)

Como ejemplo, en la Tabla 12, se muestra el resultado de los vehículos equivalentes para un período de las 00:00 a la 01:00 horas en períodos de 15 minutos.

**Tabla 12 Ejemplo de obtención de vehículos equivalentes**

HORA:MINUTO	A	B	CU	CA1	CA2	A_EQUIV.
0:15	63	282	20	12	9	577.5
0:30	57	158	27	12	14	413.5
0:45	46	77	23	4	2	213.0
0:60	29	63	25	5	9	205.0

Fuente: Elaboración propia

Así, los valores obtenidos de autos equivalentes serán los utilizados para determinar el flujo vehicular.

### 2.3.3.2 Estimación del flujo (q)

Dado que el concepto de flujo vehicular se determina en (veh/h), entonces será necesario convertir los volúmenes a flujo. En el caso que de que se considere una segmentación de períodos por minuto, la determinación del flujo será

$$q = V_{EQ}(60)$$

En donde:

$Q$ =flujo vehicular (veh/h);

$V_{EQ}$ =Volumen equivalente en autos particulares (veh)

En el caso que de que se considere una segmentación de períodos de 15 minutos, la determinación del flujo será

$$q = V_{EQ}(4)$$

En donde:

$q$ =flujo vehicular (veh/h);

$V_{EQ}$ =Volumen equivalente en autos particulares (veh)

Es importante precisar que, de acuerdo a la teoría presentada en el Capítulo 1, los aforos registrados por los equipos neumáticos son volúmenes vehiculares y que por lo tanto no requieren ser convertirlos a flujo. Sin embargo, en los estudios de tránsito, el flujo generalmente es representado en veh/h y por lo tanto, los volúmenes se llevan a estas unidades para ser considerados como flujo vehicular.

### 2.3.3.3 Estimación de la velocidad (v)

La velocidad para un determinado período se considera como el promedio aritmético de la velocidad de todos los automóviles en dicho periodo de análisis. La velocidad media considerada en esta estimación es la velocidad media espacial, explicada en el Capítulo 1.

El equipo de aforadores automáticos de tipo neumático que se utilizaron para este estudio, tienen la capacidad de medir la velocidad de todos y cada uno de los vehículos que son registrados por el equipo; por consiguiente se contó con una base de datos extensa de las velocidades de todos los autos registrados.

### 2.3.3.4 Estimación de la concentración (k)

La estimación de la concentración (k) se realiza a partir de la ecuación fundamental, tal y como se mostró en la sección 1.1.1, es decir,

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

En donde las variables ya son, hasta este punto, conocidas.

Como se puede observar, una vez obtenido el flujo y la velocidad promedio, ya es posible determinar la concentración (k), que estará dada en (veh/km).

De tal manera que se tendrán los valores para cada una de las variables, de cada uno de los períodos considerados de cada estación, sentido de circulación y día. En la Tabla 13 se muestra un ejemplo de los valores obtenidos para cada una de las variables.

**Tabla 13 Ejemplo de valores del flujo, velocidad y concentración para períodos de 15 minutos de las 00:00 a las 01:00 horas**

HORA:MINUTO	A_EQUIV.	V_PROM	FLUJO	K
0:15	577.5	108.5	2310.0	21.3
0:30	413.5	116.2	1654.0	14.2
0:45	213.0	117.2	852.0	7.3
0:60	205.0	117.0	820.0	7.0

Fuente: Elaboración propia

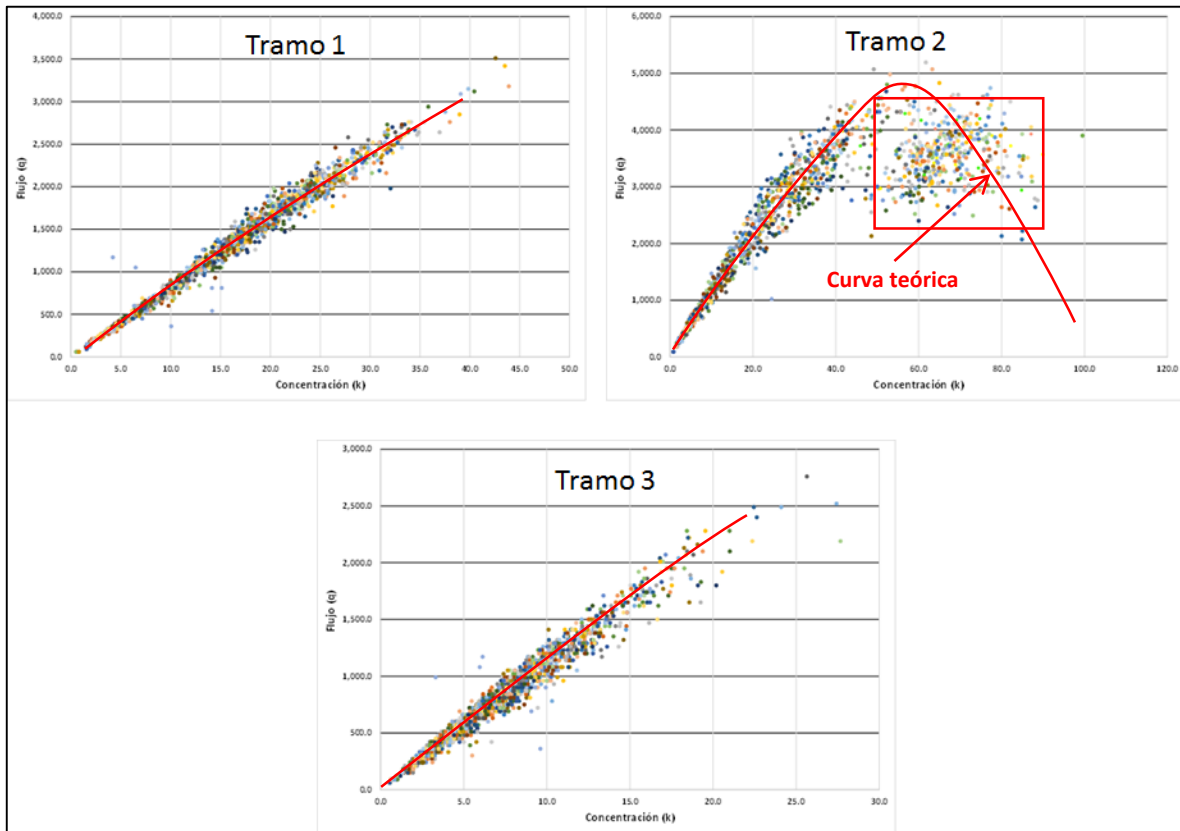
Entonces, una vez que se cuenta con dichos valores, para cada estación y cada sentido de circulación, es posible graficarlos y así obtener los diagramas fundamentales de cada caso.

En el Anexo 3 se muestran los diagramas fundamentales obtenidos considerando una segmentación de 1 minuto, con el fin de observar a detalle la dispersión de los puntos. Con base en los diagramas obtenidos, en las siguientes secciones se muestra la comparativa de estos entre cada uno de los tramos de análisis, de manera que se pueda observar la nube de puntos en cada uno y determinar en qué tramo se presenta el fenómeno de histéresis.

## 2.4 Diagrama concentración (k) – flujo (q)

En la Figura 27 se muestra la comparativa entre los tres tramos del diagrama concentración (k)-flujo (q).

**Figura 27 Comparativa del diagrama concentración (k) – flujo (q) entre los tres tramos**



Fuente: Elaboración propia

### 2.4.1 Tramos sin histéresis

Para este caso, los diagramas del tramo 1 y 3 muestran un comportamiento proporcional entre la concentración y el flujo, es decir, a medida que aumenta la concentración también lo hace el flujo, de tal manera que se presenta un comportamiento lineal y por lo tanto el flujo se comporta bajo un régimen a flujo libre, es decir, en el tramo T1 y T3 existen condiciones favorables de tránsito sin congestión y que pudiera generar filas de espera y demoras considerables y por lo tanto la demanda no rebasa la capacidad de la vialidad.

Lo anterior se refleja en que no hay disminución drástica en la concentración y el flujo y que se presente como una dispersión de puntos.

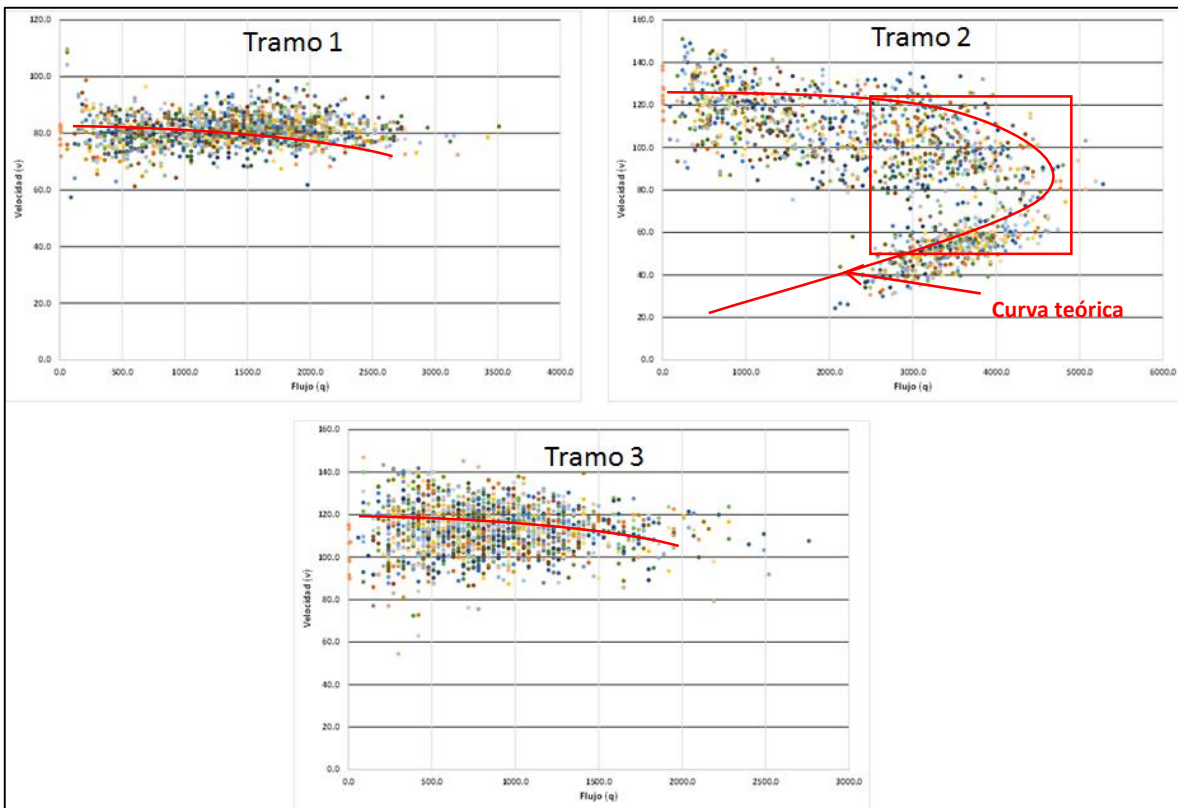
## 2.4.2 Tramo con histéresis

Contrario a lo que se observó en el tramo sin histéresis, en el diagrama del tramo T2 se observa que a partir de una concentración de 40 veh/km se refleja una dispersión de puntos considerable (recuadro rojo) en donde el comportamiento del flujo en relación a la concentración presenta una inestabilidad. Esta dispersión se debe a que el flujo entra en la fase de flujo forzado, de transición y saturación debido a que la capacidad de la vialidad es rebasada por la demanda.

## 2.4.3 Diagrama flujo (q) - velocidad (v)

A continuación se presenta el diagrama flujo (q) – velocidad (v) de los mismos tramos y de igual manera se hace una comparativa de los mismos.

**Figura 28 Comparativa del diagrama flujo (q) – velocidad (v) entre los tres tramos**



Fuente: Elaboración propia

---

#### 2.4.3.1 Tramos sin histéresis

En este caso, se observa que en los tramos 1 y 3 la dispersión de puntos se presenta en la fase de régimen a flujo libre, donde el flujo oscila entre los 200 y 2500 veh/h aproximadamente y con disminución poco significativa de la velocidad, manteniéndose en un rango de entre 65 y 95 km/h para el caso del tramo 1 y de 80 a 140 km/h para el caso del tramo 3. Esto refuerza el comportamiento del diagrama concentración (k) – flujo (q) en cuanto a la proporcionalidad y comportamiento lineal.

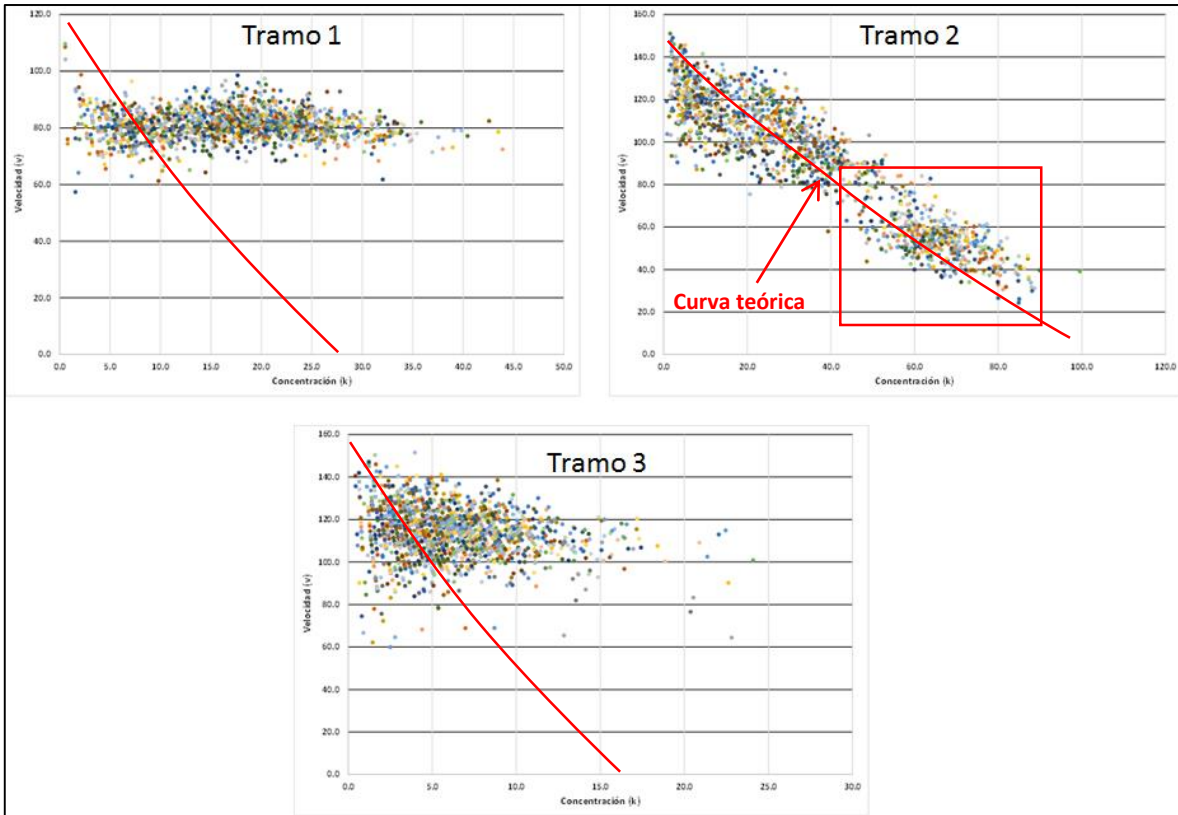
#### 2.4.3.2 Tramo con histéresis

Por el contrario, para el tramo 2, se observa que la dispersión de puntos tiene la forma parabólica teórica de este diagrama, presentándose así, los regímenes a flujo libre, forzado, de transición y saturado. El recuadro en color rojo señala la dispersión más notable de los puntos lo cual representa cambios drásticos en la velocidad en función del flujo existiendo una gran concentración de puntos entre los 2500 y 4500 veh/h.

## 2.4.4 Diagrama concentración (k) – velocidad (v)

En la Figura 29 se muestra la comparativa entre los tres tramos del diagrama concentración (k)-velocidad (v)

**Figura 29 Comparativa del diagrama concentración (k) – velocidad (v) entre los tres tramos**



Fuente: Elaboración propia

### 2.4.4.1 Tramos sin histéresis

Para el caso del tramo 1 se observa que las velocidades se mantienen en un rango de entre 65 y 95 km/h y que no existe disminución drástica de la misma conforme la concentración aumenta, manteniéndose en un régimen a flujo libre. Lo mismo sucede con el tramo 3, aunque la velocidad media se encuentra entre los 80 y 140 km/h, como se observó también el diagrama flujo (q)-velocidad (v). Esto se debe a que no existe una “*inestabilidad*” en el comportamiento del flujo y que por lo tanto no se presenta el régimen de flujo forzado, transición y saturado, como se ha mencionado anteriormente.

Consecuentemente la presencia del fenómeno de histéresis no existe y las condiciones de operación son favorables.

---

#### 2.4.4.2 Tramo con histéresis

En el tramo 2 se puede una fuerte concentración de puntos que oscila entre los 45 y 85 veh/km. A partir de los 45 aproximadamente y hasta los 85 veh/km se presentan fluctuaciones considerables de la velocidad y por lo tanto se presentan los regímenes de transición, saturación y por consiguiente, el fenómeno de histéresis.

De esta manera, se ha evidenciado el fenómeno de la histéresis de tráfico en el tramo T2 sentido México-Puebla que corresponde del día 26-09-2012, con base en los diagramas fundamentales. Lo anterior es de suma relevancia, ya que se ha utilizado la teoría fundamental de la ingeniería de tránsito para analizar a detalle los tramos indicados desde el punto de vista del comportamiento del flujo y sus relaciones con la velocidad y la concentración.

En la siguiente sección se presentan aspectos teóricos fundamentales, complementarios a los mostrados en el Capítulo 1, con el objeto de describir a detalle el fenómeno de histéresis en el tramo 2.

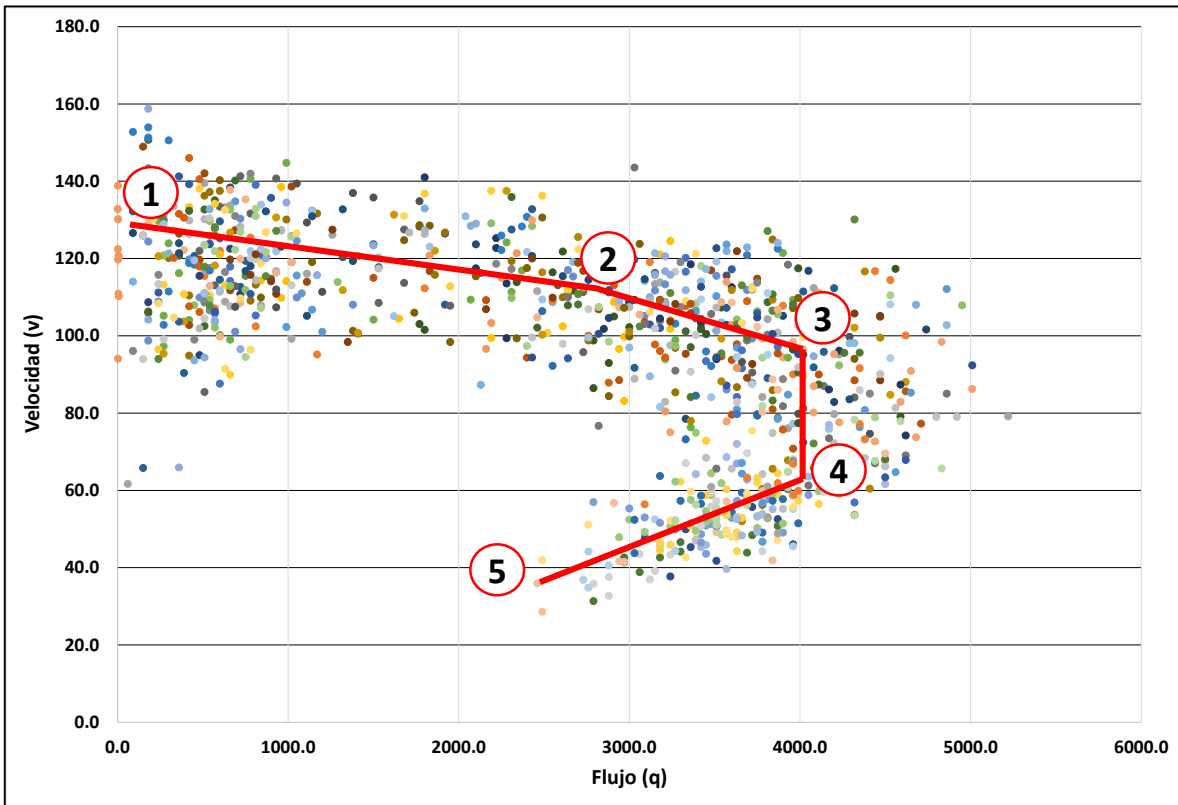
#### 2.4.5 Regímenes de flujo de tránsito. Teoría complementaria

El comportamiento del flujo vehicular en un determinado tramo de una vialidad puede presentarse en ciertos regímenes de flujo que a su vez pueden ser descritos por las variables macroscópicas del tránsito.

Una gráfica de la relación flujo ( $q$ )-velocidad ( $v$ ) puede ayudar a observar estos regímenes e identificarlos de manera más detallada. En la Figura 30 se observa una gráfica clásica del comportamiento del flujo relacionándolo con la velocidad. A continuación se describen dichos regímenes y sus características.

- **Régimen de flujo no saturado:** Se caracteriza por un comportamiento en donde la velocidad disminuye conforme el flujo aumenta, siendo este comportamiento de tipo lineal. A su vez, en este régimen se pueden identificar dos etapas de comportamiento, i) velocidad a flujo libre (segmento 1-2 de Figura 30), que se caracteriza por existir velocidades prácticamente sin restricción y demoras depreciables y; ii) velocidad a flujo forzado (segmento 2-3 de Figura 30), que se caracteriza por existir restricciones poco considerables de viajar a la velocidad deseada.
- **Régimen de transición:** Este régimen se caracteriza en una disminución repentina y considerable de la velocidad al aumentar el flujo (segmento 3-4 de Figura 30).
- **Régimen sobresaturado:** Caracterizado por un aumento del flujo a la capacidad máxima de la vialidad ocasionando grandes demoras y la existencia de filas de espera (segmento 4-5 de Figura 30).

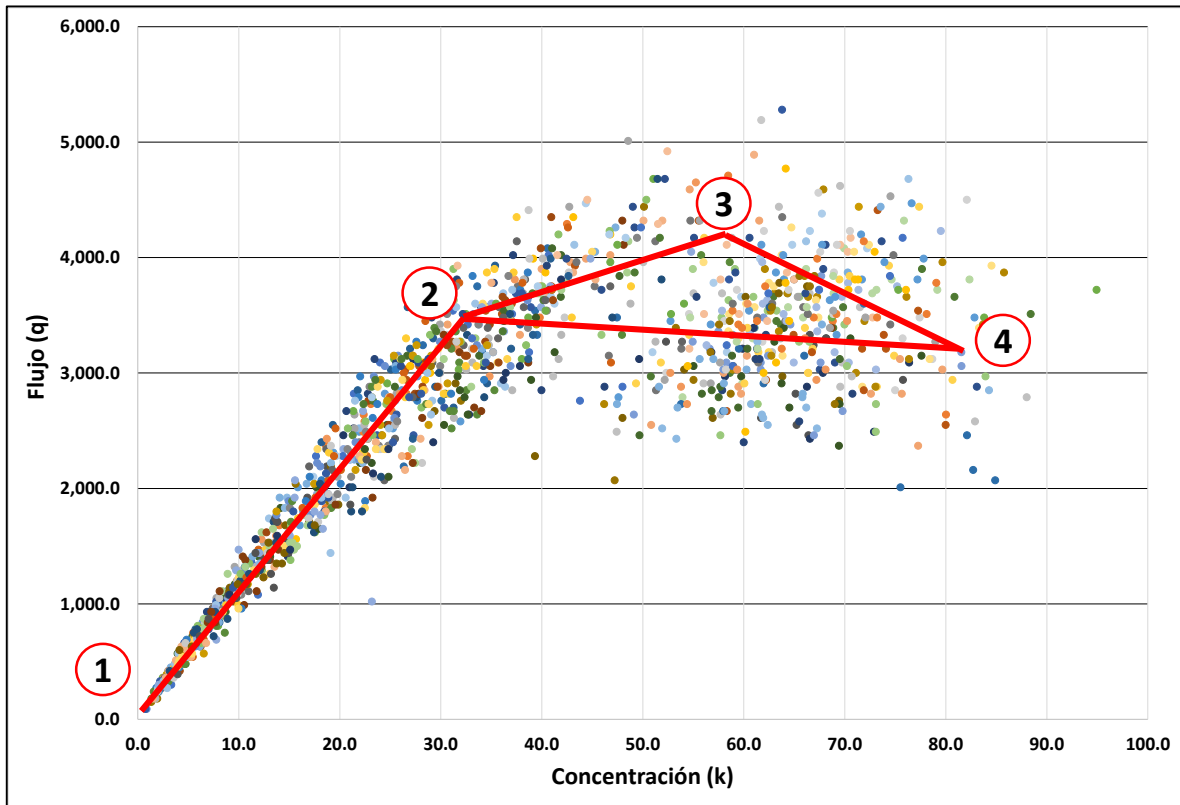
Figura 30 Regímenes del flujo en el diagrama flujo (q)-velocidad (v)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

De manera muy similar al diagrama flujo (q)-velocidad (v), en el diagrama de concentración (k)-flujo (q) pueden igualmente identificarse los cuatro regímenes del flujo como lo muestra la Figura 31.

Figura 31 Diagrama concentración (k)-flujo (q)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

En este diagrama se tiene que el segmento delimitado por los puntos 1 y 2 presenta un comportamiento a flujo libre, de tal manera que existe una relación proporcional entre la concentración (k) y el flujo (q). Posteriormente, en el segmento 2-3 el comportamiento pasa a ser de flujo forzado y donde este no presenta crecimientos considerables aunque la concentración sigue aumentando.

A partir del punto 3, se presenta el régimen de transición, en donde el flujo disminuye de manera más significativa a pesar de que aumenta la concentración, se empiezan a generar las filas de espera y demoras considerables. Después, delimitado por el segmento 4-2, el flujo entra en la fase de sobresaturación, en donde este disminuye y así lo hace también la concentración de manera más drástica, existiendo grandes demoras y filas de espera considerables.

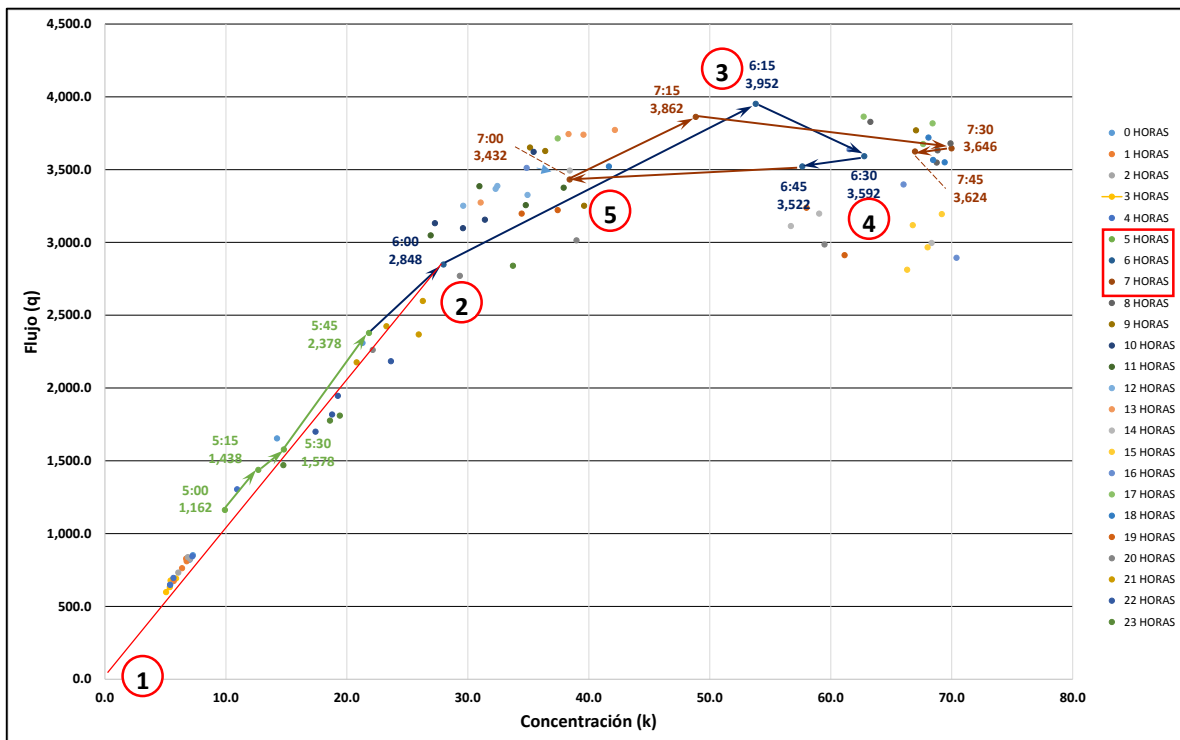
En este punto, la capacidad de la vialidad es rebasada por la demanda de manera que no es posible descargar dicha demanda y por lo tanto los automóviles están detenidos ciertos períodos de tiempo.

En la siguiente sección se analizará a detalle el fenómeno en el tramo 2, considerando los diagramas concentración (k)-flujo (q) y flujo (q)-velocidad (v) a un nivel de detalle de 15 minutos y con fundamento el teoría explicada anteriormente.

## 2.5 Análisis de la histéresis de tráfico en el Tramo 2 sentido México-Puebla

Una vez que se ha identificado el fenómeno de histéresis en el Tramo 2, en el sentido México-Puebla, se analizará a detalle el comportamiento del flujo con base en los diagramas. En la Figura 32 se presenta el diagrama concentración (k) – flujo (q) a un nivel de detalle de 15 minutos.

**Figura 32 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q), Estación 2, sentido México-Puebla en períodos de 15 mins.**



Fuente: Elaboración propia

Como muestra la figura anterior, y con base en la teoría de Sánchez (2003), explicada en la sección 1.2.3, el período de carga de flujo a régimen de flujo no saturado, para el caso de la mañana, se encuentra comprendido entre las 5:00 y las 6:00 hrs (segmento 1-2), a partir de esa hora y hasta las 6:15 las condiciones se presentan a flujo forzado (segmento 2-3). En estas dos etapas el flujo es proporcional a la concentración.

De las 6:15 a las 6:30 (segmento 3-4) se presenta la fase en régimen de transición, ya que el flujo disminuye de manera más significativa y la concentración aumenta. En este momento la vialidad comienza a presentar filas de espera y velocidades bajas. Posteriormente, de las 6:30 a las 7:00 (segmento 4-5) se observa claramente que la concentración disminuye de forma súbita al igual que el flujo pero en menor medida, presentándose así el régimen de saturación.

Se puede observar que la curva de comportamiento concentración (k) – flujo (q) a partir de las 6:15 es claramente diferente a aquella en el período de las 5:00 a las 6:15.

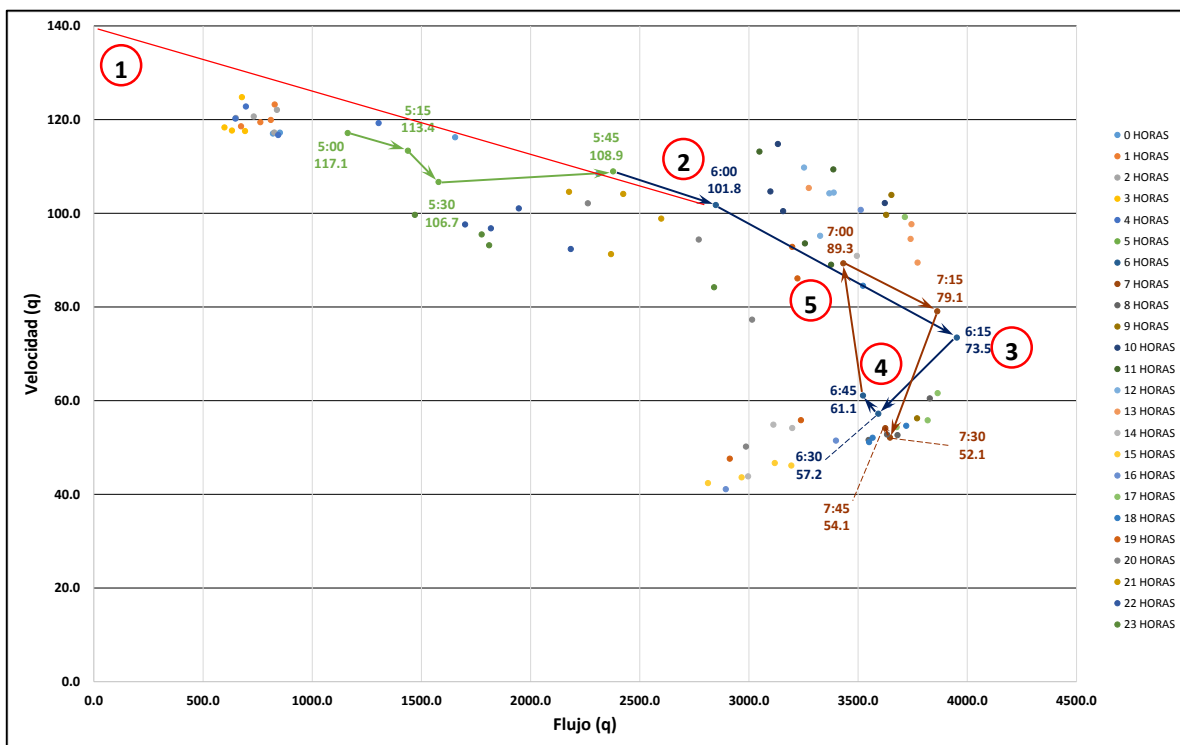
Más aún, después de las 7:00 horas nuevamente se incrementa de manera drástica el flujo hasta las 7:15 y después disminuye nuevamente, formándose una espira de comportamiento que difiere claramente del régimen a flujo libre y forzado (segmentos 1-2 y 2-3). Lo anterior es clara evidencia del fenómeno de histéresis y la presencia de regímenes de flujo de transición y saturado. La relación en estos regímenes dejan de ser lineales y los períodos de carga y descarga se presentan de forma cíclica.

A manera de resumen, los puntos de quiebre que determinan los diferentes regímenes del flujo son:

- Flujo libre.- Inicia en el punto 1 y termina en el punto 2
- Flujo forzado.- Inicia en punto 2 y termina en punto 3
- Transición.- Inicia en punto 3 y termina en punto 4
- Saturado.- A partir del punto 4 y se presenta la histéresis.

Para complementar la evidencia de la presencia de la histéresis, a continuación se muestra el diagrama flujo (q) – velocidad (v).

**Figura 33 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v), Estación 2, sentido México-Puebla en períodos de 15 mins.**



Fuente: Elaboración propia

Nuevamente podemos apreciar en el segmento 1-2 la fase en régimen a flujo libre y en el segmento 2-3 el régimen a flujo forzado, como lo indica la teoría. En estos casos la variación de la velocidad con respecto del flujo es proporcional y por lo tanto se presenta un comportamiento lineal.

---

Sin embargo, a partir de las 6:15 y hasta las 6:30 (segmento 3-4) se presenta una disminución de la velocidad más marcada, disminuyendo de 73.5 a 57.2 km/h y el flujo de casi 4000 veh/h llegando a casi 3500 veh /h, es decir, existe una descarga del flujo. Posteriormente, después de las 6:30 y hasta las 7:00 horas (segmento 4-5) se presenta un aumento súbito de la velocidad pasando de 57.2 a 89.3 km/h y el flujo siendo muy cercano a los 3500 veh/h.

Después de las 7:00 horas, nuevamente disminuye la velocidad y aumenta el flujo (carga de flujo) repitiéndose el fenómeno y el comportamiento de la velocidad con respecto al flujo difiere de manera considerable con régimen a flujo libre y forzado. Por lo tanto, de igual forma se evidencia la presencia del fenómeno de histéresis en el período de las 6:15 a las 7:45, como lo indica la Figura 33.

A partir de esta evidencia y con base en los períodos mostrados en los diagramas, se pueden determinar modelos representativos del fenómeno en dichos períodos en relación al tramo T2. La caracterización de estos modelos se hace en las siguientes secciones con base en la teoría de Sánchez (2003).

## **2.6 Efecto de nocturnidad**

Como sabemos, el comportamiento del flujo vehicular puede ser muy similar a lo largo del día en cuanto a volúmenes y velocidades en una determinada vía, sin embargo se ha observado que aunque los valores son similares en cuanto a estas variables. El efecto de nocturnidad está principalmente influenciado por condiciones tales como:

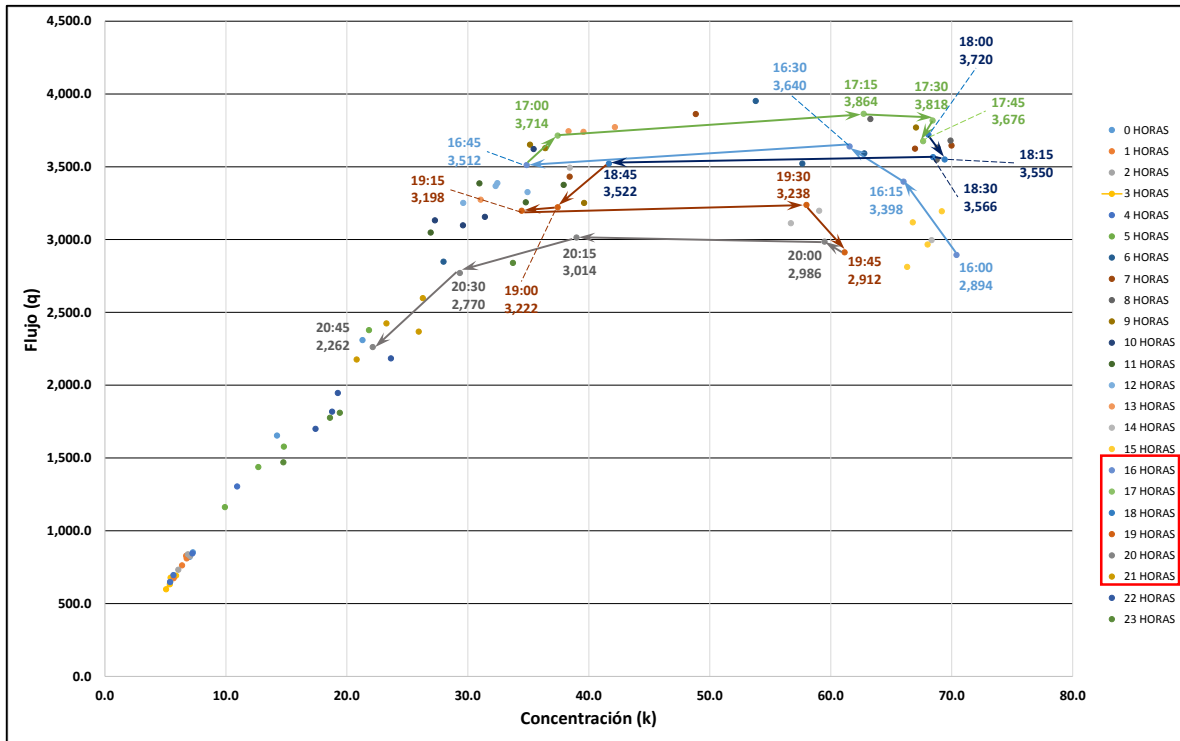
- Poca visibilidad general de la carretera y demás dispositivos de control vehicular debido a la ausencia de luz solar.
- Sensación de inseguridad debido a la poca visibilidad

Bajo esta lógica, a continuación se presenta la identificación de fenómeno de la histéresis en el período diurno y se hacen los comentarios al respecto.

## 2.6.1 Identificación del fenómeno de histéresis en Tramo T2, sentido México-Puebla (26-09).

Para el caso de la tarde-noche, la Figura 34 muestra el comportamiento del flujo con relación a la concentración, igualmente en períodos de 15 minutos.

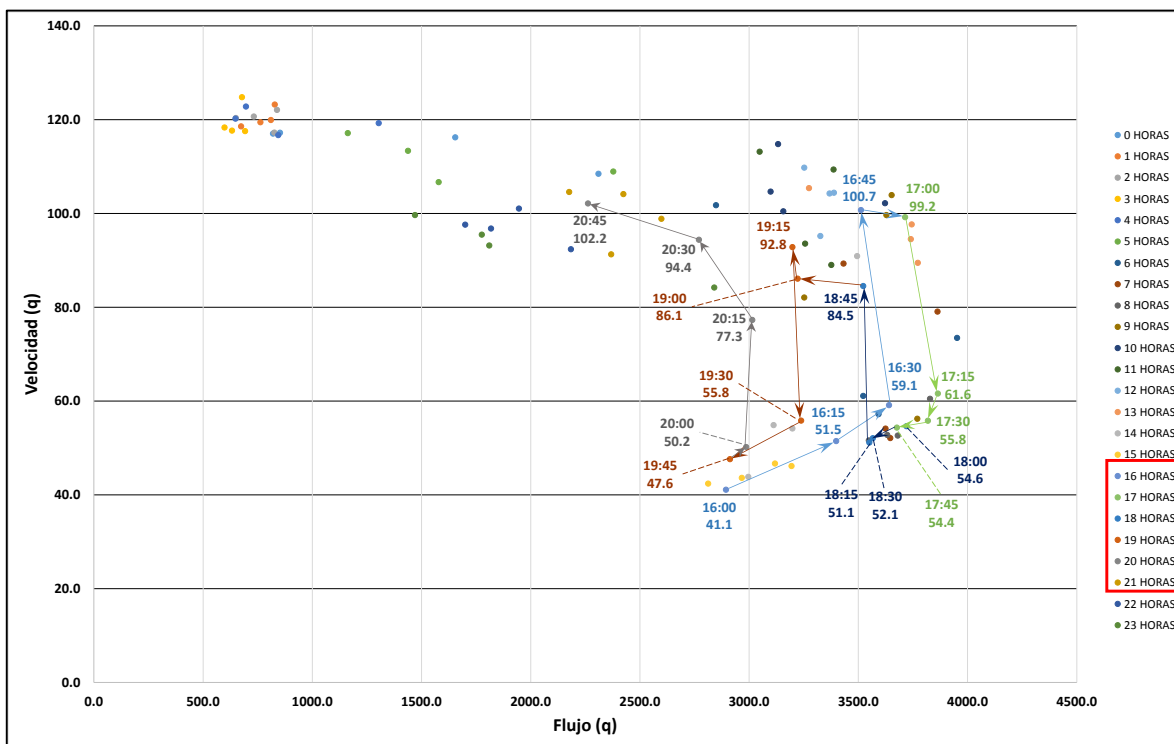
**Figura 34 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q), Estación T2, sentido México-Puebla en períodos de 15 mins. Comportamiento en período de la tarde**



Fuente: Elaboración propia

En el período de la tarde, se observa el comportamiento cíclico característico de la histéresis en el período comprendido entre las 16:00 y las 20:15 hrs. Se observa que la carga y descarga de la vialidad en este período tienen un comportamiento muy diferente al existente en el régimen de flujo no saturado, haciéndose evidente el cambio drástico de la concentración.

**Figura 35 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v), Tramo T2, sentido México-Puebla en períodos de 15 mins.**



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la figura anterior podemos observar el cambio drástico de la velocidad, sobre todo en el período comprendido entre las 16:30 y las 20:15. Aunque también se presenta la histéresis, ésta se encuentra en condiciones diferentes a las del día y por lo tanto no es posible comparar comportamientos distintos.

En siguiente capítulo se muestra la caracterización del fenómeno con base en el marco teórico seleccionado, una vez que se ha identificado y evidenciado en este capítulo.

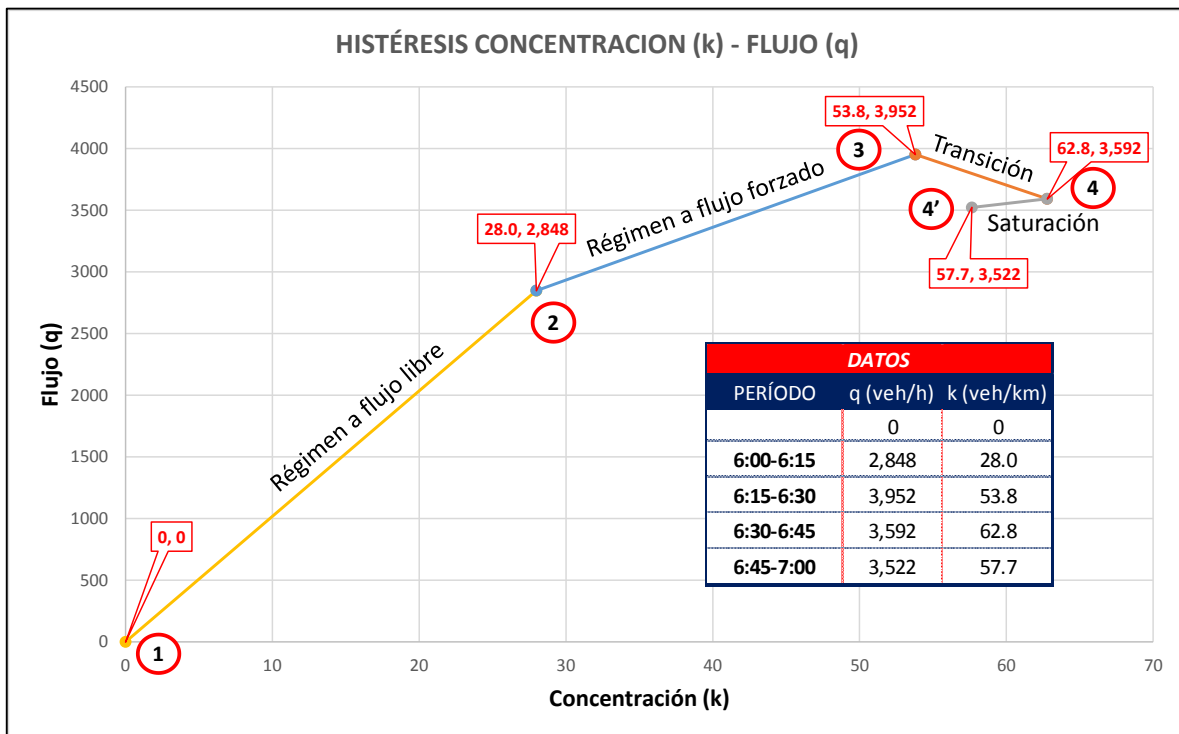
# 3 Caracterización del fenómeno de histéresis en el tramo de análisis

## 3.1 Estimación de parámetros con base en el diagrama concentración (k) – flujo (q)

Con base en la teoría de Sánchez (2003) mencionada en el capítulo 1.2.3 y una vez que se ha identificado el tramo donde se presenta el fenómeno de la histéresis de tráfico, se estimarán los parámetros que lo identifican para cada uno de los regímenes de tránsito que existen.

Los datos de entrada para estimar los parámetros se muestran en la Figura 36.

Figura 36 Datos de entrada por cada fase



Fuente: Elaboración propia

Como se observa, los datos de entrada mostrados en la figura anterior corresponden al período de las 6:00 a las 7:00 hrs. Asimismo, en la primera fila tenemos valores de cero, esto con el fin de representar el régimen fluido de acuerdo a la teoría mostrada en el capítulo 1.2.3 y considerando un comportamiento lineal. En las secciones posteriores se presenta la estimación de los valores.

### 3.1.1 Régimen a flujo libre

#### 3.1.1.1 Condición en la fase de régimen fluido

Recordando que el criterio de condición es

$$\frac{\Delta q(+)}{\Delta k(+)} > 0 \text{ ----- (1)}$$

Donde

$$\Delta q = q_f - q_i = \text{Flujo al final de la fase} - \text{Flujo al inicio de la fase}$$

$$\Delta k = k_f - k_i = \text{Concentración al final de la fase} - \text{Concentración al inicio de la fase}$$

Por lo tanto, sustituyendo valores en (1) y con base en la Figura 36, tenemos que:

$$\frac{\Delta q(+)}{\Delta k(+)} = \frac{2,848(\text{veh/h}) - 0(\text{veh/h})}{28(\text{veh/km}) - 0(\text{veh/km})} = \frac{2,848(+)}{28(+)} = 101.8 \left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)$$
$$\frac{\Delta q}{\Delta k} = 101.8 > 0$$

Por lo tanto la condición se cumple para la fase de régimen fluido. Este valor representa la pendiente de la recta que representa el comportamiento del régimen fluido, como se verá en la siguiente sección.

#### 3.1.1.2 Pendiente

La pendiente está dada por:

$$\alpha_F = \frac{q_F}{k_F} \text{ ----- (2)}$$

Donde

$q_F$  = es el valor del flujo en esta fase, que está dado por  $\Delta q$  en veh/h

$k_F$  = es el valor de la concentración en esta fase, que está dado por  $\Delta k$  en veh/km

Por lo tanto, la pendiente es el "ritmo" de cambio del flujo con respecto a la velocidad. Este ritmo de cambio estará dado por los cambios del flujo y la concentración entre el inicio y el final de este régimen, por lo tanto, la pendiente puede definirse también como

$$\alpha_F = \frac{q_F}{k_F} = \frac{\Delta q}{\Delta k} = \frac{q_f - q_i}{k_f - k_i} \text{ ----- (3)}$$

Que es la relación dada en la condición (sección 3.1.1.1). Para el caso en el régimen fluido entonces sustituyendo valores en (3), tenemos que:

$$\alpha_F = \frac{q_F}{k_F} = \frac{\Delta q}{\Delta k} = \frac{q_f - q_i}{k_F - k_i} = 101.8 \left( \frac{km}{h} \right)$$

$$\alpha_F = 101.8 \left( \frac{km}{h} \right)$$

Como se mencionó en la sección anterior, la pendiente representa la velocidad media de los vehículos en esta fase con un ritmo positivo.

### 3.1.1.3 Modelo

Entonces, en esta fase ya se cuenta con el parámetro necesario para caracterizarlo, por lo tanto el modelo que representa el régimen fluido es, de acuerdo con Sánchez (2003):

$$q_j = u_F k_j$$

$$q_j = 101.8 k_j \text{ --- (4)}$$

Como se ha mencionado anteriormente, los modelos de caracterización de cada una de las fases, con base en la teoría utilizada, consideran comportamientos lineales, por lo tanto, el modelo a flujo libre tiene las siguientes características:

- Este régimen está representado por una recta con ordenada al origen con pendiente igual a la velocidad media de los vehículos dada por  $u_F$  en (km/h).
- La variable explicativa es el flujo  $k_j$  dado en (veh/km).
- El modelo representa el comportamiento del flujo en el periodo de 6:00 a 6:15 horas, que es cuando se presenta el régimen a flujo libre.
- La ecuación es de la misma forma que la ecuación fundamental del flujo vehicular, considerando las variables macroscópicas fundamentales flujo ( $q$ ), velocidad ( $v$ ) y la concentración ( $k$ ).

Los valores de  $k$  estarán definidos por la condición de validez, que se explica en la siguiente sección.

### 3.1.1.4 Validez

La validez está dada por

$$0 \leq k_j \leq k_F \text{ --- (5)}$$

Donde

$k_F$  = concentración al final de régimen a flujo libre, para nuestro caso 28.0 (veh/km).

Por lo tanto, el rango de valores para  $k_j$  en (5) es:

$$0 \leq k_j \leq 28.0 \text{ --- (6)}$$

Lo que significa que la concentración máxima a la cual se presenta el régimen a flujo libre es de 28 (veh/km) y simultáneamente representa el inicio del régimen a flujo forzado, como se verá en la siguiente sección.

### 3.1.2 Régimen a flujo forzado

#### 3.1.2.1 Condición en la fase de régimen a flujo forzado

Sabemos que el criterio de condición es que

$$\frac{\Delta q(+)}{\Delta k(+)} > 0 \text{ ----- (7)}$$

Donde

$$\Delta q = q_f - q_i = \text{Flujo al final de la fase} - \text{Flujo al inicio de la fase}$$

$$\Delta k = k_f - k_i = \text{Concentración al final de la fase} - \text{Concentración al inicio de la fase}$$

Entonces, sustituyendo valores en (7) y con base en los valores mostrados en la Figura 36, tenemos que:

$$\frac{\Delta q(+)}{\Delta k(+)} = \frac{3,952(\text{veh/h}) - 2,848(\text{veh/h})}{53.8(\text{veh/km}) - 28.0(\text{veh/km})} = \frac{1,104(+)}{25.8(+)} = 42.78 \left( \frac{\text{km}}{\text{h}} \right)$$

$$\frac{\Delta q}{\Delta k} = 42.78 > 0$$

Por lo tanto la condición se cumple para la fase de régimen a flujo forzado. Este valor representa la pendiente de la recta que representa el comportamiento del régimen a flujo forzado y se aprecia que el ritmo de cambio del flujo es menor en comparación al presentado en el régimen a flujo libre, debido a que la velocidad media disminuye debido al aumento en la concentración y el flujo.

#### 3.1.2.2 Pendiente

La pendiente está dada por:

$$\alpha_c = \frac{q_S - q_F}{k_S - k_F} \text{ ----- (8)}$$

Donde

$$q_S - q_F = \text{es el cambio del flujo en esta fase, que está dado por } \Delta q \text{ en veh/h}$$

$$k_S - k_F = \text{es el cambio de la concentración en esta fase, que está dado por } \Delta k \text{ en veh/km}$$

De manera similar al régimen fluido, tenemos que:

$$\alpha_c = \frac{q_S - q_F}{k_S - k_F} = \frac{\Delta q}{\Delta k} \text{ --- (9)}$$

Entonces, tenemos que para el caso en el régimen a flujo forzado, sustituyendo valores en (9), tenemos que:

$$\alpha_c = \frac{q_F}{k_F} = \frac{\Delta q}{\Delta k} = \frac{q_S - q_F}{k_S - k_F} = 42.78 \left( \frac{km}{h} \right)$$

$$\alpha_c = 42.78 \left( \frac{km}{h} \right)$$

Que es la velocidad media de los vehículos en esta fase.

### 3.1.2.3 Modelo

Entonces ya se cuenta con el parámetro necesario para caracterizarla, por lo tanto el modelo que representa el régimen fluido es, de acuerdo con Sánchez (2003):

$$q_j = q_F + \alpha_c(k_j - k_F) \text{ --- (10)}$$

Sustituyendo valores en (10) tenemos que:

$$q_j = 2,848 + 42.78(k_j - 28.0) \text{ --- (11)}$$

Que es el modelo que representa el comportamiento del flujo a régimen a flujo forzado y que tiene las siguientes características:

- El modelo tiene 2,848 (veh/h) como valor mínimo del flujo, ya que ese valor representa el flujo al final del régimen a flujo libre pero el inicio del régimen forzado.
- El cambio del flujo se presenta a un ritmo de 42.78, que es la pendiente de la recta que representa el comportamiento del flujo.
- La velocidad media en este régimen es de 42.78 (km/h).
- La concentración mínima bajo este régimen es de 28.0 (veh/km), que es el valor en donde termina la fase del régimen a flujo libre e inicio del régimen a flujo forzado.

Es evidente que la velocidad media disminuye considerablemente debido al aumento del flujo y de la concentración. Por lo tanto, el flujo seguirá aumentando pero a un menor ritmo, que es característico del régimen a flujo forzado.

Los valores de  $k_j$  estarán dados por la condición de validez, mostrada en la siguiente sección.

### 3.1.2.4 Validez

La validez está dada por

$$k_F < k_j \leq k_S \text{ --- (12)}$$

Donde

$k_F$  = concentración al final de régimen a flujo libre e inicio del régimen a flujo forzado, para nuestro caso 28.0 (veh/km).

$k_S$  = concentración al final del régimen a flujo forzado e inicio del régimen de transición, para nuestro caso 53.8 (veh/km).

Por lo tanto, el rango de valores para  $k_j$  en (12) es:

$$28.0 < k_j \leq 53.8 \text{ --- (13)}$$

Lo que significa que la concentración máxima a la cual se presenta el régimen a flujo libre es de 53.8 (veh/km) y simultáneamente representa el inicio del régimen de transición, como se verá en la siguiente sección.

### 3.1.3 Régimen de transición

Como se ha mostrado en secciones anteriores, este régimen es particularmente importante ya que es en el cual se presenta la disminución considerable del flujo y la velocidad. Por estas razones, los parámetros de caracterización serán diferentes como se verá en las secciones siguientes.

#### 3.1.3.1 Condición en la fase de régimen a flujo forzado

Sabemos que el criterio de condición es que

$$\frac{\Delta q(-)}{\Delta k(+)} < 0 \text{ --- (14)}$$

Donde

$$\Delta q = q_f - q_i = \text{Flujo al final de la fase} - \text{Flujo al inicio de la fase}$$

$$\Delta k = k_f - k_i = \text{Concentración al final de la fase} - \text{Concentración al inicio de la fase}$$

Entonces, sustituyendo valores en (14) y con base en los valores mostrados en la Figura 36, tenemos que:

$$\frac{\Delta q(+)}{\Delta k(+)} = \frac{3,592(\text{veh/h}) - 3,952(\text{veh/h})}{62.8(\text{veh/km}) - 53.8(\text{veh/km})} = \frac{-360(+)}{9.0(+)} = -40.08 \left( \frac{\text{km}}{\text{h}} \right)$$

$$\frac{\Delta q}{\Delta k} = -40.08 > 0$$

Por lo tanto la condición se cumple para la fase de régimen en transición. Este valor representa la pendiente de la recta que representa el comportamiento del régimen a flujo forzado y se aprecia que el ritmo de cambio del flujo es decreciente como lo indica el signo negativo.

### 3.1.3.2 Pendiente

La pendiente está dada por:

$$\alpha_S = \frac{q_H - q_S}{k_H - k_S} \text{----- (15)}$$

Donde

$q_H - q_S$  = es el cambio del flujo en esta fase, que está dado por  $\Delta q$  en veh/h

$k_H - k_S$  = es el cambio de la concentración en esta fase, que está dado por  $\Delta k$  en veh/km

De manera similar a los regímenes anteriores, tenemos que:

$$\alpha_S = \frac{q_H - q_S}{k_H - k_S} = \frac{\Delta q}{\Delta k} \text{----- (16)}$$

Entonces, tenemos que para el caso en el régimen en transición, sustituyendo valores en (16), tenemos que:

$$\alpha_S = \frac{q_H - q_S}{k_H - k_S} = -40.08 \left( \frac{\text{km}}{\text{h}} \right)$$

$$\alpha_C = -40.08 \left( \frac{\text{km}}{\text{h}} \right)$$

Que es la velocidad media de los vehículos en esta fase pero de manera decreciente.

### 3.1.3.3 Modelo

Entonces, el modelo que representa el régimen en transición, de acuerdo con Sánchez (2003) es:

$$q_j = q_S + \alpha_S(k_j - k_S) \text{----- (17)}$$

Sustituyendo valores en (10) tenemos que:

$$q_j = 3,952 - 40.08(k_j - 53.8) \text{----- (18)}$$

---

Que es el modelo que representa el comportamiento del flujo de régimen en transición y que tiene las siguientes características:

- El modelo tiene 3,952 (veh/h) como valor mínimo del flujo, ya que ese valor representa el flujo al final del régimen a flujo forzado pero el inicio del régimen en transición.
- El cambio del flujo se presenta a un ritmo decreciente de -40.08, que es la pendiente de la recta que representa el comportamiento del flujo.
- La velocidad media en este régimen es de -40.08 (km/h), en donde el signo negativo indica la disminución de la velocidad.
- La concentración mínima bajo este régimen es de 53.8 (veh/km), que es el valor en donde termina la fase del régimen a flujo forzado e inicio del régimen en transición.
- El modelo es representativo de este régimen en el período de las 6:30 a las 6:45 horas.

Es evidente que la velocidad media disminuye considerablemente debido al aumento de la concentración aunque el flujo disminuye. Esto es evidencia de la presencia de filas de espera generadas por la congestión, aumentando los tiempos de recorrido y demoras. Como se observa en la Figura 36, el patrón de disminución del flujo es diferente al presentado en el régimen a flujo libre y forzado, lo cual es característico del fenómeno de histéresis.

Los valores de  $k_j$  estarán dados por la condición de validez, mostrada en la siguiente sección.

#### 3.1.3.4 Validez

Los valores de la concentración  $k_j$  estarán dados por la condición de validez

$$k_S < k_j \leq k_H \text{ --- (19)}$$

Donde

$k_S$  = concentración al final de régimen a flujo forzado e inicio del régimen de transición, para nuestro caso 53.8 (veh/km).

$k_H$  = concentración al final del régimen en transición e inicio del régimen saturado, para nuestro caso 62.8 (veh/km).

Por lo tanto, el rango de valores para  $k_j$  en (12) es:

$$53.8 < k_j \leq 62.8 \text{ --- (20)}$$

Lo que significa que la concentración máxima a la cual se presenta el régimen en transición es de 62.8 (veh/km) y simultáneamente representa el inicio del régimen de saturación, como se verá en la siguiente sección.

### 3.1.4 Régimen de saturación

En este régimen la presencia de filas de espera, disminución de la velocidad y flujo son característicos y forman parte de la presencia del fenómeno de histéresis.

#### 3.1.4.1 Condición en la fase de régimen a flujo saturado

Sabemos que el criterio de condición es que

$$\frac{\Delta q(+/-)}{\Delta k(-)} < 0 \text{ ----- (21)}$$

Donde

$$\Delta q = q_f - q_i = \text{Flujo al final de la fase} - \text{Flujo al inicio de la fase}$$

$$\Delta k = k_f - k_i = \text{Concentración al final de la fase} - \text{Concentración al inicio de la fase}$$

Entonces, sustituyendo valores en (14) y con base en los valores mostrados en la Figura 36, tenemos que:

$$\frac{\Delta q(+)}{\Delta k(+)} = \frac{|3,522(\text{veh/h}) - 3,592(\text{veh/h})|}{57.7(\text{veh/km}) - 62.8(\text{veh/km})} = \frac{70(+)}{-5.1(+)} = -13.65 \left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)^4$$
$$\frac{\Delta q}{\Delta k} = -13.65 < 0$$

Por lo tanto la condición se cumple para la fase de saturación. Este valor representa la pendiente de la recta que representa el comportamiento del régimen saturado y se aprecia que el ritmo de cambio del flujo es decreciente como lo indica el signo negativo.

#### 3.1.4.2 Pendiente

La pendiente está dada por:

$$\alpha_S = \frac{q_H - q_S}{k_H - k_S} \text{ ----- (21)}$$

Donde

$$q_H - q_S = \text{es el cambio del flujo en esta fase, que está dado por } \Delta q \text{ en veh/h}$$

---

<sup>4</sup> Se considera el valor absoluto de  $\Delta q$  para que tenga consistencia con la ecuación en el cálculo de la pendiente  $\alpha_H$  y así la condición de validez  $\frac{\Delta q}{\Delta k} < 0$  se cumpla.

$k_H - k_S =$  es el cambio de la concentración en esta fase, que está dado por  $\Delta k$  en veh/km

De manera similar a los regímenes anteriores, tenemos que:

$$\alpha_S = \frac{|q_F - q_H|}{k_F - k_H} = \frac{\Delta q}{\Delta k} \text{ --- (22)}$$

Entonces, tenemos que para el caso en el régimen saturado, sustituyendo valores en (22), tenemos que:

$$\alpha_S = \frac{|q_F - q_H|}{k_F - k_H} = -13.65 \left( \frac{km}{h} \right)$$

$$\alpha_C = -13.65 \left( \frac{km}{h} \right)$$

Que es la velocidad media de los vehículos en esta fase pero de manera decreciente.

### 3.1.4.3 Modelo

Entonces, el modelo que representa el régimen saturado, de acuerdo con Sánchez (2003) es:

$$q_j = q_H - \alpha_H(k_j - k_H) \text{ --- (23)}$$

Sustituyendo valores en (23) tenemos que:

$$q_j = 3,592 - 13.65(k_j - 62.8) \text{ --- (24)}$$

Que es el modelo que representa el comportamiento del flujo de régimen saturado y que tiene las siguientes características:

- El modelo tiene 3,592 (veh/h) como valor mínimo del flujo, ya que este valor representa el flujo al final del régimen en transición pero el inicio del régimen saturado.
- El cambio del flujo se presenta a un ritmo decreciente de -13.65, que es la pendiente de la recta que representa el comportamiento del flujo y a su vez la velocidad media de los vehículos.
- La concentración mínima bajo este régimen es de 62.8 (veh/km), que es el valor en donde termina la fase del régimen en transición e inicio del régimen saturado.
- El modelo es representativo de este régimen en el período de las 6:45 a las 7:00 horas.

En este régimen, debido a la disminución súbita de la concentración, la velocidad también resulta decreciente al igual que en el régimen saturado. De igual forma, el patrón de disminución del flujo y la concentración difieren al patrón del régimen a flujo libre, que como se mencionó en el caso del régimen saturado, es una característica de la presencia del fenómeno de la histéresis de tráfico.

Por lo tanto, los valores de  $k_j$  estarán dados por la condición de validez, mostrada en la siguiente sección.

### 3.1.4.4 Validez

Los valores de la concentración  $k_j$  estarán dados por la condición de validez

$$k_{A'} \leq k_j < k_H \text{ --- (25)}$$

Donde

$k_H$  = concentración al final de régimen de transición e inicio del régimen de saturación, para nuestro caso 62.8 (veh/km).

$k_{A'}$  = concentración al final del régimen de saturación, para nuestro caso 57.7 (veh/km).

Por lo tanto, el rango de valores para  $k_j$  en (12) es:

$$57.7 \leq k_j < 62.8 \text{ --- (26)}$$

Lo que significa que la concentración máxima a la cual se presenta el régimen de saturación es de 62.8 (veh/km). Esta concentración se presenta a las 6:45 y a partir de ahí disminuye hasta un valor de 57.7 (veh/km) a las 7:00 horas, como se muestra en la Figura 36.

A manera de resumen, en la Tabla 14 se muestran los valores obtenidos de caracterización de cada una de las fases para este caso de estudio.

**Tabla 14 Parámetros obtenidos de cada uno de los regímenes de tránsito**

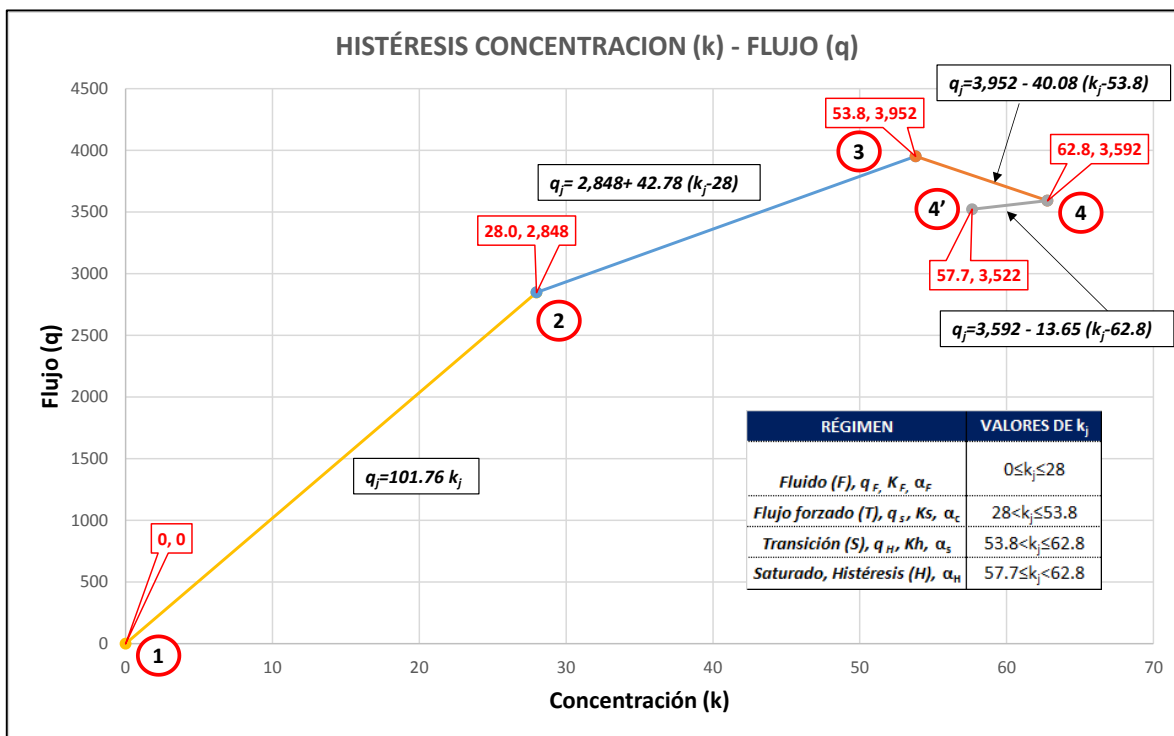
CARGA/DESCARGA	FASE	CONDICIÓN				PENDIENTE					
		$\Delta q$ (veh/h) (+/-)	$\Delta k$ (veh/km) (+/-)	$\Delta q/\Delta k$ (veh/h)	$q_i$	$k_i$	$q_2 - q_1$	$k_2 - k_1$	$\alpha$		
CARGA	Fluido (F), $q_f, K_f, \alpha_f$	2,848	(+)	28	(+)	101.8	2,848	28.0	2,848	28.0	101.76
CARGA	Flujo forzado (T), $q_s, K_s, \alpha_s$	1,104	(+)	26	(+)	42.8	3,952	53.8	1,104	25.8	42.78
CARGA	Transición (S), $q_H, K_H, \alpha_s$	-360	(-)	9	(+)	-40.1	3,592	62.8	-360	9.0	-40.08
DESCARGA	Saturado, Histeresis (H), $\alpha_H$	-70	(-)	-5	(-)	13.7	3,522	57.7	70	-5.1	-13.65

Fuente: Elaboración propia

La tabla anterior muestra también si la fase de tránsito se encuentra en carga o descarga del flujo, que es aún más evidente en la Figura 36.

Así, el modelo que representa al flujo vehicular  $q_j$  para cada uno de los regímenes se muestra en la siguiente figura.

Figura 37 Modelos para cada fase de flujo vehicular



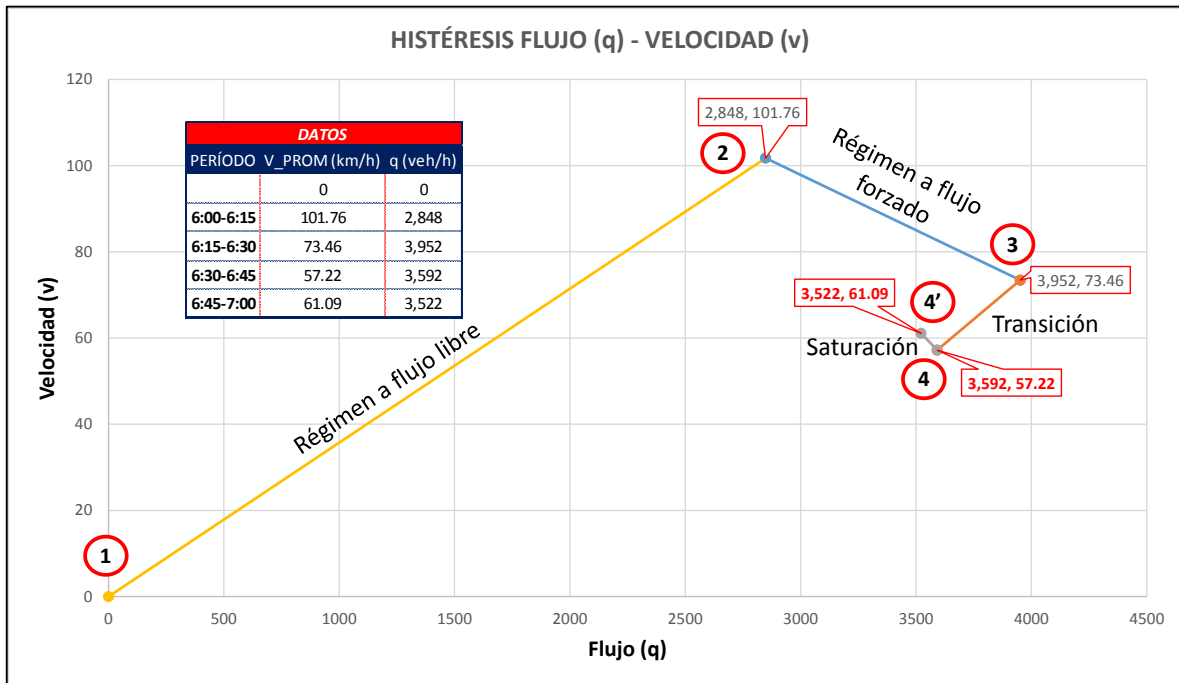
Fuente: Elaboración propia

La figura anterior también muestra los valores válidos para  $k_j$  de cada uno de los regímenes delimitados por los puntos en color rojo. Estos valores son el los correspondientes al criterio de Validez.

### 3.2 Estimación de parámetros con base en el diagrama flujo (q) – velocidad (v)

Tomando en cuenta el diagrama flujo (q) – velocidad (v) para el mismo período de análisis, los parámetros se estimarán con base en los datos de entrada mostrados en la Figura 38.

**Figura 38 Datos de entrada para el caso del diagrama flujo (q) – velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia

Con base en estos datos de entrada, se obtiene los parámetros que determinan cada uno de los regímenes de tránsito buscados con base en el diagrama flujo (q) - velocidad (v) y que se muestran en la Tabla 15.

**Tabla 15 Parámetros obtenidos de cada uno de los regímenes de tránsito para el caso del diagrama flujo (q) – velocidad (v)**

CARGA/DESCARGA	FASE	PENDIENTE				
		q <sub>i</sub>	v <sub>i</sub>	q <sub>2</sub> -q <sub>1</sub>	v <sub>2</sub> -v <sub>1</sub>	α
		0	0			
CARGA	Fluido (F), q <sub>F</sub> , K <sub>F</sub> , α <sub>F</sub>	2,848	101.8	2,848	101.8	0.0357
CARGA	Transición (T), q <sub>S</sub> , K <sub>S</sub> , α <sub>c</sub>	3,952	73.5	1,104	-28.3	-0.0256
CARGA	Saturado (S), q <sub>H</sub> , K <sub>H</sub> , α <sub>s</sub>	3,592	57.2	-360	-16.2	0.0451
DESCARGA	Histéresis (H), α <sub>H</sub>	3,522	61.1	-70	3.9	-0.0554

Fuente: Elaboración propia

Dado que la teoría mostrada por Sánchez (2003) se limita a la obtención de los parámetros con base en el diagrama concentración (k) – flujo (q), y que por lo tanto implica un cambio en los criterios de las condicionantes y validez para este caso, en esta sección no se obtienen los modelos representativos de cada una de las fases del flujo.

### 3.3 Pronóstico

Una de las grandes utilidades de los modelos de tránsito es la capacidad que estos tienen para fines de pronóstico de alguna de las variables, dadas otras. En esta sección se realiza un pronóstico básico del flujo considerando diversos valores de  $k_j$  dentro del rango de valores para los cuales tiene validez.

Así por ejemplo, si queremos conocer el flujo en el régimen a flujo forzado tomando en cuenta que el flujo está dado por

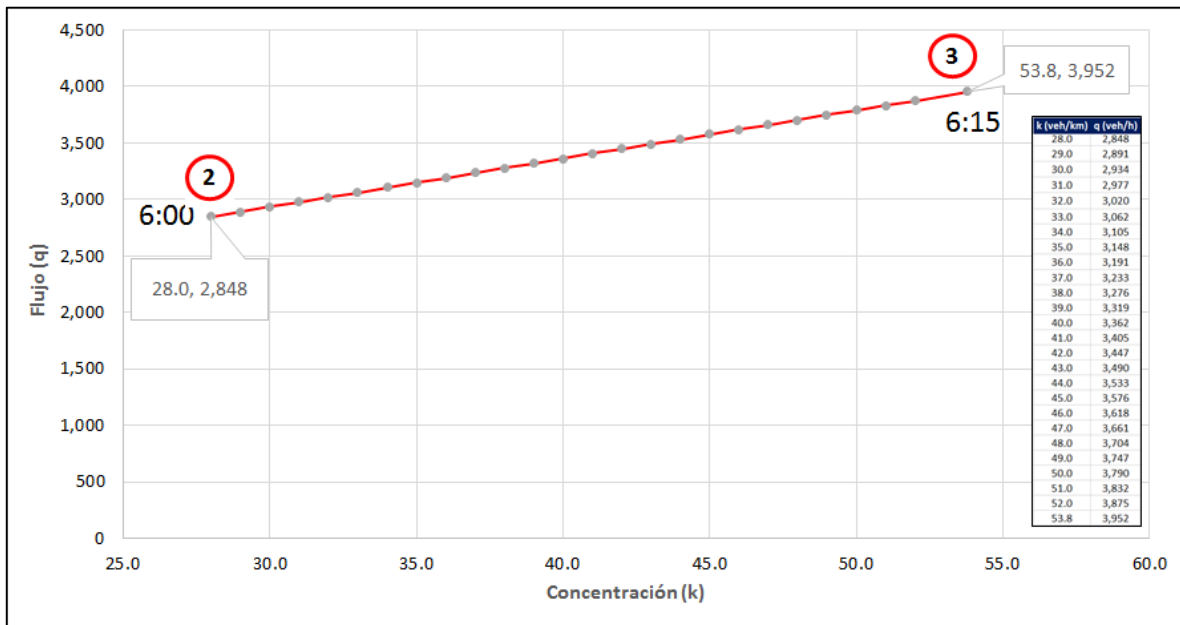
$$q_j = 2,848 + 42.78(k_j - 28.0)$$

Además

$$28 \left( \frac{veh}{km} \right) < k_j \leq 53.8 \left( \frac{veh}{km} \right)$$

Y considerando valores de  $k_j$  con incrementos en una unidad, obtenemos los valores mostrados en la Figura 39 .

**Figura 39 Pronóstico del flujo (q) en régimen a flujo forzado a partir de la concentración (k)**



Fuente: Elaboración propia

El nivel de precisión del pronóstico del flujo dependerá de la precisión de los valores de la densidad que “alimenten” el modelo. En la tabla de valores de esta, mostrada en la figura anterior se

---

consideraron incrementos en una unidad, sin embargo los valores pueden ser en incrementos de 5 veh/km o más tomando en cuenta el límite del valor de  $k_j$ .

La limitante de los modelos para cada fase radica en que no consideran al tiempo como variable de entrada y por lo tanto el modelo no representa la dinámica del flujo vehicular.

De manera similar, es posible pronosticar el flujo en relación la densidad en los demás regímenes de tránsito.

---

# 4 Análisis de resultados

## 4.1 Validación del enfoque utilizado

Los modelos de tipo macroscópico obtenidos en el capítulo anterior con base en los parámetros estimados y tomando como referencia el diagrama concentración (k) – flujo (q), resultan adecuados particularmente para el período, criterios y consideraciones en que fueron analizados, puesto que estos modelos no son ecuaciones generalizadas y que pudieran aplicarse en cualquier período de la misma vía o de cualquier otra.

Además, hay que recordar que el análisis de los datos se realizó tomando en cuenta las siguientes consideraciones importantes:

- Se consideraron vehículos equivalentes del aforo obtenido, es decir, los vehículos de carga fueron “convertidos” a vehículos particulares y por lo tanto los valores de las variables son afectados de manera directa. Esto resulta adecuado ya que se considera el comportamiento del flujo en su totalidad.
- Se realizó el análisis considerado a cada 15 minutos, puesto que este es el período en el que mejor se aprecia el fenómeno de la histéresis y de manera más práctica para manejar los datos.

## 4.2 Extensiones del modelo

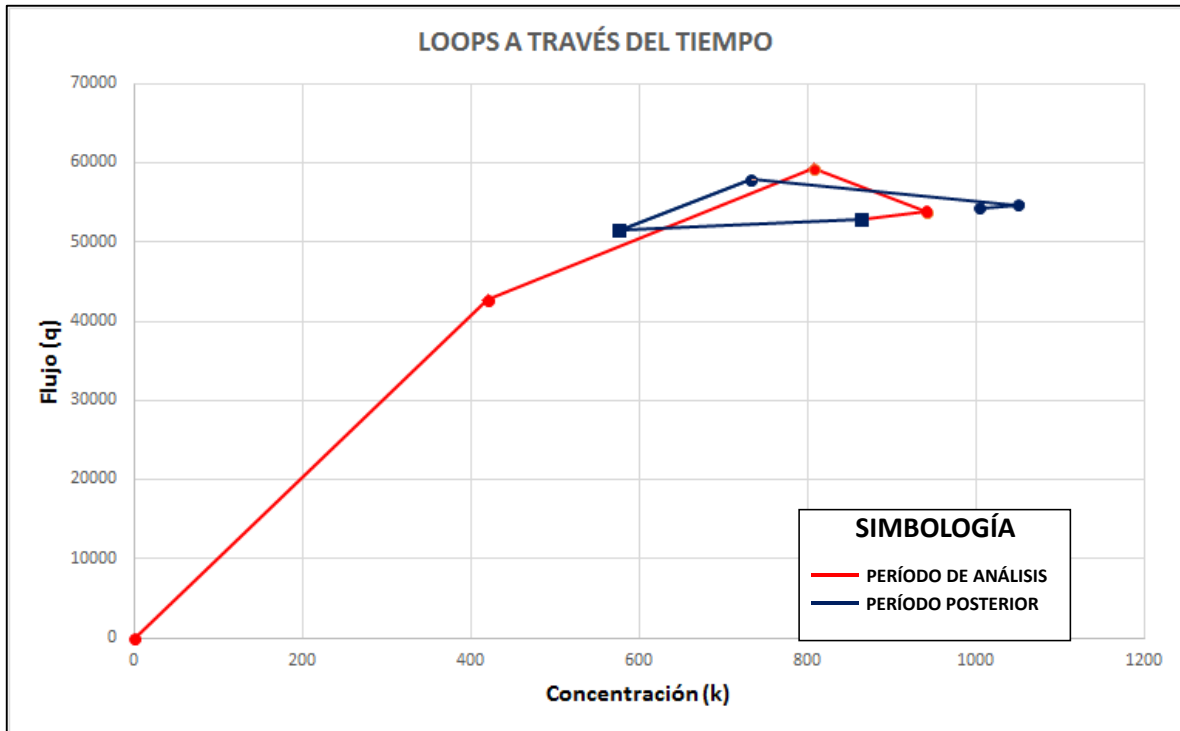
### 4.2.1 Parametrización dinámica con base en estación de aforos permanentes (por períodos)

Ya que el modelo particular obtenido para cada una de las fases de tránsito se limita a ser aplicado al período de análisis y en el tramo considerado, una potencial e interesante alternativa de mejora y extensión del mismo es la consideración del cambio de las variables macroscópicas en función del tiempo.

En este sentido, la adición de la variable tiempo en las ecuaciones presentadas puede ser a futuro la base de un estudio e investigación más extenso y delicado para los tramos de análisis aquí presentados. En este sentido, en el análisis del presente trabajo se hizo solo para un cierto período, sin embargo se observó que existe un comportamiento cíclico de la histéresis, lo cual resulta interesante ya que se demuestra que este comportamiento es dinámico y por tanto, más complejo de modelar.

En la Figura 40 se muestra este comportamiento dividido en el período de análisis (rojo) y el período posterior (azul).

**Figura 40 Diagrama Concentración (k) - Flujo (q) con presencia de espiras de histéresis**



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2 Caracterización por tipo de día

Toda vez que la adición de la variable tiempo es un potencial trabajo a futuro, adicionalmente puede considerarse la adecuación de los modelos de acuerdo a:

- Tipo de día de la semana: El comportamiento del tránsito a los largo de los días de la semana puede ser muy cambiante, es decir, no existe el mismo comportamiento en un día entre semana que uno en fin de semana. Más aún, entre semana el comportamiento del flujo vehicular resulta ser distinto el viernes con respecto al lunes y viceversa y por lo tanto las condiciones de operatividad de la vialidad también cambian.
- Tipo de semana: La variación del flujo con respecto a la semana del mes pudiera ser diferente si existen períodos vacacionales y/o fines de semana largos, de acuerdo al calendario de días feriados vigente.
- Mes del año: Como sabemos, la intensidad del flujo vehicular es muy distinta en algunos meses del año debido esencialmente a la cantidad de días laborables, períodos vacacionales largos y/o por condiciones climatológicas determinadas por las estaciones del año.

Todas estas consideraciones inherentes a las políticas y usos y costumbres de cada región determinan en gran medida la demanda y por lo tanto el comportamiento del tránsito en una

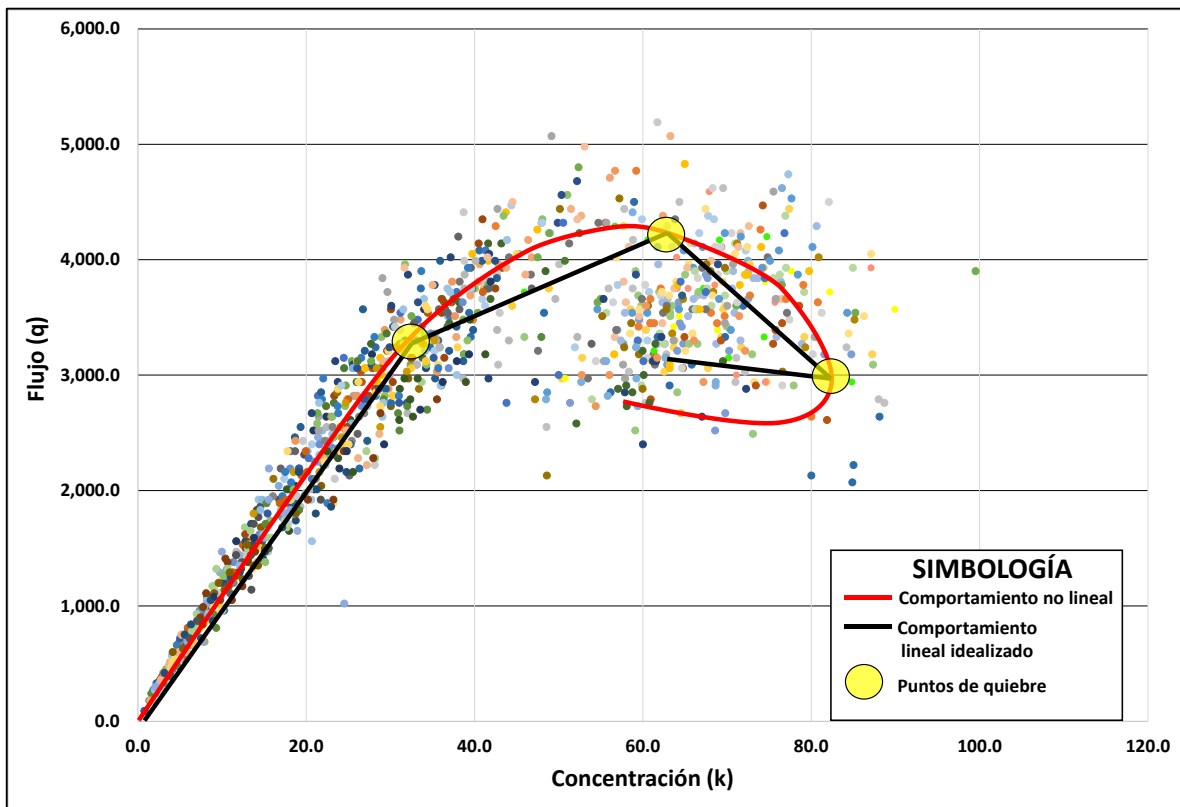
determinada región. En este caso, la extensión predictiva de los modelos a consideraciones de este tipo es otro amplio caso de trabajos futuros y más complejos.

### 4.2.3 Comportamiento no lineal entre segmentos de carga y descarga.

Como se ha presentado y mencionado en este trabajo, se hizo una consideración y enfoque de tipo lineal para la obtención de los parámetros y posteriormente los modelos de cada una de las fases. Sin embargo, se sabe que esto solo puede ser cierto y de manera muy aproximada solo en la fase de flujo libre y en donde la ecuación fundamental del tránsito es adecuada.

Pero el enfoque lineal pierde su aplicación y resulta ser muy “idealizante” al analizar las fases de transición, saturación e histéresis. Por lo tanto, el enfoque no lineal es el que mejor se adecua a estas fases aunque las ecuaciones suelen ser más complejas y a la vez más efectivas. En la Figura 41 se muestra el enfoque lineal en comparación con uno no lineal.

**Figura 41 Curva con enfoque no lineal y lineal en el diagrama concentración (k) – flujo (q) para el análisis de las fases de flujo vehicular**



Fuente: Elaboración propia

En este sentido, un mejor enfoque para cada una de las fases podría ser de tipo cuadrático y separado para cada una de las fases, en donde los puntos de quiebre serían los que definirían cada una de las fases. Es así, como tal enfoque puede ser motivo de futuros trabajos y estudios en los tramos analizados anteriormente.

---

## 4.3 Aplicaciones relevantes

Una de las grandes características de los modelos existentes en la ingeniería de tránsito y transporte es que de acuerdo a su alcance y complejidad, pueden ser herramientas de pronóstico (*forecasting*) por su término utilizado comúnmente en inglés) y de simulación para diversos escenarios que pudieran presentarse en una determinada vialidad.

En los puntos siguientes se presentan algunas alternativas de predicción.

### 4.3.1 Detección automática de cuellos de botella

Los cuellos de botella, son una de los efectos más negativos para la eficiencia operativa de una determinada vialidad. Por tanto, la predicción y detección de un cuello de botella en un determinado tiempo y lugar de la vialidad resultan muy útiles, esencialmente para:

- Dar información en tiempo real de conflictos viales al conductor y así brindar otra alternativa de ruta.
- Proporcionar información de la vialidad y así considerar adecuaciones geométricas que eviten dicha problemática.
- Consideración de construcción de infraestructura nueva y adecuada para mitigar los conflictos viales.

### 4.3.2 Predicción de tiempos de recorrido

Sin duda, una de las principales características por las que una vialidad es utilizada, es por su efectividad en el tiempo de recorrido hacia un determinado destino. Por eso es que resulta de mucha importancia y utilidad que un modelo proporcione información a este nivel.

La predicción de los tiempos de recorrido, en general no es fácil, ya que depende de diversos factores, tales como:

- La demanda vehicular clasificada en un determinado período de tiempo y ubicación.
- La existencia de eventos no recurrentes y que pueden afectar de manera inmediata el tiempo de recorrido.
- Las características geométricas de la vialidad
- Tipo de terreno en donde se encuentra la vialidad, etc.

Todos estos factores hacen que la realización de un modelo con este alcance no sea sencillo, sobre todo en áreas urbanas, en donde todos los factores antes mencionados se presentan de manera muy diversa.

En el caso de los modelos aquí presentados, la predicción de los tiempos de recorrido no puede obtenerse de manera directa y de manera generalizada pero pueden servir de manera indirecta a partir de la obtención de otras variables y solo en períodos determinados, como se indicó anteriormente.



---

# Conclusiones

Con base en los resultados y análisis obtenidos se puede concluir que:

La revisión y análisis a detalle de las características geométricas de los tramos en estudio permitió determinar que en el tramo 2, sentido México-Puebla, las condiciones de circulación son desfavorables debido principalmente la presencia de accesos y salidas importantes con mezcla de diferentes tipos de autos. En particular, se observó que la existencia de cuellos de botella debidos a cambios en el número de carriles es una de las causas principales.

Esto, trae como consecuencia la presencia del fenómeno de histéresis de tráfico generando congestiónamiento con una inestabilidad en el comportamiento del flujo vehicular y por lo tanto afectando de manera directa los tiempos de recorrido e incremento en las demoras.

Bajo este panorama, la identificación del fenómeno permitió analizar la variación drástica de la velocidad media y del flujo en un período de tiempo comprendido entre las 6:00 y las 7:45 horas, permitiendo así, la caracterización del fenómeno de los regímenes de flujo vehicular con base en el marco teórico seleccionado (Sánchez 2003).

La comparativa de capacidad teórica vs flujo máximo horario permitió comprobar que la capacidad en dicha hora fue rebasada por la demanda, presentándose así, congestiónamiento vial que derivó en la presencia de la histéresis en el período de la tarde, los cual se identificó como un efecto de nocturnidad evidenciado en la variabilidad del flujo vehicular.

Por otro lado, la elección del marco teórico (Sánchez 2003) de tipo analítico-macroscópico permitió caracterizar de manera elemental el fenómeno tomando en cuenta los diferentes regímenes de tránsito que lo componen y los datos empíricos recopilados, partiendo de un enfoque con comportamiento lineal de estos.

El pronóstico aquí presentado es limitado, ya que no considera la estimación del flujo, la velocidad o la concentración como función del tiempo y por lo tanto es una referencia y guía para aquellos que muestren interés en este tema.

Por lo anterior, se recomienda, como medida inmediata, una vez concluidas las obras del segundo piso, tener estaciones periódicas de aforo vehicular clasificado para estar en la posibilidad de analizar y comprender mejor el comportamiento del flujo y así poder brindar soluciones que resuelvan o al menos mitiguen la problemática posible existente.

Se debe mencionar que las condiciones de demanda, características geométricas, composición vehicular y congestiónamiento no recurrente analizados y observados en el año 2012 difieren notablemente a las actuales y por lo tanto, este trabajo representa un apoyo y referencia para futuros trabajos que consideren el estudio del comportamiento vehicular en condiciones actuales.

Por otra parte, se puede pensar que la solución a esta problemática de congestiónamiento no pudiera estar limitada a soluciones como la construcción de un segundo piso u otras de costos similares, por el contrario, proponer soluciones integrales óptimas de menor costo, tales como:

- Uniformización de la sección transversal a fin de eliminar cuellos de botella que deriven en congestiónamiento vial.

- 
- Adecuaciones geométricas de los accesos y salidas principales con el fin de reducir evitar al máximo la reducción drástica de la velocidad de los vehículos
  - Implementación de tecnología de control vehicular para la disminución de accidentes y eventos no recurrentes que deriven en problemas de congestionamiento.
  - Propuestas de transporte público que considere transporte local, reduciendo así al flujo vehicular de tipo particular que realiza viajes cotidianos de corto recorrido.

En fin, las propuestas pueden ser múltiples y variadas teniendo como objetivo principal una circulación vehicular eficiente que se refleje en disminución de costo y tiempos de viaje, tanto de corto como de largo recorrido.

Así, los objetivos específicos de este trabajo se llevaron a cabo bajo la metodología y bases teóricas propuestas y en consecuencia:

Se analizaron las relaciones macroscópicas en tres tramos de la autopista México-Orizaba del PK 111+000 al 138+000 considerando sus características intrínsecas en cuanto a composición vehicular, mezcla de tránsito urbano y de largo recorrido y con flujos vehiculares al límite de la capacidad de la vialidad.

Se identificó la presencia del fenómeno de histéresis en uno de los tramos, con base en datos empíricos de información obtenida directamente en campo, de tal manera que fue posible observar la variabilidad de las condiciones de circulación a través de variables macroscópicas.

Fue posible caracterizar el fenómeno de histéresis con los regímenes de tránsito vinculados a este, a través de un marco teórico de tipo macroscópico-analítico.

---

# Bibliografía

- CAL Y MAYOR, Rafael, *"Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y Aplicaciones"*. Alfaomega, México, 2007.
- TREITERER, Joseph; MYERS, Jeffrey. *"The Hysteresis Phenomenon in Traffic Flow"*. Proceedings of the sixth symposium on transportation and traffic theory, D.J. Buckley (Ed.), pp 13-38
- ZHANG, H. M., *"A mathematical theory of traffic hysteresis"*. The University of Iowa. Iowa City, USA. 1998
- SÁNCHEZ, Oscar. *"Modelación de la histéresis del tráfico a partir de las variables macroscópicas: teoría y aplicaciones"*. Revista Ideas. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México. Agosto 2003.
- Hao Xu, Hongchao Liu, Huaxin Gong. *"Modeling the asymmetry in traffic flow (a): Microscopic approach"*, Appl. Math. Modell. 2013
- SÁNCHEZ, Oscar; De Palma, André. *"Relación fundamental, histéresis y congestión en un cuello de botella: análisis y evidencias para el caso de la Autovía A-14"*. Engenharia de Tráfego e Transportes 2000, avanças para uma era de mudanças, 2000.
- LAVAL, Jorge A. *"Hysteresis in traffic flow revisited: an improved measurement method"*. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, USA. 2010.
- TREIBER, Martin; KESTING, Arne. *"Traffic Flow Dynamics. Data, Models and Simulation"*. Springer, 2013.
- GALLEGO, Jesús Felipe. *"Ingeniería de Tránsito y Carreteras"*. Thomson Learning. 2005.
- ORTUZAR, Juan de Dios, *"Modeling Transport"*, 2010
- GONZALEZ ROLDÁN, Antonio, *"Ingeniería de Tráfico"*, Bellisco Editores, España, 2008.
- GARBER, Nicholas J., *"Ingeniería de Tránsito y de carreteras"*, Thomson, 2005.
- ORTUZAR, Juan de Dios; SÁNCHEZ, Oscar, *"Métodos y Modelos en la Planeación del Transporte"*, UAEM, México, 2004.
- LARRAGA, Ma. Elena, ALVAREZ-ICAZA, Luis, *"Hacia una descripción realista del tráfico vehicular basada en autómatas celulares"*, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- HAYBACH, Gerhard; KÜCHENHOFF, Helmut. *"Testing for a Breakingpoint in Two-Phase Linear and Logistic Regression Models"*. Institute of Statistics. University of Munich. 1997
- BANDO, M., HASEBE, K., NAKAYAMA, A., SHIBATA, A., & SUGIYAMA, Y., *"Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation"*, Physical Review. 1995.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, *"Highway Capacity Manual"*. Washington, D.C. 2000.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, *"Highway Capacity Manual"*. Washington, D.C. 2010.

---

# **Ανεχο I**

---

Este anexo contiene los perfiles horarios de demanda vehicular de cada una de las estaciones de aforo (E1, E2 y E3). Cada imagen representa los perfiles horarios de cada día de la semana en la que se realizó el aforo. Existen casos en los que, por cuestiones adversas al mantenimiento y/o control de los equipos de aforo, no existe aforo en ciertas horas del día o incluso días completos.

El aforo representado en las gráficas es el total de automóviles, es decir, están considerados todos los tipos de automóviles en cada una de las horas mostradas.

Los perfiles están organizados por cada sentido de circulación (México-Puebla y Puebla-México) y ambos sentidos.

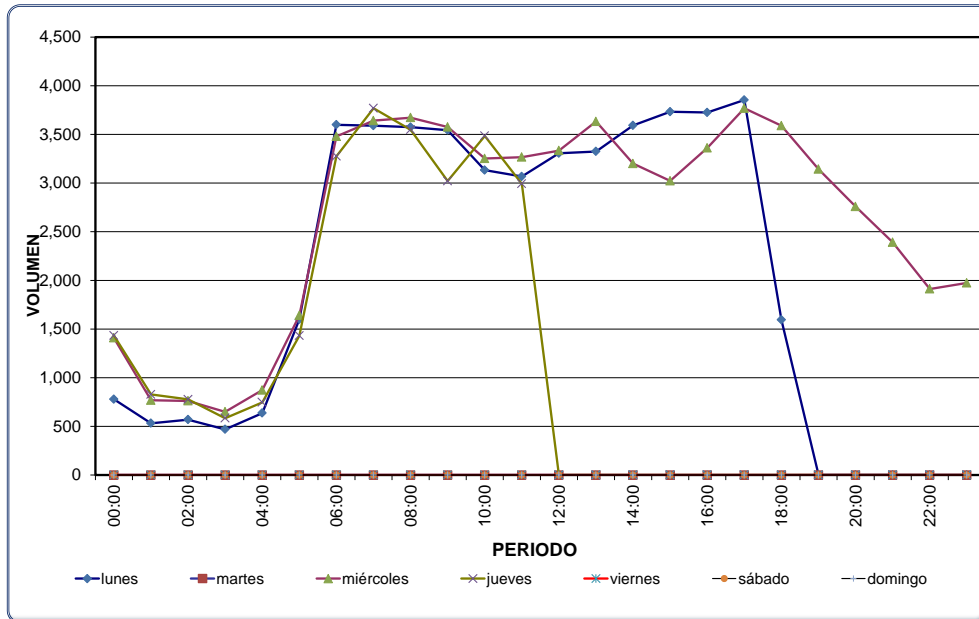
La importancia de estos perfiles radica en que es posible observar las horas valle y horas pico en el período de la mañana y de la tarde (en caso de que estos existan), además de determinar la hora de máxima demanda registrada. Los valores numéricos también permiten determinar el Tránsito Promedio diario Semanal (TDPS) y con un proceso de desestacionalización, obtener un Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) y con esto realizar diversos análisis complementarios de relevancia, como pronósticos a futuro o estudios de diseño de pavimentos entre otros.

Si bien los perfiles no muestran la relación del flujo horario con las variables macroscópicas del tránsito, son necesario para conocer de manera general el comportamiento de este en el transcurso del día.

# Estación 1

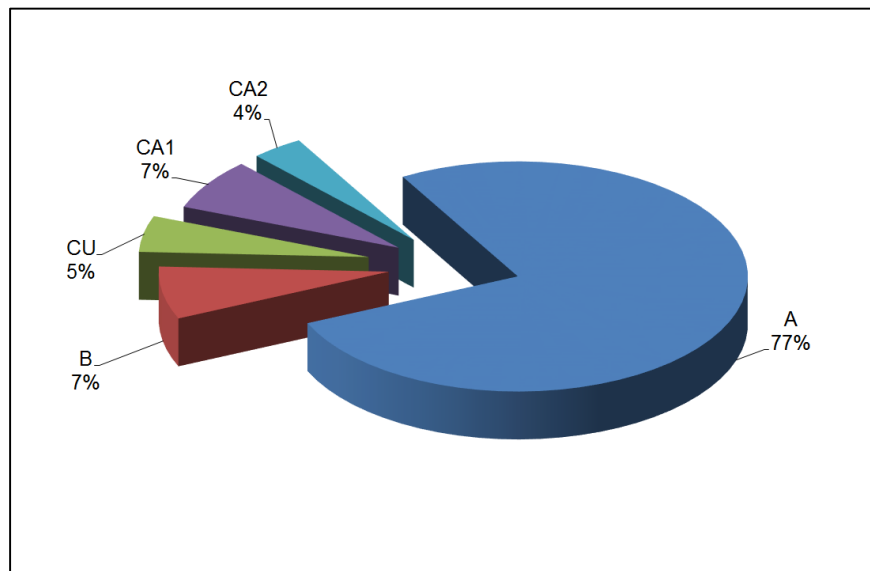
## Sentido México-Puebla

Figura 42 Perfil de demanda vehicular horaria



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

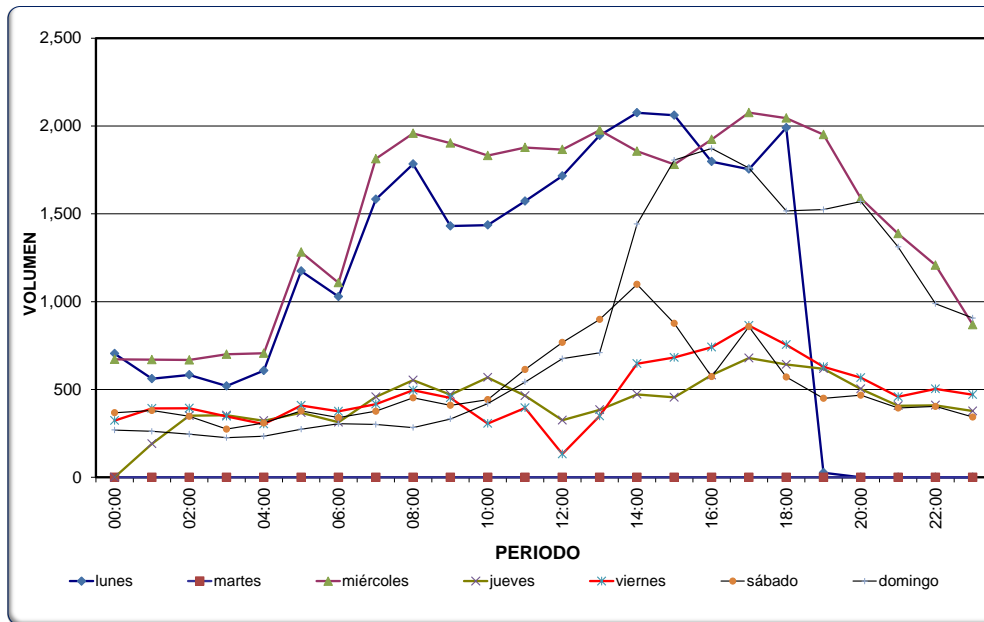
Figura 43 Composición vehicular



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

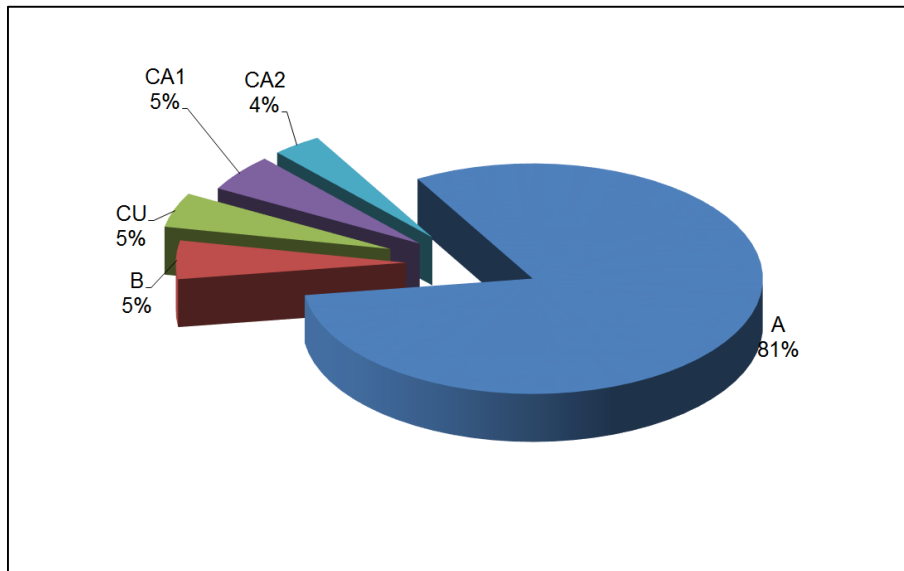
## Sentido Puebla-México

**Figura 44 Perfil de demanda vehicular horaria**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

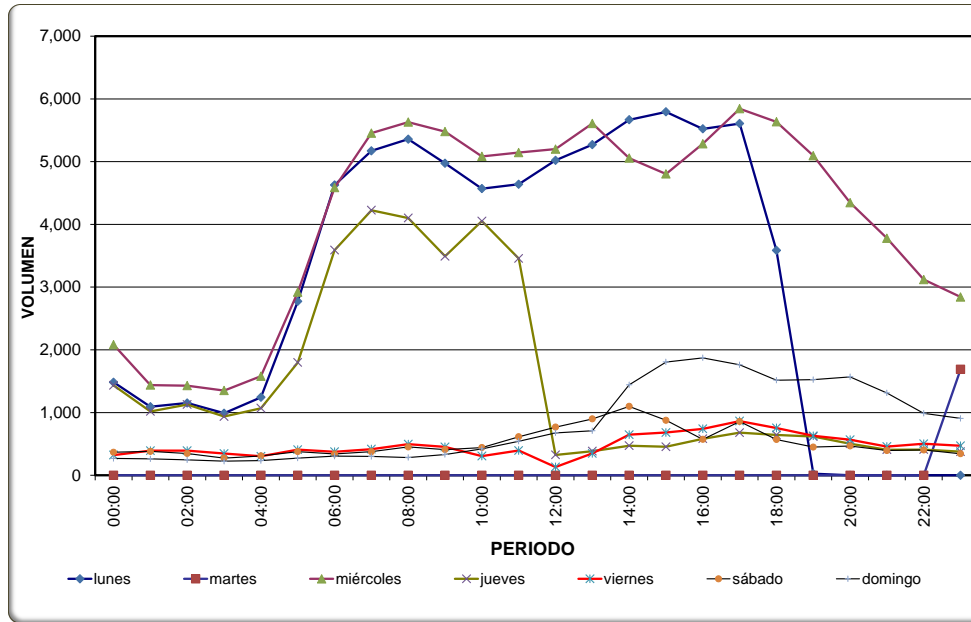
**Figura 45 Composición vehicular**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

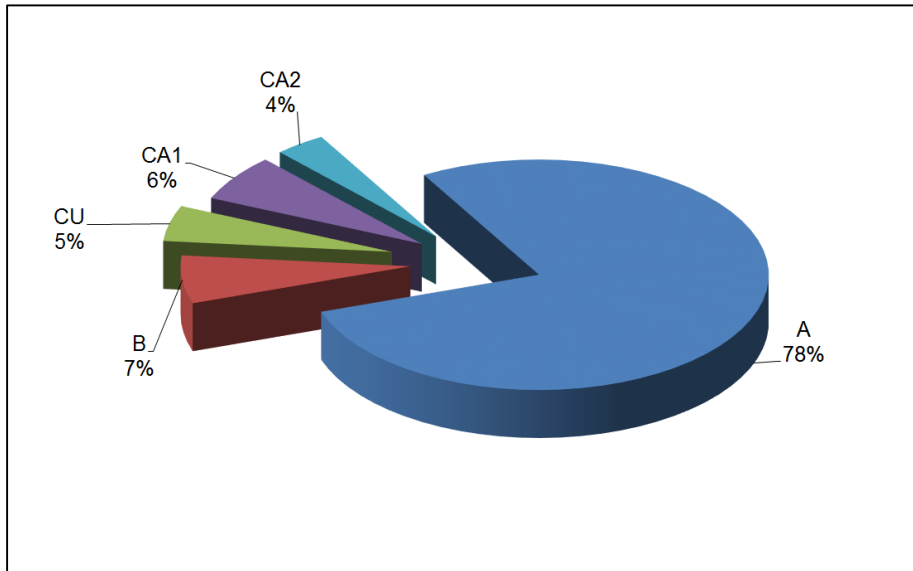
## Ambos sentidos

**Figura 46 Perfil de demanda vehicular horaria**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 47 Composición vehicular**

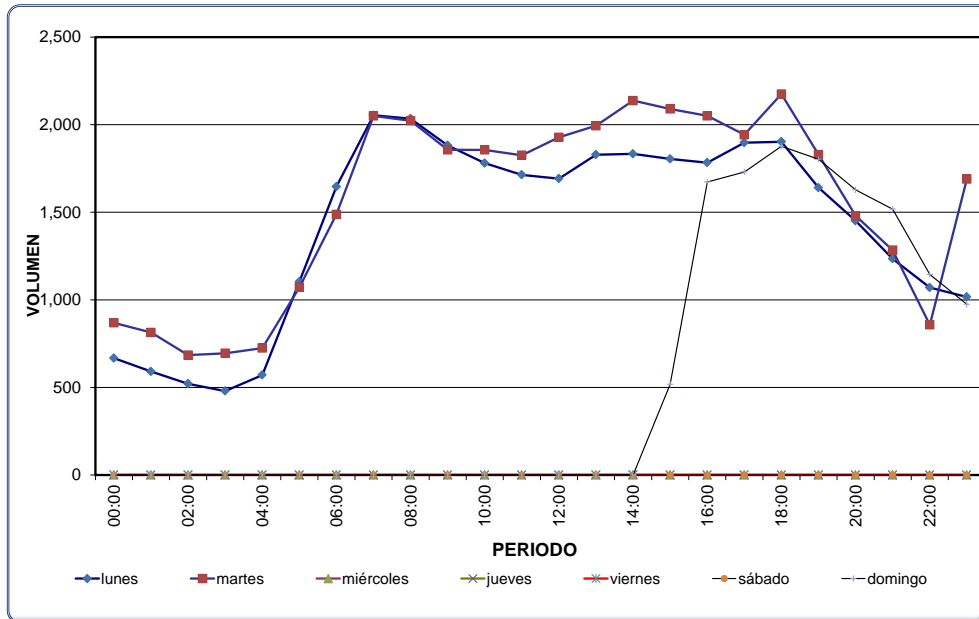


Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

## Estación 2

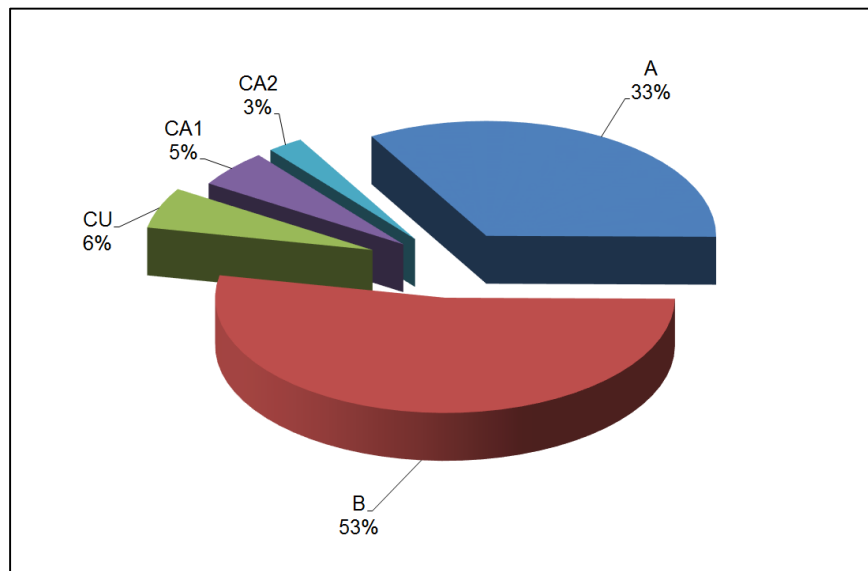
### Sentido México-Puebla

Figura 48 Perfil de demanda vehicular horaria



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

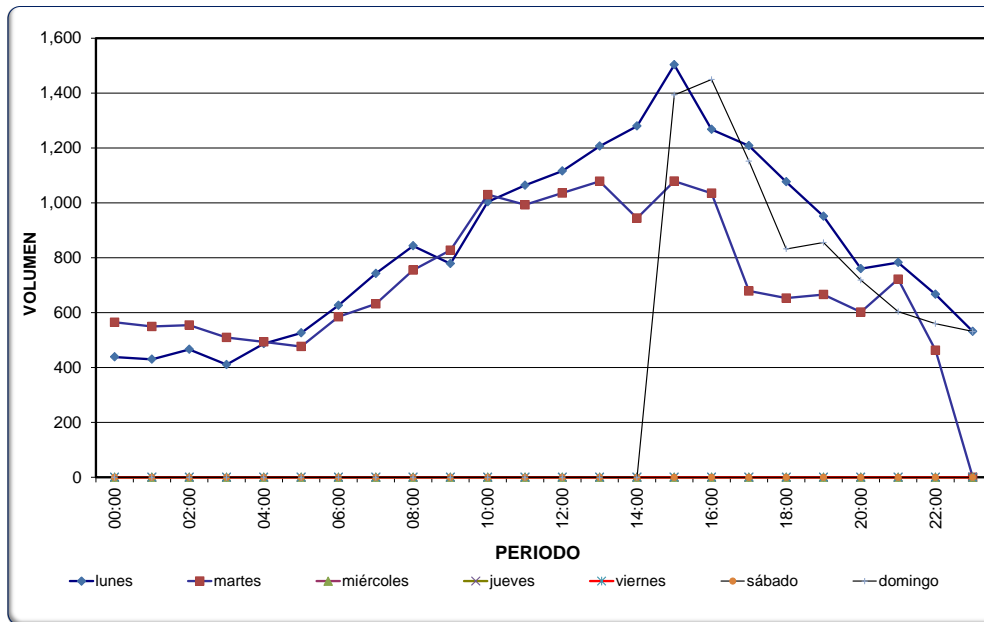
Figura 49 Composición vehicular



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

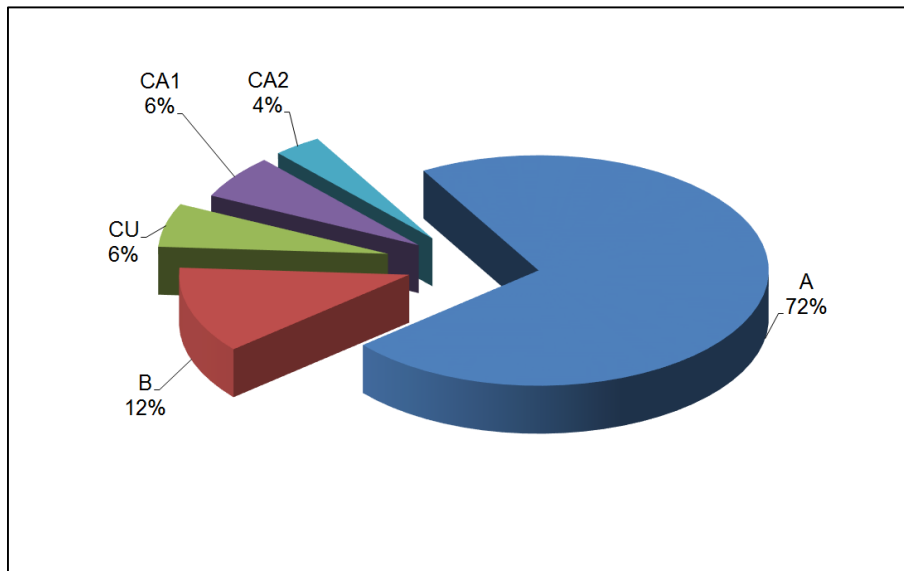
## Sentido Puebla-México

Figura 50 Perfil de demanda vehicular horaria



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

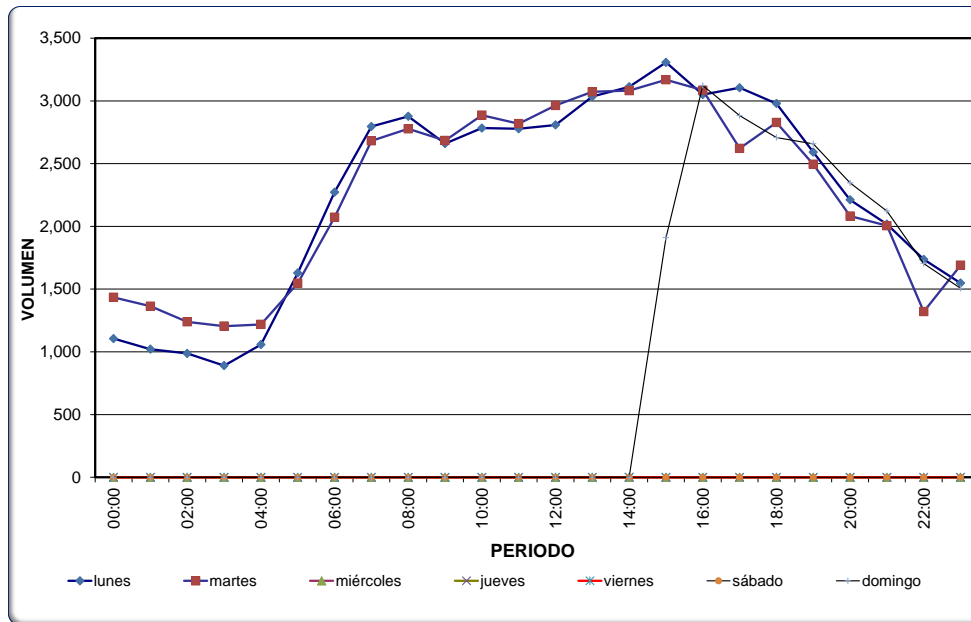
Figura 51 Composición vehicular



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

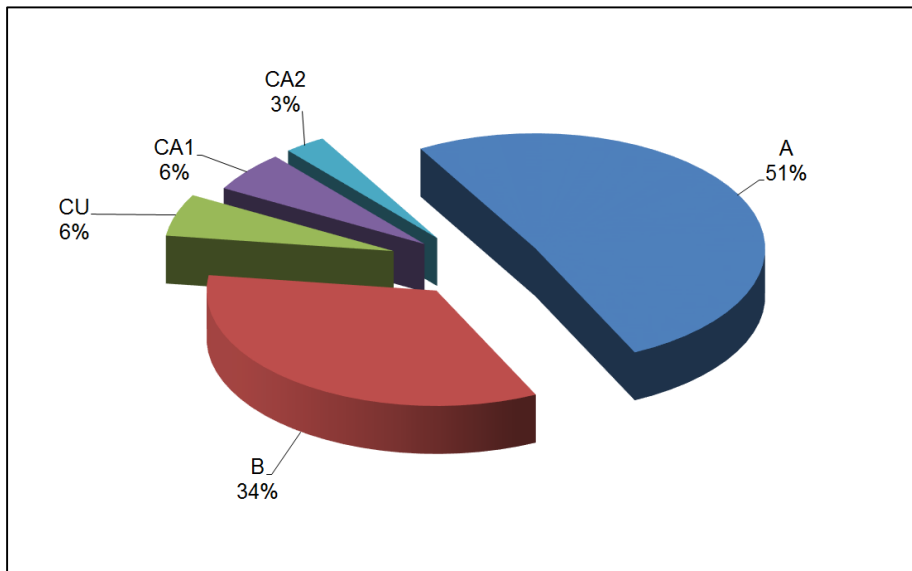
## Ambos sentidos

Figura 52 Perfil de demanda vehicular horaria



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 53 Composición vehicular

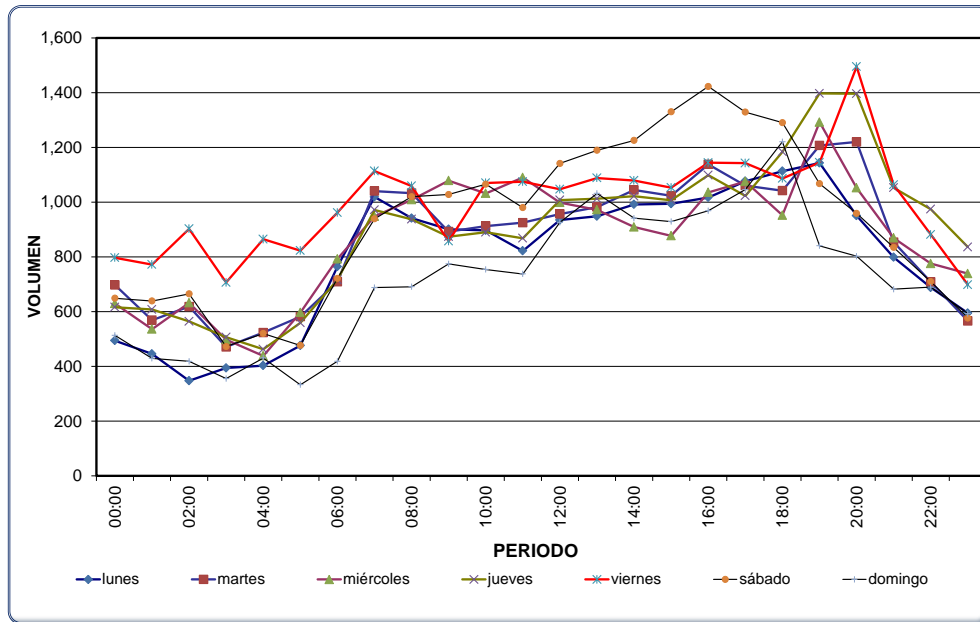


Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

## Estación 3

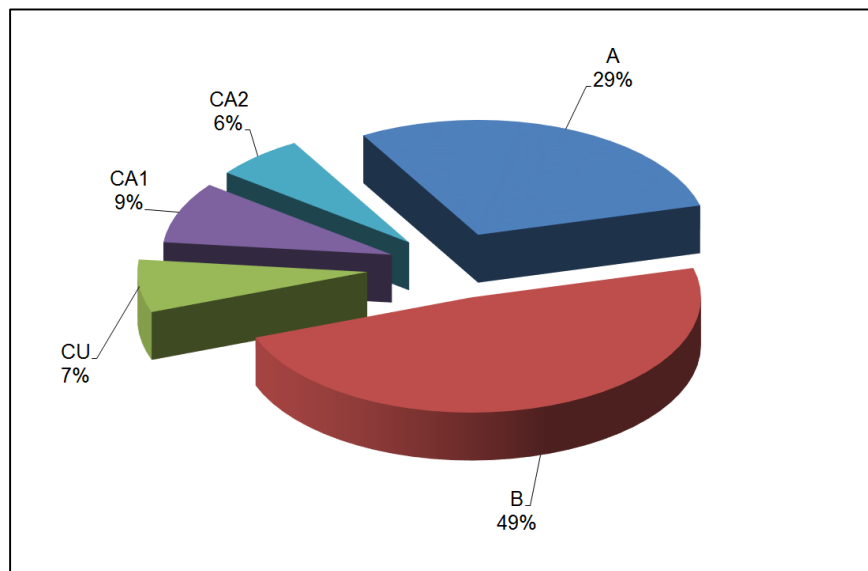
### Sentido México-Puebla

Figura 54 Perfil de demanda vehicular horaria



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

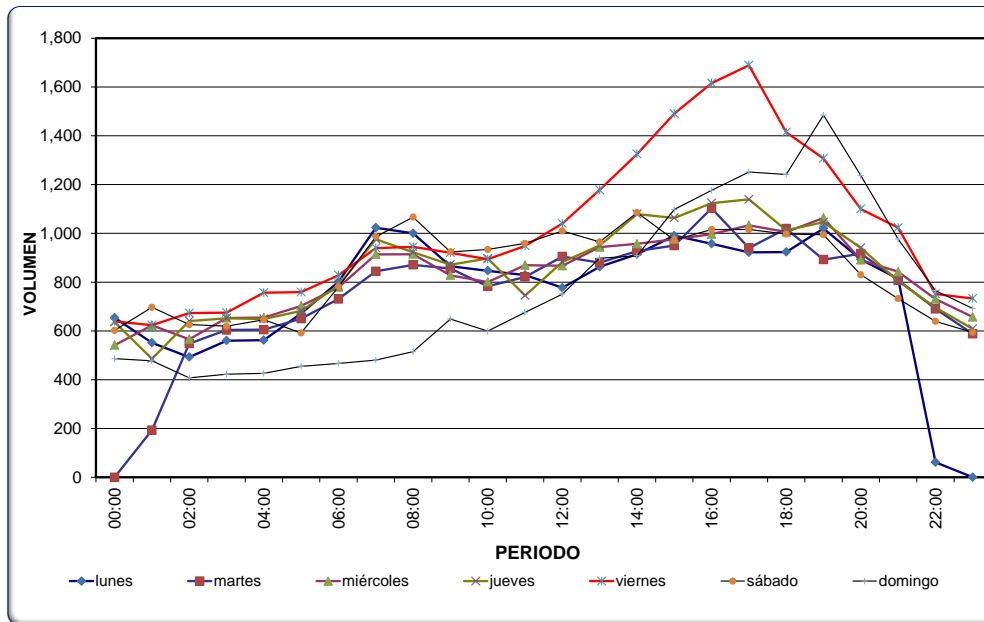
Figura 55 Composición vehicular



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

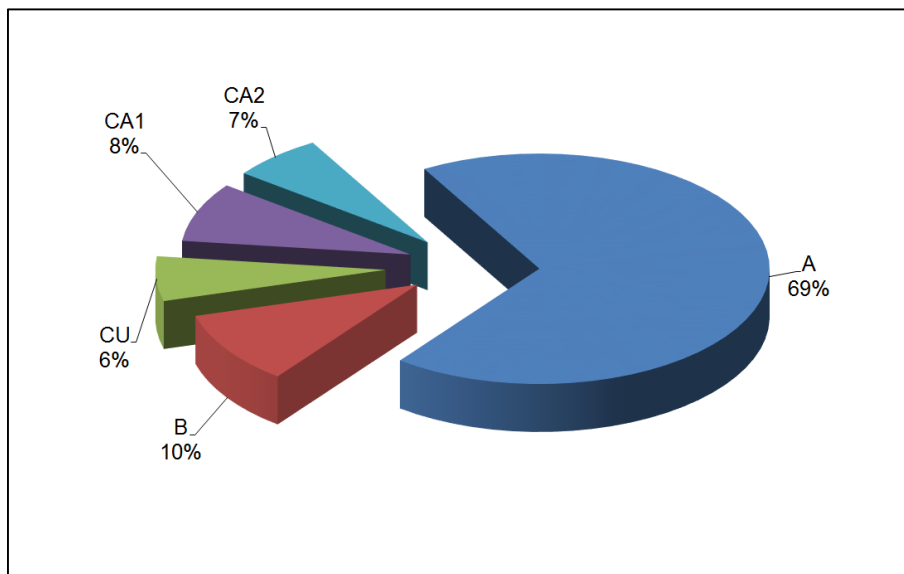
## Sentido Puebla-México

Figura 56 Perfil de demanda vehicular horaria



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

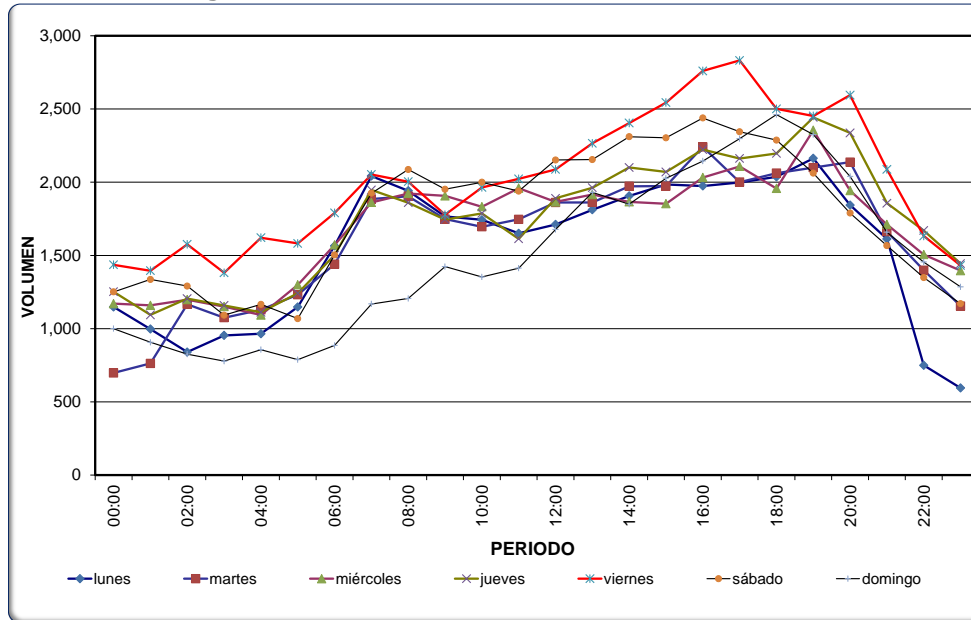
Figura 57 Composición vehicular



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

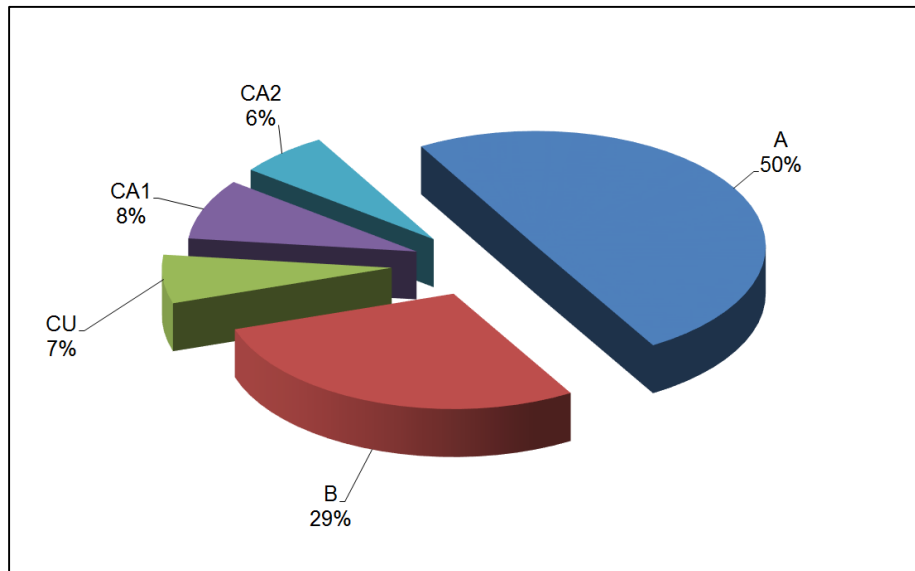
## Ambos sentidos

Figura 58 Perfil de demanda vehicular horaria



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 59 Composición vehicular



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

---

## **Ανεχο 2**

---

En este anexo se muestran los perfiles horarios de la concentración ( $k$ ) y velocidad promedio ( $v$ ) en los días con registro de 24 horas. Cada imagen corresponde al perfil horario del día (según la fecha) en el sentido de circulación correspondiente de cada estación de aforo.

En el caso del perfil de concentración, este muestra el comportamiento, a lo largo del día, de la concentración promedio existente medida en (veh/km) del flujo vehicular que transita a través de la vialidad. Como se explicó en el Capítulo 2, esta concentración se estimó a partir de despejar la concentración ( $k$ ) de la ecuación fundamental.

Estos perfiles resultan importantes, ya que se puede observar la variación de la concentración a lo largo del día y así determinar los períodos de concentración máxima y mínima.

En cuanto a los perfiles horarios de velocidad promedio, estos representan la variación de la velocidad promedio del flujo que transita a lo largo del día. Con base en estos, es posible determinar los períodos de velocidades máximas y mínimas y que pudieran representar problemas de congestionamiento en el caso de velocidades mínimas y condiciones favorables, en el caso de velocidades máximas.

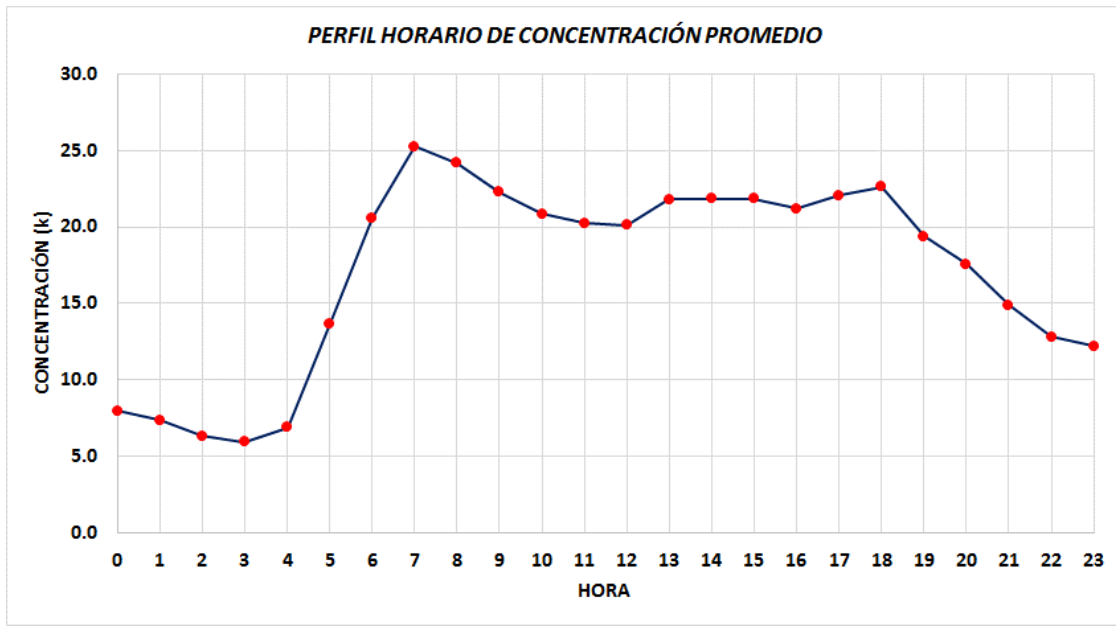
Las velocidades aquí presentadas se obtuvieron con base en los registros directos de los equipos neumáticos de aforo, ya que estos tienen la capacidad de medirla.

# Estación 1

## Sentido México-Puebla

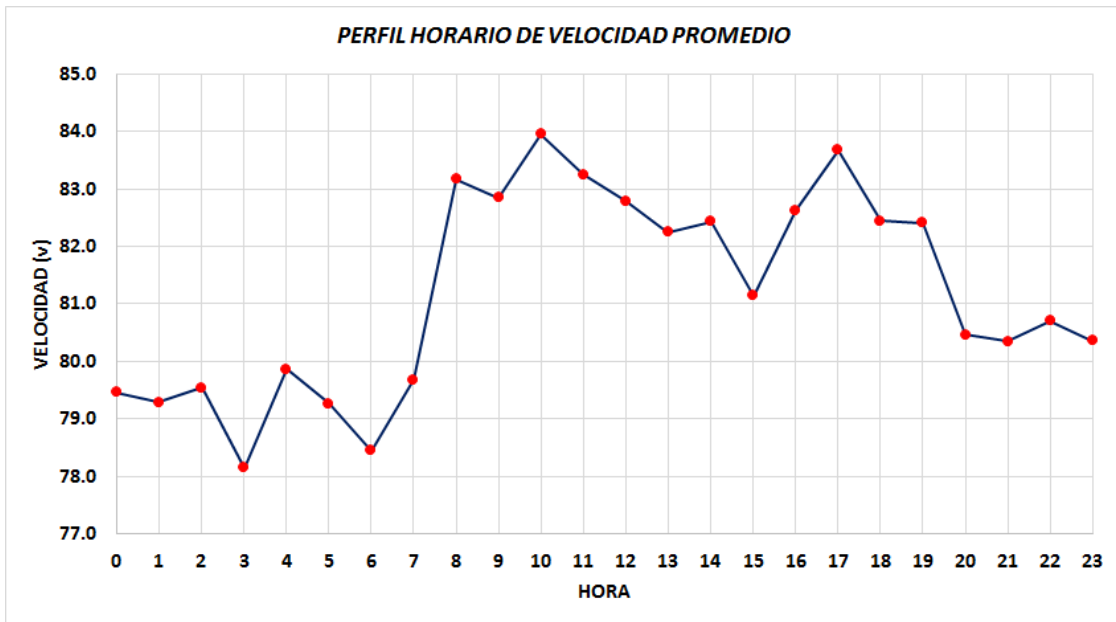
Fecha 24-09-2012

Figura 60 Perfil horario de concentración promedio (k)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 61 Perfil horario de velocidad promedio (v)

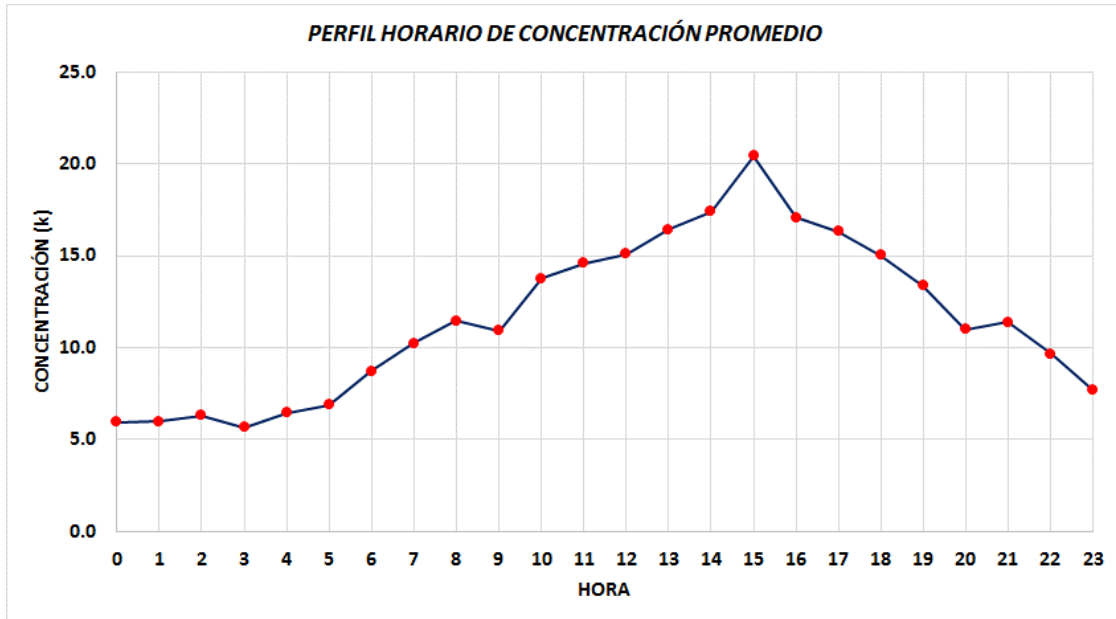


Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

## Sentido Puebla-México

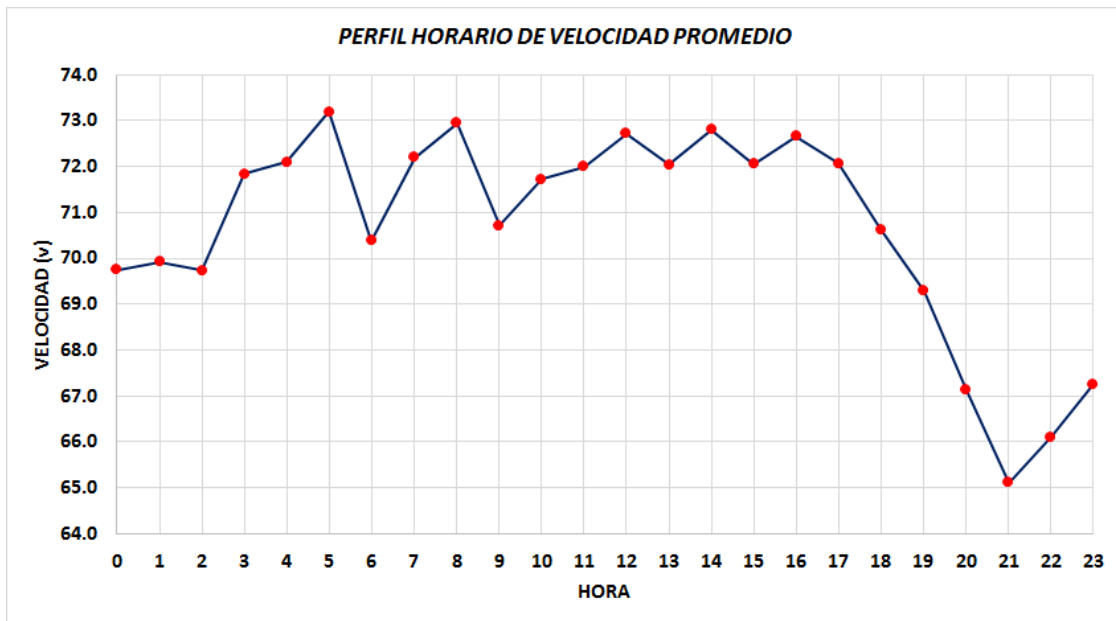
Fecha 24-09-2012

Figura 62 Perfil horario de concentración promedio (k)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 63 Perfil horario de velocidad promedio (v)



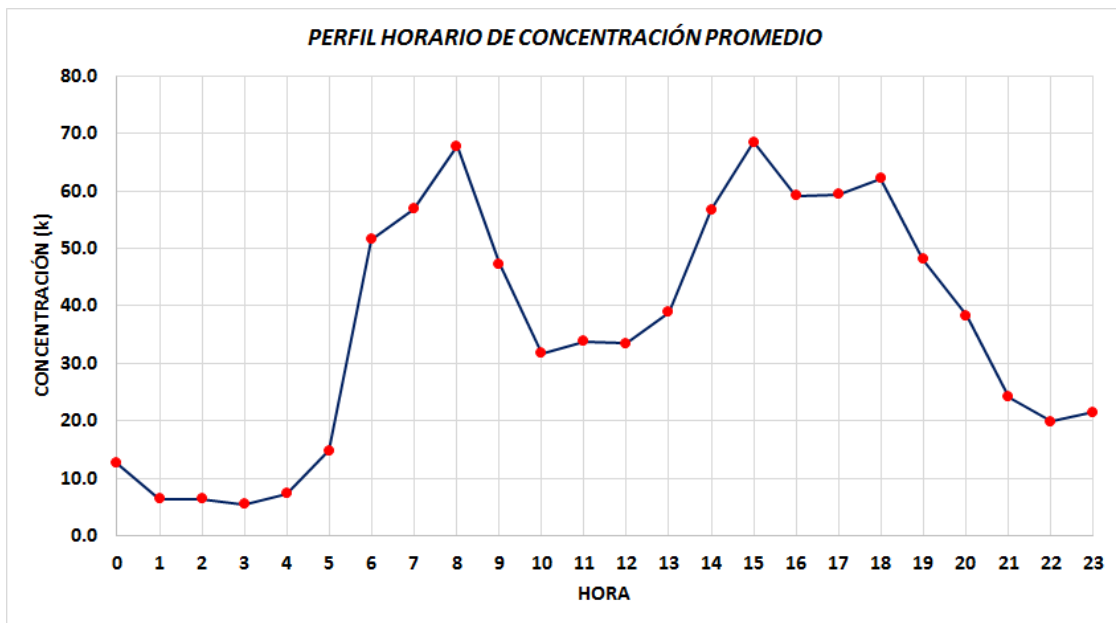
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

## Estación 2

### Sentido México-Puebla

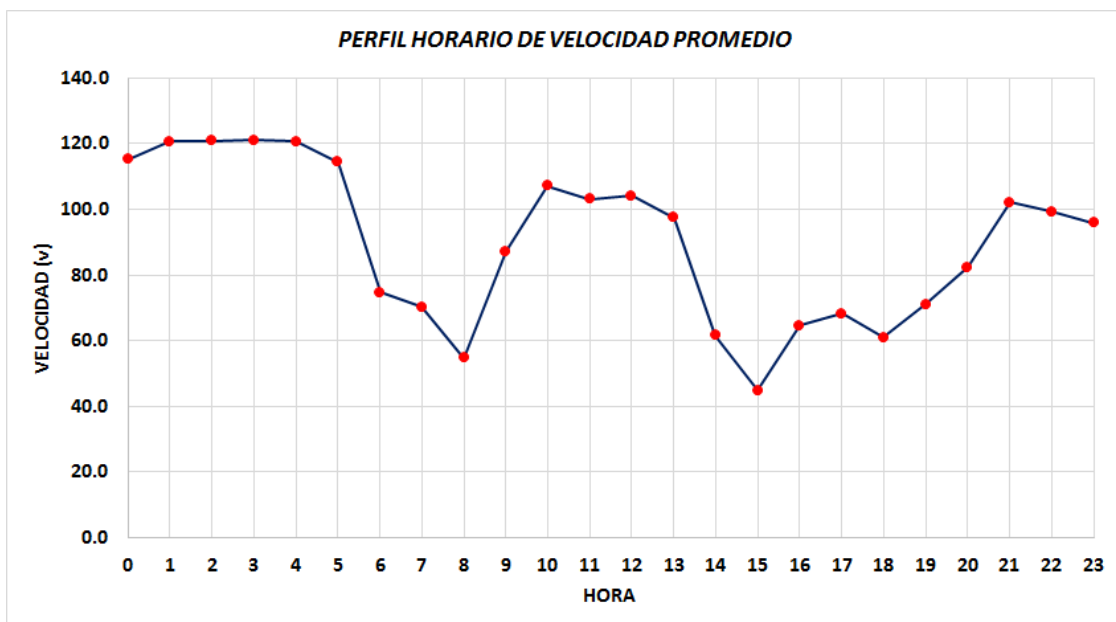
Fecha 26-09-2012

Figura 64 Perfil horario de concentración promedio (k)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 65 Perfil horario de velocidad promedio (v)

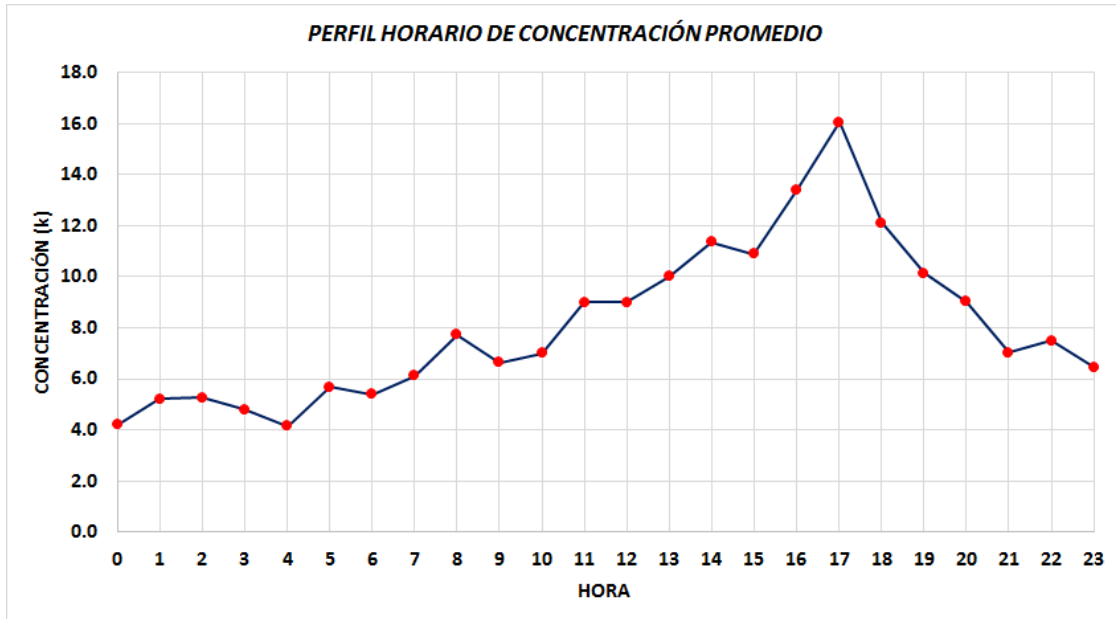


Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

## Sentido Puebla-México

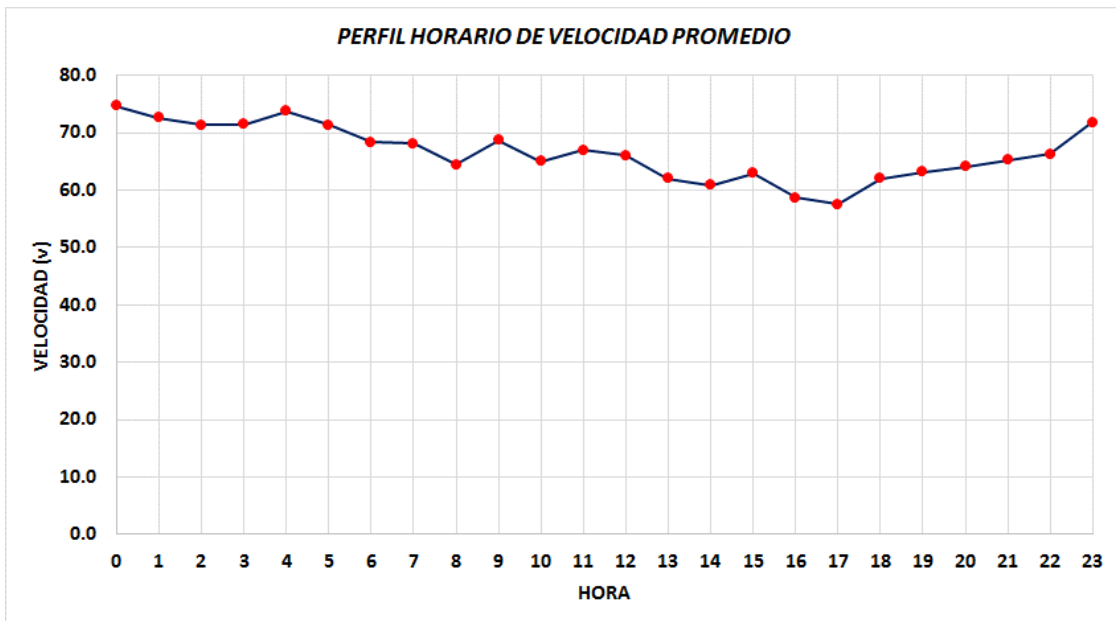
Fecha 21-09-2012

Figura 66 Perfil horario de concentración promedio (k)



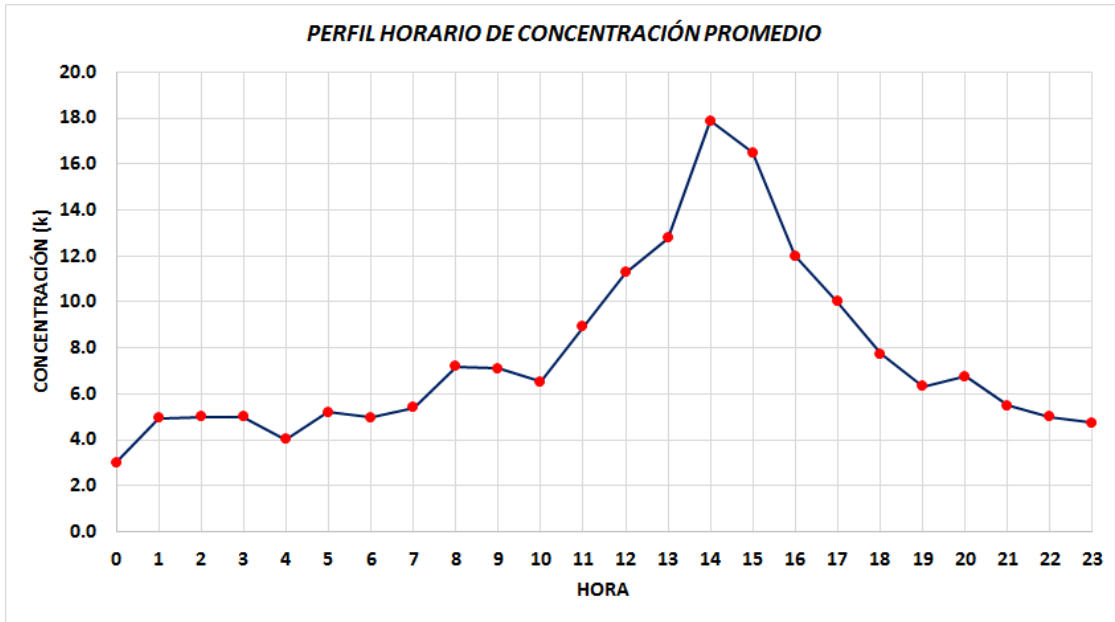
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 67 Perfil horario de velocidad promedio (v)



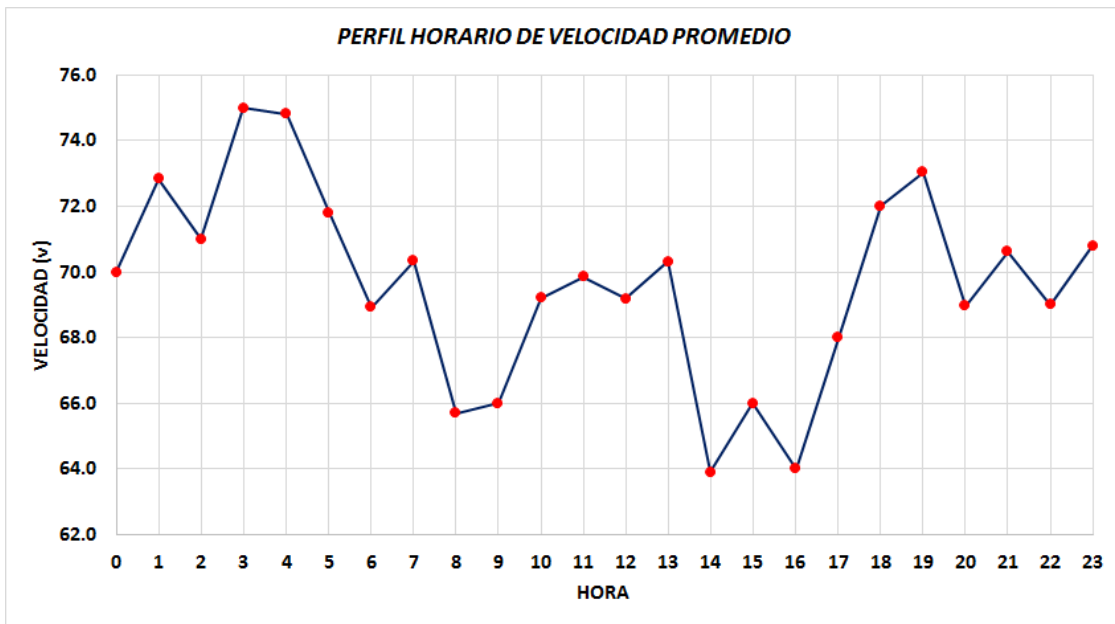
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 68 Perfil horario de concentración promedio (k)**



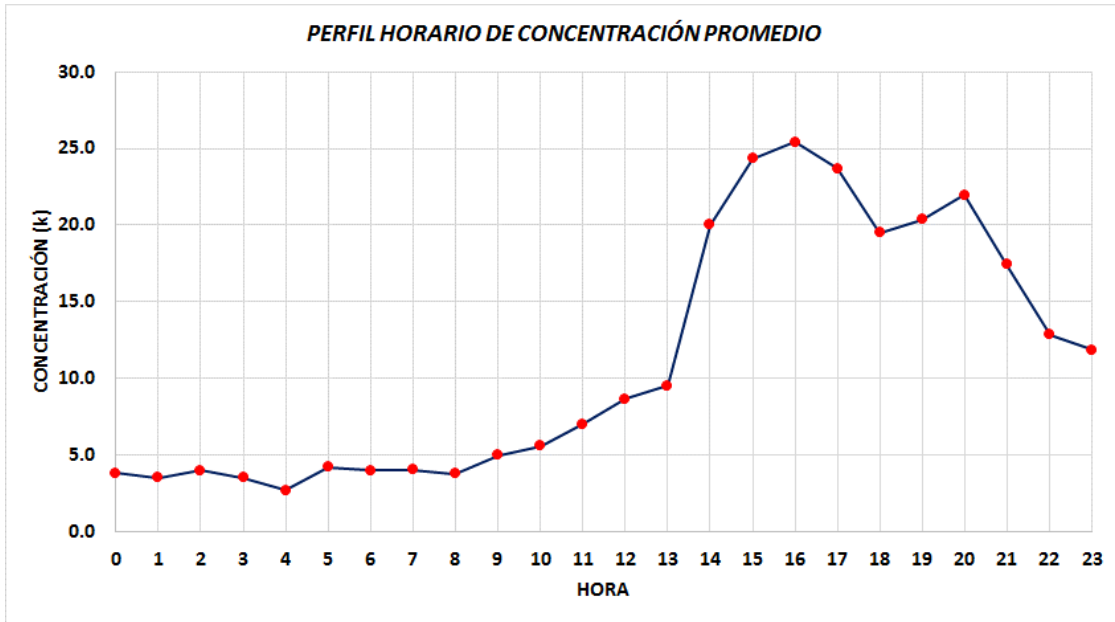
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 69 Perfil horario de velocidad promedio (v)**



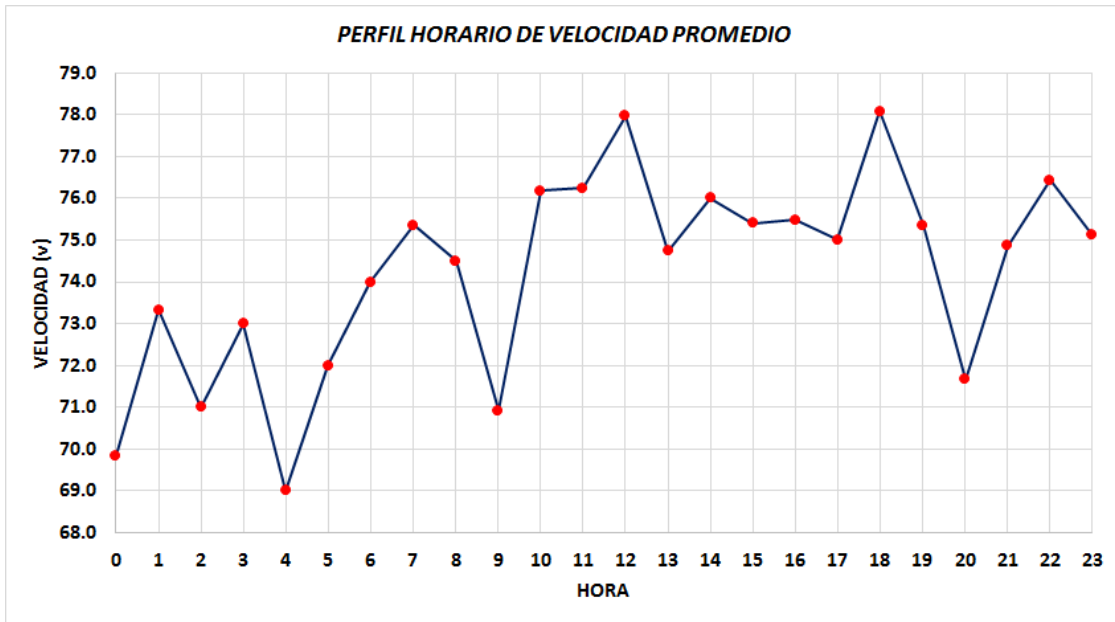
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 70 Perfil horario de concentración promedio (k)



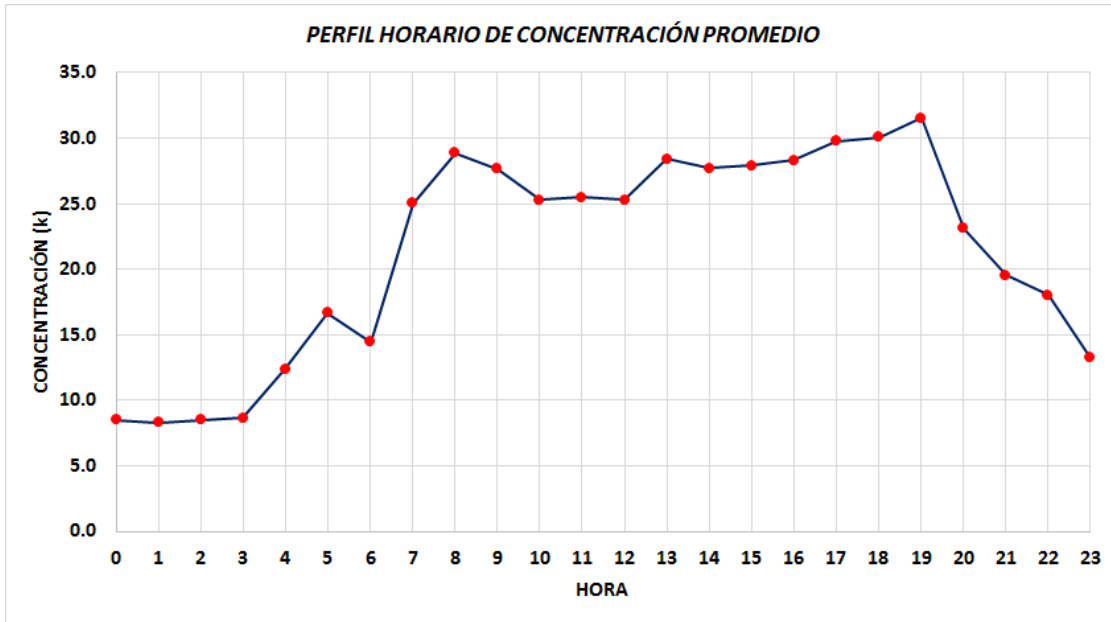
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 71 Perfil horario de velocidad promedio (v)



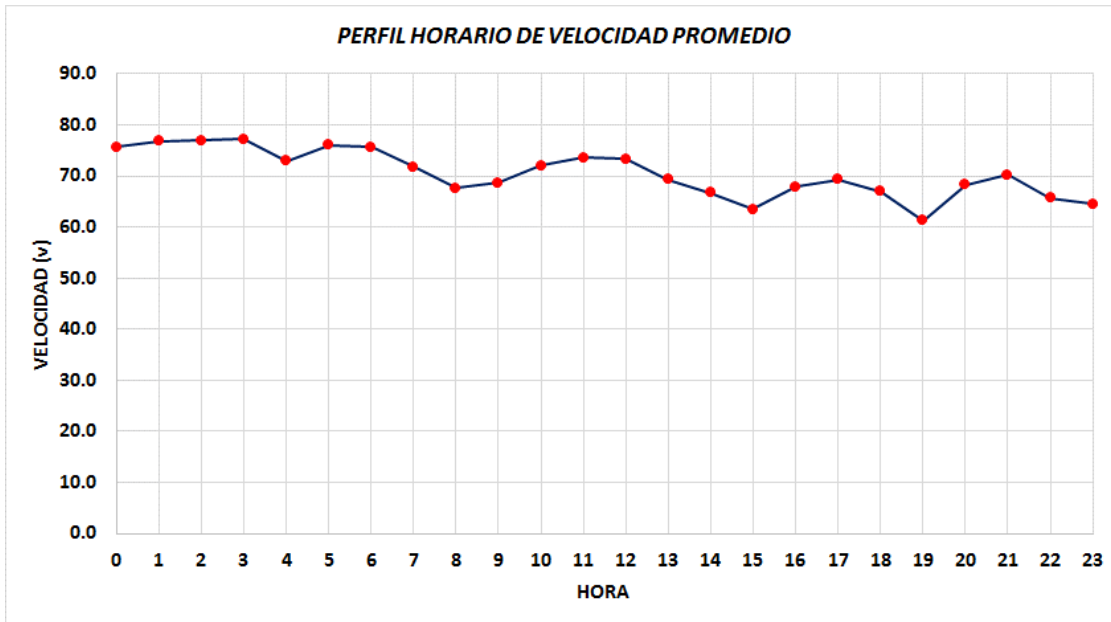
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 72 Perfil horario de concentración promedio (k)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 73 Perfil horario de velocidad promedio (v)



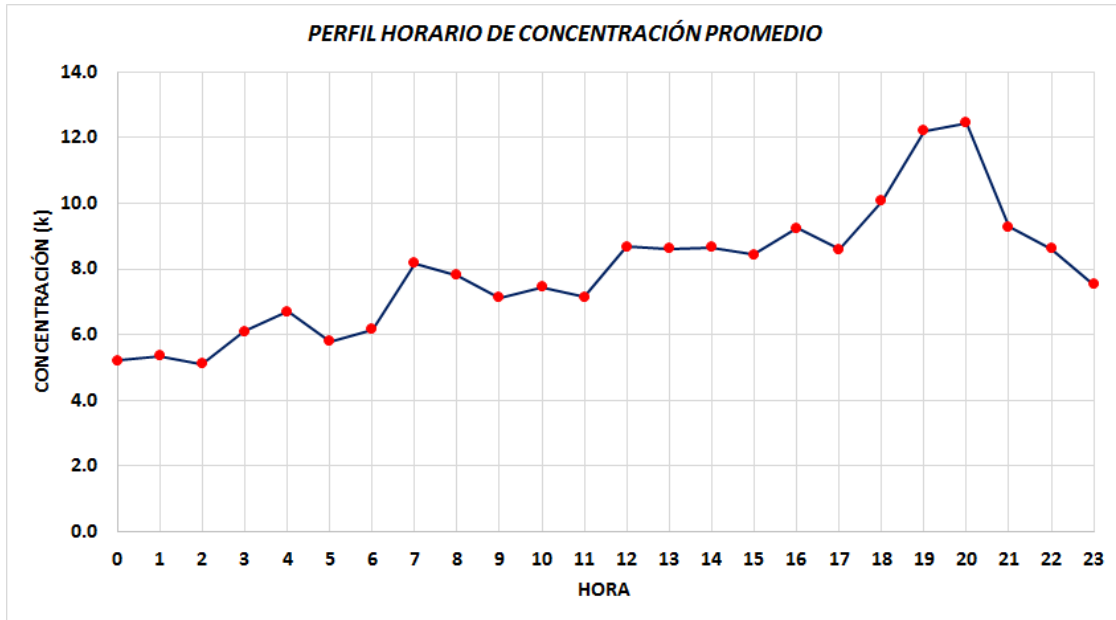
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

# Estación 3

## Sentido México-Puebla

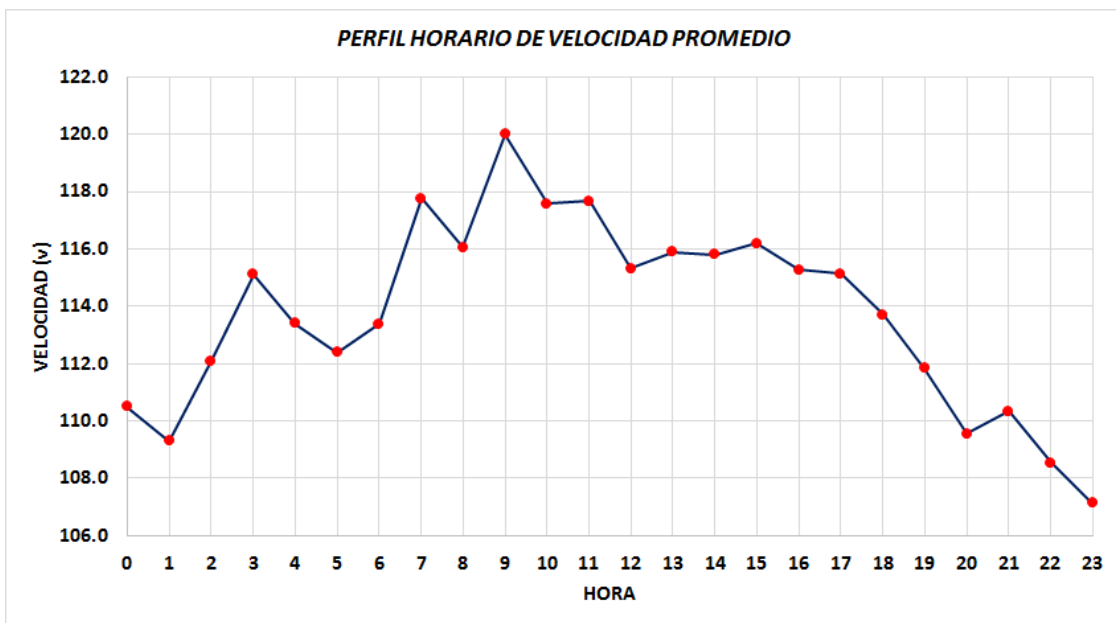
Fecha 20-09-2012

Figura 74 Perfil horario de concentración promedio (k)



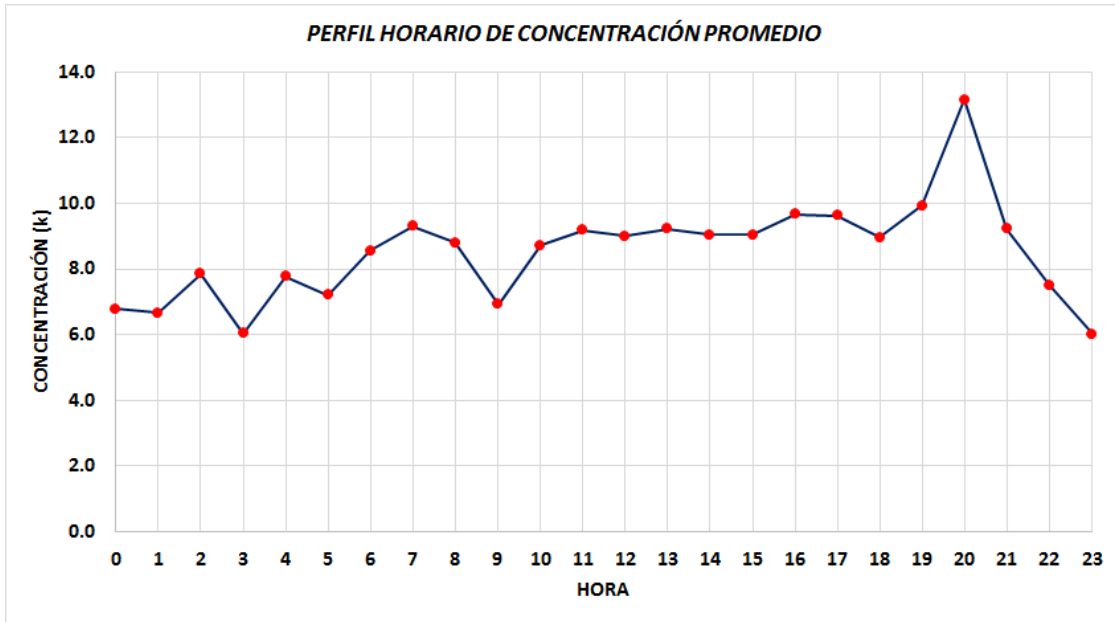
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 75 Perfil horario de velocidad promedio (v)



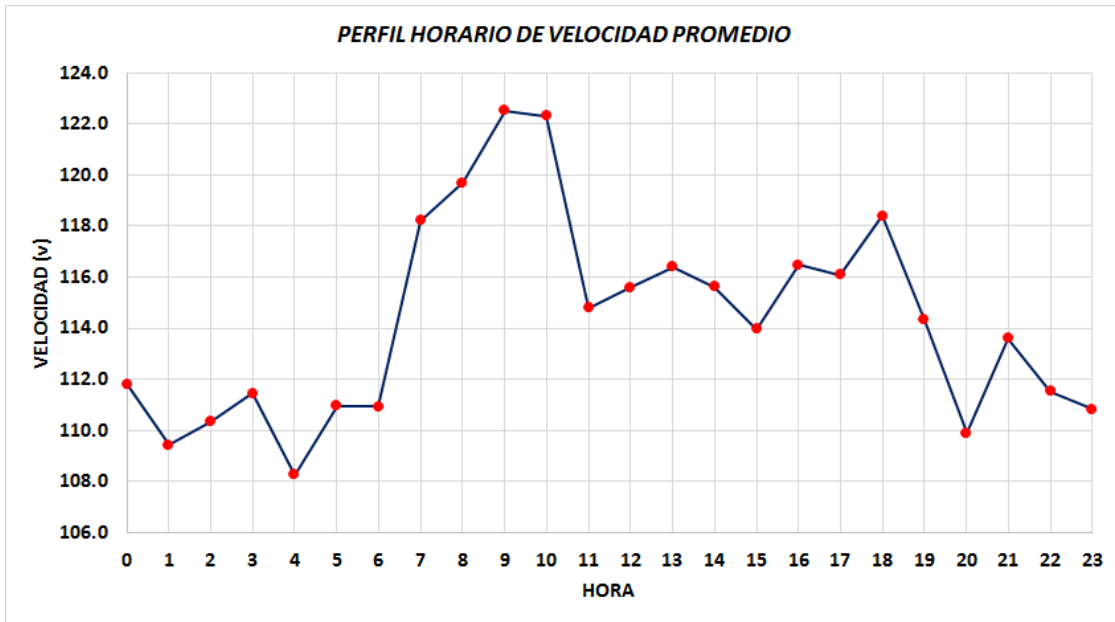
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 76 Perfil horario de concentración promedio (k)



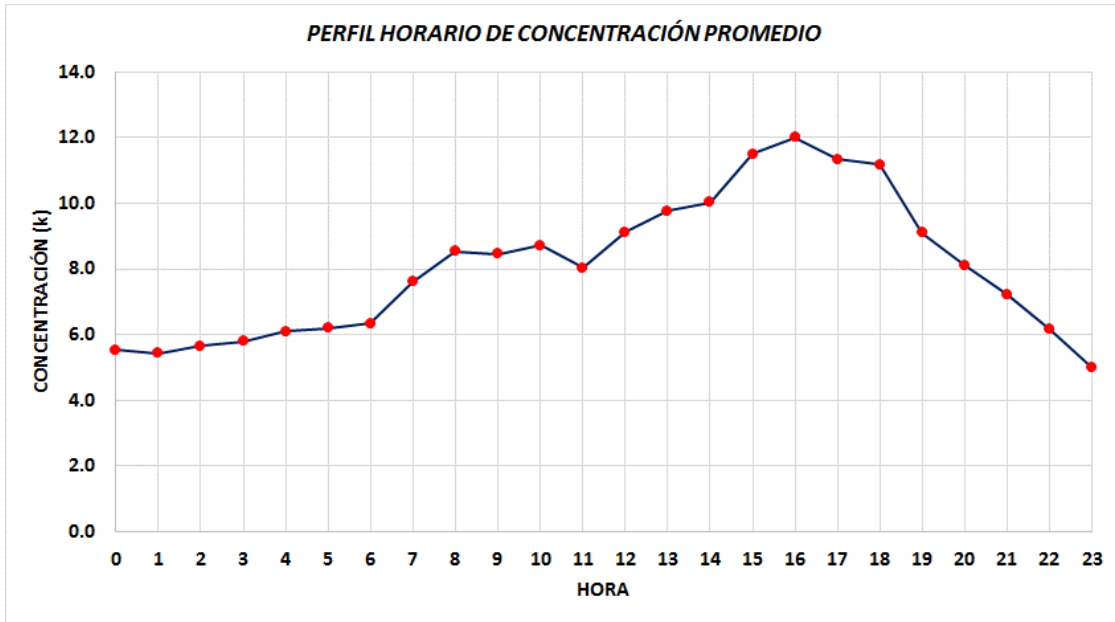
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 77 Perfil horario de velocidad promedio (v)



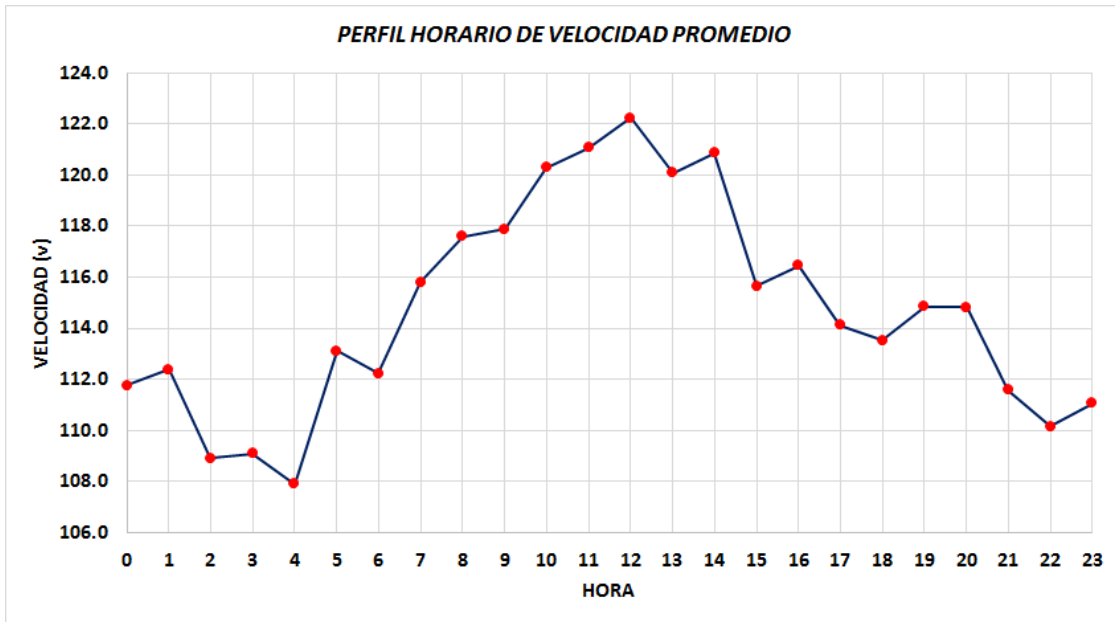
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 78 Perfil horario de concentración promedio (k)



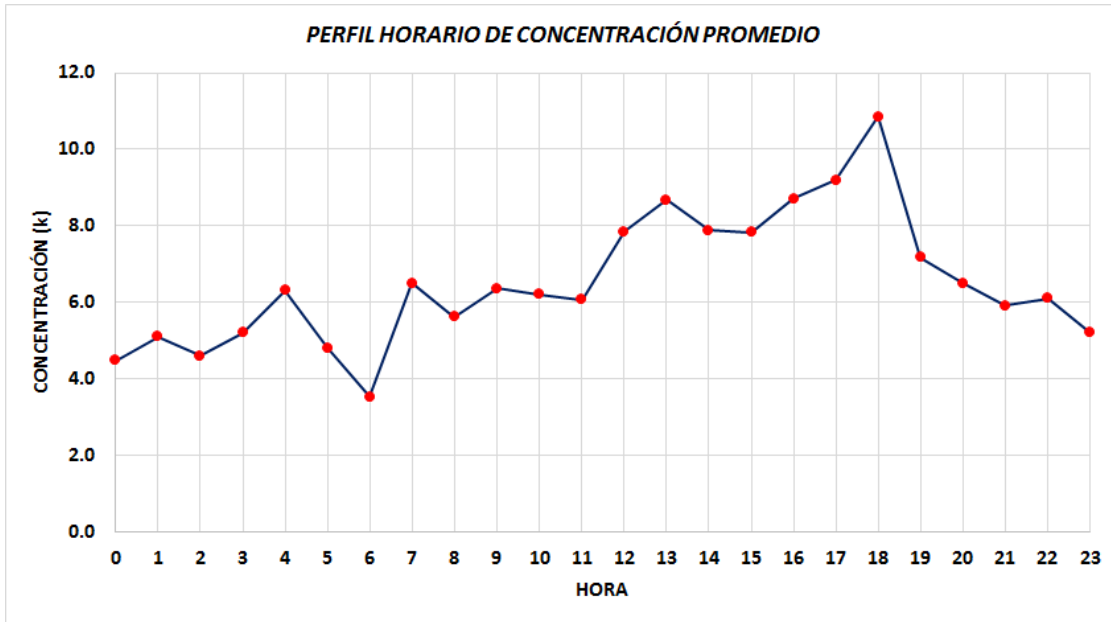
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 79 Perfil horario de velocidad promedio (v)



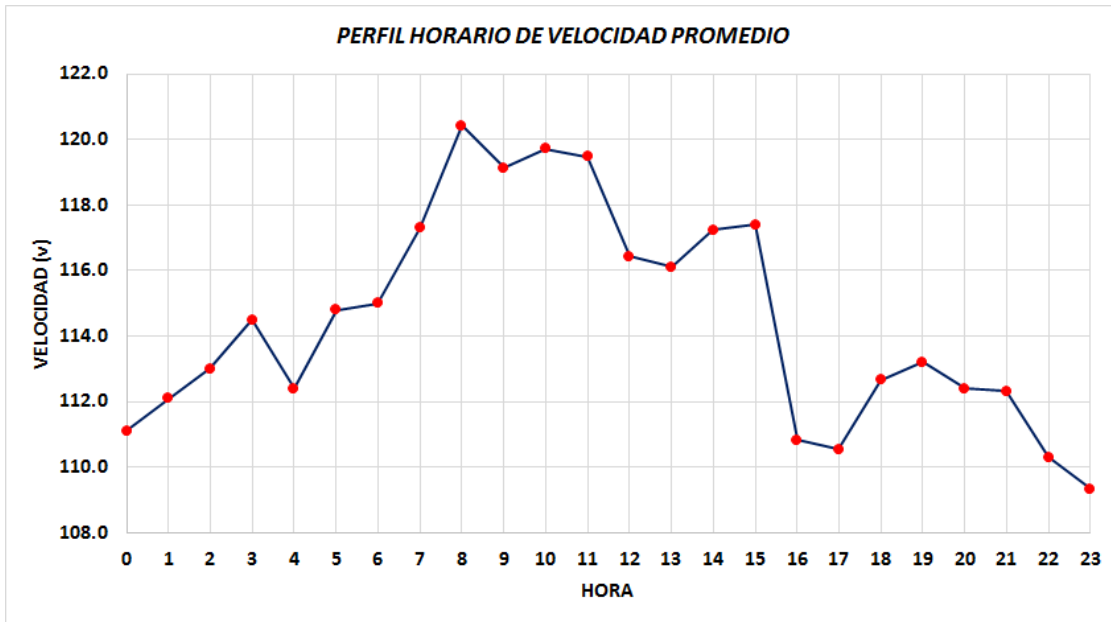
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 80 Perfil horario de concentración promedio (k)



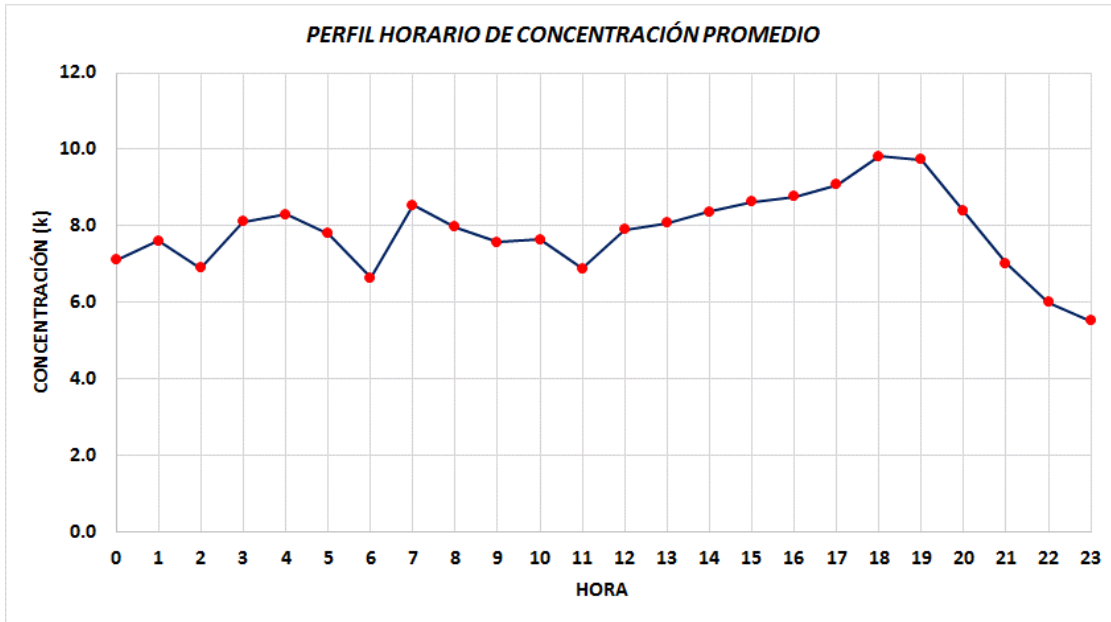
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 81 Perfil horario de velocidad promedio (v)



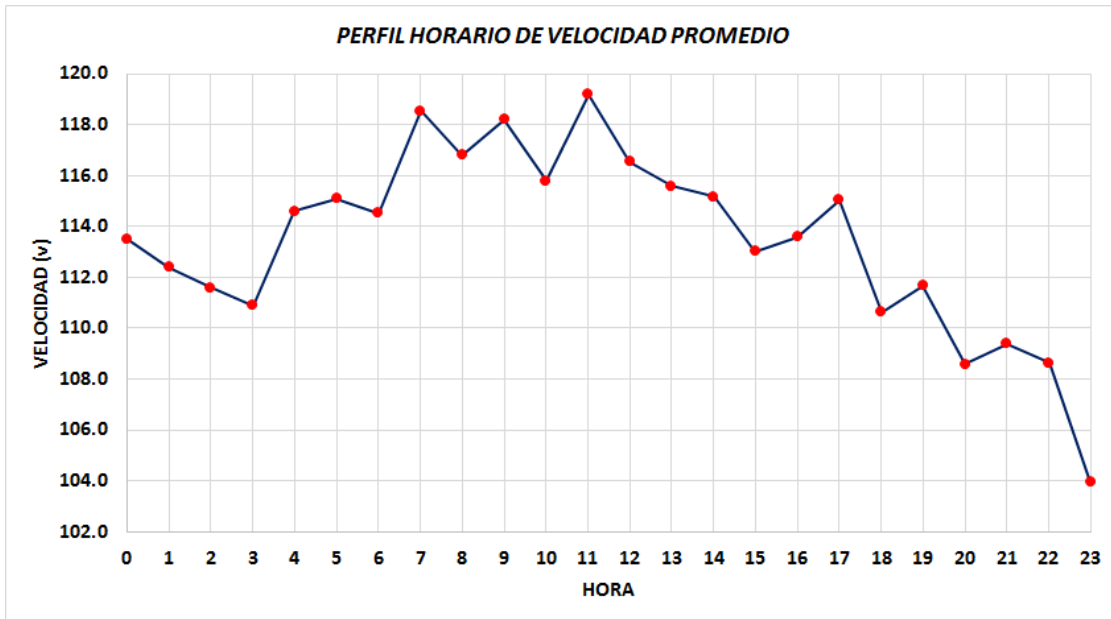
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 82 Perfil horario de concentración promedio (k)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 83 Perfil horario de velocidad promedio (v)



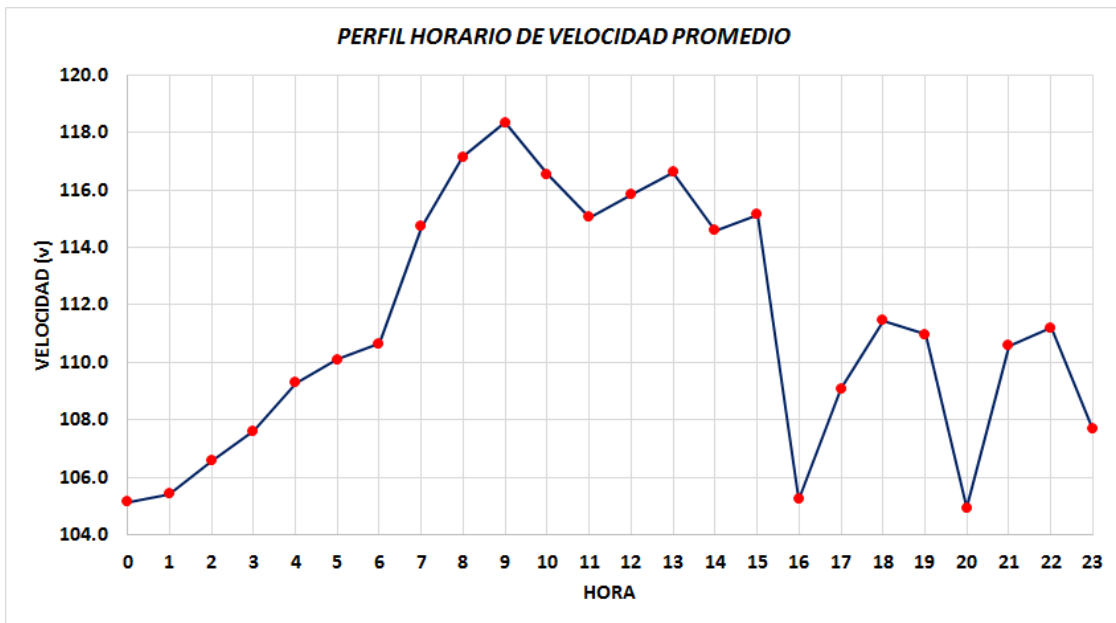
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 84 Perfil horario de concentración promedio (k)**



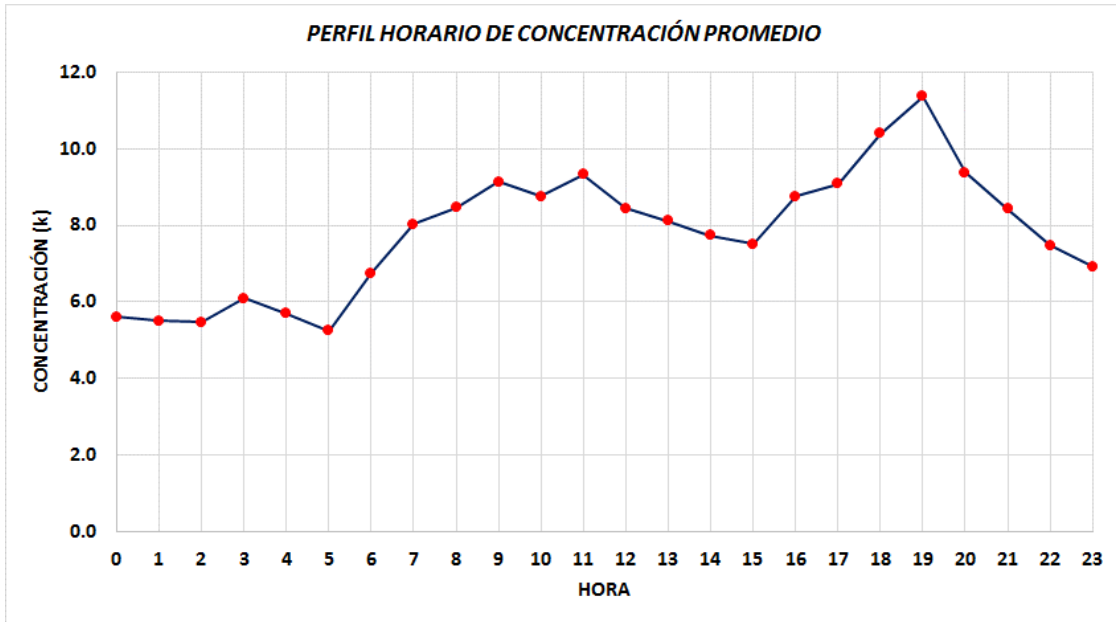
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 85 Perfil horario de velocidad promedio (v)**



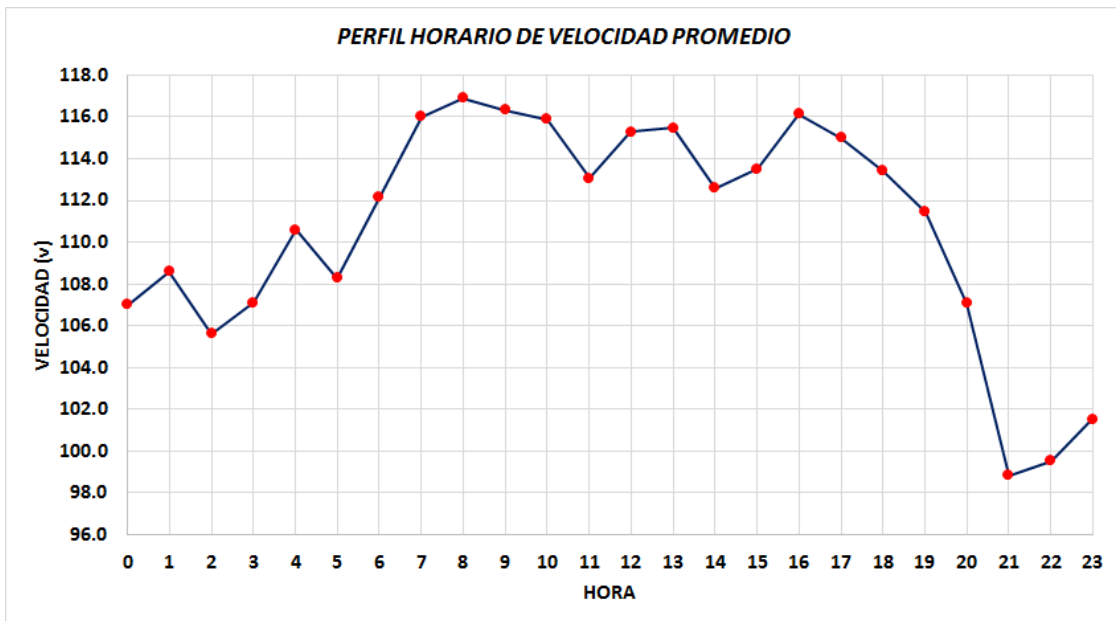
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 86 Perfil horario de concentración promedio (k)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 87 Perfil horario de velocidad promedio (v)

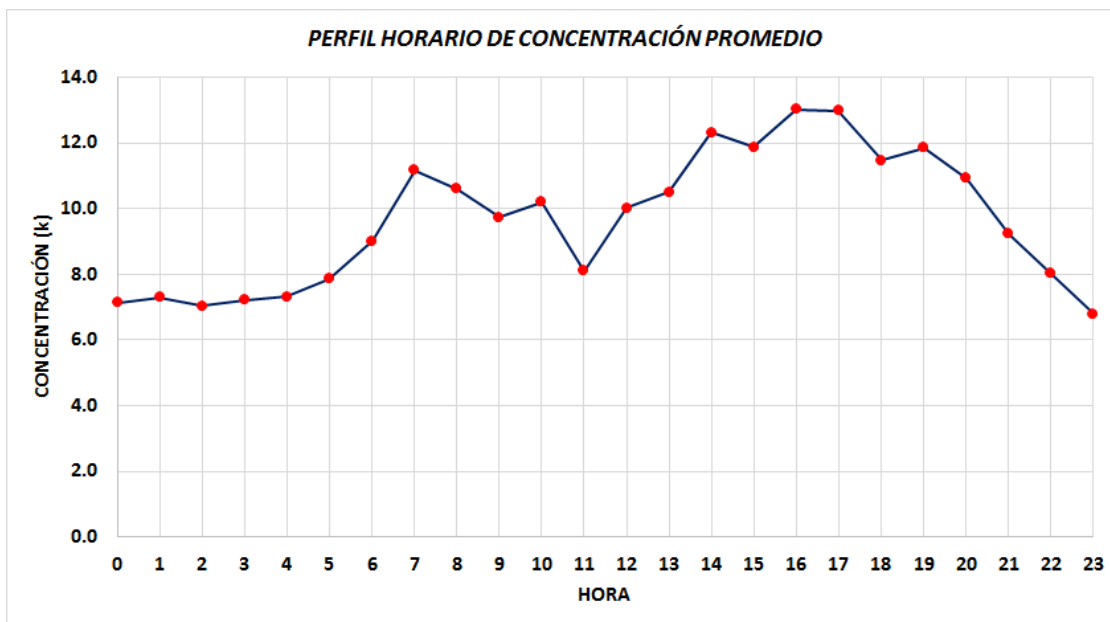


Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

## Sentido Puebla-México

Fecha 20-09-2012

Figura 88 Perfil horario de concentración promedio (k)



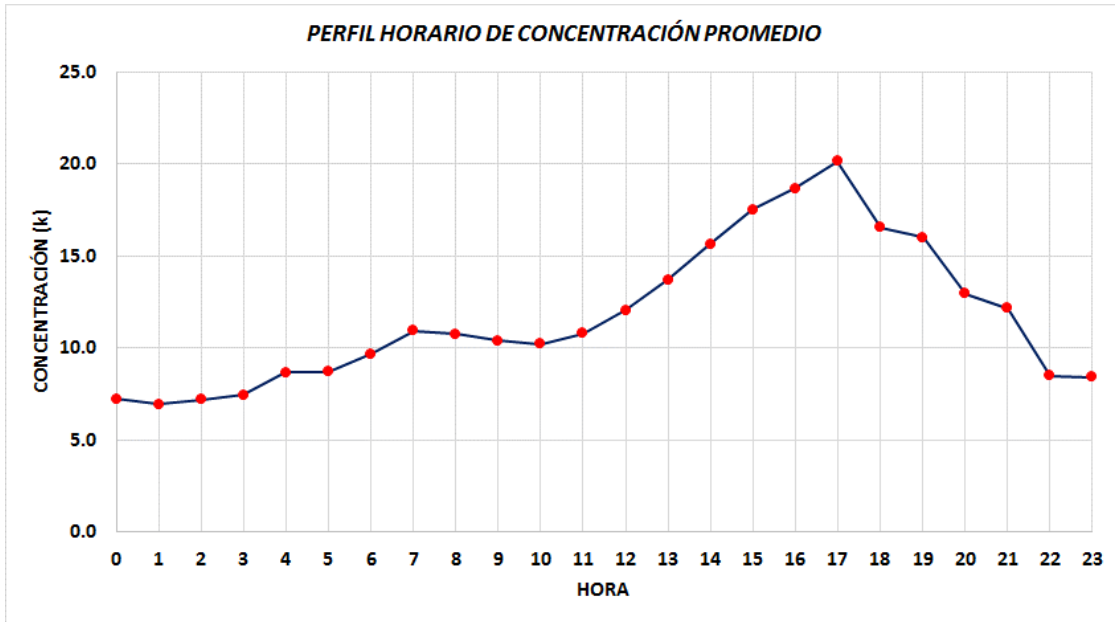
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 89 Perfil horario de velocidad promedio (v)



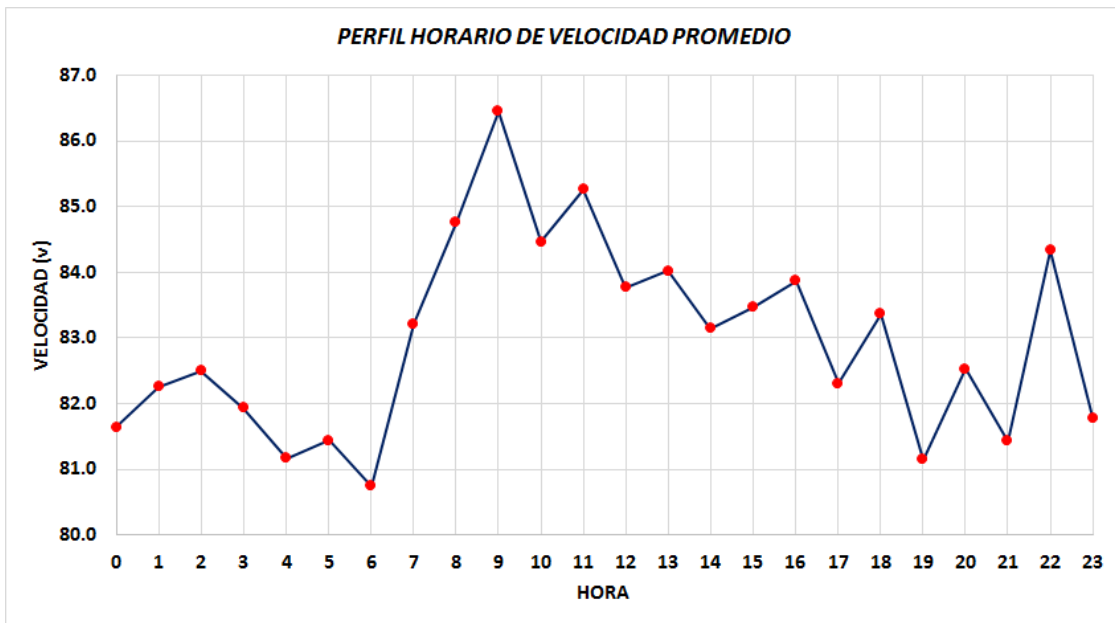
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 90 Perfil horario de concentración promedio (k)**



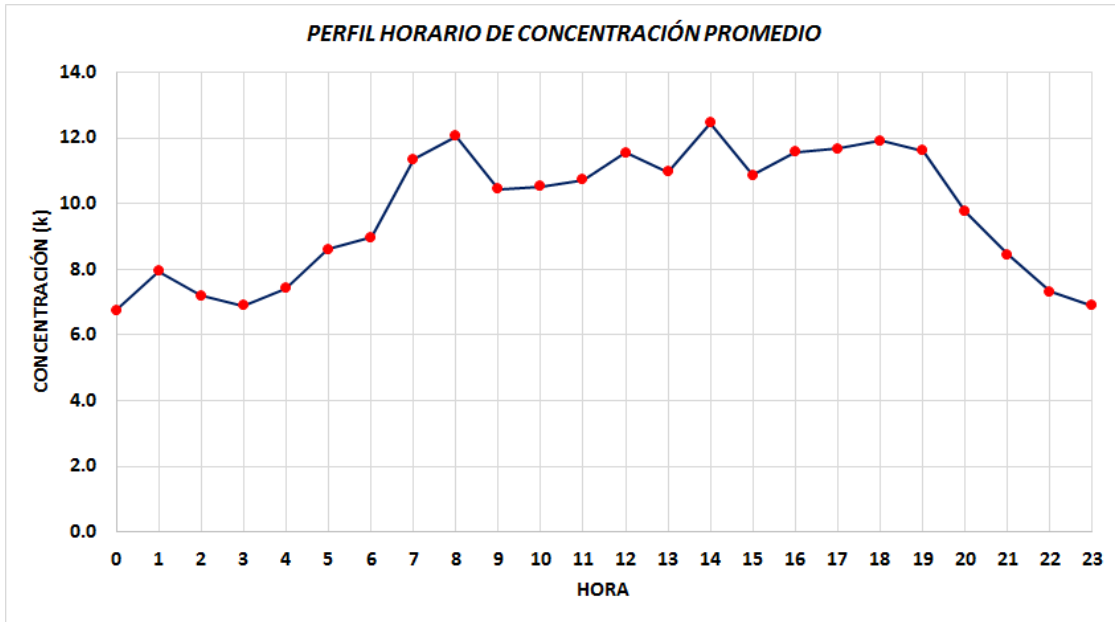
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 91 Perfil horario de velocidad promedio (v)**



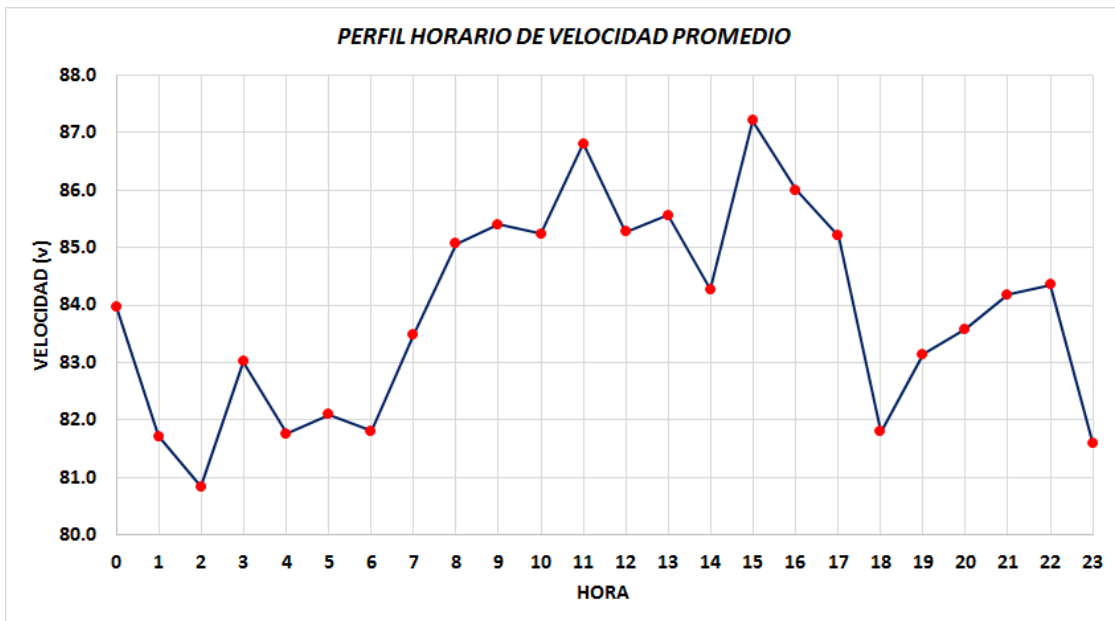
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 92 Perfil horario de concentración promedio (k)



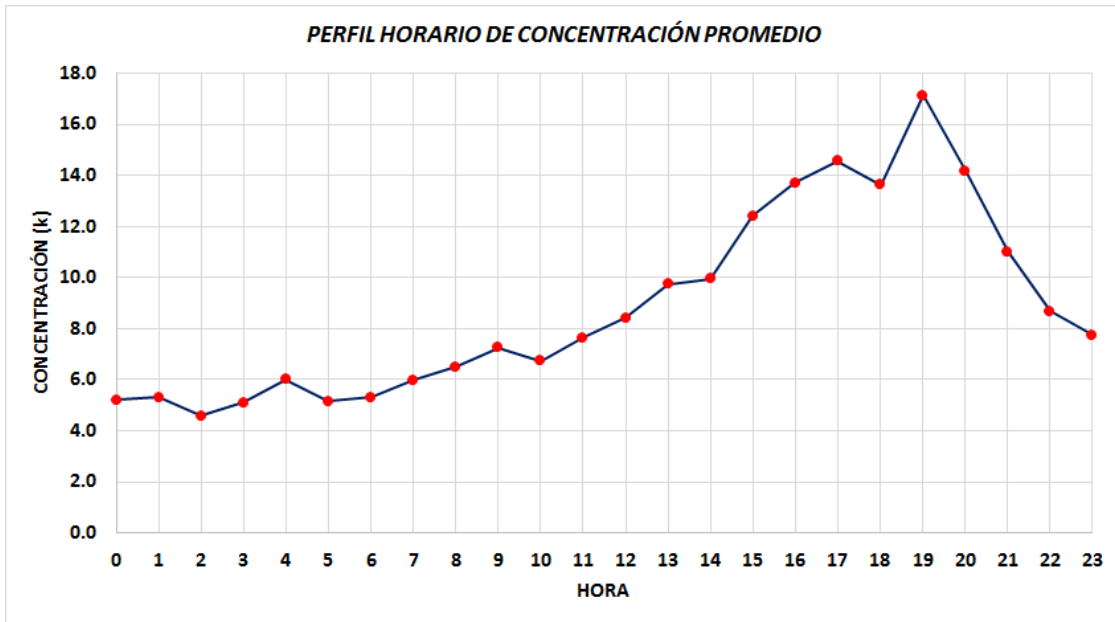
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 93 Perfil horario de velocidad promedio (v)



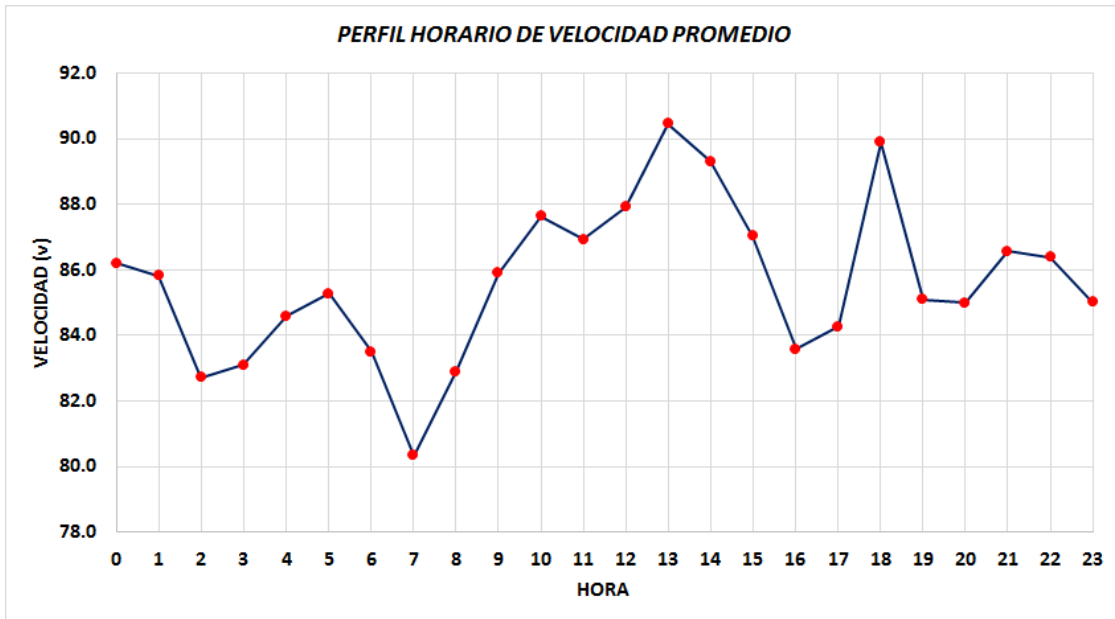
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 94 Perfil horario de concentración promedio (k)**



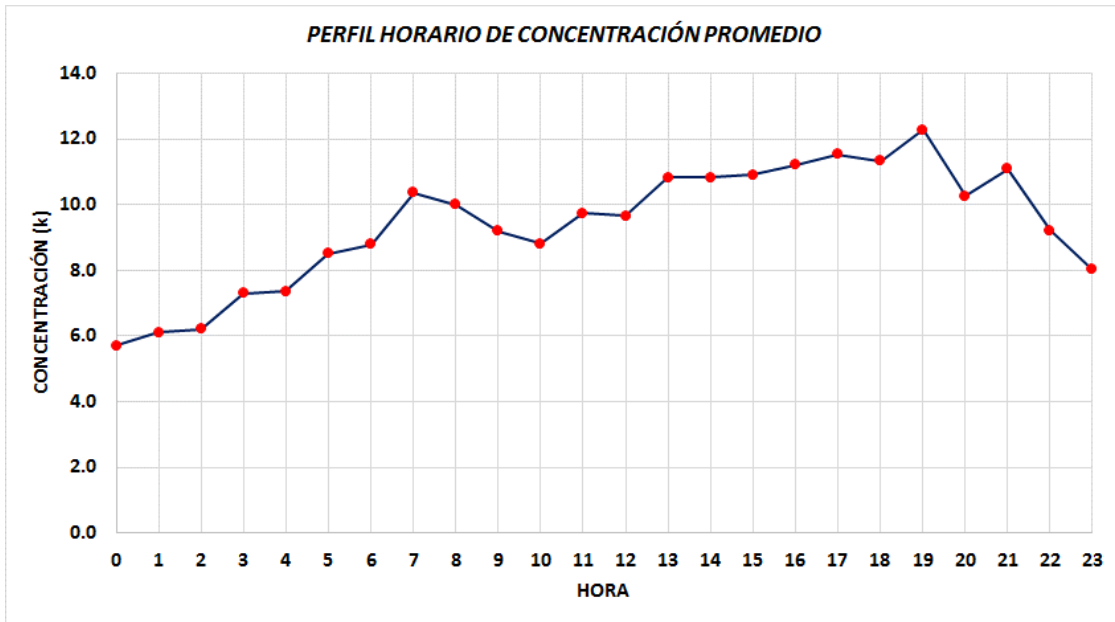
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 95 Perfil horario de velocidad promedio (v)**



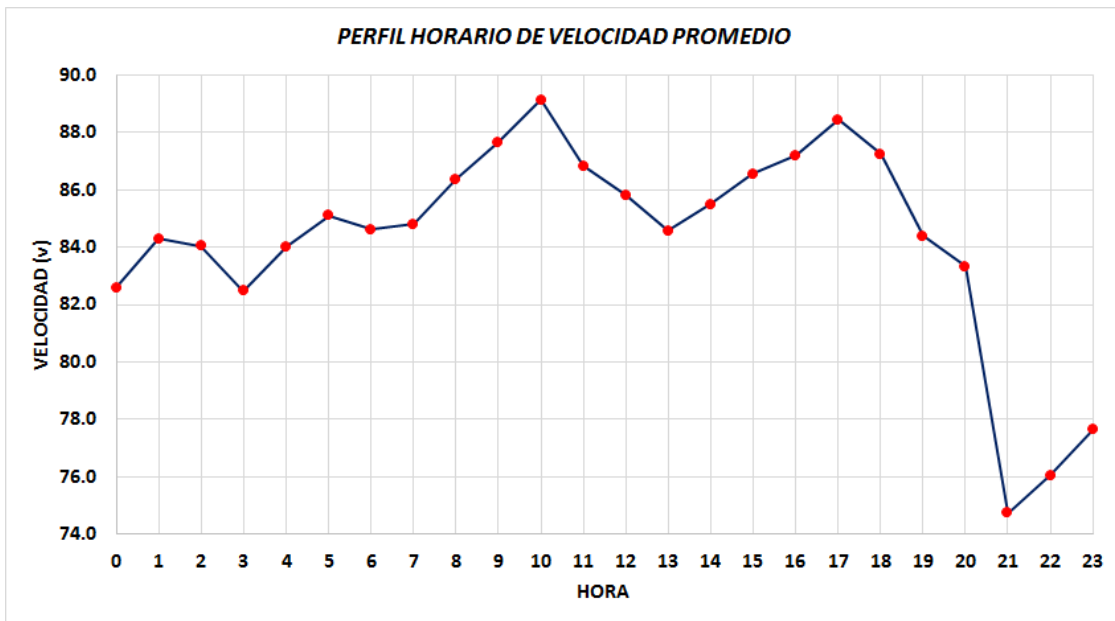
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 96 Perfil horario de concentración promedio (k)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 97 Perfil horario de velocidad promedio (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

---

## **Ανεχο 3**

---

En este anexo se muestran los diagramas fundamentales por día, sentido de circulación y estación de aforo, en el siguiente orden:

- Concentración ( $k$ ) – flujo ( $q$ )
- Flujo ( $q$ ) – velocidad ( $v$ )
- Concentración ( $k$ ) – velocidad ( $v$ )

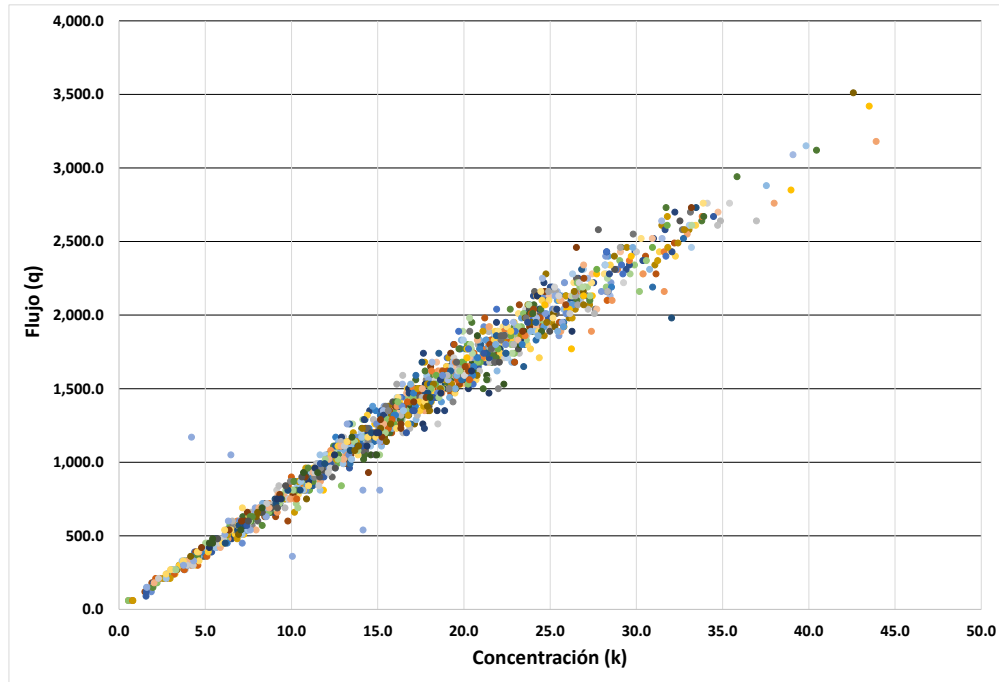
Están presentados a un nivel de detalle de un minuto a lo largo del día, con el fin de tener una “nube” de datos lo suficientemente detallada para la identificación del fenómeno de histéresis. Estos corresponden a los días de aforo con registro de 24 horas. El proceso para obtenerlos se explica en el Capítulo 2.

# Estación 1

## Sentido México-Puebla

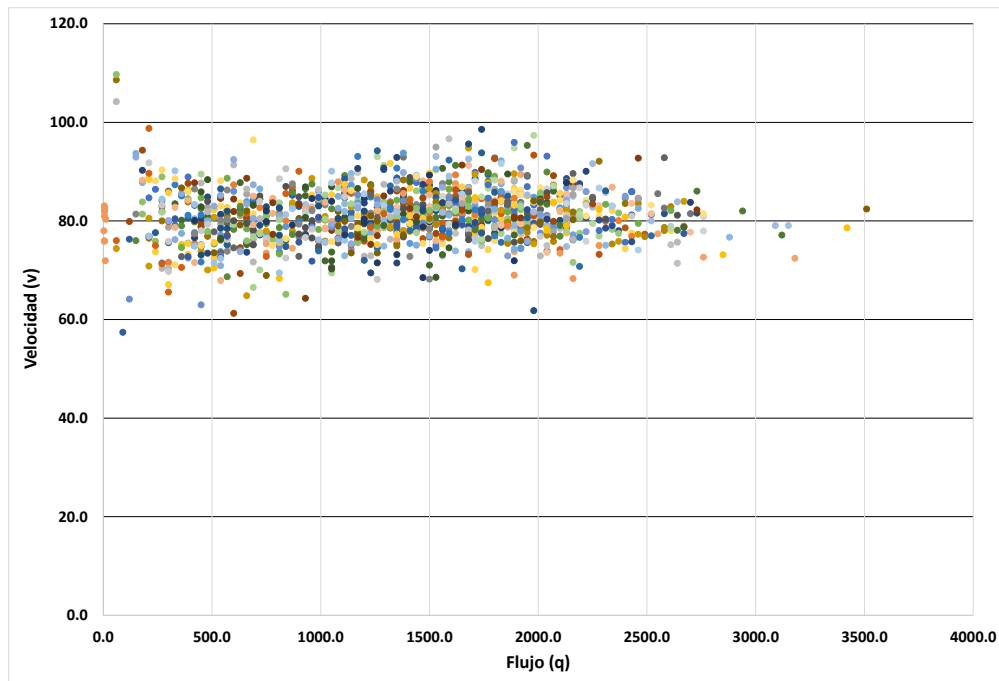
Fecha 24-09-2012

Figura 98 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)



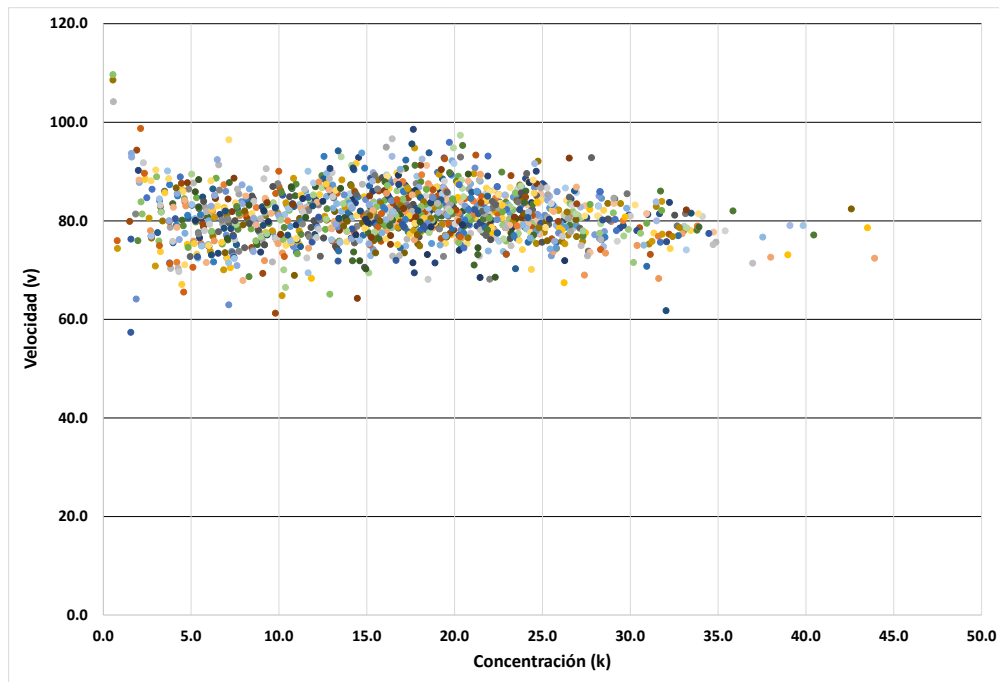
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 99 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 100 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**

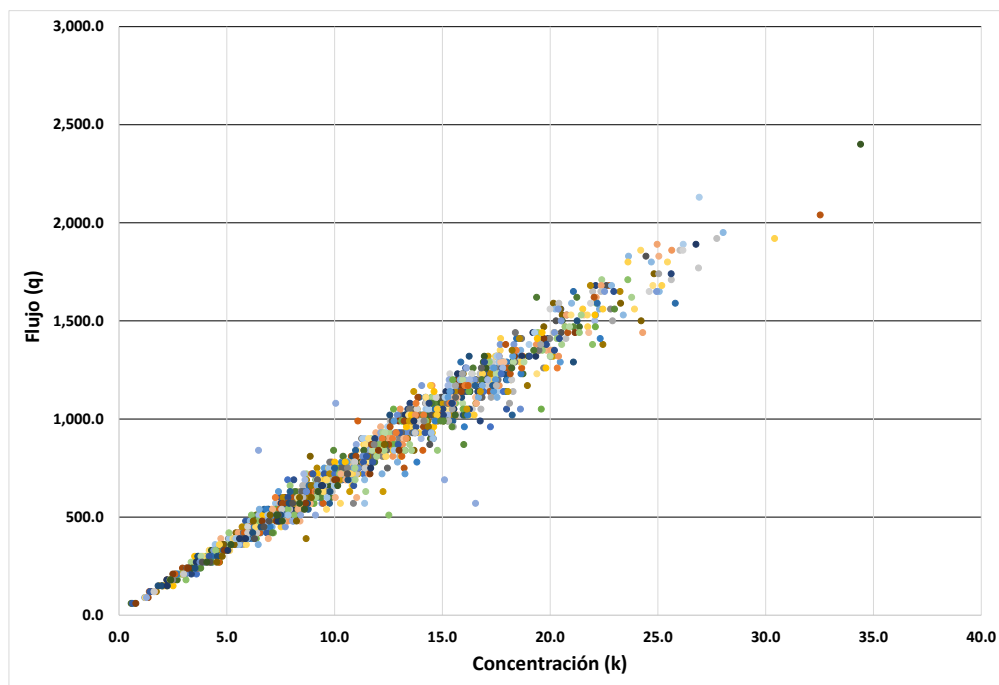


Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

## Sentido Puebla-México

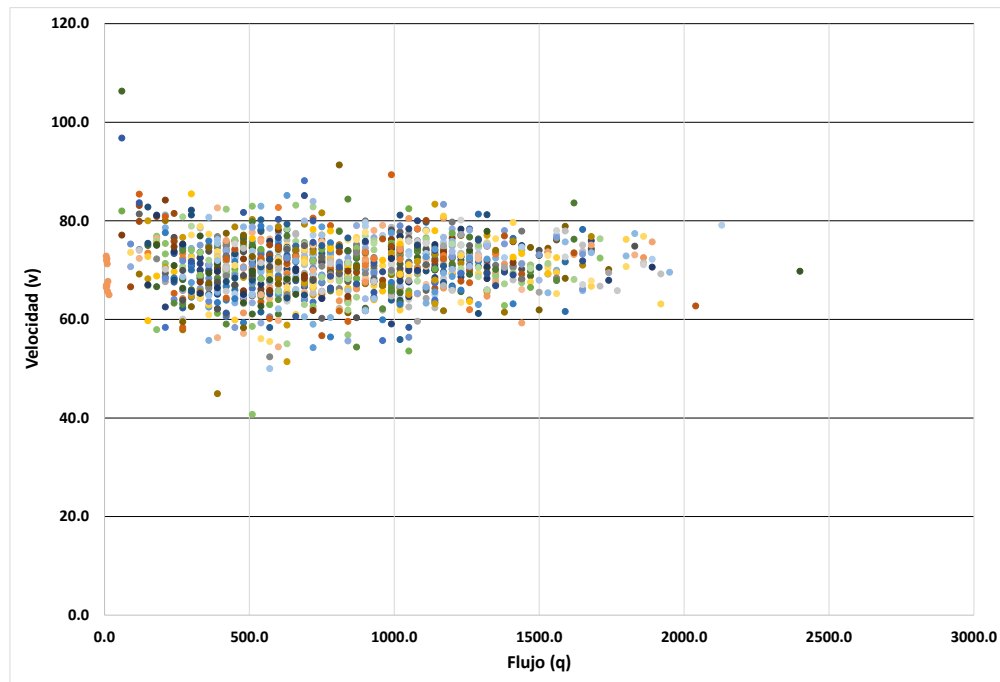
Fecha 24-09-2012

**Figura 101 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



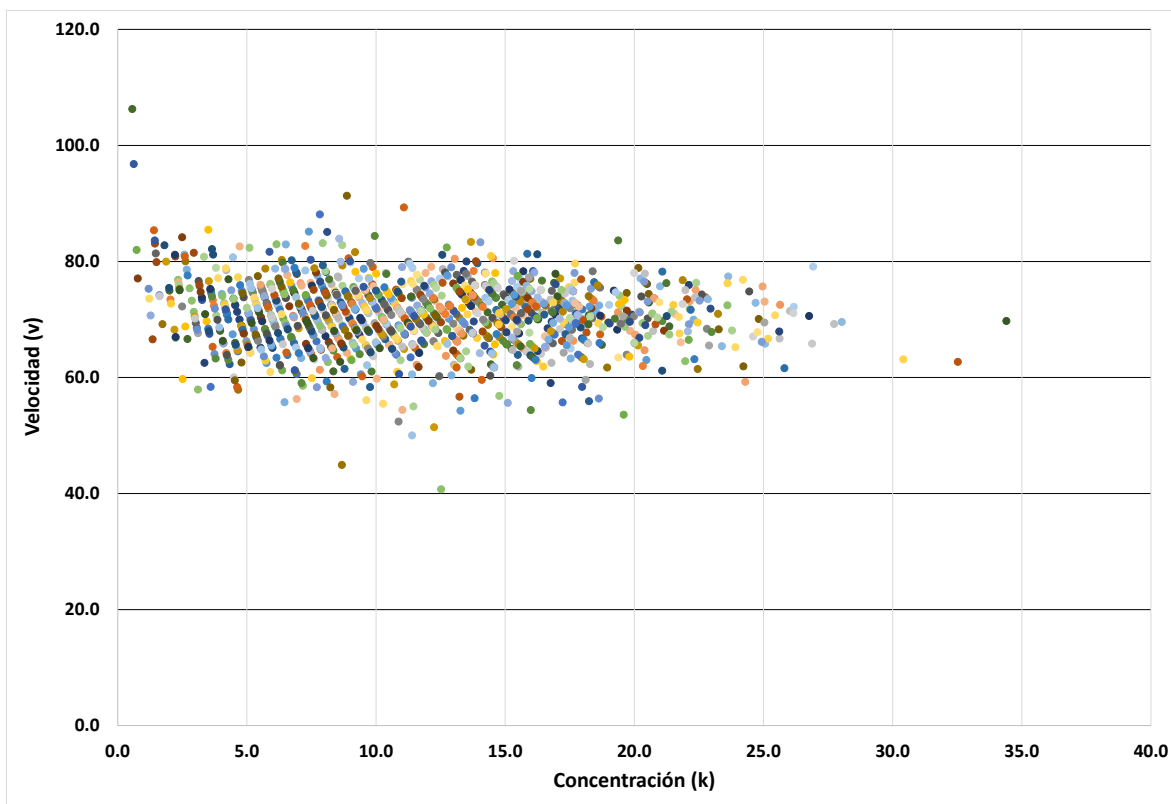
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 102 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 103 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



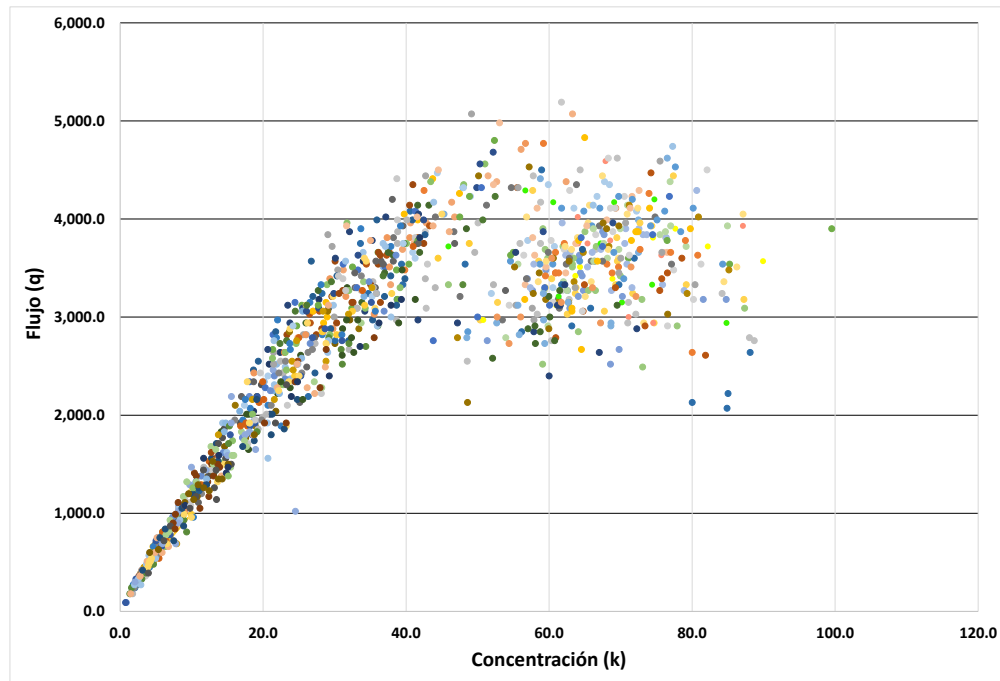
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

## Estación 2

### Sentido México-Puebla

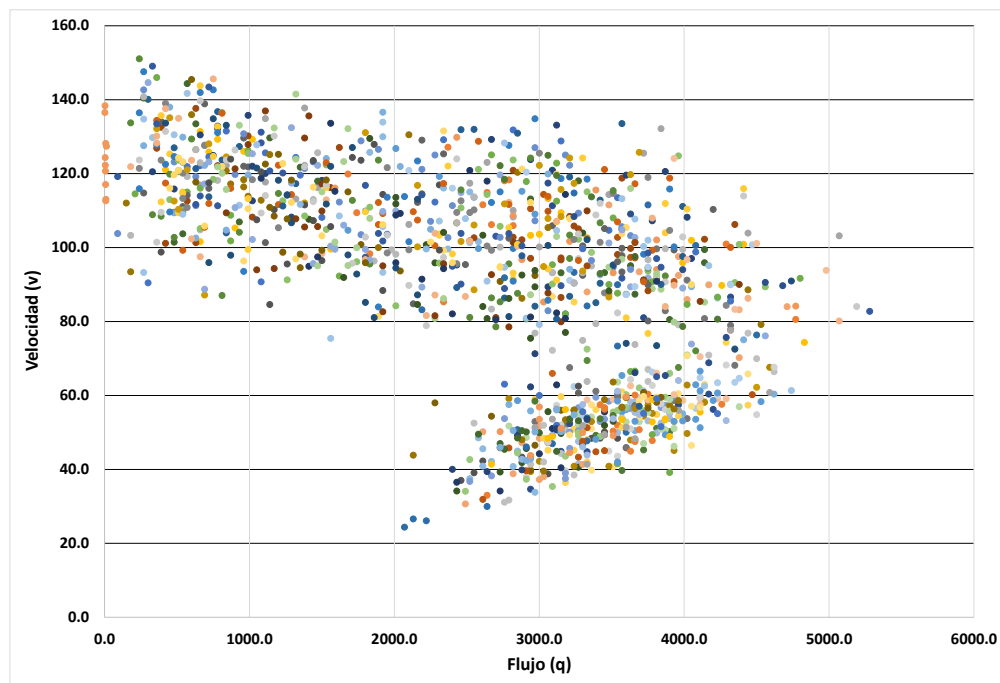
Fecha 26-09-2012

Figura 104 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)



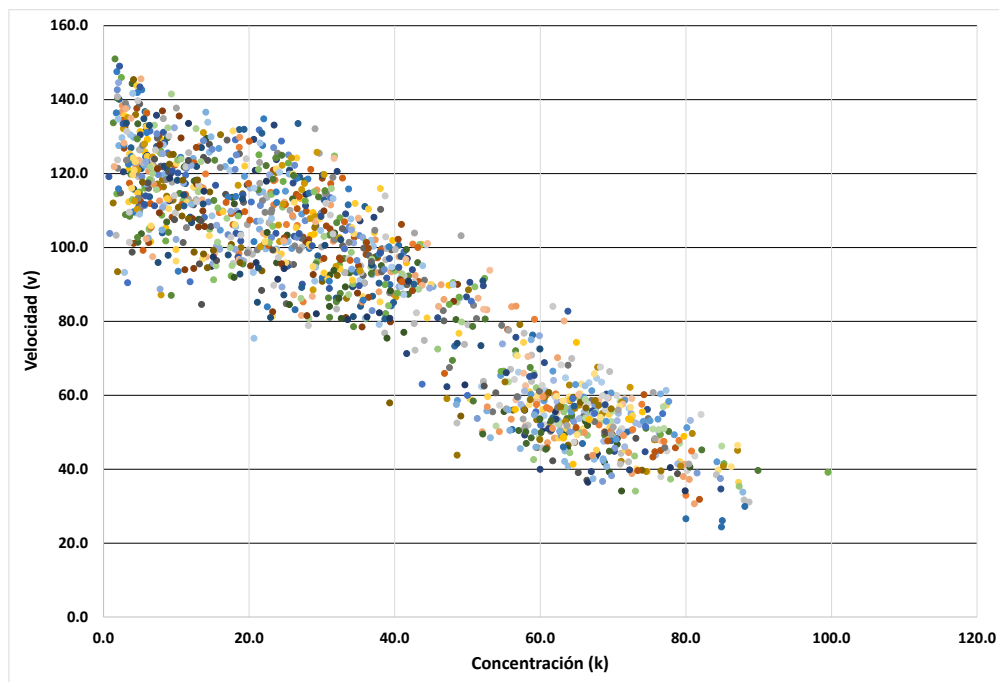
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 105 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 106 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**

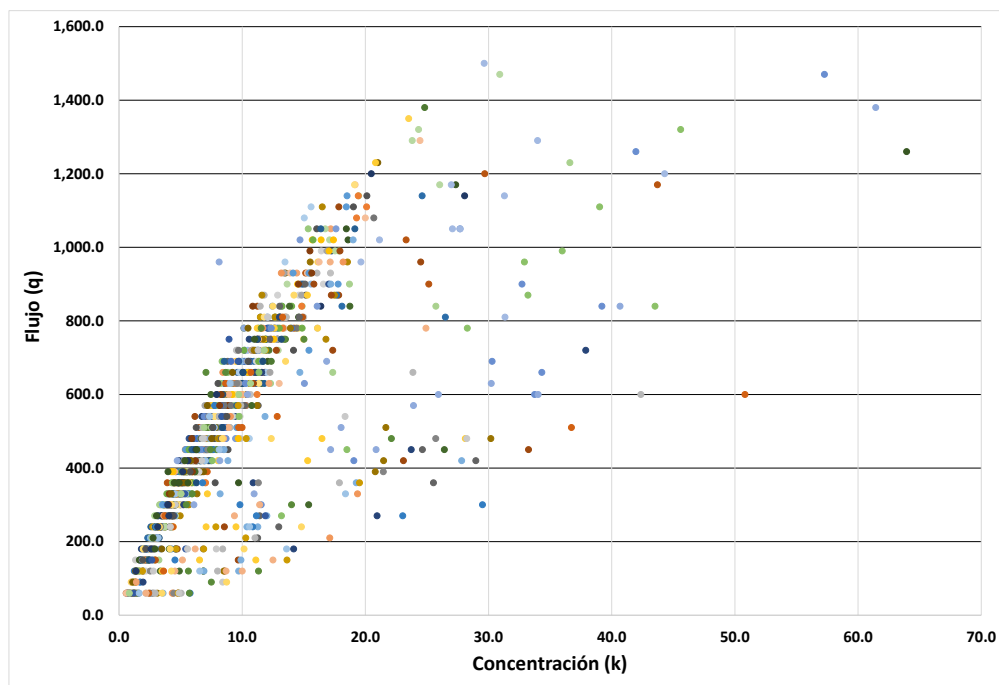


Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

## Sentido Puebla-México

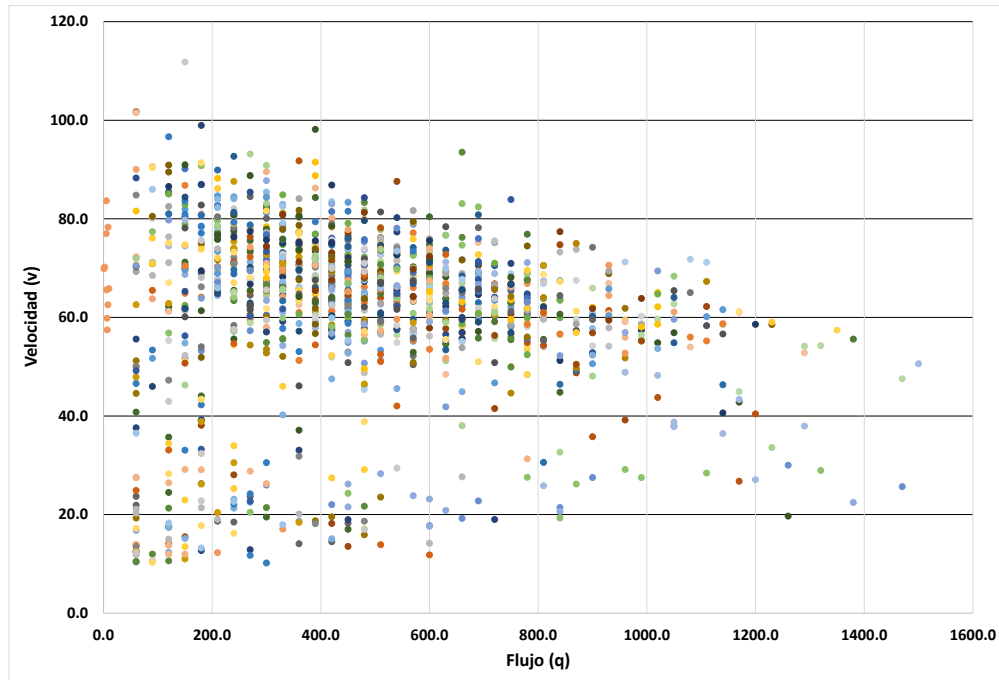
Fecha 21-09-2012

**Figura 107 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



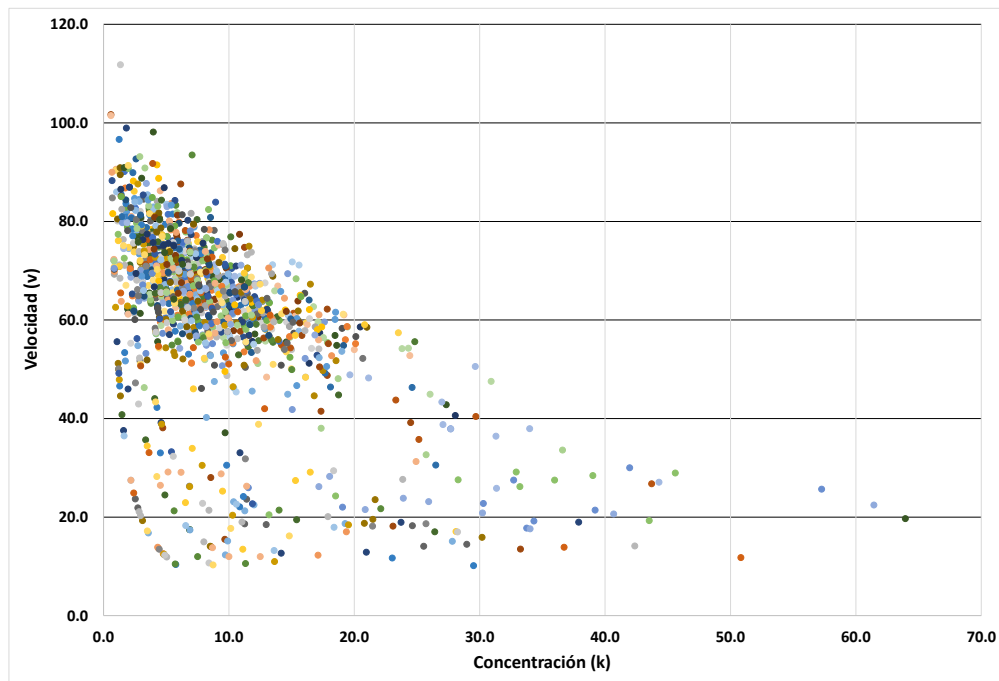
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 108 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



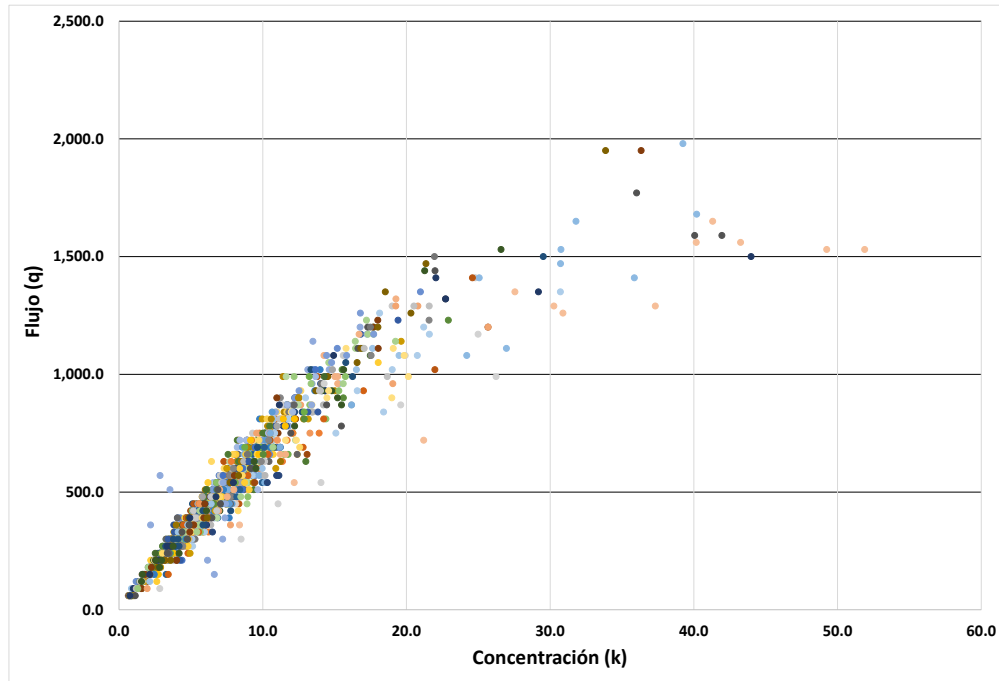
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 109 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



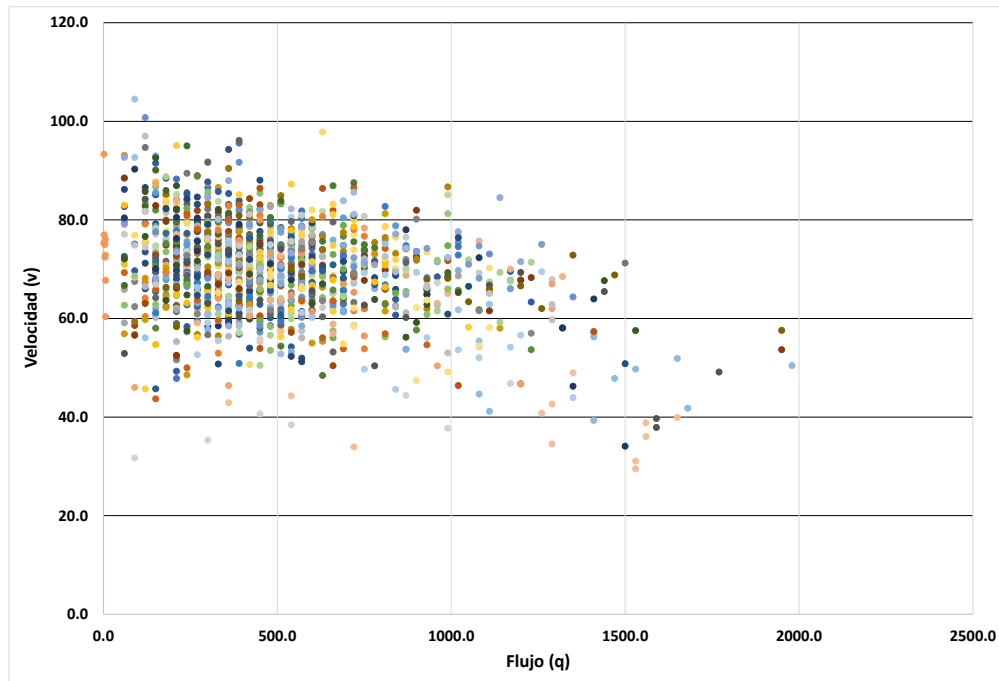
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 110 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



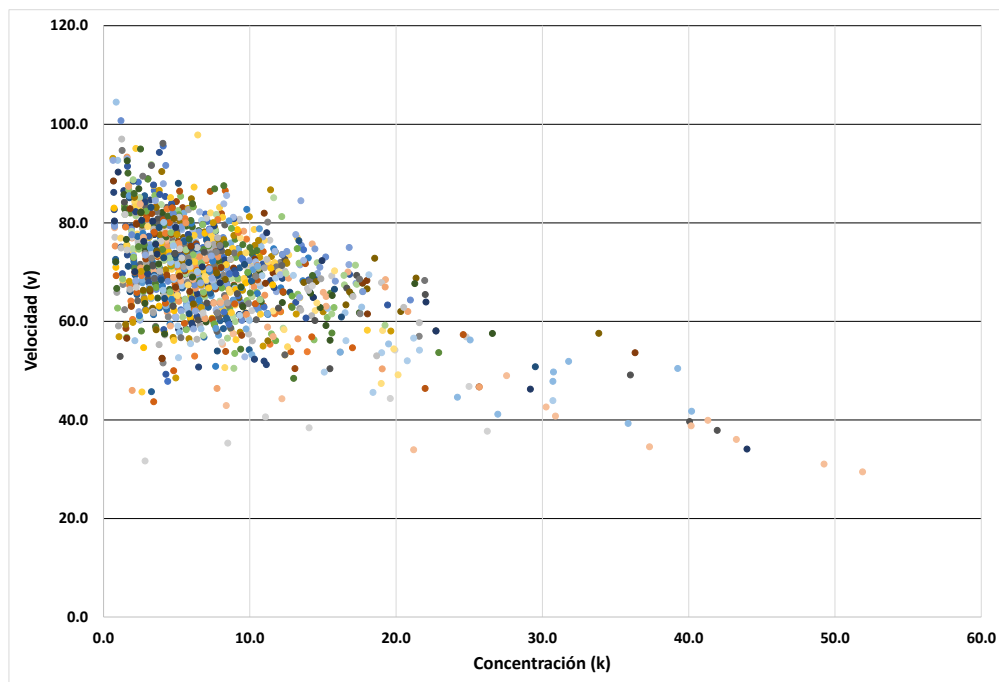
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 111 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

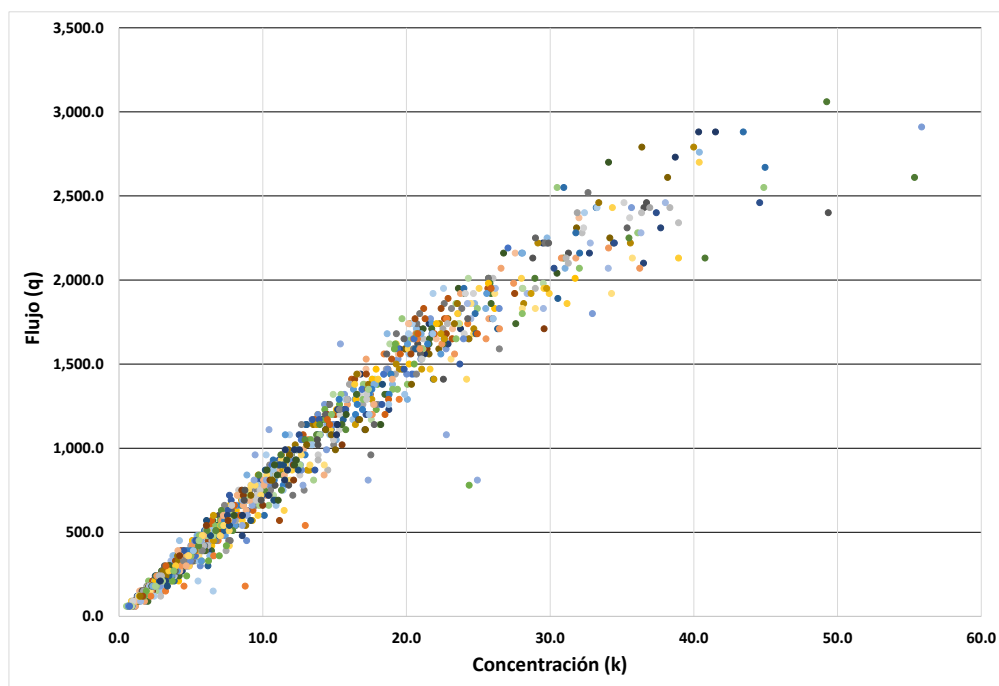
**Figura 112 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

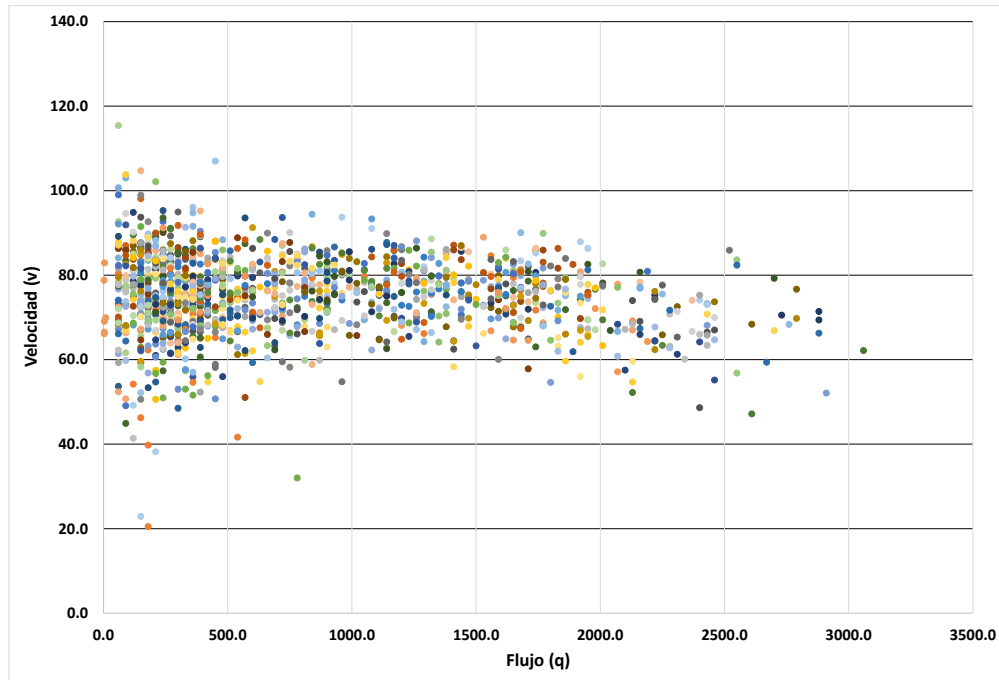
Fecha 23-09-2012

**Figura 113 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



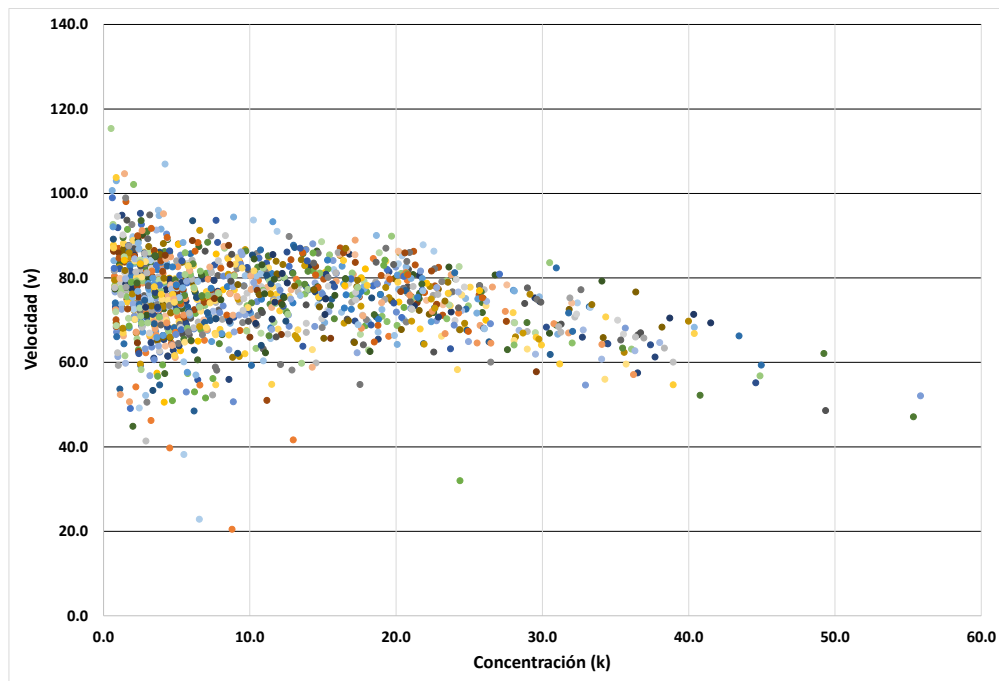
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 114 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



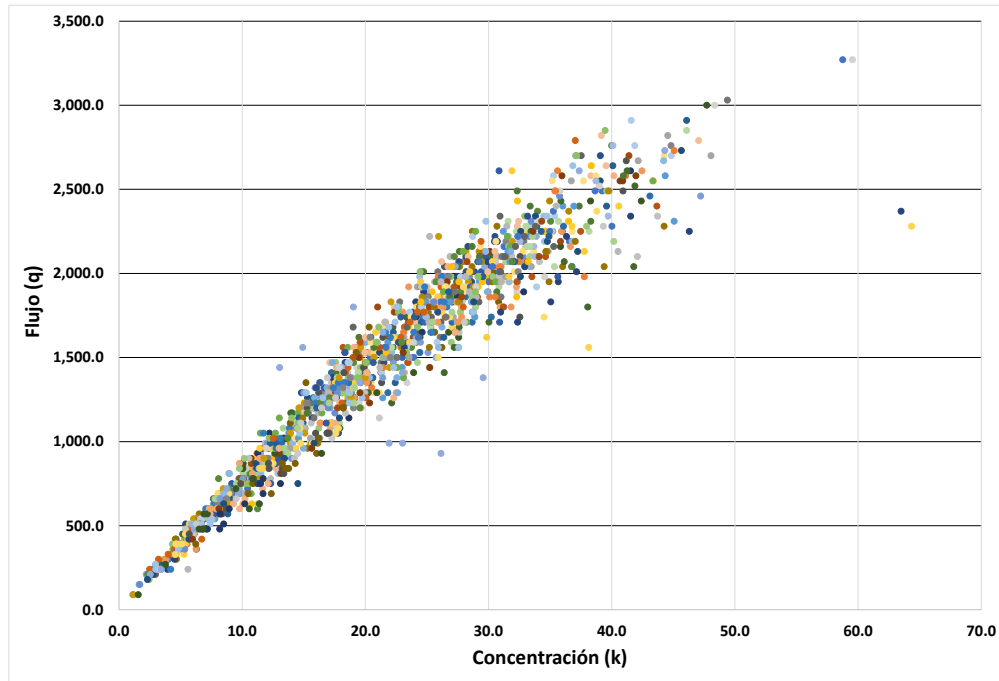
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 115 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



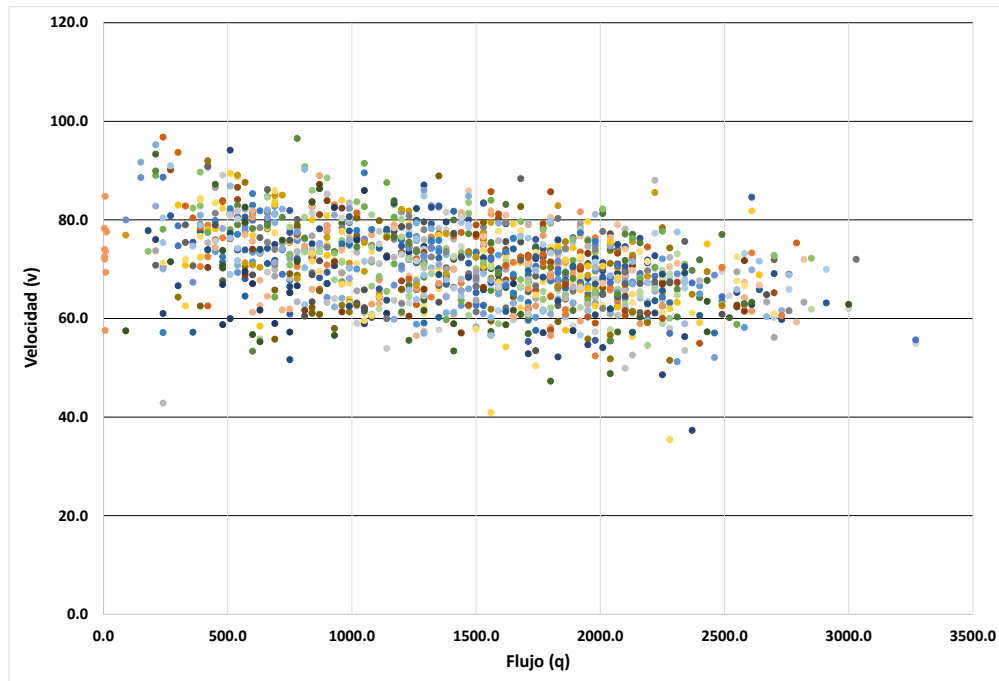
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 116 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



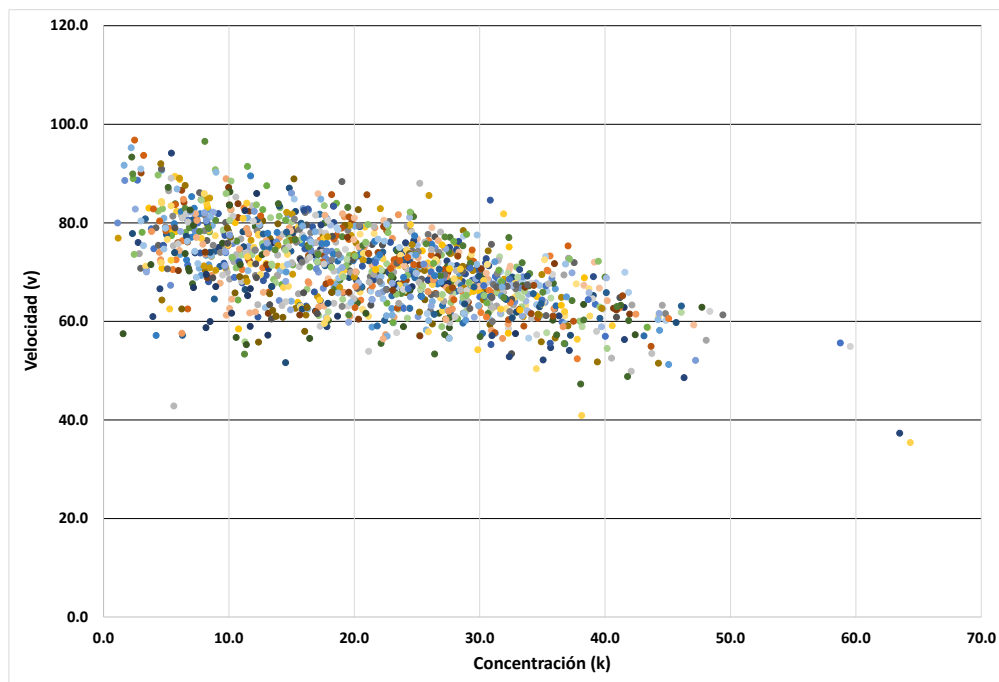
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 117 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 118 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



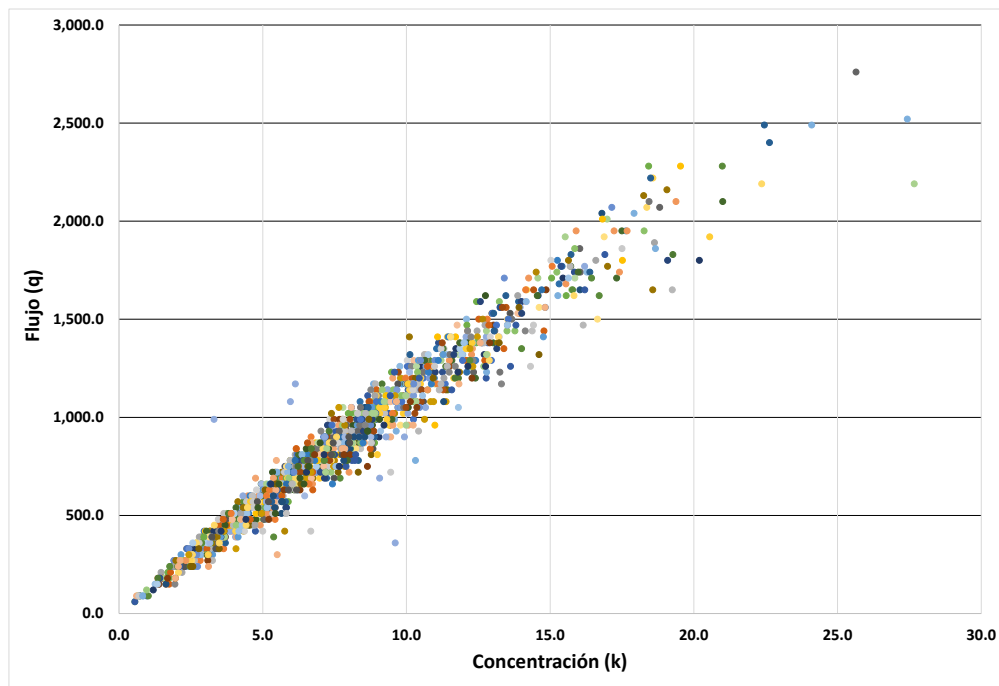
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

### Estación 3

#### Sentido México-Puebla

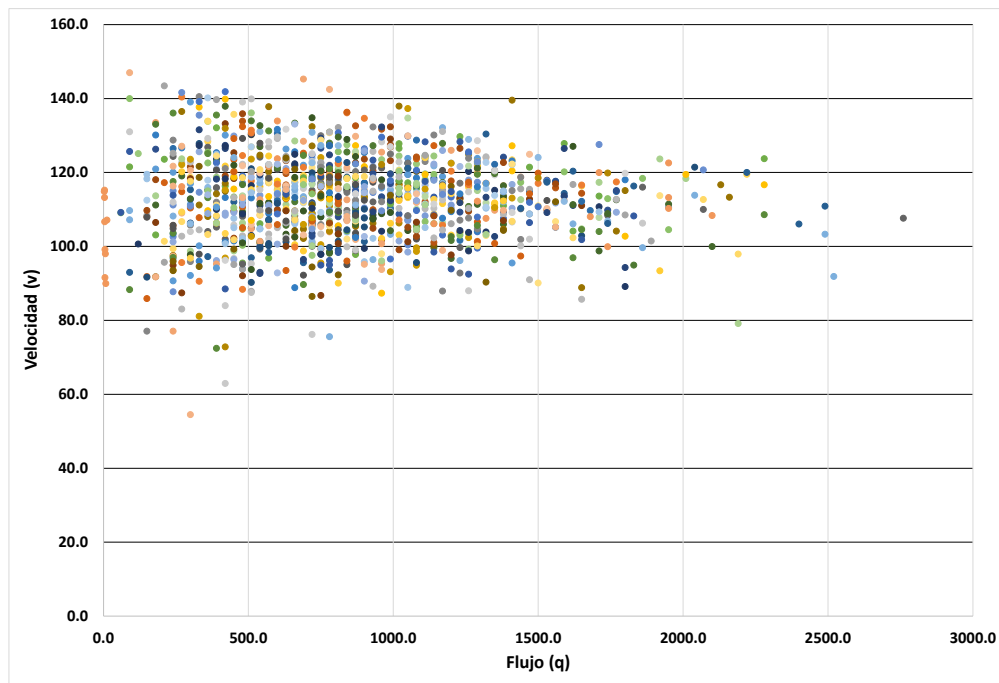
Fecha 20-09-2012

Figura 119 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)



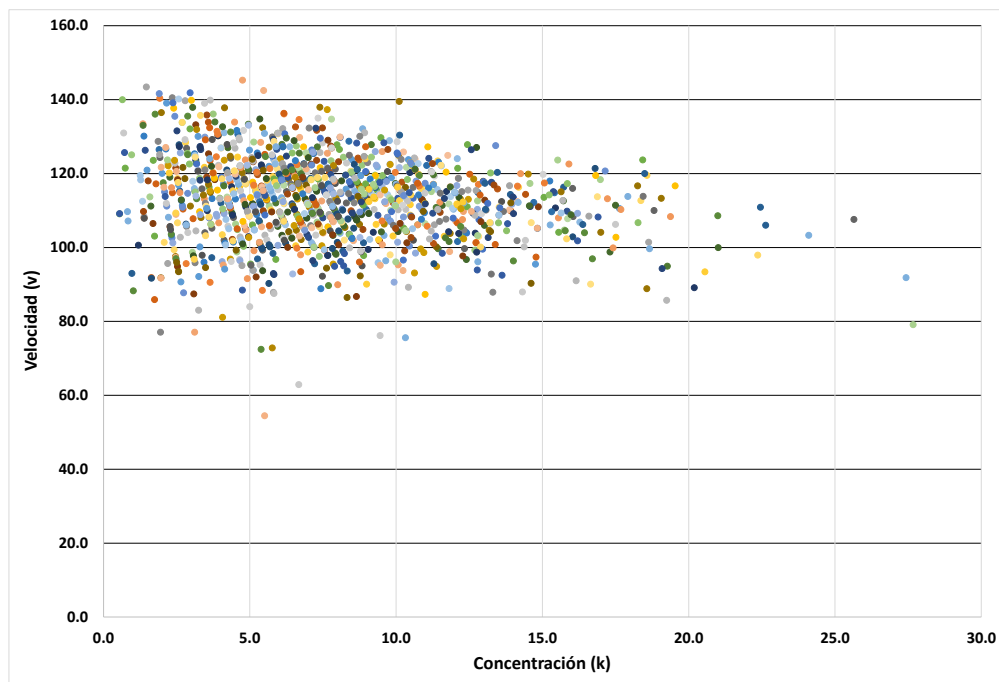
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 120 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

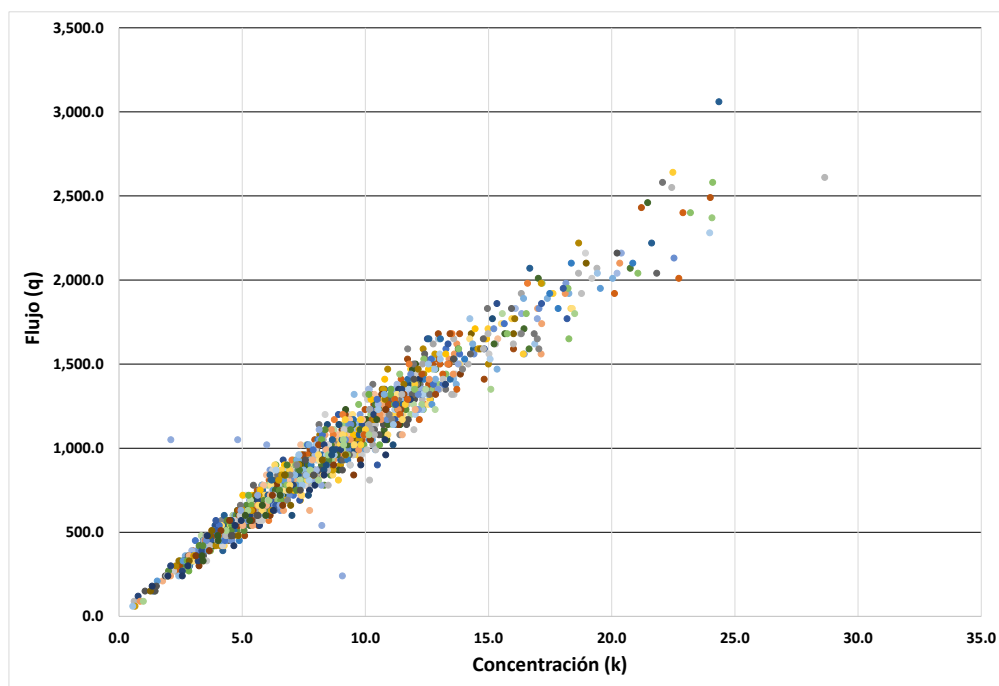
**Figura 121 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

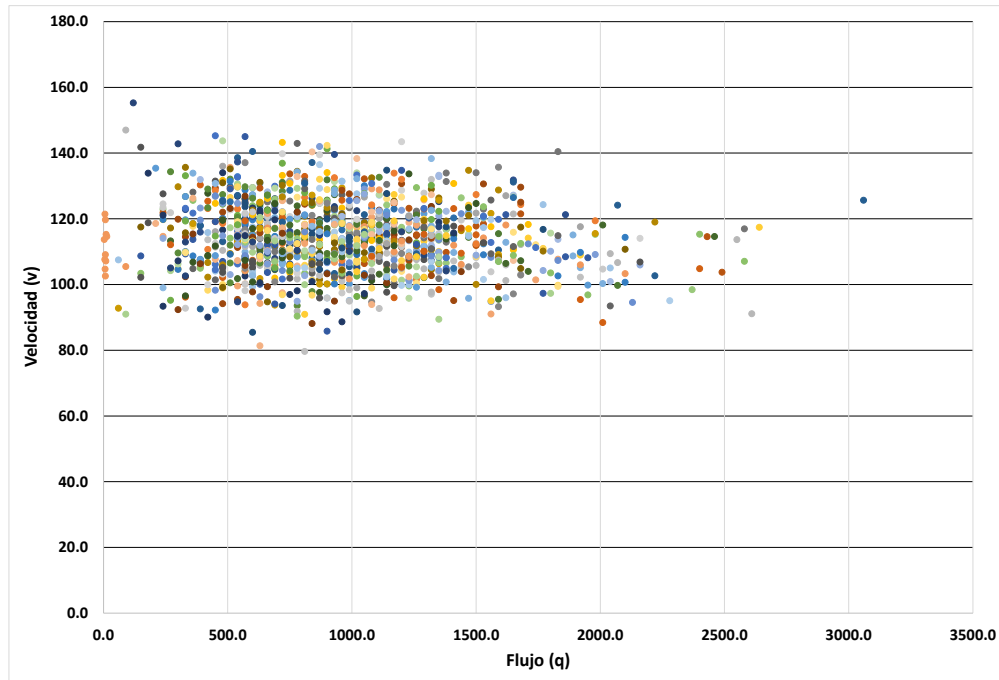
Fecha 21-09-2012

**Figura 122 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



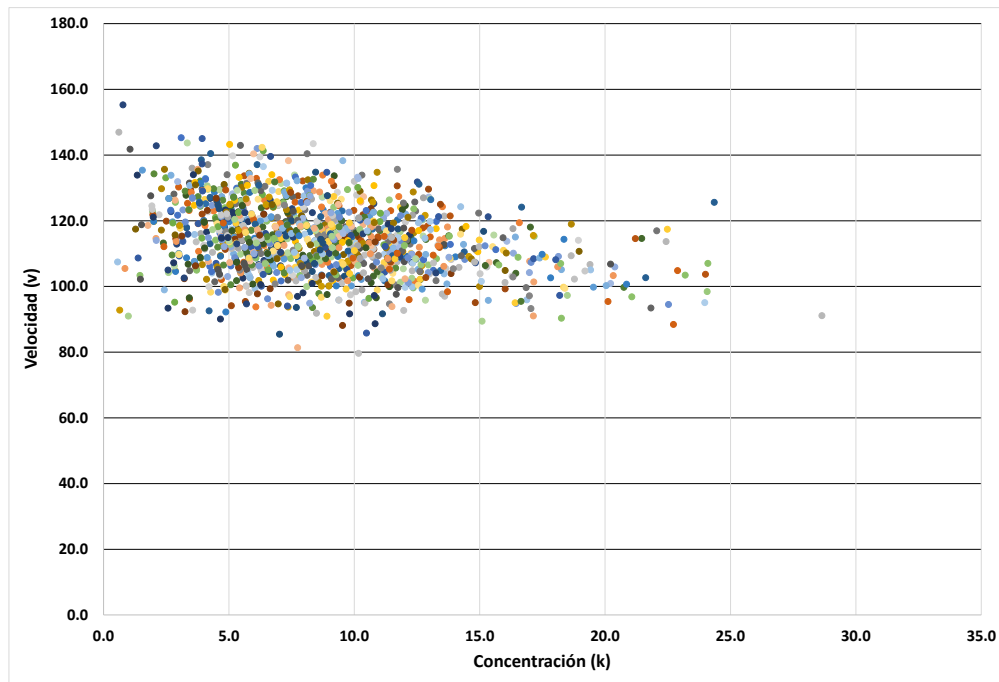
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 123 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



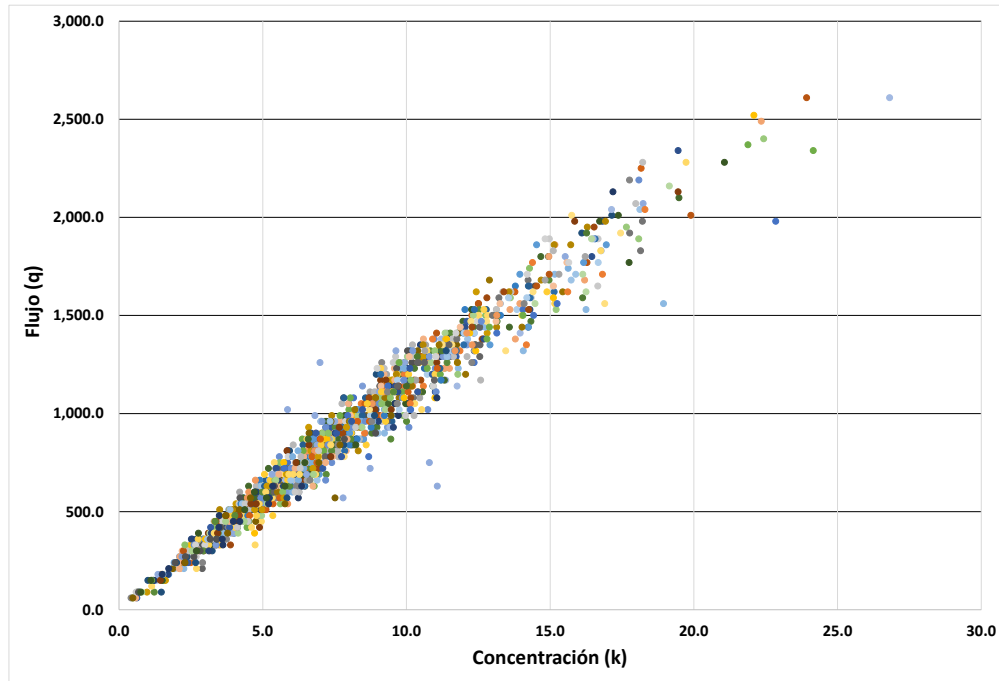
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 124 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



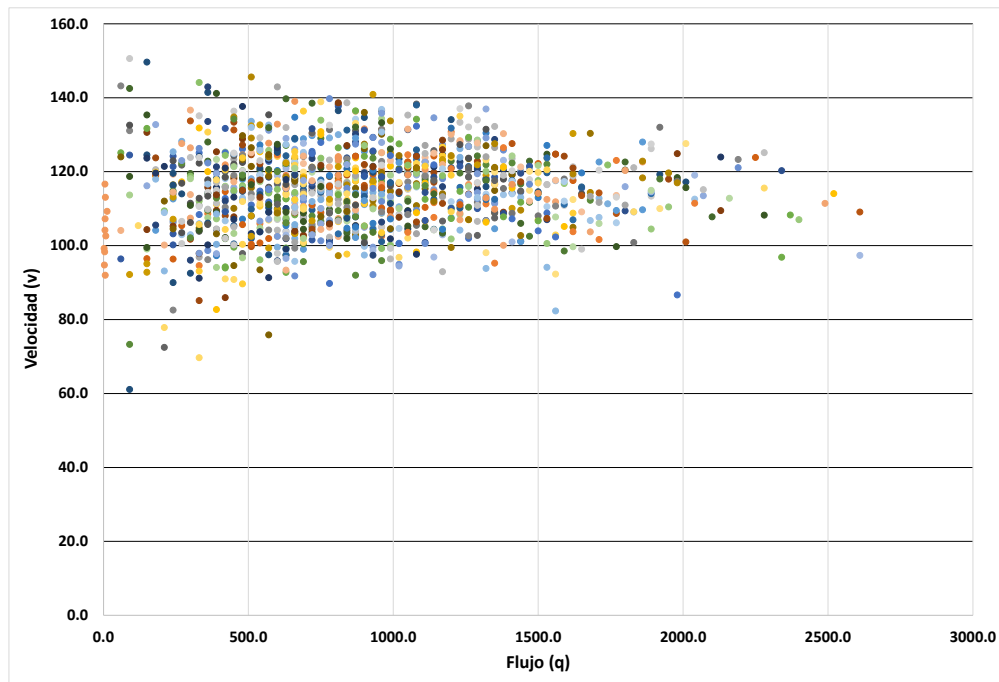
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 125 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)



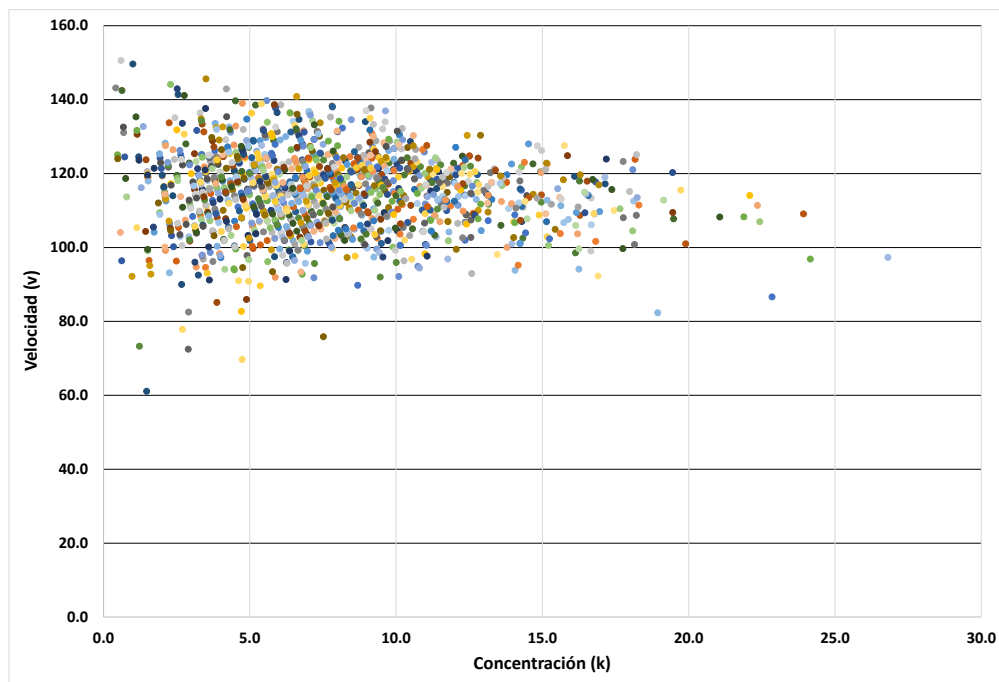
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

Figura 126 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

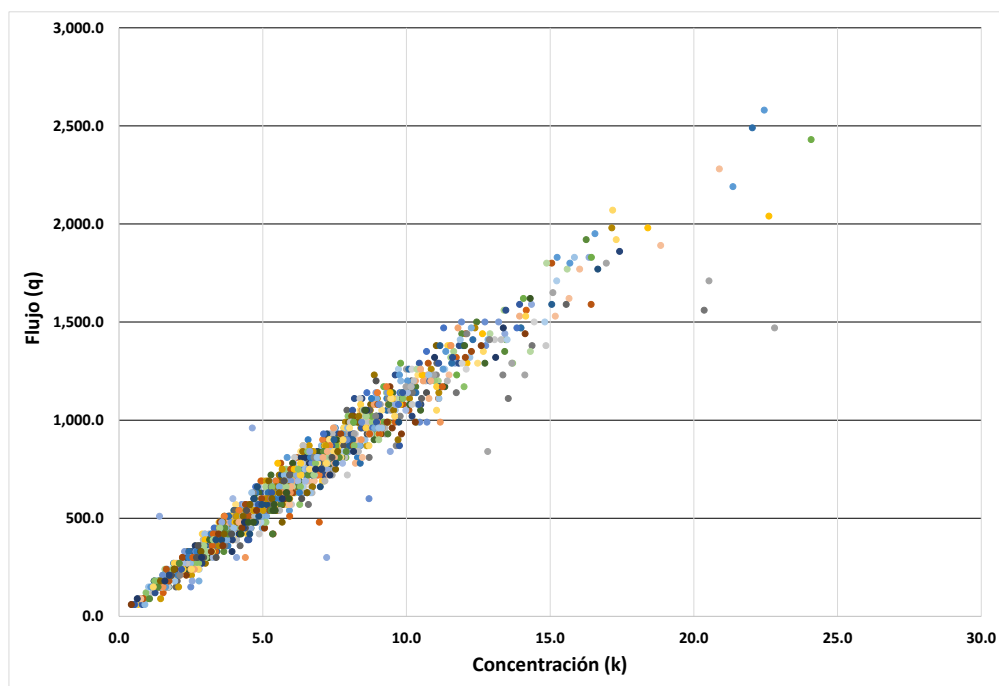
**Figura 127 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

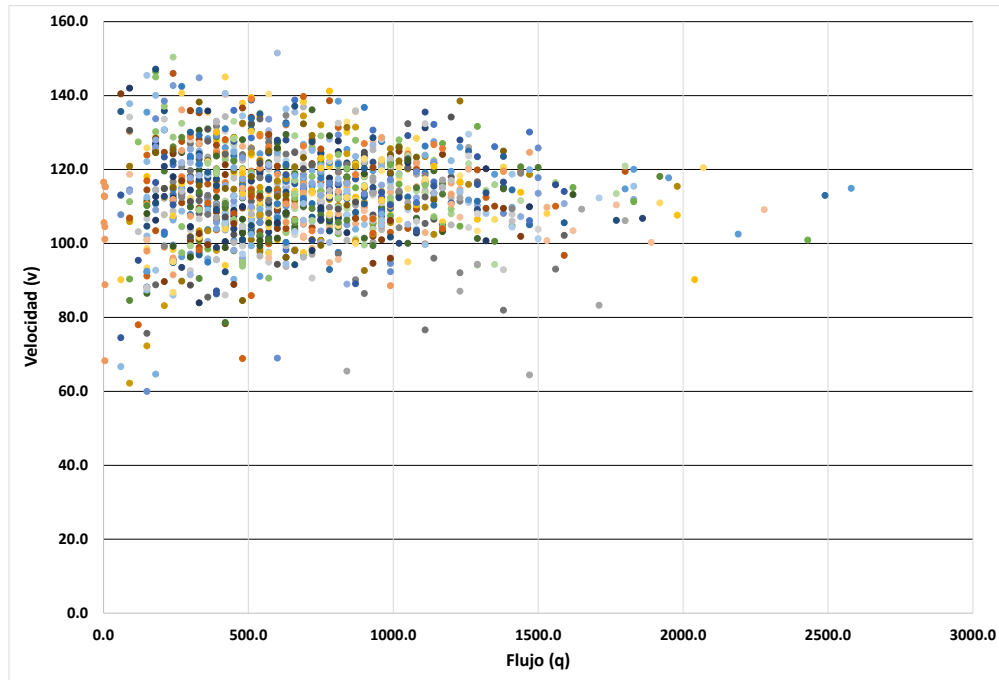
Fecha 23-09-2012

**Figura 128 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



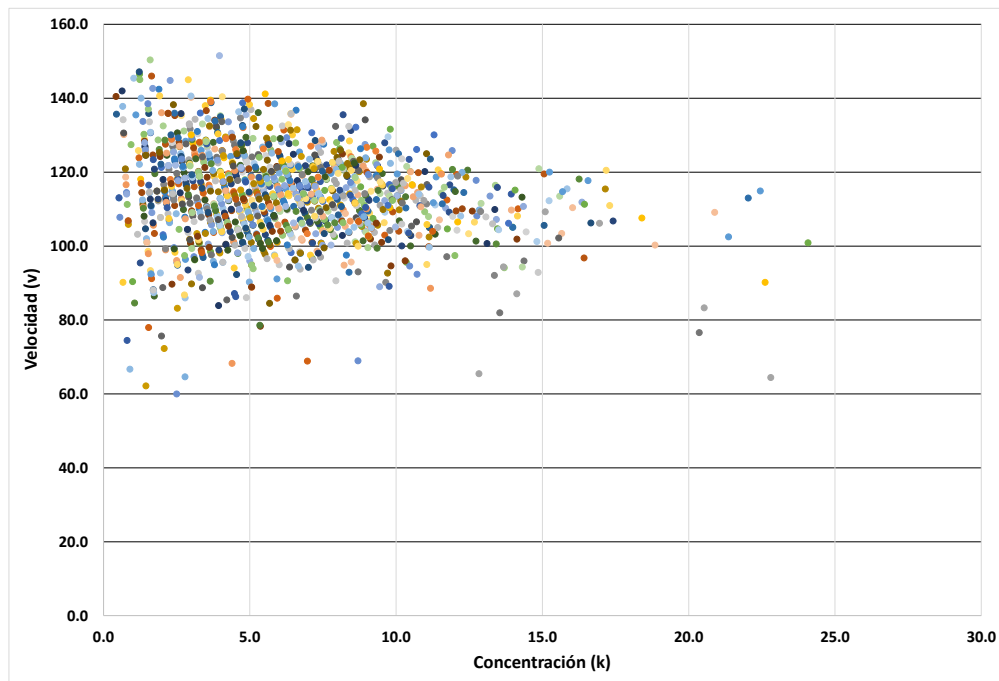
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 129 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



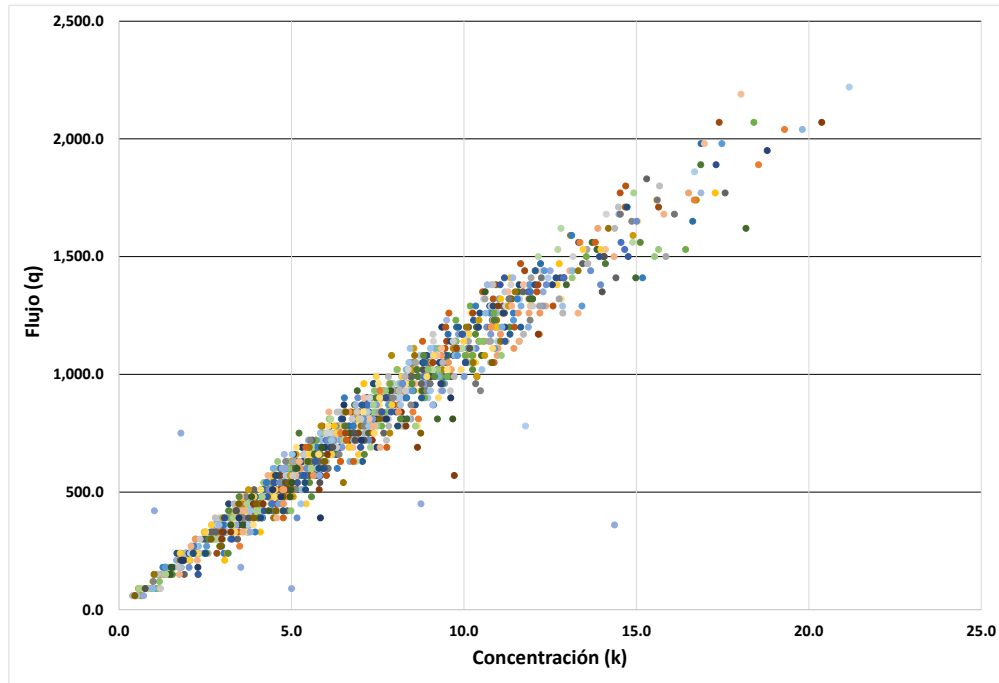
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 130 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



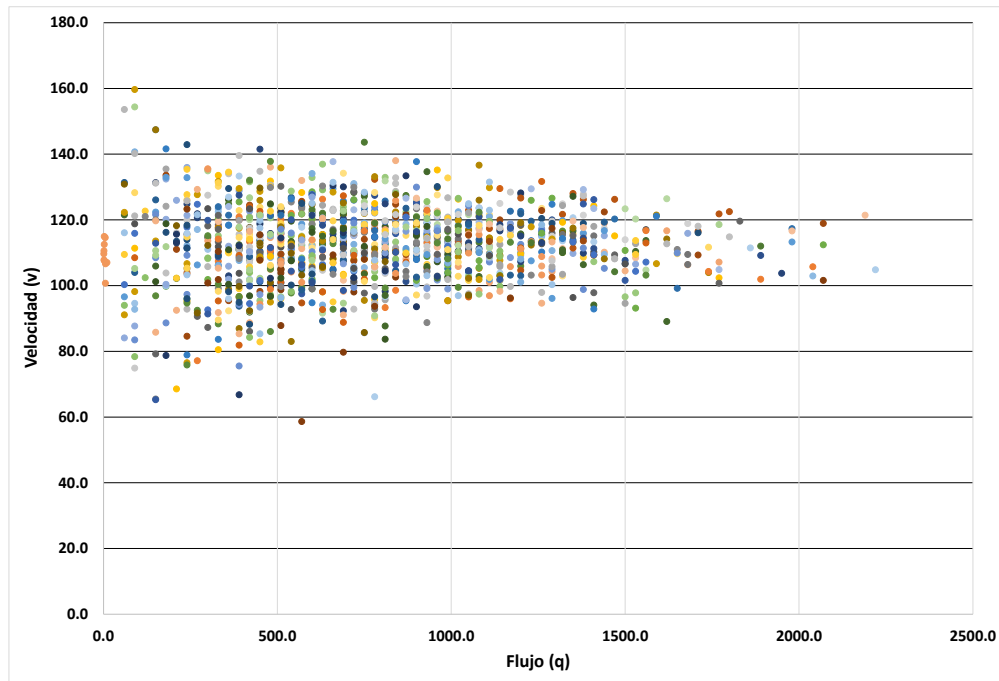
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 131 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



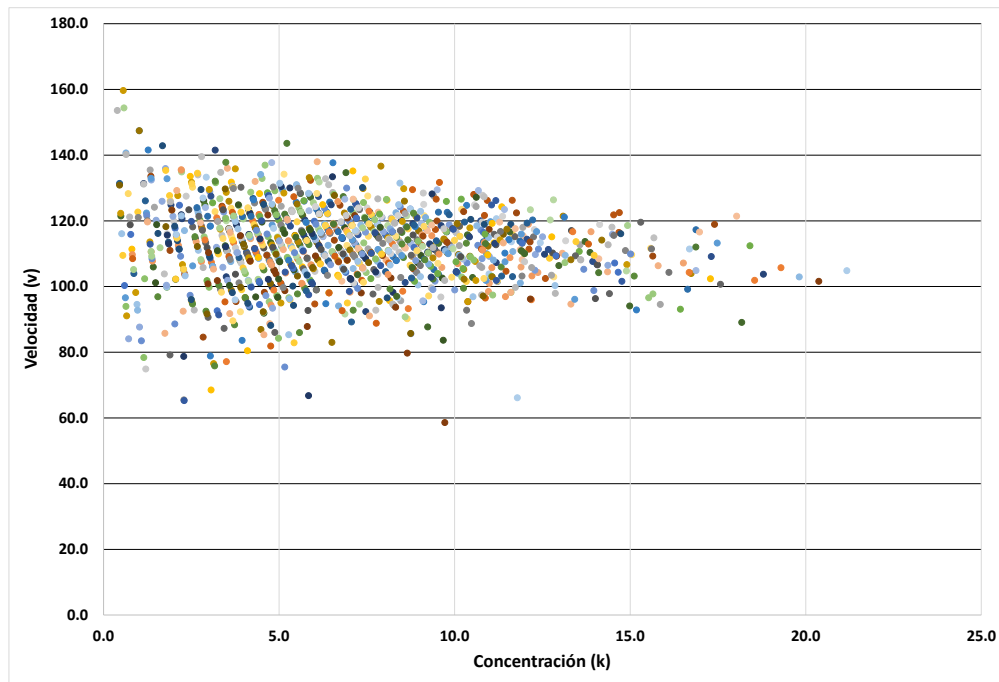
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 132 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

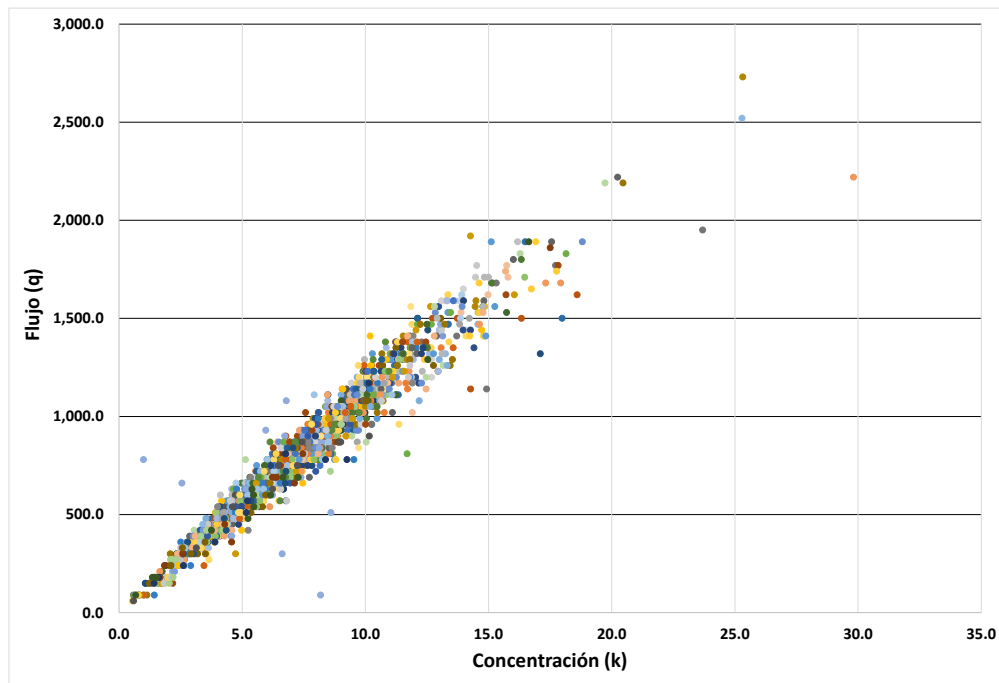
**Figura 133 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

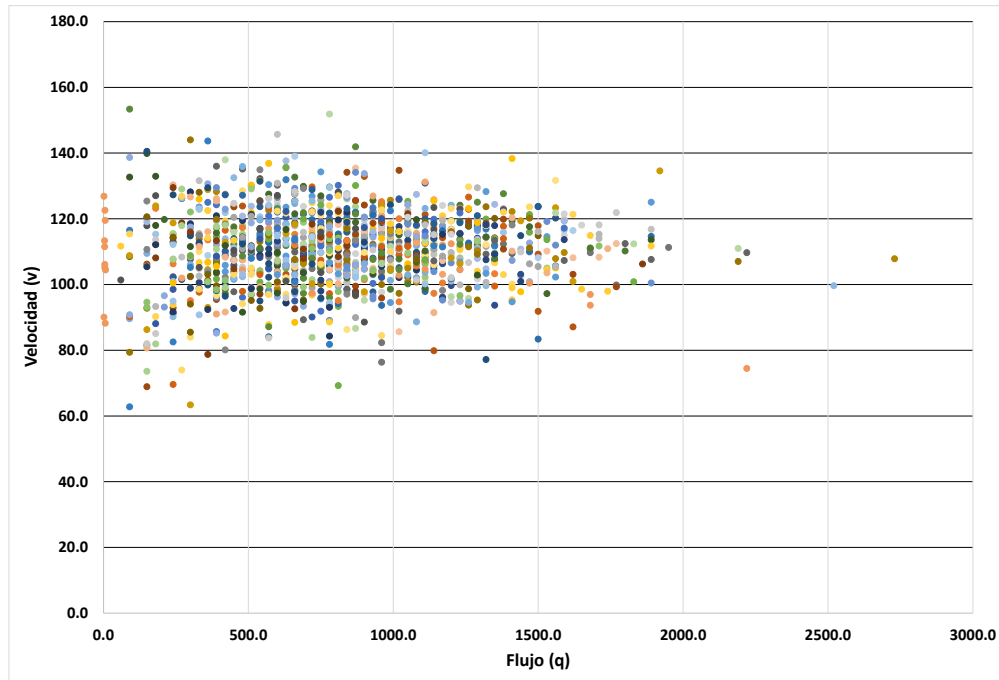
Fecha 25-09-2012

**Figura 134 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



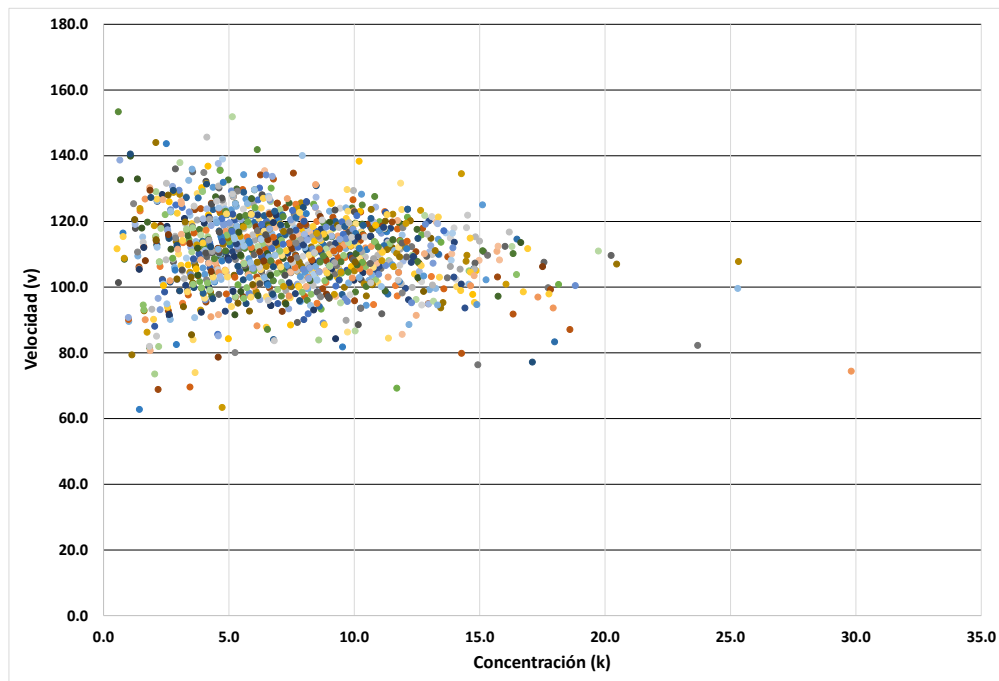
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 135 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



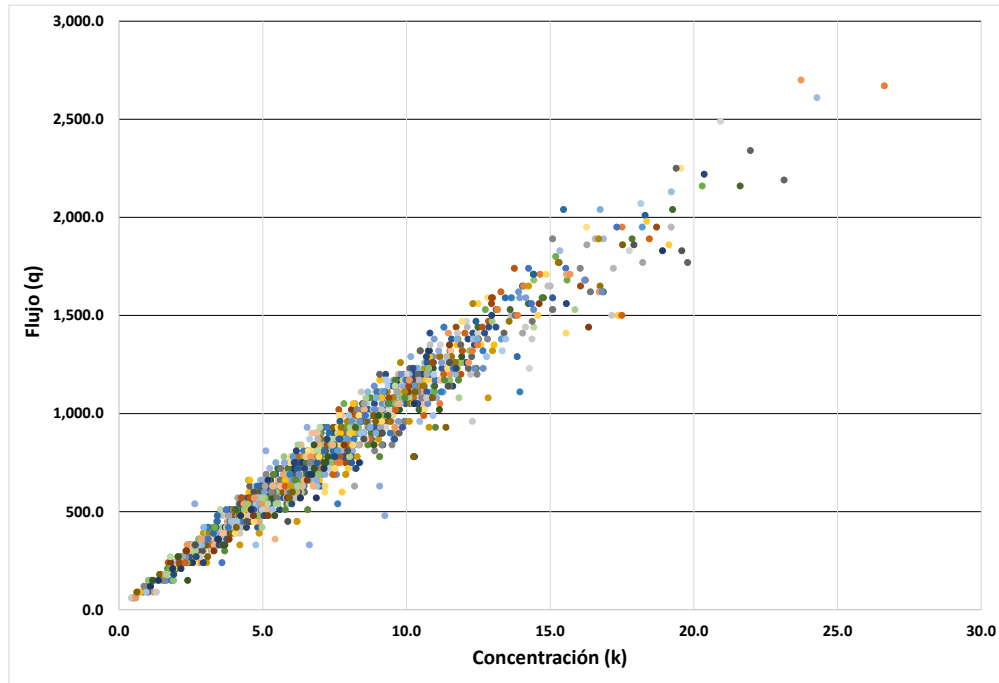
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 136 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



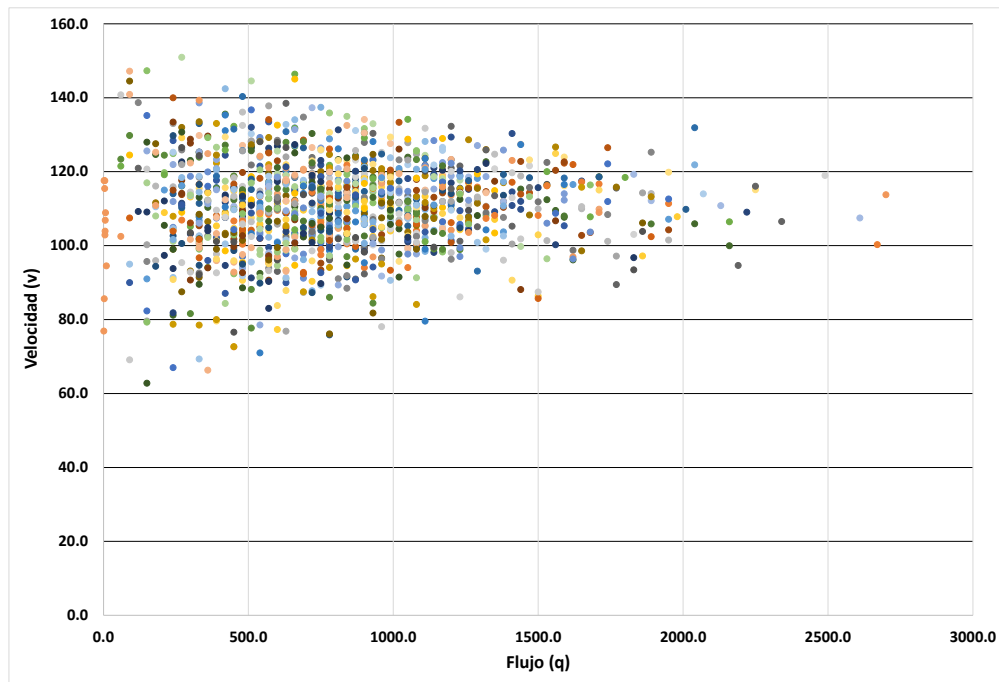
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 137 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



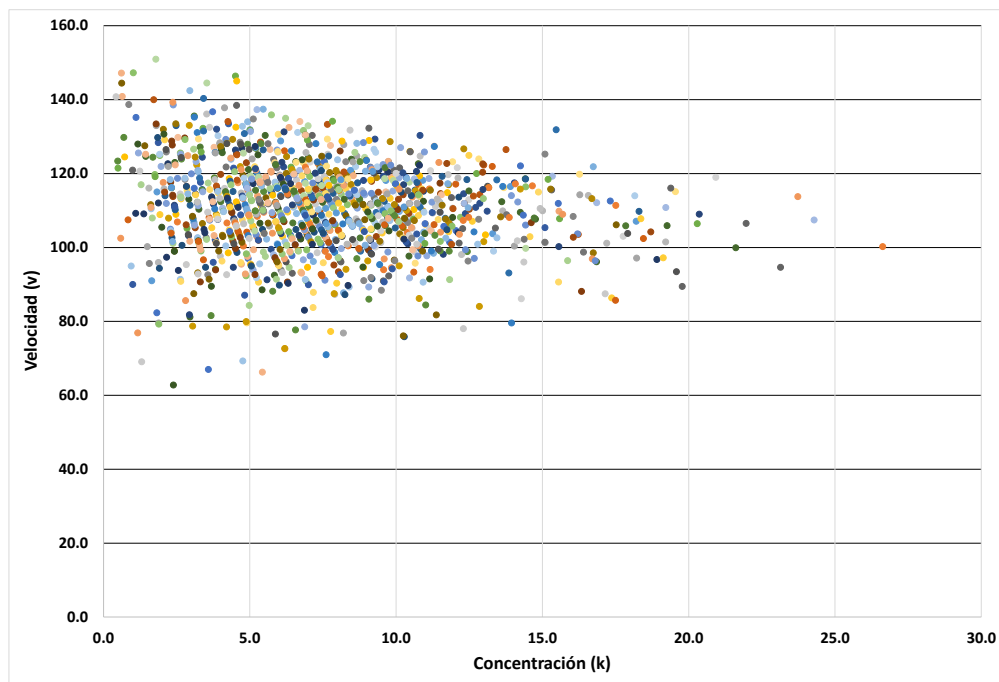
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 138 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 139 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**

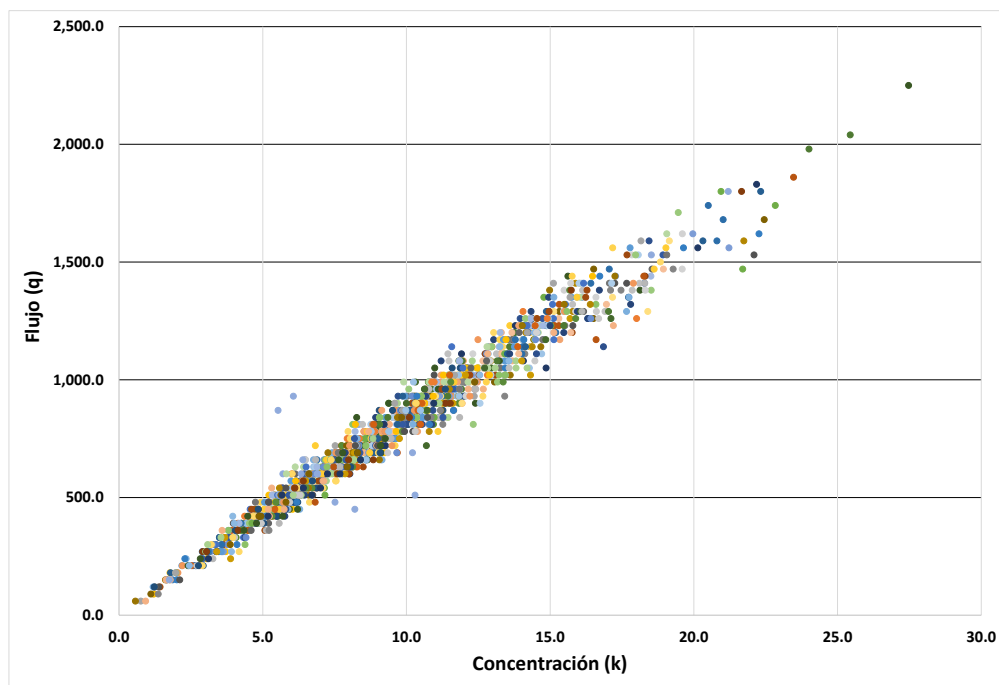


Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

## Sentido Puebla-México

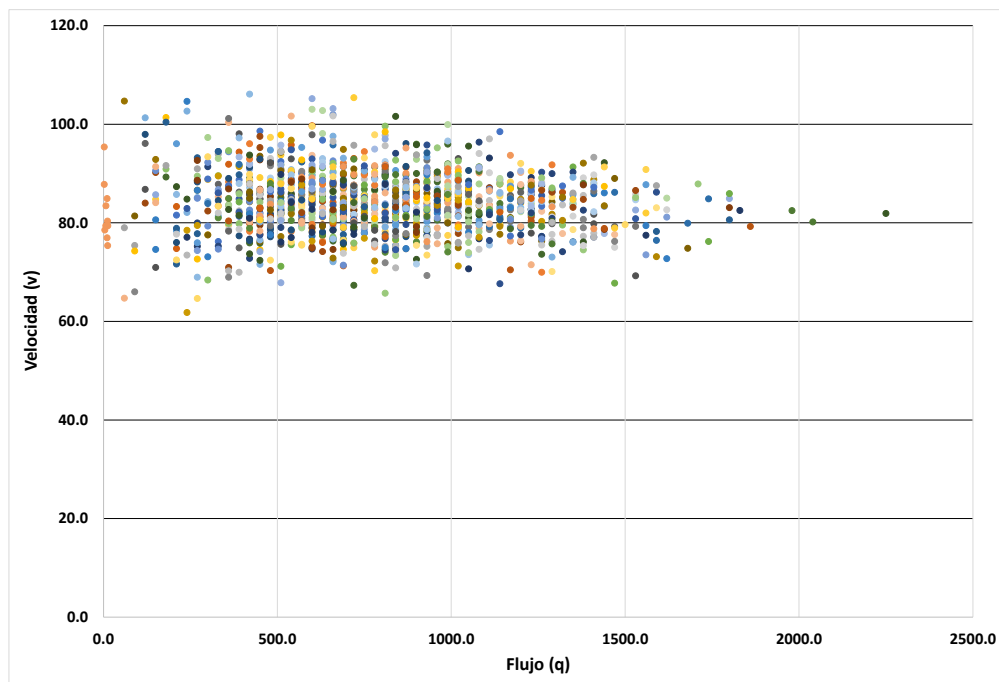
Fecha 20-09-2012

**Figura 140 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



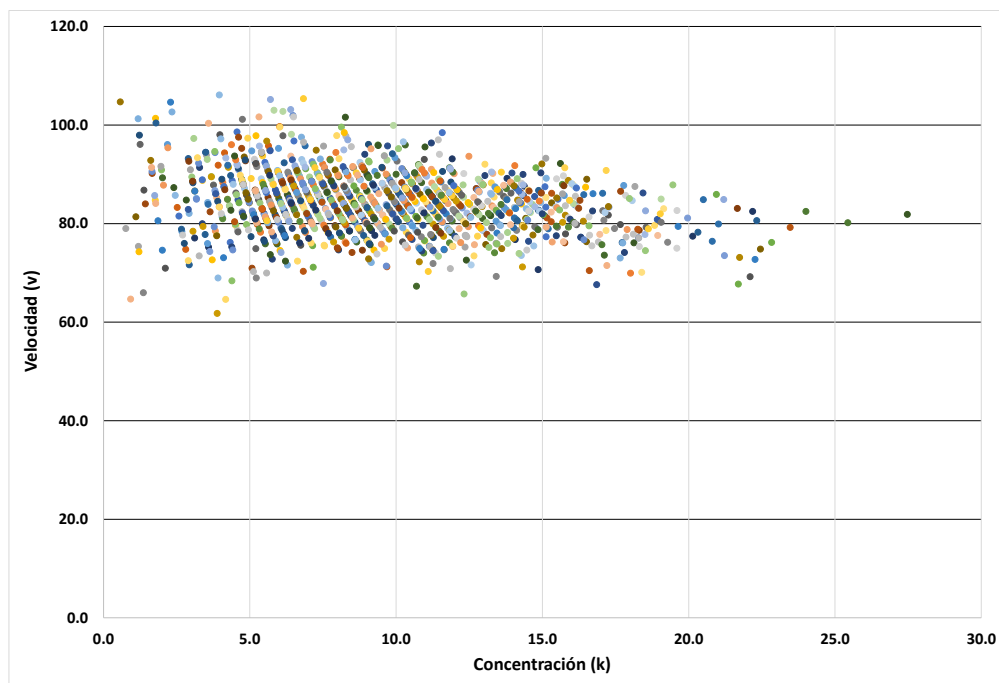
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 141 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



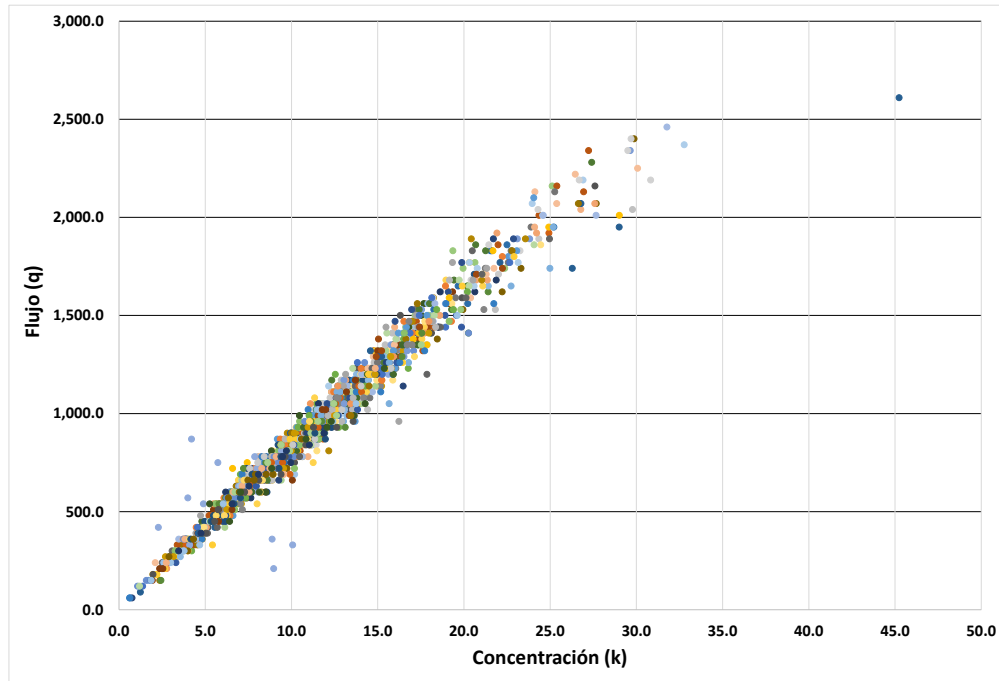
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 142 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



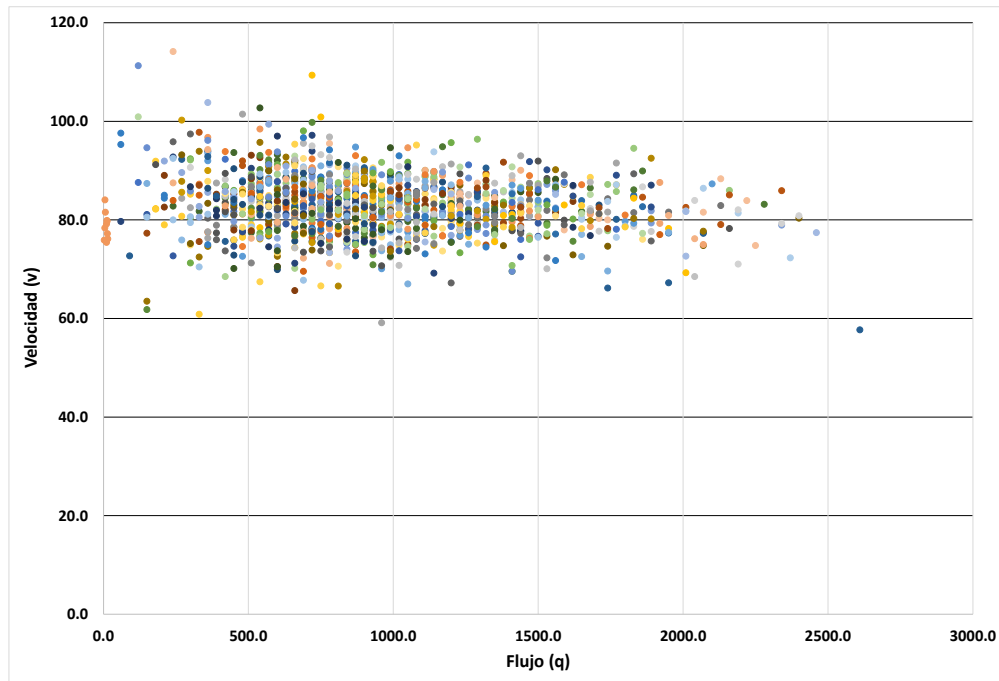
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 143 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



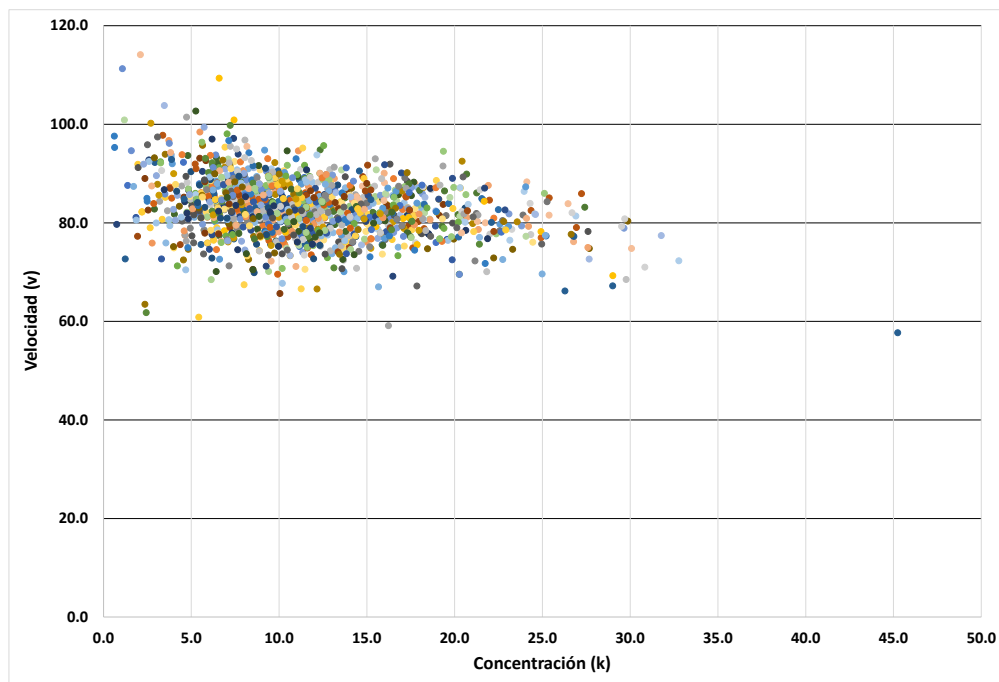
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 144 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

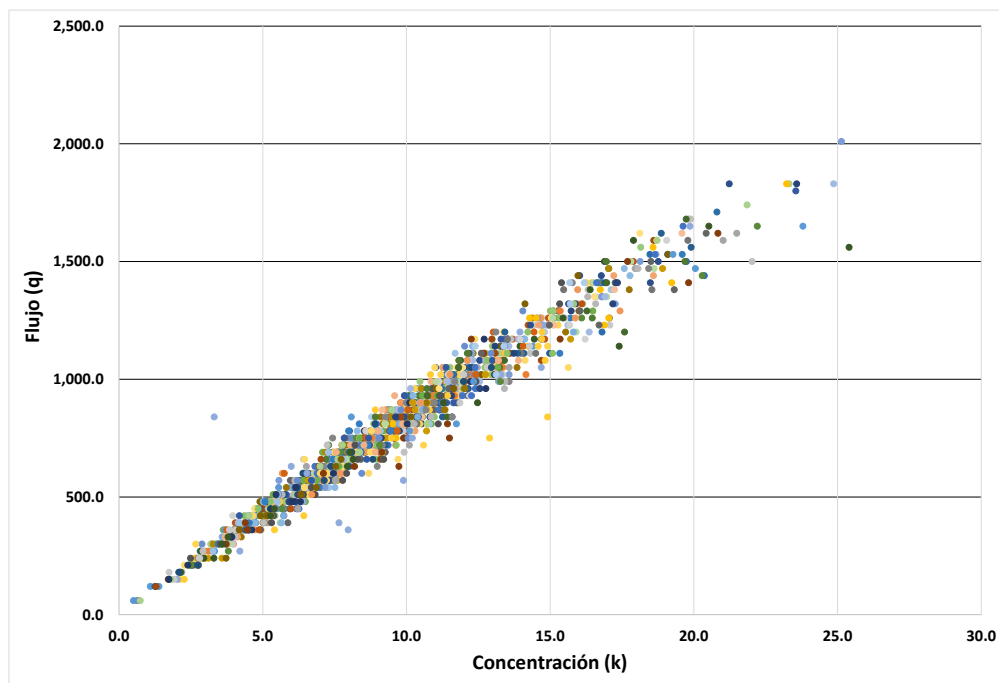
**Figura 145 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

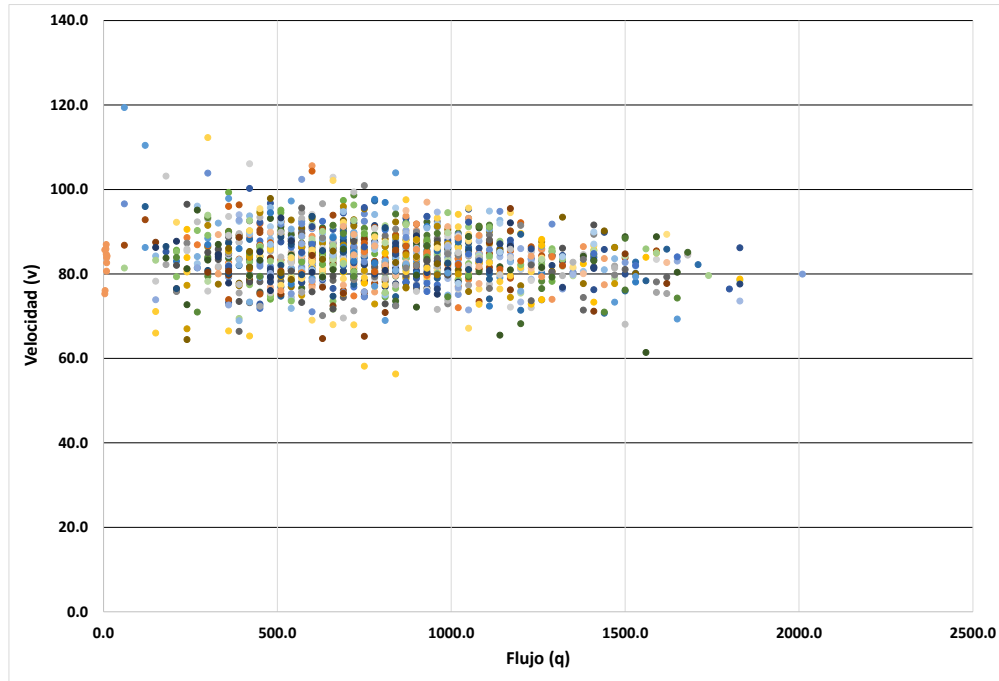
Fecha 22-09-2012

**Figura 146 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



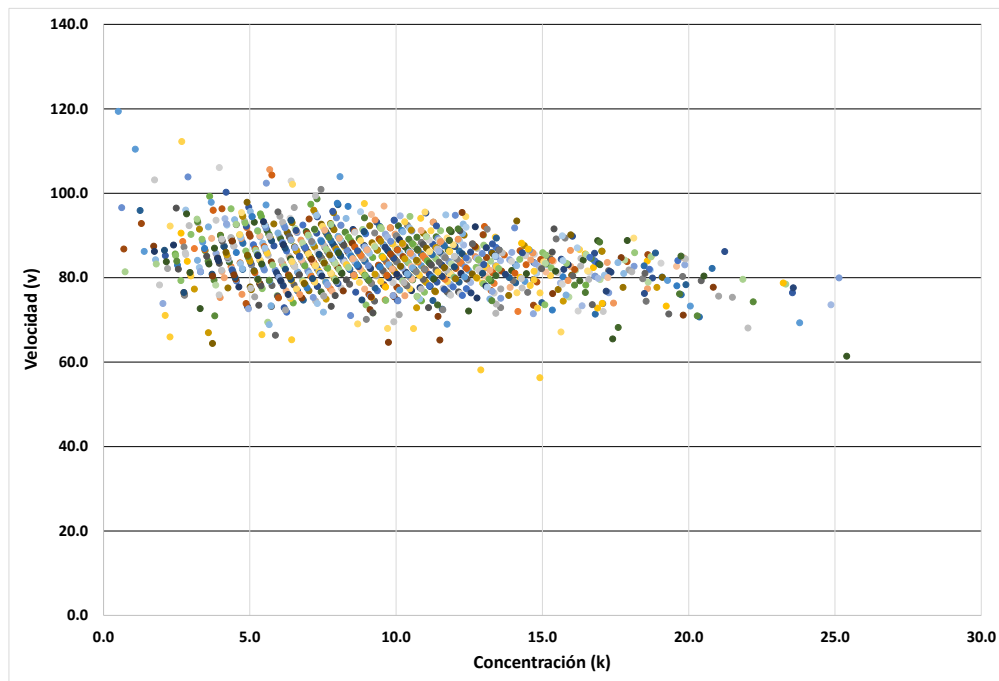
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 147 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



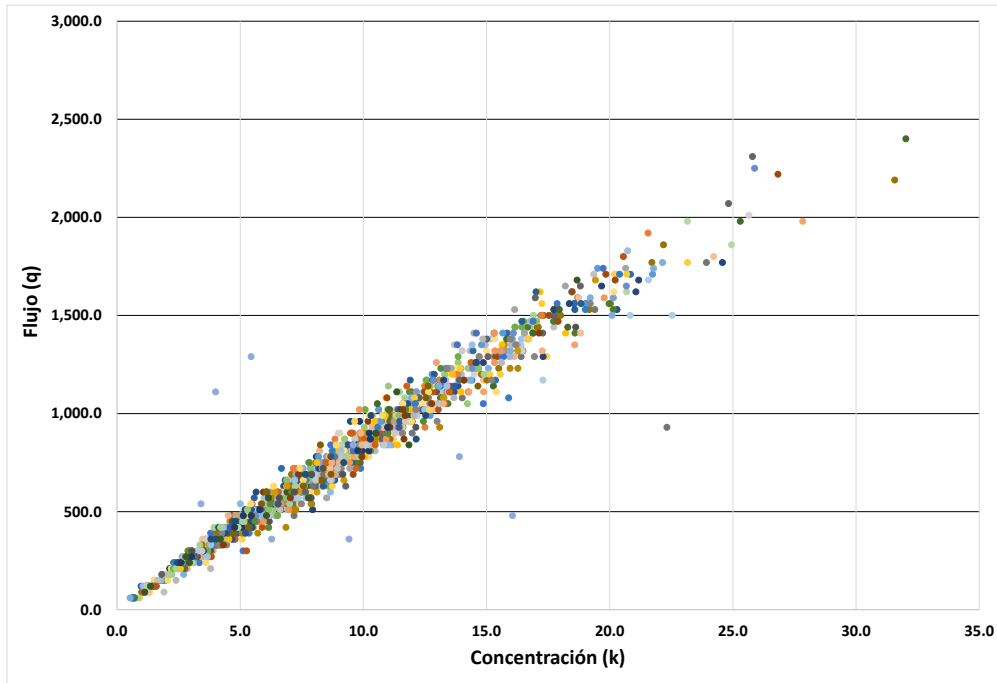
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 148 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



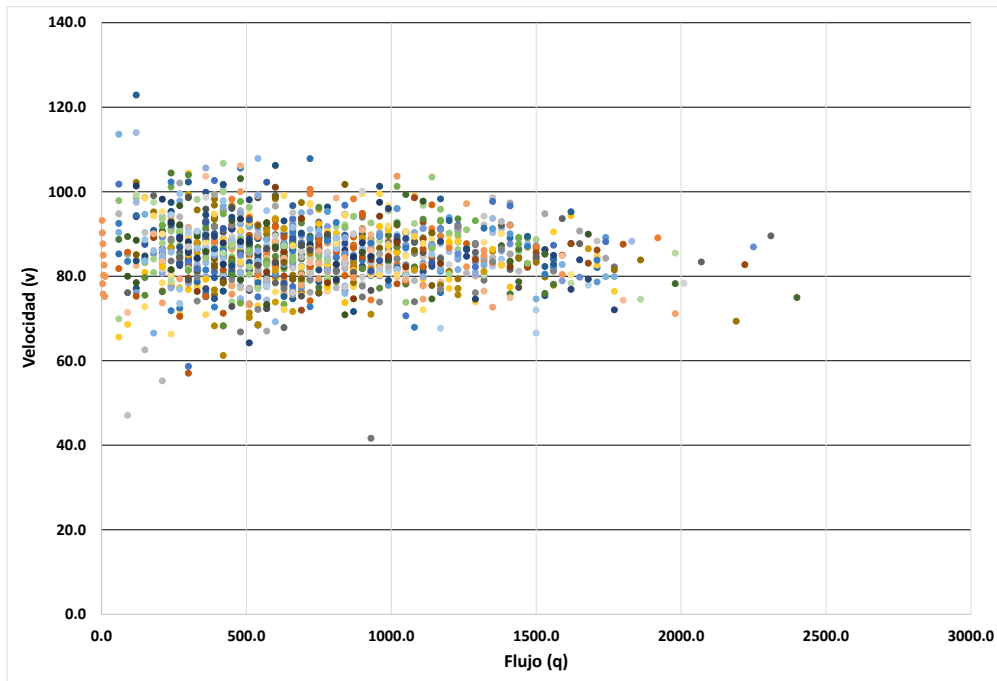
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 149 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



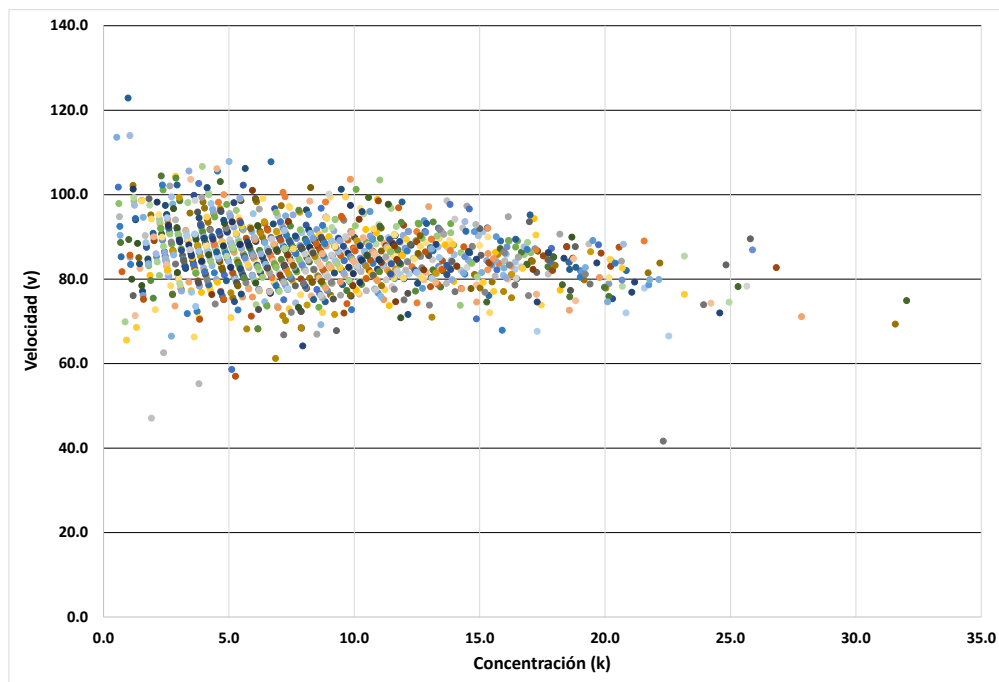
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 150 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

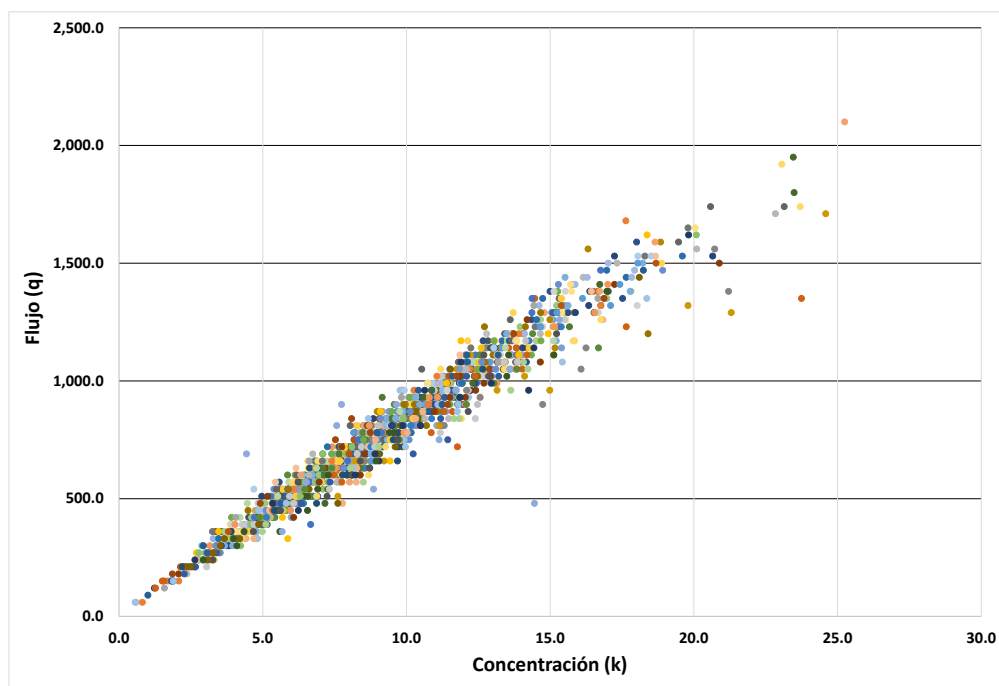
**Figura 151 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

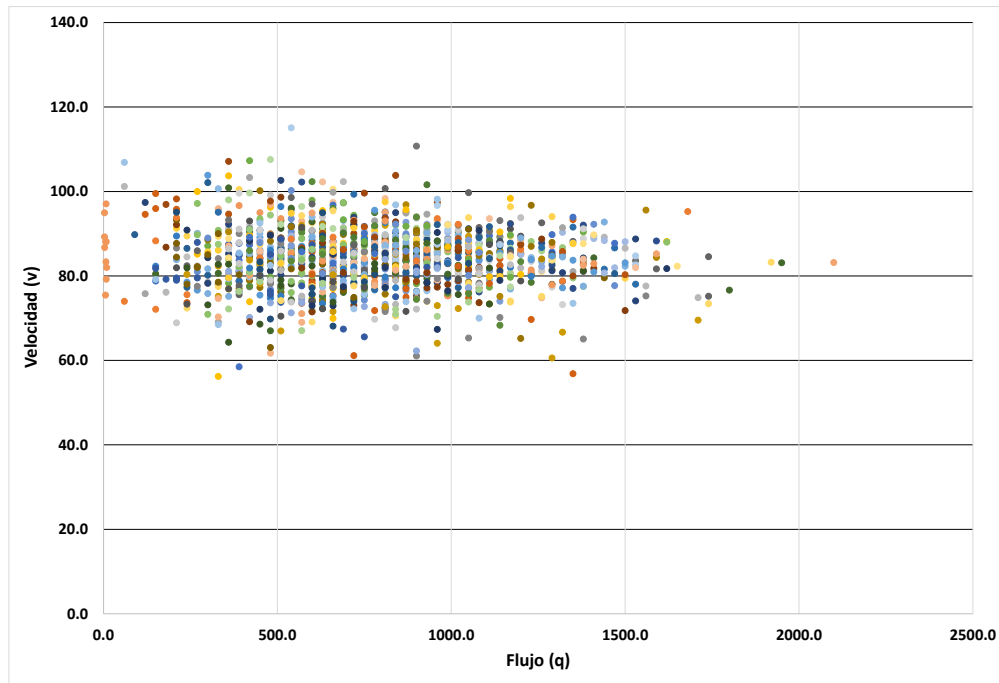
Fecha 26-09-2012

**Figura 152 Diagrama Concentración (k)-Flujo (q)**



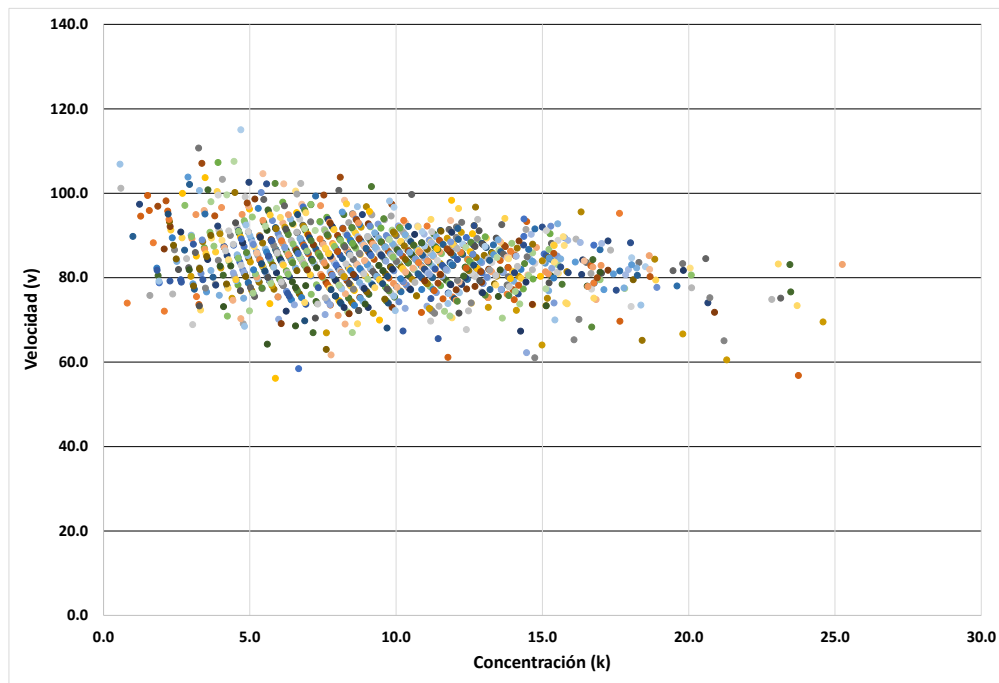
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 153 Diagrama Flujo (q)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo

**Figura 154 Diagrama Concentración (k)-Velocidad (v)**



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de campo