



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones  
Perfecta combinación entre Energía e Intelecto



Desarrollar e implementar una herramienta que permita realizar el cálculo del flujo y velocidad del tráfico vehicular, mediante el procesamiento digital de un video digital.

Vlademir Corredor Rojas

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Director

Phd .Oscar Gualdrón González

Codirector

MSc(c) Leandro F. Ariza Jiménez

Grupo de Investigación en conectividad y procesado de señal-CPS

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga-2009

**A mi padre, Ruperto, por apoyar mi sueño  
y convertirlo en propio  
A mi madre, Luz Marina, por todo su amor,  
paciencia y sacrificio**

## **Agradecimientos**

De corazón quiero dar gracias al ser todo poderoso que me da las fuerzas para afrontar cada día. A mis padres, quienes me han dado la formación, el apoyo y las herramientas necesarias para alcanzar todas mis metas. A mis hermanos, junto a quienes he crecido, me han enseñado a crecer, he compartido y aprendido a afrontar cada reto. A mis amigos, quienes han sido, y seguirán siendo parte fundamental en mi vida, gracias por haber estado en los momentos difíciles, por darme la motivación y consejos necesarios para conservar la calma y persistencia. A mi codirector y director de proyecto Leandro Ariza y Oscar Gualdrón por sus valiosos aportes y apoyo durante el trabajo. A los comandantes de las direcciones de tránsito de Floridablanca y Bucaramanga por facilitar los equipos y permisos necesarios para la realización de las pruebas de velocidad.

# CONTENIDO

<b>CAPITULO 1</b> .....	1
<b>1. Introducción</b> .....	1
<b>1.1 Marco teórico</b> .....	3
1.1.1 Sistemas de medición de tráfico.....	3
1.1.2 Contexto comercial nacional e internacional.....	4
<b>1.2 Organización del documento</b> .....	6
<b>2. Sustento Matemático</b> .....	7
<b>2.1 Preprocesamiento</b> .....	7
2.1.1 Creación de un plano de color promedio entre el plano rojo y el azul.....	7
2.1.2 Generación de la imagen de fondo.....	8
2.1.3 Algoritmo para detectar y caracterizar las líneas de borde de la carretera.....	9
2.1.4 Segmentación de las líneas divisoras de carril.....	11
2.1.5 Cálculo del umbral de binarización.....	11
<b>2.2 Procesamiento</b> .....	13
2.2.1 Segmentación de vehículos.....	13
2.2.2 Conteo y seguimiento de trayectoria.....	14
2.2.3 Cálculo de la velocidad.....	15
<b>3. Descripción del Funcionamiento de la herramienta</b> .....	21
3.1 Funcionamiento global.....	21
3.2 Condiciones de uso de la herramienta y de captura del video.....	21
3.2.1 Condiciones de captura en campo.....	21
3.2.2 Formato y condiciones del video.....	22
3.3 Dispositivo de adquisición.....	23
3.4 Software y lenguaje de programación utilizados.....	23
3.6 Algoritmos Implementados.....	23
3.6.1 Preprocesamiento.....	23
3.6.2 Procesamiento.....	28
3.8 Interfaz gráfica.....	39
<b>4. Observaciones y conclusiones</b> .....	44
4.1 Conclusiones.....	44
4.2 Aportes.....	45
4.3 Recomendaciones para trabajos futuros.....	45
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	47
<b>A. Manual del usuario de la herramienta</b> .....	49

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Frame en formato RGB de un auto de color verde .....	8
Figura 2.1. <i>Frame</i> en formato RGB de un auto de color verde oscuro .....	8
Figura 2.10. Geometría de la escena típica con la que se encuentra la velocidad promedio.....	16
Figura 2.2. Cubo.....	8
Figura 2.2. Cubo RGB.....	8
Figura 2.3. BG*Mask sometido a sumatoria de apertura Top-hat.....	11
Figura 2.4. Eliminación geométrica de ruido para aislar las líneas divisoras.....	12
Figura 2.5. Auto binarizado .....	13
Figura 2.6. Erosión con elemento horizontal .....	13
Figura 2.7. Cerramiento con elemento de forma trapezoidal.....	14
Figura 2.8. Geometría de la superposición de un objeto en un par de frames....	15
Figura 2.9. Ajuste distancia real vs distancia pixeles .....	19
Figura 3.1. Esquema Global de funcionamiento .....	21
Figura 3.11. Ventana principal sin aceptar término .....	40
Figura 3.11. Ventana principal sin aceptar términos.....	40
Figura 3.13. Ventana de desarrollo paso a paso .....	41
Figura 3.14. Líneas divisoras centrales.....	41
Figura 3.15. Trayectoria de un vehículo en escena .....	42
Figura 3.16. Ventana de desarrollo de resultados finales .....	42
Figura 3.17. Ventana de desarrollo resultados finales con resultados activados	43
Figura 3.18. Resultados de velocidad promedio.....	43
Figura 3.2. Diagrama de flujo del Preprocesamiento.....	24
Figura 3.3 Máscara construida a partir de las líneas de borde .....	25
Figura 3.4. Diagrama de flujo para encontrar la máscara .....	26
Figura 3.5 Imagen de fondo ( ).....	26
Figura 3.7. Diagrama de flujo de la segmentación .....	30
Figura 3.8. Segmentación de vehículos en movimiento .....	31
Figura 3.9. Diagrama de Flujo algoritmo seguimiento de trayectoria.....	34
Figura3.6 Diagrama de flujo del procesamiento del video .....	28

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Ajuste spline cúbica .....	20
Tabla 3.1 Resultados pruebas velocidad promedio .....	37

## INDICE DE ABREVIATURAS

avi	
audio video interleave.....	23
GUIDE	
Graphic user interface development environment.....	39
HSV	
HueSaturationLuminance .....	7
IRD	
International Road Dynamics .....	2
RGB	
RedGrendBlue .....	7
SIT	
Sistema Inteligente de Transporte .....	1
SMT	
Sistemas de Medición de Tráfico .....	1

## RESUMEN

**TITULO:** DESARROLLAR E IMPLEMENTAR UNA HERRAMIENTA QUE PERMITA REALIZAR EL CÁLCULO DEL FLUJO Y VELOCIDAD DEL TRÁFICO VEHICULAR, MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE UN VIDEO DIGITAL<sup>1</sup>

**AUTOR:** CORREDOR ROJAS VLADEMIR<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** FLUJO, FRAME, MEDICIÓN, PARÁMETROS DE TRÁFICO, VELOCIDAD, VIDEO.

### DESCRIPCIÓN:

La herramienta desarrollada permite realizar el cálculo del número de trayectorias encontradas en un segmento de video de tráfico así como estimar la velocidad promedio de cada una. Tiene una tolerancia entre  $\pm 0.2$  km/h a  $\pm 13$  km/h aproximadamente, obtenida de una muestra de 50 automóviles particulares, dependiendo de la semejanza entre la forma del auto segmentado y su forma original. La velocidad máxima de detección es de 107km/h aproximadamente. El parque automotor objetivo en este trabajo son los vehículos familiares y de pasajeros cuya pintura se encuentre en óptimas condiciones. Se ha comprobado su funcionamiento óptimo en horas del día en condiciones de no lluvia.

Se desarrolló en la etapa de preprocesamiento un algoritmo para resaltar y caracterizar las líneas que demarcan la carretera mediante el principio de análisis de componentes principales, así como un algoritmo de generación de la imagen de fondo de la escena de tráfico, utilizando la moda estadística de un pixel en el tiempo.

Para lo denominado procesamiento de la secuencia se desarrolló un algoritmo que segmenta los objetos en movimiento mediante la diferencia de cada *frame* con la imagen de fondo encontrada, resaltando de esta forma los objetos de primer plano, a los cuales se les realizó el seguimiento de trayectoria a través del tiempo mediante la creación de una matriz de correspondencia por cada par de *frames* consecutivos utilizando criterio de distancia entre los centroides de cada objeto segmentado y asignándolos como pertenecientes a una trayectoria mediante criterio de tamaño. El conteo o flujo de los vehículos se obtiene directamente del número de trayectorias encontradas y la velocidad promedio correspondiente a cada trayectoria se estima a partir de la segmentación de las líneas divisoras de la carretera, que permiten realizar la calibración de la escena gracias a ser un estándar internacional.

---

<sup>1</sup> Proyecto de Grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Oscar Gualdrón Gonzáles. Codirector: Leandro F Ariza Jiménez.

## ABSTRACT

**TITLE:** DEVELOP AND IMPLEMENT A TOOL TO PERFORM THE CALCULATION OF FLOW AND SPEED OF TRAFFIC THROUGH THE DIGITAL PROCESSING OF A DIGITAL VIDEO<sup>3</sup>

**AUTOR:** CORREDOR ROJAS VLADEMIR<sup>4</sup>

**KEYWORDS:** FLOW, FRAME, MEASUREMENT, TRAFFIC PARAMETERS, SPEED, VIDEO.

### DESCRIPTION:

The developed tool perform the calculation of the different found trajectories on a traffic video segment and estimate its average speed. Has a tolerenace between  $\pm 0.2$  km/h to  $\pm 13$  km/h, for a sample of 50 particulars automobiles, depending on the similarity between the form of the segmented car and its original form. The maximum speed of detection is 107km/h approximately. The purpose vehicle for this job are the family and passengers vehicles whose painting is in optimal conditions. It has been proved its optimal behavior on day shift with no raining.

It was developed on the preprocessing stage a straight line detection algorithm using principal component analysis to demarcate the road and a background image generation algorithm using the mode of each pixel over time.

In the processing it was developed an algorithm to segment moving objects by the difference of each frame with the background image found, highlighting foreground objects in this way, for which were carried out the trajectory tracking over time by the creation of a correlation matrix for each pair of consecutive frames using distance criterion between centroids of each segmented object and assigning them as belonging to a trajectory by size criterion. Counting or vehicles flow is got directly from the number of found trajectories and the average speed for each trajectory is estimated from the segmentation of the road line dividers which allow calibrating the scene thanks to an international standard.

---

<sup>3</sup> Grade project.

<sup>4</sup> Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electric, Electronic, and Telecommunications School. Director: Oscar Gualdrón Gonzáles. Codirector: Leandro F Ariza Jiménez.

# CAPITULO 1

## 1. Introducción

Actualmente en diferentes ciudades del mundo son muy conocidos y usados los Sistemas de Medición de Tráfico (SMT)<sup>5</sup>. Estos desempeñan un papel muy importante dentro de un Sistema Inteligente de Transporte (SIT)<sup>6</sup>, ya que con la recolección de datos como flujo vehicular por clase, velocidad y peso, se pueden programar los centros de semaforización, planificar las rutas y localizar puntos de información para el viajero, entre otros. Además, estos sistemas a su vez pueden funcionar dentro de la estructura de un completo sistema de video de administración de tráfico urbano, regido bajo los estándares de codificación de video y los protocolos de transmisión de medios de comunicación existentes, así como a largo plazo ser vitales para la planificación estratégica y la construcción de nuevas vías y de esta forma obtener un uso más eficiente de los recursos y una mejor calidad de vida tanto para peatones, usuarios del servicio de transporte público y vehículos particulares.

La industria ha desarrollado distintos tipos de sensores que registran del medio señales que permiten calcular los datos mencionados. Algunos de éstos son conocidos comercialmente como de lazo inductivos, radares de microondas, radares de láser, dispositivos de infrarrojo pasivos y activos, arreglos acústicos y detectores magnéticos.

Sin embargo las investigaciones recientes están dirigiendo su atención a los sistemas basados en video **[1]**, los cuales son típicamente no intrusivos o pasivos y que tienen ventajas con respecto a los sistemas intrusivos. Entre las ventajas más sobresalientes se encuentran: portabilidad, fácil instalación y operación, fiabilidad en la información adquirida, bajos costos y la más importante, derivada de su característica no intrusiva, durabilidad.

Un ejemplo de los problemas que se presentan con los sistemas intrusivos puede evidenciarse en la ciudad de Bucaramanga. En efecto, anteriormente se instalaron sensores a nivel de calzada de tipo lazo inductivo que detectan el vehículo por medio de la variación de la masa magnética sobre el lazo y por lo tanto era posible calcular en tiempo real el flujo vehicular de la vía **[2]**. Sin embargo, durante las obras viales que se realizaron posteriormente, las

---

<sup>5</sup> Mas conocidos por la sigla TMS (Traffic Measurement System), en adelante se usará la sigla SMT, se profundizará en estos en la sección 1.1.1

<sup>6</sup> Mas conocidos por la sigla ITS (Intelligent Transportation Systems), en adelante se usará la sigla SIT y se dará su definición en la sección 1.1.1.2

empresas encargadas no tuvieron el cuidado necesario y averiaron en su totalidad los sensores.

Empresas como Internacional Road Dynamics INC (IRD)<sup>7</sup> se dedican al desarrollo e implementación de SIT en distintas ciudades del mundo. Así mismo, en Colombia han implementado en ciudades como Santa Marta, Cali y Neiva, mediante semáforos inteligentes y junto con otros dispositivos como cámaras y sensores, sistemas que ajustan las señalizaciones de acuerdo al flujo vehicular [3]. También cuentan con sistemas de clasificación y de recolección de datos de tráfico que usan tecnologías intrusivas y no intrusivas en el sistema de transporte.

Por otra parte, si bien, existen desarrollos a nivel academia e investigación, [6][7][10][11][12][14][15][16] aún el desarrollo y comercialización de SIT basados en video es relativamente joven y no es muy competido. Una empresa de origen francés (TRAFFICON) claramente líder en el mercado [13], opera desde 1992 y en estos momentos desarrolla proyectos en todo el mundo, sin tener aún presencia en Latino America. La mayoría de empresas, incluida INC, no incluyen dentro de sus tecnologías sistemas de medición de tráfico basado en video [4][5], dejando ver que es un campo llamado a ser explotado, comercial y académicamente. El desarrollo propio de este tipo de sistemas, motivan a la academia y a la industria nacional a prepararnos para vivir en ciudades organizadas y culturizadas. Es por esto que el autor propone y considera pertinente desarrollar una herramienta de medición basada en esta última tecnología y analizar los resultados que se obtengan.

En resumen, la metodología propuesta para este trabajo se enfocará en el análisis de fragmentos de video de tráfico vehicular y que estarán sujetos a determinadas condiciones. Posteriormente, se aplicarán algoritmos de tratamiento digital a los *frames* que componen los fragmentos. De esta manera, podrán obtenerse resultados estadísticos del flujo y velocidad del tráfico vehicular. Así mismo, estos podrán visualizarse e interpretarse mediante gráficas, para obtener una herramienta base, de un sistema no intrusivo de medición de datos estadísticos de tráfico, importante para el posible posterior desarrollo y puesta en marcha de un sistema en tiempo real que dará información clave al usuario sobre como generar un sistema de tráfico más eficiente dentro de una ciudad.

En la academia nacional se han desarrollado trabajos de investigación que se centran en el conteo de automóviles mediante tratamiento digital de video [11], que dejan a posteriores trabajos la clasificación de vehículos y cálculo de velocidades; a su vez en el ámbito internacional se han desarrollado trabajos más completos [10][6] que tienen objetivos muy similares a los de este proyecto, los cuales servirán como una referencia importante para cada etapa del preprocesamiento y procesamiento del video.

---

<sup>7</sup> Empresa de origen Canadiense con intervención en países andinos , incluido Colombia, en adelante se nombrará como INC

El potencial de aplicación que tiene el proyecto planteado y los ya mencionados con antelación es muy grande a nivel local. Cabe mencionar que en Bucaramanga actualmente se realiza un conteo manual del tráfico debido a los problemas mencionados con los sensores intrusivos instalados sobre la calzada. Similarmente la velocidad vehicular se mide mediante pistolas radar manipuladas por cada agente de tránsito y que el sistema de cámaras instalado en el área urbana es de uso exclusivo de la policía[2]. También es posible suponer que Bucaramanga es seguramente una muestra de lo que está ocurriendo en muchas ciudades del país, en donde las condiciones de tráfico exigen la implementación de nuevos sistemas de medición y de señalización automatizados, que alivien la congestión en las vías ante el aumento vertiginoso del parque automotor, que reduzcan los niveles de ruido, que permitan tomar decisiones acertadas de planificación de rutas, ubicación de puentes, entre otros, y así, en últimas mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. Así de esta forma, se busca desarrollar una herramienta de medición de parámetros de tráfico no intrusivo que busca un desarrollo propio de la tendencia actual en la industria. Igualmente, se busca a su vez motivar a la academia y a la industria nacional, en particular, hacia el desarrollo e implementación de sistemas de medición sustentados en el tratamiento digital de imágenes y de video, donde existe un campo y potencial muy grande sin explotar aún.

## **1.1 Marco teórico.**

Se hablará del contexto en que se implementan las aplicaciones de tratamiento de imágenes en los Sistemas de medición de parámetros de tráfico, de sus ventajas y desventajas con respecto a los demás sistemas de medición, del contexto internacional a nivel empresarial y de nuestro estado actual en cuanto a la implementación de este tipo de sistemas.

### **1.1.1 Sistemas de medición de tráfico**

Conjunto de dispositivos de sensado, comunicación y computación interconectados con la finalidad de obtener parámetros de medición del tráfico; hacen parte de los sistemas inteligentes de transporte. Se encuentran en el mercado sistemas intrusivos y no intrusivos.

#### **1.1.1.1 Parámetros de medición de tráfico**

Variables que caracterizan el tráfico de una ciudad como el flujo vehicular y la velocidad por clase de los vehículos.

#### **1.1.1.2 Sistemas inteligentes de transporte**

Sistemas en donde se usa la tecnología con el fin de mejorar el manejo de las vías, para hacerlo más seguro y eficiente. Normalmente lo conforman un conjunto de dispositivos, entre los cuales según el caso se encuentran, de sensado, comunicación, visualización y computación, que se interconectan para resolver requerimientos de los departamentos de tráfico y de los usuarios del sistema vial. Entre ellos se encuentran los sistemas de navegación vehicular, de

semaforización, de visualización de datos como el clima, temperatura, velocidad permitida, información guía para parqueo; sistemas de reconocimiento de placas; circuitos de televisión para vigilancia, estaciones de pesaje de camiones automáticas y los sistemas de medición de parámetros de tráfico entre otros.

#### 1.1.1.3 **Sistemas intrusivos**

Se instalan sobre la calzada vehicular, invadiendo el espacio de la misma, quedando vulnerable a daños que pueda ocasionar el clima, vehículos, peatones o las empresas de reparación vial.

- **De lazo inductivo:** es básicamente un conductor en forma de lazo formando un inductor, cuyo valor de inductancia cambia y produce una señal legible cuando un vehículo pasa sobre este [9].
- **Sensores M-Gage:** detectan la presencia de vehículos con confiabilidad, mediante el registro de los cambios en el flujo magnético creado cuando los objetos metálicos (todo tipo de vehículos) lo sobrepasan. Con frecuencia son usados para reemplazar los de tipo lazo inductivo que se averían. Se entierran a unos pocos centímetros de la superficie y podemos conocer en tiempo real los datos mediante un software de monitoreo a través de un computador [9].

#### 1.1.1.4 **Sistemas no intrusivos**

Se instalan en lugares estratégicos, cercanos a la calzada vehicular,

- **Radars de microondas:** pequeños radares que operan en la banda de microondas. Se ubican en poleas a la orilla del camino de tal forma que su instalación y remoción es muy sencilla. Un solo radar puede reemplazar múltiples detectores de lazo inductivos y el controlador correspondiente. Funcionan bajo un sensor de alta tecnología pero de bajo costo comparado con otros de fines similares; realizan la detección y medición del tráfico en intersecciones y avenidas. Pueden llegar a indicar hasta para 8 carriles al tiempo datos como flujo, velocidad del vehículo e información de clasificación [8].
- **Arreglos acústicos:** se basan en sensores programables, fáciles de usar y listos para detectar múltiples carriles de tráfico para operaciones en tiempo real o recolectar conteos hasta con tres niveles de clasificación. Se puede instalar fácil y rápidamente y consumen baja energía debido a que es alimentado completamente por energía solar [8].
- **Sistemas basados en video:** una video cámara es ubicada a cierta altura para monitorear el tráfico. La señal de video se usa como entrada a una unidad de detección, que típicamente la conforman circuitos integrados para el procesamiento de imágenes de video y se obtienen parámetros como flujo, velocidad del tráfico, detección de incidentes, entre otros [13].

#### 1.1.2 **Contexto comercial nacional e internacional**

Actualmente se desenvuelven varias empresas en el campo del desarrollo e implementación de sistemas para el cálculo de parámetros de tráfico. La mayoría de ellas utiliza una gran variedad de sensores. A su vez encontramos empresas que se especializan en un solo tipo de sensor o sistema de medición. Nos centraremos en los productos y servicios ofrecidos por Traficon, empresa especializada en el desarrollo e implementación de detección de parámetros de tráfico por video y líder a nivel mundial. [13]

Traficon desarrolla e implementa desde 1987 aplicaciones de detección por video para túneles, caminos y zonas urbanas, que se caracterizan por ser multifuncionales, rápidas, flexibles y confiables, algunas de las funciones son, detección automática de incidentes como, vehículos detenidos, vehículos en contravía, peatones, humo, caída de la velocidad, velocidad del tráfico, clasificación, distancia entre vehículos, conteo, entre otros. A la fecha más de 250 túneles están equipados con un sistema de este tipo.

Traficon es la empresa con mas experiencia en el mercado de los SMT basados en video; se encontró que las demás compañías como IRD de origen canadiense, de larga trayectoria, aún no incursionan en este tipo de sistemas no intrusivos, muy seguramente debido al alto desarrollo tecnológico que implica, pero se puede observar en el éxito de Traficon y las investigaciones encontradas que se verán cada día mas empresas implementando este tipo de sistemas.

Como se mencionó anteriormente, en nuestro país ha tenido presencia la empresa IRD, pero aún no se ha incursionado en el campo de los sistemas de medición no intrusivos basados en video. La puesta en marcha de este tipo de sistemas requiere una infraestructura vial en buenas condiciones y regida bajo los estándares internacionales. En nuestro país todavía falta tiempo para llegar a tener vías ideales pero las grandes ciudades ya se encuentran suficientemente preparadas para incursionar en este medio.

Gracias a la implementación de transporte masivo estas ciudades cuentan con vías principales estandarizadas y en condiciones adecuadas.

## **1.2 Organización del documento**

El presente documento busca ilustrar de manera clara y concisa los desarrollos algorítmicos que hacen parte de la herramienta final obtenida para el cálculo del flujo y velocidad del tráfico vehicular.

En el capítulo 2 se ilustra el sustento matemático de cada uno de los algoritmos utilizados. Se definirán parámetros, esquemas utilizados, modelos geométricos y procedimientos o funciones matemáticas usadas.

El capítulo 3 explicará el funcionamiento de la herramienta en todos sus aspectos. Comenzando desde su comportamiento global hasta llegar a lo más particular como es la explicación de los algoritmos usados en cada etapa. Se detallarán las condiciones climáticas, visuales y de iluminación bajo las cuales la herramienta funciona en óptimas condiciones.

En el capítulo 4 se exponen los resultados del trabajo, se hablará de cada observación en particular, las conclusiones derivadas del mismo, se discutirá sobre el aporte realizado a los entes interesados y se darán recomendaciones para futuros trabajos que busquen profundizar en el tema.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. Sustento Matemático**

Se almacenó un video a color en formato avi en un plano promedio entre el rojo y el azul que fue procesado posteriormente con el fin de obtener resultados de flujo y velocidad promedio del tráfico. Para llegar a esto fue necesario lograr resultados parciales como el cálculo de la imagen de fondo de la secuencia de video, caracterizar las líneas que demarcan la vía y aislar las líneas a trazos que la dividen en dos carriles, encontrar la mejor curva que describe la distancia en la imagen vs la distancia en la vía, entre otros. Se explicará entonces a continuación los principios morfológicos, matemáticos y geométricos utilizados en el desarrollo de cada uno de los algoritmos. Si es necesario se explica superficialmente el funcionamiento del algoritmo, por lo que recomendamos al lector leer primero el capítulo 3, donde se trata a fondo cada desarrollo y remitirse a este capítulo para profundizar en los principios utilizados.

#### **2.1 Preprocesamiento**

##### **2.1.1 Creación de un plano de color promedio entre el plano rojo y el azul.**

Se experimentó con cada uno de los planos del modelo RGB y con los del modelo HSV, y se encontró que usar un solo plano el rango de tonalidades detectado por el algoritmo de segmentación es muy limitado. Se observó a su vez que en el mercado automotor los tonos verdes no son muy usados en comparación con los tonos rojos y azules, luego con el fin de incrementar las características de estos dos tonos en cada auto se optó por crear un plano promedio entre el plano Rojo y el plano Azul.

Adicionalmente se analizó que los tonos verdes que se encuentran para autos, en su gran mayoría son del tipo del que posee el Renault 9 de la figura 2.1, el cual se podría describir coloquialmente como un verde oscuro y si se observan los valores de intensidad del rojo, verde y azul de uno de sus pixeles, se encuentra que esta tonalidad tiene una componente mayor en el color azul, característica que se mantiene para todos los pixeles del auto durante todo el trayecto.

eje de  
coordenadas  
x  
[pixeles]



eje de coordenadas y [pixeles]

Figura 2.1. *Frame*<sup>8</sup> en formato RGB de un auto de color verde oscuro.

Esta situación ratifica el hecho de no tener en cuenta el plano Verde sino las componentes roja y azul.

Lo anterior empieza a perder validez si el mercado automotor comienza a manejar verdes más saturados, que tiendan al verde puro (0, 255, 0), ilustrado en el cubo RGB de la figura 2.2 y se tendría que pensar en manejar un modelo que tenga en cuenta los 3 planos de color, Rojo, Verde y Azul.

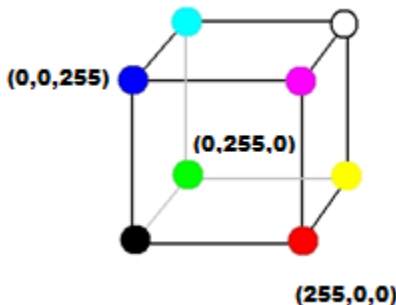


Figura 2.2. Cubo RGB. Obtenida de Wikipedia (contenido libre)

### 2.1.2 Generación de la imagen de fondo

Para generar la imagen de fondo (*BG*<sup>9</sup>), indispensable en el proceso de segmentación, se utilizó el siguiente principio.

<sup>8</sup> Término en inglés usado para denotar a una imagen perteneciente a un video. Se usará de ahora en adelante de esta forma.

<sup>9</sup> Connotación que será usada en ciertas ocasiones de ahora en adelante para referirse a la imagen de fondo de la escena

**Moda estadística:** Se conoce como moda estadística al valor que cuenta con mayor frecuencia de aparición en un arreglo de datos. En este caso el arreglo lo conforman las intensidades de un pixel en cada *frame* a lo largo del tiempo. El valor de mayor frecuencia en un segmento donde no existan autos detenidos será el valor correspondiente a la intensidad de la carretera o fondo.

### 2.1.3 Algoritmo para detectar y caracterizar las líneas de borde de la carretera

Para aislar las líneas rectas que se encuentran en la escena de tráfico y obtener una máscara (*Mask*<sup>10</sup>) que limite la región de trabajo únicamente a una vía, se utiliza la operación morfológica conocida como apertura Top-hat.

**Apertura Top-hat:** Operación que rescata los elementos que se eliminan tras una apertura morfológica. Se encuentra restando del frame a analizar, el resultado de aplicar una apertura al mismo con un elemento estructurante estratégico para eliminar ciertos objetos. En este caso se desean rescatar las líneas de borde de la carretera, las cuales tienen orientación vertical, por lo tanto se escogió como elemento para la apertura, un rectángulo horizontal.

**Sumatoria de Tophats.** Sumando las frames resultantes de la operación Top-hat, se obtiene una imagen en donde las líneas de interés tendrán el máximo valor en la escala de grises utilizada, lo cual permite aplicar fácilmente una umbralización que las aisle.

### Principio de análisis de componentes principales [15].

Se utiliza para caracterizar las dos *líneas de borde*<sup>11</sup>, que limitan la carretera y el área de trabajo, utilizando como entrada el resultado de la apertura Top-hat. Se puede pensar en este principio como una operación que revela la estructura interna de los datos desde el punto de vista de la varianza de los mismos. En este trabajo dicho principio se utiliza para obtener las líneas rectas trazadas por las dos líneas de borde que limitan un carril y conocer su ángulo de inclinación.

Se sabe que una línea puede estar compuesta por segmentos curvos, rectos o circulares. Además, digitalmente solo puede haber dos tipos de líneas rectas, horizontales o verticales y su combinación puede producir una aproximación a una curva. Desde este punto de vista se podría decir que todos los segmentos de línea son básicamente líneas rectas en un esquema digital y que cada uno de estos segmentos tiene una orientación que gradualmente cambiará la forma final de la línea. El principio de análisis de componentes principales se basa en encontrar los segmentos de línea que tienen menos variación en su orientación

---

<sup>10</sup> Connotación que será usada en ciertas ocasiones para referirse a la máscara que limita la región de trabajo del algoritmo.

<sup>11</sup> Término usado para referirse a las dos líneas continuas pintadas de blanco que limitan la carretera. Ver gráfico 2.3.

con respecto a los demás segmentos y obtener la dirección predominante que caracteriza la línea.

Para encontrar los componentes principales de una línea ideal en dos dimensiones se pueden utilizar los eigenvectores y eigenvalores de una matriz de dispersión de sus componentes, en este sentido el eigenvector indica la dirección principal de la distribución de los píxeles de una línea y el eigenvalor indica que tan grande es la distribución.

Se define la matriz de dispersión como:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \quad [2.1]$$

Si  $n$  es el número de píxeles en una línea y  $(x_i, y_i)$  son las coordenadas del píxel  $i$  de la línea,

$$S_{11} = \frac{1}{n} \sum_{i=1, \dots, n} (x_i - x_m)^2 \quad [2.2]$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{1}{n} \sum_{i=1, \dots, n} (x_i - x_m)(y_i - y_m) \quad [2.3]$$

$$S_{22} = \frac{1}{n} \sum_{i=1, \dots, n} (y_i - y_m)^2 \quad [2.4]$$

Donde

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1, \dots, n} x_i \quad y_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1, \dots, n} y_i, \quad [2.5]$$

Los eigenvalores de  $S$ ,  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  se encuentran como:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{2} \left\{ S_{11} + S_{22} + \sqrt{(S_{11} - S_{22})^2 + 4S_{12}^2} \right\} \quad [2.5]$$

De donde finalmente se obtiene el ángulo de orientación  $\theta$  de la línea, que se define como:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(\lambda_1 - S_{11})}{S_{12}} \quad \text{o} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{S_{21}}{(\lambda_1 - S_{22})} \quad [2.6]$$

En cualquier caso se obtiene el mismo resultado para el ángulo ya que las dos ecuaciones anteriores son idénticas debido a que  $\det(\lambda_1 I - S) = 0$ .

#### 2.1.4 Segmentación de las líneas divisoras de carril

Las *líneas divisoras de carril*<sup>12</sup> se segmentan con el fin de utilizar las coordenadas verticales máximas y mínimas que las describen como referencia para el cálculo de coordenadas sobre la vía mediante un ajuste de curva implementado y a partir de estas estimar la velocidad promedio de cada vehículo.

Para realizar la segmentación se recurrió nuevamente a la operación morfológica de apertura Top-hat y sumatoria Top-hat, explicadas en la sección 2.1.3, pero esta vez se utilizó como imagen de entrada la imagen de fondo de la escena, multiplicada por la máscara que limita el área de trabajo. El resultado parcial se muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3. *BG\*Mask* sometido a sumatoria de apertura Top-hat

Para eliminar el ruido que en este caso son lo que queda de las líneas de borde y la alcantarilla, se recurre a la geometría y se ajustan a cero los píxeles a cierta distancia horizontal del punto de corte de cada línea en la parte superior de la imagen, así como los que se encuentran a cierta distancia vertical de la línea inferior de la imagen. El área que se mantiene sin modificar se muestra de color gris en la figura 2.4.

Finalmente se utiliza morfología para eliminar el ruido aislado que se obtiene de la umbralización.

#### 2.1.5 Cálculo del umbral de binarización

La segmentación de los objetos en movimiento se realiza mediante la diferencia de cada frame del video con la imagen de fondo encontrada de la secuencia, siendo necesaria una binarización posterior de la imagen resultante. Para

<sup>12</sup> Se utiliza este término para referirse a las líneas a trazos pintadas de blanco sobre la calzada de la carretera y que dividen cada carril en dos.

encontrar el umbral de binarización utilizado en cada secuencia, se acudió a los siguientes principios estadísticos.

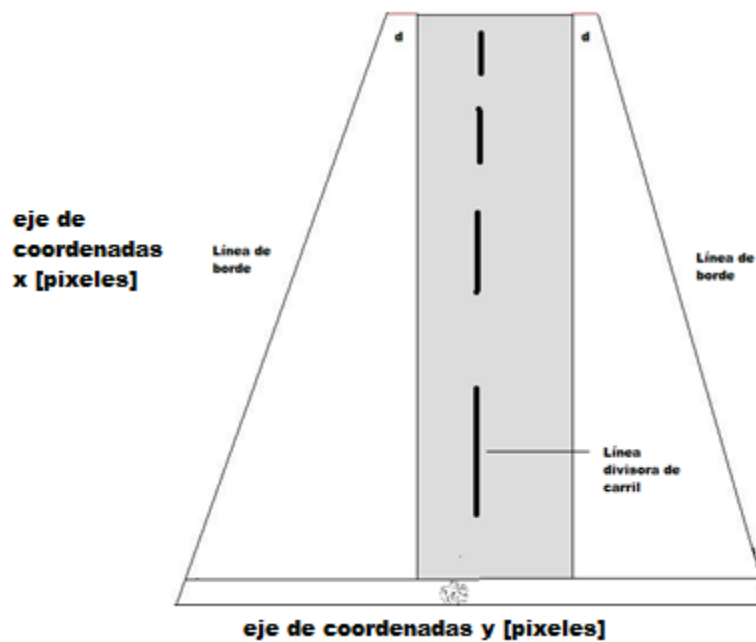


Figura 2.4. Eliminación geométrica de ruido para aislar las líneas divisoras de carril.

Sea

$M\{i\}$  : frame  $i$  de la secuencia de video.

$BG$  : imagen de fondo de la secuencia.

$$Difu\{i\} = M\{i\} - BG \quad [2.7]$$

$thr$  : umbral de binarización de  $Difu\{i\}$ .

$thr$  representa un valor por encima de cual se deben encontrar la gran mayoría de los píxeles que representan objetos en movimiento en  $Difu\{i\}$ , por lo que se decide encontrar un *frame* de la secuencia que no contenga objetos en movimiento y derivar a partir de este los datos estadísticos que llevarán a encontrar  $thr$ .

El componente de  $Difu\{i\}$  que no contenga objetos en movimiento se caracteriza porque sus píxeles corresponden todos a la imagen de fondo, luego sus intensidades se caracterizan por ser muy similares o por tener una pequeña dispersión asociada, luego se utiliza la varianza estadística como criterio para encontrar  $Difu\{sa\}$ , que se define como,

$Difu\{sa\}$  : componente de  $Difu$  que se caracteriza por tener la menor varianza de sus componentes.

Sea

$Mod = \text{mode}(Difu\{sa\})$ : moda estadística de los componentes de  $Difu\{sa\}$  distintos de cero.

$Var(Difu\{sa\})$  : varianza estadística de los componentes de  $Difu\{sa\}$  distintos de cero.

$Desv = \sqrt{Var(Difu\{sa\})}$  : desviación estándar de los componentes de  $Difu\{sa\}$  distintos de cero. [2.8]

$thr$  es un valor que representa a la gran mayoría de los valores de  $Difu\{sa\}$  y la estadística nos dice que el valor obtenido en la ecuación [2.9], donde se suma la moda de los datos con la desviación estándar, genera un valor satisfactorio.

$$thr = Mod + Desv \quad [2.9]$$

## 2.2 Procesamiento

### 2.2.1 Segmentación de vehículos

#### Cerramiento Morfológico

Durante el proceso de segmentación de los autos es necesario realizar un cerramiento morfológico una vez se realice la binarización de la imagen diferencia con la imagen de fondo. Se ilustrará el porque se decide utilizar un trapecio como elemento estructurante de este cerramiento.



eje de coordenadas y [pixeles]

Figura 2.5. Auto binarizado



eje de coordenadas y [pixeles]

Figura 2.6. Erosión con elemento horizontal



Figura 2.7. Cerramiento con elemento de forma trapezoidal

El caso ilustrado en las figuras 2.5 a 2.7, es el común para automóvil pequeño, el cual es el tipo de vehículo más común en carretera, razón por la que la decisión de que elemento estructurante usar se tomó a partir de este caso típico, además de mostrar un correcto funcionamiento para los demás casos de buses, busetas, minivans, camionetas, etc, todo tipo de vehículo excepto las motocicletas<sup>13</sup>.

Se observa entonces que en el caso típico, el vidrio trasero del vehículo no es resaltado por la umbralización y que la forma que este tiene desde la perspectiva en que el carro se aleja del dispositivo de captura<sup>14</sup> es la de un trapecio. Una vez realizada la umbralización es necesario eliminar cierto ruido como algunos componentes aislados de las líneas de borde y el ruido generado por las motos que alcanzan a ser detectadas por el umbral. Para esto se aplica una erosión con una línea horizontal como elemento estructural y se aplica una operación morfológica con un filtro majority<sup>15</sup> seguido de erosiones con líneas verticales y horizontales que eliminan los pequeños sobrantes. Como ilustra la figura 2.6, al aplicar este procedimiento la imagen del vehículo se divide en dos y a simple vista se observa que el mejor elemento para unir estos dos objetos es un trapecio, con el que se obtiene la segmentación del auto ilustrada en la figura 2.7.

## 2.2.2 Conteo y seguimiento de trayectoria

### Geometría del principio utilizado y sus limitantes

Para realizar el seguimiento de trayectoria o tracking<sup>16</sup> de los vehículos en escena, se utilizó el método descrito por Yue Hao, Shao Chunfu, Zhao Yi y Chen Xiaoming en [17].

<sup>13</sup> Se explicará mas adelante el porque se decidió no tenerlas en cuenta en la detección y la estrategia utilizada para no ser tenidas en cuenta.

<sup>14</sup> La herramienta se optimizó para secuencias de video donde el auto se aleja del dispositivo de captura, esto se explicará con más detalle en el capítulo 3.

<sup>15</sup> Filtro morfológico que envía a 1 el pixel si sus vecinos tienen este valor. Se implementó mediante la operación bwmorph de Matlab

<sup>16</sup> Término en inglés utilizado en tratamiento de imágenes para referirse al seguimiento de trayectoria de un objeto en movimiento. Se utilizará de ahora en adelante en ocasiones

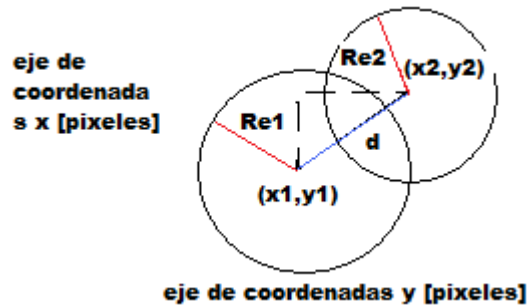


Figura 2.8. Geometría de la superposición de un objeto en un par de *frames*

El principio geométrico utilizado se basa en que cada objeto se observa como una figura completamente circular. La figura 2.8 simula un objeto en movimiento que se superpone a sí mismo en dos frames consecutivos. La geometría dice que para que estos dos objetos, que en realidad son el mismo, se superpongan, se debe cumplir la condición mostrada en [2.10].

$$Re_1 + Re_2 > d \quad [2.10]$$

Donde

$Re_1$  : Radio equivalente del objeto 1. Se habla de equivalente porque en este caso los objetos no son circulares, pero se utiliza este valor como una medida aproximada de su tamaño.

$Re_2$  : Radio equivalente del objeto 2.

$(x_1, y_1)$  : Coordenadas del centroide geométrico del objeto 1.

$(x_2, y_2)$  : Coordenadas del centroide geométrico del objeto 2.

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad [2.11]$$

Una vez se sabe que los objetos se superponen, se etiquetan como posible pareja.

Para asignar una pareja como parte de la trayectoria del auto, la diferencia entre sus radios equivalentes debe ser inferior a un umbral que se ha establecido experimentalmente

Para este caso de seguimiento de trayectoria de vehículos, este principio tendrá limitantes en cuanto a la velocidad que tenga el vehículo y en cuanto a la frecuencia de muestreo que se utilice para el procesamiento, ya que si la velocidad supera cierto valor o si la frecuencia de muestreo es muy baja, el auto dejará de superponerse en dos *frames* consecutivos.

Los rangos de velocidad y de tiempo de muestreo en los que la herramienta opera correctamente se darán a conocer en el capítulo 3.

### 2.2.3 Cálculo de la velocidad

La estimación de la velocidad, una vez el vehículo se ha identificado en *frames* diferentes, exige determinar la posición en el plano de la vía del vehículo. A continuación se describe el método utilizado para este fin.

### Cálculos Geométricos

El algoritmo que calcula la velocidad promedio de cada vehículo se basa en la segmentación de las líneas divisoras de carril pintadas sobre la calzada, las cuales son un estándar a nivel internacional y es obligación del departamento de tráfico de cada ciudad regirse por dicho estándar. La figura 2.10 ilustra las medidas que deben tener dichas líneas según el estándar y se muestra la situación típica de un auto con la que se encuentra la velocidad promedio entre dos líneas de referencia.

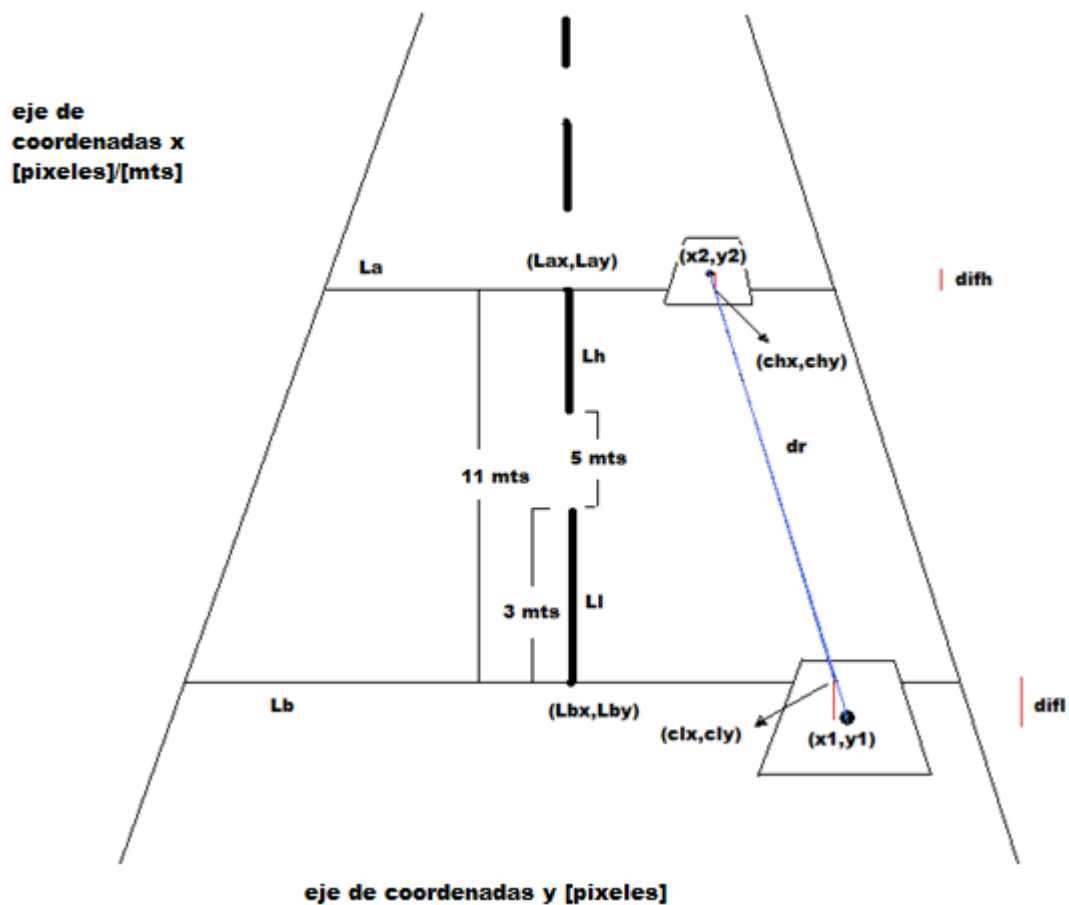


Figura 2.9. Geometría de la escena típica con la que es calculada la velocidad promedio.

La distancia recorrida por el vehículo en metros se calcula con el siguiente procedimiento.

## Sea

$Lh$  : Línea divisora de carril que se ubica entra las dos más centrales de la escena.

$Ll$  : Línea divisora de carril que se ubica entra las dos más centrales de la escena.

$Lb$  : Línea de referencia trazada a la altura del punto mas bajo de  $Ll$  .

$La$  : Línea de referencia trazada a la altura del punto mas alto de  $Lh$  .

$(x1, y1)$  : Coordenadas del centroide del auto mas cercanas a  $Lb$  .

$(x2, y2)$  : Coordenadas del centroide del auto más cercanas a  $La$  .

$R_{12}$  : Línea recta que va de  $(x1, y1) \rightarrow (x2, y2)$  .

$m$  : Pendiente de  $R_{12}$  .

$(lby, lby)$  : Coordenadas del pixel mas bajo de  $Ll$  .

$(lay, lay)$  : Coordenadas del pixel mas alto de  $Lh$  .

$(clx, cly)$  : Coordenadas del pixel perteneciente a  $R_{12}$  , para  $cly = lby$  .

$(chx, chy)$  : Coordenadas del pixel perteneciente a  $R_{12}$  , para  $chy = lay$  .

$dr$  : Distancia en pixeles de la recta que va de  $(clx, cly) \rightarrow (chx, chy)$  .

$$dr = \sqrt{(chx - clx)^2 + (chy - cly)^2} \quad [2.13].$$

$road$  : Distancia en pixeles equivalente a los 11 metros existentes entre  $Lb$  y  $La$  .

$$road = lay - lby \quad [2.14].$$

$dist$  : Conversión a metros de  $dr$  .

$$dist = dr * 11 / road \quad [2.15].$$

$difl$  : Distancia vertical en metros entre  $cly \rightarrow y1$  .

$difh$  : Distancia vertical en metros entre  $chy \rightarrow y2$  .

Ahora se hace uso del ajuste exponencial ya descrito para encontrar  $difl$  y  $difh$  .

$\exp adj(y)$ : Función que calcula la distancia en metros medida desde el límite inferior de la imagen correspondiente a la coordenada  $y$  de un pixel en la imagen.

$$difl = \exp adj(cly) - \exp adj(y1) \quad [2.16].$$

$$difh = \exp adj(y2) - \exp adj(chy) \quad [2.17].$$

Conociendo  $difl$  y  $difh$  se resta o se suma cada una a  $dist$  dependiendo de que el centroide del auto se encuentre por encima o por debajo de las líneas de referencia  $La$  y  $Lb$ .

$drv$  : Distancia recorrida por el vehículo en metros de  $(x1, y1) \rightarrow (x2, y2)$

La ecuación [2.18] muestra el proceso de decisión final para encontrar  $drv$ .

```

if (y1 < cly)
dvr = dist + difl
else
dvr = dist - difl
end
if (y2 > chy)
dvr = dist + difh
else
dvr = dist - difh
end

```

[2.18]

### **Ajuste de curva de distancia en la imagen vs distancia en la vía.**

Es necesario encontrar una función que realice una transformación de coordenadas verticales en la imagen a la distancia vertical recorrida en metros hasta el punto equivalente.

Las parejas de valores utilizadas para encontrar numéricamente la ecuación de la mejor curva que describa el comportamiento de las coordenadas verticales de los pixeles en la imagen con respecto a la distancia equivalente en metros referida a la línea inferior de la imagen, son, por el lado del espacio digital las coordenadas verticales de los extremos de las líneas divisoras de carril segmentadas y por el lado del espacio real, las distancias reales equivalentes a dichos extremos, referidas a la línea inferior de la imagen, que en el espacio real coincide con el extremo de una línea divisora de carril<sup>17</sup>.

Para encontrar la forma de la mejor curva inicialmente se recurrió a la geometría del problema tratada a fondo en [1], de donde se logró llegar a una relación aproximada donde la distancia en la vía estaba relacionada mediante un polinomio de segundo orden con respecto a la distancia en la imagen. Sin embargo en la práctica los resultados no fueron satisfactorios, por lo que se

---

<sup>17</sup> Dentro de las condiciones de captura del video se encuentra que la línea inferior del video coincide con el final de una línea divisora de carril y así poder referenciar los demás puntos a una distancia conocida.

decidió intentar con otro tipo de curvas, como exponenciales y de raíz cuadrada, concluyendo que ninguna originaba resultados satisfactorios. Se decidió entonces utilizar la interpolación de datos denominada spline cúbica cuyo principio se explica a continuación

### Interpolación de datos spline cúbica

Consiste en encontrar una función que se encuentra definida por un polinomio cúbico diferente para cada par de parejas. Para encontrarlo se añaden restricciones de continuidad en la derivada de tal forma que el conjunto de curvas aladañas forme una sola curva. Al momento de realizar la interpolación se utilizan entonces distintos coeficientes correspondientes a la curva correspondiente a la ubicación del punto que se quiere encontrar.

En la figura 2.9 se muestra el ajuste conseguido para una de las secuencias de prueba, en la cual se obtuvieron las siguientes parejas de valores de entrada,  $y$ ,  $x$ , que se obtienen de las coordenadas verticales de los pixeles de las líneas divisoras ubicados en los extremos de las mismas y de los valores de distancia correspondiente a cada uno en el plano de la vía, respectivamente.

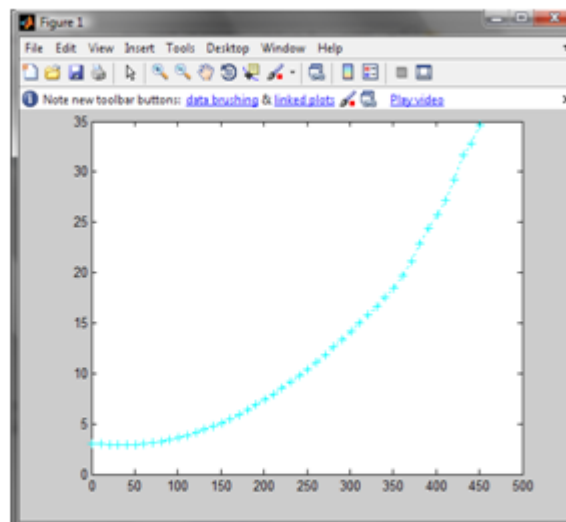
$y$  : Distancia vertical medida en pixeles y referenciada al límite inferior de la imagen.

$x$  : Distancia vertical medida en metros y referenciada al límite inferior de la imagen.

$$y = [ 148 \ 212 \ 286 \ 323 \ 370 \ 388 \ 420 \ 433 \ 456 \ 460 ]$$

$$x = [ 5 \ 8 \ 13 \ 16 \ 21 \ 24 \ 29 \ 32 \ 37 \ 40 ]$$

**distancia  
en metros  
sobre la  
carretera  
[pixeles]**



**altura del pixel en la imagen [pixeles]**

Figura 2.10. Ajuste distancia real vs distancia pixeles

Su implementación se llevó a cabo mediante la función spline perteneciente a Matlab de la siguiente manera.

```
r=(1:10:460);
yy =spline(x,y,r);
```

r es un vector de valores que representa la variación de distancias verticales en la imagen que serán interpoladas y se usa como entrada de la función spline junto con los vectores  $x, y$  definidos arriba.

En el algoritmo de velocidad su implementación se realiza con r siendo un escalar entre 1 y 480 que es tamaño vertical de los frames de la secuencias para el dispositivo de captura utilizado y yy representa el valor en metros en la vía correspondiente a este escalar en la imagen referenciado a la línea inferior de la imagen.

Se aclara que este tipo de ajuste con una interpolación spline cúbica puede ser utilizada independientemente de la ubicación del dispositivo de captura y de las características del mismo, siempre y cuando se cumpla con las condiciones geométricas de captura ya establecidas y descritas en la sección 3.2.1 y que garantizan que sean segmentadas las líneas divisoras de carril si se almacena un video a color en formato avi. Si no se cumplen estas condiciones las líneas divisoras de carril no serán segmentadas y no tendrá sentido la utilización de este ajuste.

En el ejemplo anterior el resultado del ajuste fue el siguiente.

Se puede apreciar en la tabla 2.1 que la interpolación spline tiene un % error de 0 en los puntos correspondientes a las parejas proporcionadas. Por lo tanto sus demás valores deben tener un error mínimo.

Coordenada y en imagen [pix]	distancia x en la vía[m]
74	3.14
<b>148</b>	5
200	7.34
<b>212</b>	8
250	10.37
<b>286</b>	13
310	14.94
<b>323</b>	16
350	18.4
<b>370</b>	21
378	22.35
<b>388</b>	24
413	27.55
<b>420</b>	29
426	30.51
<b>433</b>	32
445	33.24
<b>456</b>	37
458	38.36
<b>460</b>	40

Tabla 2.1. Ajuste spline cúbica

## CAPITULO 3

### 3. Descripción del Funcionamiento de la herramienta

#### 3.1 Funcionamiento global

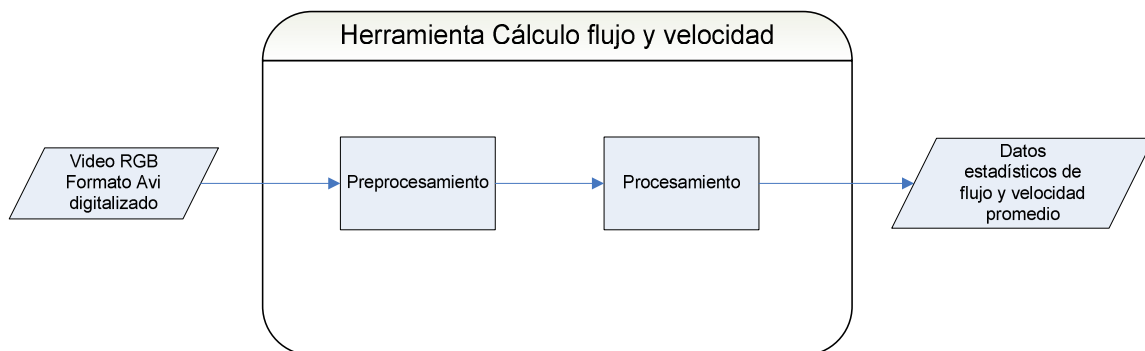


Figura 3.1. Esquema Global de funcionamiento

La herramienta diseñada tiene como entrada un video a color en formato *avi*, el cual contiene tráfico vehicular, y es capturado con ciertas condiciones que se darán a conocer en la sección 3.2. El desarrollo algorítmico de la herramienta se divide en dos partes, el preprocesamiento y procesamiento del video. Es importante aclarar que se consideró preprocesamiento del video a todo desarrollo necesario para el desempeño eficiente de la segmentación de los vehículos en escena. Inicialmente en el preprocesamiento se obtienen datos como la imagen de fondo de la escena, una máscara que identifica la carretera, segmentación de las líneas divisoras, entre otras, que serán tratadas a fondo mas adelante y en el procesamiento se realiza la segmentación, seguimiento de trayectorias y calculo de la velocidad promedio de los vehículos.

Fue diseñada una interfaz gráfica de usuario para su fácil uso, que permite ver los resultados del proceso paso a paso hasta llegar a los datos estadísticos de flujo y velocidad promedio que se describen con más detalle en la sección 3.8.

#### 3.2 Condiciones de uso de la herramienta y de captura del video

Se darán a continuación las condiciones bajo las cuales el usuario debe capturar el video para el funcionamiento óptimo de la herramienta.

##### 3.2.1 Condiciones de captura en campo

### **Condiciones de la carretera o vía a ser capturada:**

Las líneas de carril separadoras, que son las líneas a trazos que separan la vía en dos carriles, tienen que estar bien demarcadas, pintadas en color blanco.

Estas líneas tienen que estar ajustadas a las medidas estándar manejadas a nivel mundial, teniendo 12 cm de ancho, 3 metros de largo y conservando una separación entre cada par de líneas de 5 metros.

El asfalto o pavimento debe ser lo suficientemente oscuro<sup>18</sup>, de tal forma que tenga un alto contraste con las líneas de carril mencionadas anteriormente.

Las líneas de borde de la carretera que son las que limitan el área de interés para el procesamiento en este trabajo, deben estar completamente demarcadas, con pintura blanca.

### **Condiciones geométricas de la escena capturada**

La escena capturada debe cumplir 4 requisitos geométricos. Las líneas de borde que demarcan la región de interés deben aparecer cortando la línea horizontal inferior y la línea horizontal superior de la escena, es decir la captura registra en su punto más alto la carretera y no el horizonte.

Se debe asegurar que al dibujar una línea vertical que divida la carretera en dos partes, ésta línea debe atravesar la región de interés sin tocar ninguna de las líneas de borde que delimitan la misma. Este requerimiento se hace con el fin de garantizar el buen desempeño del algoritmo de detección de las líneas que delimitan el área de interés, perteneciente al preprocesamiento.

La parte inferior de la imagen, corta con el inicio de una línea de carril separadora, ya que de esta forma se puede calcular la distancia real que atraviesa el vehículo, lo cual se utilizará para su velocidad promedio.

Finalmente se recomienda que la escena no registre más de 5 líneas de carril separadoras con el fin de que las dos líneas centrales<sup>19</sup> sean la primera y la segunda línea de abajo hacia arriba y así no se presentan problemas de unión de objetos en la segmentación.

### **3.2.2 Formato y condiciones del video**

El video debe registrar vehículos en la dirección en que estos se alejan del dispositivo de captura. Esta condición se implementa simplemente por simplificar el desarrollo, pruebas en campo y la explicación del funcionamiento de la herramienta, pero no se encuentra ninguna razón para pensar que los principios utilizados no se cumplirán en el sentido en el que los carros se acercan a la video cámara.

### **Características del formato del video y duración.**

---

<sup>18</sup> La herramienta tiene su mejor desempeño en el pavimento regular de color gris oscuro. Se menciona porque se encuentran casos en donde este tiende a un color blanco, caso en el que presenta problemas la herramienta.

<sup>19</sup> El video es cortado a un valor por encima y por debajo de las dos líneas divisoras de carril más centrales, se explicará el porque en el preprocesamiento.

El video capturado debe ser formato *avi*<sup>20</sup>. Se utiliza este formato por defecto ya que el dispositivo de captura usado para las pruebas almacena el video en este formato.

Debido a las limitantes de memoria de procesamiento se debe poner un límite de tiempo a los segmentos de video a analizar con el fin de no caer en falta de memoria. La máquina utilizada para las pruebas es un Intel core 2 duo, 1.67Ghz de 2 Gb de memoria Ram, con una memoria virtual disponible de 1550 MB. Para estas características se obtiene que el video no deba superar los 20 segundos para un tiempo de muestreo cada cuatro *frames*.

### **Condiciones climáticas**

La herramienta se diseñó para que trabajara en óptimas condiciones a cualquier hora del día. En la noche no se realizaron pruebas pero debido a que la segmentación se basa en las características de color de los autos, estas no serían detectadas sin suficiente iluminación, por lo que lo más probable es que no tenga un buen desempeño.

Se realizaron pruebas bajo leve lluvia y el desempeño fue satisfactorio. Es probable que bajo lluvia intensa el agua genere ruido en la segmentación además de que bajo estas condiciones lo más probable es que las condiciones de iluminación no sean las mejores, por lo que se recomienda usar la herramienta con capturas hechas durante el día y sin lluvia intensa.

### **3.3 Dispositivo de adquisición**

El dispositivo de captura utilizado es una video cámara Panasonic 3CCD PVG-S300. Captura video con un tamaño de 720X480 pixeles, a una velocidad de 29.97 *frames* por segundo.

### **3.4 Software y lenguaje de programación utilizados**

El software utilizado para el desarrollo de la herramienta fue Matlab, y el lenguaje utilizado fue M, lenguaje propio de Matlab.

### **3.6 Algoritmos Implementados**

A continuación se dará una clara explicación de cada uno de los algoritmos desarrollados, con base en los diagramas de flujo de cada uno. Se recomienda ver la figura 3.1 para tener presente el funcionamiento global de la herramienta.

#### **3.6.1 Preprocesamiento**

Se consideró preprocesamiento del video a todo desarrollo necesario previo a la segmentación de los vehículos. El video en formato *avi* almacenado se muestreo cada 4 *frames* y se encontró un plano promedio entre el rojo y el azul con el cual se trabajó durante todo el desarrollo<sup>21</sup>. Este tiempo de muestreo se escogió experimentalmente, teniendo como criterio que a medida que éste aumenta, el error que se comete al usar el ajuste de curvas exponencial en el algoritmo de

---

<sup>20</sup> Acrónimo de Audio Video Interleave.

<sup>21</sup> La justificación para la escogencia de este plano promedio se hace en la sección 2.1.1.

velocidad es mayor y el tiempo de procesamiento se reduje. Se encontró entonces que el procesamiento cada 4 *frames* es un buen compromiso para generar resultados satisfactorios de velocidad en el menor tiempo posible.

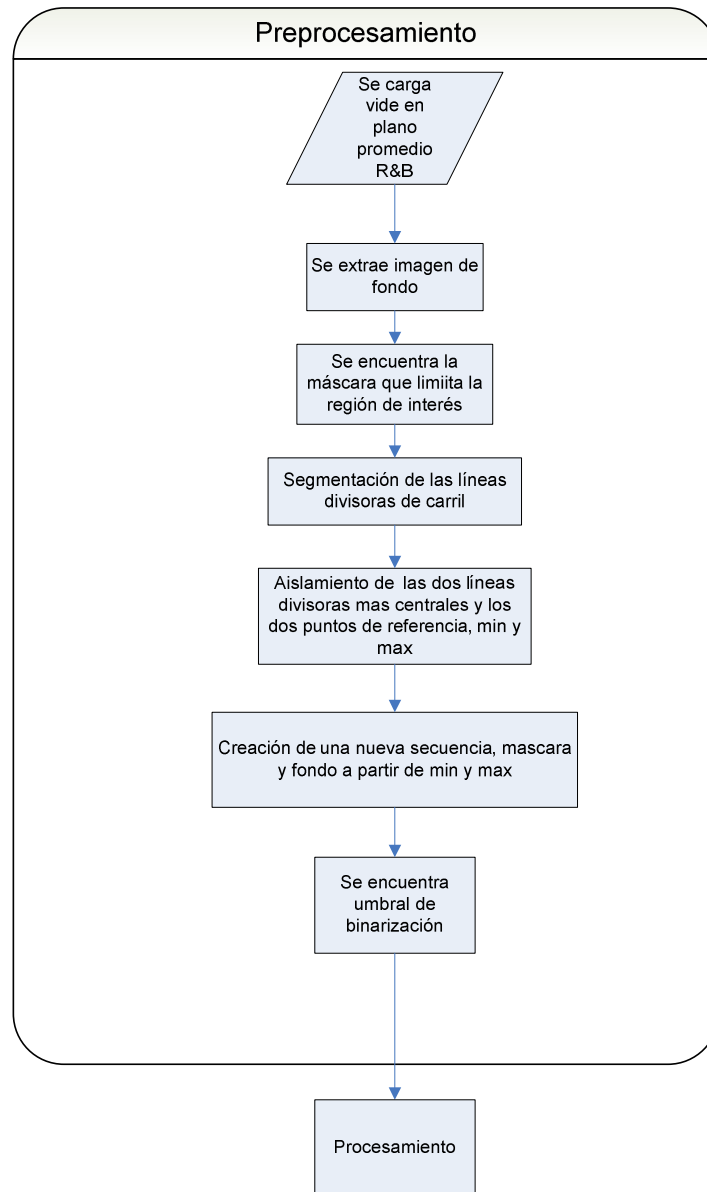


Figura 3.2. Diagrama de flujo del Preprocesamiento.

### 3.6.1.1 Máscara que limita la región de interés

Se desarrolló un algoritmo que segmenta las líneas de borde de la carretera, caracteriza la línea recta que describe y que construye con éstas una máscara como la mostrada en la figura 3.3, que se aplicará a todos los *frames* del video y a la imagen de fondo con el fin de disminuir el área de trabajo y hacer más eficientes los algoritmos posteriores.

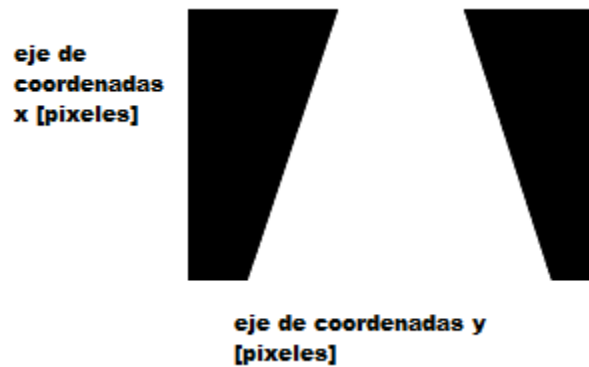
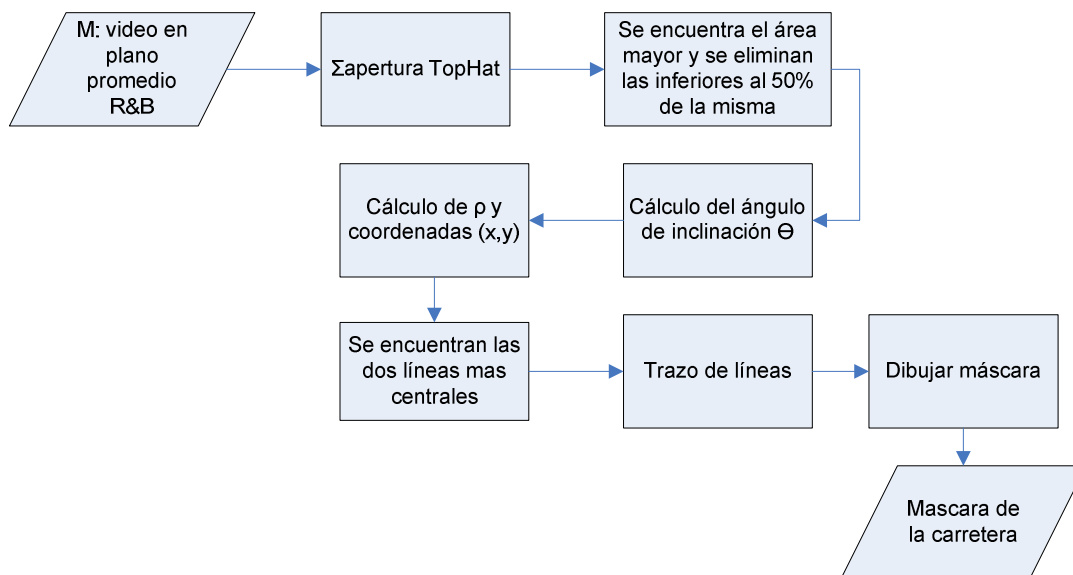


Figura 3.3 Máscara construida a partir de las líneas de borde

En la figura 3.4 se ilustra paso a paso el proceso para la construcción de la máscara.

Inicialmente se aplica al video una sumatoria de apertura Top-hat<sup>22</sup> para resaltar las líneas blancas que se encuentren en la escena. Posteriormente se encuentra la mayor de estas áreas y se eliminan las áreas que sean inferiores a un 50% de ésta.

Teniendo aisladas las líneas se aplica un análisis de componentes principales<sup>23</sup> para caracterizarlas por medio de su ángulo de inclinación y componentes en los dos ejes. Una vez se tengan las posibles líneas de borde se escogen las dos líneas cuyo corte con el límite superior de la imagen se encuentre mas cercano a una línea vertical trazada justo en la mitad. Finalmente se dibuja la máscara a partir de estas dos líneas encontradas.



<sup>22</sup> En la sección 2.1.3 se explica esta operación morfológica.

<sup>23</sup> En la sección 2.1.3 se explica en detalle la lógica utilizada por este principio.

Figura 3.4. Diagrama de flujo para encontrar la máscara que describe la carretera.

### 3.6.1.2 Extracción de la imagen de fondo.



Figura 3.5 Imagen de fondo ( $BG$ ) en escena pruebas.

Se ha utilizado en anteriores trabajos [14] la extracción de la imagen de fondo de la escena, con el fin de aislar los objetos en movimiento o de primer plano. En las herramientas en tiempo real esta extracción se hace en forma progresiva, es decir, la imagen de fondo se va actualizando de acuerdo a los cambios que van presentando las imágenes capturadas. Debido a que la herramienta propuesta en este trabajo no será implementada en tiempo real, se decidió extraer la imagen de fondo realizando el cálculo estadístico de la variación en el tiempo de cada pixel en la secuencia completa, obteniendo la moda de intensidad de cada pixel en su variación a través del tiempo. En la sección 2.1.2 se justifica el uso de la moda para este requerimiento.

### 3.6.1.3 Segmentación de las líneas divisoras de carril

Las líneas divisoras de carril se segmentan con dos fines principales. En primer lugar durante las pruebas de segmentación se observó que en la parte final de la imagen, donde los autos se encuentran más alejados del dispositivo de captura, se presentaban problemas de unión de objetos en movimiento debido a que la perspectiva que se utiliza hace cada vez mas estrecho el camino, lo que hace que los autos se perciban a menos distancia entre ellos a medida que se alejan y que el elemento estructurante necesario para realizar el cerramiento tenga un mayor tamaño en este tramo de la vía en comparación con el tamaño de los autos. El anterior problema llevó a que era necesario reducir el área de trabajo del algoritmo y no tener en cuenta la parte final del trayecto. Se decide entonces utilizar las dos líneas divisoras de carril más centrales como referencia para crear una secuencia nueva de tamaño reducido<sup>24</sup>. El segundo fin con el que se segmentaron estas líneas ya estaba previsto como parte fundamental de la

<sup>24</sup> En la sección 3.6.1.4 se hablara de estas dos líneas y su uso.

solución al algoritmo de velocidad promedio de los autos, en el cual se implementó una función que describe el comportamiento de la distancia vertical en la imagen con respecto a la distancia real en la vía, mediante un ajuste de curva de tipo exponencial que utiliza como datos de entrada la distancia estándar conocida entre estas líneas y la ubicación de sus extremos en la imagen.

En la sección 2.1.5 se ilustró el procedimiento utilizado para su segmentación.

#### **3.6.1.4 Aislamiento de las dos líneas divisoras más centrales**

Debido a que se presentaron problemas de segmentación en la parte superior de cada *frame*, en donde los vehículos se encuentran más alejados de la video cámara se decidió acotar el área de trabajo aún más, teniendo como referencia las dos líneas divisoras más centrales de la imagen. A su vez el extremo inferior de la línea más cercana a la cámara ( $lby$ ) y el extremo superior de la línea más alejada de esta ( $lay$ ) serán usados como puntos de referencia para el cálculo de la velocidad promedio de cada vehículo<sup>25</sup>. En la sección 2.1.4 se explicó el procedimiento utilizado para segmentar todas las líneas divisoras. Una vez segmentadas se aplicó un sencillo algoritmo basado en la geometría de la escena para escoger las dos líneas más cercanas a una línea horizontal que divida la imagen en dos partes iguales.

#### **3.6.1.5 Creación de una nueva secuencia, máscara y fondo de tamaño reducido.**

Este algoritmo tiene como entrada los puntos de referencia  $lby$  y  $lay$  ilustrados en la figura 2.9, además de la secuencia de video ( $M$ ), la imagen de fondo ( $BG$ ) y la máscara de la carretera ( $Mask$ ). Todos fueron recortados a una altura de 50 pixeles por encima de  $lay$  y 50 pixeles por debajo de  $lby$ , medida que se consideró suficiente para no recortar la segmentación de algún vehículo que se encontrara próximo a cualquiera de los dos puntos.

#### **3.6.1.6 Cálculo del umbral de binarización**

Este es el último desarrollo necesario antes de iniciar el proceso de segmentación de los vehículos.

El algoritmo de segmentación se basa en la extracción de los objetos en movimiento mediante la diferencia de cada *frame* con los objetos estáticos de la escena. Este método implica tener que aplicar una binarización a la diferencia nombrada, donde se obtiene la forma básica del vehículo dependiendo de si sus tonalidades resaltan suficientemente con respecto a las del fondo. Debido a que este umbral cambia con las características de iluminación de la escena se desarrolló un algoritmo que encuentra este valor único para cada video

---

<sup>25</sup> Para observar la ubicación de estas dos líneas y como se usan en el cálculo de la velocidad dirijase a la gráfica 2.10.

analizado. La solución que se dio se basa en encontrar un *frame* del video que no contenga ningún objeto en movimiento, y en la imagen diferencia entre éste y la imagen de fondo, de la cual se obtiene la moda de las diferencias y la desviación estándar para encontrar un valor que represente a la gran mayoría de sus componentes.

Para conocer en detalle el método estadístico utilizado diríjase a la sección 2.1.5.

### 3.6.2 Procesamiento

El procesamiento del video inicia con la segmentación de los vehículos en escena, continúa con el seguimiento de trayectoria de cada uno y termina con el cálculo de parámetros de flujo y velocidad que es el objetivo final del presente trabajo.

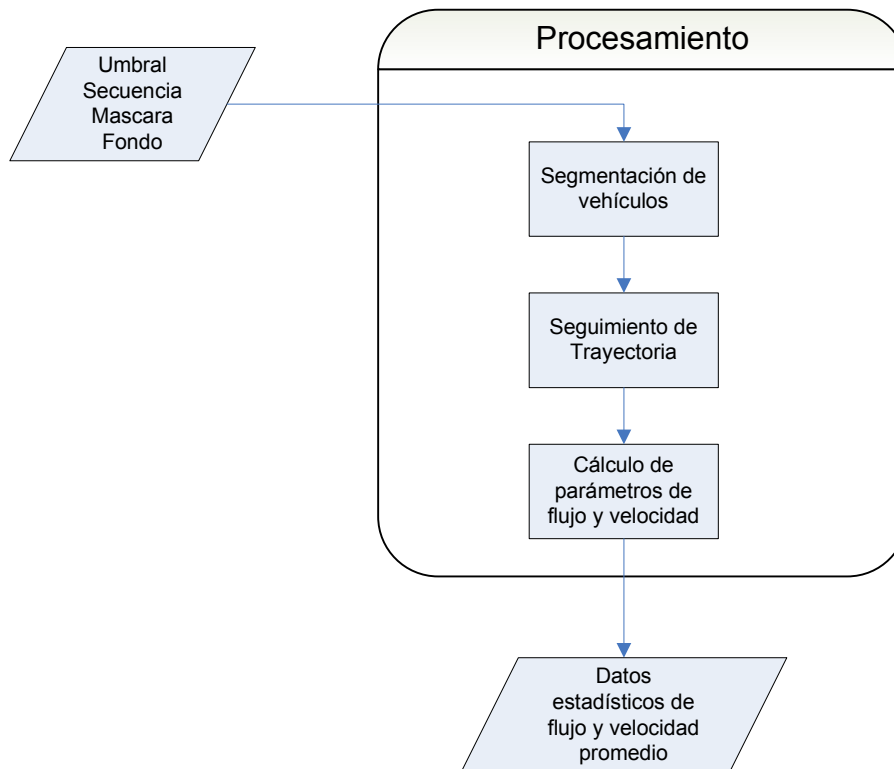


Figura3.6 Diagrama de flujo del procesamiento del video

#### 3.6.2.1 Segmentación de vehículos

El diagrama de flujo 3.7 describe el método utilizado para el proceso de segmentación.

Este método utiliza como base el método desarrollado por J. M. Wang, Y. C. Chung, S. C. Lin, S. L. Chang, S. Cherng, and S. W. Chen y descrito en el artículo citado [1]; en dicho trabajo, se utiliza para extraer la imagen de primer plano el siguiente principio; si a una imagen que contiene objetos en movimiento

se le resta la imagen que no contiene algún objeto en movimiento, el resultado será básicamente los objetos en movimiento<sup>26</sup>.

De este modo, la imagen de primer plano se obtiene en principio, de la resta del *frame* actual, con la imagen de fondo. La intensidad de los píxeles correspondientes al fondo luego de la resta sigue teniendo un valor por encima de cero debido a que el valor de cada uno es calculado como un promedio de su comportamiento en el tiempo, luego se va a presentar una mínima variación con respecto al valor del *frame* actual.

Para llevar a cero el valor de las intensidades de fondo y aislar los objetos en movimiento, es necesario realizar una binarización de la imagen mediante un umbral característico de cada video<sup>27</sup>.

Luego de la umbralización es inevitable que sean llevados a una intensidad correspondiente al fondo, pero se presentan como pequeños grupos de píxeles aislados que son eliminados aplicando un filtro majority<sup>28</sup> seguido por erosiones con elementos verticales y horizontales.

---

<sup>26</sup> El método utilizado en el presente trabajo para encontrar la imagen sin objetos en movimiento, mas conocida como la imagen de fondo, es explicada en la sección 3.6.1.2.

<sup>27</sup> El método utilizado para calcular el umbral en cada video se explica en la sección 3.6.1.6 y su justificación matemática se encuentra en la sección 2.1.5.

<sup>28</sup> Filtro morfológico que envía a 1 el píxel si sus vecinos tienen este valor. Se implementó mediante la operación `bwmorph` de Matlab

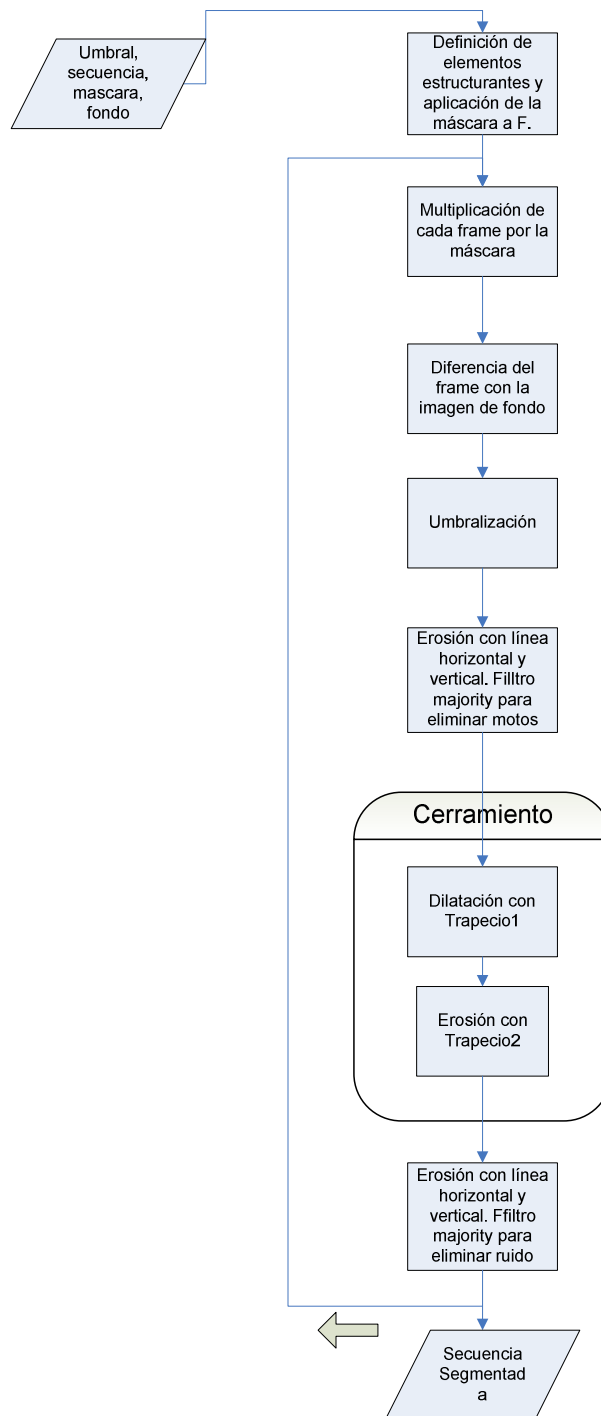


Figura 3.7. Diagrama de flujo de la segmentación de vehículos.

Es necesario hacer énfasis en una de las condiciones de captura mencionadas en la sección 3.3.1, la cual describe que lo anterior se cumple siempre y cuando la cámara se encuentre totalmente estática durante la grabación; si se presenta algún tipo de movimiento esto ocasionará la aparición de alto nivel de ruido una

vez realizada la umbralización y los siguientes pasos no serán llevados a cabo con éxito.

El siguiente paso se realiza con el fin de que para el algoritmo las motos no se tengan en cuenta o pasen desapercibidas y para eliminar posible ruido debido a movimientos leves de la video cámara, una erosión con una línea horizontal utilizada como elemento estructurante realiza dicha función; originalmente son pocas las motos que siguen presentes luego de la umbralización, siendo la causa de esto el color brillante de algunos chalecos utilizados por los motociclistas o el color blanco de su camisa o camiseta. Se utiliza una línea horizontal como elemento estructurante debido a que la región detectada para las motos es mucho más pequeña que la correspondiente a los vehículos, mas angosta y son mas largas que anchas, luego aplicando esta erosión y posteriormente un filtro majority son eliminadas en la gran mayoría de los casos; cuando no son eliminadas el algoritmo de seguimiento de trayectoria no las tiene en cuenta debido a que sus apariciones son aisladas.

La erosión anterior en los casos de auto pequeño ocasiona una partición del auto en dos, por lo que se requiere realizar un cerramiento del objeto<sup>29</sup>.

Para realizar el cerramiento de la imagen resultante para cada auto se utilizaron dos elementos estructurales en forma de trapecio, escogidos debido a su parecido con el parabrisas o el vidrio trasero del vehículo. Para la erosión se utilizó un trapecio un poco menos largo, pero igual de alto que el utilizado para la dilatación ya que en algunos casos al realizar la erosión la partición ocurría nuevamente.

Finalmente se vuelve a aplicar una erosión con una línea horizontal seguida por un filtro majority y erosiones con líneas verticales y horizontales con el objetivo de eliminar cualquier posible ruido o parte de alguna motocicleta aún detectada.



Figura 3.8. Segmentación de vehículos en movimiento

El algoritmo de segmentación presenta problemas con la detección de autos de color negro debido a que su principio de funcionamiento es que la intensidad de los píxeles del auto en el plano promedio entre rojo y azul creado, son en gran parte mayor a las intensidades de la carretera en ese mismo plano. Los autos de color negro siempre presentan intensidades muy por debajo de las que presentan los píxeles de fondo y no son detectados en la binarización por umbral.

<sup>29</sup> En la sección 2.2.1 se da a la explicación al tipo de elemento estructural utilizado.

### 3.6.2.2 Seguimiento de trayectoria

Inicialmente se creó un algoritmo que se denominó de *pretracking*<sup>30</sup> en el cual se encuentra para cada objeto segmentado un radio equivalente y las coordenadas del centroide geométrico que serán usados en el algoritmo de seguimiento de trayectoria.

El algoritmo de seguimiento de trayectoria de cada vehículo tiene como objetivo obtener un arreglo por cada vehículo en escena que contenga las coordenadas del centroide geométrico a lo largo de la escena capturada.

Se basa en la creación de una matriz de correspondencia por cada par de *frames* pertenecientes a la secuencia de video.

La construcción de dicha matriz por cada par de *frames* consecutivos, permitirá encontrar para cada vehículo segmentado, los objetos que posiblemente comparten su trayectoria en el *frame* siguiente, utilizando el criterio geométrico explicado en la sección 2.2.2 el cual tiene en cuenta a los objetos que se superpongan geoméricamente en dos *frames* consecutivos.

El tamaño de cada matriz de correspondencia se define por el número de objetos segmentados en cada *frame*. Por ejemplo, si en el *frame*  $t$ , se encuentran  $m$  objetos, y en el *frame*  $t-1$  se encuentran  $n$  objetos, la matriz correspondiente a estos dos *frames*, será de tamaño  $(m \times n)$ . A cada componente de la matriz se le asigna un valor dependiendo de si el objeto  $i$  del *frame*  $t$  se encuentra a una distancia que garantice que su figura se traslape con la del objeto  $j$  del *frame*  $t-1$ , caso en el que es probable corresponda al mismo vehículo y se asigna en esa ubicación de la matriz el valor absoluto de la diferencia de los radios equivalentes de los dos, medida alusiva a la distancia que existe entre estos. En caso de no garantizar esta condición, se asigna un valor  $\text{Max}$ <sup>31</sup>, que descarta cualquier posibilidad de que se trate del mismo vehículo.

Una vez construida dicha matriz se encuentra para cada objeto el objeto al que menor distancia se encuentre, entre los posibles encontrados. Si la distancia entre los dos no supera un umbral establecido previamente a través de pruebas experimentales<sup>32</sup> se asume que los dos objetos pertenecen a la misma trayectoria y se elimina la posibilidad de que alguno de los otros posibles objetos encontrados lo sea, asignando  $\text{Max}$  a los demás componentes de la matriz. Si la distancia entre los dos supera este umbral se busca la siguiente posible pareja con la menor distancia entre los dos y se realiza el mismo procedimiento. Si se encuentra que ninguna de las posibles parejas cumple se encuentran lo

---

<sup>30</sup> Término utilizado para referirse al algoritmo que se implementa justo antes del seguimiento de trayectoria.

<sup>31</sup>  $\text{Max}$  es un valor muy grande en comparación con las distancias entre los objetos encontrados. En el desarrollo se hizo  $\text{Max}=1000$ .

<sup>32</sup> En la sección 2.2.2 se mostrará la normalización de este umbral con respecto al tamaño de cada *frame*.

suficientemente cerca se asume como ruido y se procede a analizar la siguiente matriz. En cada matriz después del anterior procedimiento se comparan las coordenadas de las parejas encontradas con las coordenadas de las trayectorias ya creadas y se decide cada nueva pareja a que trayectoria pertenece, almacenando las coordenadas del nuevo centroide encontrado, en el vector de trayectoria correspondiente. A continuación se repite el proceso de búsqueda del valor más pequeño, hasta que este sea el valor Max, lo cual quiere decir que entre dos *frames* consecutivos no se encuentran más vehículos por relacionar. El algoritmo encuentra nuevas trayectorias en escena, lleva un conteo de cuantos vehículos han salido de escena y cuando todas las trayectorias se han creado, crea en una nueva variable la trayectoria de cada vehículo con el tiempo de aparición, asignando un cero en los *frames* en que esta no presenta componentes y elimina las que tienen menos de 4 componentes ya que seguramente se trata de una motocicleta que alcanzó a ser detectada en la segmentación o de una partición de un vehículo que se dio en algunos *frames* consecutivamente<sup>33</sup>.

---

<sup>33</sup> Iniciando la sección 3.6.1 se explica el criterio utilizado para escoger el tiempo de muestreo cada 4 *frames*.

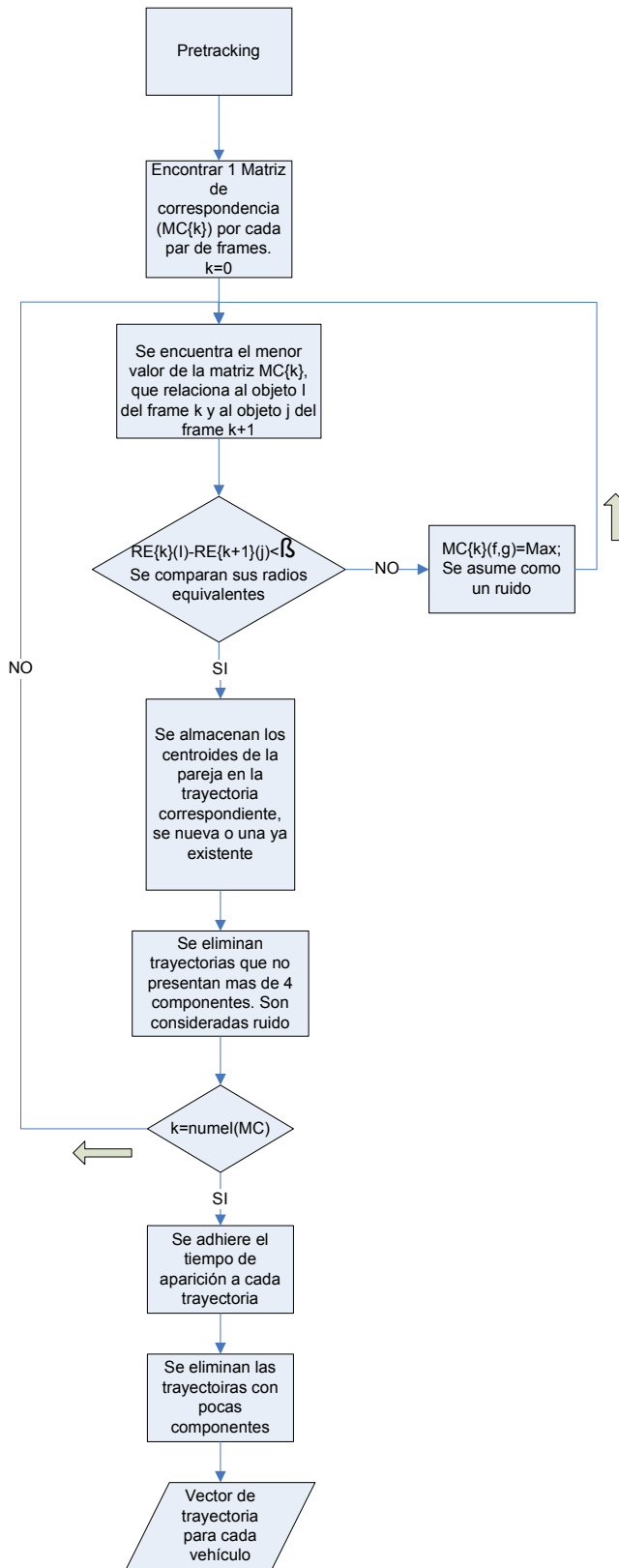


Figura 3.9. Diagrama de Flujo algoritmo seguimiento de trayectoria.

### **3.6.2.3 Cálculo de parámetros de flujo y velocidad**

Se realizaron pruebas de flujo para vehículos familiares y de pasajeros, como automóviles particulares, camionetas, buses, busetas, minivans. Se recuerda que las motos no son tenidas en cuenta, así como los autos de tonalidad negra y vehículos encarpados como camiones, ciertas camionetas y tracktomulas, debido a no presentar tonalidades relativamente uniformes. Debido a la corta disposición de la pistola radar marca facilitada por el departamento de tráfico del municipio de Floridablanca, se realizaron pruebas de velocidad promedio sólo con automóviles particulares.

#### **Flujo de tráfico**

Se obtiene el flujo de tráfico del número de trayectorias diferentes encontradas en el algoritmo de seguimiento de trayectoria.

#### **Cálculo de velocidad**

Una vez almacenadas las trayectorias del centroide de cada vehículo, éstas junto con el ajuste de curvas descrito en la sección 2.2.3 son las entradas al algoritmo de velocidad.

Se realizaron pruebas calculando una velocidad promedio en el trayecto en el que cada auto atraviesa las dos líneas centrales divisoras usando como referencia la distancia vertical conocida de 11 metros que tiene el trayecto. También se realizaron pruebas de velocidad instantánea utilizando el ajuste de curva exponencial descrito más adelante de las que se sacaron algunas conclusiones. De los dos métodos el que presenta mejores resultados es el de velocidad promedio, por lo que se explicará más detalladamente.

Es necesario encontrar la distancia equivalente en metros en la vía para una distancia dada en pixeles en la imagen.

#### **Interpolación de datos con ajuste spline cúbico**

La segmentación de las líneas divisoras de carril, el hecho que sus medidas sean medidas estandarizadas internacionalmente y la condición geométrica impuesta para la captura del video, en la que el borde inferior de la imagen coincide con el final de una línea divisora de carril, permite plantear un ajuste de curva para conocer la distancia en metros equivalente a un pixel en la imagen referenciadas al borde inferior de la imagen

El ajuste de curva desarrollado se describe con detalle en la sección 2.2.3, donde se ilustra la curva lograda con un ejemplo y en la tabla 2.1 se muestran la precisión de sus resultados.

#### **Velocidad Promedio**

La geometría de la escena típica y los cálculos realizados para encontrar la distancia recorrida por cada auto entre las dos líneas divisoras centrales se describen detalladamente en la sección 2.2.3, luego se dará por entendido y se continuará con el cálculo del tiempo transcurrido.

Si  $fps = 29.97$  [frames/seg]: Velocidad de captura del video conocida por las características del dispositivo de captura y calculada por el algoritmo que almacena el video.

$NF$  : Número de *frames* existentes entre los dos centroides más cercanos a  $lby$  y  $lay$  <sup>34</sup>.

Se asume que acá va incluido el cálculo que cambia este valor de acuerdo al tiempo de muestreo del video.

$time = NF / fps$  : Tiempo transcurrido en segundos para el trayecto de  $y1$  a  $y2$  <sup>35</sup>.

$drv$  : Distancia en metros entre  $(x1, y1) \rightarrow (x2, y2)$  <sup>2</sup>

$veprom$  : Velocidad promedio en  $km/h$  entre  $(x1, y1) \rightarrow (x2, y2)$

$$veprom = (drv / time) * 3.6 \quad [3.1]$$

A continuación se muestra una tabla de velocidades medidas con una pistola radar marca FALCON <sup>36</sup>.

Vel Radar km/h	Descripción vehículo	Veprom km/h	Error km/h	%Error
70	Taxi Spark	70.26	0.26	0.37
53	Megan Azul	54.73	1.73	3.26
59	Aveo Gris	60.28	1.28	2.17
62	Opra Rojo	62.45	0.45	0.73
65	Aveo Gris verdoso	61.32	3.68	5.66
55	Sprint Blanco	58.71	3.71	6.74
65	Megan Dorado	60.08	4.92	7.57
54	Mazda323Taxi	48.08	4.08	7.55
60	Hyundai plateado	55.48	4.52	7.53
53	Taxi Hyundai	54.14	1.14	2.15
68	Kia pequeño taxi	63.74	4.26	6.26
57	Hyundai elantra gris	58.02	1.02	1.79
67	Mazda 323 Blanco	66.16	0.84	1.25
73	Hyunday Elantra gris	70.97	2.03	2.78
48	Lofan Vino Tinto	53.54	5.54	11.54
45	Sprint Rojo	54.1	9.1	20.22
54	Renault 9 plateado	64.71	10.71	19.83
60	Chevrolet Wagor Vino tinto	71.5	11.5	19.16
52	Chevrolet Spark Rojo	63.41	11.41	21.94
38	Renault 12 Rojo	46.06	10.65	28.02
49	Renault Clio gris/dorado	61.54	12.54	25.59
54	corsa dorado	60.95	6.95	12.87
55	Renault 19 Rojo	61.79	6.79	12.34

<sup>34</sup> Se utilizará la notación utilizada en la sección 2.2.3

<sup>35</sup> Ver gráfica 2.25.

<sup>36</sup> Este dispositivo fue facilitado por el comandante de la dirección vial de Floridablanca, Ricardo Chacón. Su referencia es la FCC ID IVQK5. No se encontraron datos exactos de su tolerancia pero el fabricante ([http://www.saraviabravo.com/radares\\_halcon.htm](http://www.saraviabravo.com/radares_halcon.htm)) asegura exactitud todas las veces.

Tabla 3.1 Resultados pruebas velocidad promedio

La tabla anterior está subdividida en dos tipos de resultados. Los primeros 14 vehículos tienen un error de velocidad que no supera los 5 km/h y los 9 restantes tienen un error de 5 km /h en adelante hasta llegar en ocasiones a errores de 12.54 km/h.

La razón que se encontró para que en ciertos casos los resultados del algoritmo no fueran satisfactorios es que el vehículo presenta tonalidades de baja saturación que no resaltan lo suficiente con respecto a la imagen de fondo, ocasionando que los píxeles detectados sean menos y el objeto que se obtiene en la segmentación sea de tamaño menor al tamaño original del vehículo. Debido a que la distancia recorrida se encuentra por medio de la ubicación del centroide, si el auto no tiene la forma original, el centroide estará ubicado en un lugar diferente al que corresponde y la distancia recorrida tendrá un valor diferente a la real.

### Máxima velocidad detectada

El algoritmo desarrollado tiene un límite de velocidad que será detectado sin problemas ya que a medida que la velocidad promedio del auto aumenta, la distancia entre sus centroides entre dos par de *frames* aumenta y llegará un punto en que no sean considerados como una posible pareja en la matriz de correspondencia mencionada en el seguimiento de trayectoria debido a que no se sobrepone en dos *frames* consecutivos. El valor máximo de velocidad instantánea detectado se calculó de la siguiente forma:

En el límite en donde dos objetos se encuentran más distanciados y aún se sobrepone, la distancia entre sus centroides es la suma de sus radios equivalentes, luego, sea:

$v_{max}$  : máxima velocidad instantánea detectada.

$D_{max}$  : máxima distancia entre dos centroides de objetos que se traslapen en dos *frames* consecutivos.

$dt$  : tiempo existente entre un par de *frames* para un tiempo de muestreo de 4.

$Re1, Re2$  : radios equivalente de cada objeto en el par de *frames* consecutivos.

$NF$  : número de *frames* capturados entre dos frames segmentados a un periodo de muestreo de 4. Su valor es 5 para este caso.

$fps$  : *frames* por segundo capturados por la video cámara.

$$D_{max} = Re1 + Re2 .$$

$$dt = \frac{NF}{fps} [seg] = \frac{5}{29.97} [seg] . \quad [3.2]$$

$$v_{max} = \frac{D_{max}}{dt} * 3.6 [km / h] \quad [3.3]$$

Se observa en la ecuación 3.3 que  $v^{\max}$  depende de la suma de los dos radios equivalentes. Se sabe que el mayor valor para esta suma se obtiene en los primeros *frames* donde un auto acaba de entrar en escena, ya que este debido a la perspectiva disminuye su tamaño a medida que se aleja de la video cámara. Luego se decide calcular un valor de  $v^{\max}$  que caracterice a los automóviles, es decir los vehículos típicos para 5 pasajeros. Se analizaron pruebas con distintos de estos y se concluyó que los mayores valores de  $Re1$  y  $Re2$  llegan a 50 y 60. Luego el mayor valor de  $v^{\max}$  para detectado para esta clase de vehículos es de:

$$v_{\max} = \frac{110}{5/29.97} * 3.6[km/h] = 107.48[km/h]$$

Se considera este valor suficiente debido a las pruebas realizadas en donde no se observaron velocidades mayores a 75 km/h. Si se quiere aumentar este rango de velocidad máxima detectado se sugiere sacrificar el costo computacional y disminuir el periodo de muestreo.

### **Velocidad Instantánea**

Se entiende en este caso velocidad instantánea como la que se encuentra analizando dos *frames* consecutivos. En este caso en que el periodo de muestreo es 4 se sabe que el número de *frames* entre dos muestreados es de 5. Para encontrar la distancia recorrida se utilizó la función spline cúbica explicada en la sección 2.2.3 . Se obtiene con este método un conjunto de velocidades instantáneas para cada trayectoria.

Se observó que en todos los casos por lo menos una de dichas velocidades se acerca bastante a la velocidad real medida con la pistola y que en los casos en los que la velocidad promedio no es tan cercana, esta presenta mejores resultados. El inconveniente en usar este método radica en que solo una o máximo dos de las velocidades se acercan a la velocidad real y la ubicación en la imagen para estos *frames* varía para cada auto por lo que es imposible establecer un campo en el que siempre se detectarían las velocidades ya que para cada caso el lugar en el que presenta menos error es distinto. Por esto se decide utilizar el algoritmo descrito de velocidad promedio.

### 3.8 Interfaz gráfica

La herramienta final obtenida para el cálculo del flujo y velocidad del tráfico vehicular se presenta como una interfaz gráfica de usuario denominada FSC TOOL 9.0, desarrollada mediante Matlab,

A continuación se presentan las 3 ventanas principales que la conforman.

La figura 3.11 ilustra la ventana principal de la herramienta. Se muestran los términos y condiciones de uso de la herramienta en un cuadro de texto. En la figura 3.12 se observan las dos opciones que se presentan al usuario, la ejecución paso a paso y la denominada resultados finales. La ejecución paso a paso mostrada en la figura 3.13 permite al usuario avanzar a través de un diagrama de bloques, ejecutando una por una, las funciones que fueron desarrolladas y al mismo tiempo ver los resultados de la ejecución de cada una como los mostrados en las figuras 3.14 y 3.15, los cuales muestran la trayectoria de un vehículo y la segmentación de las líneas divisoras centrales, respectivamente<sup>37</sup>. La tercer ventana principal se observa en la figura 3.16, acá el usuario solo verá los resultados finales de seguimiento de trayectoria y velocidad; para seguimiento se muestra una gráfica que describe la trayectoria del vehículo en la imagen como la de la figura 3.15, además de visualizar en pantalla el número de trayectorias encontradas. Para velocidad promedio se muestra una imagen como la de la figura 3.18 por cada vehículo en escena que contiene la imagen del carro y la velocidad en km/h en forma de título en la parte superior. Para profundizar mas en los resultados obtenidos con la FSC TOOL 9.0 diríjase al apéndice A.

---

<sup>37</sup> Si quiere saber mas acerca de los resultados obtenidos en la ventana paso a paso vea el apéndice A. manual del usuario.



Figura 3.11. Ventana principal sin aceptar términos.

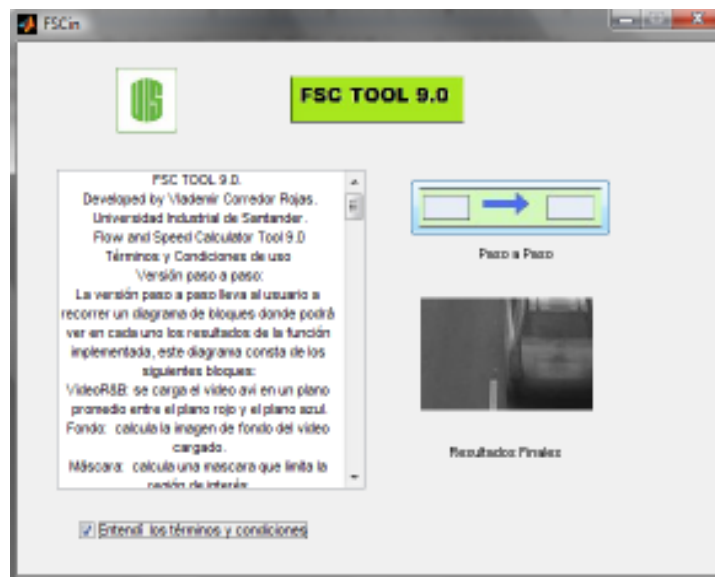


Figura.3.12. Ventana principal aceptando términos.

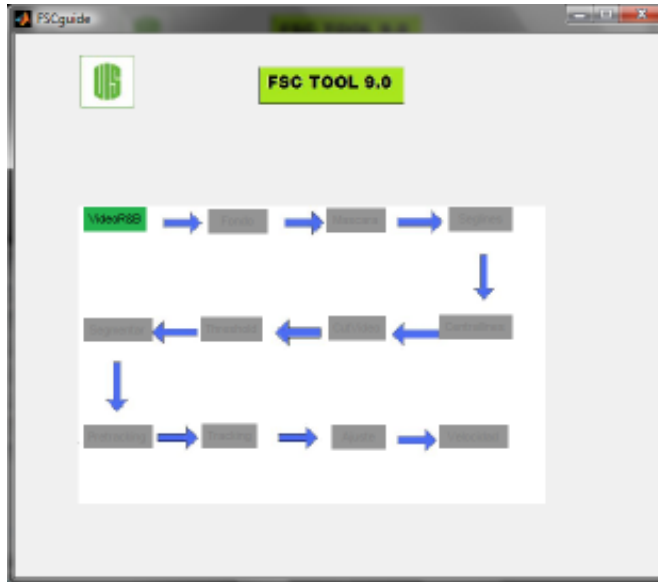


Figura 3.13. Ventana de desarrollo paso a paso.

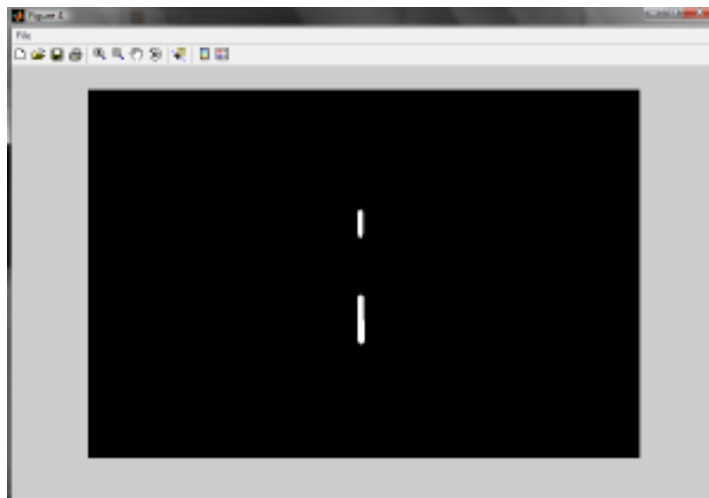


Figura 3.14. Resultado FSC tool 9.0 Líneas divisoras centrales

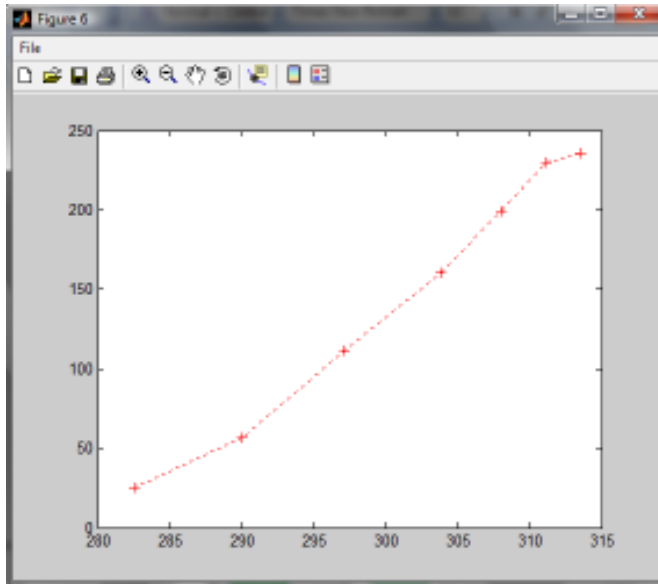


Figura 3.15. Resultado FSC tool 9.0. Trayectoria de un vehículo en escena



Figura 3.16. Ventana de desarrollo de resultados finales

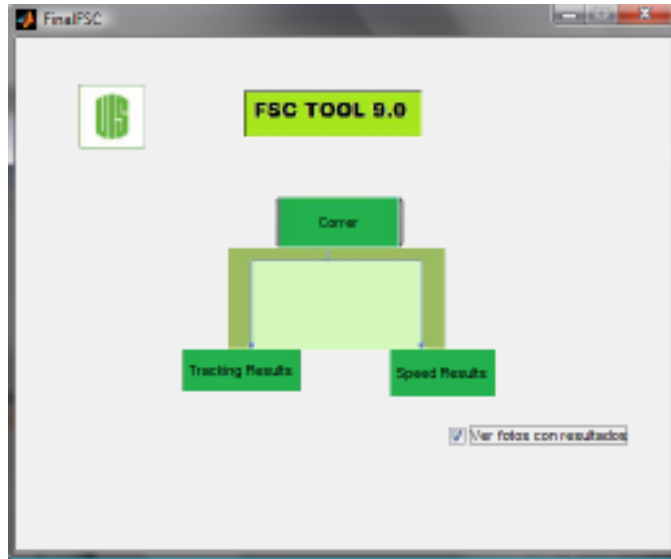


Figura 3.17. Ventana de desarrollo resultados finales con resultados activados

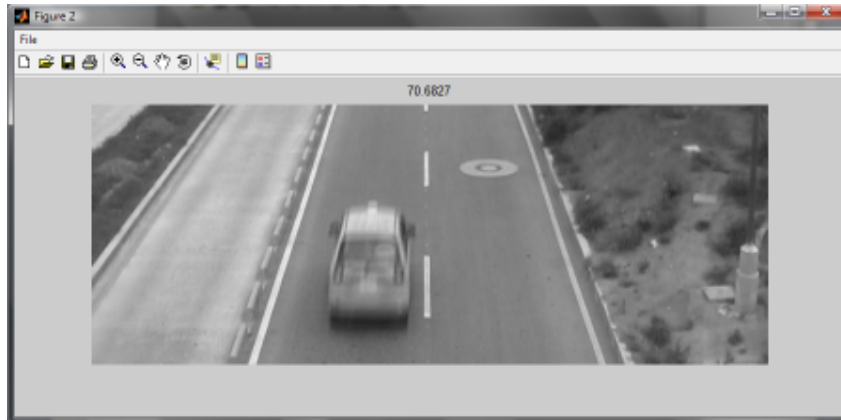


Figura 3.18. Resultados FSC tool 9.0. Velocidad promedio [km/h].

## CAPITULO 4

### 4. Observaciones y conclusiones

#### 4.1 Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló en la etapa de preprocesamiento un algoritmo para resaltar y caracterizar las líneas que demarcan la carretera mediante el principio de análisis de componentes principales, así como un algoritmo de generación de la imagen de fondo de la escena de tráfico, utilizando la moda estadística de un pixel en el tiempo. Para lo denominado procesamiento de la secuencia se desarrolló un algoritmo que segmenta los objetos en movimiento mediante la diferencia de cada *frame* con la imagen de fondo encontrada, resaltando de esta forma los objetos de primer plano, a los cuales se les realizó el seguimiento de trayectoria a través del tiempo mediante la creación de una matriz de correspondencia por cada par de *frames* consecutivos utilizando criterio de distancia entre los centroides de cada objeto segmentado y asignándolos como pertenecientes a una trayectoria mediante criterio de tamaño. El conteo o flujo de los vehículos se obtiene directamente del número de trayectorias encontradas y la velocidad promedio correspondiente a cada trayectoria se estima a partir de la segmentación de las líneas divisoras de la carretera, que permiten realizar la calibración de la escena gracias a ser un estándar internacional. La tolerancia de la herramienta en la velocidad se encuentra aproximadamente en un rango que va desde  $\pm 0.2$  km/h a  $\pm 13$  km/h, para una muestra de 50 automóviles particulares y que varía dependiendo de la semejanza entre la forma del auto segmentado y su forma original. Los autos con tonalidades mas saturadas presentan mejor respuesta al algoritmo de segmentación, logrando así una mayor semejanza y menor porcentaje de error en la medición de la velocidad. La velocidad máxima posible de detección es de 107 km/h aproximadamente.

La herramienta fue diseñada para calcular velocidades de todo tipo de vehículo como, automóvil de cualquier tonalidad menos negra , buses, busetas, minivans, camionetas, exceptuando las motocicletas y los vehículos encarpados como camiones ,ciertas camionetas y tracktomulas , debido a no presentar tonalidades relativamente uniformes.

Se impusieron ciertas condiciones geométricas para la captura del video que apuntan a que la escena contenga en toda su trayectoria vertical, pixeles pertenecientes a la carretera y a que la vía o región de interés seleccionada se encuentre relativamente centrada con respecto a todo el escenario; esto con el fin de realizar una correcta segmentación de las líneas divisoras de carril que son vitales en el cálculo de la velocidad.

El funcionamiento de la herramienta ha sido probado en horas del día y con leve lluvia.

## 4.2 Aportes

El presente trabajo da una solución inicial a un requerimiento de los departamentos de tráfico de cualquier ciudad del mundo; aunque existen en la industria mundial herramientas de alto desempeño, en nuestro país no se ha iniciado la implementación de sistemas de medición de parámetros de tráfico en base a video, ni se ha desarrollado una tecnología propia para su implementación. Luego se espera que los resultados obtenidos junto con las recomendaciones futuras sirvan de motivación a la academia y a la industria para indagar en el desarrollo de este tipo de tecnologías, con el fin de llegar a ser competitivos en el campo.

La herramienta desarrollada en el presente trabajo, encuentra una forma eficiente de calcular la velocidad promedio de un vehículo, basada en las líneas divisoras de carril presentes en toda vía que cumpla con los estándares internacionales, método hasta ahora no utilizado en la literatura relacionada o en trabajos similares. Lo anterior evita tener que realizar una calibración previa del dispositivo de captura, que implica mediciones de alta precisión o introducir marcas ajenas a la escena de tráfico a distancia conocida.

En cuanto a la segmentación de vehículos en movimiento, se encontró un método estadístico para encontrar automáticamente el umbral de binarización que aísla los vehículos del fondo, lo cual permite una detección acorde a las características de iluminación de cada video y permite optimizar la detección en cada caso; se considera esto un aporte ya que en los trabajos de investigación encontrados se habla de un umbral obtenido a través de experimentos.

## 4.3 Recomendaciones para trabajos futuros

Está claro que los problemas que se presentaron con el algoritmo de velocidad se deben a la segmentación realizada de los vehículos. Para obtener los mejores resultados de velocidad se debe trabajar en obtener una segmentación que contenga la forma de cada vehículo lo más parecido posible a la que muestra cada *frame* de la secuencia original y dar una solución a la no detección de autos oscuros o negros.

Se deben afinar los métodos para estimación de velocidad.

Es preciso realizar pruebas que validen o descalifiquen el desempeño de la herramienta en condiciones de lluvia y en horas de la noche y proponer soluciones a los problemas encontrados.

Así mismo se deben realizar pruebas con diferentes dispositivos de captura que tengan una calidad menor y mayor en imagen capturada al dispositivo usado y de esta forma sacar conclusiones de optimización de la herramienta y generalización de su funcionamiento con respecto a la video cámara usada.

Se recomienda realizar investigación y desarrollo en cuánto a clasificación de los vehículos segmentados.

Una vez solucionados los problemas anteriores o la mayoría de estos se propone llevar la herramienta a tiempo real mediante un sistema embebido.

Si se decide llevar la aplicación a tiempo real, se recomienda desarrollar un algoritmo de generación progresiva de imagen de fondo, como el implementado en [1] y de esta forma obtener una imagen actualizada con los cambios climáticos.

## BIBLIOGRAFIA

- [1]. J. M. Wang, Y. C. Chung, S. C. Lin, S. L. Chang, S. Cherng, and S. W. Chen. *Vision-based traffic measurement system* [pdf]. 17<sup>th</sup> International Conference on Pattern Recognition, IEEE Computer Society. 2004. Introducción. Disponible desde: <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [2]. Información obtenida directamente del comandante Gerardo Hernández, jefe de control vial de la dirección de tránsito de B/manga.
- [3]. Empresas canadienses en los países andinos. Embajada de Canadá en Colombia. 10 de Septiembre 2002. [http://geo.international.gc.ca/latin-america/colombia/whats\\_new/default-es.aspx?id=1654](http://geo.international.gc.ca/latin-america/colombia/whats_new/default-es.aspx?id=1654)
- [4]. Non-Intrusive Sensors. International Road Dynamics INC. [http://www.irdinc.com/products/sensors\\_accessories/non-intrusive\\_sensors/](http://www.irdinc.com/products/sensors_accessories/non-intrusive_sensors/).
- [5]. Interval Traffic Classifiers. International Road Dynamics INC. [http://www.irdinc.com/products/counters\\_classifiers/classifiers/](http://www.irdinc.com/products/counters_classifiers/classifiers/) >.
- [6]. Tun-YuChiang, WilsonLau. *Segmentation of Vehicles in Traffic Video* [pdf]. Stanford University. 2002. Disponible en: [http://www.stanford.edu/class/ee392j/Winter2002/student\\_projects\\_final.html](http://www.stanford.edu/class/ee392j/Winter2002/student_projects_final.html) >.
- [7]. Jesús Gonzales Villar, Pedro Gil de Diego. *Segmentación de vehículos en videos de tráfico*. Sigillum Universitatis Literariaehispalensis. 2006. Disponible en : <http://ma1.eii.us.es/miembros/armario/pid/t0506/pid17.htm>
- [8]. Microwave. International Road Dynamics INC. [http://www.irdinc.com/products/sensors\\_accessories/non-intrusive\\_sensors/microwave.php](http://www.irdinc.com/products/sensors_accessories/non-intrusive_sensors/microwave.php)
- [9]. In-Road Sensors. International Road Dynamics INC. [http://www.irdinc.com/products/sensors\\_accessories/in\\_road\\_sensors/](http://www.irdinc.com/products/sensors_accessories/in_road_sensors/)
- [10]. J. M. Wang, Y. C. Chung, S. C. Lin, S. L. Chang, S. Cherng, and S. W. Chen. *Vision-based traffic measurement system* [pdf]. 17<sup>th</sup> International

Conference on Pattern Recognition, IEEE Computer Society. 2004.  
Disponibile desde: <<http://ieeexplore.ieee.org>>.

- [11]. Andrés Jaramillo, Ronald Rodríguez, Daniel Sanchez. *Conteo de automóviles usando secuencias de video en formato avi* [pdf]. XII Simposio de Tratamiento de Señales, imágenes y visión artificial. 2007.
- [12]. Daniel J Dailey, F W Cathey, Suree Pumrin. *An Algorithm to estimate mean traffic speed using uncalibrated cameras*. Pdf . IEEE transactions on intelligent transportations systems, vol 1, No 2, june 2000.
- [13]. The world of traffic video detection. TRAFICON .Traffic video detection. <<http://www.traficon.com/page.jsp?id=115>>.
- [14]. J. M. Wang, Y.C.Chung and S.W.Chen, *Progressive background Image Generation*. Proc. of 15th IPPR Conf. on Computer Vision, Graphics and Image Processing, pp.858-865,2002. Traducción proporcionada por el autor.
- [15]. Yun-Seok Lee, Han-Suh Koo, Chang-Sung Jeong. *A straight line detection using principal component analysis*. Department of electronics Engineering, Korea University, Anam-Dong, Seongbuk-gu. Available at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). 22 june 2006.
- [16]. Bin Yu and Anil K.Jain. *Lane Boundary Detection Using A Multiresolution Hough Transform* .Dept of Computer Science Michigan State University, East Lansing, MI 48824 IEEE. 1997.
- [17]. Yue Hao, Shao Chunfu, Zhao Yi, Chen Xiaoming. *Study on Moving Pedestrian Tracking Based on Video Sequences*. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China. J Transpn Sys Eng & IT, 2007, 7(4), 47-51.<[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)>.

## **A. Manual del usuario de la herramienta**

### **FSC TOOL 9.0**

#### **Flow and Speed Calculator Tool 9.0**

##### **Versión paso a paso:**

La versión paso a paso lleva al usuario a recorrer un diagrama de bloques donde podrá ver en cada uno los resultados de la función implementada, este diagrama consta de los siguientes bloques:

**VideoR&B:** se carga el video avi en un plano promedio entre el plano rojo y el plano azul.

**Fondo:** calcula la imagen de fondo del video cargado.

**Máscara:** calcula una máscara que limita la región de interés.

**Seglines:** segmenta las líneas divisoras de carril, que son las líneas punteadas que separan la carretera en 2 carriles

**Centrallines:** aísla las dos líneas divisoras más centrales.

**Cutvideo:** obtiene una nueva secuencia de video recortada a un valor por encima y por debajo de las dos líneas centrales.

**Threshold:** calcula el umbral de binarización que será utilizado en la segmentación de los objetos en movimiento.

**Segmentar:** segmenta los vehículos en escena, excepto las motocicletas.

**Pretracking:** calcula el centroide y el radio equivalente para objeto detectado en cada frame.

**Tracking:** encuentra el vector de trayectoria para cada vehículo en escena.

**Ajuste y velocidad:** encuentra la forma de la curva que mejor describe el comportamiento de distancia en la imagen vs distancia en la vía y encuentra la velocidad promedio de cada vehículo en escena.

##### **Versión un paso:**

Esta versión realiza los cálculos de todas las funciones cuando el usuario oprime el botón correr. Una vez se realice todo el cálculo se activan los botones para mostrar los resultados de seguimiento de trayectoria y de velocidad promedio. En los resultados de seguimiento se muestra una gráfica que describe cada trayectoria encontrada y se imprime un mensaje con el número de vehículos en escena y para la velocidad promedio se muestra una gráfica que contiene una imagen de cada auto que atraviesa completamente la zona de detección con su velocidad medida en km/h en la parte superior. El usuario tiene que activar la casilla de verificación para ver las imágenes mencionadas, de lo contrario solo observará una gráfica con todas las velocidades encontradas demarcadas.