

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN

Facultad Politécnica



“MONITOREO COLABORATIVO DE TRÁNSITO
VEHICULAR BASADO EN APLICACIONES MÓVILES”

TRABAJO FINAL DE GRADO PRESENTADO POR

ALFREDO DANIEL CAMPUZANO ROMERO
Y RUBÉN DARÍO LÓPEZ ROJAS

COMO REQUISITO
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
EN INFORMÁTICA

ORIENTADOR:
ING. JOAQUÍN QUINTO LIMA MOLINARI

San Lorenzo - Paraguay.

Octubre de 2014

Índice General

Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	vi
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Justificación y Antecedentes	2
1.3. Objetivos	4
1.4. Organización	4
2. Sistemas de Información Geográfica	6
2.1. Datums, Proyecciones y Coordenadas	6
2.1.1. Sistemas de Coordenadas	7
2.1.2. Datums geodésicos	8
2.1.3. Proyecciones	10
2.2. Modelos de datos	12
2.2.1. Modelo de Datos Vectorial	12
2.2.2. Modelo de Datos Raster	13
2.2.3. Modelos de Datos de Red	14
2.2.4. Red Irregular de Triángulos (TIN)	15
2.3. Bases de Datos Espaciales	15
2.3.1. Análisis, procesamiento y consultas espaciales	16

2.3.2. Productos comerciales y de código abierto	17
3. Recolección de datos de tráfico	19
3.1. Tecnologías In-Situ	19
3.1.1. Tecnologías Intrusivas	20
3.1.2. Tecnologías No Intrusivas.	22
3.2. Tecnologías en vehículo o Floating Car Data (FCD)	24
3.2.1. FCD basado en GPS	25
3.2.2. Identificación por radiofrecuencia o sistemas de transpondedores	26
3.2.3. FCD basado en teléfono móviles	26
3.3. Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS)	29
3.3.1. Servicios a usuarios ITS	29
3.3.2. Arquitectura ITS	30
3.3.3. Planeamiento ITS	30
4. Map Matching	32
4.1. Definición del problema	32
4.2. Clasificación de algoritmos de MM	33
4.2.1. Algoritmos geométricos	35
4.2.2. Algoritmos topológicos	36
4.2.3. Algoritmos estadísticos	38
4.2.4. Algoritmos avanzados	39
4.3. MM en Aplicaciones Móviles.	43
5. Estimación de Tráfico	46
5.1. Parámetros del flujo de tráfico	46
5.2. Velocidad	47
5.2.1. Velocidad Local	48
5.2.2. Velocidad de Circulación	48

5.2.3. Velocidad de Viaje	48
5.2.4. Velocidad media local	49
5.2.5. Velocidad media en un tramo	49
5.3. Flujo	50
5.3.1. Variaciones de Volumen	50
5.3.2. Tipos de Medidas de Volumen	51
5.4. Densidad	52
5.5. Estimación de Tráfico en tiempo real	53
6. Arquitectura e Implementación de la Solución	55
6.1. Arquitectura	55
6.2. Implementación de la Solución Propuesta	56
6.2.1. Preparando la Base de Datos	57
6.2.2. Obteniendo el Floating Car Data	58
6.2.3. Map Matching	62
6.2.4. Estimación del estado actual del tráfico	62
Bibliografía	63

Índice de Figuras

2.1. Elipsoide que modela la superficie de la Tierra	8
2.2. Sistema de coordenadas de latitud y longitud	9
2.3. Desplazamiento de la latitud entre NAD83 y NAD27	10
2.4. Desplazamiento de la longitud entre NAD83 y NAD27	11
2.5. Tipos de proyecciones por forma	11
2.6. Modelo de datos vectorial	13
2.7. Modelo de datos raster	14
2.8. Red irregular de triángulos	16
3.1. Típicas configuraciones de detección intrusiva	20
3.2. Sistema de detección Weight-In-Motion	22
3.3. Configuraciones típicas de tecnologías no intrusivas	23
3.4. Comunicación con GPS	25
3.5. Triangulación de Antenas	27
4.1. Trayectoria y camino reconstruido mediante MM	33
4.2. Error en el algoritmo de punto-a-punto	35
4.3. Error en el algoritmo de punto-a-curva	36
4.4. Parámetros de un modelo oculto de Markov	41
5.1. Ilustración de Densidad	53
5.2. Típica información proveída por el mapa de tráfico de la DGT	54

6.1. Arquitectura del Sistema	56
6.2. Vista de Autotracks en un teléfono	59

Índice de Tablas

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La congestión del tránsito es uno de los problemas más serios que enfrentan las zonas urbanas del mundo hoy en día, el constante aumento del parque de automóviles, el alto uso de vehículos de transporte privado y la falta de planificación de las ciudades son algunos de los factores que deterioran la calidad de vida de los ciudadanos. Además, los países menos desarrollados no cuentan con sistemas integrados de control de tránsito debido al alto costo de inversión requerido, tampoco existen servicios proveídos por empresas privadas. Esta situación dificulta la utilización eficiente de las escasas y mal planificadas vías de tránsito existentes, es por eso que se hace evidente la necesidad de recolectar y analizar información sobre el tránsito de forma barata, sencilla y que requiera una mínima inversión.

En este trabajo se propone la implementación de un sistema que permitirá monitorear las condiciones del tránsito utilizando información proveída por dispositivos móviles en tiempo real. Para ello se estudiará el estado del arte de las técnicas de recolección, análisis y distribución de información de tráfico y se seleccionarán los mecanismos de monitoreo y análisis más adecuados a las necesidades y limitaciones de nuestro medio. Dicha información quedará disponible de forma pública y podrá ser utilizada en trabajos futuros para desarrollar soluciones que ayuden a mitigar la

problemática de la congestión vehicular.

1.2. Justificación y Antecedentes

Debido a que los países en vías de desarrollo no cuentan con infraestructura vial bien planificada y tampoco con tecnología instalada para monitorear el estado del tráfico, se hace necesario buscar una alternativa económica para obtener información de tráfico precisa y confiable. Los sistemas de información de tráfico basados en Floating Car Data han demostrado ser una alternativa viable para obtener esta información de forma económica y eficiente [1, 2].

Los sistemas existentes se basan en la utilización de vehículos de prueba equipados con sensores GPS. Para este propósito se han utilizado flotas de taxis [1, 2] y sistemas instalados por empresas de seguro en los vehículos de sus clientes [3]. Sin embargo en países menos desarrollados no existen programas de gobierno o iniciativas privadas que promuevan la utilización de este tipo de sistemas.

Teniendo en cuenta que el mercado de teléfonos móviles inteligentes equipados con sensores GPS está creciendo a un ritmo considerable, y que los automovilistas generalmente llevan consigo este tipo de teléfonos, surge la posibilidad de utilizar esta tecnología como una forma barata y sencilla de recolectar información. Este tipo de tecnología ya se ha usado en aplicaciones para el rastreo de vehículos [4], estimación del tiempo de llegada de buses [5] y estimación de tiempo de viaje [6]. Diversos estudios han demostrado la factibilidad de utilizar esta tecnología para estimar el estado del tráfico en tiempo real [7, 8], sugiriendo que una penetración de entre un 2 y 3 % es suficiente para proporcionar mediciones precisas de la velocidad del flujo del tráfico [8].

Para estimar el estado del tráfico primeramente se debe determinar la trayectoria de los vehículos por las calles de la ciudad, este proceso es conocido por el nombre de Map Matching. Existe una gran variedad algoritmos de Map Matching, desde lo más

sencillos, basados solamente en información geográfica [9], hasta los más complejos basados en modelos estadísticos y otras técnicas avanzadas [10, 11]. Debido a las limitaciones impuestas por las plataformas móviles (poca batería, baja conectividad, etc.) que se utilizan para obtener los datos, este trabajo se enfoca principalmente en la utilización de algoritmos especializados en procesar muestras relativamente dispersas y poco precisas [12].

Muchos sistemas actualmente se basan en la formación de redes ad-hoc entre los dispositivos móviles para distribuir la información de tráfico recolectada [13, 14]. Esto dificulta que los datos obtenidos sean procesados de forma adecuada y distribuidos a otros posibles usuarios que se encuentren fuera de estas redes ad-hoc. En este trabajo se propone una arquitectura centralizada de manera a que todo el procesamiento de la información y la distribución de la información sean manejados por un servidor dedicado.

Existen implementaciones comerciales y/o libres similares a la solución propuesta, sin embargo estos productos generalmente no se encuentran disponibles en los países en vías de desarrollo y además en la literatura no existen trabajos que presenten todos los detalles de diseño, arquitectura y resolución de cuestiones implementativas a la problemática estudiada. Los trabajos anteriores se enfocan generalmente en una sola parte de la problemática, ya sea en la recolección de datos, el análisis o la distribución de la información de tránsito, dejando de lado la arquitectura completa de los sistemas.

De esta forma se pretende llenar un vacío en el estado del arte al realizar un estudio completo de las técnicas utilizadas en la implementación de sistemas de información de tránsito, abarcando cada una de las partes involucradas, desde la recolección hasta la distribución de la información, y para cada parte, estudiando y aplicando las últimas técnicas publicadas en el estado del arte.

1.3. Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es construir un sistema que permita recolectar y procesar información del estado del tránsito vehicular en tiempo real a través de dispositivos móviles para ofrecer funcionalidades que ayuden al control y/o reducción de la congestión de tránsito.

Entre los objetivos específicos se puede citar:

- Estudiar el estado del arte de las técnicas de recolección de datos de tránsito con un enfoque particular en el área de Floating Car Data.
- Estudiar el estado del arte en técnicas de Map Matching utilizadas para procesar la información obtenida.
- Estudiar el estado del arte de técnicas de Distribución de la Información entre dispositivos móviles.
- Diseñar la arquitectura para un sistema que utilice las técnicas estudiadas de modo a recolectar, analizar, distribuir y utilizar la información del estado del tránsito vehicular.
- Implementar una aplicación móvil que se utilizará para recolectar datos de ubicación de los usuarios, distribuir la información de tránsito procesada y brindar soporte a los usuarios.
- Implementar un sistema centralizado capaz de recibir los datos de ubicación de los usuarios para determinar el estado del tránsito vehicular.

1.4. Organización

Este trabajo está dividido en 8 capítulos. El Capítulo 1 describe la justificación para realizar el trabajo, brinda una visión general de los desafíos existentes y define los objetivos que se desean alcanzar.

En el Capítulo 2 se presentan conceptos básicos sobre Sistemas de Información Geográfica y bases de datos espaciales.

El Capítulo 3 describe el estado del arte de las técnicas de recolección de datos, con un especial enfoque en las técnicas de Floating Car Data basadas en la utilización de dispositivos móviles.

En el Capítulo 4 se realiza un extenso análisis del estado del arte de los algoritmos de Map Matching utilizados para el procesamiento de la información recolectada.

En el Capítulo 5 se explican los parámetros, fórmulas y análisis realizados para derivar el estado del tráfico.

El ?? describe detalladamente la arquitectura de la solución propuesta, las técnicas seleccionadas para la recolección y el análisis de datos y los algoritmos utilizados en cada paso del proceso.

En el ?? se presentan las pruebas realizadas y se realiza un análisis de los resultados para verificar el funcionamiento del sistema.

Finalmente en el ?? se presentan las conclusiones y se proponen los posibles trabajos futuros.

Capítulo 2

Sistemas de Información Geográfica

Se conocen como Sistemas de Información Geográfica (SIG) a aquellos sistemas basados en computadoras diseñados para la recolección, mantenimiento, análisis y distribución de datos e información geográfica [15]. Un SIG es un sistema de hardware, software, personas, datos, organización y mecanismos institucionales para recoger, almacenar, analizar y difundir información geográfica [16].

Los SIG ayudan en el análisis y la toma de decisiones basadas en información geográfica y son aplicables en diversas áreas de la actividad humana como la planificación para el desarrollo de zonas urbanas y rurales, la delimitación de propiedades y el cobro de impuestos, el análisis del flujo del tráfico en ciudades, etc. En este capítulo se explican los conceptos fundamentales que sirven de base para el desarrollo del SIG propuesto en este trabajo.

2.1. Datums, Proyecciones y Coordenadas

La tarea fundamental de cualquier SIG es conocer e identificar de forma precisa la ubicación de los objetos de interés dentro de un mapa. En esta sección describimos los principios básicos que permiten definir esta ubicación y representarla en el mapa.

2.1.1. Sistemas de Coordenadas

El primer paso para definir la ubicación de los objetos es definir el sistema de coordenadas utilizado. Se denominan como *coordenadas* al conjunto de números que identifican de forma única a una posición dentro de un sistema de coordenadas. Estos números son representados generalmente como pares x,y en un plano cartesiano, o como valores de *latitud* y *longitud* en un sistema de coordenadas geográficas. Para definir el sistema de coordenadas geográficas se tienen en cuenta dos elementos principales: 1) el tamaño y la forma de la Tierra y 2) un conjunto de elementos de referencia a partir de los cuales se puede determinar la ubicación de cualquier otro objeto en la superficie de la Tierra.

La forma de la Tierra es modelada como un elipsoide achatado hacia los polos cuyo semieje mayor corresponde al radio en la dirección del ecuador y cuyo semieje menor corresponde al radio en la dirección de los polos. Los polos están definidos por el eje de rotación del elipsoide y el ecuador se define como el círculo a mitad de camino entre los dos polos, en un ángulo recto con respecto al eje polar, y que cubre la dimensión más ancha de la elipsoide (Ver Figura 2.1).

Los sistemas de coordenadas geográficas se componen de la *latitud*, que varía de norte a sur, y la *longitud*, que varía de este a oeste. Las líneas de longitud constante son denominadas *meridianos*, y las líneas de latitud constante son denominadas *paralelos*. Los paralelos son líneas paralelas entre sí en dirección este-oeste alrededor de la Tierra. Los meridianos son líneas que van de sur a norte y convergen en los polos. Por convención, el ecuador se toma como la latitud cero y las latitudes al sur y al norte varían en un rango de hasta 90° . Se toma como longitud cero al meridiano que atraviesa el Observatorio Real de Greenwich, en Inglaterra y las longitudes al este u oeste se especifican como ángulos de giro con respecto al meridiano de Greenwich, variando de -180° (oeste) a 180° (este) (Ver Figura 2.2).

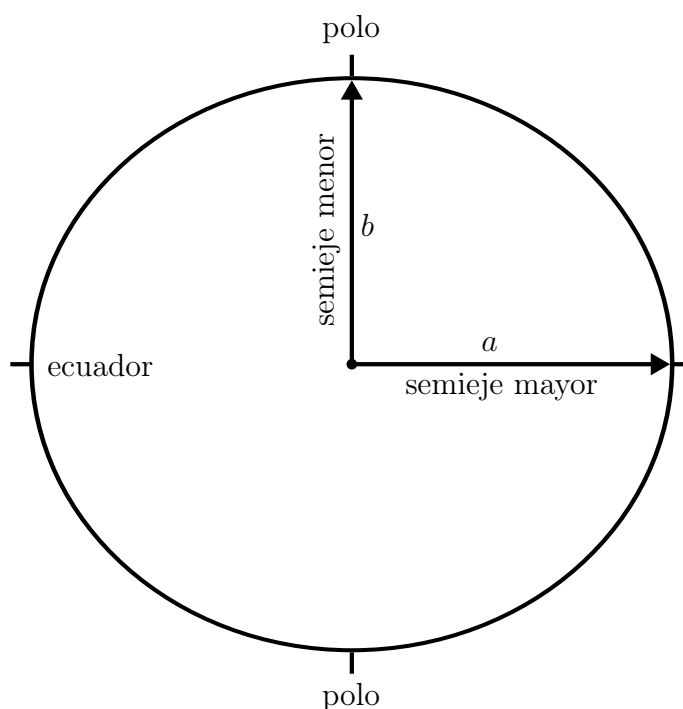


Figura 2.1: Elipsoide utilizado para modelar la superficie del planeta Tierra

2.1.2. Datums geodésicos

Con el sistema de coordenadas definido se procede a estimar las longitudes y latitudes de todas las demás ubicaciones a través de mediciones. Mediante estas estimaciones se establecen un conjunto de puntos de referencia para los cuales la latitud y la longitud han sido precisamente determinadas. Todas las demás coordenadas se miden en referencia a este conjunto de puntos. El conjunto de puntos resultante se conoce como *datum geodésico*. Un datum geodésico consta de dos componentes principales. El primer componente es un elipsoide con un sistema de coordenadas esféricas o cartesianas de tres dimensiones y un origen. La segunda parte consiste en un conjunto de puntos y líneas cuyas coordenadas han sido medidas cuidadosamente utilizando los mejores métodos y equipos [15].

A lo largo de la historia diferentes estudios han determinado diversos valores para los radios y el centro del elipsoide. Debido a errores de medición, diferencias en los métodos de cálculo y a que la tierra no es un elipsoide perfecto, diferentes

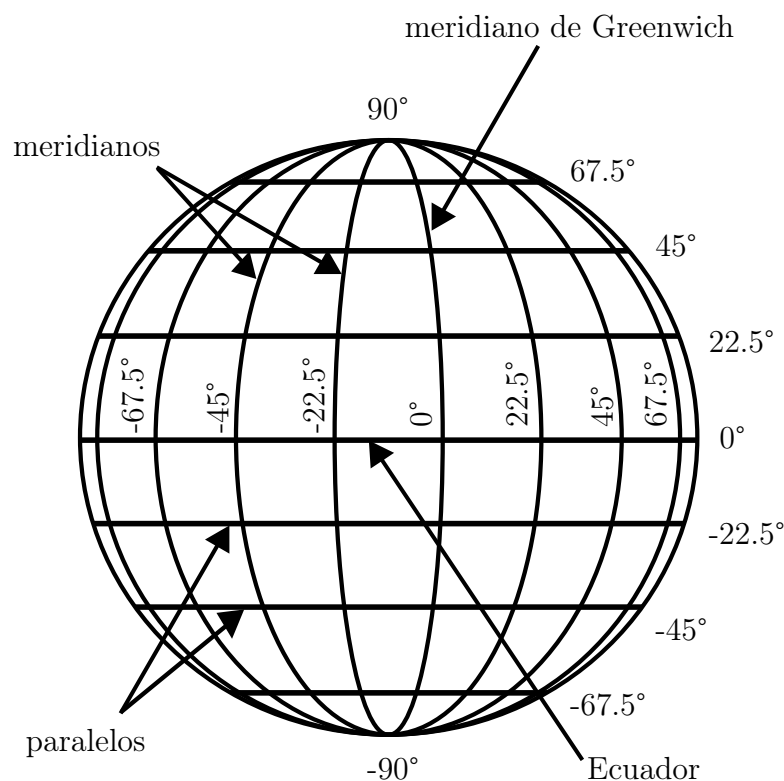


Figura 2.2: Sistema de coordenadas de latitud y longitud

estimaciones alrededor del mundo tienen ligeramente diferentes orígenes, ejes de orientación y radios. Estas diferencias aunque pequeñas, generalmente resultan en estimaciones bastante diferentes para las coordenadas de una misma localización, dependiendo del elipsoide utilizado. En la actualidad las mediciones globales y la avanzada capacidad computacional permiten estimar elipsoides aplicables de forma global.

El primer datum utilizado ampliamente en Norteamérica fue el North American Datum de 1927 (NAD27), su sucesor fue el North American Datum de 1983 (NAD83), las mejores estimaciones de las localizaciones de los puntos cambiaron en hasta 200 metros entre estos dos datums. En la Figura 2.3 se puede apreciar el desplazamiento de la latitud entre los datums NAD83 y NAD27 y en la Figura 2.4 se visualiza la diferencia de longitud entre los mismos. El World Geodetic System

de 1984 (WGS84) es un conjunto de datums globales desarrollado y utilizado principalmente por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y hoy en día es ampliamente aceptado y utilizado en todo el mundo [16].

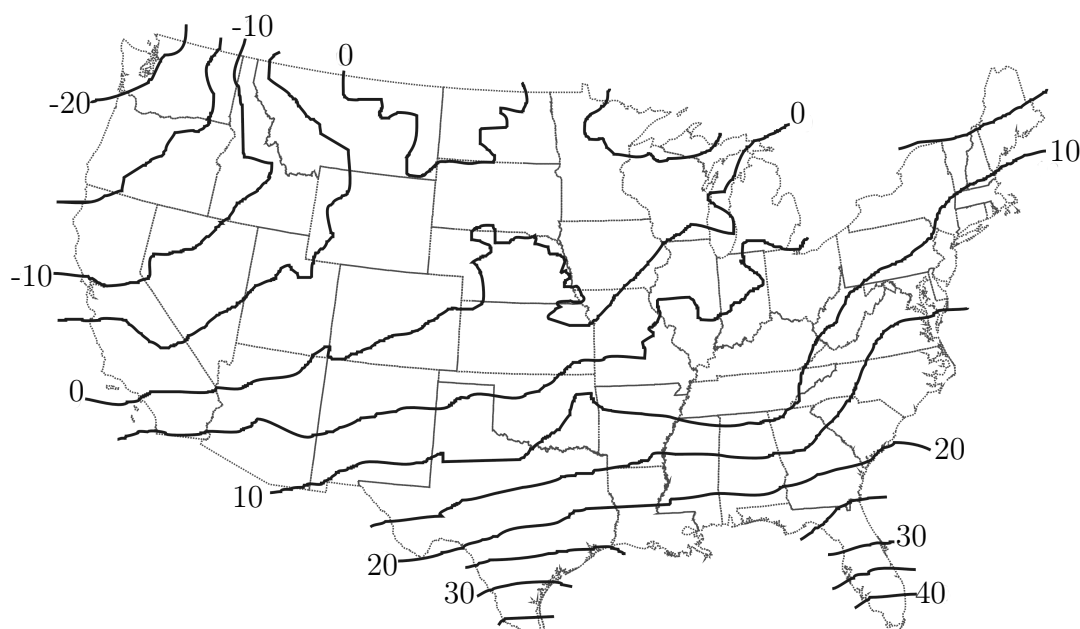


Figura 2.3: Desplazamiento de la latitud de los datums en metros, NAD83 menos NAD27

2.1.3. Proyecciones

Una *proyección* es una representación sistemática de las posiciones de la superficie curva de la Tierra sobre una superficie plana de un mapa. El mapa resultante sufre una distorsión debido a la traducción de una superficie curva a una plana. La proyección puede definirse por lo tanto como la transformación de una posición en la superficie de la Tierra, identificada por su latitud y longitud (φ, λ) a una posición en coordenadas cartesianas (x, y) . Cualquier proyección puede representarse como un par de funciones matemáticas:

$$x = f(\varphi, \lambda); \quad y = g(\varphi, \lambda)$$

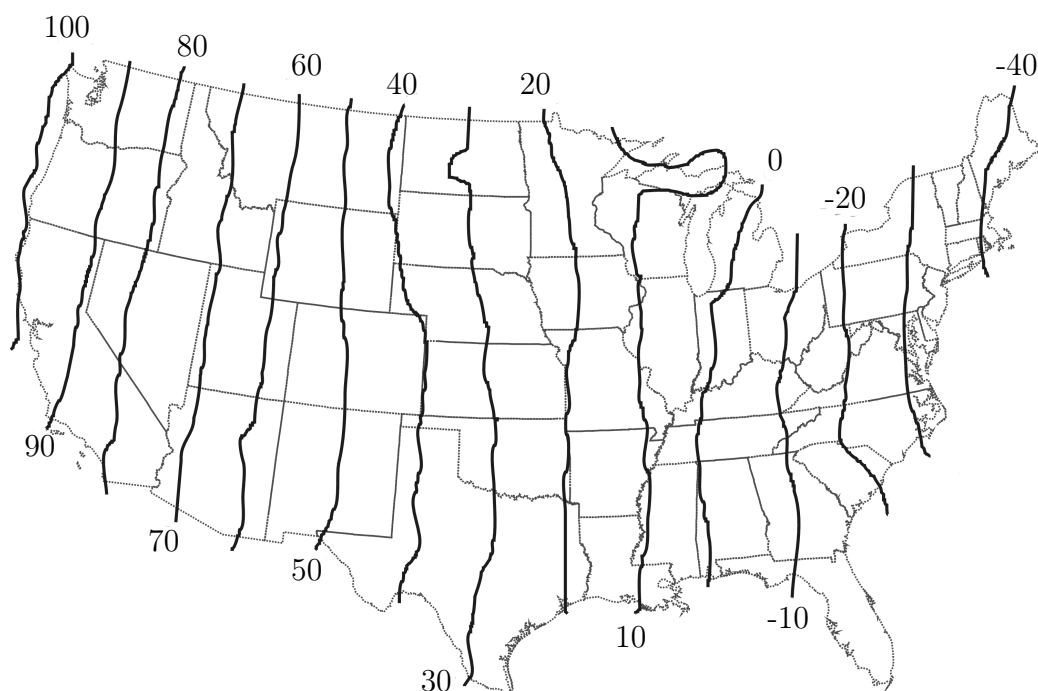


Figura 2.4: Desplazamiento de la longitud de los datums en metros, NAD83 menos NAD27

Las proyecciones se pueden clasificar de acuerdo a su forma, en *cónicas*, *cilíndricas* o *planas* (ver Figura 2.5) y de acuerdo a su orientación en *ecuatoriales*, cuando el eje de la proyección coincide con los polos, o *transversales*, cuando coincide con el ecuador.

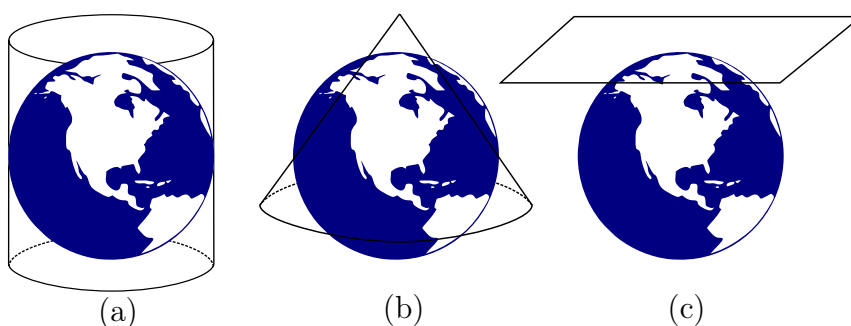


Figura 2.5: Tipos de proyecciones: a) cilíndrica, b) cónica y c) plana

Algunas de las proyecciones más importantes son la Proyección Cilíndrica Equidistante; la Proyección Conforme de Lambert (cónica), la Proyección Transversa de Mercator (cilíndrica) y el Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mer-

cator (UTM por sus siglas en Inglés), que está basada en la Proyección Normal de Mercator pero en lugar de ser tangente al ecuador es tangente a un meridiano.

2.2. Modelos de datos

Los fenómenos geográficos requieren de dos características para representar el mundo real; *qué* se está representando, y *dónde* está. Para lo primero comúnmente utilizamos conceptos como ‘ciudad’, ‘calle’, ‘río’, etc,. Los modelos de datos geográficos son los equivalentes formales de estos modelos conceptuales y definen las estructuras de datos abstractas que serán almacenadas en las bases de datos espaciales y manipuladas por el SIG [17].

2.2.1. Modelo de Datos Vectorial

En un modelo vectorial cada objeto del mundo real es representado como uno de tres posibles tipos de datos geométricos: *puntos*, *líneas* o *polígonos* (ver Figura 2.6). Un punto se representa de forma única por sus coordenadas (ciudades, puestos de salud, comisarías), las líneas se representan como una lista ordenada de coordenadas correspondientes a sus vértices (rutas, ríos y arroyos) y los polígonos se representan como uno o más segmentos de líneas que se cierran para formar un polígono (propiedades rurales, lagos, distritos). Las coordenadas que definen la geometría de cada objeto pueden tener 2, 3, 4 o más dimensiones. En algunos modelos de datos las figuras geométricas pueden ser representadas por curvas definidas por una función matemática (ej. curvas de Biézer).

Objetos del mismo tipo (ej. calles) normalmente son guardados en una tabla de base de datos en la que cada objeto ocupa una fila de la tabla y cada atributo del objeto corresponde a una columna de la tabla. En un SIG también se puede almacenar información topológica sobre los objetos, por ejemplo las relaciones de adyacencia y conectividad entre las calles o su sentido de circulación y su límite de

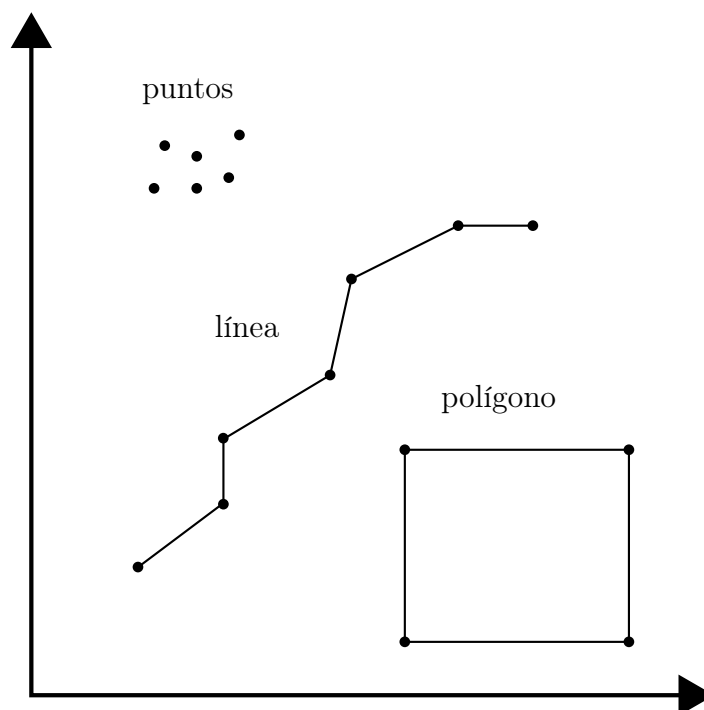


Figura 2.6: Modelo de datos vectorial

velocidad.

2.2.2. Modelo de Datos Raster

En una representación raster el espacio es dividido en una colección de celdas rectangulares, todas las variaciones geográficas son expresadas asignando propiedades o atributos a estas celdas. Este tipo de representación requiere que la superficie curva de la tierra sea proyectada en una superficie plana. Debido a que esto genera distorsiones, las celdas en una representación raster no son perfectamente iguales en forma o área a la superficie que representan. Cuando se usa este formato, toda la información acerca de las variaciones dentro de una celda es perdida y se asigna un único valor a toda la celda (Ver Figura 2.7).

Las celdas pueden contener atributos basados en diversos esquemas de codificación. Por ejemplo, un esquema de codificación simple puede asignar un valor binario, cero o uno, a cada celda para representar la presencia o ausencia de forestación en

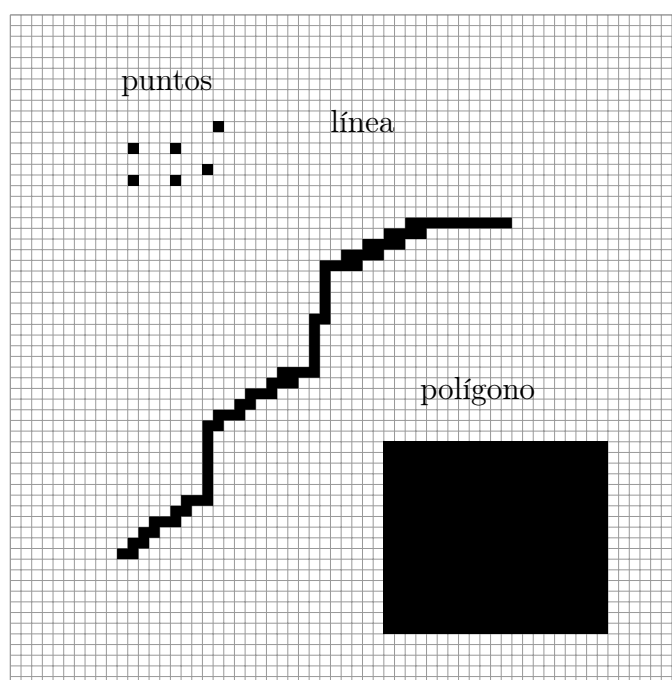


Figura 2.7: Modelo de datos raster

dicha celda. Múltiples atributos pueden ser guardados para cada celda en una tabla en la que cada columna es un atributo de la celda y cada fila representa a una celda en particular. Los datos usualmente son guardados en archivos comprimidos o en bases de datos relacionales.

2.2.3. Modelos de Datos de Red

El modelo de red es un tipo especial de modelo topológico que puede ser utilizado para modelar el flujo de bienes y servicios. En un SIG las redes son modeladas como puntos o nodos (ej. intersecciones de calles, fusibles, interruptores, válvulas de agua) y líneas (calles, líneas de transmisión y tuberías). Las relaciones topológicas de la red definen cómo las líneas se conectan entre sí en los nodos y también pueden definir reglas sobre cómo los flujos pueden moverse a través de una red.

Por ejemplo, en una red de calles que está compuesta por un conjunto de nodos (intersecciones de las calles) y líneas (las calles), así como las relaciones topológicas

entre las mismas (restricciones de giro en los nodos, sentido de las calles, límites de velocidad), la información topológica permite analizar el flujo de tráfico a través de la red y determinar los puntos más congestionados o calcular caminos más cortos de un punto de la red a otro.

2.2.4. Red Irregular de Triángulos (TIN)

Los modelos de datos geográficos descritos hasta ahora se utilizan para representar datos en una o dos dimensiones. Para representar superficies tridimensionales en un SIG se pueden utilizar modelos raster o redes irregulares de triángulos (TIN por sus siglas en Inglés). En los modelos raster cada celda almacena la altura de la superficie en una localización dada. En una estructura TIN se representa una superficie como una serie de elementos triangulares contiguos que no se superponen entre sí.

Un TIN es una estructura topológica que almacena información acerca de los nodos que conforman cada triángulo y sus triángulos vecinos. El triángulo está representado por una secuencia de tres nodos, cada nodo está definido por sus coordenadas x , y , z (Ver Figura 2.8). Los triángulos tienen como atributos su pendiente, orientación y área, los vértices tienen atributos de elevación y los bordes tienen como atributos su pendiente y dirección. Al igual que en los demás modelos de datos, cada triángulo puede tener otros datos o atributos asociados.

2.3. Bases de Datos Espaciales

Una base de datos espacial es aquella en la que están definidos tipos de datos especiales para representar objetos geométricos y permite guardar estos objetos, que usualmente son de origen geográfico, en tablas regulares de una base de datos. Además provee funciones e índices para consultar y manipular estos datos [18]. Las bases de datos espaciales no necesitan ser relacionales pero muchas de las más

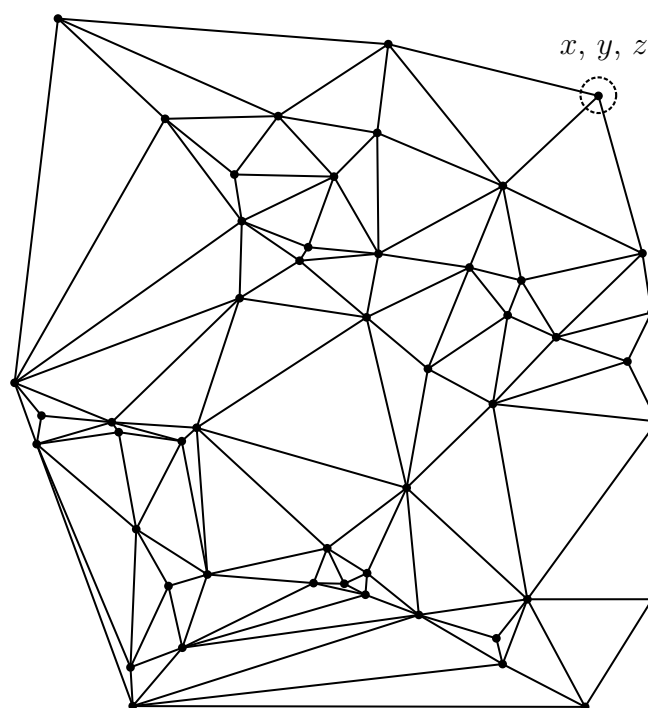


Figura 2.8: Red irregular de triángulos

populares lo son.

En las bases de datos espaciales se definen tipos de datos que representan puntos, líneas y polígonos a partir de los cuáles se pueden construir otros tipos de datos más complejos y representar objetos del mundo real. Estas bases de datos están especialmente diseñadas para representar información en dos dimensiones en formato vectorial, pero también pueden almacenar datos raster y topologías tridimensionales.

2.3.1. Análisis, procesamiento y consultas espaciales

Una consulta espacial es una consulta de base de datos que utiliza funciones geométricas para responder preguntas acerca del espacio y de los objetos en el espacio. Extensiones para bases de datos como PostGIS y Oracle Spatial agregan un conjunto de funciones a las ya existentes en el lenguaje SQL estándar que trabajan con objetos geométricos de forma similar a como las funciones estándar trabajan con las fechas.

Por ejemplo, existen funciones que indican la cantidad de tiempo que hay entre dos fechas o si una fecha dada corresponde al pasado o al futuro. De forma similar las bases de datos espaciales proveen funciones especiales que permiten obtener la distancia entre dos figuras geométricas, o el área total de un polígono. Las funciones espaciales también permiten crear y modificar objetos geométricos.

Existen estándares que definen este conjunto de tipos de datos y funciones espaciales. Open Geospatial Consortium (OGC) es un consorcio internacional de la industria cuyo objetivo es tratar de estandarizar la forma en que los datos geométricos y espaciales son accedidos y distribuidos. OGC cuenta con numerosas especificaciones que definen el acceso a los datos geoespaciales, servicios web para consulta y manipulación de datos, formatos de datos geoespaciales y consulta de datos geoespaciales.

2.3.2. Productos comerciales y de código abierto

Existen varias bases de datos espaciales disponibles en el mercado que implementan los estándares OGC, tanto de código abierto como soluciones comerciales. Entre las bases de datos de código abierto más populares podemos citar a SpatialLite/SQLite, PostgreSQL/PostGIS y MySQL. Los productos comerciales más populares incluyen a Oracle Spatial y SQL Server de Microsoft.

PostGIS es una extensión para PostgreSQL que agrega soporte para tipos de datos geométricos y funciones especiales convirtiendo a PostgreSQL en una base de datos espacial. PostGIS es un proyecto de código abierto que se publica bajo la Licencia Pública General de GNU. Además de los tipos de datos básicos provee otros tipos de datos más complejos como multi-polígonos, multi-puntos, multi-líneas y curvas geométricas. PostGIS 2 además agrega soporte para datos raster para y datos tridimensionales en formato TIN. De forma similar SpatialLite es una extensión para SQLite que agrega soporte para tipos de datos y funciones geométricas.

Oracle Spatial es una extensión para la base de datos Oracle que proporciona tipos de datos y funciones para la gestión de datos espaciales. Los tipos estándar y funciones de Oracle (CHAR, DATE, INTEGER, etc) se extienden con equivalentes geográficos. Oracle Spatial provee tres tipos básicos de figuras geométricas: puntos, líneas y polígonos (incluyendo polígonos complejos con agujeros), a partir de los cuáles se pueden construir estructuras de datos más complejas. Además, Oracle Spatial puede almacenar y administrar datos de tipo raster.

Capítulo 3

Recolección de datos de tráfico

Actualmente existen una variedad de tecnologías para la recolección automática de datos del tráfico. Según Mimbela y Klein [19] podemos dividir estas tecnologías en dos métodos. El primero, es la tecnología in-situ, que toma los datos del tráfico a través de detectores a lo largo del camino. Generalmente estas tecnologías de conteo de tráfico pueden dividirse en dos categorías: la intrusiva y la no intrusiva. Por el otro lado tenemos los datos flotantes del vehículo (FCD por sus siglas en inglés). FCD es una alternativa para obtener datos del tráfico de gran calidad y se está volviendo crucial para el desarrollo de nuevos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS por sus siglas en inglés).

3.1. Tecnologías In-Situ

En [20] se puede apreciar un gran número de sensores fijos para la detección del tráfico. Estas tecnologías de detección in-situ se dividen en dos categorías: tecnologías intrusivas, que están montadas en o por debajo de la superficie de las rutas y cuya instalación ocasiona la interrupción potencial del tráfico. En contrapartida, las tecnologías no intrusivas son montadas en o por encima de la superficie de las rutas, su instalación no genera interrupción del tráfico o lo hace en pequeña medida.

3.1.1. Tecnologías Intrusivas

Los tipos de sensores y la ubicación de los mismos se pueden observar en la Figura 3.1 El primer tipo de unidades son los sensores magnéticos pasivos o magnetómetros que pueden ser montados de forma permanente en hoyos a lo largo del camino, o pegados a la superficie de la ruta. Estas unidades se comunican a una estación de procesamiento cercana ya sea utilizando cables debajo del camino, o a través de comunicación inalámbrica. El sensor tiene una zona circular o elíptica de alcance de detección. Los magnetómetros monitorean la fluctuación en la fuerza del campo magnético, el cual cambia en presencia de objetos de metal moviéndose (automóviles).

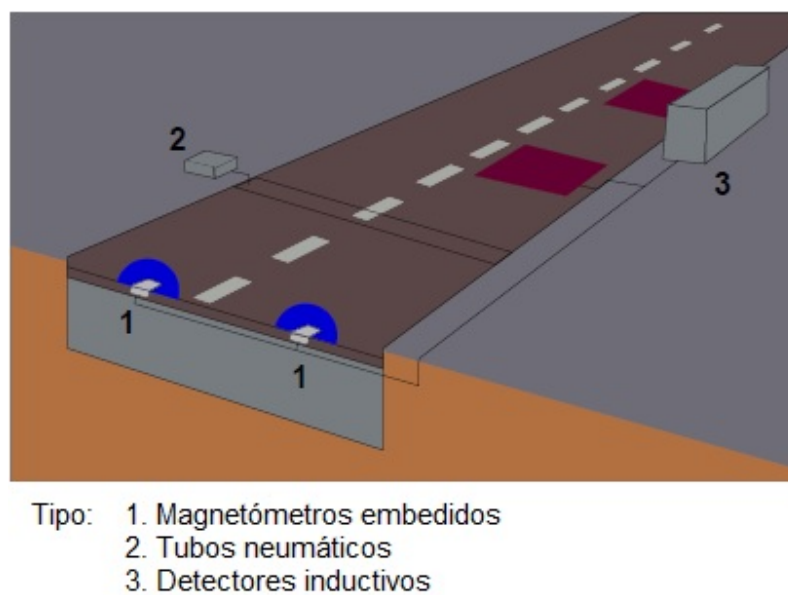


Figura 3.1: Típicas configuraciones de detección intrusiva

El segundo tipo de unidades utilizan tubos neumáticos que son extendidos a través de la calzada y se fijan en el lado de la acera en ambos extremos. Estos sistemas solamente se pueden implementar de forma temporal, debido a la naturaleza frágil de los tubos, que son fácilmente dañados por vehículos pesados o que se mueven a gran velocidad. Estos sensores envían una ráfaga de presión de aire a lo largo de un tubo de goma cuando un vehículo pasa por encima de los tubos. El pulso de

presión de aire cierra un interruptor de aire, produciendo una señal eléctrica que es transmitida a un contador. Tienen la ventaja de ser sistemas portables utilizando plomo-ácido, gel, u otras baterías recargables como fuente de energía.

El tercer tipo son los detectores de bucle inductivos (IDL por sus siglas en inglés). Consisten en rollos de alambre recubierto, enterrados en ranuras cortadas en la superficie de la carretera y sellados con masilla bituminosa. Los datos son enviados a través de un cable enterrado con los bucles hasta una unidad de procesamiento al borde de la carretera. La zona de detección para los sensores de bucle inductivo depende de la forma de corte de la ranuras del bucle. Los IDL son una tecnología barata y madura. La oscilación de la señal eléctrica es aplicada al bucle, el metal contenido en el chasis de un vehículo en movimiento cambia las propiedades eléctricas del circuito. Estos cambios son detectados por una unidad al costado del camino, que disparan un evento de vehículo.

El cuarto tipo de sistemas intrusivos es Weigh-In-Motion (WIM) mostrado en Figura 3.2, los detectores consisten en un sensor piezoeléctrico ubicado en un canal a través del camino. El sistema registra la tensión medida por los sensores y calcula la carga dinámica, la carga estática se calcula utilizando la carga dinámica y parámetros de calibración. Los parámetros de calibración dependen de factores como la velocidad del vehículo y el pavimento o la dinámica de suspensión que influencia en los cálculos de la carga estática. La precisión de los sistemas WIM puede ser expresada como función a la velocidad con que el vehículo pasa sobre las placas, asumiendo que el sistema está instalado en una carretera sujeta a las condiciones normales de tráfico. Estos sistemas son raros y se utilizan en ubicaciones específicas mayormente para el control de acceso.

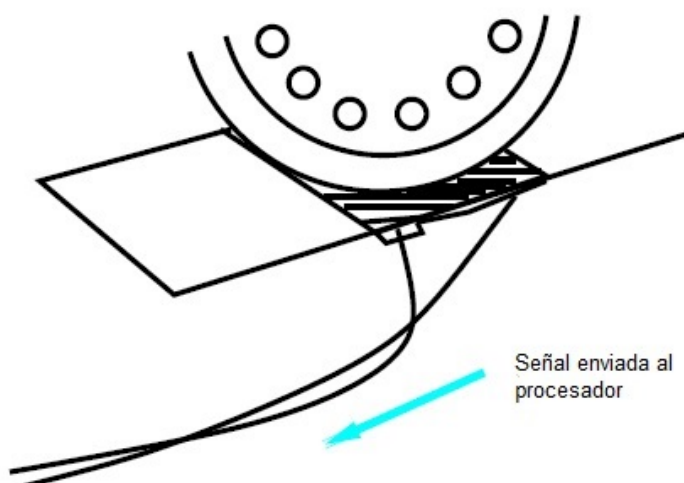


Figura 3.2: Sistema de detección Weight-In-Motion

3.1.2. Tecnologías No Intrusivas.

Las tecnologías no intrusivas incluyen recolección de datos por video, detectores infrarrojos pasivos o activos, radares de microondas, detectores ultrasónicos, detectores acústicos, detectores láser y fotografía aérea. Según el Dr. Mathew [21], todas estas tecnologías representan campos emergentes que se están expandiendo rápidamente con continuos avances en el procesamiento de señales. Actualmente estas tecnologías son utilizadas para proveer información suplementaria para lugares seleccionados o para aplicaciones específicas. La Mayoría de los sistemas no intrusivos son operacionalmente y en cierta medida visualmente similares, consistiendo en pequeñas unidades electrónicas montadas en contenedores a prueba de agua y colocadas en varias ubicaciones con se puede observar en la Figura 3.3.

El primer tipo de detectores no intrusivos son los montados al costado de la carretera. El detector procesa un campo de visión que cubre un área oblicua ya sea por encima o por debajo de la unidad. También existen múltiples zonas de detección definidas dentro del campo de visión, o la zona total de detección al igual que el campo de visión, dependiendo del tipo de detector específico y la tecnología utilizada.

Problemas de oscurecimiento ocurren cuando vehículos grandes cubren a vehícu-

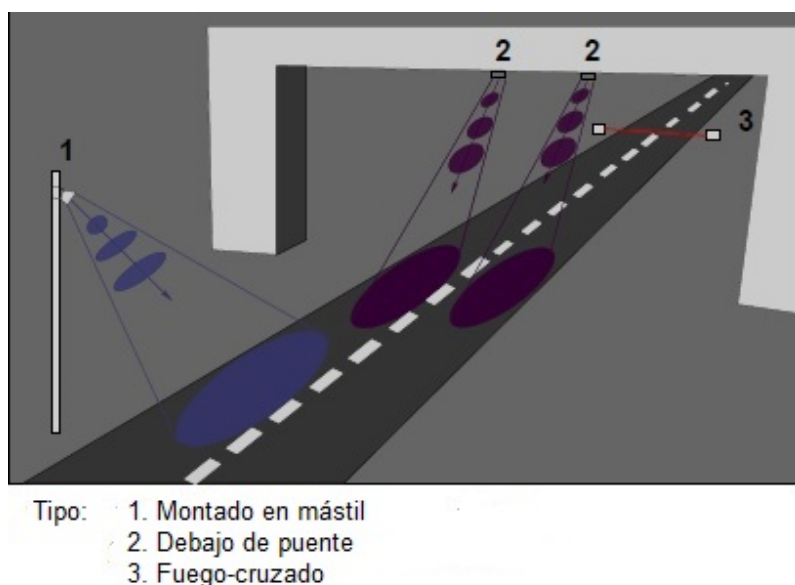


Figura 3.3: Configuraciones típicas de tecnologías no intrusivas

los pequeños del detector o cuando el campo de visión es muy grande, llevando a detección de vehículos afuera del carril deseado. El segundo tipo de detectores no intrusivos son montados debajo de puentes o portales, con un campo de visión justo por debajo de los mismos, o ligeramente oblicuo a la unidad. Finalmente, algunas unidades como los monitores de polución de camino abierto son montados a nivel del piso a los lados del camino, disparando un haz a través de la carretera. Estas unidades están sujetas al enmascaramiento de lado a lado y por lo tanto, son más adecuadas para un solo carril.

En la detección por imagen de video los parámetros del tráfico son recolectados a través del análisis cuadro por cuadro de las imágenes capturadas por las cámaras al costado del camino. Dependiendo de la tecnología de procesamiento, se pueden obtener prácticamente todos los parámetros del tráfico a través de análisis de video. Un problema con este sistema es que es susceptible al oscurecimiento y su rendimiento puede decaer con el mal clima o con bajas condiciones de luz.

Los sensores infrarrojos pueden montados por encima o al costado del tráfico dependiendo de la información que se quiera obtener con ellos. Estos sensores son

utilizados para obtener el volumen, la velocidad y el tipo de vehículos, como también a los transeúntes. Tienen la ventaja de ser menos susceptibles al mal clima. Cuando los sensores poseen una baja resolución la precisión en la velocidad y el largor de los vehículos tiende a ser bastante impreciso.

3.2. Tecnologías en vehículo o Floating Car Data (FCD)

En adición a la utilización de tecnologías in-situ, muchas aplicaciones de gestión de redes de tráfico utilizan dispositivos en los vehículos, generalmente conocidos como sistemas de ubicación automática de vehículo (AVL por sus siglas en inglés). Los dispositivos AVL proveen información de posición cuando un vehículo equipado con ellos pasa cierto punto de la red, o información continua a medida que el vehículo viaja a través de la red. Los anteriores sistemas se basaban en vehículos equipados con transpondedores que transmitían y recibían información de los dispositivos ubicados en la carretera. Los sistemas actuales se basan en la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés).

El principio de FCD es recolectar datos de tráfico en tiempo real ubicando los vehículos a través de teléfonos móviles o GPS en toda la red de caminos como se muestra en la Figura 3.4. Todos los vehículos equipados con con teléfonos móviles o con GPS actuarán como sensores para la red de caminos. Datos como la ubicación del vehículo, la velocidad y dirección del viaje son enviados de forma anónima un un centro de procesamiento. Después de la recolección y extracción, información útil como el estado del tráfico y rutas alternativas pueden ser distribuidas a los conductores del camino. FCD es una alternativa o más bien una fuente de información de alta calidad para las tecnologías existentes. Ayuda a mejorar la seguridad, eficiencia y confiabilidad de los sistemas de transporte. Se están volviendo cruciales en los

Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS por sus siglas en inglés).

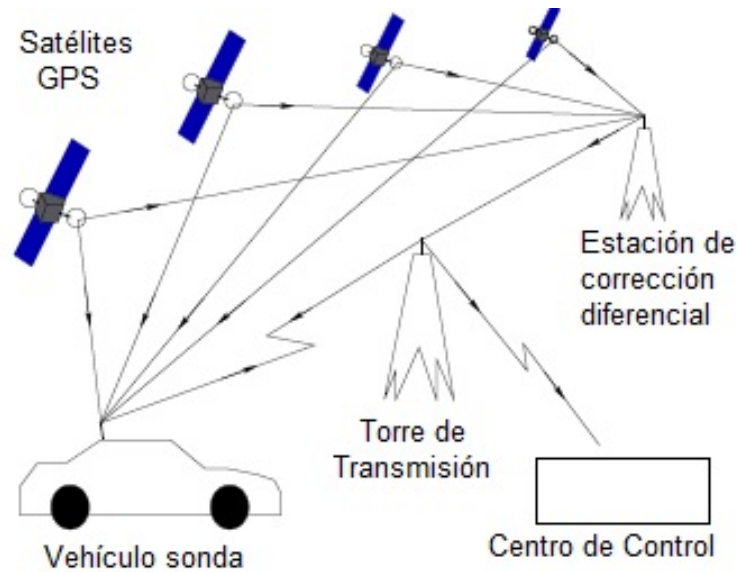


Figura 3.4: Comunicación con GPS

3.2.1. FCD basado en GPS

La tecnología GPS se está convirtiendo cada vez más útil y barata, va en aumento el número de autos equipados con sistemas GPS que le permiten ser ubicados dentro de la red de caminos. La precisión de la ubicación del vehículo es relativamente alta, típicamente menor a 30 metros. Generalmente, los datos del tráfico se obtienen de vehículos privados o camiones son más adecuados para autopistas y zonas rurales.

Actualmente, los datos de sondas GPS son utilizados como fuente para información en tiempo real de muchos proveedores de servicios pero sufre el limitado número de vehículos equipados y los costos de equipamiento comparados con el FCD obtenido de teléfonos celulares.

3.2.2. Identificación por radiofrecuencia o sistemas de transpondedores

La identificación por radiofrecuencia (RFID por sus siglas en inglés) es un método automático de identificación, confiando en el almacenamiento y recuperación de datos de áreas remotas utilizando dispositivos llamados etiquetas RFID o transpondedores. La tecnología requiere la cooperación entre lectores y etiquetas RFID. Una etiqueta RFID es un objeto que puede ser aplicado o incorporado a un producto, animal, o persona para el propósito de identificación y seguimiento utilizando ondas de radio. Algunas etiquetas pueden ser leídas desde varios metros de distancia y más allá de la línea de vista del lector.

Una etiqueta RFID se compone de un microchip para recolectar información y de una antena que transmite estos datos de forma inalámbrica a un lector. En su forma más básica, el chip contendrá un identificador serializado, o el número de matrícula, que identifica de manera única al objeto.

3.2.3. FCD basado en teléfono móviles

La rápida expansión de los teléfonos inteligentes y los múltiples sensores que poseen los mismos, los convierte en una fuente invaluable para la obtención de FCD. En los últimos tiempos un gran número de trabajos se centró en la utilización de dispositivos móviles para la detección del tráfico. La mayoría de los mismos aprovechando los sistemas de GPS, pero también han habido otros que utilizan las redes GSM, WiFi y hasta la tecnología bluetooth.

Ya en 2007, Scott Fraser [22] habla de la viabilidad de utilización de dispositivos móviles como alternativa a los métodos típicos de detección de tráfico. En aquel entonces uno de los problemas grandes encontrados era la precisión, ya que se utilizaba la triangulación de antenas (Figura 3.5) como método de ubicación, y el mismo tiene una precisión entre 50 y 200 metros. Posteriormente, con la llegada de los sistemas

GPS a los teléfonos inteligentes se mejoró bastante el problema de la precisión.

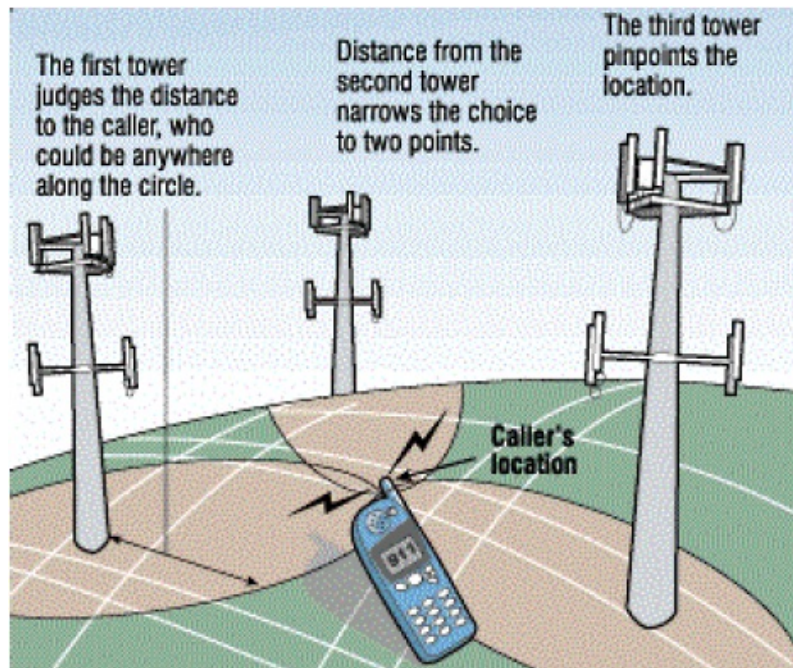


Figura 3.5: Triangulación de Antenas

A pesar de la baja precisión de los sistemas GSM para la ubicación de dispositivos móviles, se han realizado trabajos como CTrack [23] que utiliza solamente este método de triangulación de antenas celulares en lugar de GPS o WiFi que bien es sabido consumen un alto nivel de batería. En este método el consumo marginal de energía es cercano a cero. CTrack utiliza un nuevo Modelo Oculto de Markov de dos pasos que secuencía las huellas digitales GSM de los celulares sin convertirlas en coordenadas geográficas, y los fusiona con los datos de los sensores de bajo consumo de energía con los que cuentan la mayoría de los teléfonos inteligentes, incluyendo acelerómetros (para detectar movimiento) y compases magnéticos (para detectar giros). El sistema consiste en dos componentes de software, la librería para el teléfono y el servicio web. La librería recolecta, filtra y escanea los datos obtenidos de GSM y de otros sensores del teléfono y los transmite a través de cualquier red inalámbrica disponible al servicio web, que corre un algoritmo de mapeo de trayectoria sobre los datos recibidos.

Otro trabajo que busca un uso eficiente de energía es EnAcq [24]. El mismo presenta un nuevo método de adquisición de ubicaciones basado en un pareo de mapas mejorado que se centra en dos desafíos claves: datos imprecisos de trayectoria y consumo de energía. Para mejorar la precisión de los datos de la trayectoria, utiliza un algoritmo mejorado de pareo de mapas basado en modelos ocultos de Markov, que puede encontrar pares candidatos para cada punto sin usar una consulta de rango y determinar la ruta más probablemente seguida por el vehículo. Para evitar el consumo innecesario de energía, utiliza un periodo adaptativo para la toma de ubicaciones por GPS, este periodo de toma de posiciones se basa en el estado de movimiento actual del vehículo.

También existen trabajos que utilizan otros métodos para detectar la ubicación de los vehículos como la tecnología Bluetooth y las redes WiFi [25]. Donde se ven enfoques de bajo coste y gran escala para monitorear el tráfico, que aumentan el principio de FCD y permiten la detección de vehículos, transeúntes, ciclistas y pasajeros del transporte público para lograr datos espacio-temporales de tráfico por un aumento considerable de la base de datos subyacente.

Este nuevo enfoque se basa en un método para la ubicación anónima a través de la detección indirecta de objetos de tráfico (autos, ciclistas, transeúntes) usando las tecnologías WiFi y Bluetooth. Esto es ventajoso debido a que varios participantes del tráfico utilizan dispositivos con el WiFi o Bluetooth activado. Por ejemplo, un auto que está equipado con receptores específicos, detecta todos los objetos de tráfico que están dentro de un área a través del número de identificación de WiFi o Bluetooth. Este número de identificación se ve aumentado por las marcas de tiempo y la ubicación de los objetos de detección. Los datos medidos son procesados para obtener las trayectorias, tiempo de viaje, estado del tráfico, matrices de origen-destino y otros parámetros de tráfico.

3.3. Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS)

Los Sistemas Inteligentes de Transporte son la aplicación de tecnologías de computación, electrónica y comunicaciones con estrategias de administración de una forma integrada para proveer información de viaje para incrementar la seguridad y eficiencia de los sistemas de transporte en las rutas. Estos sistemas incluyen vehículos, conductores, pasajeros, operadores de rutas y administradores, todos interactuando los unos con los otros y enlazándose con la compleja infraestructura de los sistemas para mejorar la seguridad y capacidad de las rutas. Chowdhary y Sadek [26] hablan de los servicios al usuario, la arquitectura y el planeamiento de los ITS, que utilizados correctamente mejoran la seguridad y movilidad en el transporte y realzan la conectividad global en términos de mejoras en la productividad logradas a través de la integración de avanzadas tecnologías de comunicación en la infraestructura del transporte.

3.3.1. Servicios a usuarios ITS

Con el fin de implementar ITS, se desarrolla un marco destacando los varios servicios que los ITS pueden proveer a los usuarios. Una lista de 33 servicios a los usuarios ha sido proveída en el plan nacional ITS de los Estados Unidos. El número de servicios de usuario sigue variando con el tiempo cuando un nuevo servicio es añadido. Todos estos servicios están divididos en ocho grupos. La división de estos servicios está basada en la perspectiva de la organización y la distribución de funciones técnicas comunes. Estos ocho grupos de servicios se dividen de la siguiente manera:

- Gestión de los viajes y el tráfico
- Operaciones de transporte público
- Pago electrónico

- Operaciones de vehículos comerciales
- Sistemas avanzados de control y seguridad de vehículos
- Gestión de emergencias
- Gestión de la información
- Gestión del mantenimiento y construcción.

3.3.2. Arquitectura ITS

La arquitectura de los ITS provee un marco común para planeamiento, definición, e integración de los sistemas inteligentes de transporte. Especifica cómo los diferentes componentes de un ITS deben interactuar entre ellos para ayudar a resolver los problemas del transporte. Proporciona a los profesionales del transporte una gran variedad de opciones para hacer frente a sus necesidades. Identifica y describe varias funciones y asigna responsabilidades a las partes interesadas del ITS. La arquitectura debe cumplir con los siguientes requisitos:

Interoperabilidad, la arquitectura debe ser de tal manera que la información recolectada, la función implementada o cualquier equipo instalado pueda ser interoperable por varias agencias de diferentes regiones.

Capaza de compartir e intercambiar información. La información de las operaciones de tráfico puede ser útil en los servicios de emergencia.

Compartir recursos. torres regionales de comunicación construidas por diversas agencias privadas están obligadas a ser compartidas por las operaciones ITS.

3.3.3. Planeamiento ITS

El planeamiento ITS consiste en integrar ITS en el proceso de planeamiento del transporte. El planeamiento del transporte ayuda a dar forma a un sistema de

transporte bien balanceado que pueda cumplir con las demandas futuras. Es un proceso interactivo que incluye identificación de problemas, generación de soluciones, análisis, evaluación e implementación. Esto puede ser integrado con ITS utilizando computadores, sistemas de comunicación y software. Como el planeamiento es realizado normalmente para un periodo largo, la instalación de ITS debe ser actualizable y se debe asegurar que los equipos y tecnologías serán compatibles para futuras mejoras y expansiones.

Los pasos tradicionales en un planeamiento de transporte son los siguientes:

1. Establecer metas y objetivos
2. Inventario de las condiciones existentes.
3. Análisis de las condiciones existentes.
4. Elementos de largo y corto alcance.
5. Pronóstico del uso de la tierra, población y empleo.
6. Pronóstico de viajes futuros.
7. Desarrollo y evaluación de planes alternativos de transporte.
8. Preparación de planes y programas recomendados.

El proceso de planeamiento de transporte ITS difiere del tradicional, ya que los ITS tienen la capacidad única de integrar diferentes modos de transporte como el transporte público, tráfico, y elementos infraestructurales a través de comunicaciones y control. El potencial de integración multimodal ofrece una gran oportunidad para la planificación a través de los diferentes modos.

Capítulo 4

Map Matching

El proceso de Map Matching (MM) es utilizado en una gran variedad de servicios y aplicaciones SIG, como la predicción de trayectorias de los usuarios [27], los sistemas de navegación en vehículos [11], el control del estado del tránsito en tiempo real [4, 6] y muchos otros. En este capítulo se hace un extenso análisis de los algoritmos de MM existentes en la actualidad.

4.1. Definición del problema

Antes de realizar una definición formal del problema primeramente debemos definir algunos conceptos básicos.

Punto: Un punto es el conjunto de todas las mediciones recolectadas por el vehículo en un instante específico del tiempo. Estas mediciones incluyen la localización del vehículo, su dirección de desplazamiento, su velocidad, etc.

Trayectoria: Una trayectoria es una secuencia ordenada de puntos pertenecientes al mismo vehículo. La trayectoria corresponde únicamente a los puntos recolectados durante un viaje del vehículo.

Red de calles: Una red de calles es un grafo dirigido que representa la forma y las propiedades del sistema de calles de un área geográfica en particular. Los vértices del grafo describen las intersecciones entre las calles y las aristas representan la forma

y los atributos de las calles.

Camino reconstruido: Un camino reconstruido es una secuencia ordenada de calles conectadas entre sí a través de las cuáles el vehículo pudo haber transitado.

El problema de MM puede definirse de la siguiente forma: *Dada una trayectoria T y una red de calles R , encontrar el camino C que hace coincidir a T con su reconstrucción más realista sobre R .*

En la Figura 4.1 se puede apreciar en rojo la trayectoria de un vehículo sobre una red de calles y en verde el posible camino reconstruido por el cual transitó el vehículo.

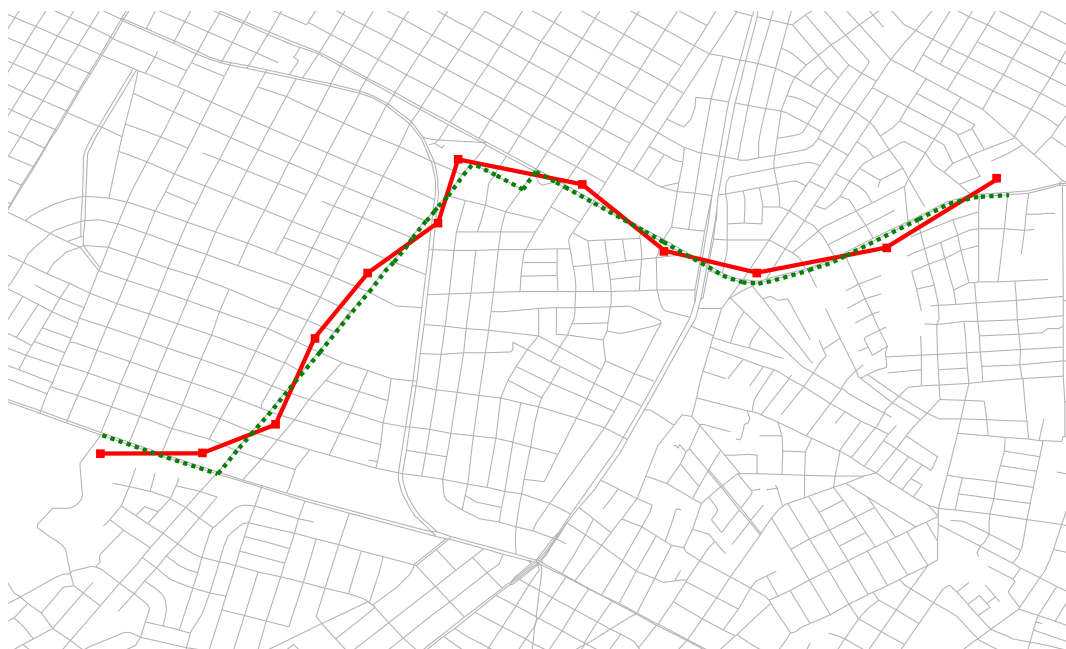


Figura 4.1: Ejemplo de trayectoria (rojo) y camino reconstruido (verde) mediante MM

4.2. Clasificación de algoritmos de MM

Los algoritmos de MM pueden clasificarse de acuerdo a la técnica utilizada en su implementación en: *geométricos*, *topológicos*, *estadísticos* y *avanzados*; de acuerdo al momento en que se realiza el procesamiento en: *incrementales* y *globales*; y de

acuerdo a la frecuencia con que se toman los puntos en: de *baja frecuencia* y de *alta frecuencia*.

De acuerdo a la información y las técnicas utilizadas en su implementación los algoritmos de MM se pueden clasificar en: 1) *geométricos*, que utilizan sólo la información de posición y distancia entre las calles y puntos [9], son sencillos de implementar y suelen utilizarse como paso inicial en la implementación de otros algoritmos; 2) *topológicos*, que incorporan información topológica de la red de calles [12, 28, 29, 30], utilizan información sobre la conectividad, restricciones de giro, sentido y límite de velocidad de las calles; 3) *estadísticos*, que definen regiones de probabilidad alrededor de cada punto y analizan los tramos dentro de dichas regiones [31], estos análisis estadísticos también se utilizan como parte de otros algoritmos y 4) *avanzados*, que combinan diversas técnicas geométricas, topológicas y estadísticas con otros conceptos avanzados como Filtros de Kalman, Modelos Ocultos de Markov, Lógica Difusa, entre otros [6, 10, 23, 24].

De acuerdo al momento en el que se realiza el procesamiento de los datos, existen dos categorías: 1) los algoritmos *incrementales* u *on-line*, que realizan el MM a medida que se va obteniendo cada nuevo punto [6, 23, 29, 30, 10], se utilizan en aplicaciones de tiempo real como asistentes personales de navegación y 2) los algoritmos *globales* u *off-line*, que realizan el MM luego de que se han recolectado todos los puntos [12, 28], se utilizan en aplicaciones de análisis de tráfico o estudios sobre el comportamiento de usuarios. Existen algoritmos que pueden ser adaptados para funcionar de manera local o global dependiendo de la aplicación para la que se utilizan.

Dependiendo de la frecuencia de muestreo se pueden identificar dos categorías: 1) los algoritmos para *alta frecuencia* o *high-sampling*, que típicamente trabajan con intervalos de muestra en el rango de los pocos segundos y generalmente se ejecutan de forma on-line [29, 30, 10] y 2) los algoritmos para *baja frecuencia* o *low-sampling*, que funcionan para intervalos de muestreo de varios minutos y se ejecutan generalmente

de forma off-line [12, 28]. En general todos los algoritmos pueden ser alimentados con muestras de alta o baja frecuencia pero ciertos algoritmos dejan de ser efectivos a medida que disminuye la frecuencia de muestreo.

4.2.1. Algoritmos geométricos

Los algoritmos geométricos fueron los primeros en ser desarrollados, son los más simples y rápidos pero a la vez son los más propensos a errores. Estos algoritmos tienen en cuenta únicamente la posición de los puntos y de los vértices y aristas que conforman la red de calles [32].

El algoritmo más sencillo se denomina de *punto a punto* [9], consiste en buscar para cada punto, el vértice dentro de la red de calles que sea el más cercano a dicho punto. Esta técnica es muy propensa a errores puesto que no se tiene en cuenta la conectividad entre los vértices seleccionados. Esta técnica implícitamente favorece a aquellas calles que tengan una mayor densidad de vértices, lo que puede llevar a resultados incorrectos. En la Figura 4.2 se puede apreciar cómo el punto p_0 es incorrectamente asociado al vértice b_1 cuando realmente está más próximo a la línea comprendida entre los vértices a_0 y a_1 .

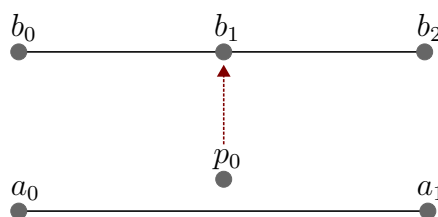


Figura 4.2: Error en el algoritmo de punto-a-punto

Otra técnica utilizada se denomina *punto a curva* [9], y consiste en buscar para cada punto, la calle (curva) del mapa más cercana a dicho punto. Como tampoco se tiene en cuenta la conectividad entre las calles, se pueden tener los mismos errores que con la técnica anterior. Esta técnica no es efectiva en zonas urbanas que tienen una mayor densidad de calles debido al margen de error de las localizaciones. En

la Figura 4.3 se puede apreciar cómo el punto p_4 es incorrectamente asignado a la línea comprendida entre los vértices b_0 y a_0 debido a que la distancia a esta línea es más corta que la distancia a la línea comprendida entre a_0 y a_1 .

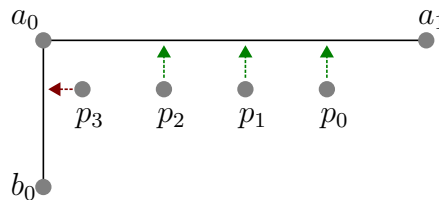


Figura 4.3: Error en el algoritmo de punto-a-curva

La última técnica dentro de esta categoría es conocida como *curva a curva* [9], y consiste en utilizar la técnica de punto a punto para identificar un vértice candidato para un punto, luego se seleccionan todos los tramos que se originan en dicho vértice y se calcula la distancia entre cada uno de estos tramos y la recta comprendida entre el punto actual y un punto siguiente. El tramo del mapa que resulta ser el más cercano es seleccionado como el tramo real que recorre el vehículo. Un tramo puede estar compuesto por una o más secciones de una calle en el mapa. La forma específica en que se definen estos tramos y la función que calcula la distancia puede variar entre implementaciones.

4.2.2. Algoritmos topológicos

Se conoce como *topología* a la relación entre las distintas formas geométricas (puntos, líneas, polígonos), entre estos elementos pueden definirse relaciones de adyacencia y conectividad. Los mapas de calles se representan generalmente como puntos y líneas, las líneas representan secciones de calles y los puntos representan intersecciones entre las calles. Además, los mapas digitales cuentan con información adicional como por ejemplo los límites de velocidad, restricciones de giro y sentido de circulación de las calles. Todos los algoritmos que incorporan este tipo de información en la reconstrucción del trayecto del vehículo se conocen como algoritmos

topológicos [32].

El algoritmo topológico desarrollado en [29] utiliza distintos criterios de similitud para determinar la mejor calle candidata para cada punto. Los criterios utilizados son la similitud en la orientación entre dos puntos consecutivos y la calle candidata, la proximidad entre la localización del punto y la calle candidata y el tamaño del ángulo comprendido entre la dirección de desplazamiento del vehículo (bearing) y la dirección de la calle candidata. Para cada calle candidata se realiza una suma ponderada de los criterios y se elige como mejor candidata a aquella con la mayor suma.

El mismo procedimiento es utilizado en [30] pero se agrega información adicional como la velocidad del vehículo y la posición relativa del punto con respecto al vértice más cercano. En este algoritmo el proceso para determinar si el vehículo sigue o no en la calle seleccionada anteriormente se aplica cada vez que el vehículo pasa por una intersección de calles. Ambos métodos requieren que se identifique correctamente la primera calle, para luego ir eligiendo las calles que tienen conexión con la misma. Un fallo en la elección inicial puede llevar a resultados incorrectos.

El algoritmo desarrollado en [12], conocido como ST-Matching, utiliza información geográfica y topológica para asignar un valor numérico a cada camino posible y luego selecciona el camino con el mayor valor. El algoritmo utiliza la técnica de punto a curva para determinar el conjunto de puntos candidatos para cada punto de la trayectoria. Existe un camino entre cada punto candidato y todos los puntos candidatos del punto siguiente, formando así todos los posibles caminos del vehículo. Para asignar el valor numérico a cada camino se tienen en cuenta dos tipos de análisis: a) el *análisis espacial*, en el que se calcula una probabilidad de observación para cada punto candidato y una probabilidad de transmisión entre cada par de puntos candidatos consecutivos y b) el *análisis temporal*, en el que se calcula la similitud entre la velocidad promedio entre dos puntos candidatos y las restricciones de velocidad del camino comprendido entre los puntos. Otros trabajos posteriores

han agregado diversas mejoras al algoritmo original, como un proceso de detección de localizaciones inválidas [33], la normalización del cálculo de la probabilidad de transmisión y la prevención de bucles en el camino final obtenido [34].

En [28] se propone un algoritmo basado en ST-Matching que incorpora además el concepto de “voto interactivo” para modelar la influencia mutua que tienen entre sí todos los puntos de la trayectoria del vehículo (a mayor distancia entre candidatos, menor la influencia). Para cada punto candidato existe un conjunto de caminos posibles que pasan por él, el objetivo es determinar cuál de los caminos es el óptimo para cada punto candidato, luego cada punto candidato vota por su “mejor camino” y finalmente se selecciona el camino óptimo global de acuerdo al resultado de esta votación.

Ambos algoritmos, [12] y [28], están específicamente diseñados para trabajar de forma off-line y con una baja frecuencia de muestreo. En [12] se menciona que es posible utilizar el algoritmo en aplicaciones on-line definiendo una “ventana” de localizaciones para las cuales se realiza el procedimiento de MM. En [33] se realizaron varias adaptaciones para utilizar el algoritmo en una aplicación de tiempo real, definiendo un tamaño de ventana de una localización, efectivamente convirtiendo el algoritmo global en un algoritmo incremental.

4.2.3. Algoritmos estadísticos

Los algoritmos estadísticos, también conocidos como probabilísticos, son aquellos que definen regiones de “confiabilidad” alrededor de las localizaciones y seleccionan una calle candidata de entre todas aquellas que están dentro de esta región [32]. Para determinar la región de confianza se tienen en cuenta los posibles errores originados por los sensores utilizados para obtener la localización y los errores en el mapa digital. Estos algoritmos también pueden utilizar información geométrica y topológica de la red de calles.

El algoritmo desarrollado en [31] toma en cuenta diversas fuentes de error asociadas con los sensores de localización, la trayectoria anterior del vehículo, la información topológica de las calles (conectividad y orientación de las calles), e información sobre la velocidad y la dirección del vehículo. Este algoritmo está específicamente diseñado para aplicaciones con requerimientos de tiempo real y con una alta frecuencia de muestreo. El algoritmo se divide en dos partes, a) el proceso de inicial de selección (Initial Matching Process), y b) el proceso subsecuente de selección (Subsequent Matching Process).

En el *proceso inicial* se define alrededor de la primera localización una región de confiabilidad rectangular o elíptica, si dentro de esta región no existe ningún candidato se asume que el vehículo está fuera de la red de calles, si existe más de un candidato se utiliza información sobre la conectividad de los candidatos y la dirección de desplazamiento del vehículo para determinar el candidato más apropiado. El *proceso subsecuente* es utilizado para determinar si en la siguiente localización el vehículo sigue viajando o no por la misma calle, para ello se intenta identificar si el vehículo ha hecho alguna maniobra de giro o si está atravesando una intersección de calles y en caso de que se detecte alguna de estas dos condiciones se vuelve a realizar el proceso inicial de selección para determinar la siguiente calle sobre la que esta viajando el vehículo.

4.2.4. Algoritmos avanzados

Los algoritmos avanzados son aquellos que combinan diversas técnicas topológicas, geométricas y estadísticas con otras técnicas avanzadas [32]. Las técnicas más utilizadas en los algoritmos implementados en los últimos años son la Lógica Difusa y los Modelos Ocultos de Markov.

Se conocen como Procesos de Markov a aquellos procesos estocásticos que cumplen con la condición de que la probabilidad de transición entre dos estados depende

única y exclusivamente del estado actual y no de la secuencia de estados anteriores. Existen diversos tipos de Procesos de Markov, por ejemplo las Cadenas de Markov, Los Procesos de Decisión de Markov y los Modelos Ocultos de Markov. Los Modelos Ocultos de Markov se caracterizan por el hecho de que los estados del sistema que está siendo modelado no pueden ser observados directamente, pero otros eventos dependientes de los estados sí son observables [35]. Cada estado (no observable) del sistema tiene una distribución de probabilidad asociada a cada evento (observable) de dicho estado, denominada probabilidad de emisión. El conjunto de todos los eventos observados puede ayudar a determinar cuáles fueron los estados que generaron dichos eventos. La Figura 4.4 muestra los parámetros de un Modelo Oculto de Markov.

En [36] se define un Modelo Oculto de Markov en el que se modelan los segmentos individuales de calles como los estados no observables del sistema y todos los puntos de la trayectoria del vehículo como los eventos observados a partir de dichos estados. El objetivo del algoritmo es que dada una secuencia de eventos observados (los puntos) se encuentre la secuencia de estados (calles) que generaron dichas observaciones. La probabilidad de emisión de cada punto disminuye a medida que aumenta la distancia entre el punto y la calle. Para obtener la probabilidad de transición se compara la distancia entre dos puntos consecutivos con la distancia del camino más corto entre dos de sus correspondientes calles candidatas. Se utiliza el algoritmo de Viterbi para calcular el camino óptimo a través del diagrama de estados del modelo. El algoritmo de Viterbi usa programación dinámica para encontrar rápidamente el camino que maximiza el producto de las probabilidades de emisión y de transición [37]. Este proceso de MM está diseñado específicamente para funcionar de forma off-line pero puede ser adaptado utilizando una “ventana” de localizaciones para funcionar de forma on-line.

Otra técnica utilizada en algoritmos de MM es la Lógica Difusa. A diferencia de lógica convencional en la que una proposición puede tener dos valores, verdadero o

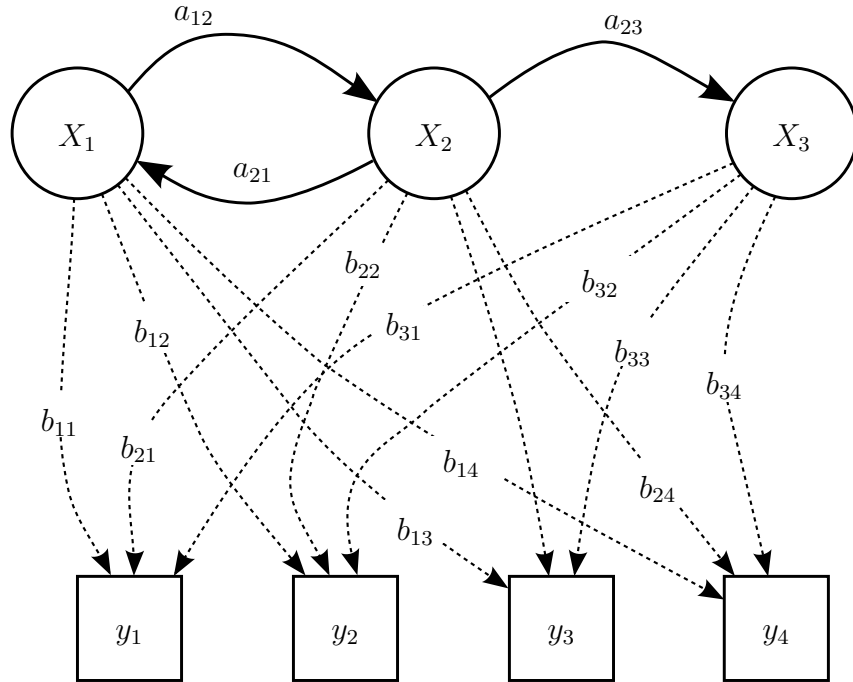


Figura 4.4: Parámetros probabilísticos de un modelo oculto de Markov:

- X : estados no observables
- y : eventos observables
- a : probabilidad de transición
- b : probabilidad de emisión

falso, en la Lógica Difusa las proposiciones pueden ser “parcialmente” verdaderas, oscilando entre ser totalmente verdaderas o totalmente falsas. Por ejemplo, podemos decir que la velocidad del vehículo es “alta”, o que el tiempo de viaje es “bajo”, en lugar de usar cantidades exactas. Para inferir resultados se utilizan reglas difusas, como por ejemplo “si la velocidad del vehículo es alta y el tiempo de viaje es bajo, entonces la congestión en la calle es baja”. Las variables de entrada son la “velocidad” del vehículo y el “tiempo” de viaje, y la variable de salida es la “congestión”. Consideremos por ejemplo la variable “velocidad” del vehículo, el valor de dicha variable se mide cuantitativamente en m/s y podemos clasificar la velocidad en tres posibles grupos: cero, baja y alta; cada posible valor de la velocidad corresponde en cierta

medida a uno de estos tres grupos. La función que determina el grado de pertenencia de un valor a cada uno de estos grupos se denomina “función de pertenencia”. El proceso completo consta de tres pasos: primero se convierten todas las variables de entrada a sus correspondientes valores difusos, a continuación se aplican las reglas de inferencia para obtener un resultado y finalmente se convierten los resultados nuevamente a un valor concreto. Una explicación más detallada se puede encontrar en [38]

El algoritmo propuesto en [10] funciona de forma muy similar al propuesto en [31] pues también está dividido en dos partes principales el: *proceso inicial* de selección y el *proceso subsecuente* de selección. El proceso subsecuente se divide a su vez en dos partes: el proceso de selección subsecuente *a lo largo de un enlace* y el proceso de selección subsecuente *en una intersección*. El proceso inicial se aplica para seleccionar la primera calle, a partir de ahí se aplica la selección a lo largo de un enlace para determinar si el vehículo sigue sobre la misma calle, cuando se detecta una intersección se aplica el proceso de selección en una intersección para determinar si el vehículo ha hecho una maniobra de giro. Para el proceso inicial se tienen en cuenta la velocidad, la dirección, la distancia perpendicular a la calle y el error horizontal del GPS. El proceso subsecuente a lo largo de un enlace tiene en cuenta la velocidad, la dirección, la lectura del giroscopio y otras variables más. Para el proceso de selección subsecuente en una intersección se aplican dos variables más, la conectividad de las calles y la distancia recorrida por el vehículo. Finalmente, para cada paso se determina la ubicación del vehículo sobre la calle teniendo en cuenta la proyección del punto sobre la calle, la velocidad y dirección del vehículo. El algoritmo está especialmente diseñado para aplicaciones de tiempo real (on-line) con una alta frecuencia de muestreo.

Existen muchas otras técnicas avanzadas que se utilizan en conjunto con algunas de las técnicas descritas anteriormente ya sea como parte del algoritmo, como un proceso previo o como una forma de verificación del resultado. Entre estas técnicas

podemos citar a la Distancia de Fréchet [39, 27], que determina la similaridad entre dos curvas y es utilizada en los algoritmos de curva a curva para determinar la curva a seleccionar. La Distancia de Fréchet también es generalmente utilizada para validar los resultados de los algoritmos. Otra técnica muy popular son los Filtros de Kalman y los Filtros Extendidos de Kalman [11], que generalmente se utilizan cuando existe una alta densidad de muestras y se desea realizar un paso previo para mejorar su calidad.

4.3. MM en aplicaciones móviles.

Los algoritmos de MM han sido utilizados en aplicaciones móviles para la planificación de rutas de viaje, asistentes de navegación personal, estimación de rutas de buses y para monitorear el estado del transito de forma cooperativa [4, 6]. Se han desarrollado además técnicas específicas para superar las limitaciones inherentes a las plataformas móviles como la baja precisión de los sensores de localización, baja disponibilidad de energía de la batería [23, 24].

En [6] se utiliza un algoritmo basado en un Modelo Oculto de Markov para determinar en tiempo real el camino que está recorriendo el usuario. Los datos de las localizaciones son enviados a un servidor central para determinar finalmente cuales son los caminos que tienen un mayor tiempo estimado de viaje. Los resultados son presentados tanto en la aplicación móvil instalada por el usuario como en una aplicación web. El algoritmo utiliza principalmente el GPS cuando está disponible pero también puede utilizar las localizaciones obtenidas mediante WiFi. Este trabajo demuestra que las localizaciones obtenidas mediante WiFi, si bien son menos precisas, son lo suficientemente confiables para realizar una estimación aceptable de los tiempos de viaje promedio en las calles y por consiguiente del estado del tránsito.

El sistema propuesto en [4] utiliza los sensores del teléfono, GPS, Wifi y acelerómetro para determinar si un usuario ha subido o no a un bus y a partir de ahí

estimar el tiempo de llegada del bus a otras paradas, con el objetivo de reducir el tiempo de espera de los pasajeros. Se propone un algoritmo de clasificación de actividad basado en el acelerómetro para detectar cuando un usuario ha subido a un vehículo. Una vez que se detecta que el usuario está en un vehículo la aplicación empieza a rastrear al usuario usando GPS o WiFi y utiliza las localizaciones para determinar si el usuario está o no en un bus. Las localizaciones son enviadas a un servidor central. A diferencia de todos los algoritmos, en este caso en lugar de un mapa digital de calles se utiliza solamente el mapa de rutas de los buses. Se realiza un análisis espacial y temporal para determinar el bus al que ha subido el usuario.

En [24] se propone un esquema de bajo consumo de energía para la adquisición de datos de localizaciones. Se utiliza un algoritmo mejorado basado en Modelos Ocultos de Markov para determinar la ruta por la que ha viajado el vehículo. Para evitar el consumo innecesario de energía se adopta un método de muestreo adaptativo GPS que ajusta el período de muestreo del GPS basado en el estado de movimiento actual del vehículo, sin embargo debido al algoritmo de MM utilizado, el tiempo de muestreo nunca es demasiado largo. Para mejorar el tiempo de ejecución del algoritmo se utiliza información histórica de las calles seleccionadas anteriormente, así como información topológica y restricciones de velocidad de las calles. El algoritmo está diseñado para funcionar de forma on-line y el proceso de MM se realiza en el teléfono móvil.

En [23] describe un algoritmo que utiliza solamente información de las antenas de telefonía celular GSM y no hace uso de otros métodos para obtener localizaciones como el GPS y el WiFi que consumen mucha mas energía. La utilización de esta fuente de datos supone un desafío muy grande pues la precisión de las localizaciones es muy baja. Para procesar los datos se utiliza un algoritmo de dos pasadas basado en Modelos Ocultos de Markov que combina la información de las antenas GSM con información de otros sensores de bajo consumo de energía como el acelerómetro (para detectar el movimiento) y el giroscopio (para detectar giros). El algoritmo funciona

de forma global y los datos son enviados y procesados en un servidor central.

Capítulo 5

Estimación de Tráfico

El tráfico vehicular, o simplemente tráfico, es el fenómeno causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. Cuando el flujo de tráfico es elevado en una zona particular, se produce la congestión del tráfico que deriva en pérdida de tiempo y consumo excesivo de combustible para los conductores.

La ingeniería de tráfico se refiere al análisis del comportamiento del tráfico para diseñar la infraestructura para un funcionamiento fluido, seguro y económico del tráfico [41] El flujo del tráfico, al igual que el flujo del agua, tiene una gran cantidad de parámetros asociados a él. Los parámetros del flujo de tráfico proporcionan información acerca de la naturaleza del flujo de tráfico, que ayuda al análisis en la detección de cualquier variación en las características del flujo. Entender el comportamiento del tráfico requiere un conocimiento profundo de los parámetros del flujo de tráfico y sus relaciones entre sí.

5.1. Parámetros del flujo de tráfico

El flujo de tráfico incluye la combinación del comportamiento de los conductores y vehículos. Debido a que el comportamiento de los conductores no es uniforme, la naturaleza del flujo de tráfico tampoco lo es. Es influenciada no sólo por las características individuales de los vehículos y conductores, sino que también por

la forma en que interactúan entre sí en grupos. Así, el flujo de tráfico a través de una calle con características definidas variará tanto por la localización y el tiempo correspondiente a los cambios en el comportamiento humano.

La ingeniería de tráfico, para propósitos de planificación y diseño, asume que estos cambios están dentro de ciertos rangos que pueden ser predecidos [42]. Por ejemplo, si la velocidad máxima permitida en una carretera es de 60 kilómetros por hora, se puede suponer que todo el flujo de tráfico se mueve a una velocidad promedio de 40 kilómetros por hora en vez de a 100 o 20 kilómetros por hora.

Los parámetros se pueden clasificar principalmente como: mediciones de cantidad, que incluye la densidad y el flujo de tráfico; y mediciones de calidad que incluye la velocidad. Los parámetros del flujo de tráfico pueden ser macroscópicos que caracterizan el tráfico como un todo o microscópicos que estudia el comportamiento de vehículos individuales. Las características principales en el flujo o corriente de tráfico son velocidad, flujo, y densidad [43]

5.2. Velocidad

La velocidad es considerada una medida de calidad del viaje ya que los conductores y pasajeros estarán más preocupados por la velocidad del viaje que por los aspectos del diseño del tráfico. Está definida por el desplazamiento por unidad de tiempo. Matemáticamente la velocidad v está dada por,

$$v = \frac{d}{t} \quad (5.1)$$

donde, v es la velocidad del vehículo en metros sobre segundos, d es la distancia recorrida en metros y t el tiempo en segundos. La velocidad de diferentes vehículos variará con respecto al tiempo y el espacio. Para representar esa variación, varios tipos de velocidad pueden ser definidos. Los más importantes entre ellos son la velocidad local o instantánea, la velocidad de circulación, la velocidad de viaje, la

velocidad media local y la velocidad media en un tramo [43]

5.2.1. Velocidad Local

La velocidad local es la velocidad instantánea de un vehículo en una ubicación específica. La velocidad local puede ser utilizada para diseñar la geometría del camino como curvas horizontales y verticales, elevación, etc. La ubicación y el tamaño de las señales, el diseño de las señales, la velocidad segura, y la determinación de la velocidad de la zona requieren la velocidad local. El análisis de accidentes, mantenimiento de caminos, y la congestión son campos modernos de la ingeniería de tráfico que utilizan los datos de la velocidad local como entrada básica.

5.2.2. Velocidad de Circulación

La velocidad de circulación es la velocidad promedio mantenida en un curso en particular mientras el vehículo se está moviendo y se calcula dividiendo la distancia del recorrido sobre el tiempo en el que el vehículo estuvo en movimiento, es decir, esta velocidad no considera el tiempo en el cual el vehículo se encuentra en una parada, o tiene que esperar a tener un camino claro enfrente. La velocidad circulación siempre será mayor o igual a la velocidad de viaje, debido a que los retrasos no se tienen en cuenta para su cálculo.

5.2.3. Velocidad de Viaje

La velocidad de viaje es la velocidad efectiva del vehículo en un viaje entre dos puntos y es la distancia recorrida entre dos puntos dividida por el total del tiempo utilizado por el vehículo para completar el viaje incluyendo cualquier parada. Si la velocidad de viaje es inferior a la velocidad de carrera, indica que el viaje sigue una condición de parada-marcha con aceleración forzada y desaceleración. Una uniformidad entre las velocidades de viaje y circulación denota condiciones de

viaje confortables.

5.2.4. Velocidad media local

La velocidad media local está definida como el promedio de velocidad de todos los vehículos que pasan por un punto de la carretera en un periodo de tiempo determinado. La velocidad media local está dada por

$$v_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (5.2)$$

donde v_i es la velocidad local del i -ésimo vehículo, y n es el número de observaciones. En muchos estudios, las velocidades son representadas en forma de tabla de frecuencia. Entonces la velocidad media local está dada por

$$v_t = \frac{\sum_{i=1}^n q_i v_i}{\sum_{i=1}^n q_i} \quad (5.3)$$

donde q_i es el número de vehículos que tienen la velocidad v_i , y n es el número de tales categorías de velocidad.

5.2.5. Velocidad media en un tramo

La velocidad media en un tramo está definida como el promedio de velocidad de todos los vehículos que están en una sección de la carretera durante un periodo de tiempo específico. Considerando la unidad longitud de un camino, y v_i como la velocidad local del i -ésimo vehículo. Siendo t_i el tiempo que le toma al vehículo completar esa unidad de distancia y está dada por $\frac{1}{v_i}$. Si hay n vehículos, entonces el tiempo promedio de viaje t_s está dado por

$$t_s = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i} \quad (5.4)$$

Si t_{av} es el promedio de tiempo de viaje, entonces la velocidad promedio $v_s = \frac{1}{t_s}$. Por lo tanto, a partir de la ecuación anterior

$$v_s = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i}} \quad (5.5)$$

Esto es simplemente la media armónica de la velocidad local. Si la velocidad local está expresada como tabla de frecuencia, entonces

$$v_s = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{v_i}} \quad (5.6)$$

donde q_i vehículos tendrán la velocidad v_i y n es el número de tales observaciones.

5.3. Flujo

Existen dos formas prácticas de contar el número de vehículos en una carretera. Una es el flujo o volumen, que se define como el número de vehículos que pasan por una carretera, o por un carril o dirección del camino durante un intervalo de tiempo. La medida se lleva a cabo contando el número de vehículos, n_t , que pasan por un punto en particular en un carril durante un tiempo definido t . Entonces el flujo q expresado en vehículos por hora está dado por

$$q = \frac{n_t}{t} \quad (5.7)$$

El flujo se expresa en la planificación y el diseño de campo teniendo un día como medida de tiempo.

5.3.1. Variaciones de Volumen

La variación de volumen en el tiempo, es decir, mes a mes, día a día, hora a hora. Las variaciones de volumen también pueden ser observadas de una temporada a otra. El volumen será superior a la media durante un mes de vacaciones de verano, pero será más pronunciado en zonas rurales que en las urbanas. Esta es la más consistente de todas las variaciones y es la que menos afecta a las características de la corriente de tráfico.

Los días entre semana, sábados y domingos también se encuentran ante diferencias de patrones. Pero comparando día con día, los patrones de rutas de una

naturaleza similar a menudo muestran una marcada similitud, que es útil para realizar predicciones.

La variación más significativa se puede observar en los periodos de horas. La hora pico observada durante las mañanas y tardes durante los días entre semana, que es usualmente el 8 a 10 por ciento del total del flujo diario o 2 o 3 veces el promedio de volumen por hora. Estos viajes son principalmente los viajes al trabajo, que se mantienen relativamente estables con el tiempo y más o menos constantes día a día.

5.3.2. Tipos de Medidas de Volumen

Debido a que hay una considerable variación en el volumen de tráfico, existen gran cantidad de medidas de volumen que son comúnmente adoptadas que promedian estas variaciones en un solo conteo de volumen que se utiliza para varios fines de diseño:

1. **Promedio Anual de Tráfico Diario:** Es el promedio del volumen de tráfico de las 24 horas del día en un lugar determinado durante los 365 días del año, es decir, el número total de vehículos que pasan por un sitio dividido por 365.
2. **Promedio Anual de Tráfico Entre Semana:** Es el promedio del volumen de tráfico de las 24 horas del día dentro de los días entre semana en un año. Se calcula dividiendo el total del volumen de tráfico de días entre semana del año entre 260.
3. **Promedio de Tráfico Diario:** Es el promedio del volumen de tráfico durante las 24 horas del día durante un periodo de tiempo menor a un año. Se puede medir durante seis meses, una temporada, un mes, una semana, a tan poco como dos días. Esta medida es válida sólo para el periodo de tiempo sobre el cual se realiza.
4. **Promedio de Tráfico Entre Semana:** Es el promedio de volumen de tráfico

durante las 24 horas del día dentro de los días entre semana durante un periodo de tiempo menor a un año, como por ejemplo un mes o una temporada.

La relación entre el Promedio Anual de Tráfico Entre Semana y el Promedio de Tráfico Entre Semana es análoga a la que existe entre el Promedio Anual de Tráfico Diario y el Promedio de Tráfico Diario. Principalmente el estudio del volumen establece la importancia de una ruta en particular con respecto a las otras, la distribución del tráfico en las carreteras, y la fluctuación del flujo. Todo lo que finalmente determina el diseño de una carretera y de las instalaciones relacionadas a la misma. Por lo tanto, el volumen es tratado como el más importante de todos los parámetros de la corriente de tráfico.

5.4. Densidad

La densidad se define como el número de vehículos ocupando una longitud dada de la carretera o carril y es generalmente expresada como vehículos por kilómetro. Uno puede fotografiar una longitud de camino x , contar el número de vehículos, n_x , en un carril de la ruta en ese momento y derivar la densidad k como,

$$k = \frac{n_x}{x} \quad (5.8)$$

Esto se ilustra en la Figura 5.1. En la figura, la densidad es el número de vehículos entre los puntos A y B dividida por la distancia entre A y B. La densidad es igualmente como el flujo, pero desde un punto de vista diferente, ya que esta medida está más directamente relacionada con la demanda de tráfico. También mide la proximidad de los vehículos entre sí dentro de la corriente lo cual afecta a la libertad de maniobra y conducción cómoda.

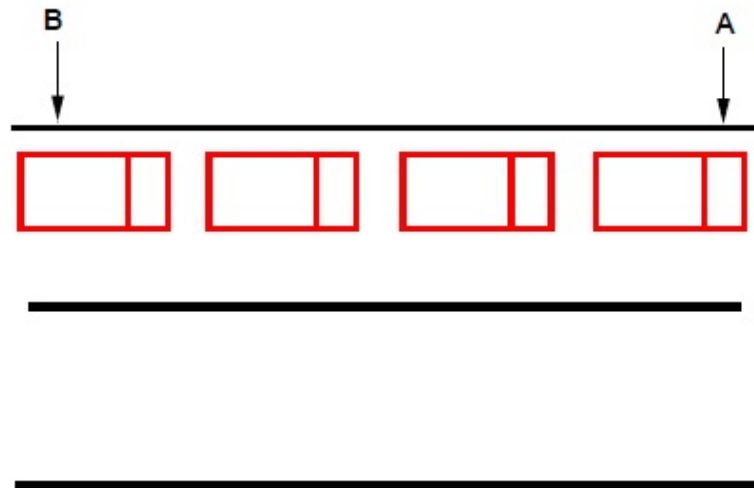


Figura 5.1: Ilustración de Densidad

5.5. Estimación de Tráfico en tiempo real

Para la estimación de tráfico en tiempo real, los países desarrollados utilizan redes de sensores detectores [44] como fuente de datos. Desde el verano de 2007, la Dirección General de Tráfico (DGT) del Ministerio del Interior de España ha estado proveyendo una gran cantidad de datos de tráfico en tiempo real integrados con los mapas de Google. Utilizando unos 4000 sensores de tráfico localizados a lo largo de la red de caminos españoles. Esta herramienta permite, por ejemplo, recolectar el flujo de tráfico por hora y la velocidad promedio en los alrededores de Madrid (Figura 5.2) a través de sensores ubicados en los cruces de las carreteras.

Otros países como Francia, Reino Unido y Portugal cuentan con sistemas similares a los de España. También existen varios estudios basados en FCD para la estimación de tráfico en tiempo real, en [8] presentan uno de los primeros experimentos de campo utilizando teléfonos celulares equipados con GPS para obtener datos de tráfico en tiempo real, en el mismo se utilizaron 100 vehículos que llevaban un nokia N95 a bordo. La prueba consistió en conducir en círculos en un tramo de aproximadamente 15 kilómetros de la carretera I-880, cerca de Union City. Los resultados obtenidos del experimento sugerían que una penetración de 2-3 % de te-



Figura 5.2: Típica información proveída por el mapa de tráfico de la DGT

léfonos móviles entre los conductores era suficiente para proveer medidas precisas de la velocidad del flujo de tráfico. En otros trabajos como [2] se utiliza a taxis como vehículos de prueba para la obtención de FCD, debido a que las medidas de velocidad provenientes de taxis son representativas de la velocidad promedio de toda la población de vehículos [45].

Aparte de la estimación de tráfico, también es posible realizar predicciones del estado del tráfico basándose en la información actual e histórica del tráfico. En [46] trabajaron con 600.000 vehículos que enviaban su ubicación cada tres minutos, y a través de dos algoritmos basados en redes neuronales y emparejamiento de patrones realizaban predicciones a corto plazo (15 a 30 minutos) del estado de tráfico futuro. Logrando un error situado entre 2 % a 8 % en predicciones de 15 minutos y 3 % a 16 % para predicciones de 30 minutos.

Capítulo 6

Arquitectura e Implementación de la Solución

6.1. Arquitectura

En este trabajo se propone desarrollar un sistema centralizado capaz de recibir datos de los dispositivos móviles de los conductores y procesarlos para obtener el estado del tráfico en la ciudad de Asunción. La información resultante será enviada en tiempo real a los usuarios para que los mismos puedan elegir trayectos menos congestionados.

La aplicación móvil está pensada inicialmente para dispositivos con sistema operativo Android. La misma, al ser utilizada por el conductor durante su viaje, registrará los datos del trayecto recorrido que servirán para definir el estado de las rutas. Esta aplicación también contará con un mapa de la ciudad de Asunción, que permitirá ver el estado de las carreteras que tengan información suficiente sobre el tráfico en las mismas.

La aplicación web, se encargará de generar el estado actual de las rutas procesando la información que reciba de los teléfonos de los conductores. Esta información quedará almacenada de forma persistente en el tiempo y podrá ser utilizada posteriormente con otros fines, ya sean estadísticos o de predicción de tráfico.

Como se puede apreciar en la Figura 6.1, se tiene un módulo web que consiste en

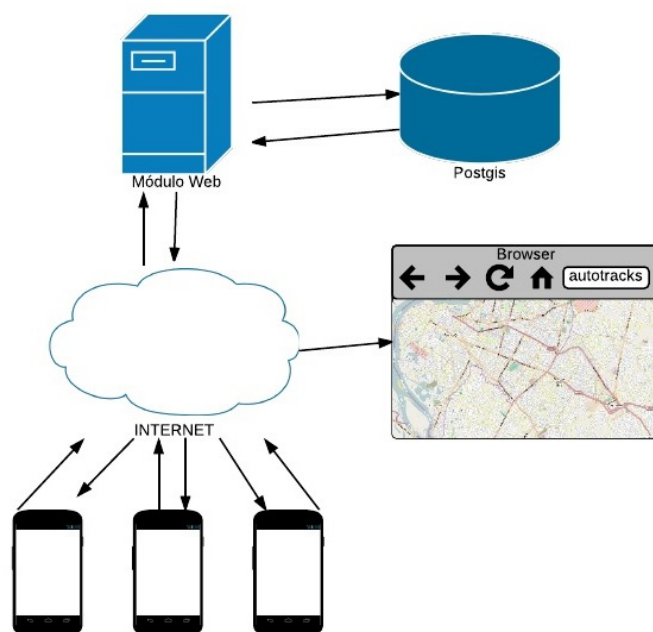


Figura 6.1: Arquitectura del Sistema

una aplicación web desarrollada en java que corre sobre un servidor de aplicaciones jboss 7. Como motor de base de datos utilizamos postgres en su versión 9.1, el mismo cuenta con la extensión postgis para añadir capacidades GIS y con la extensión pgRouting para las funciones de ruteo geoespacial. Todo esto se encuentra alojado en un servidor privado virtual. Los dispositivos móviles deben contar con el sistema operativo Android en su versión 2.3 (Gingerbread) o superior.

6.2. Implementación de la Solución Propuesta

En esta sección se presentan de manera detallada las herramientas, los datos, los algoritmos y procedimientos utilizados para el sistema de monitoreo de tráfico vehicular Autotracks. Se describen los pasos seguidos para el desarrollo de la aplicación móvil y web.

6.2.1. Preparando la Base de Datos

Para trabajar correctamente con coordenadas se necesita una base de datos Espacial, que a diferencia de las bases de datos relacionales, pueden almacenar y operar sobre datos geométricos. Teniendo como motor de base de datos PostgreSQL, que es relacional, necesitamos añadirle la extensión PostGIS para convertirla en espacial.

Una vez se posea un motor adecuado es necesario obtener la información de los mapas y rutas. A nivel mundial es Google Maps el referente en cuanto a mapas digitales se refiere, pero no permite descargar la información geográfica de los mismos. Por ello optamos por Open Street Maps, un proyecto colaborativo para crear mapas libres y editables, que permite distribuir sus datos bajo licencia abierta Open Database License (ODbL).

Los datos descargados desde Open Street Maps están en el formato OSM XML, que básicamente consiste en una lista de instancias de nodos, caminos y relaciones dentro de su modelo. Para transformar estos datos al formato de Postgis, existe una herramienta llamada `osm2pgsql`, que es un programa basado en líneas de comando. Como resultado de esta importación se obtienen cuatro tablas:

1. `planet_osm_point`
2. `planet_osm_polygon`
3. `planet_osm_line`
4. `planet_osm_roads`

`planet_osm_point` almacena todos los nodos importados, `planet_osm_polygon` almacena todos los polígonos, `planet_osm_line` almacena todas las rutas, y `planet_osm_roads` almacena un subconjunto de las rutas a efectos de renderización a bajos niveles de zoom debido a que `planet_osm_line` contiene demasiados datos para renderizar en estos casos. Estas tablas almacena los datos geométricos con el SRID 900913.

Como también se desean capacidades de enrutamiento, es necesario añadir la extensión pgRouting a PostgreSQL. pgRouting representa toda la información de las rutas como un grafo, siendo los vértices las intersecciones de las calles y las aristas las calles en sí. La longitud de la calle determina su peso, que es utilizado para el cálculo del camino más corto. Para convertir los datos de Open Street Maps se utiliza la herramienta osm2po. Como resultado de esta importación se obtiene una tabla con los datos geométricos almacenados con el SRID 4326. Para almacenar la información de los usuarios de la aplicación se definieron dos tablas:

1. localizaciones
2. rutas

en la tabla de localizaciones se guardan los datos de ubicación que son recibidos periódicamente de los usuarios de la aplicación móvil. Se almacena la fecha, la latitud, la longitud, la velocidad, la dirección, la precisión, altitud y la ruta a la que pertenece. Una ruta es un conjunto lógico de localizaciones que es utilizado para el map matching incremental, la ruta representa el recorrido que hace una persona en un viaje.

6.2.2. Obteniendo el Floating Car Data

Para obtener el FCD de los vehículos se desarrolló una aplicación móvil para teléfonos y tabletas con sistema operativo android denominada autotracks (ver Figura 6.2). La misma se encarga de detectar, almacenar y enviar periódicamente las ubicaciones de los usuarios que se estén moviendo de automóviles de manera completamente anónima a un servidor centralizado.

Autotracks tiene tres partes principales en lo que concierne a FCD:

- Detección de Movimiento.
- Toma de localizaciones.

- Envío de datos al servidor.



Figura 6.2: Vista de Autotracks en un teléfono

Detección de Movimiento

Tomar las localizaciones de los usuarios todo el tiempo implicaría un gasto excesivo e innecesario de batería, tomar las localizaciones cuando se tiene abierta la aplicación significaría que el usuario debe iniciar la aplicación manualmente y mantenerla abierta para poder ir registrando su ubicación. Otra alternativa más efectiva es dejar que el usuario inicie y finalice las toma de posiciones, pero nuevamente requiere de la intervención humana.

La forma óptima de registrar las ubicaciones es aquella que no requiera la intervención del usuario y que sea lo suficientemente inteligente para evitar tomar localizaciones no deseadas. Para ello, se necesita una forma de detectar cuando el teléfono se encuentra en movimiento, esto se puede lograr gracias a los sensores con los que cuentan los dispositivos móviles actualmente, especialmente el acelerómetro, que permite medir la aceleración en los ejes coordenados x, y y z de donde se puede estimar la velocidad y el desplazamiento. Una aceleración igual a cero significa que el dispositivo se encuentra quieto, una aceleración mayor a cero implica movimiento.

Incluso la detección no es suficiente para evitar la toma de localizaciones no deseadas como por ejemplo cuando una persona está caminando o andando en bicicleta. Para evitar estos casos es necesario, aparte de detectar el movimiento, reconocer la actividad que se está realizando durante ese movimiento. Existen trabajos como [47, 48, 49] que permiten detectar la actividad que se está realizando utilizando las posiciones GPS o el acelerómetro del dispositivo.

Específicamente para dispositivos Android existe una solución para el Reconocimiento de Actividad que viene incluida dentro del Marco de Servicios de Google Play. Este reconocimiento de actividad reconoce cuatro actividades diferentes: quieto, a pie, en bicicleta y en vehículo. Retorna la probabilidad de cada actividad en un momento determinado. Como este framework ya incluye todo lo necesario para la detección de movimiento y actividad, se decidió utilizarlo en Autotracks.

La actividad del usuario es consultada periódicamente con el fin de saber si el mismo se encuentra en un vehículo, en el caso de que así sea se inicia el servicio de toma de ubicaciones y el mismo no se detiene hasta pasados 10 minutos desde la última actividad en vehículo conocida por el usuario, para evitar así que se detenga cuando por ejemplo el vehículo se encuentre quieto a causa de un semáforo.

Toma de Localizaciones

Para obtener la ubicación de los teléfonos inteligentes de hoy en día existen varias opciones posibles, cada una con sus ventajas y desventajas:

- **Triangulación de antenas:** uso mínimo de batería, baja precisión, requiere estar dentro de una red GSM.
- **Redes WiFi:** uso bajo de batería, precisión media, es necesario estar en la cercanías de un punto de acceso WiFi, funciona bien en interiores.
- **GPS:** uso elevado de batería, alta precisión, no funciona correctamente en interiores.

Buscando la mayor flexibilidad posible, se decidió que la aplicación fuera capaz de trabajar con cualquiera de estas opciones para obtener la ubicación de los dispositivos, buscando siempre utilizar la mejor opción disponible. Para ello se utilizó la localización fusionada que se incluye dentro del Marco de Servicios de Google Play.

En los casos en que la localización es obtenida a través de las redes GSM o WiFi no se dispone de la información de velocidad, para paliar esta falta de información, cuando no se puede obtener la velocidad en un punto, la misma es estimada utilizando la ubicación anterior de la siguiente manera

$$v = \frac{d}{t} \tag{6.1}$$

donde d es la distancia entre el punto actual y el punto anterior, y t es el tiempo que transcurrió entre la toma de las velocidades.

Además de la forma de obtener las ubicaciones, otro aspecto importante a tener en cuenta es el tiempo entre las tomas de ubicación. [7] sugiere que intervalos de entre 10 y 20 segundos son los recomendados en la práctica. En [50] se reivindica que intervalos de muestras más largos permiten obtener información sobre mayores

distancias y reduce la probabilidad de capturar velocidades no representativas. Buscando balance entre frecuencia y consumo de batería por la toma de localizaciones, se establece un intervalo de 60 segundos para el muestreo utilizado en la aplicación.

Envío de datos al servidor

Como se utiliza un servidor centralizado para almacenar y procesar la información de las ubicaciones, el mismo necesita recibir estos datos desde los teléfonos móviles que cuentan con la aplicación instalada. El escenario ideal para este servidor sería recibir las ubicaciones al momento que son tomadas para así tener la información más actual posible, pero este funcionamiento afectaría de manera excesiva a los teléfonos en lo que respecta a consumo de batería y de datos.

Para disminuir la batería utilizada al conectarse a la redes de datos móviles, los teléfonos almacenan la información de las ubicaciones que van recolectando durante sus viajes dentro de vehículos. Cada un periodo de tiempo determinado, toda la información almacenada es enviada al servidor y borrada de la memoria del teléfono.

6.2.3. Map Matching

6.2.4. Estimación del estado actual del tráfico

Una vez realizado el map matching, el último paso es la estimación del tráfico en un momento dado. Para ello, lo que se hace es calcular

Bibliografía

- [1] Kai-Uwe y Wagner Peter Schäfer, Ralf-Peter y Thiessenhusen. A traffic information system by means of real-time floating-car data. In *ITS world congress*, volume 2, 2002.
- [2] Martin Reinthaler, Bernhard Nowotny, F Weichenmeier, and R Hildebrandt. Evaluation of speed estimation by floating car data within the research project dmotion. In *14th World Congress on Intelligent Transport Systems, ITS Word Congress*, 2007.
- [3] Luca Giovannini. A novel map-matching procedure for low-sampling gps data with applications to traffic flow analysis. 2011.
- [4] Arvind Thiagarajan, James Biagioni, Tomas Gerlich, and Jakob Eriksson. Cooperative transit tracking using smart-phones. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 85–98. ACM, 2010.
- [5] Pengfei Zhou, Yuanqing Zheng, and Mo Li. How long to wait?: predicting bus arrival time with mobile phone based participatory sensing. In *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 379–392. ACM, 2012.
- [6] Arvind Thiagarajan, Lenin Ravindranath, Katrina LaCurts, Samuel Madden, Hari Balakrishnan, Sivan Toledo, and Jakob Eriksson. Vtrack: accurate, energy-aware road traffic delay estimation using mobile phones. In *Proceedings of the*

- 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 85–98. ACM, 2009.
- [7] Sha Tao, Vasileios Manolopoulos, Saul Rodriguez, Ana Rusu, et al. Real-time urban traffic state estimation with a-gps mobile phones as probes. *Journal of Transportation Technologies*, 2(01):22, 2012.
- [8] Juan C Herrera, Daniel B Work, Ryan Herring, Xuegang Jeff Ban, Quinn Jacobson, and Alexandre M Bayen. Evaluation of traffic data obtained via gps-enabled mobile phones: The mobile century field experiment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(4):568–583, 2010.
- [9] Christopher E White, David Bernstein, and Alain L Kornhauser. Some map matching algorithms for personal navigation assistants. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 8(1):91–108, 2000.
- [10] Mohammed A Quddus, Robert B Noland, and Washington Y Ochieng. A high accuracy fuzzy logic based map matching algorithm for road transport. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 10(3):103–115, 2006.
- [11] Sinn Kim and Jong-Hwan Kim. Adaptive fuzzy-network-based c-measure map-matching algorithm for car navigation system. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 48(2):432–441, 2001.
- [12] Yin Lou, Chengyang Zhang, Yu Zheng, Xing Xie, Wei Wang, and Yan Huang. Map-matching for low-sampling-rate gps trajectories. In *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pages 352–361. ACM, 2009.
- [13] Ting Zhong, Bo Xu, and Ouri Wolfson. Disseminating real-time traffic information in vehicular ad-hoc networks. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE*, pages 1056–1061. IEEE, 2008.

- [14] Ilias Leontiadis, Gustavo Marfia, David Mack, Giovanni Pau, Cecilia Mascolo, and Mario Gerla. On the effectiveness of an opportunistic traffic management system for vehicular networks. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 12(4):1537–1548, 2011.
- [15] Paul Bolstad. Gis fundamentals: A first text on geographic information systems. 2005.
- [16] Paul Longley. Geographic information systems and science. 2005.
- [17] Peter A Burrough, Rachael McDonnell, Peter A Burrough, and Rachael McDonnell. *Principles of geographical information systems*, volume 333. Oxford university press Oxford, 1998.
- [18] Regina Obe and Leo Hsu. Postgis in action. 2011.
- [19] Luz Elena Yañez Mimbela, Lawrence A Klein, and Vehicle Detector Clearing-house. Summary of vehicle detection and surveillance technologies used in intelligent transportation systems. 2003.
- [20] Lawrence A Klein, Milton K Mills, and David RP Gibson. Traffic detector handbook: -volume ii. 2006.
- [21] Tom Mathew. *Transportation Systems Engineering*. Indian Institute of Technology Bombay, 2014.
- [22] Scott Fraser. The use of floating cellular telephone data for real-time transportation incident management. *McMaster University, Hamilton*, 2007.
- [23] Arvind Thiagarajan, Lenin Ravindranath, Hari Balakrishnan, Samuel Madden, Lewis Girod, et al. Accurate, low-energy trajectory mapping for mobile devices. MIT, 2011.

- [24] Shunkai Fang and Roger Zimmermann. Enacq: energy-efficient gps trajectory data acquisition based on improved map matching. In *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pages 221–230. ACM, 2011.
- [25] Sten Ruppe, Marek Junghans, Mathias Haberjahn, and Christian Troppen. Augmenting the floating car data approach by dynamic indirect traffic detection. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 48:1525–1534, 2012.
- [26] Mashrur A Chowdhury and Adel Wadid Sadek. Fundamentals of intelligent transportation systems planning. 2003.
- [27] Jochen Eisner, Stefan Funke, Andre Herbst, Andreas Spillner, and Sabine Storandt. Algorithms for matching and predicting trajectories. In *ALLENEX*, pages 84–95, 2011.
- [28] Jing Yuan, Yu Zheng, Chengyang Zhang, Xing Xie, and Guang-Zhong Sun. An interactive-voting based map matching algorithm. In *Proceedings of the 2010 Eleventh International Conference on Mobile Data Management*, pages 43–52. IEEE Computer Society, 2010.
- [29] Joshua S Greenfeld. Matching gps observations to locations on a digital map. In *Transportation Research Board 81st Annual Meeting*, 2002.
- [30] Mohammed A Quddus, Washington Yotto Ochieng, Lin Zhao, and Robert B Noland. A general map matching algorithm for transport telematics applications. *GPS solutions*, 7(3):157–167, 2003.
- [31] Washington Y Ochieng, M Quddus, and Robert B Noland. Map-matching in complex urban road networks. *Revista Brasileira de Cartografia*, 2(55), 2009.
- [32] Mohammed A Quddus, Washington Y Ochieng, and Robert B Noland. Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future

- research directions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 15(5):312–328, 2007.
- [33] Ermin Sakic. Map-matching algorithms for android applications. 2012.
- [34] Benedikt Budigm. An algorithm for map matching on incomplete road databases. 2012.
- [35] Phil Blunsom. Hidden markov models. *Lecture notes, August*, 15:18–19, 2004.
- [36] Paul Newson and John Krumm. Hidden markov map matching through noise and sparseness. In *Proceedings of the 17th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*, pages 336–343. ACM, 2009.
- [37] G David Forney Jr. The viterbi algorithm. *Proceedings of the IEEE*, 61(3):268–278, 1973.
- [38] Lofti A Zadeh. Fuzzy logic. *Computer*, 21(4):83–93, 1988.
- [39] Daniel Chen, Anne Driemel, Leonidas J Guibas, Andy Nguyen, and Carola Wenk. Approximate map matching with respect to the fréchet distance. In *ALENEX*, pages 75–83, 2011.
- [40] Arthur Thompson and Wayne Goodridge. Bus coming: A service for tracking buses in rural areas based on passenger locations. In *GEOProcessing 2012, The Fourth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services*, pages 23–27, 2012.
- [41] L R Kadiyali. *Traffic Engineering and Transportation Planning*. Khanna Publishers, 1987.
- [42] C S Papacostas. *Fundamentals of Transportation Engineering*. Prentice-Hall, 1987.

- [43] Adolf D May. *Fundamentals of Traffic Flow*. Prentice-Hall, 1990.
- [44] Guillaume Leduc. Road traffic data: Collection methods and applications. *Working Papers on Energy, Transport and Climate Change*, 1:55, 2008.
- [45] M Linauer. Fleet project report-fleet logistics service enhancement with egnoS & galileo satellite technology. *Austrian Institute of Technology (AIT), Vienna*, 2004.
- [46] Corrado De Fabritiis, Roberto Ragona, and Gaetano Valenti. Traffic estimation and prediction based on real time floating car data. In *Intelligent Transportation Systems, 2008. ITSC 2008. 11th International IEEE Conference on*, pages 197–203. IEEE, 2008.
- [47] Lin Liao. *Location-based activity recognition*. PhD thesis, University of Washington, 2006.
- [48] Ling Bao and Stephen S Intille. Activity recognition from user-annotated acceleration data. In *Pervasive computing*, pages 1–17. Springer, 2004.
- [49] Nishkam Ravi, Nikhil Dandekar, Preetham Mysore, and Michael L Littman. Activity recognition from accelerometer data. In *AAAI*, volume 5, pages 1541–1546, 2005.
- [50] Michael D Fontaine and Brian L Smith. Part 1: Freeway operations: Probe-based traffic monitoring systems with wireless location technology: An investigation of the relationship between system design and effectiveness. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1925(1):2–11, 2005.