

**Universidad de Costa Rica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**

**Estudio de la configuración espacial de la ciudad de Cartago y su relación  
con la asignación de viajes dentro de una red urbana**

**Trabajo de Graduación**

Presenta:

**Marcos Alberto Martínez Martínez**

Director de Proyecto de Graduación:

**Ing. Jonathan Agüero Valverde, Ph.D.**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio



Ing. Jonathan Agüero Valverde, Ph.D.

Director.



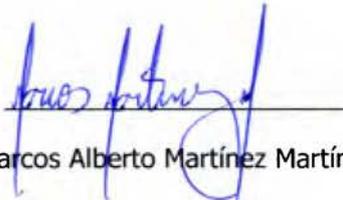
Ing. Renato Guadamuz Flores

Asesor.



Ing. Cristhian Quirós Calderón

Asesor.



Marcos Alberto Martínez Martínez

Estudiante.

## Derechos de autor

**Fecha:** 2017, febrero, 24

**El suscrito, Marcos Alberto Martínez Martínez**, cédula 3-0408-0029, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **A43193**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Estudio de la configuración espacial de la ciudad de Cartago y su relación con la asignación de viajes**, bajo la Dirección del **Ph.D., Jonathan Agüero Valverde**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión autorizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **Dedicatoria**

Este trabajo se lo dedico a todas las personas que han estado ahí para mí durante todo este recorrido, mis hermanos, mi mamá, mi papá y el resto de mi familia. Y a Melissa, quién matriculó conmigo Humanidades 1 y quién con el paso del tiempo se ha convertido cada vez en una parte más importante de mi vida.

## **Agradecimientos**

Especial gratitud para el Ing. Jonathan Agüero Valverde, Ph.D., Director de este Trabajo de Graduación, por todo el tiempo y la ayuda brindada, por servir de guía para llevar este proyecto a puerto seguro.

Un profundo agradecimiento también al Ing. Renato Guadamuz Flores y al Ing. Cristhian Quirós Calderón, miembros del comité asesor, por la disponibilidad y la diligencia mostradas, por el tiempo invertido.

Agradezco al Ing. Jorge Cardoza Sánchez de la Dirección General de Ingeniería de Tránsito y también a la Unidad de Gestión Municipal del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales por facilitarme información necesaria para la conclusión satisfactoria de este trabajo.

Un gran agradecimiento a la señora Victoria León Wong y su familia, por el apoyo mostrado desde hace tantos años.

A mis compañeros y amigos, les digo gracias. A Allan, José Alberto, Fabiola y Adrián, participantes de gran parte de mi vida universitaria, aún cuando ha pasado tanto tiempo, siempre los recuerdo con cariño. A Marvin y a otro Adrián, están ahí día a día.

También quiero dar un agradecimiento a mi familia, quienes siempre me han ayudado en todo lo que pueden y han estado pendientes de mi bienestar. Especialmente a Tavo y Leo, mis hermanos, con quienes he compartido tanto, a Claudia, que es lo más cercano que tengo a una hermana. Y a mi mamá y a mi papá. A mis tías.

Por último, quiero expresar mi gratitud a Melissa, por ayudarme a encontrar motivación y apoyarme, por no dejarme flaquear y preocuparse, por impulsarme a crecer.

# Índice

1. Introducción .....	1
1.1 Justificación .....	1
1.2 Objetivo General .....	4
1.3 Objetivos Específicos .....	4
1.4 Delimitación del problema.....	5
1.5 Marco Teórico.....	6
1.5.1 Conceptos Importantes .....	6
1.5.2 Tiempo de viaje.....	10
1.6 Metodología .....	14
1.6.1 Delimitar Área de Estudio.....	15
1.6.2 Recolección de información sobre intersecciones .....	15
1.6.3 Jerarquización de vías y definición de segmentos unitarios.....	15
1.6.4 Modelación de la red.....	16
1.6.5 Análisis de segmento unitario.....	16
1.6.6 Conteos Vehiculares.....	17
1.6.7 Correlación.....	17
1.6.8 Aplicación del modelo .....	18
2. Área de Estudio .....	19
2.1 Delimitación .....	19
2.2 Características de la red .....	20
2.3 Jerarquización de Elementos.....	23
3. Análisis de segmento unitario .....	30
3.1 Modelación de la red.....	30
3.2 Conectividad .....	34
3.3 Integración .....	38
4. Resultados Correlación .....	44
4.1 Conteos Vehiculares.....	44
4.2 Correlación.....	48

5. Análisis de Resultados .....	56
6. Aplicaciones .....	59
6.1 Identificación de intersecciones .....	59
6.2 Cambios en la red .....	61
6.2.1 Conectar la Ruta 10 con la Transversal 11 .....	61
6.2.2 Boulevard desde el Museo Municipal a Escuela Ascensión Esquivel.....	66
6.2.3 Avenida 3 – Situación Antes del Boulevard.....	68
6.2.4 Cierre sección de la Avenida Central .....	70
7. Conclusiones.....	72
8. Bibliografía.....	75

## Índice de Figuras

Figura 1. Representación de una red de caminos. ....	6
Figura 2. Análisis topológico de profundidad de caminos de la figura 1(c). ....	7
Figura 3. Ejemplos de segmentos unitarios entre los puntos de decisión A y B.....	10
Figura 4. Red donde todos los elementos tienen el mismo tiempo de viaje.....	11
Figura 5. Intersección entre calles con distinta jerarquía. ....	11
Figura 6. Puntos de decisión cuando hay calles con diferentes velocidades. ....	12
Figura 7. Representación de un camino con diferentes características de velocidad.....	13
Figura 8. Diagrama de actividades. ....	14
Figura 9. Área de Estudio. ....	20
Figura 10. Intersección con semáforo. ....	21
Figura 11. Intersección con alto. ....	21
Figura 12. Ejemplos de intersecciones importantes en la ciudad de Cartago.....	22
Figura 13. Ejemplos de intersecciones importantes en la ciudad de Cartago.....	22
Figura 14. Ciudad de Cartago, intersecciones fotografiadas. ....	23
Figura 15. Rutas nacionales y travesías. ....	24
Figura 16. Modelo topológico Residencial El Molino.....	25
Figura 17. Selección de Avenida 2 como vía prioritaria. ....	27
Figura 18. Segmentos unitarios para la Avenida 2.....	28
Figura 19. Segmentos Unitarios Importantes. ....	29
Figura 20. Red área de estudio.....	30
Figura 21. Aproximación con líneas rectas.....	30
Figura 22. Segmentos unitarios curvos. ....	31
Figura 23. Secciones para representar segmentos unitarios curvos.....	32
Figura 24. Conectividad para el Modelo en la ruta 219. ....	33
Figura 25. Resultados conectividad Modelo. ....	34
Figura 26. Segmento unitario con mayor conectividad.....	35
Figura 27. Histograma conectividad. ....	36
Figura 28. Kilómetros de carretera para segmentos de acuerdo a su conectividad.....	37
Figura 29. Segmento unitario de menor integración.....	39
Figura 30. Segmento unitario con mayor integración.....	40
Figura 31. Histograma integración.....	41
Figura 32. Kilómetros de carretera para segmentos de acuerdo a su integración. ....	41
Figura 33. Resultados integración Modelo. ....	43
Figura 34. Localización puntos con información de conteos vehiculares. ....	44
Figura 35. Tasa de crecimiento anual. (MOPT, 2011).....	47
Figura 36. Conteos vehiculares para correlación.....	48
Figura 37. Gráfico Volumen vehicular contra Integración - Ajuste Curva Exponencial. ....	50
Figura 38. Gráfico Volumen vehicular contra Integración - Ajuste Curva S.....	51

Figura 39. Gráfico Volumen vehicular contra Integración - Ajuste Lineal. ....	52
Figura 40. Gráfico de Volumen vehicular promediado por segmento contra Integración - Ajuste Curva Exponencial. ....	53
Figura 41. Gráfico de Volumen Vehicular Observado contra el Volumen Vehicular Predicho para el modelo multivariado. ....	55
Figura 42. Intersecciones con semáforo. ....	59
Figura 43. Avenida 4 y Calle 7. ....	60
Figura 44. Intersección Calle 7 y Transversal 7. ....	61
Figura 45. Segmento unitario Ruta 10-Transversal 11. ....	62
Figura 46. Intersección Calle 2 y Transversal 2. ....	62
Figura 47. Resultados Integración sin modificaciones. ....	63
Figura 48. Resultados Integración al conectar la Ruta 10 con la Transversal 11. ....	64
Figura 49. Principales intersecciones afectadas al conectar la Ruta 10 con la Transversal 11. ....	65
Figura 50. Trazo Boulevard Museo – Ascensión Esquivel. Elaborado a partir de Google Maps 2016. ....	66
Figura 51. Cambio en Integración con Boulevard Museo – Escuela Ascensión Esquivel. ...	67
Figura 52. Ubicación boulevard Estación del Tren. Elaborado a partir de Google Maps 2016. ....	68
Figura 53. Cambio de integración antes y después del Boulevard de la estación del tren. ....	69
Figura 54. Calle desde Municipalidad de Cartago a Basílica de Los Ángeles. ....	70
Figura 55. Cambio de integración por el cierre de una sección de la Avenida Central. ....	71

## Índice de Cuadros

Cuadro 1. Resultados de análisis de sintaxis espacial para ejemplo de la figura 1.....	9
Cuadro 2. Información de tipo de intersección y jerarquía de vía para los nodos 15 a 40.	26
Cuadro 3. Descripción estadística de la conectividad para el modelo. ....	36
Cuadro 4. Kilómetros de carretera para segmentos de acuerdo a su conectividad. ....	38
Cuadro 5. Descripción estadística de la integración en el modelo. ....	39
Cuadro 6. Kilómetros de carretera para segmentos de acuerdo a su integración.....	42
Cuadro 7. Conteos vehiculares Cartago. ....	45
Cuadro 8. Conteos Vehiculares Cartago. ....	46
Cuadro 9. Conteos Vehiculares – Valores de Integración.....	49
Cuadro 10. Estimación de parámetros para el modelo multivariado. ....	54
Cuadro 11. Prueba de los efectos para el modelo multivariado.....	54
Cuadro 12. Resumen del modelo.....	54
Cuadro 13. Correlaciones Tráfico Vehicular – Integración.....	56

Martínez Martínez, Marcos Alberto

Estudio de la configuración espacial de la ciudad de Cartago y su relación con la asignación de viajes dentro de una red urbana.

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

M. A. Martínez M., 2016.

xi, 78, [0]; ils. col. – 35 refs.

## RESUMEN

La sintaxis espacial estudia la configuración de elementos espaciales y las relaciones entre ellos. Para una ciudad, estos elementos son las calles que forman su red de caminos. La sintaxis espacial trata de buscar relaciones entre esta composición espacial y características urbanas como el movimiento de personas y vehículos, el valor de la tierra, y la ubicación del comercio. Este estudio busca determinar la correlación entre esta configuración y el volumen vehicular que pasa por una sección de la red. Además, se analizan los cambios en la sintaxis espacial ante cambios en la configuración física de la red vial.

Para obtener esta correlación, se elaboró un análisis de segmento unitario, estableciendo la prioridad de las vías en cada intersección y recopilando información al recorrer la ciudad. Posteriormente se consideran varios modelos estadísticos para encontrar el mejor ajuste de los datos. Después se observan aplicaciones del modelo al comparar las características de la red en su estado actual y ante posibles cambios.

La correlación más alta se consigue al utilizar un modelo exponencial multivariado. Incluir una variable categórica para las calles con orientación Norte-Sur y flujo en sólo una dirección mejora considerablemente el coeficiente de determinación, tomar en cuenta sólo una variable lleva a una sobrestimación del volumen del tráfico para estos casos. Se concluye que es un método rápido y económico que puede brindar dirección para ejecutar estudios más detallados sobre la red actual y etapas tempranas de proyectos potenciales. M.A.M.M.

SINTAXIS ESPACIAL; CARTAGO; PLANIFICACIÓN URBANA

Ing. Jonathan Agüero Valverde, Ph.D.  
Escuela de Ingeniería Civil.

# **1. Introducción**

La sintaxis espacial es un campo que estudia la configuración de elementos espaciales. En el caso de las ciudades los elementos corresponden a las calles y estos a su vez forman la red de caminos.

La sintaxis espacial trata de buscar relaciones entre esta composición espacial y características urbanas como el movimiento de personas y vehículos, el valor de la tierra, la ubicación del comercio. Es un área de estudio que "ha emergido como un programa internacional usado para la investigación y práctica en más de 50 países alrededor del mundo" (Major, 2015).

El presente trabajo consiste en un estudio de la configuración de la ciudad de Cartago utilizando conceptos de sintaxis espacial, específicamente el análisis de segmento unitario propuesto en 2009 por Abhijit Paul en "An integrated approach to modeling vehicular movement networks: trip assignment and space syntax".

Se trabaja con la hipótesis de que existe una correlación entre la integración de un elemento dentro de una red urbana con el volumen de tránsito vehicular que pasa por el mismo. Además, es importante verificar si las intersecciones entre elementos con alto nivel de integración en el modelo son importantes en la red de la ciudad. También se explica cómo definir el modelo de la red para el análisis de segmento unitario en este caso.

Después de establecer la correlación entre integración y volumen de tránsito, se procede a revisar casos de posibles modificaciones y cómo cambian las características de la red frente a estas alteraciones.

## **1.1 Justificación**

En Costa Rica no se ha investigado como potencial herramienta para la planificación y entendimiento de las ciudades del país, a pesar de que hay posibilidades de ampliar el estudio del espacio y de los resultados interesantes que se han obtenido internacionalmente.

Ni siquiera se ha tocado el tema para analizar las características de las edificaciones del país, el único artículo investigativo que se encuentra se llama "Sintaxis del espacio y narrativa del poder: arquitectura en Golfito" del autor Henning Jenssen-Pennington, que investiga "la distribución del espacio que resultó del asentamiento de la United Fruit Company en la costa pacífica de Costa Rica, y analiza los patrones de comunicación social y la estructura jerárquica de los flujos de tránsito humano dentro de la ciudadela y del complejo residencial, acentuando los mecanismos de exclusión y segregación entre las tres zonas en que se dividió el asentamiento." (Jenssen-Pennington, 2012).

El potencial para ampliar el estudio del espacio es grande, se han dado trabajos de investigación sobre su relación con el flujo del tránsito, no sólo de vehículos sino también de peatones, se ha buscado su importancia en la colocación de paradas de transporte público como en el estudio de Carpio-Pinedo (2014) sobre paradas de buses en Madrid, España, y el de Kishimoto et al. (2007) para sistemas de riel ligero (Light Rail Transit) en Maebashi, Japón. Raford (2007) hace un análisis sobre pronóstico de riesgo de exposición de peatones y establece un Índice de Riesgo Peatonal en la ciudad de Oakland, California, utilizando conceptos de sintaxis espacial.

El centro de análisis espacial avanzado (CASA por sus siglas en inglés) de la Universidad Colegio de Londres (UCL) ha buscado observar el espacio y relacionar otros fenómenos urbanos y de transporte. En el trabajo de Anderson (2005) examinan las variaciones espaciales para colisiones en carreteras de Londres. También se ha revisado como la configuración espacial de sectores urbanos se relaciona con la criminalidad en el informe presentado por Ashby y Webber (2005). Además, se ha estudiado el cambio y crecimiento de las ciudades, como se puede encontrar en los artículos de Batty, Besussi y Chin (2003) que analizan la expansión urbana, y el de Kim y Batty (2011) donde intentan desarrollar un modelo de crecimiento urbano.

Además, el estudio de la configuración espacial de las ciudades y su relación con el movimiento de las personas, puede tener importancia a la hora de estudiar proyectos que cambien la red de comunicación urbana, es decir las vías de la ciudad, puesto que puede mostrar el cambio de la accesibilidad de las vías y como podrían cambiar los patrones de

movimiento con respecto a las relaciones del espacio. Por ejemplo, ya se ha analizado que construir una circunvalación tiene un "profundo impacto en la estructura de una ciudad" (Van Nes, 2001), causando la modificación en la localización de tiendas y las tendencias del cambio en las rutas tanto de vehículos como peatones. "Un entendimiento sistemático de los cambios en configuración puede ofrecer la primera explicación de los posibles efectos de circunvalaciones en ciudades y sus centros" (Van Nes, 2001).

El análisis de la sintaxis espacial de las redes urbanas de comunicación tiene el potencial de convertirse en una herramienta de utilidad para la planificación territorial, el trabajo de Jayashing, Sano y Nishiuchi en "Explaining traffic flow patterns using centrality measures" (2015) concluye que la influencia de la geometría de la red en el tránsito puede enriquecer su análisis y servir de guía para justificar decisiones de planificación y de formulación de estrategias para enfrentar el problema del transporte. Un ejemplo es el estudio elaborado por Mainieri y Rigatti "Ring roads in greater Porto Alegre: would it be an effective solution?" (2007), donde consideran la posibilidad de construir anillos de circunvalación en la región metropolitana de Porto Alegre en Brasil para provocar cambios en los flujos de tránsito del área, establecen que para esto es necesario que estas rutas alternativas compitan en términos de linealidad, conectividad e integración con la ruta principal de la zona.

Zhuang y Song en "Combined impacts of configurational and compositional properties of street network on vehicular flow" (2015), indican que la integración puede ser un factor importante para determinar la distribución vehicular dentro de una red, pero no hay claridad de qué tan importante puede ser para determinar el flujo y su dirección debido a que una de las limitantes del modelo es la incapacidad de establecer calles con una sola vía.

Se propone entonces este método, sobre todo, como un análisis preliminar del transporte y la configuración de la ciudad. Se espera que sea mucho menos costoso que un estudio que incluya datos de oferta y demanda de viajes e inclusive que ahorre tiempo. Major en "The hidden corruption of American regular grids: Why space Syntax doesn't work in the United States, when it looks like it should" (2015) explica que se puede conseguir información de la ciudad con los principios de sintaxis espacial antes de incluir datos como uso de suelo, valor de la tierra y hasta flujo vehicular.

En "Exploratory study of space syntax as a traffic assignment tool" (2007) Barros, da Silva y de Holanda también resaltan el tiempo necesario para realizar este tipo de estudio, ya que sólo se necesita la configuración de la red para hacer el análisis y son los resultados de esto los que se tratan de correlacionar a otras variables. Concluyen que la sintaxis espacial es interesante sobre todo para la primera parte del estudio del tráfico donde se buscan indicadores generales que ayuden a entender el comportamiento de la red.

## **1.2 Objetivo General**

- Determinar la correlación entre la configuración, el nivel de integración y características del movimiento de los vehículos dentro de su centro urbano, mediante el análisis de segmento unitario y la teoría de sintaxis espacial.

## **1.3 Objetivos Específicos**

- Describir la ciudad de Cartago de acuerdo a su configuración espacial y nivel de integración.
- Definir la elección de ruta mediante información de conteos de volúmenes vehiculares en las calles de la ciudad.
- Clasificar las calles de la ciudad de Cartago en una jerarquía de acuerdo a la velocidad de operación.
- Establecer el nivel de integración de las calles de la ciudad de Cartago de acuerdo al análisis de segmento unitario.
- Determinar la correlación entre la cantidad de vehículos que atraviesan una calle perteneciente a una red urbana y su nivel de integración.
- Estudiar los cambios en la configuración espacial de una red urbana ante posibles modificaciones.

## **1.4 Delimitación del problema**

El problema consiste en estudiar la configuración espacial y nivel de integración de la red urbana de la ciudad de Cartago con las condiciones presentadas por esta región durante el segundo semestre del año 2016.

Con este trabajo se obtuvieron mediciones en campo de conteos vehiculares para 40 calles dentro del área de estudio. No se pretende tener datos para cada uno de los elementos de la red, sino de algunas localizaciones representativas para realizar una comparación del modelo con la realidad.

El modelaje de la ciudad se realizó utilizando un software de dibujo asistido por computadora y el algoritmo que se corrió a partir del programa DepthmapX, desarrollado por la Universidad Colegio de Londres, para calcular los niveles de integración de acuerdo a la teoría de sintaxis espacial.

Se realizó una jerarquización de los caminos sin tomar en cuenta velocidades reales de operación, sino a partir de su importancia y características, al definirlo como autopistas, calles principales, calles secundarias, calles locales y caminos rurales.

## 1.5 Marco Teórico

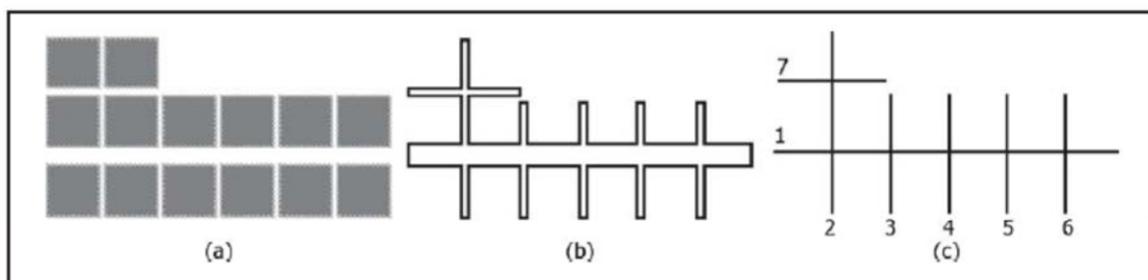
### 1.5.1 Conceptos Importantes

La siguiente descripción está basada en los conceptos presentados por Hillier y Hansen en "The social logic of space" (1984) donde presentan las bases teóricas y los conceptos de topología de redes necesarios para estudiar la configuración de ciudades o edificios mediante sintaxis espacial, también en el trabajo de Abhijit Paul para sus tesis de doctorado en Land-Use Planning, Management and Design y en el artículo "Axial Analysis: A syntactic approach to movement network modeling" (2011) del mismo autor.

La sintaxis espacial es una teoría que analiza las características y relaciones entre los espacios. Nos explica que "la configuración de la red urbana de calles es en sí misma un importante determinante de los flujos de movimiento" (Hillier, 2005).

Es un campo de estudio que trata de describir las relaciones que existen dentro de una red de caminos al considerar estos caminos como elementos espaciales. Describe conexiones de unidades espaciales mediante análisis de profundidad usando teoría de gráficos.

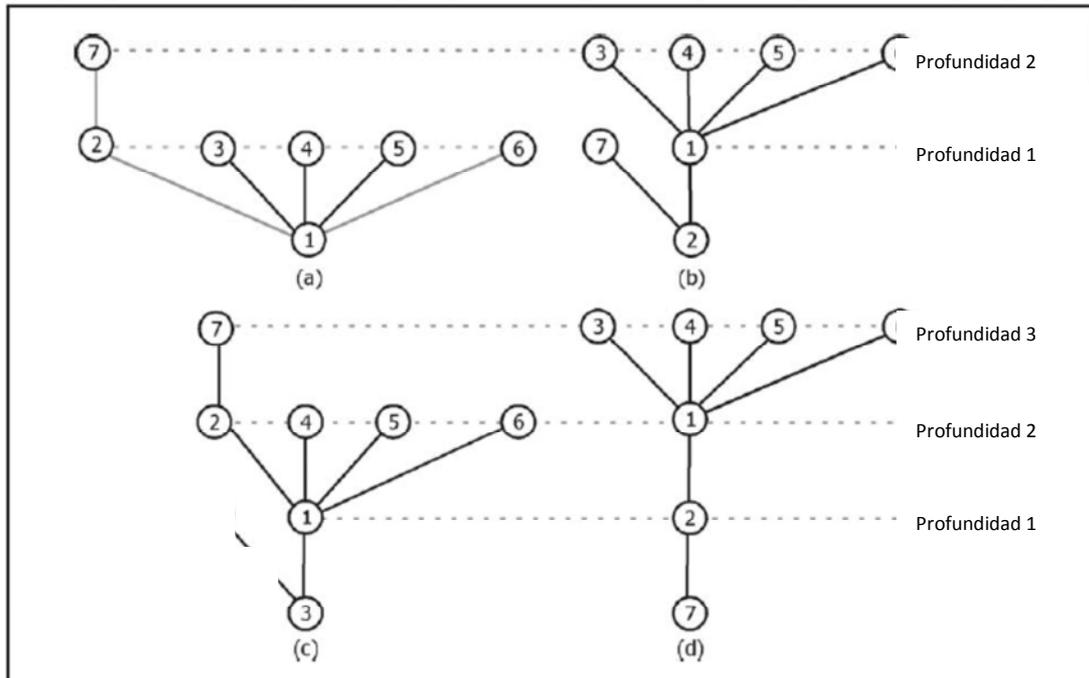
Uno de los conceptos más importantes es la integración o accesibilidad, que es básicamente qué tan fácil es alcanzar un camino con respecto a los otros. Para ilustrar y explicar mejor el concepto, se analiza la Figura 1.



**Figura 1. Representación de una red de caminos.**

**Fuente: Paul, 2009.**

En la Figura 1(a) se pueden ver diferentes bloques en gris y las calles que los conectan, mientras que en la Figura 1(b) se presenta la red de forma más clara, ya que esta es el objeto de estudio, y en la Figura 1(c) se hace una representación simplificada y una enumeración de las calles para poder referirse a ellas evitando confusiones en la siguiente figura. A cada una de estas calles se les considera una unidad de espacio.



**Figura 2. Análisis topológico de profundidad de caminos de la figura 1(c).**

**Fuente: Paul, 2009. Modificado por el autor.**

En la Figura 2 se puede ver el análisis topológico de profundidad mediante teoría de gráficos donde cada círculo representa un camino de la Figura 1(c) y cada línea representa si existe conectividad entre distintos elementos. En la Figura 2(a) se puede ver como la calle 1 está conectada con el resto de calles en el primer nivel de profundidad, excepto la calle 7 que se encuentra en el segundo nivel. En la Figura 2(b) se puede ver el mismo análisis, pero tomando como base la calle número 2, el gráfico indica que en la profundidad 1, esta calle se encuentra conectada con los elementos 7 y 1, mientras el resto se encuentran en la profundidad 2. Las representaciones gráficas de esta Figura 2 demuestran el principio de accesibilidad e integración en la sintaxis espacial, la calle 1 es la más integrada porque es la

que se conecta con una mayoría de otros elementos en la menor profundidad, es decir que es más accesible desde otros puntos de la red, mientras que el elemento número 7 se encuentra más segregado. Se define conectividad como la cantidad de elementos que se pueden relacionar desde un punto a una profundidad de 1, en este caso vemos en la Figura 2(a) que la calle 1 tiene una conectividad de 5.

Esta accesibilidad se puede denotar a través de un cálculo de profundidad promedio a partir de la siguiente fórmula:

$$\bar{D} = \frac{\sum d*n}{k-1} \quad (1)$$

Donde

$\bar{D}$  = profundidad promedio

$d$  = profundidad

$n$  = número de unidades de espacio en una profundidad específica

$k$  = total de unidades de espacio en el sistema

Volviendo al ejemplo de las figuras 1 y 2 para la calle 1:

$$\bar{D} = \frac{1 * 5 + 2 * 1}{7 - 1} = \frac{7}{6} \approx 1,167$$

En el caso del elemento 7, la profundidad promedio sería:

$$\bar{D} = \frac{1 * 1 + 2 * 1 + 3 * 4}{7 - 1} = \frac{15}{6} = 2,5$$

Entre menor sea el valor de la profundidad promedio de una unidad de espacio, más integrado está con respecto a los otros elementos del sistema, pero esta medida de profundidad promedio es un "parámetro relativo en términos de cómo la unidad está localizada en el sistema" (Paul, 2011) y debido a esta relatividad se debe evaluar en una escala común para poder comparar estas unidades de espacio entre ellas. Esta escala se encuentra definida entre los dos valores extremos de la ecuación (1), que serían 1 y  $k/2$ .

La escala de simetricidad determina la medida relativa de una profundidad promedio y es el incremento (en término de profundidades) desde el valor más bajo con respecto al rango de la escala. Esta medida relativa se conoce como "Asimetría Relativa" y se calcula de la siguiente forma:

$$RA = \frac{2(D-1)}{k-2} \quad (2)$$

El tamaño del sistema influye los valores de accesibilidad de las unidades de espacio. Las asimetrías relativas de dos sistemas distintos no se pueden comparar en la misma escala a menos que se normalicen, esto se logra mediante la Asimetría Relativa Real (RRA) y se denomina  $D_k$ .

$$D_k = \frac{2\{k[\log_2\left(\frac{k+2}{3}-1\right)+1]\}}{(k-1)(k-2)} \quad (3)$$

Y tenemos también:

$$RRA = \frac{RA}{D_k} \quad (4)$$

Definimos integración entonces como el inverso de RRA:

$$I = \frac{1}{RRA} \quad (5)$$

Para el ejemplo anterior de la figura 1, se puede resumir el siguiente cuadro:

Elemento	Conectividad	Profundidad Promedio	Integración
1	5	1,17	5,095
2	2	1,67	1,274
3	1	2,00	0,849
4	1	2,00	0,849
5	1	2,00	0,849
6	1	2,00	0,849
7	1	2,50	0,566

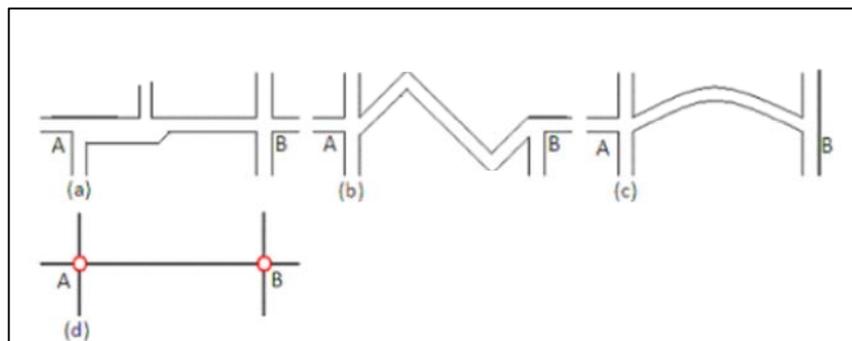
**Cuadro 1. Resultados de análisis de sintaxis espacial para ejemplo de la figura 1.**

**Fuente: Paul, 2009.**

El análisis de integración se puede realizar de forma global o local, esto significa que se puede establecer un límite superior al nivel de profundidad de análisis para los elementos y de esta forma hacer más regional el estudio, lo que se ha utilizado en algunos casos para buscar la correlación de tránsito peatonal.

### 1.5.2 Tiempo de viaje

Para poder utilizar la sintaxis espacial como herramienta de asignación de viajes es necesario considerar el tiempo de viaje. Al considerar configuraciones de ciudad dónde existen verdaderamente distintas opciones de ruta podemos asegurar que la mayoría de los usuarios van a decidirse por el camino que requiera menos tiempo. Para esto se define un segmento unitario que consiste en "una sección de camino entre dos puntos de decisión" (Paul, 2009), sin importar la forma que tenga la calle. Un punto de decisión es una intersección donde los usuarios de la red escogen dónde ir después.



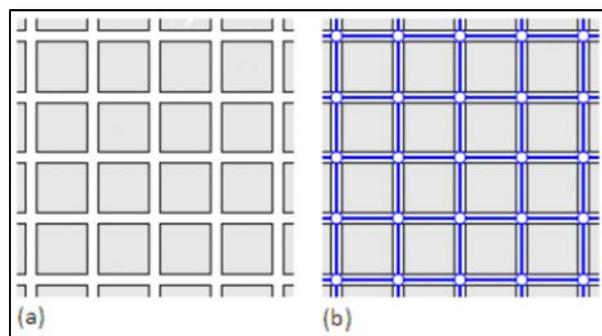
**Figura 3. Ejemplos de segmentos unitarios entre los puntos de decisión A y B.**

**Fuente: Paul, 2009.**

En un sistema de carreteras en árbol, el segmento unitario es simplemente la distancia más corta entre dos puntos de decisión, porque el sistema sólo le da al usuario un camino posible, sin necesidad de elegir. En cambio, un sistema en red si permite al usuario escoger su ruta y en este caso la velocidad de una sección de calle se vuelve la principal consideración decidir por dónde ir, debido a que esto le permitiría potencialmente el menor tiempo de viaje y "es la

jerarquía de caminos lo que ayuda a los viajeros a entender cuáles segmentos de ruta tienen características de movilidad mayores que otros” (Paul, 2009). Es mediante esta clasificación que se da la forma en que el usuario entiende y relaciona esta velocidad de desplazamiento en el sistema.

Cuando todos los caminos tienen el mismo tiempo de viaje, se tiene una situación como la presente en la Figura 4, donde cada una de las uniones de calles es un punto de decisión.



**Figura 4. Red donde todos los elementos tienen el mismo tiempo de viaje.**

**Fuente: Paul, 2009.**

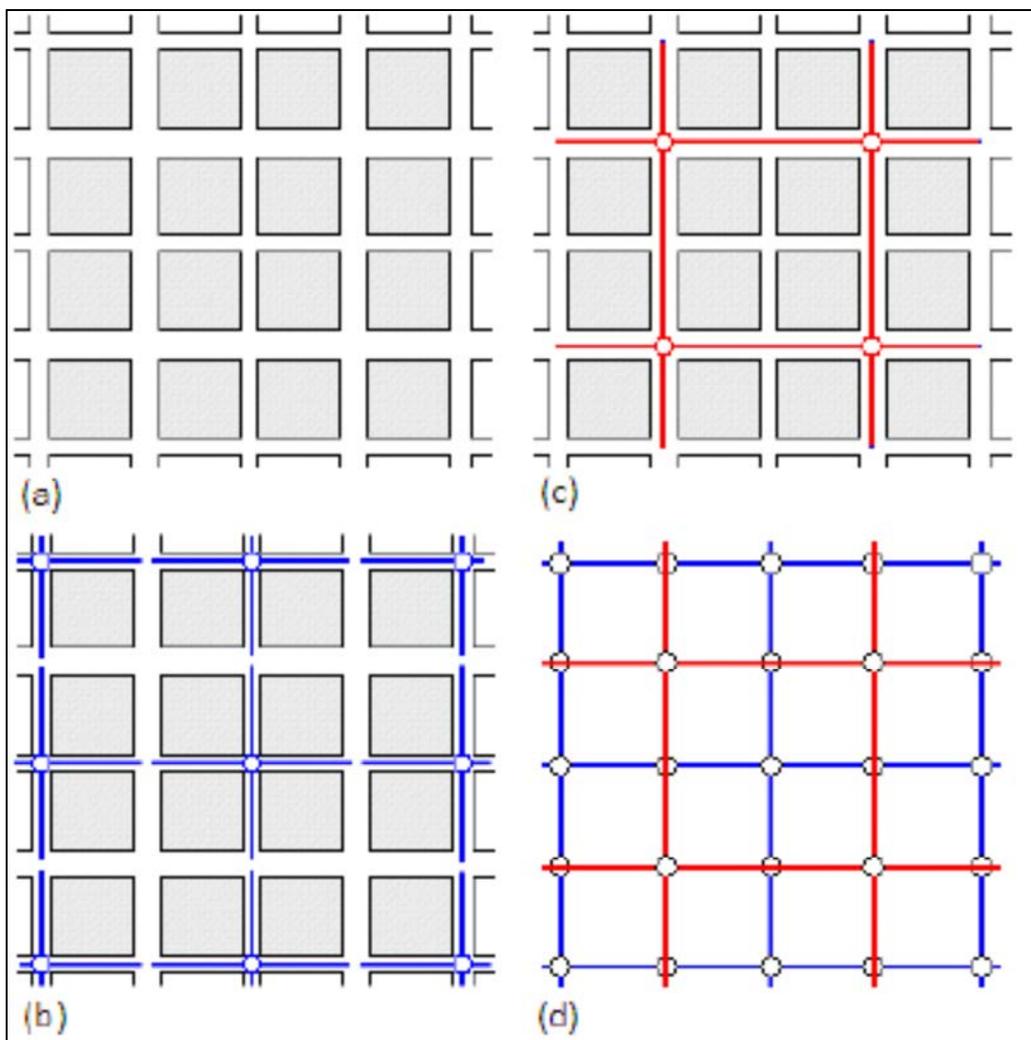
Es necesario definir cómo se identifican los puntos de decisión cuando existen caminos con distintos tiempos de viaje en el sistema. “Cuando las calles de diferentes velocidades libres se encuentran en una intersección, el área traslapada se considera que tiene la mayor velocidad libre, y el segmento unitario de menor velocidad de viaje sólo se vuelve discontinuo en esa intersección” (Paul, 2009). Como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5. Intersección entre calles con distinta jerarquía.**

**Fuente: Paul, 2009.**

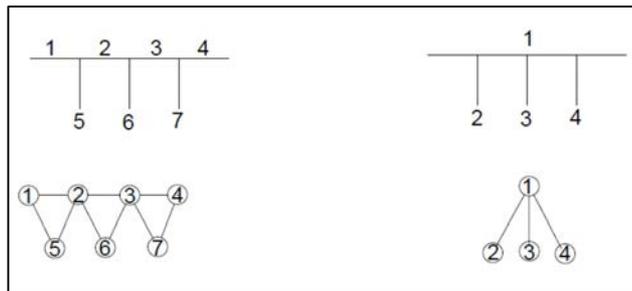
De acuerdo a lo anterior, se define un segmento unitario para una red de caminos como “la sección de camino entre dos intersecciones que están formadas por calles de igual o mayor velocidad libre” (Paul, 2009). En la Figura 6 se puede ver gráficamente este razonamiento, las líneas rojas son las calles con mayor velocidad y los puntos de decisión entre ellas se muestran en Figura 6(c), mientras que las líneas azules representan menores velocidades y sus puntos de decisión se pueden ver en Figura 6(b). En la Figura 6(d) se ve la totalidad del sistema, donde se considera que las intersecciones entre líneas rojas y azules pertenecen a la sección con mayor velocidad.



**Figura 6. Puntos de decisión cuando hay calles con diferentes velocidades.**

**Fuente: Paul, 2009.**

Lo que pasa gráficamente es que cada segmento entre puntos de decisiones de los caminos con mayor velocidad se considera un solo elemento con respecto a las secciones con menor velocidad, mientras que los segmentos con igual velocidad se consideran elementos separados, como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7. Representación de un camino con diferentes características de velocidad.**

## 1.6 Metodología

La metodología para realización del trabajo se ve resumida en la Figura 8 y se puede dividir básicamente en tres partes importantes: el modelaje de la ciudad de acuerdo a los requerimientos para la utilización del método, la correlación de datos de volumen vehicular con las características de integración de la red y la evaluación de distintos ejemplos de modificaciones en la red.

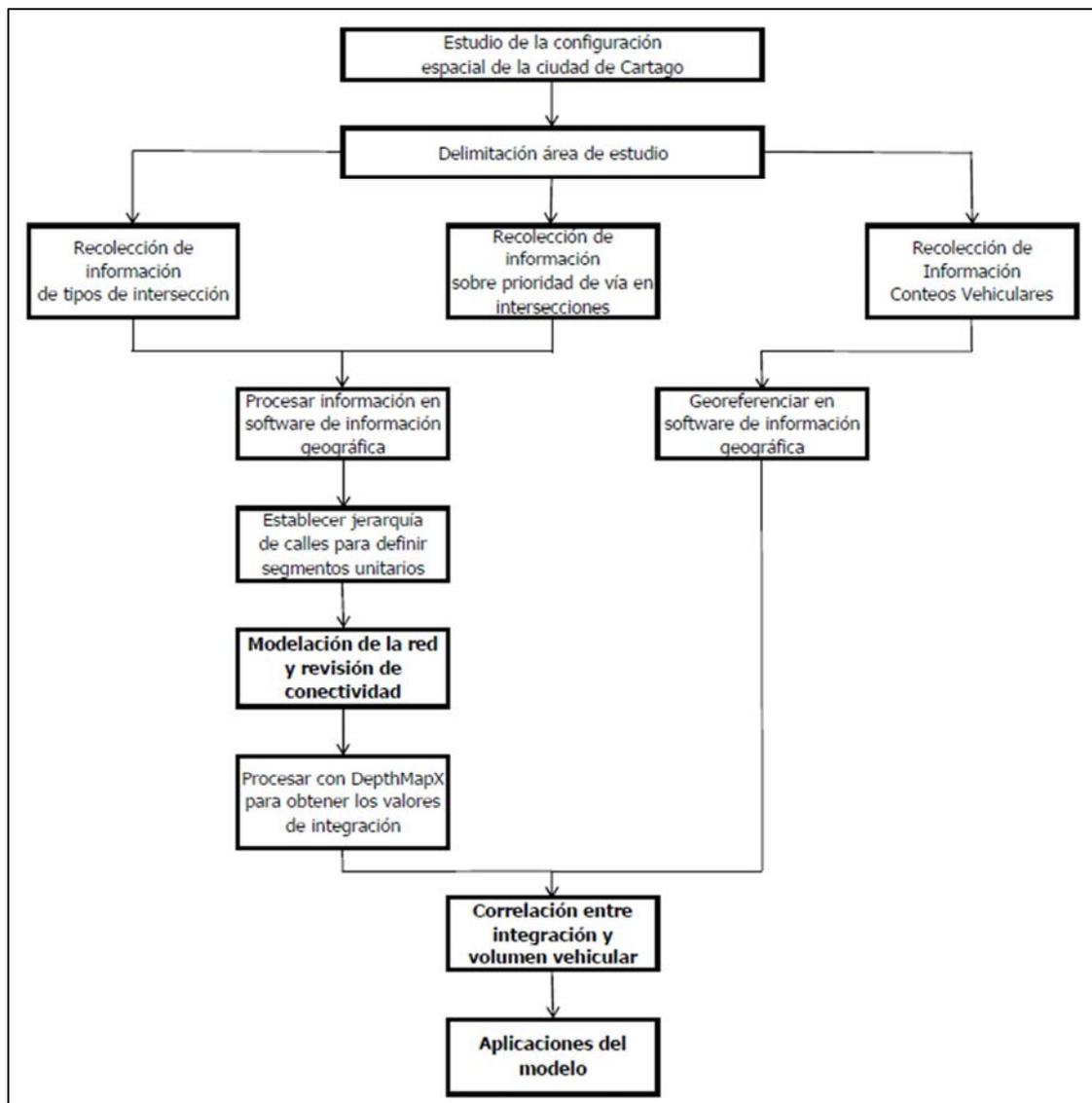


Figura 8. Diagrama de actividades.

### **1.6.1 Delimitar Área de Estudio**

Para establecer el lindero del área de estudio de la ciudad, se busca establecer la zona de interés, que en este caso es principalmente los distritos Oriental y Occidental de la provincia de Cartago y las cercanías a su alrededor. Después, se busca alejar el límite de esta región de interés suficiente para al menos incluir todos los elementos que se conecten con sus límites, se intenta conseguir la mayor área posible que se pueda procesar con el tiempo y los recursos disponibles. Esto para reducir el efecto de borde que se produce al cortar la continuidad de la red.

### **1.6.2 Recolección de información sobre intersecciones**

Después de delimitar el área de estudio, se procede a recorrer la red y recolectar la información necesaria para poder establecer la jerarquización de vías. Esta información consiste en el tipo de control, ya sea alto o semáforo, y la prioridad de la vía en cada una de las intersecciones. Los semáforos se consideran intersecciones donde ambas vías tienen la misma prioridad.

### **1.6.3 Jerarquización de vías y definición de segmentos unitarios**

Posterior a esta recolección de datos, se procesan mediante software de información geográfica, en este caso se utilizó QGIS 2.14.0, y se procede a definir los segmentos unitarios para el análisis, ya que se puede visualizar el punto de inicio y final de los segmentos unitarios a través de la prioridad de las vías en cada intersección. En la sección 2.3 se explica con más detalle el proceso que se realizó.

En el caso del área de estudio, existen pocas calles que por sus características y capacidad indiquen una jerarquización sin recurrir al análisis de cada intersección.

#### **1.6.4 Modelación de la red**

Cuando se han definido los segmentos unitarios, es posible modelar la red. Esto se hace con una representación aproximada mediante líneas rectas, evitando la utilización de trazos curvos y de multilíneas.

De acuerdo a la jerarquización de vías que se establece anteriormente, existen algunos segmentos unitarios que deberían ser curvos de acuerdo a la definición que se utiliza en el modelo. Para poder representarlos mediante líneas rectas hay dos opciones: en la primera se interpretarían con varias líneas para respetar la geometría, en la segunda se utiliza una sección que represente todo el segmento.

Para poder utilizar la segunda opción es necesario revisar que todas las intersecciones de caminos que forman parte del segmento unitario curvo estén conectadas a su sección representativa. Esto se logra importando un archivo dxf con el modelo preliminar de la red en el programa DepthMapX versión 10.14.00b para verificar y establecer la conectividad de los elementos y así alcanzar el modelo definitivo. Es importante también, revisar que no se produzcan islas de elementos dentro del modelo, porque distorsionan los resultados obtenidos.

En la sección 3.1 se retoma y especifica más puntualmente la técnica para definir el modelo.

#### **1.6.5 Análisis de segmento unitario**

Una vez que el modelo topológico de la red es completado se puede correr el algoritmo mediante DepthMapX, y de esta forma se obtienen los datos y la representación visual del análisis de segmento unitario a través de los principios de sintaxis espacial. Es importante revisar que cada unión de elementos importantes en la red haya sido reconocida correctamente por el programa y si este no fuera el caso se debe corregir para completar el algoritmo nuevamente. Con esto se obtienen los valores de integración para la red.

### **1.6.6 Conteos Vehiculares**

La información de conteos vehiculares se obtiene del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, la Dirección General de Ingeniería de Tránsito, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes y otros trabajos de investigación previos. A continuación, se deben procesar los datos de su ubicación, es decir, georeferenciarlos, para poder relacionarlos con los valores de integración de los elementos. También hay que extrapolar estos datos con un factor de crecimiento, cuando sea necesario, y así poder comparar todos en el mismo año, en este caso 2016.

### **1.6.7 Correlación**

Para establecer si existe la correlación se tomarán los valores de integración para los segmentos unitarios de los cuáles hay información de conteos vehiculares que se encuentren dentro de los bordes del área de estudio, no se tomarán en cuenta los conteos propiamente en los límites ni muy cercanos a ellos.

Con estos datos se procede a graficar el volumen vehicular en función del valor de integración para el elemento, calcular el coeficiente de correlación y los coeficientes de determinación para distintas curvas de mejor ajuste, y así establecer cuál representa mejor la relación entre las variables.

Para obtener la descripción estadística y las curvas de ajuste lineal y exponencial se utiliza Microsoft Excel 2010. Para conseguir la curva S y el modelo multivariado se utiliza el software JMP 13.0.0 desarrollado por SAS Institute.

### **1.6.8 Aplicación del modelo**

Como parte final del trabajo, se estudian posibles modificaciones a la red y cómo hacen cambiar las características de la configuración espacial y qué significaría esto para la red. Se examina lo que provocaría agregar un boulevard, las condiciones previas al boulevard de la estación del tren, el cierre de una vía y agregar una conexión entre la Ruta 10 y el eje sur de la ciudad.

## **2. Área de Estudio**

### **2.1 Delimitación**

El área de estudio consiste en la ciudad de Cartago, delimitada de acuerdo a la Figura 9. Incluye la totalidad de los distritos Oriental y Occidental del cantón de Cartago, y el sur del distrito El Carmen, el este de Guadalupe, Taras del distrito de San Nicolás, Dulce Nombre en las cercanías del Instituto Tecnológico además del oeste de Caballo Blanco y el norte de Aguacaliente con el Barrio Manuel de Jesús Jiménez. Además, una sección del oeste de San Rafael de Oreamuno y de El Tejar de El Guarco, principalmente el Barrio Viento Fresco.

Se elige estudiar la ciudad de Cartago por ser una de las más importantes del país y por tener una significativa actividad local. Siendo un centro urbano 20km al este de San José, se encuentra suficientemente lejos de la capital como para considerar que el efecto de los viajes con ese destino sea menor que en otros lugares que forman parte del área metropolitana. Además, el tamaño se considera adecuado para realizar la modelación con los recursos y tiempo disponibles, también para buscar establecer la correlación con suficientes datos de conteos, analizar modificaciones a la red y verificar la prontitud de la aplicación del método.

De acuerdo a las observaciones de Ratti en "Urban texture and space syntax: some inconsistencies" (2004) los sistemas de comunicación en una red varían según la extensión de la ciudad que está siendo considerada y dónde se decide colocar el borde del área de estudio. Existe un efecto de borde, se produce al delimitar el área y significa que los segmentos unitarios cercanos al límite, o propiamente parte de este, pierden importancia al deshacerse de los elementos que se encuentran fuera del mismo.

Se busca disminuir la presencia de los cantones de El Tejar de El Guarco y San Rafael de Oreamuno en la región seleccionada al dejar su influencia cerca del límite, ya que el foco más importante es la parte central de la zona seleccionada. También se intenta que el límite del



Figura 11. Las señales de "ceda el paso" se consideran igual que los altos para los efectos del estudio. Las fotografías se toman utilizando la aplicación de GPS Map Camera para sistema operativo Android, con la cual se obtiene una localización cercana. Se cuentan 950 intersecciones aproximadamente y se establecen 1464 segmentos unitarios y en total son aproximadamente 230 kilómetros de carretera.



**Figura 10. Intersección con semáforo.**



**Figura 11. Intersección con alto.**

Esta es la información que se utiliza para establecer la prioridad de vía en las intersecciones y de esa forma establecer la jerarquización de los caminos. Conocer esto en cada uno de los cruces de caminos servirá de base para definir el inicio el final de cada elemento dentro de la red.

Otro aspecto que se puede notar es como en algunas partes de la red los segmentos unitarios no serían líneas rectas sino líneas curvas, una de las limitaciones del software DepthmapX es que reconoce elementos rectos, por lo tanto, para los elementos curvos se debe considerar cómo representarlos.

Durante los recorridos se identificaron ciertas intersecciones importantes. En las Figura 12 y Figura 13 se representan algunos ejemplos, el primero siendo el final del Boulevard el Molino, el segundo es la ruta 231 en las cercanías del colegio Miravalles, estos caminos conectan los distritos Oriental y Occidental del cantón de Cartago con Aguacaliente, Dulce Nombre e inclusive con una parte del Tejar del Guarco. La tercera intersección es entre la Avenida Central y la Calle 14, donde gran parte del tránsito proveniente del Este de la ciudad cruzaría para alcanzar la Avenida 1 y seguir moviéndose hacia el Oeste. Se espera que, de acuerdo a

la hipótesis inicial, se ven representadas en el modelo como intersecciones entre elementos con un alto nivel de integración



**Figura 12. Ejemplos de intersecciones importantes en la ciudad de Cartago.**

**Fuente: Google Maps, 2016.**



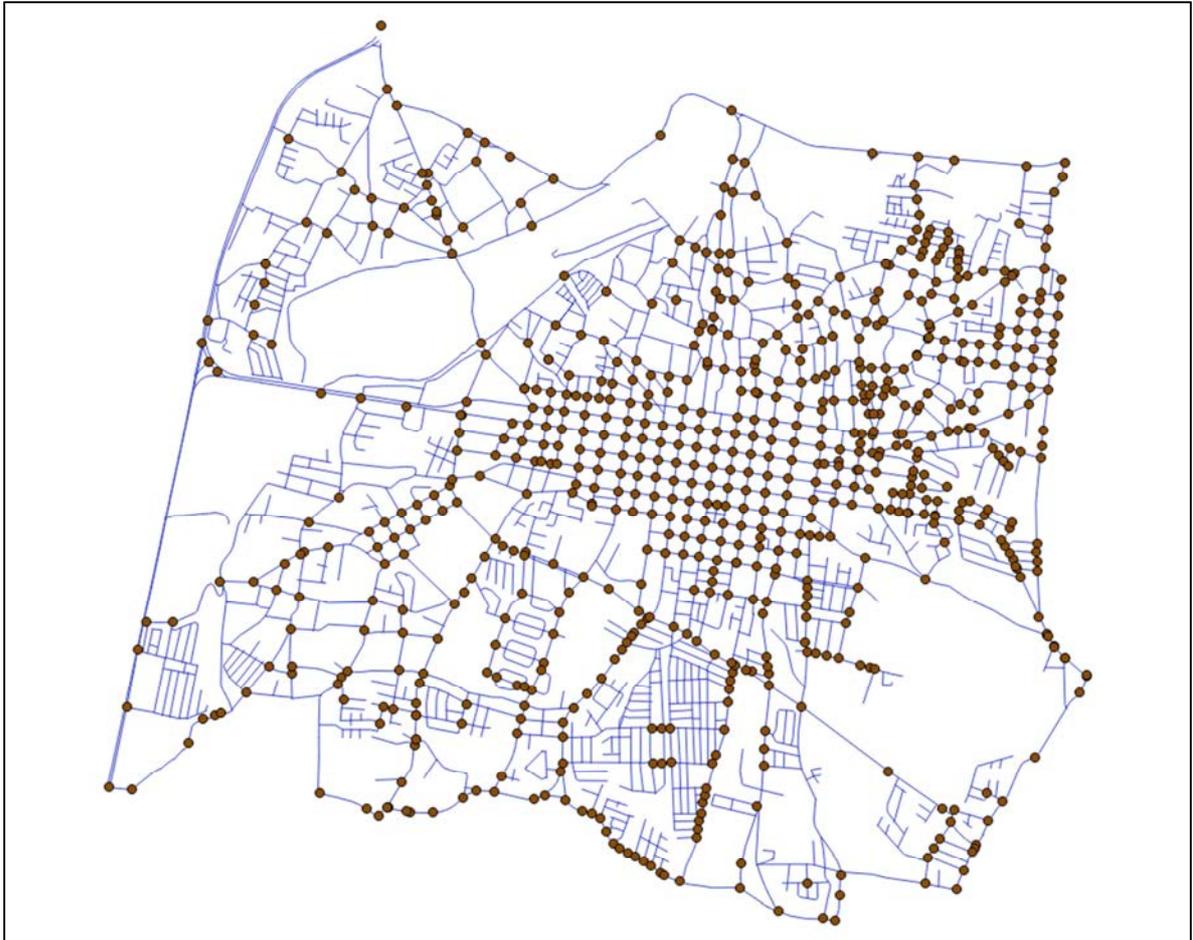
**Figura 13. Ejemplos de intersecciones importantes en la ciudad de Cartago.**

Otro aspecto necesario de anotar es que, de acuerdo a lo observado, en la parte más central de la ciudad, de la avenida 6 a la avenida 3, el tránsito se mueve de forma más fluida entre este y oeste que entre norte y sur, esto podría dar resultados altos de integración para los segmentos que conecten estas avenidas sin que necesariamente se refleje un alto volumen vehicular.

También cabe destacar que en la sección central y sur de la ciudad de Cartago se nota un mayor orden en el trazo de las vías, mientras que en el sector norte, especialmente el área de El Carmen y San Blas, fue más difícil orientarse y entender la jerarquía de vías durante los recorridos.

## 2.3 Jerarquización de Elementos

Para la jerarquización de elementos en la red, se utiliza la información obtenida durante los recorridos y así representar la ciudad como se muestra en la Figura 14 mediante el software de información geográfica QGIS 2.14.0.



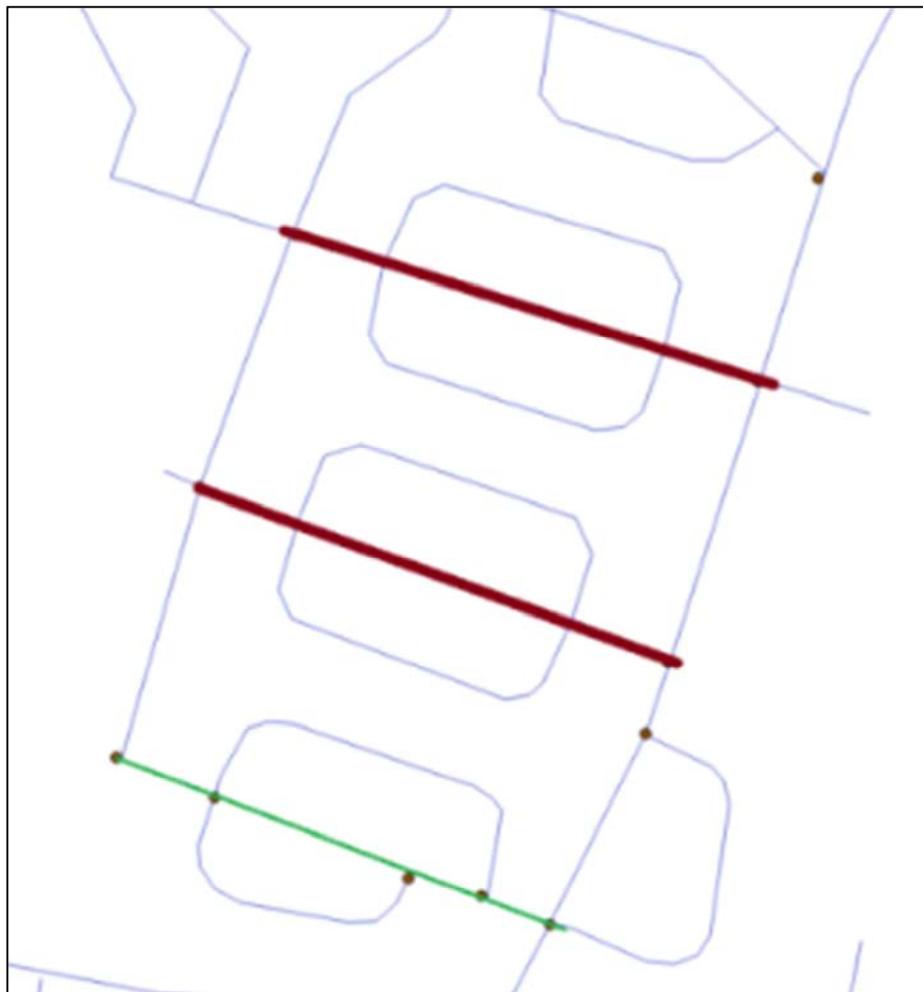
**Figura 14. Ciudad de Cartago, intersecciones fotografiadas.**

**Fuente: Atlas del TEC, 2014. Modificado por el autor.**

Para la simplificación del trabajo, se asume que todas las intersecciones tipo T tienen prioridad de vía en la cabeza de la T y el tránsito que entra por el cuerpo de la T debe hacer un alto para poder ingresar.



En el caso de caminos residenciales con características similares como los mostrados en la Figura 16, cuando se tiene información de uno de los elementos como el marcado en verde, se considera que los otros marcados en rojo tienen una jerarquía que se comporta de la misma manera.



**Figura 16. Modelo topológico Residencial El Molino.**

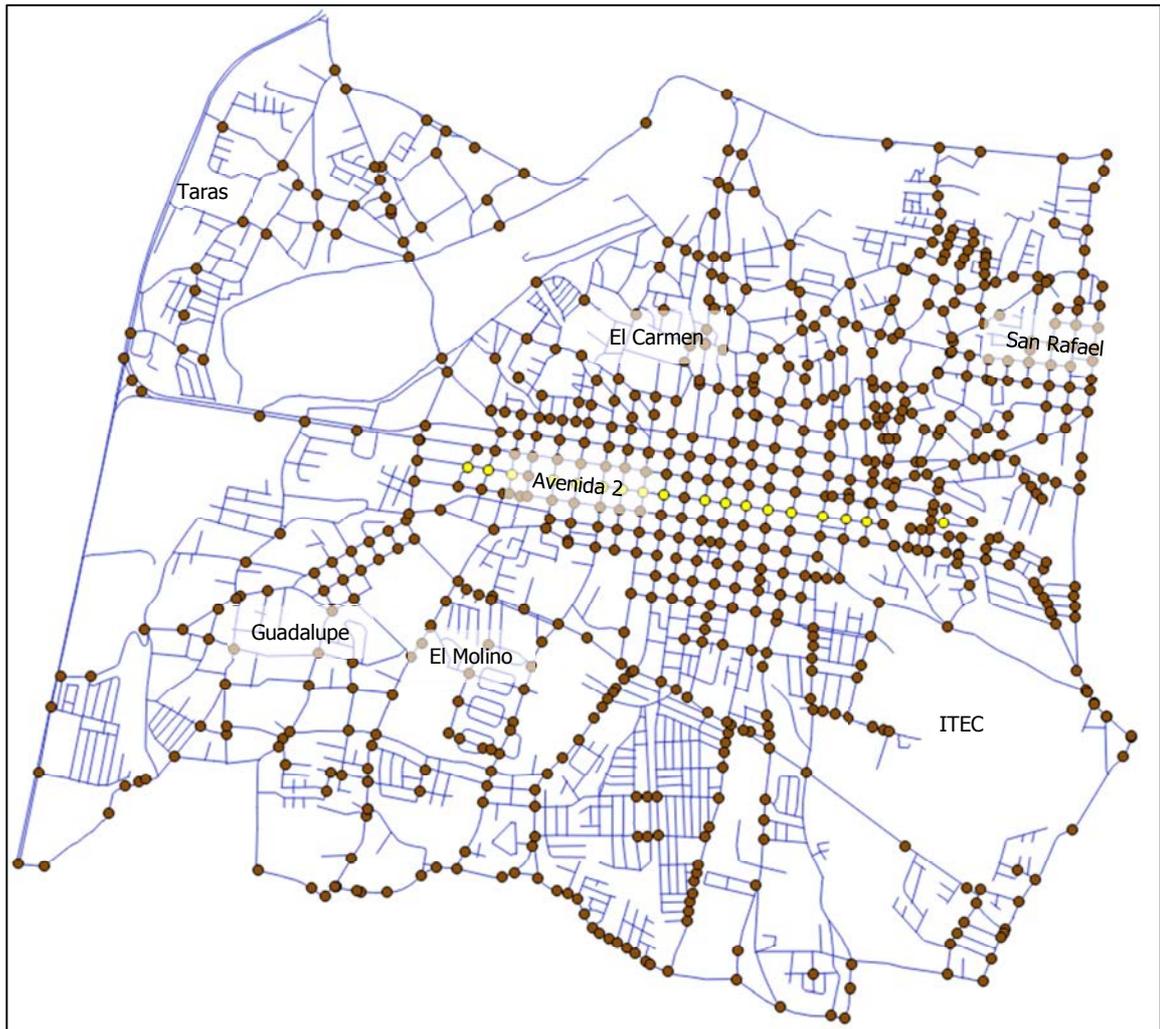
**Fuente: Atlas del TEC, 2014. Modificado por el autor.**

Una vez definida la prioridad de las vías, se procesa la información para localizar geográficamente las intersecciones mediante el software QGIS y tabular la información requerida como se ejemplifica en el Cuadro 2, en el cual se procedió a darle un número de identificación a cada intersección, referenciar la fotografía donde se pueden ver las características, especificar cuál es la vía con mayor jerarquía y cuál es el tipo de intersección. Para el caso de las intersecciones con semáforo, se decide que la jerarquía es igual para ambas vías. En el caso del nodo 16, lo que sucede es que el flujo se puede bifurcar entre los que van hacia el oeste de Cartago y los que van hacia el sector noreste, pero no entra flujo vehicular a la vía en esa intersección, sólo sale, por lo que se considera que esa calle sigue siendo un solo segmento unitario hasta el siguiente punto de decisión.

ID Nodo	Número Fotografía	Vía Principal	Tipo de Intersección	ID Nodo	Número Fotografía	Vía Principal	Tipo de Intersección
15	015	No Aplica	Semáforo	28	029	Avenida 2	Alto
16	016	Transversal 17	No Aplica	29	030	Avenida 2	Alto
17	017	Avenida 2	Alto	30	031	Avenida 2	Alto
18	018	Avenida 2	Alto	31	032	Avenida 2	Alto
19	019	Avenida 2	Alto	32	033	No Aplica	Semáforo
20	020	Avenida 2	Alto	33	034	Avenida Central	Alto
21	021	Avenida 2	Alto	34	035	Avenida Central	Alto
22	022	Avenida 2	Alto	35	036	Avenida Central	Alto
23	023	Avenida 2	Alto	36	037	Avenida Central	Alto
24	024	Avenida 2	Alto	37	038	No Aplica	Semáforo
25	025	No Aplica	Semáforo	38	039	No Aplica	Semáforo
26	027	Avenida 2	Alto	39	043	Avenida Central	Alto
27	028	Avenida 2	Alto	40	044	Avenida Central	Alto

**Cuadro 2. Información de tipo de intersección y jerarquía de vía para los nodos 15 a 40.**

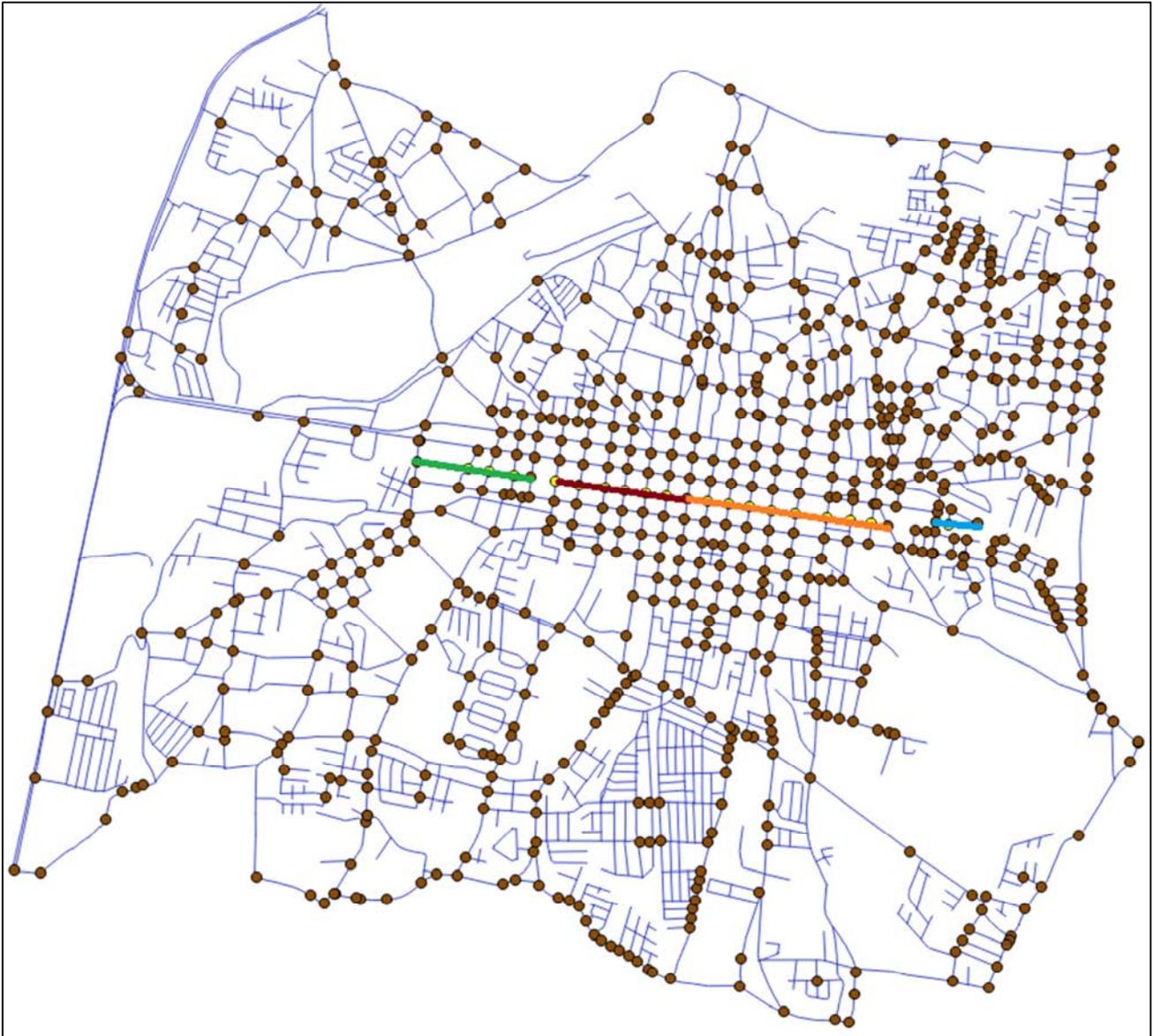
Con la información clasificada dentro del software es posible ahora seleccionar cuál es la calle con prioridad en cada intersección. Utilizando el ejemplo de la Avenida 2, como se muestra en las Figura 17, se selecciona cada una de las intersecciones donde este es el elemento con mayor jerarquía y se muestra gráficamente donde comienza y finaliza cada segmento unitario sobre esta avenida.



**Figura 17. Selección de Avenida 2 como vía prioritaria.**

**Fuente: Atlas del TEC, 2014. Modificado por el autor.**

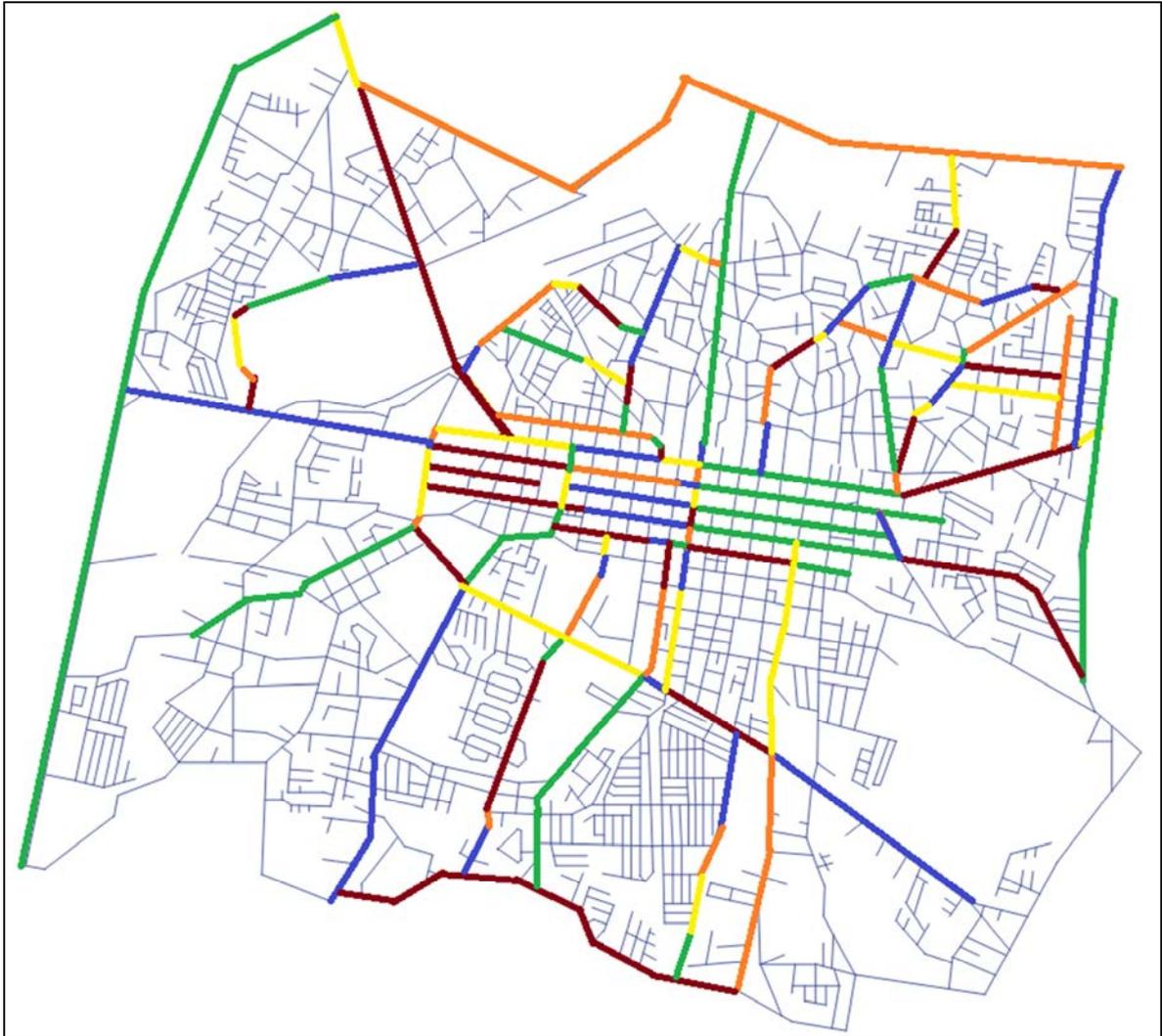
En la Figura 18 se demuestra cada uno de los elementos que formarían parte del análisis de segmento unitario en la Avenida 2. Este proceso se repite para cada una de las vías principales establecidas con anterioridad para así poder definir cada uno de los segmentos unitarios de la red entre puntos de decisión. Y así proceder a elaborar el modelaje.



**Figura 18. Segmentos unitarios para la Avenida 2.**

**Fuente: Atlas del TEC, 2014. Modificado por el autor.**

En la Figura 19 se presentan los principales segmentos unitarios resaltados, cada cambio de color en una intersección solamente significa un cambio de segmento unitario. Se pueden apreciar los elementos importantes cuya geometría no permite que se dibuje en una línea recta, para estos es necesario utilizar una sección representativa y conectar todas las calles que intersequen el elemento que se indica en la figura.

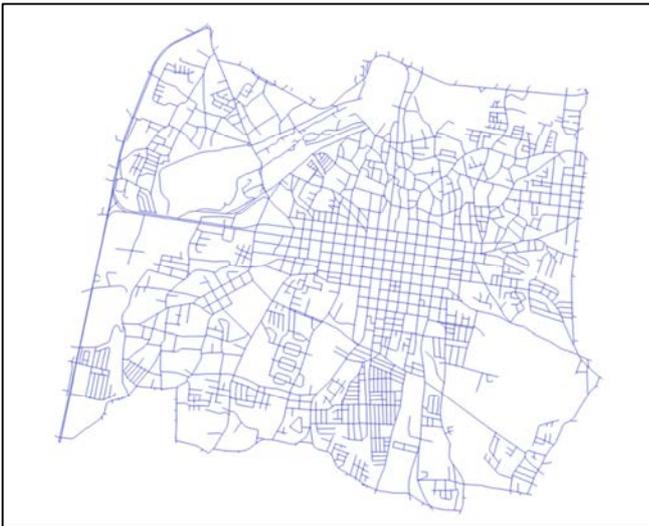


**Figura 19. Segmentos Unitarios Importantes.**

### 3. Análisis de segmento unitario

#### 3.1 Modelación de la red

A partir de la definición de elementos explicada anteriormente, se dibuja el modelo de la red, esto se puede realizar utilizando un software de información geográfica o con un programa de dibujo asistido por computadora (CAD). En la Figura 20 se muestra la red del área de estudio que debe modificarse a utilizar sólo líneas rectas como se puede ver en la Figura 21, ya que el software DepthMapX no reconoce líneas curvas ni multilíneas como elementos únicos.



**Figura 20. Red área de estudio.**

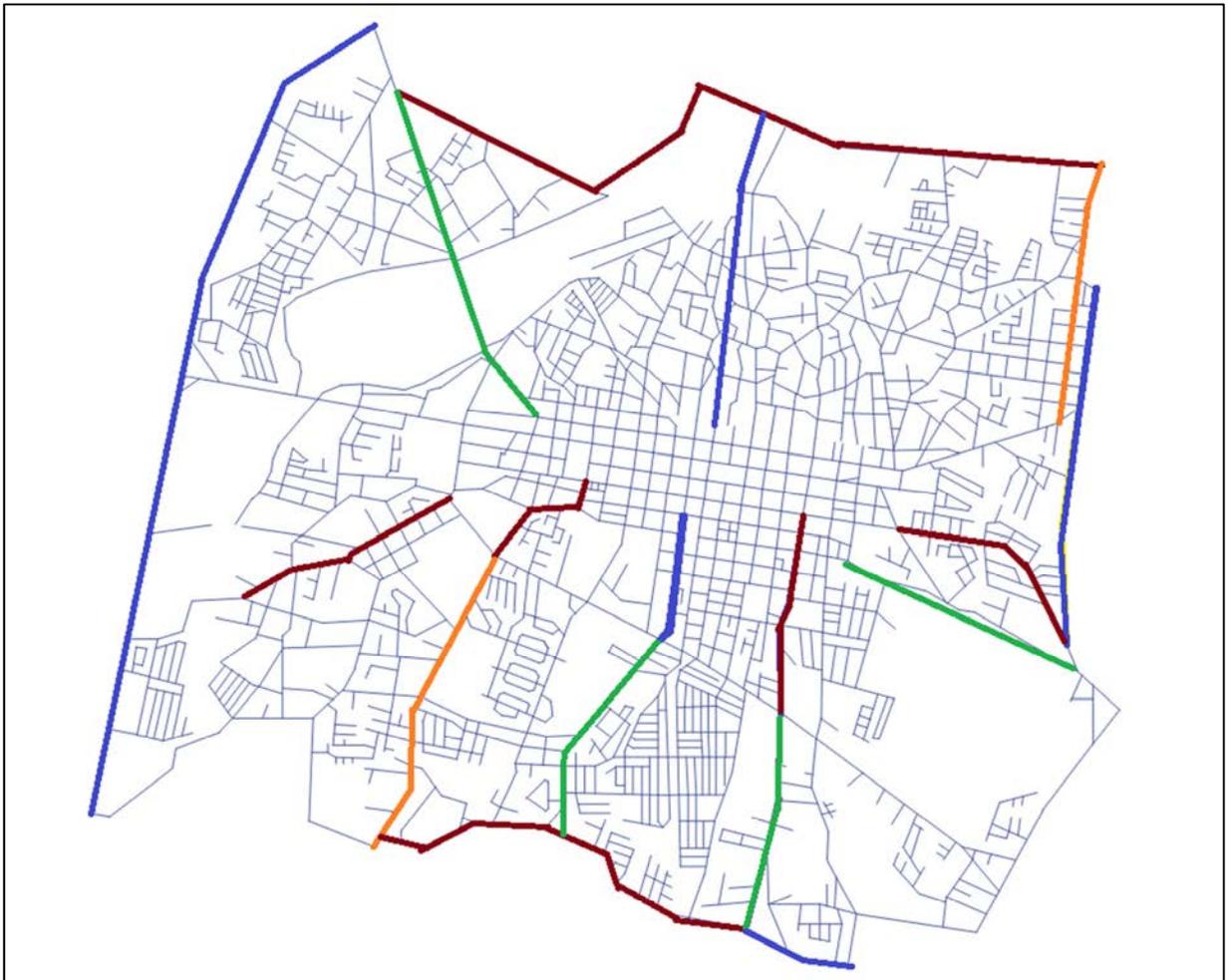
**Fuente: Atlas TEC 2014.**



**Figura 21. Aproximación con líneas rectas**

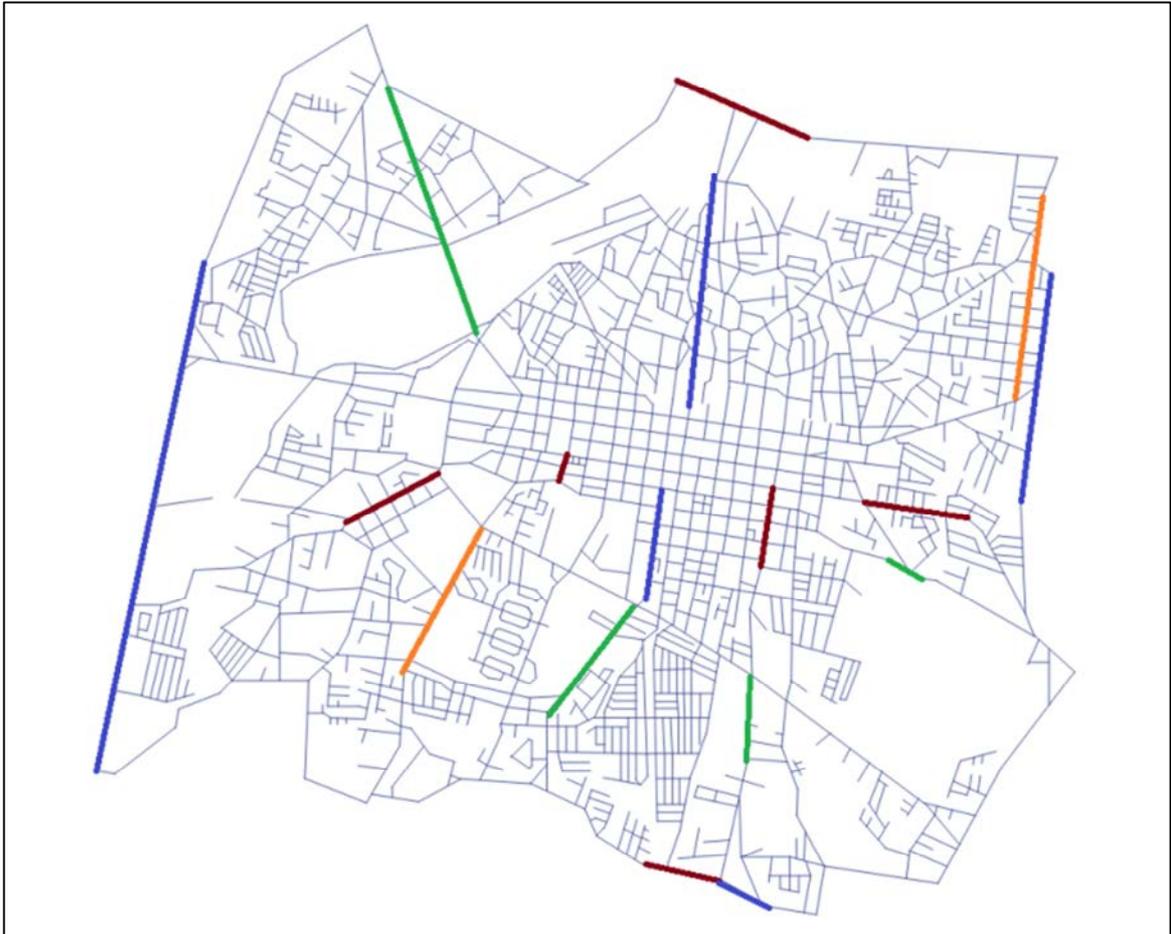
Una consideración importante a la hora de elaborar el modelo, es la decisión sobre líneas curvas que se comportan como un segmento unitario de acuerdo a la definición. Debido a la limitación del software de trabajar sólo con elementos rectos, es necesario decidir la mejor forma de representar estos caminos. Lo ideal sería utilizar una línea que represente todo el segmento unitario, pero eso dificulta la fidelidad geométrica de algunas secciones de la red, como en los ejemplos de la Figura 22, donde se resaltan los elementos que podrían ser

importantes entre los segmentos curvos que pierden características de conectividad por su trazo.



**Figura 22. Segmentos unitarios curvos.**

Para evaluar el método se decide elaborar dos modelos, el primero consiste en utilizar secciones de los segmentos unitarios que representen cada uno de los elementos, como se especifica en la Figura 23. Mientras que para el segundo, se usan todas las líneas rectas representando la geometría, este último demostró no reflejar de manera convincente la situación real.



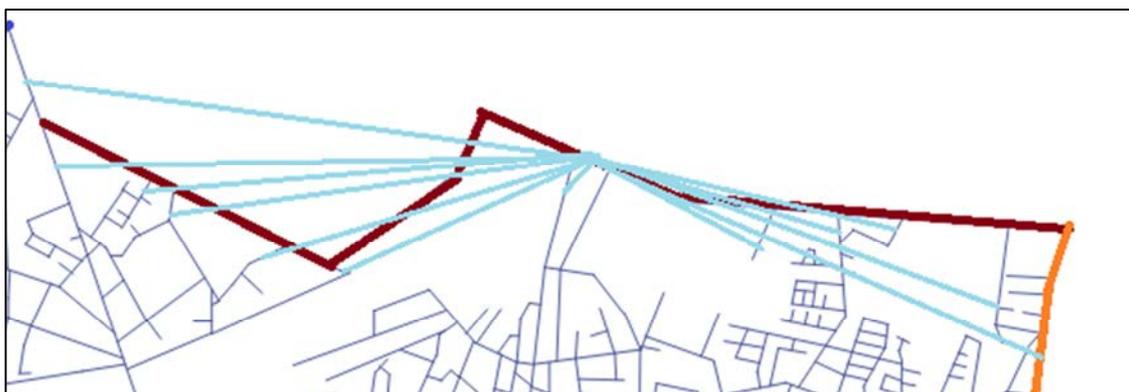
**Figura 23. Secciones para representar segmentos unitarios curvos.**

Cuando se definen los segmentos unitarios y se establece el modelo, se procede a analizar las características de conectividad mediante el programa DepthMapX. Se utiliza también este software para hacer el análisis de integración de la red.

Uno de los cuidados que se debe tener es la revisión de que todos los elementos de la red estén conectados correctamente y que no se formen "islas" de unos pocos segmentos que no estén ligados a la red. Esto sucede porque en algunos casos el software no logra reconocer uniones en una intersección, por lo tanto, se deben comprobar los elementos y corregir cuando esto ocurra.

La forma en que se define la conectividad para los segmentos unitarios curvos es tomando en cuenta cada segmento unitario teórico marcado en la Figura 22 y ligando todos los elementos que lo intersecarían con la sección marcada en la Figura 23. Es importante especificar, que cada uno los otros elementos del segmento unitario teórico deben quedar completamente separados del resto de la red, para que evitar crear islas que distorsionen los resultados del cálculo de integración y los mapas de calor.

En la Figura 24 se ilustra cuáles elementos se ligan a la sección representativa del segmento unitario correspondiente a la ruta 219.



**Figura 24. Conectividad para el Modelo en la ruta 219.**

### 3.2 Conectividad

En la Figura 25 se muestra un mapa de calor de la conectividad para la red. Los segmentos unitarios rojos son los que se encuentran conectados con una mayor parte de otros elementos de la red en el primer nivel de profundidad, mientras que los elementos azul oscuro están ligados a un máximo de dos. Se puede ver un cambio en las avenidas del centro después de la Calle 2 donde dejan de ser rojas. Esto sucede porque al este de esa división no hay semáforos y por lo tanto los segmentos unitarios son más largos.

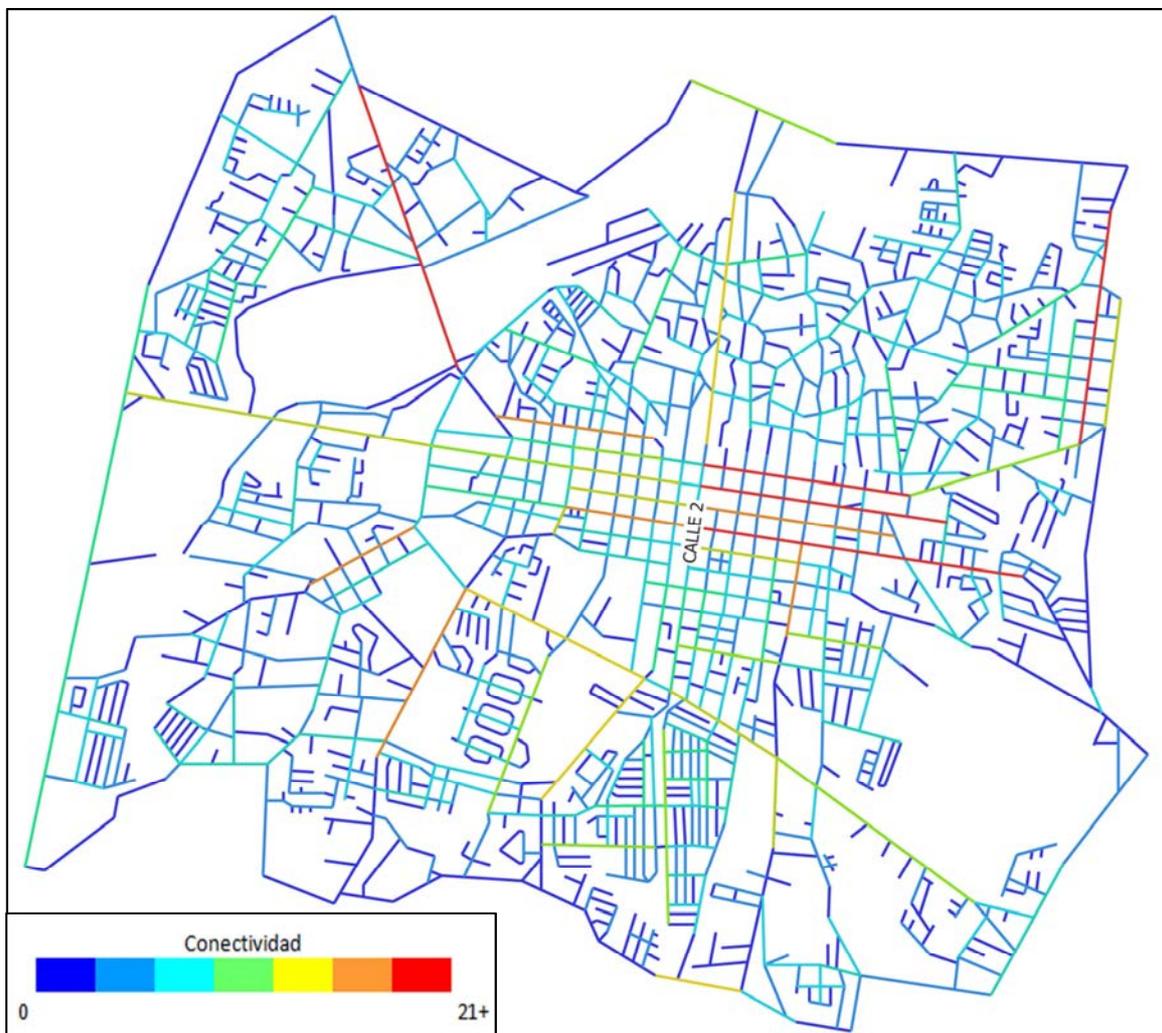
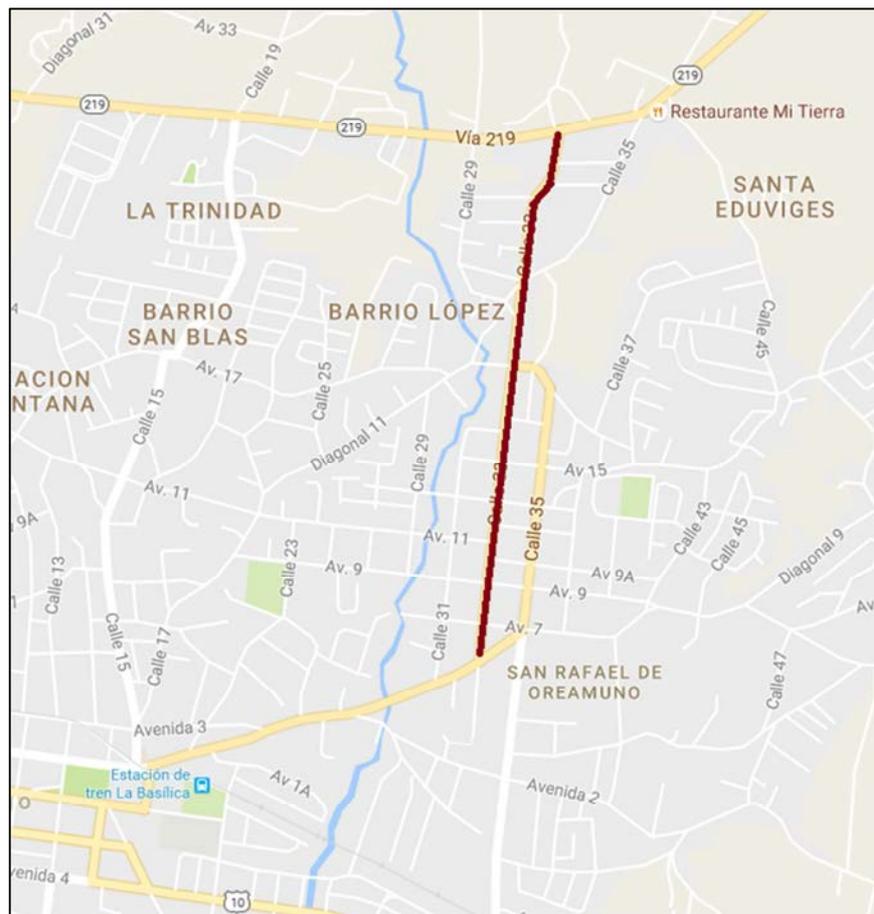


Figura 25. Resultados conectividad Modelo.

El modelo consta de 1464 segmentos unitarios. Hay 180 elementos con una conectividad de 1, que significa que sólo están ligados a otro elemento de la red. La mayor conectividad es de 22 y se presenta en la calle 33 que pasa por el centro de San Rafael de Oreamuno que se muestra en la Figura 26



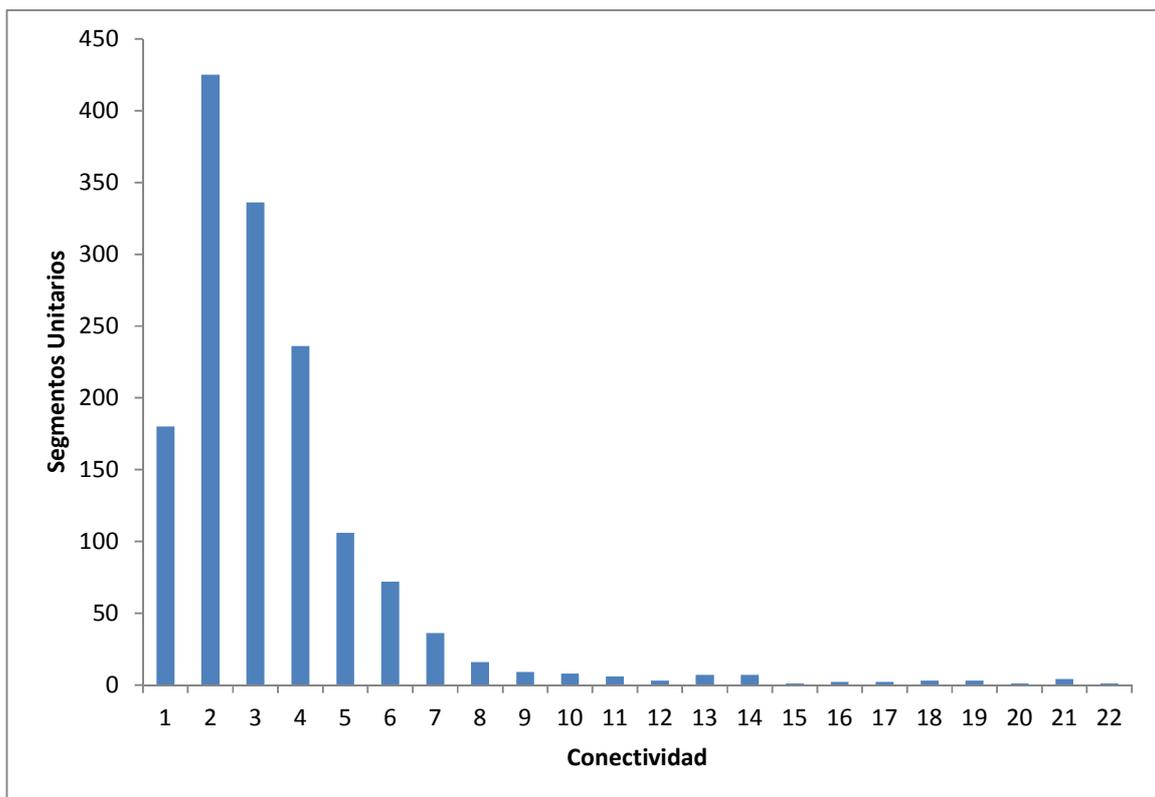
**Figura 26. Segmento unitario con mayor conectividad.**

La conectividad promedio es de 3,48. La moda es 2 y la mediana es 3. La mayoría de estas calles con baja conectividad se encuentran en sectores residenciales y alejadas del centro de la ciudad. Los elementos con una conectividad alta tienden a formar parte de carreteras nacionales o de travesías. En el Cuadro 3 se muestra un resumen de la descripción estadística de la conectividad para el modelo.

Conectividad	
Media	3,48
Error típico	0,069
Mediana	3
Moda	2
Desviación estándar	2,65
Varianza de la muestra	7,00
Curtosis	14,29
Coefficiente de asimetría	3,17
Rango	21
Mínimo	1
Máximo	22

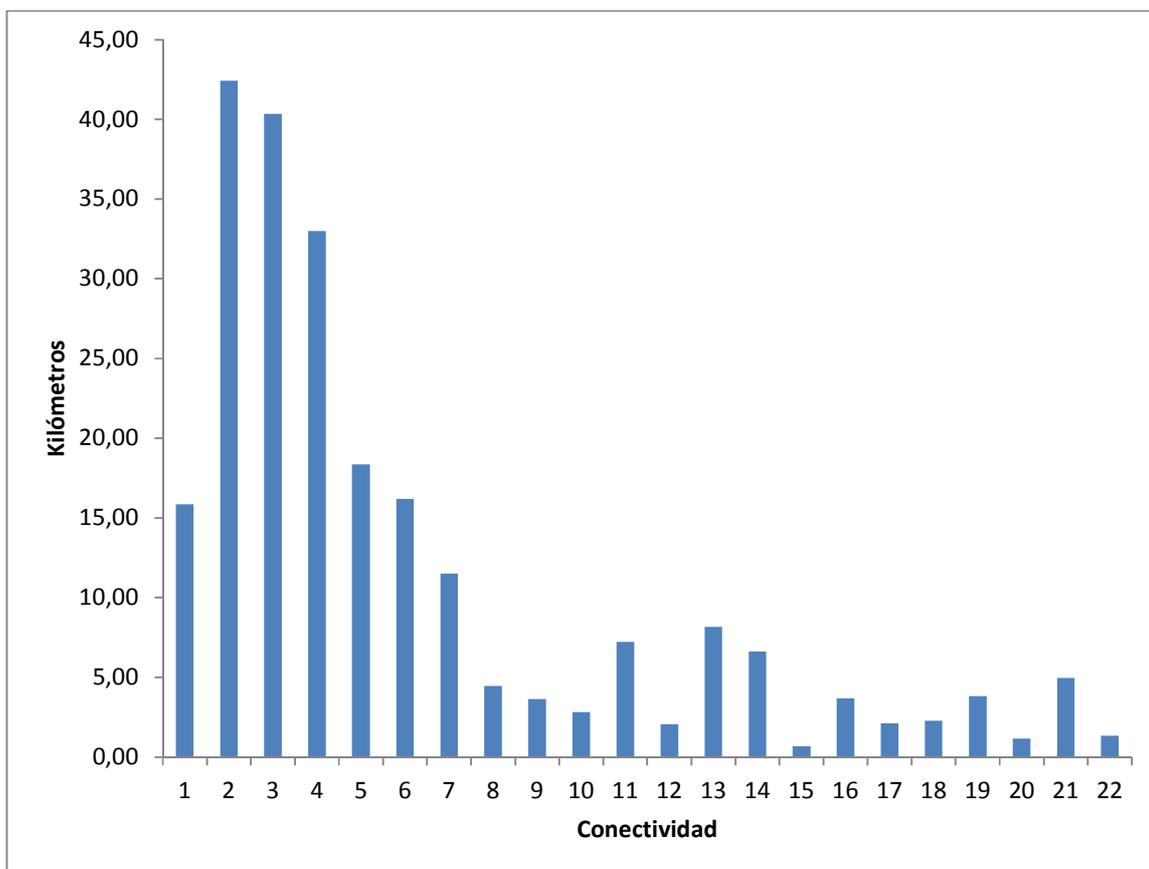
**Cuadro 3. Descripción estadística de la conectividad para el modelo.**

En la Figura 27 se presenta un histograma con la frecuencia que se presentan los valores de conectividad para los segmentos unitarios dentro del área de estudio.



**Figura 27. Histograma conectividad.**

En la Figura 28 se representa la cantidad de kilómetros de carretera en la red de acuerdo a la conectividad de los elementos de acuerdo a los datos detallados en el Cuadro 4.



**Figura 28. Kilómetros de carretera para segmentos de acuerdo a su conectividad.**

Hay 180 elementos en la red con una conectividad de 1 y forman parte de 15,85 kilómetros de carretera, esto representa un 6,81% del total de la red. Los segmentos unitarios con conectividad de 2, 3 y 4 tienen un total de 115,76 kilómetros de calles y representan 49,74%

del área de estudio. Los elementos con una conectividad bastante alta, de 10 o más son 18,95% de la red con 46,92km.

Conectividad	Segmentos	Km	Conectividad	Segmentos	Km
1	180	15,85	12	3	2,05
2	425	42,42	13	7	8,18
3	336	40,36	14	7	6,61
4	236	32,98	15	1	0,67
5	106	18,36	16	2	3,67
6	72	16,21	17	2	2,11
7	36	11,51	18	3	2,30
8	16	4,48	19	3	3,83
9	9	3,63	20	1	1,16
10	8	2,81	21	4	4,96
11	6	7,22	22	1	1,33

**Cuadro 4. Kilómetros de carretera para segmentos de acuerdo a su conectividad.**

### 3.3 Integración

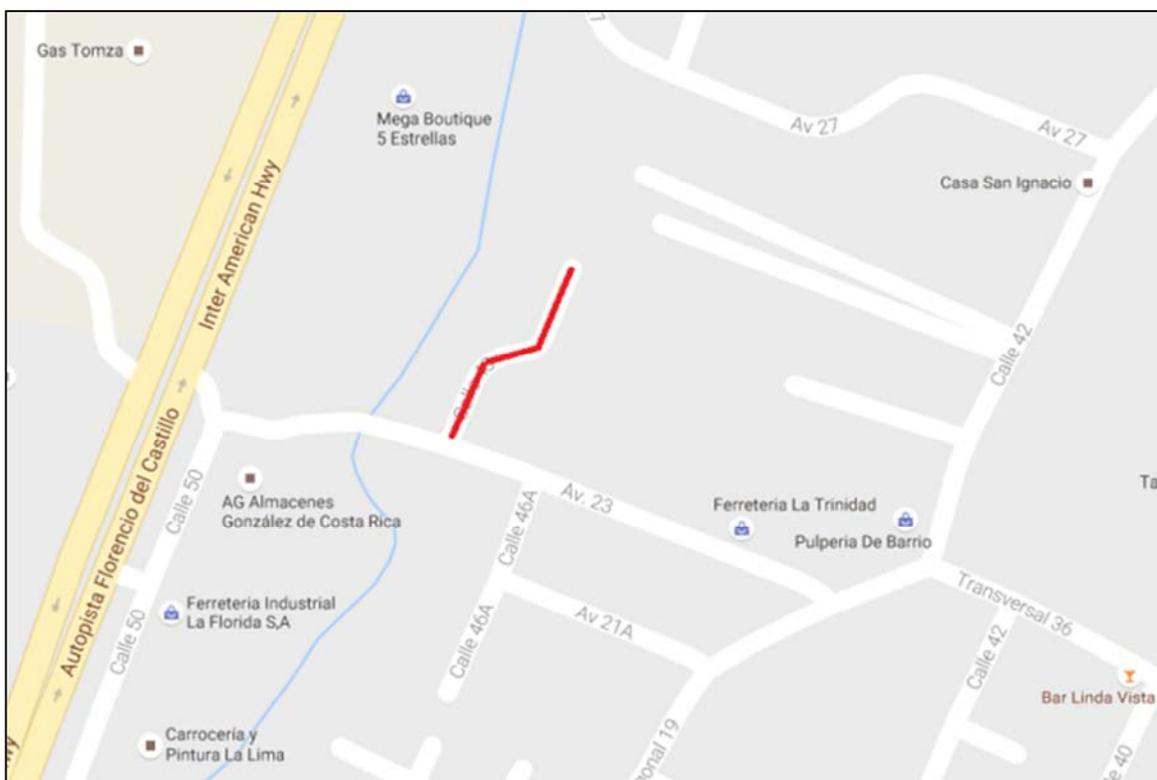
La integración se puede considerar como una medida de qué tan accesible es un elemento de una red con respecto al resto de las partes de esa misma red, en el caso de este trabajo este elemento es un segmento unitario definido como tal en la sección 1.5.2.

Para el modelo se tiene que el valor promedio de integración de los segmentos unitarios es 1,04. La moda es 0,85 y la mediana es 1,01. En el Cuadro 5 se muestra un resumen de la descripción estadística de la integración en el modelo.

Integración	
Media	1,04
Error típico	0,005
Mediana	1,01
Moda	0,85
Desviación estándar	0,19
Varianza de la muestra	0,04
Curtosis	-0,27
Coficiente de asimetría	0,45
Rango	1,03
Mínimo	0,62
Máximo	1,65

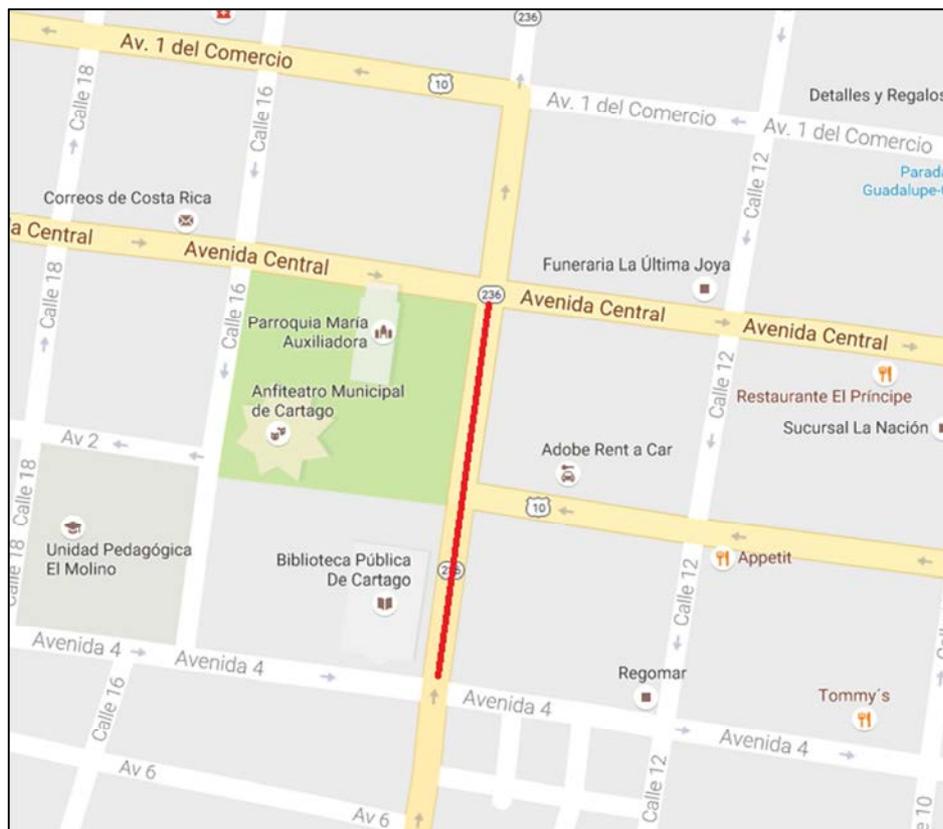
**Cuadro 5. Descripción estadística de la integración en el modelo.**

El valor mínimo es 0,62 y se ubica en el sector de Taras, calle 48, se puede ver resaltado en la Figura 29 .



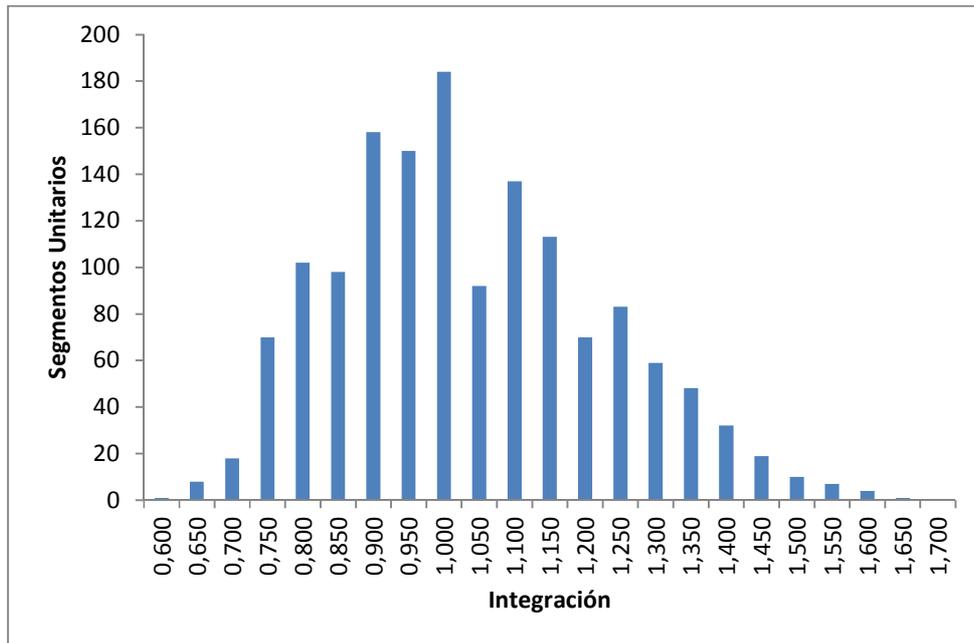
**Figura 29. Segmento unitario de menor integración.**

El valor máximo es 1,65 y se encuentra en la Calle 14 al costado este de la Parroquia María Auxiliadora, se muestra resaltado en la Figura 30. Este es un elemento donde convergen la Ruta Nacional 10, la Vía 236. Además, está conectado con la Avenida 2 que recibe gran parte del tránsito proveniente del este de la ciudad y con las avenidas Central y 4 que son por dónde se mueve mucho del tráfico en dirección Oeste-Este. También, este segmento unitario se encuentra a dos niveles de profundidad de la Avenida 1, que es la principal salida hacia San José.



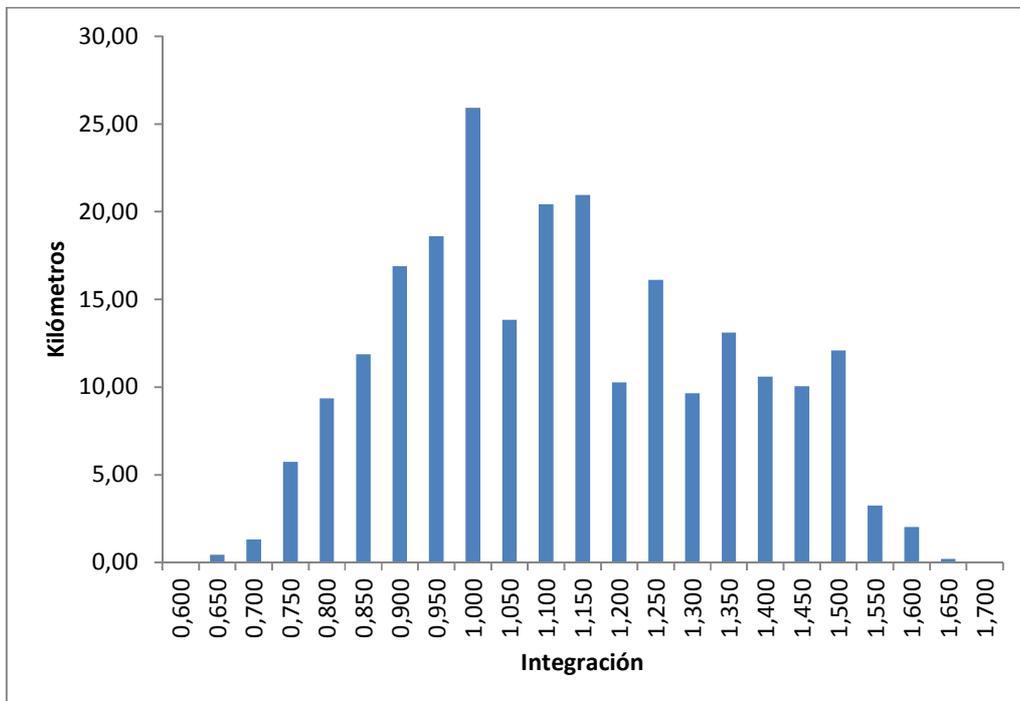
**Figura 30. Segmento unitario con mayor integración.**

En la Figura 31 se presenta el histograma para la frecuencia que se presentan los valores de integración para los segmentos unitarios de la red. En el eje X se presentan los puntos medios para los intervalos representados por las barras.



**Figura 31. Histograma integración.**

En la Figura 32 se representa la cantidad de kilómetros de carretera en la red de acuerdo a la conectividad de los elementos de acuerdo a los datos detallados en el Cuadro 6.



**Figura 32. Kilómetros de carretera para segmentos de acuerdo a su integración.**

Integración	Segmentos	Km	Integración	Segmentos	Km
0,60	1	0,05	1,15	113	20,96
0,65	8	0,44	1,20	70	10,27
0,70	18	1,32	1,25	83	16,10
0,75	70	5,74	1,30	59	9,65
0,80	102	9,35	1,35	48	13,10
0,85	98	11,88	1,40	32	10,60
0,90	158	16,90	1,45	19	10,05
0,95	150	18,60	1,50	10	12,08
1,00	184	25,92	1,55	7	3,24
1,05	92	13,84	1,60	4	2,03
1,10	137	20,43	1,65	1	0,19

**Cuadro 6. Kilómetros de carretera para segmentos de acuerdo a su integración.**

Hay 184 elementos en la red con una integración de 1 y corresponden a 25,92 kilómetros de carretera, esto representa un 11,14% del total de kilómetros en la red. Los segmentos unitarios con integración menor a 0,75 suman 7,54 kilómetros del área de estudio. Los elementos con una integración bastante alta, mayor a 1,50 consisten el 7,54% de la red con 17,54km.

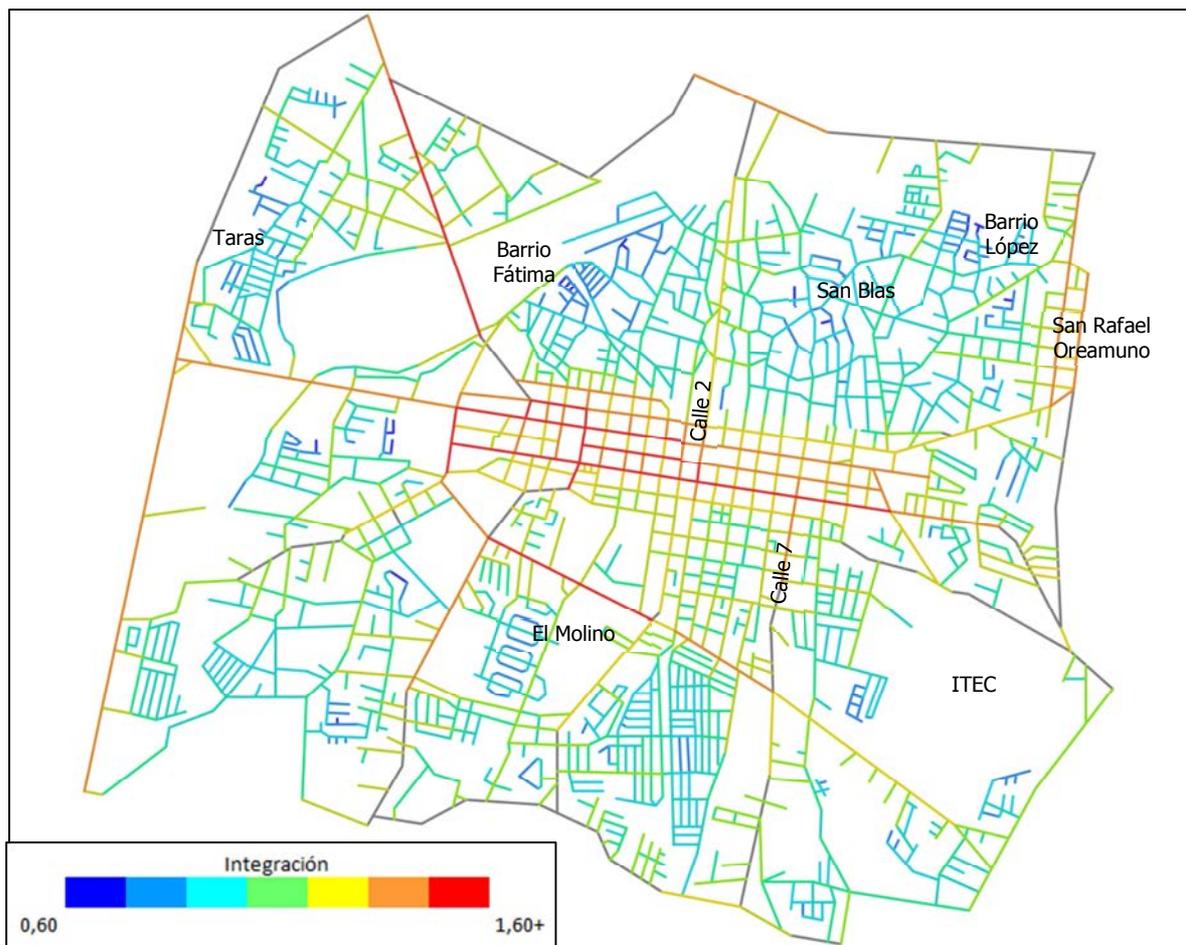
En la Figura 33 se muestra el mapa de calor para el modelo, donde los segmentos unitarios rojos son los elementos con mayor nivel de integración y los azules tienen los valores menores. Los elementos grises en la figura son parte de los segmentos unitarios curvos que están siendo representados por las secciones resaltadas en la Figura 23 y tienen un valor de integración nulo al estar aislados. Se mantienen para representar la geometría de la red.

Se ve en la Figura 33 que las zonas menos integradas de la ciudad de Cartago son áreas destinadas principalmente a la vivienda como Taras, Barrio López, Barrio Fátima y el sector de San Blas en menor medida. Se pueden ver elementos de baja integración en calles residenciales alejadas del centro. Eso indica que son que son las calles y los sectores menos accesibles desde otros puntos de la red. Se pueden ver elementos con altos niveles de integración en las avenidas del centro de la ciudad, principalmente en el sector oeste después de cruzar la Calle 2, también es importante la diagonal que conecta el centro con el sector de Taras y el Boulevard El Molino al sur del casco central. La región con calles más integradas está principalmente en el Distrito Occidental. Se puede establecer que las

avenidas son importantes en el centro de la ciudad y que es de esperar que ahí transiten la mayor cantidad de vehículos.

Una integración también alta pero en menor medida se puede ver en San Rafael de Oreamuno, en las avenidas del centro al Este de la Calle 2 y en la Calle 7. También en las calles que salen de la ciudad como la Ruta 10 tanto al este como al oeste del casco central y la vía que se conecta con El Tejar de El Guarco.

En general el modelo indica que el sector sur del área de estudio está más integrado que el norte. Esto puede tener la influencia de los caminos que conectan la ciudad con los distritos de Aguacaliente, Dulce Nombre, Guadalupe y El Tejar de El Guarco.



**Figura 33. Resultados integración Modelo.**

## 4. Resultados Correlación

### 4.1 Conteos Vehiculares

Existen distintas fuentes de información con datos de conteos vehiculares dentro del área de estudio, un importante número de conteos realizados por la Unidad de Gestión Municipal del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), la Dirección General de Ingeniería de Tránsito (DGIT), y datos del Proyecto de Graduación de Christian Moukhallaleh, además existe información del Ministerio de Obras Públicas y Transportes publicada en los Anuarios de Tránsito. En la Figura 34 se muestra la ubicación de estos conteos.

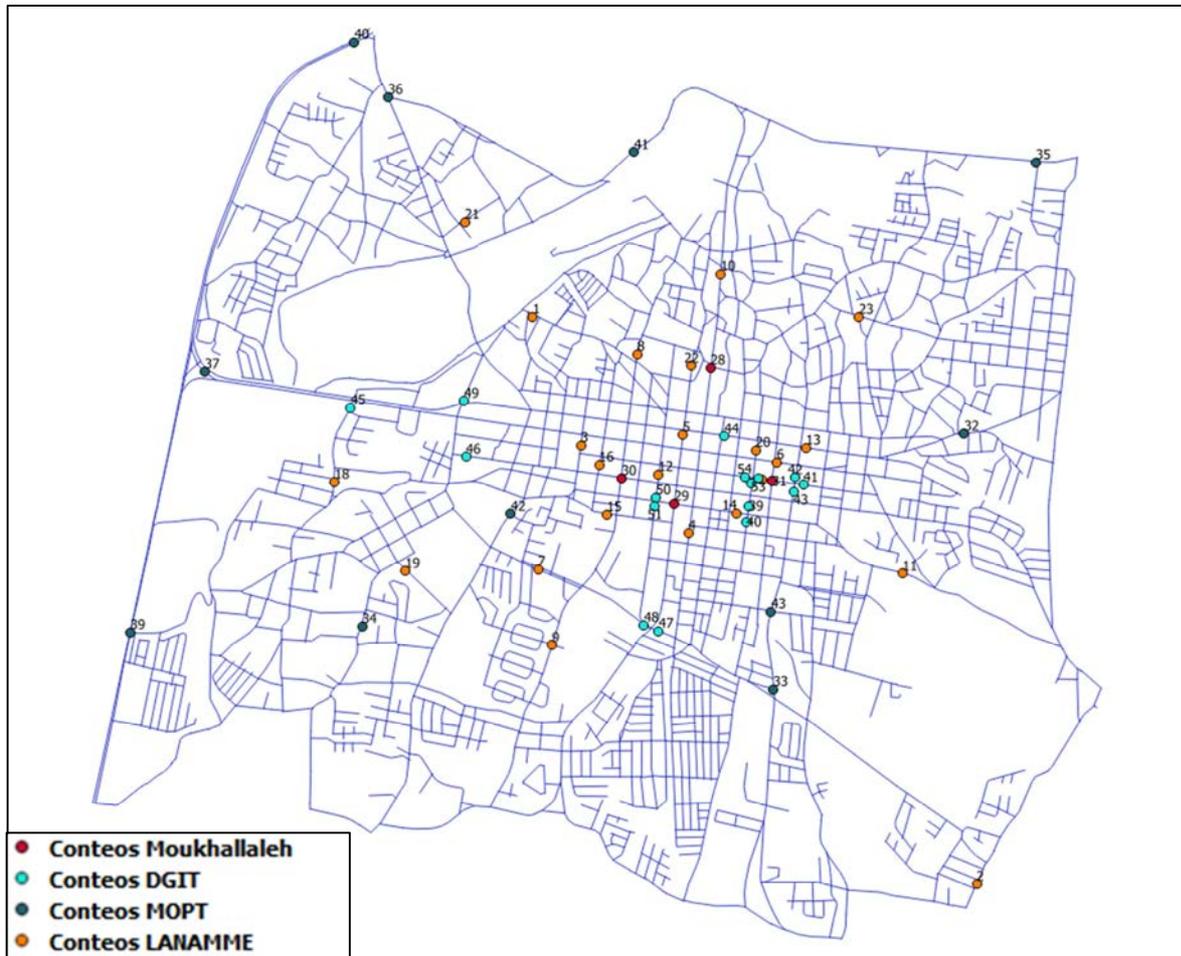


Figura 34. Localización puntos con información de conteos vehiculares.

Fuente: Atlas del TEC, 2014. Modificado por el autor.

Los datos de los bordes no se tomaron en cuenta para establecer la correlación entre el volumen de tránsito y la integración de las calles dentro del sistema porque “el análisis de segmento unitario no es totalmente libre del efecto de borde” (Paul, 2009). El efecto de borde se presenta al delimitar el área de estudio, porque haciendo esto se eliminan ciertos elementos que podrían conectarse con el borde fuera de la red analizada.

En los siguientes cuadros se presentan los datos de conteos disponibles obtenidos a través de la Unidad de Gestión Municipal del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, el trabajo de graduación elaborado por Christian Moukhallaleh, El Ministerio de Obras Públicas y Transportes, y la Dirección General de Ingeniería de Tránsito.

ID	Fuente	Año	Crecimiento	Ubicación	Total Conteo	Diario Estimado	Estimado 2016
1	LANAMME	2009	4.0%	Barrio Fátima	1866	1866	2456
2	LANAMME	2009	4.0%	Dulce Nombre	583	583	767
3	LANAMME	2009	4.0%	Occidente Iglesia	8586	8586	11299
4	LANAMME	2009	4.0%	Oriental Hospital	7018	7018	9235
5	LANAMME	2010	4.0%	Oriental Estación	8839	8839	11184
6	LANAMME	2010	4.0%	Oriental	13566	13566	17165
7	LANAMME	2009	4.0%	El Molino	7623	7623	10031
8	LANAMME	2009	4.0%	El Carmen	4930	4930	6488
9	LANAMME	2009	4.0%	Res. El Molino	2742	2742	3608
10	LANAMME	2009	4.0%	San Blas	4326	4326	5693
11	LANAMME	2010	4.0%	Dulce Nombre	6028	6028	7627
12	LANAMME	2010	4.0%	Oriental BC	3871	3871	4898
13	LANAMME	2010	4.0%	Oriental Farmacia	12017	12017	15205
14	LANAMME	2010	4.0%	Oriental UCA	6920	6920	8756
15	LANAMME	2009	4.0%	Occ. Barrio Molino	4717	5128	6748
16	LANAMME	2009	4.0%	Occidental	3608	3888	5116
17	LANAMME	2009	4.0%	Oriental	9253	9272	12201
18	LANAMME	2009	4.0%	Urb. La Joya	4108	4439	5841
19	LANAMME	2009	4.0%	Guadalupe	2579	2680	3527
20	LANAMME	2009	4.0%	Oriental	3314	4795	6310
21	LANAMME	2009	4.0%	San Nicolás	3102	3444	4532
22	LANAMME	2009	4.0%	Occidental Norte	5123	5123	6742
23	LANAMME	2009	4.0%	San Blas	2843	2843	3741

**Cuadro 7. Conteos vehiculares Cartago.**

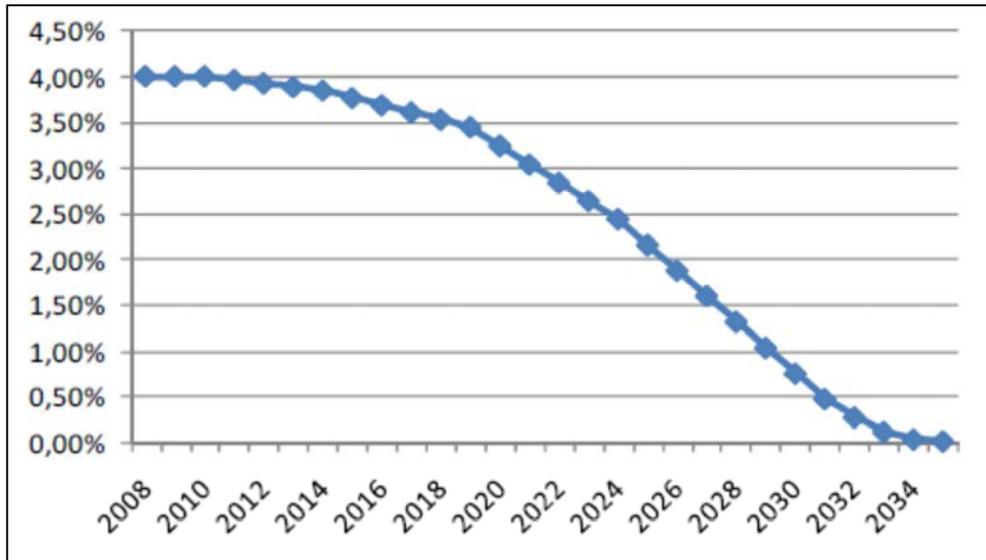
**Fuente: LANAMME, 2012.**

ID	Fuente	Año	Crecimiento	Ubicación	Total Conteo	Diario Estimado	Estimado 2016
24	C. Moukhallaleh	2014	4.0%	CP-C-2	Sin Dato	8339	9019
25	C. Moukhallaleh	2014	4.0%	CP-C-1	Sin Dato	8211	8881
26	C. Moukhallaleh	2014	4.0%	CP-C-4	Sin Dato	6250	6760
27	C. Moukhallaleh	2014	4.0%	CP-C-3	Sin Dato	5246	5674
28	MOPT	2013	4.0%	ER-632	Sin Dato	12115	13628
29	MOPT	2013	4.0%	ER-689	Sin Dato	9001	10125
30	MOPT	2013	4.0%	ER-693	Sin Dato	5704	6416
31	MOPT	2013	4.0%	ER-737	Sin Dato	13212	14862
32	MOPT	2013	4.0%	ER-273	Sin Dato	13302	14963
33	MOPT	2013	4.0%	ER-749	Sin Dato	38850	43701
34	MOPT	2013	4.0%	ER-522	Sin Dato	23971	26964
35	MOPT	2013	4.0%	ER-165	Sin Dato	48886	54990
36	MOPT	2013	4.0%	ER-566	Sin Dato	13841	15569
37	MOPT	2013	4.0%	ER-234	Sin Dato	18553	20870
38	MOPT	2013	4.0%	ER-231	Sin Dato	9314	10477
39	DGIT	2016	4.0%	Intersección Parada Paraíso	228	3963	3963
40	DGIT	2016	4.0%		149	2590	2590
41	DGIT	2016	4.0%	Noreste Tribunales	705	12887	12887
42	DGIT	2016	4.0%		311	5685	5685
43	DGIT	2016	4.0%		418	7641	7641
44	DGIT	2009	4.0%	Ekono/Visión	420	7677	10103
45	DGIT	2009	4.0%	La Joya	220	3982	5240
46	DGIT	2009	4.0%	Cementerio	654	11838	15578
47	DGIT	2010	4.0%	Servicentro Metrópoli	359	6820	8629
48	DGIT	2010	4.0%		490	9308	11778
49	DGIT	2010	4.0%		197	3778	4780
50	DGIT	2010	4.0%	San Luis Gonzaga	291	5737	7259
51	DGIT	2010	4.0%		285	5618	7109
52	DGIT	2016	4.0%	100 NorOeste Tribunales	326	6018	6018
53	DGIT	2016	4.0%		744	13733	13733
54	DGIT	2016	4.0%		605	11168	11168

**Cuadro 8. Conteos Vehiculares Cartago.**

**Fuentes: MOPT, 2013; Moukhallaleh, 2015; DGIT, 2016.**

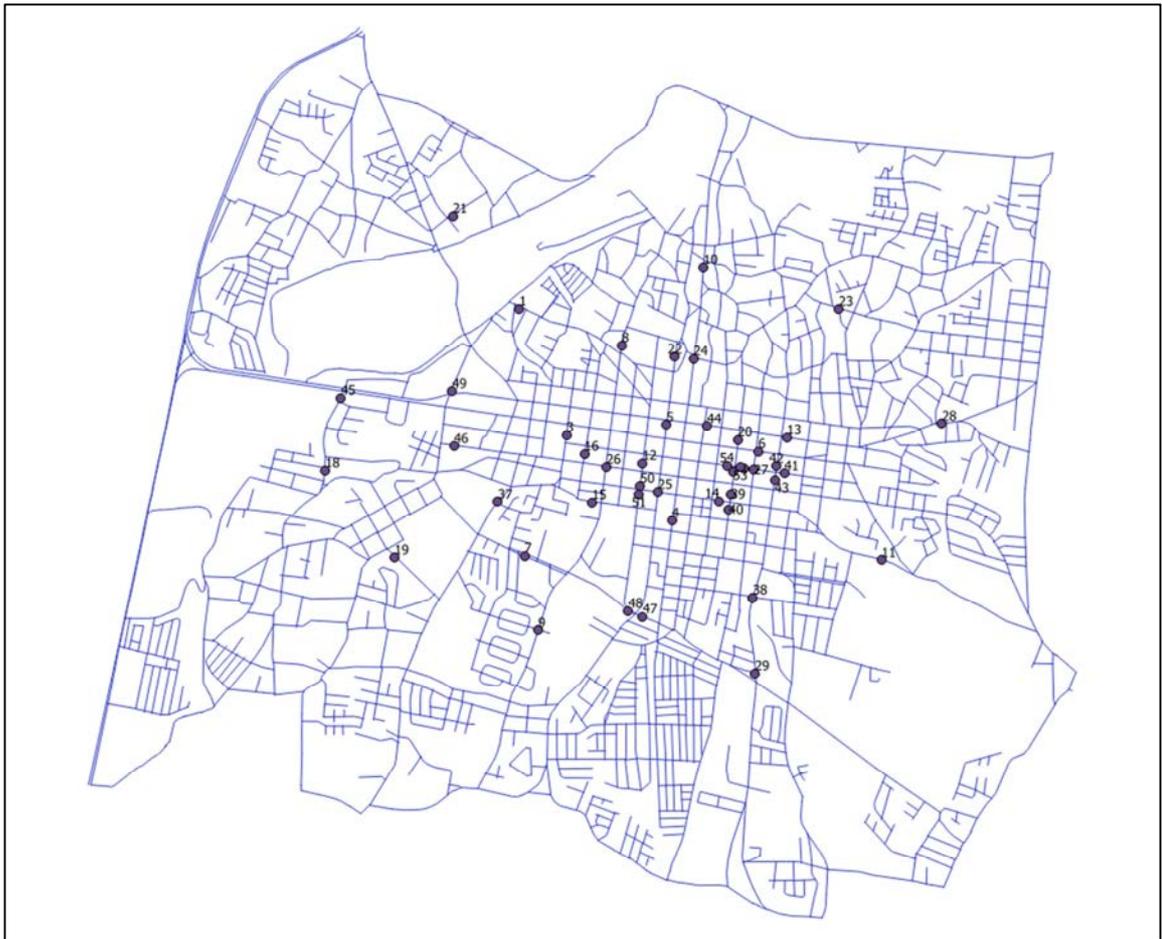
Para establecer la tasa de crecimiento vehicular anual de 4% y así poder estimar el tránsito promedio diario para el año 2016 se utiliza la proyección del Plan Nacional de Transportes 2011 – 2035 elaborado por la empresa INECO para el Ministerio de Obras Públicas y Transportes en su Anexo 2 "Resultados por tramos," (MOPT, 2011). Como se muestra en la Figura 35.



**Figura 35. Tasa de crecimiento anual. (MOPT, 2011).**

## 4.2 Correlación

Para establecer si existe la correlación entre integración y volumen vehicular se consideraron los valores de integración para los segmentos unitarios de los cuáles hay información de conteos vehiculares que se encuentren dentro de los bordes del área de estudio, que se muestran en la Figura 36, no se tomaron en cuenta los conteos propiamente en los límites ni muy cercanos a ellos.



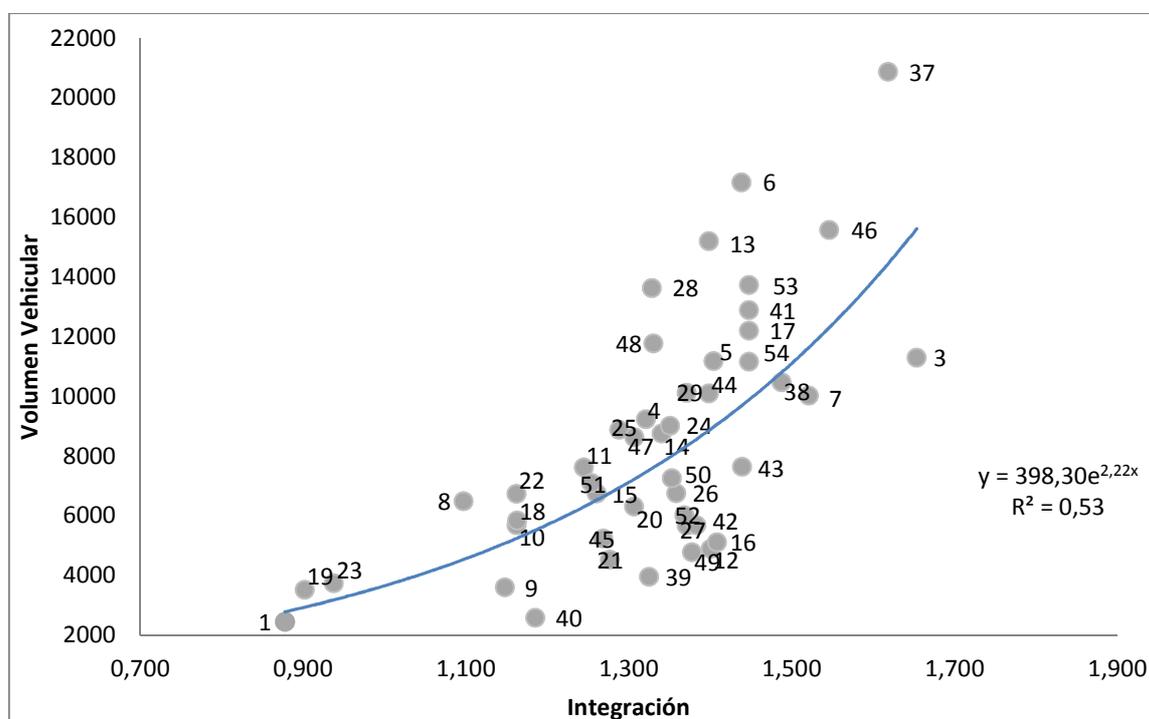
**Figura 36. Conteos vehiculares para correlación.**

En el Cuadro 9 se presentan los datos de conteos representados en la Figura 36 y se tabulan además los valores de integración para los segmentos unitarios correspondientes de acuerdo al modelo.

Fuente	Año	Crecimiento	Ubicación	Total Conteo	Diario Estimado	Estimado 2016	Integración Global
LANAMME	2009	4,00%	Barrio Fátima	1866	1866	2456	0,878
LANAMME	2009	4,00%	Occidente Iglesia	8586	8586	11299	1,653
LANAMME	2009	4,00%	Oriental Hospital	7018	7018	9235	1,321
LANAMME	2010	4,00%	Oriental Estación	8839	8839	11184	1,404
LANAMME	2010	4,00%	Oriental	13566	13566	17165	1,438
LANAMME	2009	4,00%	El Molino	7623	7623	10031	1,521
LANAMME	2009	4,00%	El Carmen	4930	4930	6488	1,097
LANAMME	2009	4,00%	Res. El Molino	2742	2742	3608	1,148
LANAMME	2009	4,00%	San Blas	4326	4326	5693	1,162
LANAMME	2010	4,00%	Dulce Nombre	6028	6028	7627	1,245
LANAMME	2010	4,00%	Oriental BC	3871	3871	4898	1,400
LANAMME	2010	4,00%	Oriental Farmacia	12017	12017	15205	1,398
LANAMME	2010	4,00%	Oriental UCA	6920	6920	8756	1,340
LANAMME	2009	4,00%	Occ. Barrio Molino	4717	5128	6748	1,261
LANAMME	2009	4,00%	Occidental	3608	3888	5116	1,408
LANAMME	2009	4,00%	Oriental	9253	9272	12201	1,447
LANAMME	2009	4,00%	Urb. La Joya	4108	4439	5841	1,163
LANAMME	2009	4,00%	Guadalupe	2579	2680	3527	0,902
LANAMME	2009	4,00%	Oriental	3314	4795	6310	1,306
LANAMME	2009	4,00%	San Nicolás	3102	3444	4532	1,277
LANAMME	2009	4,00%	Occidental Norte	5123	5123	6742	1,162
LANAMME	2009	4,00%	San Blas	2843	2843	3741	0,938
C. Moukhallaleh	2014	4,00%	CP-C-2	N/D	8339	9019	1,351
C. Moukhallaleh	2014	4,00%	CP-C-1	N/D	8211	8881	1,288
C. Moukhallaleh	2014	4,00%	CP-C-4	N/D	6250	6760	1,358
C. Moukhallaleh	2014	4,00%	CP-C-3	N/D	5246	5674	1,371
MOPT	2013	4,00%	ER-632	N/D	12115	13628	1,328
MOPT	2013	4,00%	ER-689	N/D	9001	10125	1,371
MOPT	2013	4,00%	ER-234	N/D	18553	20870	1,618
MOPT	2013	4,00%	ER-231	N/D	9314	10477	1,488
DGIT	2016	4,00%	Intersección Parada Paraíso	228	3963	3963	1,325
DGIT	2016	4,00%		149	2590	2590	1,185
DGIT	2016	4,00%	Noreste Tribunales	705	12887	12887	1,447
DGIT	2016	4,00%		311	5685	5685	1,383
DGIT	2016	4,00%		418	7641	7641	1,439
DGIT	2009	4,00%	Ekono/Visión	420	7677	10103	1,398
DGIT	2009	4,00%	La Joya	220	3982	5240	1,268
DGIT	2009	4,00%	Cementerio	654	11838	15578	1,546
DGIT	2010	4,00%	Servicentro Metrópoli	359	6820	8629	1,307
DGIT	2010	4,00%		490	9308	11778	1,330
DGIT	2010	4,00%		197	3778	4780	1,377
DGIT	2010	4,00%	San Luis Gonzaga	291	5737	7259	1,353
DGIT	2010	4,00%		285	5618	7109	1,254
DGIT	2016	4,00%	100 NorOeste Tribunales	326	6018	6018	1,368
DGIT	2016	4,00%		744	13733	13733	1,447
DGIT	2016	4,00%		605	11168	11168	1,447

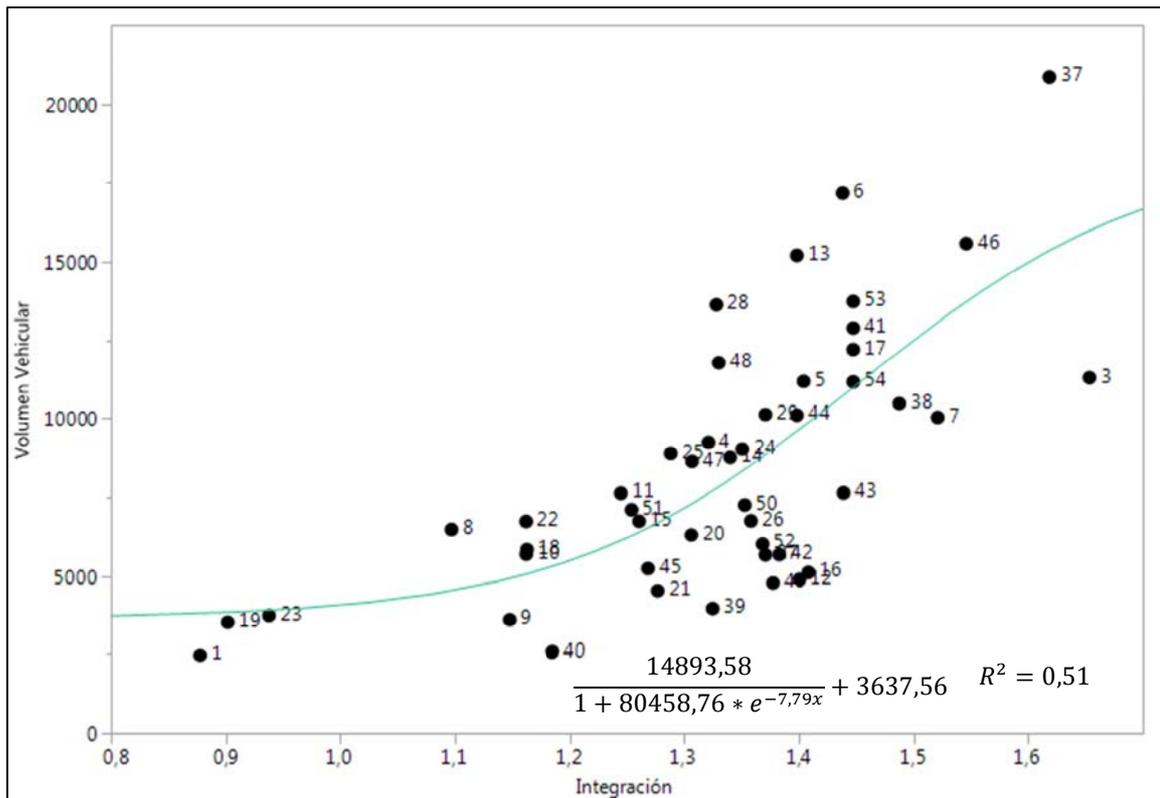
**Cuadro 9. Censos Vehiculares – Valores de Integración.**

Para el modelo, el coeficiente de correlación entre las variables es de 0,68. Lo que indica que sí existe una relación positiva entre las variables. En la Figura 37 se grafican los valores de tránsito diario de los conteos vehiculares en función de los valores de integración. Se puede ver además el ajuste exponencial para los datos, donde el coeficiente de determinación es  $R^2 = 0,53$ .



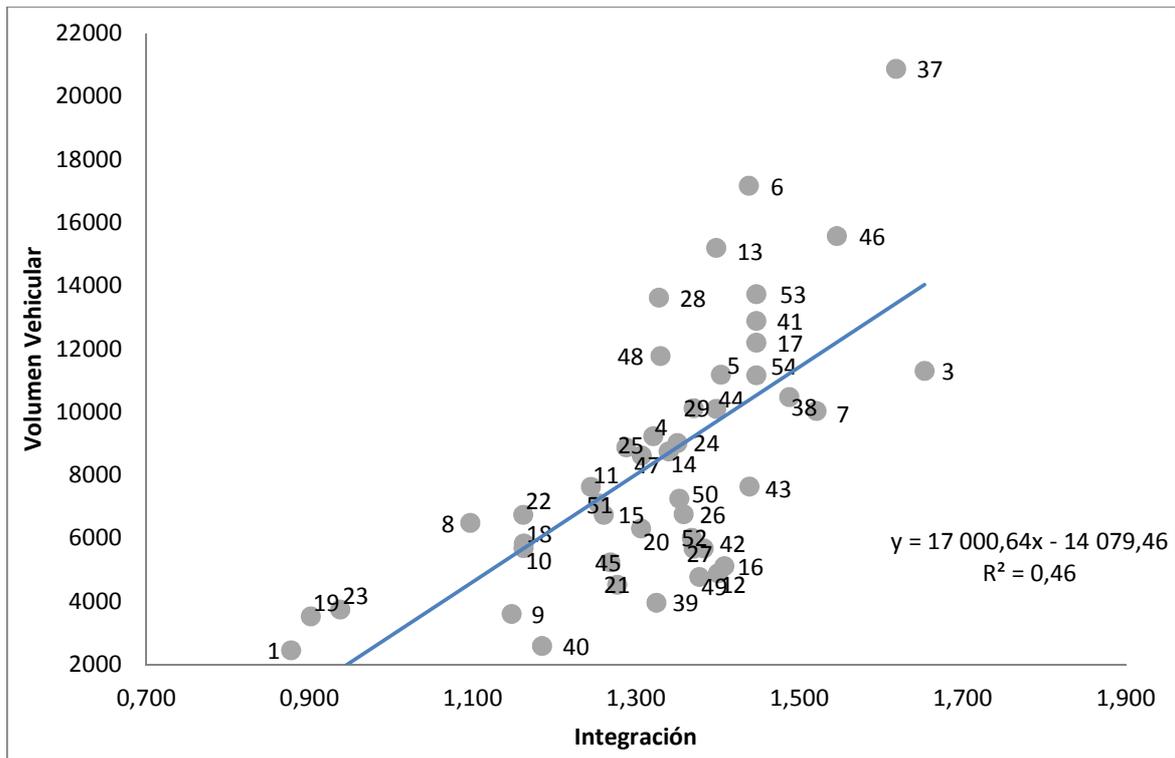
**Figura 37. Gráfico Volumen vehicular contra Integración - Ajuste Curva Exponencial.**

En la Figura 38 se muestra el ajuste de una curva S de la forma  $\frac{a}{1+be^{-cx}} + d$  para los datos. En este caso el coeficiente  $R^2$  es ligeramente más bajo que para la curva exponencial con 0,51.



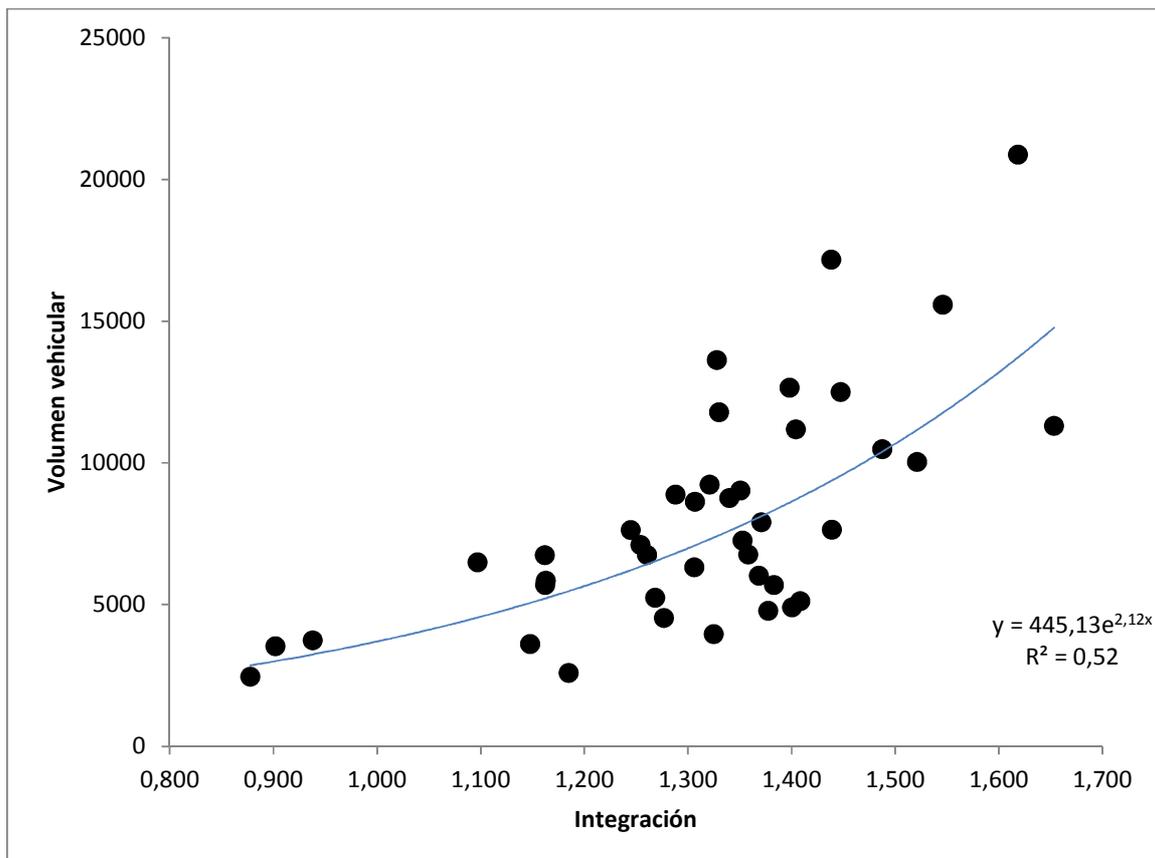
**Figura 38. Gráfico Volumen vehicular contra Integración - Ajuste Curva S.**

En la Figura 39 se muestra el ajuste lineal para los datos. En este caso el coeficiente  $R^2$  es menor que para la curva exponencial con 0,46.



**Figura 39. Gráfico Volumen vehicular contra Integración - Ajuste Lineal.**

Se elaboró también, el ajuste exponencial promediando los valores de volumen vehicular en los casos para los cuáles se cuenta con más de un dato de conteo dentro del mismo segmento unitario. Se presenta en la Figura 40. El coeficiente  $R^2$  en este caso es de 0,52 que es prácticamente el mismo obtenido utilizando todos los puntos.



**Figura 40. Gráfico de Volumen vehicular promedio por segmento contra Integración - Ajuste Curva Exponencial.**

Además, se realizó una regresión multivariada al agregar una segunda variable independiente, esta se establece como una variable categórica con valor de 1 para las calles Norte-Sur que tienen una sola dirección de tránsito y se denomina "Calles". Se obtuvo la siguiente ecuación para el modelo:

$$Volumen Vehicular = e^{(5,947+2,354*Integración-0,339*Calle)}$$

El Cuadro 10 muestra el resumen de la estimación de parámetros para el modelo. En el Cuadro 11 se puede ver que tanto la variable Integración como la variable Calle son significativas.

Término	Estimación	Error estándar	Razón t	Prob >  t
Constante del modelo	5,947	0,382	15,56	<,0001
Integración	2,354	0,295	7,98	<,0001
Calle	-0,339	0,097	-3,48	0,0013

**Cuadro 10. Estimación de parámetros para el modelo multivariado.**

Fuente	N parámetros	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Razón F	Prob > F
Integración	1	1	5,845	63,73	<,0001
Calle	1	1	1,113	12,13	0,0013

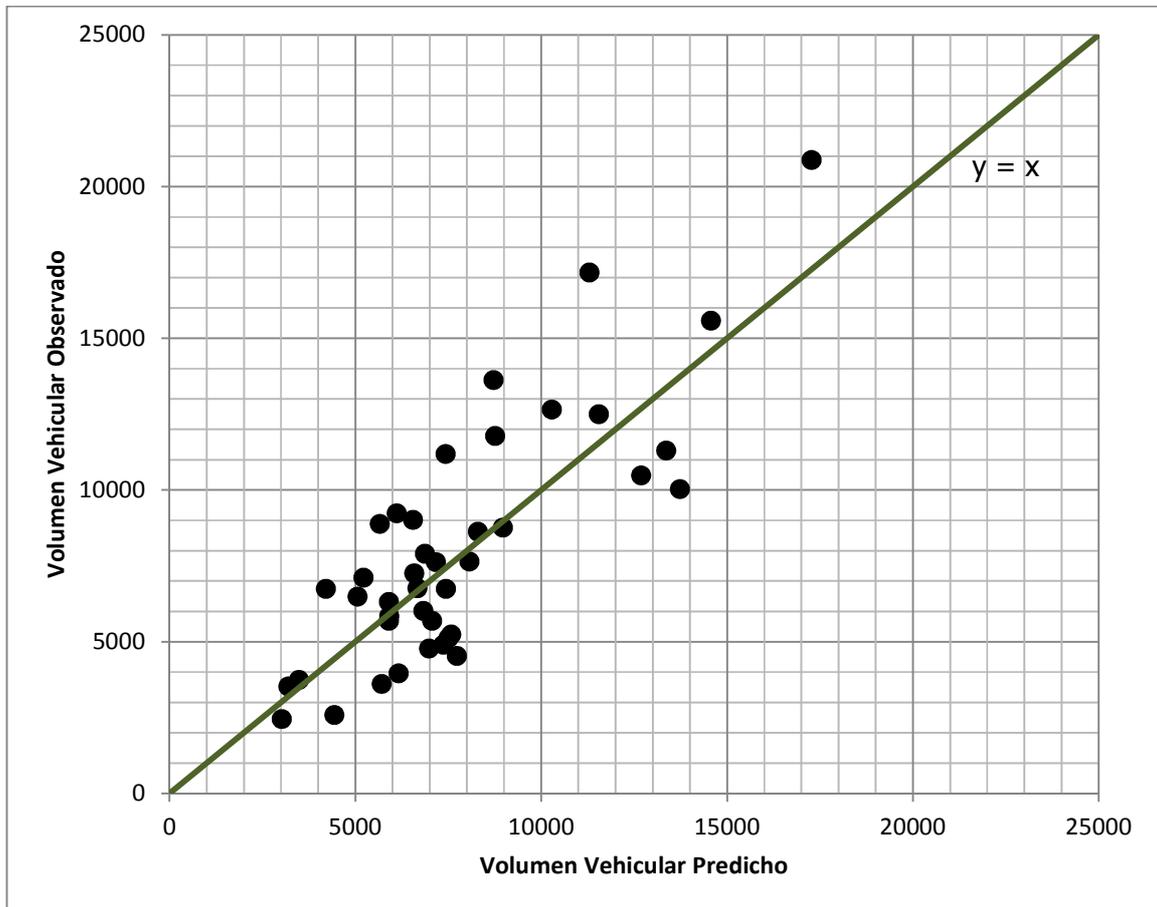
**Cuadro 11. Prueba de los efectos para el modelo multivariado.**

El  $R^2$  para el modelo de ajuste multivariado es de 0,64 mientras que el  $R^2$  Ajustado es de 0,62.

$R^2$	0,64
$R^2$ ajustado	0,62
Raíz del error cuadrático medio	0,303

**Cuadro 12. Resumen del modelo.**

En la Figura 41, se muestra el gráfico del Volumen Vehicular Observado en los conteos contra el Volumen Vehicular Predicho por el modelo estadístico multivariado, junto a la función identidad.



**Figura 41. Gráfico de Volumen Vehicular Observado contra el Volumen Vehicular Predicho para el modelo multivariado.**

## 5. Análisis de Resultados

Es claro que existe una correlación entre los valores de integración y el volumen vehicular al elaborar el análisis de segmento unitario. En el Cuadro 13 se presentan los resultados de la correlación entre integración y tráfico vehicular obtenidos por distintos autores, donde se observa que los coeficientes de determinación están entre 0,29 y 0,63. En el caso del trabajo de Zhuang y Song, se normalizaron los valores de integración y volumen vehicular para obtener la ecuación. Para el estudio de Peponis (1997) se considera el volumen vehicular en intervalos de 5 minutos. Dawson considera el tránsito en intervalos de 8 minutos y la integración de la red se calcula con un máximo de tres niveles de profundidad. Karimi elabora su análisis con datos de la red y el tráfico en el año 1980.

Autor	Año	Localidad	r	R <sup>2</sup>	Ecuación
Karimi et al.	2003	Isfahan, Irán	0,78	0,61	$y = 5857,77x - 8704,21$
Dawson	2003	Arviat, Canada	0,74	0,55	No disponible
Peponis et al.	1997	Downtown, Atlanta, Estados Unidos	0,58	0,34	No disponible
Peponis et al.	1997	Buchhead, Atlanta, Estados Unidos	0,54	0,29	No disponible
Paul	2009	Lubbock, Texas, Estados Unidos	0,79	0,63	$y = 28583,25x - 34185,18$
Zhuang et al.	2015	Wujiaochang, China	0,81	0,66	No disponible
Zhuang et al.	2015	Shangchenglu, China	0,72	0,52	No disponible
Zhuang et al.	2015	Xujiahui, China	0,71	0,50	No disponible
Zhuang et al.	2015	Jingansi, China	0,70	0,48	No disponible
Zhuang et al.	2015	Xintiandi, China	0,63	0,40	No disponible

**Cuadro 13. Correlaciones Tráfico Vehicular – Integración.**

**Fuentes: Dawson, 2003; Karimi, 2003; Paul, 2009; Peponis, Ross y Rashid, 1997; Zhuang y Song, 2015**

Al comparar el R<sup>2</sup> de 0,53 obtenido en este trabajo para la regresión con exponencial con una variable, se puede ver que está entre los valores que se han obtenido en estudios internacionales que utilizan conceptos de sintaxis espacial para estudiar el tráfico vehicular. Cabe destacar que, internacionalmente, también se han realizado proyectos donde se analiza el tránsito peatonal y se obtuvieron resultados de correlaciones similares o mayores a los conseguidos para vehículos.

En el caso de este estudio realizado sobre la configuración espacial de la ciudad de Cartago, una observación importante de por qué no se alcanza una mayor correlación puede estar relacionada con lo observado por Zhuang y Song en "Combined impacts of configurational and compositional properties of street network on vehicular flow" (2015), donde estudiaron ciudades chinas y concluyen que las correlaciones tienden a disminuir cuando hay gran presencia de calles con dirección en un solo sentido, como es el caso del área de estudio.

Para verificar la influencia de los elementos con solamente una vía de tránsito se decidió hacer un modelo multivariado, se observa que esto no es suficiente para el área de estudio, sino que también se debe considerar si los segmentos unitarios son Calles o Avenidas, ya que es claro que en la jerarquía de elementos del centro de la ciudad, las segundas tienen prioridad y tienen un funcionamiento distinto a las primeras.

Se estableció, para la ciudad de Cartago, que al considerar únicamente la variable "Integración" se sobrestima el volumen vehicular de calles con orientación norte-sur y sólo una dirección en un 29%. Es importante recalcar que al agregar una nueva variable categórica para estas Calles, la estimación del modelo mejora notablemente con un  $R^2$  de 0,64.

Sería de esperar que otra variable categórica para las Avenidas de una vía tenga un efecto similar, pero no se logró probar que fuera una variable significativa para los datos disponibles.

Es importante mencionar que incluir esta variable no tiene porqué aumentar significativamente la dificultad ni el tiempo para la aplicación del modelo. La información si un elemento es de una dirección, y si es una Calle o Avenida, se consigue y se procesa rápidamente. Además, al menos para el caso particular de la ciudad de Cartago, significó una mejoría.

El análisis de segmento unitario puede ayudar a identificar la importancia de elementos de la red para viajes locales. El modelo no lograría tomar en cuenta los viajes que tienen origen en San José y destino en la Zona Sur o viceversa y que pasan por la Ruta 2 que funciona de

límite al oeste del área de estudio, porque al establecer un área de estudio se limita la continuidad de la red de carreteras existente dentro de ella y no sería posible que considere la influencia de elementos fuera esta, estos viajes no podrían formar parte del modelo porque no comienzan ni terminan en la ciudad de Cartago. Cabe preguntarse si una ampliación del área de estudio donde se incluya mayor parte de El Tejar, Aguacaliente, Dulce Nombre y San Rafael de Oreamuno podría mejorar la correlación o tal vez resaltar otros elementos e intersecciones importantes en la red.

Durante la elaboración del trabajo se consideró un segundo modelo, en el cual los segmentos unitarios curvos fueron caracterizados con varias líneas rectas en lugar de una sección representativa de todo el elemento. Ese modelo resultó en una correlación considerablemente menor con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,36 para un ajuste exponencial. Esto indica un ajuste menos fiel a las condiciones reales, razón por la cual fue descartado.

## 6. Aplicaciones

Se propone que el método podría ser útil para la planificación en etapas tempranas de los proyectos, o para sugerir puntos de estudio dentro de la red.

### 6.1 Identificación de intersecciones

Aún antes de establecer la correlación entre el volumen de tránsito y la integración, se puede obtener alguna información cualitativa interesante del modelo. Se puede establecer que en las zonas residenciales hay una menor integración, claramente sucede en distrito de El Carmen, y la parte norte de los distritos Oriental y Occidental.

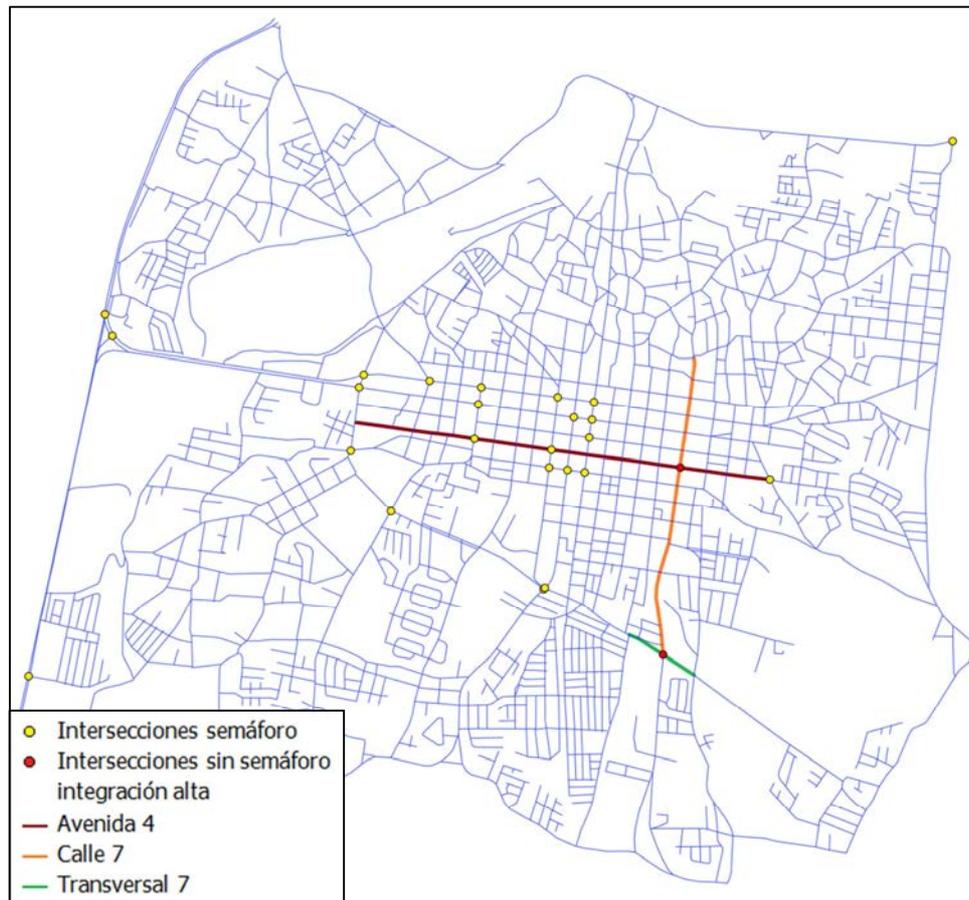
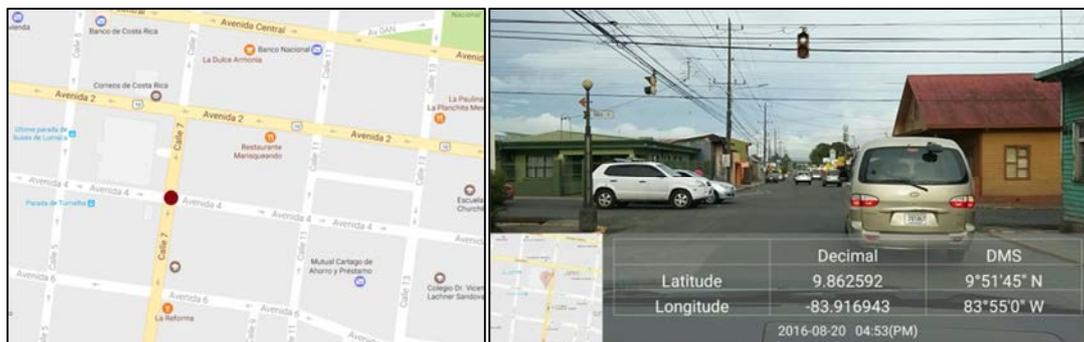


Figura 42. Intersecciones con semáforo.

En la Figura 42 se resaltan con amarillo las intersecciones dentro del área de estudio que son contraladas con semáforo, y en rojo intersecciones entre elementos con alta integración controlados por alto, que podrían merecer atención para definir si otro tipo de control sería necesario. Esto a partir del mapa de calor para resultados de Integración de la Figura 33, donde se puede ver que las intersecciones marcadas comparten características similares de integración.

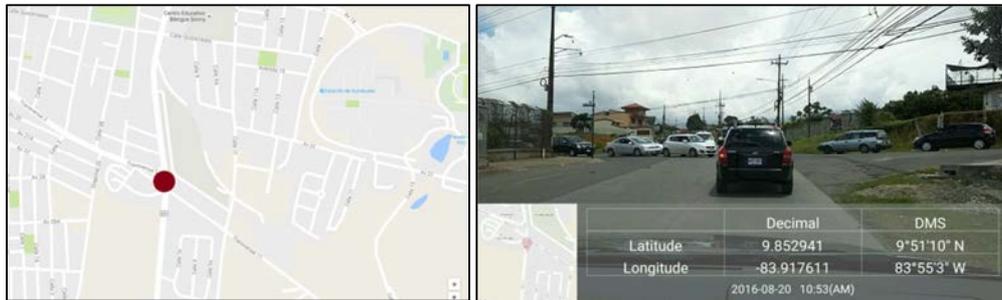
La primera de las intersecciones marcadas en rojo en la Figura 42 es entre la Calle 7 y la Avenida 4, como se muestra en la Figura 43. La Avenida 4 cruza sin interrupción la ciudad de Cartago de Oeste a Este y puede formar parte de rutas que se dirigen al sur de la ciudad o que buscan salir hacia los centros de población como Paraíso o Turrialba provenientes tanto de Cartago como desde sectores al Oeste, incluyendo San José. La Calle 7 tiene dirección Norte – Sur y puede ser importante en las rutas con rumbo a los distritos de Dulce Nombre y Aguacaliente, también para las que buscan el Instituto Tecnológico que es destino para importante cantidad de viajes.



**Figura 43. Avenida 4 y Calle 7.**

La segunda es entre la calle 7 y la Transversal 7, como se puede ver en la Figura 44. Esta intersección puede formar parte de rutas que conecten los distritos al sur de la ciudad con el centro y también puede formar parte de los viajes entre sectores Suroeste y Sureste de

Cartago, podría inclusive atraer parte del tráfico que viene desde los centros urbanos al Este de Cartago.



**Figura 44. Intersección Calle 7 y Transversal 7.**

## **6.2 Cambios en la red**

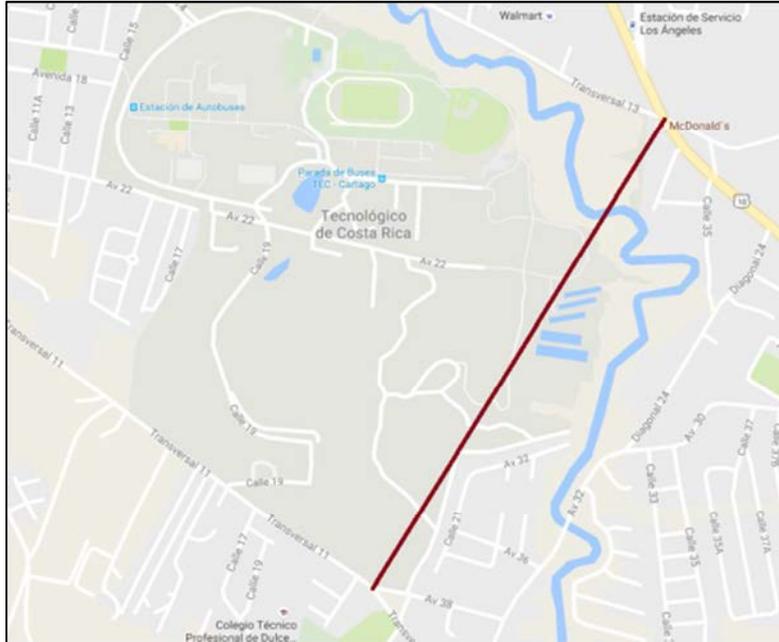
Se propone revisar cuatro posibles cambios en la red y establecer si la información que arroja el método puede ser útil para planificación.

### **6.2.1 Conectar la Ruta 10 con la Transversal 11**

En el informe de labores 2012 de la Municipalidad de Cartago (2013) se menciona el eje Guadalupe – Caballo Blanco con lo que se pretende que el tránsito proveniente de otras zonas al este de la región como Paraíso y Turrialba buscando cruzar la ciudad de Cartago, utilizando la Ruta 10 tenga una opción para hacerlo sin ingresar propiamente al centro urbano.

El documento menciona requerir la donación de una parte del campus del Instituto Tecnológico para poder realizar la conexión entre la Ruta 10 y este eje.

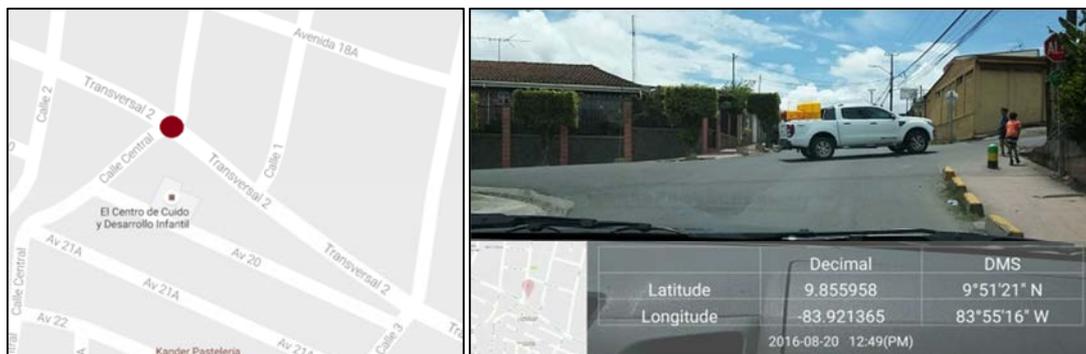
Independientemente de la geometría que se podría definir, se representa esta vía con un segmento unitario que liga la Ruta 10 con la Transversal 11, como se muestra en la Figura 45.



**Figura 45. Segmento unitario Ruta 10-Transversal 11.**

**Fuente: Google Maps, 2016. Modificado por el autor.**

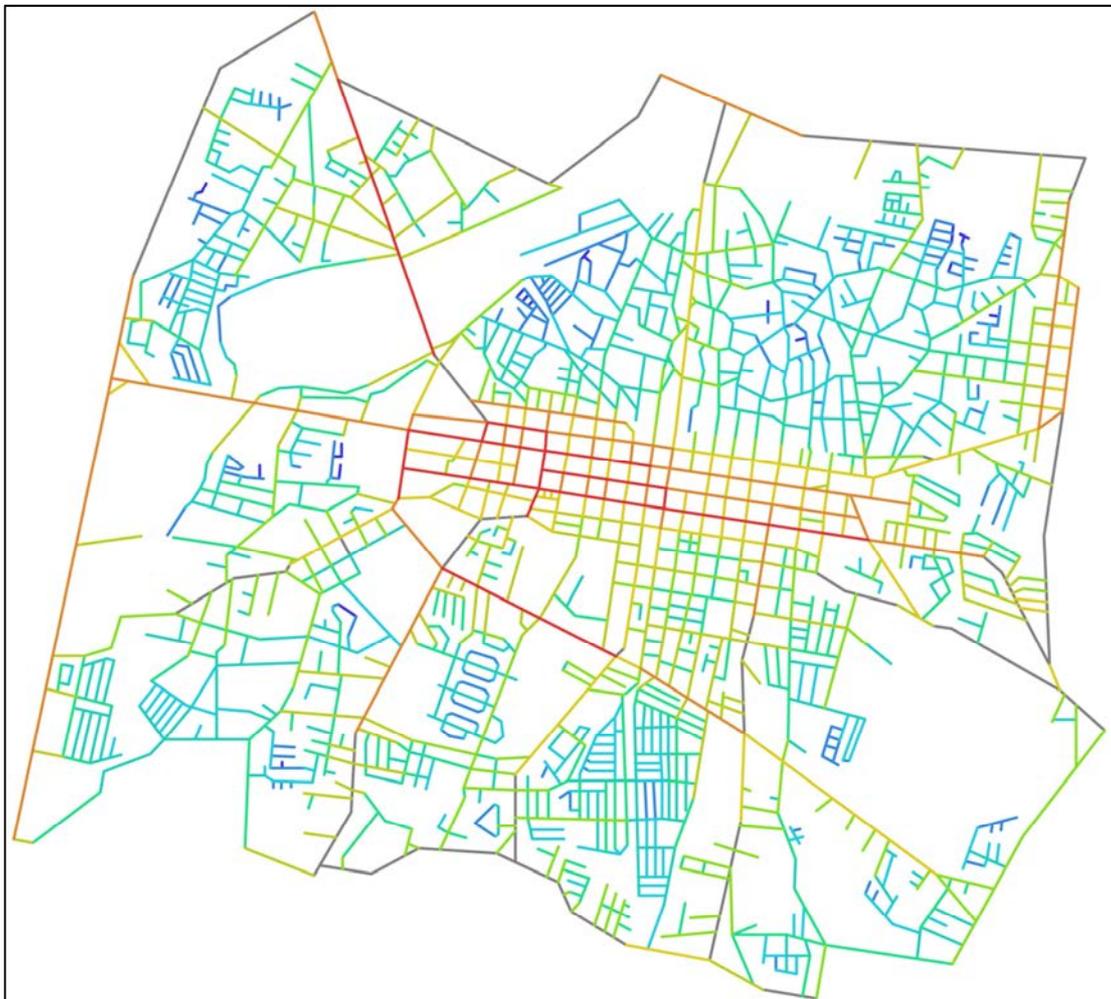
Además de agregar el nuevo elemento de la red, se procede a cambiar el alto en la intersección que se presenta en la Figura 46 y así darle mayor jerarquía a la Transversal 2 sobre la Calle 2 en el cruce.



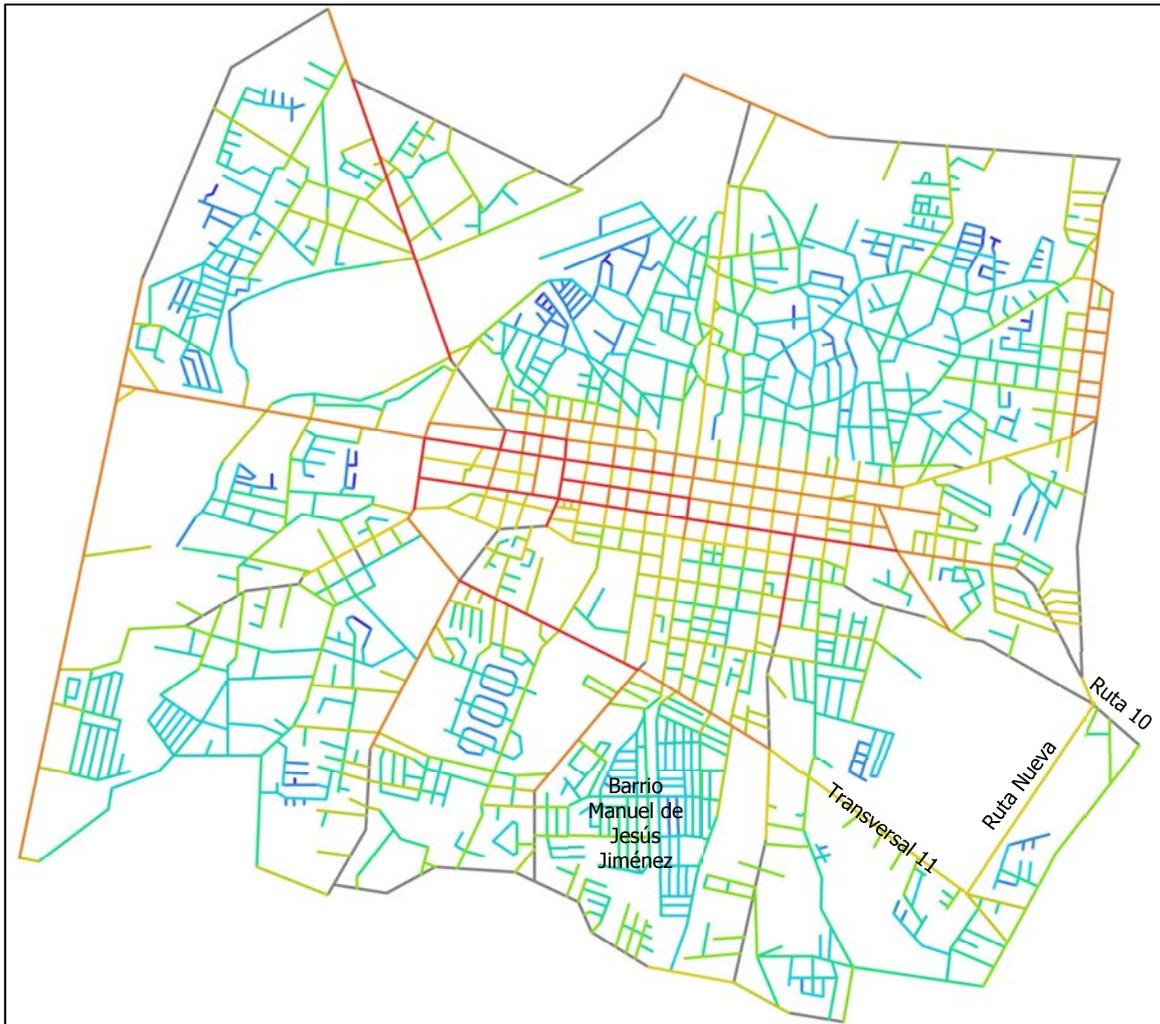
**Figura 46. Intersección Calle 2 y Transversal 2.**

Una vez que se establecen estos cambios se procede a analizar la integración de la red nuevamente y de esa forma se obtiene la Figura 48 que es el mapa de calor con las modificaciones.

Al comparar la situación antes y después como se muestra en la Figura 48 se pueden hacer algunas observaciones en el cambio de los valores de integración de los segmentos unitarios. Por ejemplo la Transversal 2 que está al norte del Barrio Manuel de Jesús Jiménez tiene ahora una mayor integración, ya que esta forma parte del eje Guadalupe – Caballo Blanco que se está modificando con la propuesta y esto invita a preguntarse si esa calle tiene la capacidad para recibir el tráfico que se esperaría transite por ahí.



**Figura 47. Resultados Integración sin modificaciones.**



**Figura 48. Resultados Integración al conectar la Ruta 10 con la Transversal 11.**

Al realizar este cambio, de acuerdo al modelo habría que prestarle atención a algunas de las intersecciones que se verían afectadas con un aumento de tránsito vehicular, como las resaltadas en la Figura 49. Es especialmente interesante el aumento de la integración en toda la red, que podría significar un aumento en la cantidad de usuarios.



**Figura 49. Principales intersecciones afectadas al conectar la Ruta 10 con la Transversal 11.**

## 6.2.2 Boulevard desde el Museo Municipal a Escuela Ascensión Esquivel

En el Anexo 5 del Plan Regulador Territorial del Cantón de Cartago se incluye una tabla de plan vial donde se menciona un Boulevard para uso peatonal entre el Museo Municipal y la Escuela Ascensión Esquivel, área que se muestra en la Figura 50. En el documento se expresa la idea de usar una pasarela elevada en una sección, pero se analizará en el caso de este trabajo como si todo el proyecto fuera a nivel de suelo.

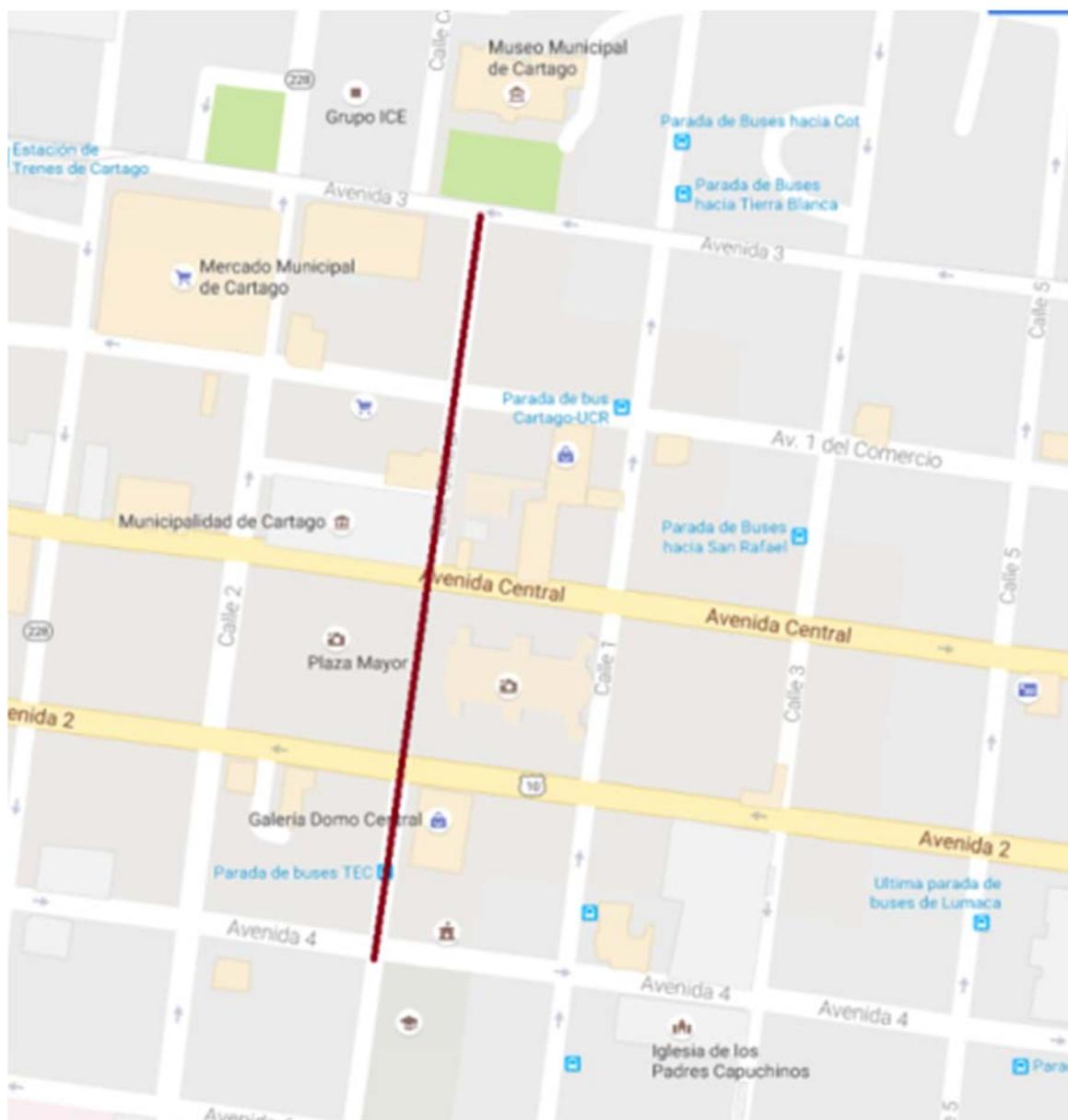


Figura 50. Trazo Boulevard Museo – Ascensión Esquivel. Elaborado a partir de Google Maps 2016.

Para hacer el análisis de integración de la red modificada se eliminan las calles que se verían reemplazadas por el boulevard y se decide que habría semáforos en las Avenidas que lo crucen para facilitar el tráfico peatonal.

En la Figura 51 se puede ver a la derecha la integración al incluir el boulevard y a la izquierda las condiciones actuales. Se produce una pequeña reducción en la mayoría de los elementos de la red, posiblemente influenciada por la eliminación de calles que conectan avenidas importantes del centro de la ciudad. Al ver la variación relativa de la integración en los mapas de calor, no hay gran diferencia para la red más allá de los segmentos unitarios cercanos a la ubicación propuesta para el boulevard, se ve especialmente una reducción en la Avenida 2 y la Avenida Central al este del sitio, también en una pequeña sección de la Avenida 4.



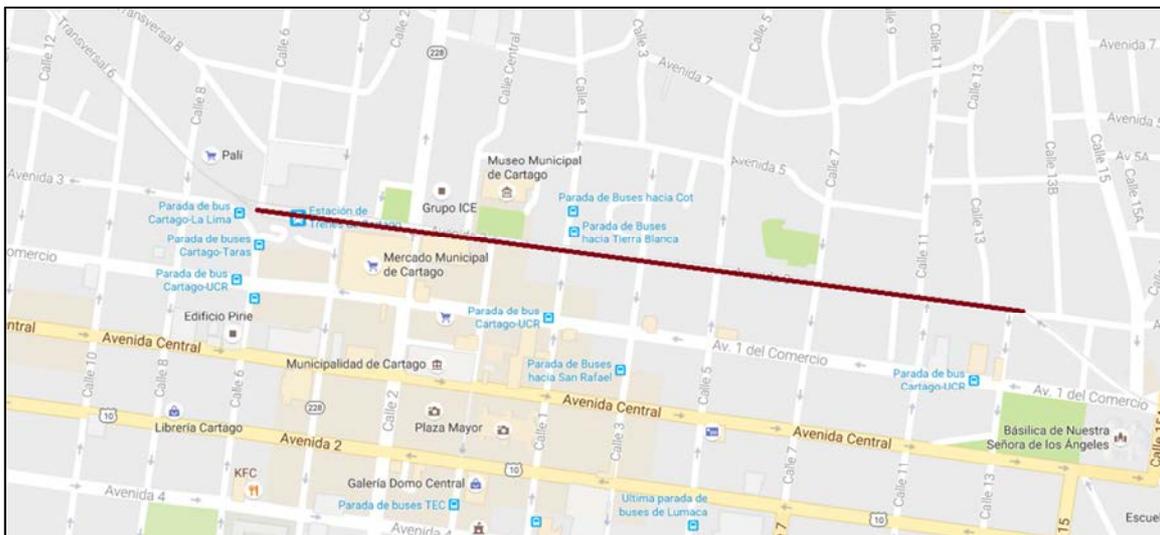
(a) Actual.

(b) Después.

**Figura 51. Cambio en Integración con Boulevard Museo – Escuela Ascensión Esquivel.**

### 6.2.3 Avenida 3 – Situación Antes del Boulevard

En la Figura 52 se marca la ubicación de un boulevard para tránsito peatonal que se estableció de forma reciente, posterior al año 2012, se propone entonces estudiar la situación de la integración de la red cuando se habilitaba el paso de automóviles por ese sector.



**Figura 52. Ubicación boulevard Estación del Tren. Elaborado a partir de Google Maps 2016.**

En la Figura 53(a) se muestra el mapa de integración de la situación actual, con el boulevard en funcionamiento. En la Figura 53(b) se presenta la integración para la situación anterior, cuando era posible el paso de automóviles. Los segmentos unitarios tenían en su totalidad más integración, así que lo más importante es considerar los cambios relativos en el mapa de calor. Se puede ver como cuando existía esta posibilidad

de tránsito, la integración de las calles adyacentes al norte y las ligadas a estas era mayor, pero entre más se aleja del lugar del cambio se dejan de ver efectos.



(a) Actual.

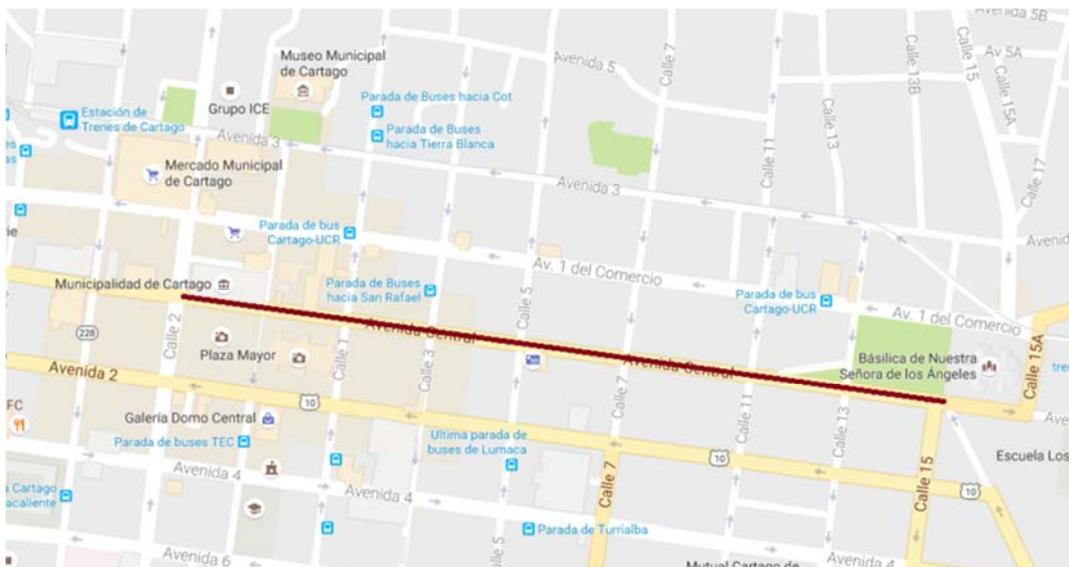


(b) Antes del Boulevard.

**Figura 53. Cambio de integración antes y después del Boulevard de la estación del tren.**

## 6.2.4 Cierre sección de la Avenida Central

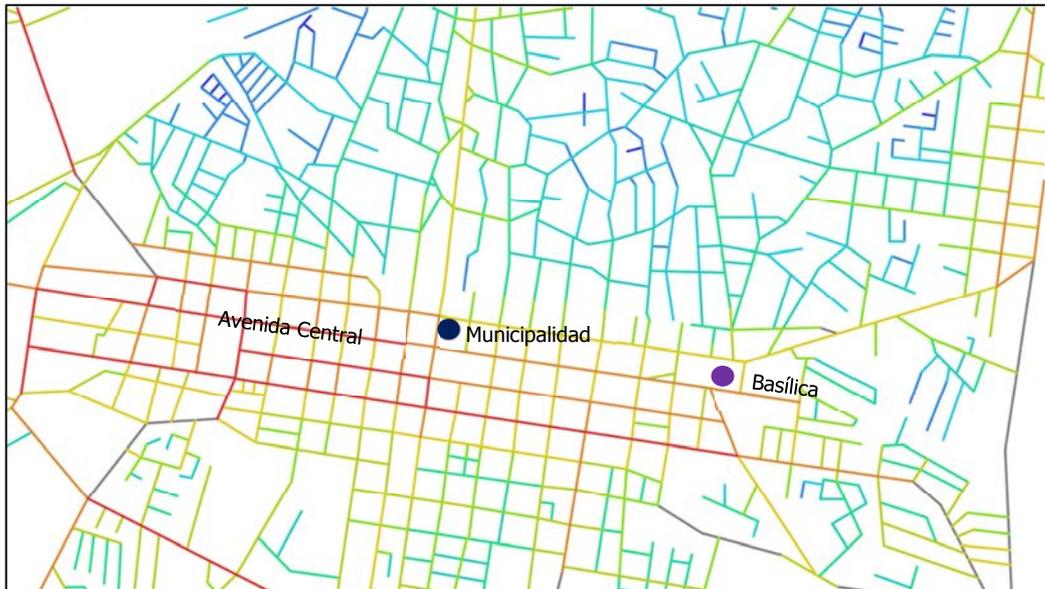
En la Figura 54 se resalta la ubicación de la calle que conecta a la Municipalidad de Cartago con la Basílica de la Virgen de los Ángeles, esta sería una de las calles que se cierran durante festividades religiosas como "La Pasada" que va de la Catedral Santiago Apóstol hacia?.



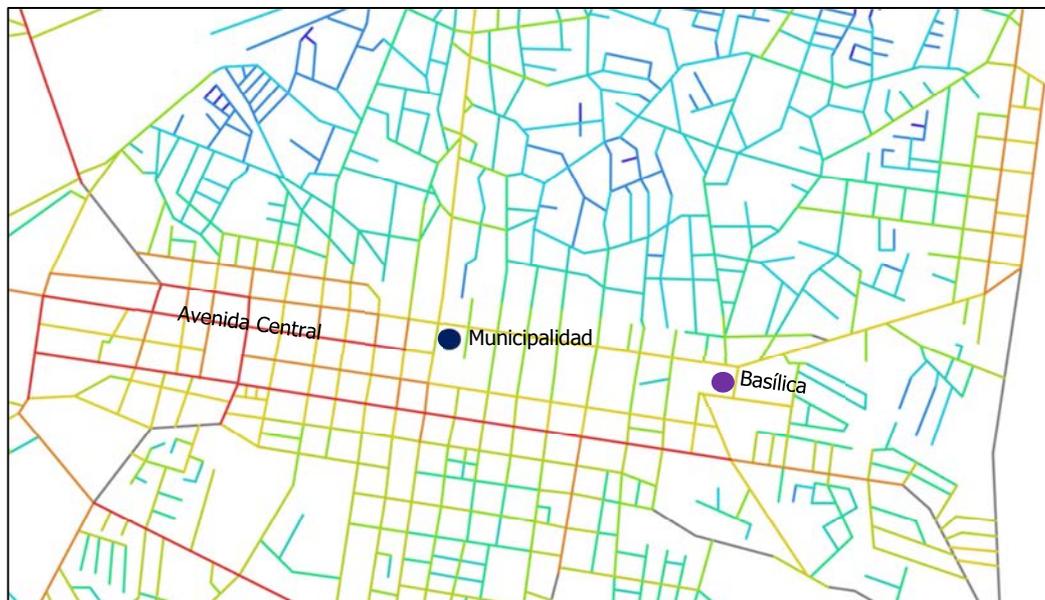
**Figura 54. Calle desde Municipalidad de Cartago a Basílica de Los Ángeles.**

En la Figura 55 se encuentran los mapas de integración, para el cierre de la Avenida Central desde el edificio municipal hasta la Basílica a la izquierda y para la condición actual a la derecha. Nuevamente este cambio reduce la integración de los elementos de la red y se debe estudiar el cambio relativo gráficamente. El efecto inmediato más claro es que todos los segmentos unitarios adyacentes a donde se ubicaba la calle tienen una integración considerablemente menor, se puede ver además que los elementos más al

norte, sobre todo en el sector de San Blas también tienen una reducción en su integración.



(a) Actual.



(a) Después del cierre.

**Figura 55. Cambio de integración por el cierre de una sección de la Avenida Central.**

## 7. Conclusiones

El análisis de segmento unitario permitió encontrar información importante sobre las características de movimiento dentro de una red urbana, dado que encontró una correlación entre la integración de un elemento dentro de la red y el volumen de tránsito vehicular para el caso de estudio

El coeficiente de correlación de 0,68 para el modelo y el coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,53 para una curva de mejor ajuste exponencial son aceptables y comparables con otros trabajos, hay que notar que en la ciudad de Cartago existe una gran cantidad de calles que tienen vía en un solo sentido y eso disminuye la certeza del método. Una limitación del software es que no se pueden establecer flujos unidireccionales en los segmentos unitarios, el algoritmo considera que cada elemento puede tener tránsito en ambas direcciones.

Al considerar lo que este método necesita para ser utilizado, que es la geometría de la red urbana y la jerarquización de las vías en cada intersección sin tomar en cuenta datos Origen-Destino ni las velocidades de operación en las carreteras mediante carro flotante, se puede considerar que es una opción rápida para estudiar redes urbanas. Es un modelo que sólo puede considerar viajes locales, lo que significa que desde su concepto es más impreciso, pero sí es viable para analizar y comparar características dentro de la red.

Se logró mejorar el modelo al agregar una variable categórica para las Calles de una vía del centro, diferenciándolas de las Avenidas y de los elementos de doble vía, llevando el coeficiente de determinación  $R^2$  a 0,64. Esto porque existe un comportamiento distinto donde estas calles tienen altos valores de integración pero relativamente bajo tránsito. Incluir esta variable no significó mayor diferencia a la hora de recolectar los datos ni de procesarlos, manteniendo los beneficios del modelo en lo referente a tiempo y costo.

Sí se pudieron representar segmentos unitarios curvos al utilizar una línea recta representativa de todo el elemento, siempre con la atención de conectar todas las intersecciones. Cabe preguntarse si será posible incluir la capacidad de reconocer líneas

curvas como elementos en alguna actualización o desarrollo de software para este tipo de análisis para disminuir la posibilidad de cometer errores al verificar la conectividad.

El método funcionó para encontrar intersecciones importantes en la red, al comparar las características de integración entre los elementos que las conforman, que pueden requerir atención en el tipo de control. Además para identificarlas al hacer modificaciones como en el ejemplo presentado en la sección 5.2.1. También se logra determinar elementos de la red que toman o pierden importancia ante cambios como se pudo ver en el resto de ejemplos de la sección 5.2

Al eliminar elementos altamente integrados como se hizo en 5.2.2 y 5.2.4 los valores de integración de todos los segmentos unitarios de la red tienden a bajar, cuando este tipo de elemento se agrega, los valores de integración suben. Esto no necesariamente significa que aumente o disminuya el tránsito en toda la red pero tal vez pueda ser indicador de que sea más fluido o menos fluido el movimiento dentro de la misma ya que los usuarios tienen más opciones.

Uno de los errores que se pueden cometer durante un análisis de segmento unitario es la incorrecta interpretación de la jerarquía de los caminos, especialmente en los elementos importantes de la red. Fallar en definir la conectividad de los segmentos unitarios provoca que no se estudie con precisión las relaciones entre ellos, es de especial cuidado verificar que no se produzcan islas de elementos dentro de la red ni se ligen o desliguen segmentos de forma distinta a la realidad porque sesgan los resultados y el despliegue del mapa de integración.

También es esencial establecer un área de estudio lo suficientemente grande para minimizar el efecto de borde en la región de interés, se recomienda considerar en futuros estudios sobre la ciudad de Cartago la influencia e importancia del cantón de El Tejar en los viajes locales.

En general, el método de Análisis de Segmento Unitario utilizando principios de sintaxis espacial puede ser una herramienta útil para conocer características de la red y sugerir

puntos de interés en las condiciones actuales o durante etapas tempranas de un proyecto a desarrollar, siempre tomando en cuenta que no es una herramienta definitiva que va a sustituir otros estudios más completos, pero sí como una opción económica y rápida de evaluación que puede servir de guía para justificar políticas y estudios más detallados.

## 8. Bibliografía

Anderson, T. (2005). Spatial variations in road collision propensities in London. [Versión electrónica]. *CASA Working Paper Series* (96).

Ashby, D. y Webber, R. (2005). High Crime: High disorder neighbourhoods spatial analysis and geodemographics. University College London, Londres, Inglaterra.

Barros, A., da Silva, P. y de Holanda, F. (2007). Exploratory study of space syntax as traffic assignment tool. *Actas del 6to congreso internacional de sintaxis espacial*, Turquía.

Batty, M., Besussi, E. y Chin, N. (2003). Traffic, urban growth and urban sprawl. [Versión electrónica]. *CASA Working Paper Series* (70).

Carpio – Pinedo, J. (2014) Urban bus demand forecast at stop level: Space syntax and other built environment factors. Evidence from Madrid [Versión electrónica]. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* (160), 205-214.

Dawson, P. (2003). Analysing the effects of spatial configuration on human movement and social interaction in Canadian Arctic communities. *Actas del 4to congreso Internacional de sintaxis espacial*. Londres.

Hillier, B. y Hanson, J. (1984). *The social logic of space*, Cambridge University Press, New York.

Hillier, B. (2007) *Space is the machine*, University College London, Londres, Inglaterra.

Hillier, B. y Iida, S. (2005) Network effects and psychological effects: a theory of urban movement. *Actas del 5to congreso internacional de sintaxis espacial*. Holanda.

Jayashinghe, A., Sano, K. y Nishiuchi, H. (2015) Explaining traffic flow patterns using centrality measures [Versión electrónica]. *International journal for traffic and transport engineering* 5(2), 134-149.

Jenssen-Pennington, H. (2012). Sintaxis del espacio y narrativa del poder: Arquitectura en golfito [Versión electrónica]. *Revista reflexiones* 91(1), 199-206.

Karimi, K. (2003). The tale of two cities: the dynamics of the city Isfahan in the past and present. *Actas del 4to congreso internacional de sintaxis espacial*. Londres, Inglaterra.

Kim, D. y Batty, M. (2011). Modeling urban growth: an agent based microeconomic approach to urban dynamics and spatial policy simulation. [Versión electrónica]. *CASA Working Paper Series* (165).

Kishimoto, T., Kawasaki, S., Nagata, N. y Tanaka, R. (2007). Optimal location of routes and stops of public transportation. *Actas del 6to congreso internacional de sintaxis espacial*. Turquía.

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME). (2012). Evaluación de la Red Vial Cantonal de Cartago: Tramos Homogéneos. San José: LANAMME.

Major, M. (2015). The hidden corruption of American regular grids: Why space Syntax doesn't work in the United States, when it looks like it should. *Actas del 10mo simposio internacional de sintaxis espacial*. Londres, Inglaterra.

Mainieri, C. y Rigatti, D. (2007). Ring roads in greater Porto Alegre: would it be an effective solution?. *Actas del 6to congreso internacional de sintaxis especial*, Turquía.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (2011). Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011 – 2035 Anexo 2: Resultados por Tramos. San José: MOPT.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (2013). Anuario de Información de Tránsito 2013. San José: MOPT.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (2013). Costa Rica: Red Vial Nacional rutas de travesía cantón central provincia de Cartago. San José: MOPT.

Moukhallaleh, C. (2015). Análisis de emisiones de gases por fuentes móviles en las ciudades de Alajuela, Cartago y Heredia. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Municipalidad de Cartago (2013). Informe de Labores 2012. Cartago: Municipalidad de Cartago.

Municipalidad de Cartago (2012). Plan Regulador Territorial del Cantón de Cartago Anexo 5. Cartago: Municipalidad de Cartago.

Patterson, J. (2016) Traffic modeling in cities – validation of space syntax at an urban scale [Versión electrónica]. *Indoor and built environment*(25), 1163-1178.

Paul, A. (2009) An integrated approach to modeling vehicular movement networks: trip assignment and space syntax. Proyecto de graduación para optar por el grado de Doctorado, Texas Tech University, Texas, Estados Unidos.

Paul, A. (2011) Axial Analysis: a syntactic approach to movement network modeling [Versión electrónica]. *Institute of Town Planners, India Journal* 8(1), 29-40.

Paul, A. (2012) Unit segment Analysis: A space syntax approach to capturing vehicular travel behavior emulating configurational properties of roadway structures [Versión electrónica]. *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 12(3), 275-290.

Pereira, R., de Holanda, F., Medeiros, V. y Barros, A. (2012). The use of space syntax in urban transport analysis: limits and potentials. *Actas del 8vo congreso internacional de sintaxis especial*, Chile.

Peponis, J., Ross, C. y Rashid, M. (1997). The structure of urban space, movement and co-presence: the case of Atlanta [Versión electrónica]. *Geoforum* 28(3-4), 341-358.

Raford, N. (2003). Looking both ways: Space syntax for pedestrian exposure forecasting and collision risk analysis. *Actas del 4to congreso internacional de sintaxis especial*. Londres, Inglaterra.

Ratti, C. (2004). "Space syntax: some inconsistencies." [Versión electrónica]. *Environment and Planning B: Planning and Design* (31), 487-499.

Thomson, R. (2003). Bending the axial line: Smoothly continuous road centre-line segments as a basis for road network analysis. *Actas del 4to congreso internacional de sintaxis espacial*, Londres, Inglaterra.

Torres, M. (2016). Estudio de la movilidad ciclista en los distritos de San Francisco, Guadalupe y Quebradilla del cantón de Cartago, y los distritos de Tobosi y Tejar del cantón de El Guarco. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Van Nes, A. (2001). Road building and urban change: A morphological and configurative explanation of how ring roads change the pattern of distribution of shops in city and town centres. *Actas del 3er simposio internacional de sintaxis espacial*. Atlanta, Estados Unidos.

Zhuang, Y. y Song, X. (2015). Combined impacts of configurational and compositional properties of street network on vehicular flow. *Actas del 10mo simposio internacional de sintaxis espacial*. Londres, Inglaterra.