

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Metodología de zonificación de clientes para la distribución urbana de
mercancías en compañías de consumo masivo

Por:

Andres Tejada

Tesis para optar al título de
Magister en Logística Integral

Medellín, Colombia

2018

Departamento de Ingeniería Industrial

Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Metodología de zonificación de clientes para la distribución urbana de
mercancías en compañías de consumo masivo

Por

Andres Tejada

Asesor:

Ph.D. Juan Guillermo Villegas Ramírez

Medellín, Colombia

2018

Tabla de Contenido

Capítulo 1	2
Introducción	2
1.1 Planteamiento del Problema	2
1.2 Revisión de la Literatura	4
Capítulo 2	8
Metodología.....	8
2.1 Descripción General.....	9
2.2 Estimación de Tiempos	10
2.3 Problema de Balanceo de Cargas de Trabajo	13
Capítulo 3	20
Resultados en Casos de Estudio.....	20
3.1 Descripción de la Implementación.....	20
3.2 Caracterización de la Prueba	21
3.3 Resultados y Análisis.....	27
Capítulo 4	31
Conclusiones y trabajo futuro.....	31
Referencias	33

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología para el diseño de territorios de entrega en distribución urbana de mercancía. La metodología consta de dos etapas. La primera es la estimación de tiempos de entrega y de desplazamiento; y la segunda es la solución de un problema de zonificación para el balanceo de las cargas de trabajo de los territorios. La metodología propuesta se validó en dos casos de estudio inspirados en la operación de entrega de una compañía de consumo masivo en dos ciudades colombianas. Los resultados indican que es posible reducir tanto el coeficiente de variación como el rango de las jornadas de trabajo de las rutas que atienden los distintos territorios diseñados.

Palabras clave: Diseño de territorios; distribución urbana de mercancía; estimación de tiempos de entrega; GRASP

Capítulo 1

Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

La distribución urbana de mercancías (DUM) es una decisión a la que se enfrentan diariamente las empresas de consumo masivo. Teniendo en cuenta que los costos de transporte representan la mayor parte del costo logístico [1], determinar una forma adecuada para distribuir la mercancía a sus clientes se convierte en un problema que afecta la rentabilidad de dichas empresas.

En Colombia (según cifras de FENALCO, ver Tabla 1) se estima que hay 200 mil tiendas de barrio [2] (*para el problema en cuestión estos clientes representan el 90% del total*), y teniendo en cuenta que las empresas de consumo masivo no sólo atienden este tipo de clientes sino también grandes cadenas, mayoristas, entre otros, se enfrentan diariamente a operaciones de distribución para un gran número de puntos de entrega.

	Universo de Tiendas
Rural (Ciudades < 80.000 habs)	60.000
Resto Urbano (Ciudades > 80.000 habs)	50.500
Bogotá	38.000
Medellín	14.000
Cali	11.500
Barranquilla	10.500
Bucaramanga	5.000
Eje Cafetero	6.500
Total Ciudades MeikO	85.500

Tabla 1. Tiendas de barrio en Colombia, Fuente: DANE + IDT (Informe de Distribución de Tiendas)

Dadas las condiciones del mercado Colombiano (problemas de seguridad, ventanas horarias, problemas inesperados de movilidad, ausencia de clientes o falta de dinero para pagos, entre otros) se hace necesario agrupar los clientes en zonas o territorios (en adelante, zonas de entrega) que sean compactas para que sean visitados por los vehículos de entrega. Dicha agrupación se hace buscando el balanceo de las cargas de trabajo de los equipos asignados a cada zona de entrega y debe cumplir ciertas condiciones que ayuden a garantizar la repartición de las cargas de manera homogénea [3].

Con este diseño en donde se privilegia la zonificación antes del ruteo se busca mantener el balance de las cargas de trabajo a pesar de los cambios en las secuencias de entrega que puedan ocurrir debido a las condiciones arriba mencionadas.

Diseñar una zona para cada recurso, que en este caso es un vehículo destinado a la entrega de mercancía, implica tener en cuenta factores como la contigüidad, compacidad, convexidad, tamaño y balance de cargas de trabajo, en donde esas cargas de trabajo pueden ser de diferentes tipos: número de clientes, cantidad de mercancía, distancia recorrida, jornadas de trabajo, entre otros [4]. En particular, en el desarrollo de este trabajo se considerará como carga de trabajo principal la jornada de trabajo, en donde se pretenderá establecer rutas que consuman aproximadamente la misma cantidad de tiempo desde que el vehículo sale del centro de distribución hasta que regresa al mismo luego de entregar la mercancía a los clientes asignados.

Teniendo en cuenta que se le dará foco a las jornadas de trabajo para que sean tenidas en cuenta como cargas de trabajo a balancear, se debe considerar que esta jornada está compuesta por dos tipos de tiempos: Tiempo de desplazamiento [5] y tiempo de servicio en clientes [6][7] de acuerdo a su canal. Por lo cual se hace importante contar con una buena estimación de estas variables para que el balanceo de cargas sea el adecuado.

Estas zonas propuestas se atenderán con rutas fijas que se repiten periódicamente y son dependientes del tiempo, por lo cual, una vez realizada la zonificación es posible plantear posteriormente la secuenciación de clientes sugerida para estos territorios (es decir, las rutas) [8].

Considerando las premisas anteriores, este trabajo propone una metodología para la zonificación de clientes en DUM que permita balancear la carga de trabajo de una manera diferente a las formas habituales encontradas en la literatura en los siguientes aspectos: (i) Teniendo como prioridad la homogeneidad en las jornadas de trabajo, (ii) realizando estimaciones tanto para los tiempos de desplazamiento como para los tiempos de entrega en los clientes, (iii) con técnicas adaptadas al sector de consumo masivo. El problema a resolver para este trabajo se puede representar con la siguiente pregunta: ¿Cómo puede mejorarse la zonificación para la distribución urbana de mercancías en empresas de consumo masivo buscando el balanceo de jornadas de trabajo?

Para dar respuesta a esta pregunta, en el desarrollo del presente documento se plantearán estrategias para abordar este problema y diseñar territorios para los vehículos de entrega en empresas de consumo masivo que ayuden a distribuir de manera adecuada las cargas de trabajo, logrando así que los vehículos de entrega cuenten con jornadas de trabajo homogéneas.

La estructura de este documento es la siguiente: el Capítulo 1 realiza una breve síntesis de la literatura relacionado con la DUM, el problema de zonificación y la estimación de tiempos de entrega

y desplazamiento en DUM. Posteriormente, el Capítulo 2, describe la metodología propuesta para el diseño de territorios en DUM. La cual incluye el desarrollo de métodos para la estimación de los parámetros empleados en los procesos de zonificación (tiempo de atención a los clientes, y tiempo de desplazamiento entre clientes). ; y el desarrollo de un metaheurístico para la zonificación de clientes que permita balancear las jornadas de trabajo de los vehículos utilizados en DUM por las empresas de consumo masivo. Finalmente, para validar la metodología propuesta el Capítulo 3 presenta un caso de estudio en el cual se utilizan los datos de una compañía de referencia para medir las mejoras potenciales en comparación con los métodos utilizados previamente. El Capítulo 4 cierra el documento presentando las conclusiones y alternativas de trabajo futuro que se derivan de este trabajo.

1.2 Revisión de la Literatura

1.2.1 Distribución Urbana

En el contexto de la distribución comercial, se considera a la actividad de distribución urbana de mercancías como el conjunto de acciones generadas sobre un producto a través de la cadena de distribución, desde el origen y envío del productor hasta la recepción por el cliente final dentro de una zona urbana [9].

Un sistema de distribución de mercancías con un diseño inapropiado puede generar sobrecostos y afectar la calidad del servicio esperado por el cliente. De éste modo, si bien las empresas resultan beneficiadas de las importantes ventajas derivadas de la alta aglomeración de actividades de producción y consumo localizadas dentro de las ciudades, dicha aglomeración conlleva al mismo tiempo, importantes desafíos impuestos por externalidades como la congestión del tráfico y otras barreras para la eficaz distribución de sus productos. En este sentido, la DUM tiene al mismo tiempo, tanto el reto de adaptarse a las nuevas formas de consumo de productos cada vez más sofisticados, como el de ajustarse a las transformaciones del territorio urbano que imponen nuevas barreras a las operaciones logísticas [9].

Hay tres aspectos principales que caracterizan y condicionan la distribución urbana de mercancías [7]:

- La influencia de la infraestructura, por ejemplo calles cortadas, calles con sentido único, semáforos, etc.
- La estrategia de la distribución, por ejemplo el número de destinos a cubrir, los tiempos de espera y de descarga, los horarios de recepción de mercancía, etc.

- Las características de los vehículos, que deben adaptarse a las condiciones de infraestructura y a las estrategias de distribución.

Para el correcto proceso de zonificación para el diseño de rutas de entrega, estos tres aspectos deben ser tenidos en cuenta.

1.2.2 Procesos de Zonificación

El problema de zonificación o problema de diseño de territorios (TDP de la sigla en inglés para territory design problem) puede ser visto como un problema de agrupación de pequeñas unidades geográficas dentro de un grupo amplio de unidades, llamados territorios, de manera en que los territorios sean aceptados de acuerdo al criterio relevante de planeación [3]. El diseño o distribución de territorios cuenta con un amplio rango de aplicaciones como: distritos políticos, diseño de territorios comerciales (ventas), asignación de estudiantes a escuelas, repartición de servicios públicos, entre otros. A través de la historia, el problema de zonificación ha sido utilizado como una herramienta para dividir territorios en unidades geográficas más pequeñas y asignar recursos disponibles a cada una de esas unidades, con la finalidad de que cada unidad cuente con una población homogénea en determinadas características.

Otro problema muy vinculado al TDP es el diseño de zonas para la prestación de servicios, ya sea para satisfacer la demanda de clientes o la de ciertas infraestructuras (equipamientos técnicos). Al igual que en el caso anterior, los principales objetivos que guían este proceso tienden a crear regiones homogéneas en lo que respecta a uno o varios atributos (nivel medio de ventas, número de clientes potenciales, etc.) que sean lo más compactas posible, de modo que se minimicen los tiempos de viaje de los vendedores para aumentar su eficiencia [10].

Para el diseño de estos territorios deben ser tenidos en cuenta diferentes aspectos que son claves para lograr un buen balanceo de los mismos. Dentro de los métodos utilizados para resolver el problema de zonificación se consideran una serie de restricciones y criterios que ayudan a resolver el problema de acuerdo al contexto en que éste se encuentre. El tamaño del territorio, contigüidad, compacidad, convexidad, balance de cargas de trabajo, entre otros, son criterios que comúnmente son tenidos en cuenta al momento de solucionar este tipo de problemas [4].

Las aplicaciones para el diseño automático de zonas se han desarrollado como programas independientes o bien han sido integradas en un entorno SIG (Sistema de Información Geográfica), ya que estas plataformas, dotadas de funciones de gestión, almacenamiento, visualización y análisis espacial de datos geográficos, carecen de este tipo de herramientas. Por este motivo, más de la mitad de las aplicaciones - desarrolladas entre 1995 y 2003- han utilizado fundamentalmente los programas

de SIG para el almacenamiento de datos y la visualización de resultados [11]. La situación actual pone de manifiesto la existencia de una gran variedad de aplicaciones específicas, adaptadas a problemas particulares, dada la dificultad de diseñar herramientas genéricas de carácter universal [12].

La formulación del problema del diseño de zonas es discreta en tanto las zonas se construyen como agregados de un conjunto de unidades de área o piezas indivisibles. Si se dispone de N unidades para generar M regiones, siendo $M < N$, existen del orden de M^N zonificaciones espaciales sin imponer restricciones de tamaño y conectividad a dichas regiones [13]. Por un lado, aunque el valor de M sea pequeño, el número de soluciones crece exponencialmente a medida que N aumenta. Por otro, cuando las zonas han de ser conexas, no existe una fórmula general que permita determinar el número total de soluciones (posibles zonificaciones), aunque se mantiene un comportamiento exponencial respecto a N [12].

Este tipo de problemas para procesos de zonificación pueden ser abordados a través de modelos de programación matemática o técnicas heurísticas y metaheurísticas. Sin embargo, se estima que el 80% de los problemas de este tipo son resueltos por medio de métodos heurísticos y metaheurísticos y sólo un 20% se resuelve a través de métodos exactos. Esto se debe en gran parte a las características de cada una de las metodologías [12].:

Modelos de Programación Matemática: (i) encuentran la solución óptima, (ii) son aplicables en problema pequeños (*es decir, con pocos clientes*), (iii) consumen alto tiempo de computo, y finalmente, (iv) dependen de un optimizador.

Técnicas Heurísticas y Metaheurísticas: (i) obtienen una buena solución pero no garantizan la solución óptima, (ii) no hay (*virtualmente*) limitación en el tamaño del problema, (iii) tienen tiempo de computo corto con respecto a métodos exactos, y finalmente, (iv) no dependen de un optimizador, se puede desarrollar el método usando un lenguaje de programación.

Tal como se mencionó antes, los métodos más utilizados para forzar la conectividad en problemas de zonificación, abordan la búsqueda de soluciones con procedimientos de tipo heurístico. Estas técnicas son capaces de encontrar buenas soluciones, pero no pueden garantizar matemáticamente la mejor solución ni determinar la desviación respecto a ésta. Heurísticas tales como búsqueda local (*hill climbing*), recocido simulado (*simulated annealing*), búsqueda tabú (*tabu search*), GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) o algoritmos genéticos se han utilizado en modelos de programación entera o mixta, modelos de partición de grafos o modelos de análisis de conglomerados (*clúster*), que han sido implementados en diversas aplicaciones para el diseño

automático de zonas. En general, estos algoritmos tratan el problema de zonificación como uno de optimización combinatoria [12].

Desde un punto de vista comercial, en donde el problema de diseño de territorios se enfoca en brindar una solución para atender los clientes a los que se les debe entregar mercancías, la solución apunta a resolver el problema de distribución urbana, en donde se ven involucradas diferentes variables que deben ser tenidas en cuenta para que el diseño de los territorios se realice de manera eficiente [14]. En este contexto, un territorio se convierte en el conjunto de clientes que deben ser visitados por un vehículo de reparto asignado, en el cual se carga toda la mercancía que debe ser entregada a los clientes. El enfoque en la literatura que se le da a este problema puntual de zonificación es el diseño de áreas de mercado o “territorios” de ventas y prestación de servicios. Este problema es común a todas las empresas que gestionan fuerzas de venta y necesitan subdividir su espacio de mercado en regiones o zonas de responsabilidad [10].

1.2.3 Estimación de parámetros para distribución urbana

Para una correcta realización de una distribución urbana se deben tener en cuenta diferentes criterios que pueden determinar el éxito o fracaso del modelo de distribución. Estos criterios, de acuerdo al contexto de la distribución deben ser considerados en su totalidad o de manera parcial, según sea el caso.

Algunos de los criterios tenidos en cuenta con regularidad son: jornada de trabajo, capacidad de los vehículos utilizados, dispersión y número de clientes, tamaño de los territorios [14][15][16]. A menudo, estos criterios se convierten en restricciones dentro de un modelo de optimización, en donde la asignación de territorios y clientes para cada vehículo se realiza bajo un proceso de zonificación que ya tuvo en cuenta esos parámetros y que no rompió ninguna de esas restricciones y buscó balancear los territorios [3].

Hay dos restricciones que podrían ser las más importantes al momento de diseñar un modelo de distribución urbana: la capacidad de los vehículos y la jornada de trabajo. En el caso particular de DUM abordado en este trabajo la restricción de capacidad de los vehículos no es crítica. Si bien, la capacidad de los vehículos es una restricción que no tiene ningún tipo de flexibilidad, es una restricción que se puede manejar de manera estratégica cuando se cuenta con una flota heterogénea como se menciona en [15], en donde toman inicialmente el vehículo disponible de mayor capacidad y lo van llenando de mercancía que será entregada a los clientes asignados hasta llegar a su restricción de jornada de trabajo, en ese momento, de acuerdo a la carga que tenga asignada la ruta, se redefine el tipo de vehículo que se necesite y se asigna el vehículo de menor capacidad disponible que pueda llevar esa carga.

Por otro lado, la jornada de trabajo se debe tener en cuenta que es el tiempo transcurrido desde que el vehículo sale a ruta a entregar la mercancía a los clientes hasta que regresa de la misma. Esta jornada se compone de dos parámetros que deben ser estimados: Tiempo en clientes y tiempo de desplazamiento.

- *El tiempo en clientes* consiste en el tiempo que se invierte en atender cada uno de los clientes que se deben visitar para la entrega de mercancía y se toma desde el momento en que se llega al lugar en donde está ubicado el cliente hasta que el vehículo parte de ese lugar.

- *El tiempo de desplazamiento* consiste en el tiempo durante el cual el vehículo se encuentra en movimiento para desplazarse desde el centro de distribución hasta el primer cliente, entre los clientes de un territorio de entrega y para regresar desde el último cliente de nuevo al centro de distribución.

Para la estimación del tiempo en clientes se debe tener en cuenta que estos dependen del tipo de cliente y del tamaño de su pedido, y si bien, ya existen unas estimaciones generales para esto [7], es recomendable que estos tiempos en cliente sean estimados de manera particular para cada empresa.

Para la estimación del tiempo de desplazamiento es necesario entender que éste depende de varios factores, dentro de los que se destacan: el tipo de vehículo [14], la densidad de la población o clientes [17], las diferentes velocidades a diferentes distancias [14]. Para poder hacer la estimación, es necesario, inicialmente, estimar también cuál es la distancia que se debe recorrer, para esto, se propone en [18] trabajar con factores que puedan llevar una distancia cartesiana a una estimación de la distancia real recorrida entre dos puntos.

Capítulo 2

Metodología

La metodología utilizada en este trabajo combinará métodos empíricos, de acuerdo a la experiencia adquirida, con métodos teóricos, que de manera complementaria ayuden a dar respuesta al problema planteado [19]. Esto permite proponer una metodología generalizable que sea posiblemente replicable en otros casos dentro del mismo sector de consumo masivo en los cuales se realice DUM.

2.1 Descripción General

El problema a abordar en este caso se trata del diseño de territorios de clientes que serán atendidos por vehículos de distribución urbana que realizan rutas periódicas en un horizonte de planeación de una semana para una empresa de consumo masivo en ciudades colombianas. Con el objeto de diseñar los territorios de clientes que serán asignados a los vehículos de distribución urbana, se propone una metodología de dos etapas: en la primera etapa se estiman los tiempos que componen las jornadas de trabajo; y en la segunda etapa se resuelve un problema de diseño de territorios logrando así una solución final de buena calidad. Dicha metodología combina la experiencia adquirida por el equipo encargado de administrar dicho proceso (*factores que influyen el tiempo de servicio a los clientes, comportamiento del tiempo de servicio y de desplazamiento, etc.*) con métodos disponibles en la literatura para la solución de los problemas de zonificación (*métodos heurísticos y aproximaciones continuas*).

Inicialmente, es necesario recolectar la información de los clientes que atiende la compañía en su DUM: conjunto de clientes con su localización (*latitud y longitud*), tamaño de pedido y tipo; y localización (*latitud y longitud*) del centro de distribución (*CD*). Esta información se debe organizar en una base de datos.

Con la información recolectada se realiza el ajuste de los parámetros que serán utilizados en el problema de zonificación: tiempos de entrega por cliente, factores de conversión de distancias a tiempos de desplazamiento del CD a las zonas de entrega, y factores de conversión para los tiempos de desplazamiento entre los clientes de cada zona de entrega. Posteriormente, se utiliza dicha información para resolver el problema de zonificación utilizando un GRASP que consta de dos componentes: construcción aleatorizada y búsqueda local. Para obtener de esta manera territorios de clientes compactos que serán atendidos por rutas de entrega con jornadas de trabajo balanceadas. La descripción gráfica de la metodología se muestra en la Figura 1.

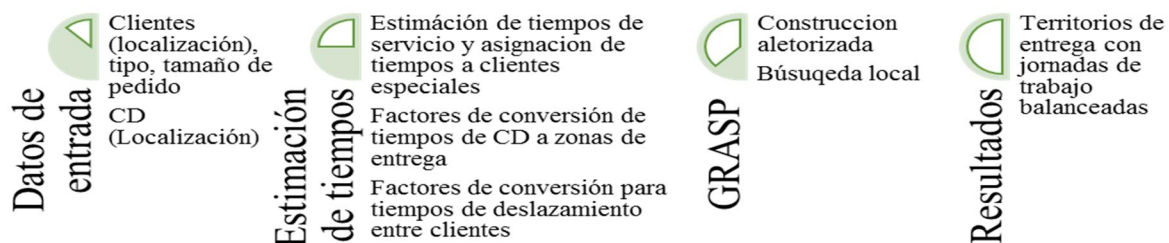


Fig 1. Esquema general de la metodología propuesta para el diseño de territorios en DUM.

2.2 Estimación de Tiempos

Como se ha mencionado anteriormente, la jornada de trabajo (*métrica a balancear en la zonificación*), en este caso, se compone de dos variables o dos tipos de tiempos (*tiempo de entrega en clientes y tiempo de desplazamiento*), debido a esto, para lograr un balanceo de las cargas de trabajo, es necesario contar con una buena estimación del comportamiento de los tiempos mencionados, por lo cual se recomienda realizar esta estimación de manera discriminada.

2.2.1 Estimación de Tiempos de Entrega

Inicialmente para contar con una base de trabajo para la estimación, es necesario tomar un muestreo del comportamiento de los tiempos de entrega en campo. Es decir, se deben tomar tiempos en operación desde que el vehículo llega al lugar en donde se encuentra el cliente al que le va a hacer entrega de mercancía hasta que el vehículo retoma su camino y comienza nuevamente con el desplazamiento. Estas muestras deben ir acompañadas de información adicional que permita la clasificación y posterior análisis de los datos (*identificación del cliente, tipo o canal del cliente, tamaño de pedido, estrato socioeconómico, hora de entrega, etc*).

Con la información recolectada de las muestras se realizó un análisis exploratorio en el cual se determinó que las variables tamaño de pedido (*en kg*) y el tipo de cliente (*tradicional, mayorista, autoservicio, grandes cadenas*) son las más apropiadas para describir el tiempo de entrega en este caso. En la Tabla 2 se describe cada tipo de cliente o canales así como el tiempo promedio de entrega observado en campo para cada uno.

Canal	Descripción	Tiempo promedio de entrega
Tradicional	Tiendas de barrio	7 minutos
Mayorista	Distribuidor de productos al por mayor sin exclusividad	15 minutos
Autoservicio	Minimercados	14 minutos
Grandes Cadenas	Supermercados	54 minutos

Tabla 2. Descripción de tipos de clientes o canales.

Inicialmente, se realizó un análisis del comportamiento de los tiempos de entrega para validar si este comportamiento obedece a algún tipo de distribución de probabilidad conocida. Sin embargo, para la muestra en estudio no hubo ninguna distribución conocida a la cual se ajustaran los datos (*utilizando prueba de bondad de ajuste*). Sin embargo, según la experiencia del equipo encargado del proceso, los tiempos de entrega se comportan de manera creciente hasta cierto tamaño de pedido

(de acuerdo al canal) y de allí en adelante siguen un comportamiento relativamente asintótico paralelo al eje x (*tamaño de pedido*), en el cual los tiempos de entrega dejan de crecer significativamente. La Figura 2 ilustra este comportamiento.



Fig 2. Comportamiento de los tiempos de entrega.

De acuerdo al comportamiento observado en la muestra y a los análisis antes mencionados, se decidió ajustar una regresión no paramétrica. En donde, en lugar de especificar un modelo preestablecido, se considera un modelo no especificado a partir de la literatura [20]. La expresión utilizada para explicar este comportamiento y que lo relaciona para cada tipo de cliente es la siguiente:

$$y = A + (B(o)) * [(C * x) / (D + x)] \quad (1)$$

En donde: x representa el tamaño del pedido e y representa el tiempo estimado de entrega (*en minutos*). La constante A corresponde al tiempo fijo de servicio en un cliente; B es una constante a usar dependiendo del tipo de cliente o ($o \in \{Tradicional, Mayorista, Autoservicio, Gran Cadena\}$), mientras que C y D son constantes que ayudan a recrear el comportamiento asintótico paralelo al eje x (*tamaño de pedido*).

2.2.2 Estimación de Tiempos de Desplazamiento

Por otro lado, los tiempos de desplazamiento representan el tiempo que un vehículo se encuentra en movimiento durante la jornada de trabajo y están compuestos de dos partes: primero está el tiempo de desplazamiento desde el CD y cada territorio de entrega y viceversa; y segundo está el tiempo de desplazamiento entre clientes una vez que los vehículos están en el territorio de entrega.

Tal como lo resaltan Francescheti, Jabali y Laporte [21], el uso de aproximaciones en el diseño de rutas, las decisiones de localización o zonificación, es conveniente, en algunos casos, al nivel estratégico o táctico. En este nivel de decisión es posible utilizar una aproximación que permita

tener un primer indicio del costo de una solución sin tener un ruteo detallado de los clientes. Dicha secuenciación se realiza posteriormente en el nivel operativo una vez definida la zonificación.

2.2.2.1 Tiempos de Desplazamiento a Zonas de Entrega

Para estimar los tiempos de desplazamiento a los territorios de entrega es necesario contar con algunos elementos: inicialmente se calculan las coordenadas del centroide del territorio de entrega, de acuerdo a las coordenadas de los clientes pertenecientes a dicho territorio. Con este dato se calcula la distancia Euclidiana (*i.e., en línea recta*) entre el centroide mencionado y el centro de distribución. Dicha distancia se calcula mediante la fórmula de distancia entre dos puntos (*usando la latitud y longitud de los puntos*; $D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$).

Luego de contar con la distancia entre el centro de distribución y el centroide del territorio de entrega, se convierte dicha distancia en línea recta a una distancia en un circuito urbano, por medio de un factor de conversión tal como se sugiere en [14]. Posteriormente, esta distancia estimada se multiplica por 2, dado que el desplazamiento entre el centro de distribución y el territorio de entrega es de ida y regreso.

Para trabajar con valores de medición de distancia que sean comunes y fácilmente entendibles, se utiliza un valor de conversión para transformar la distancia cartesiana en kilómetros (*1 unidad cartesiana = 110,68 km*).

Finalmente, con la ayuda de la velocidad promedio de la ciudad en estudio, se puede estimar el tiempo de desplazamiento hacia y desde el territorio de entrega.

2.2.2.2 Tiempos de Desplazamiento entre Clientes

Una vez el vehículo llega al territorio de entrega se estima el tiempo que el vehículo tardará realizando los desplazamientos entre los clientes, este tiempo depende de la extensión del territorio y el número de clientes que se debe visitar, debido a esto, como se sugiere en [22], se aplica la ecuación (2).

$$\text{Distancia recorrida entre clientes} = K_{TSP}\sqrt{SN} \quad (2)$$

En la ecuación (2) se estima la distancia recorrida por un vehículo entre los clientes de un mismo territorio, utilizando para ello los siguientes términos: K_{TSP} factor de conversión a distancias de TSP [22]; S área en metros cuadrados cubierta por el territorio; y N número de clientes en el territorio.

Para encontrar S se construye un rectángulo en el que se toma el cliente que esté más al norte del territorio y el cliente que se ubique más al sur, se encuentra la distancia entre estos dos clientes

(como se mencionó anteriormente). De esta manera se tiene uno de los lados del rectángulo. Luego se repite el ejercicio con los clientes que estén más al oriente y occidente para encontrar el segundo lado. Finalmente con estos dos lados se halla el área comprendida por el territorio de entrega en cuestión.

Nuevamente, luego de encontrar la estimación de distancia recorrida, se divide por la velocidad promedio para estimar el tiempo de desplazamiento entre clientes.

2.3 Problema de Balanceo de Cargas de Trabajo

Para solucionar el problema de balanceo de cargas de jornadas de trabajo en los vehículos que salen a ruta, se planteó una solución en la cual se distribuyen los tiempos de entrega y desplazamiento de cada jornada, de manera que la suma de ambos tiempos en cada territorio sea homogéneo para todos los territorios.

2.3.1 Formulación del TDP

La metodología para el balanceo de cargas de trabajo en este caso, se basa en la solución para un problema TDP, en el cual se busca conformar territorios de clientes, los cuales son asignados a vehículos para DUM, que cumplen con los principios para la zonificación [4] y que están homogéneamente distribuidos en cuanto a sus jornadas de trabajo.

Matemáticamente, este diseño de territorios de entrega puede expresarse como un problema de optimización que busca asignar los clientes a los territorios para minimizar la suma del promedio de las jornadas de trabajo de los territorios de entrega más la desviación de los mismos, garantizando que cada cliente esté asignado a un solo territorio. Dicho problema de optimización se puede formular usando la siguiente notación:

Conjuntos:

- *Clientes: \mathbf{C}*
- *Centro de distribución: \mathbf{CD}*
- *Territorios: \mathbf{T}*

Parámetros:

- *$te_i, i \in \mathbf{C}$: Tiempo de entrega en cada cliente.*
- *$(x_i, y_i), i \in \mathbf{C}$: Coordenadas para cada cliente.*

- (x_{cd}, y_{cd}) : *Coordenadas del centro de distribución.*
- $d(p_1, p_2)$: *Distancia entre dos puntos calculada con distancia euclidiana.*
- v : *Velocidad promedio en la ciudad.*
- f : *Factor de conversión de distancia euclidiana a distancia en circuito urbano.*
- m : *Factor de conversión de distancia cartesiana a kilómetros.*
- K_{TSP} : *Factor para estimar la distancia recorrida entre los clientes de un mismo territorio.*

Variable de decisión:

- a_{it} : {1 si el cliente i es asignado al territorio $t \in T$; 0 en otro caso}

Variables Auxiliares:

- ta_t : *Tiempo de entrega acumulado del territorio $t, t \in T$.*
- $td1_t$: *Tiempo de desplazamiento desde el CD hasta el territorio $t, t \in T$.*
- $td2_t$: *Tiempo de desplazamiento entre clientes del territorio $t, t \in T$.*
- $Jornada_t$: *Jornada de trabajo del territorio $t, t \in T$.*
- $Jornada_{prom}$: *Jornada promedio de los territorios.*
- $Centroide_t$: *Punto central calculado para cada territorio $t, t \in T$.*
- S_t : *Área del territorio $t, t \in T$.*
- N_t : *Número de clientes del territorio $t, t \in T$.*

Con dicha notación el TDP se expresa de la siguiente manera:

Función Objetivo:

$$\mathbf{Min} : Jornada_{prom} + \sum_{t \in T} \frac{|Jornada_t - Jornada_{prom}|}{|T|} \quad (3)$$

Sujeto a:

$$\sum_{t \in T} a_{it} = 1, \quad \forall i \in C \quad (4)$$

$$a_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in C ; \forall t \in T \quad (5)$$

Donde:

$$Jornada_t = ta_t + td1_t + td2_t \quad (6)$$

$$Jornada_{prom} = \sum_{t \in T} \frac{Jornada_t}{|T|} \quad (7)$$

$$ta_t = \sum_{i \in C} a_{it} * te_i \quad (8)$$

$$td1_t = \frac{d(CD, Centroide_t)}{v} * f * m \quad (9)$$

$$td2_t = \frac{K_{TSP} \sqrt{S_t N_t} * m}{v} \quad (10)$$

De esta manera cada cliente se asigna a uno y solo un territorio. Para minimizar la función objetivo la jornada promedio y la desviación absoluta promedio con respecto a dicho valor. La jornada promedio de un territorio $t \in T$ está compuesta por tres términos (ta_t , $td1_t$ y $td2_t$). El primero acumula el tiempo de atención en los clientes del territorio. El segundo representa el tiempo de desplazamiento hasta el territorio y se calcula a partir de la distancia entre el centroide del territorio y el CD ($d(CD, Centroide_t)$). El tercer término se calcula a partir de la aproximación continua introducida por [22], utilizando el área cubierta por el territorio (S_t) y el número de clientes del mismo (N_t). Así mismo, para calcular el centroide y la superficie del territorio se utilizan las siguientes expresiones con base en los clientes asignados a cada territorio.

$$centroide_t = (\tilde{x}_t, \tilde{y}_t) \quad (11)$$

$$\tilde{x}_t = \frac{\sum_{i \in C} x_i * a_{it}}{\sum_{i \in C} a_{it}} \quad (12)$$

$$\tilde{y}_t = \frac{\sum_{i \in C} y_i * a_{it}}{\sum_{i \in C} a_{it}} \quad (13)$$

$$\mathbf{s}_t = (\overline{\mathbf{x}}_t - \underline{\mathbf{x}}_t) * (\overline{\mathbf{y}}_t - \underline{\mathbf{y}}_t) \quad (14)$$

$$N_t = \sum_{i \in C} a_{it} \quad (15)$$

$$\overline{\mathbf{x}}_t = \max\{x_i : a_{it} = 1\} \quad (16)$$

$$\underline{\mathbf{x}}_t = \min\{x_i : a_{it} = 1\} \quad (17)$$

$$\overline{\mathbf{y}}_t = \max\{y_i : a_{it} = 1\} \quad (18)$$

$$\underline{\mathbf{y}}_t = \min\{y_i : a_{it} = 1\} \quad (19)$$

2.3.2 GRASP

Los parámetros estimados anteriormente, para calcular los tiempos de entrega y desplazamiento, se utilizan para resolver el problema de zonificación para el balanceo de las jornadas de trabajo en las zonas de entrega a través de un método GRASP. Dicho método consta de dos etapas [23]. En la primera etapa se crea una solución constructiva con un componente aleatorio y en la segunda etapa se realiza una búsqueda local en la cual se mejora la solución inicial intentando minimizar la función objetivo. Al finalizar cada iteración del GRASP (*construcción + mejora de solución*) se almacena la mejor solución encontrada por la búsqueda local y se actualiza de ser necesario la mejor solución global. Este proceso se repite por un número de iteraciones; y al final se reporta la mejor solución encontrada durante la búsqueda.

La Figura 3 ilustra el procedimiento general de GRASP. En la figura se muestran los principales componentes (*construcción de solución inicial y búsqueda local para mejorar la solución*). *Max_iteraciones* indica el número de iteraciones que se correrá el algoritmo. En este caso, los demás parámetros corresponden a los valores que controlan los diferentes componentes de GRASP (*factor para convertir distancias euclidianas en distancias en circuitos urbanos, factor para pasar de distancia cartesiana a kilómetros, k_{TSP} , etc.*).

```

Procedimiento GRASP (Max_iteraciones, Parámetros)
1)  Lectura de datos
2)  Para k=1 hasta Max_iteraciones Haga
3)      Solución ← Construcción Aleatorizada (Parámetros)
4)      Solución ← Búsqueda Local (Solución)
5)      Actualizar mejor solución (Solución, Mejor_Solución)
6)  Fin Para
7)  Muestre Mejor_Solución
Fin GRASP

```

Fig 3. Procedimiento general de GRASP [24].

2.3.2.1 Construcción de la Solución Inicial

La primera parte del algoritmo para el balanceo de cargas de trabajo consiste en crear una solución inicial con un componente aleatorio, de manera que esa solución inicial sea la entrada para la segunda parte del algoritmo. Inicialmente, en la solución constructiva no se tienen en cuenta los tiempos de desplazamiento. El pseudocódigo del algoritmo para la construcción de la solución inicial se describe en la Figura 4.

Para comenzar con la solución constructiva se elige el número de territorios que se desea crear (k). Luego se calcula la sumatoria de los tiempos de entrega de todos los clientes y el total del tiempo obtenido por la sumatoria se divide por el número de territorios deseados (*línea 2*). Como resultado se obtiene el tiempo promedio ideal (*para esta parte de la solución*) que debe tener cada territorio en cuanto a tiempos de entrega se refiere (C_{ideal}).

Posteriormente, para generar los territorios se toma un punto aleatorio en el espacio como semilla y se usa un método de vecino más cercano para agregar clientes al territorio (*líneas 3-5*). Primero se determina cuál es el cliente más cercano (*calculado la distancia euclidiana*) al punto semilla (*línea 11*), y luego se busca el cliente más cercano al cliente inicial y se asignan ambos al territorio en construcción. A partir de ahí se calcula el centroide de los clientes que se encuentren en el territorio y se agrega (*secuencialmente*) el cliente más cercano a dicho centroide hasta llegar al tiempo promedio de entrega para cada territorio (*Se eligió trabajar con el centroide debido a que en el momento del diseño del algoritmo se hicieron pruebas preliminares con otros criterios como el primer cliente o el inicio de ruta de cada territorio; y aunque la función objetivo obtenía resultados similares a los del centroide, los territorios en algunos casos dejaban de ser compactos*).

Luego de completar el primer territorio se toma nuevamente el punto semilla y se busca el cliente más cercano a éste que aún no ha sido asignado a un territorio para construir un nuevo territorio

utilizando el vecino más cercano. Este procedimiento de construcción aleatoria se repite hasta asignar todos los clientes al número de territorios indicado.

```

1  Construcción (k, C, xmin, xmax, ymin, ymax)
2    Cideal = (∑i∈C tai)/k
3    rx = rand(xmin, xmax)
4    ry = rand(ymin, ymax)
5    r = (rx, ry) // punto de referencia aleatorio para la construcción
6    T = ∅
7    j = 1
8    mientras j ≤ k
9      tj = ∅
10     STE = ∅
11     C0 = argmini∈C \ ∪tk∈T tk {d(r, i)}
12     tj = tj ∪ {C0}
13     STE = STE + taC0
14     mientras STE ≤ Cideal
15       C = argmini∈C \ ∪tk∈T tk {d(centroidetj, i)}
16       tj = tj ∪ {C}
17       STE = STE + taC
18     fin mientras
19     T = T ∪ tj
20     j = j + 1
21   fin mientras
22   devuelva T // Territorios iniciales
23 fin Construcción

```

Fig 4. Pseudocódigo de algoritmo para construcción de la solución inicial.

2.3.2.2 Búsqueda Local

Luego de contar con una solución inicial con los territorios balanceados en cuanto a tiempos de entrega se refiere, se deben incluir ahora los tiempos de desplazamiento para mejorar la función objetivo reinsertando clientes de un territorio a otro. La Figura 5 muestra el pseudocódigo del algoritmo para la búsqueda local.

Inicialmente, se calcula la función objetivo original de la solución inicial incluyendo los tiempos de desplazamiento utilizando la ecuación (3), (línea 5). Para mejorar la solución, en el caso en el cual el territorio con mayor desviación a la jornada promedio esté por encima, se toma el cliente más

alejado de su centroide (*de acuerdo a la distancia euclidiana*) y se asigna a otro de los territorios cuyo centroide sea el más cercano al cliente (*líneas 7-11*). Por el contrario, si el territorio más alejado en cuanto a jornada está por debajo del promedio, se le asigna a ese territorio el cliente que pertenezca a otro territorio y que sea el más cercano a su centroide (*líneas 12-17*). Luego de este movimiento se recalcula la función objetivo.

Cuando se mejora la solución se actualizan los territorios y se reinicia el contador de la búsqueda local (l), líneas (19-23). La inserción de clientes se repite hasta llegar a un número definido (IBL) de movimientos continuos sin que se mejore la función objetivo de la solución actual (*línea 24*). La búsqueda local devuelve la solución mejorada (T^*) o la misma solución inicial si no logro mejorarla.

```

1  Búsqueda local( IBL, T)
2    T* = T
3    l = 1
4    mientras l ≤ IBL
5      Z = f(T)
6      tmax = argmaxt ∈ T{ |jornadat - jornadaprom| }
7      si jornadatmax ≥ jornadaprom
8        C = argmaxi ∈ tmax{ d(centroidetmax, i) }
9        tmax = tmax \ {C}
10       tnuevo = argmint ∈ T \ {tmax}{ d(centroidet, C) }
11       tnuevo = tnuevo ∪ {C}
12     sino
13       C = argmini ∈ T \ {tmax}{ d(centroidetmax, i) }
14       t(c) = t ∈ T : C ∈ t
15       t(c) = t(c) \ {C}
16       tmax = tmax \ {C}
17     fin si
18     Z' = f(T)
19     si Z' < Z
20       l = 1
21       Z = Z'
22       T* = T
23     sino
24       l = l + 1
25     fin si
26   fin mientras
27   devuelva T*
28 fin Búsqueda local

```

Fig 5. Pseudocódigo de algoritmo para solución a través de búsqueda local.

Capítulo 3

Resultados en Casos de Estudio

3.1 Descripción de la Implementación

Con el objetivo de validar la metodología propuesta, se aplicó en dos escenarios de prueba. Dichos escenarios fueron construidos utilizando los datos de una compañía colombiana de referencia que opera en el segmento del consumo masivo. Esto permitió medir las mejoras potenciales que ofrece la metodología propuesta en comparación con los métodos utilizados actualmente por la compañía.

Para ambos escenarios se validó la situación actual con la metodología propuesta, de manera que al recrear la situación actual se tuvieran resultados comparables con los resultados de la situación propuesta.

Para garantizar que la situación actual recreada con esta metodología fuera realista, se llevaron a cabo pruebas comparativas, en las cuales se compara el comportamiento real de la duración de las rutas contra la duración estimada por la metodología propuesta. Los resultados obtenidos fueron similares. De esta forma se valida la metodología planteada a través de su implementación.

La metodología se utilizó para zonificar una ciudad de tamaño mediano, con más de mil clientes. Se compararon los tiempos de las zonas obtenidas con la metodología propuesta con los tiempos de las rutas detalladas de cada zona obtenidos con un sistema de información geográfico (*ArcGis*). Para un total de 77 observaciones, la diferencia absoluta promedio fue de 5.6%, la desviación máxima por debajo fue de 20.3% y la desviación máxima por encima fue de 19.3%. La Figura 6 resume los resultados de esta prueba. Como puede observarse, el 60% de las observaciones tiene un error inferior al 5% y el 90% de las observaciones se encuentran por debajo del 10%. Sólo un 10% se encuentra por encima del 10% de desviación. Estos últimos resultados corresponden a zonas que presentan algunas particularidades en ruta como tiempos muertos finalizando la ruta por esperar para entregar un cliente con una ventana de atención establecida en la tarde, un elemento que no fue considerado en la metodología de zonificación y que se constituye en una oportunidad de trabajo futuro.

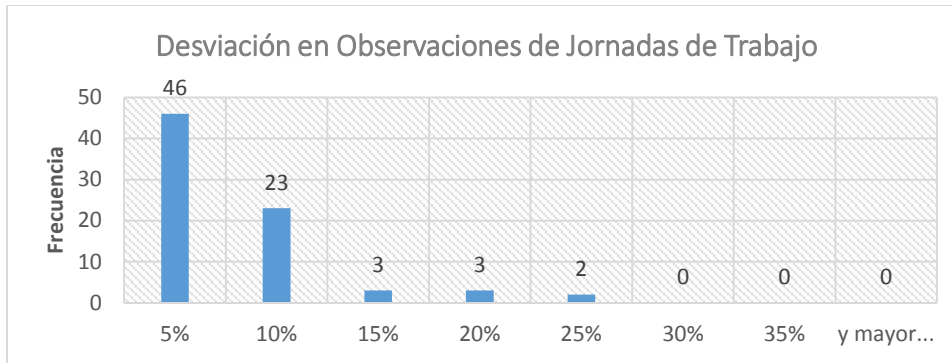


Fig 6. Histograma con las desviaciones de las observaciones en jornadas de trabajo.

El primer escenario corresponde a una ciudad colombiana en donde se cuenta con 800 clientes; el segundo escenario utiliza otra ciudad colombiana, en donde el tamaño de la operación es mayor, contando con cerca de 3000 clientes. En ambos casos los clientes son atendidos periódicamente con frecuencias semanales, por lo cual se requiere crear territorios de entrega para cada día de la semana. Los casos utilizados para la implementación de la prueba consisten en asignar los recursos disponibles (vehículos) a territorios de entrega conformados por clientes a los cuales se les debe hacer entrega de los productos de la compañía en cuestión, de manera que las jornadas de trabajo de todos los vehículos sean homogéneas, garantizando a su vez la entrega del 100% de los productos a los clientes.

El método GRASP y la estimación de los tiempos fueron implementados usando VBA en Excel [25]. Para resolver los problemas de optimización necesarios para la estimación de los parámetros de la ecuación (1) y el factor K_{TSP} se utilizó el Solver de Excel [26].

3.2 Caracterización de la Prueba

3.2.1 Situación actual

Antes de la implementación ya se contaba con territorios de entrega establecidos para cada recurso, sin embargo, estos territorios no cumplían con dos de los criterios de zonificación: las jornadas de trabajo no eran homogéneas y los territorios de entrega no eran necesariamente compactos; lo que ocasionaba desigualdad en las cargas de trabajo para los entregadores, dificultades para cumplir con ventanas horarias, dificultades para realizar segundas visitas (*en los casos puntuales que fuera necesario*), generación de horas extra, entre otros. Estas situaciones hacían necesario revisar las zonas de entrega de estas ciudades y lograr proponer una mejor manera en la que fueran atendidos los clientes.

En el caso de la primera ciudad se contaba con 9 recursos disponibles para realizar la operación de entrega en los territorios, los cuales tenían un rango promedio de más de 2 horas de diferencia entre la jornada de trabajo más corta y la más larga, cada vez que atendían los territorios de entrega. Para el caso de la segunda ciudad, en la cual la operación era de mayor tamaño, se contaba con 32 recursos destinados a la entrega en los territorios conformados. En esta ciudad, el rango entre la jornada más corta y la más larga era de más de 3 horas. La Figura 7 muestra el comportamiento de las jornadas de trabajo de los territorios antes de la implementación en un día promedio para la operación en la primera ciudad.

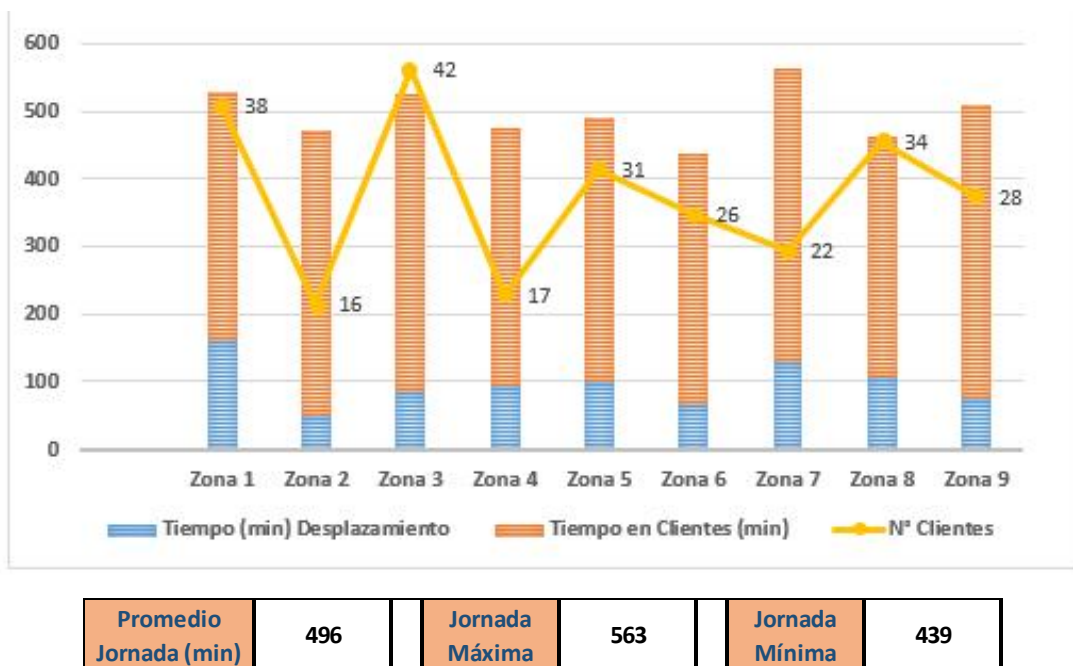


Fig 7. Distribución de las jornadas de trabajo (en minutos) para un día promedio en la ciudad 1.

3.2.2 Implementación de la metodología para el mejoramiento de los territorios de entrega

Siguiendo la metodología propuesta, inicialmente se realizó la estimación de parámetros para los tiempos de entrega y desplazamiento; y posteriormente se ejecutó el algoritmo de zonificación para la conformación de los nuevos territorios de entrega con jornadas de trabajo homogéneas.

3.2.2.1 Tiempos de Entrega

Luego de analizar 755 observaciones tomadas en campo (*como se menciona en la sección 2.2.1*) en diferentes ciudades colombianas con los tiempos de entrega, el tamaño de pedido y el tipo de cliente, se ajustó la ecuación (1) utilizando el Solver de Excel para minimizar la desviación absoluta media de la estimación. La Figura 8 ilustra el ajuste para cada tipo de cliente. La ecuación utilizada para calcular los tiempos de entrega es la siguiente (*con las constantes $o(B)$ de la Tabla 3*):

$$y = 3,9 + (o(B)) * [(42,53 * x) / (83,22 + x)] \quad (20)$$

Constantes para tipos de clientes (o)	Tradicional	Mayorista	Autoservicio	Gran cadena
B	0,62	0,80	1,90	1,99

Tabla 3. Constantes para tipos de clientes

De esta manera, para cada cliente, de acuerdo su tipo y tamaño de pedido se realiza la estimación del tiempo de entrega utilizando la ecuación mencionada anteriormente con las constantes encontradas. La estimación del tiempo de entrega para cada tipo de cliente en un pedido del mismo tamaño es diferente. Este comportamiento se describe en la Tabla 4 con un ejemplo para un pedido de 30 kg.

Canal	Tamaño de pedido (kg)	Tiempo de entrega estimado (min)
Tradicional	30	13.9
Mayorista	30	16.7
Autoservicio	30	34.2
Gran Cadena	30	35.7

Tabla 4. Estimación de tiempo de entrega para diferentes tipos de clientes en un pedido de igual tamaño.

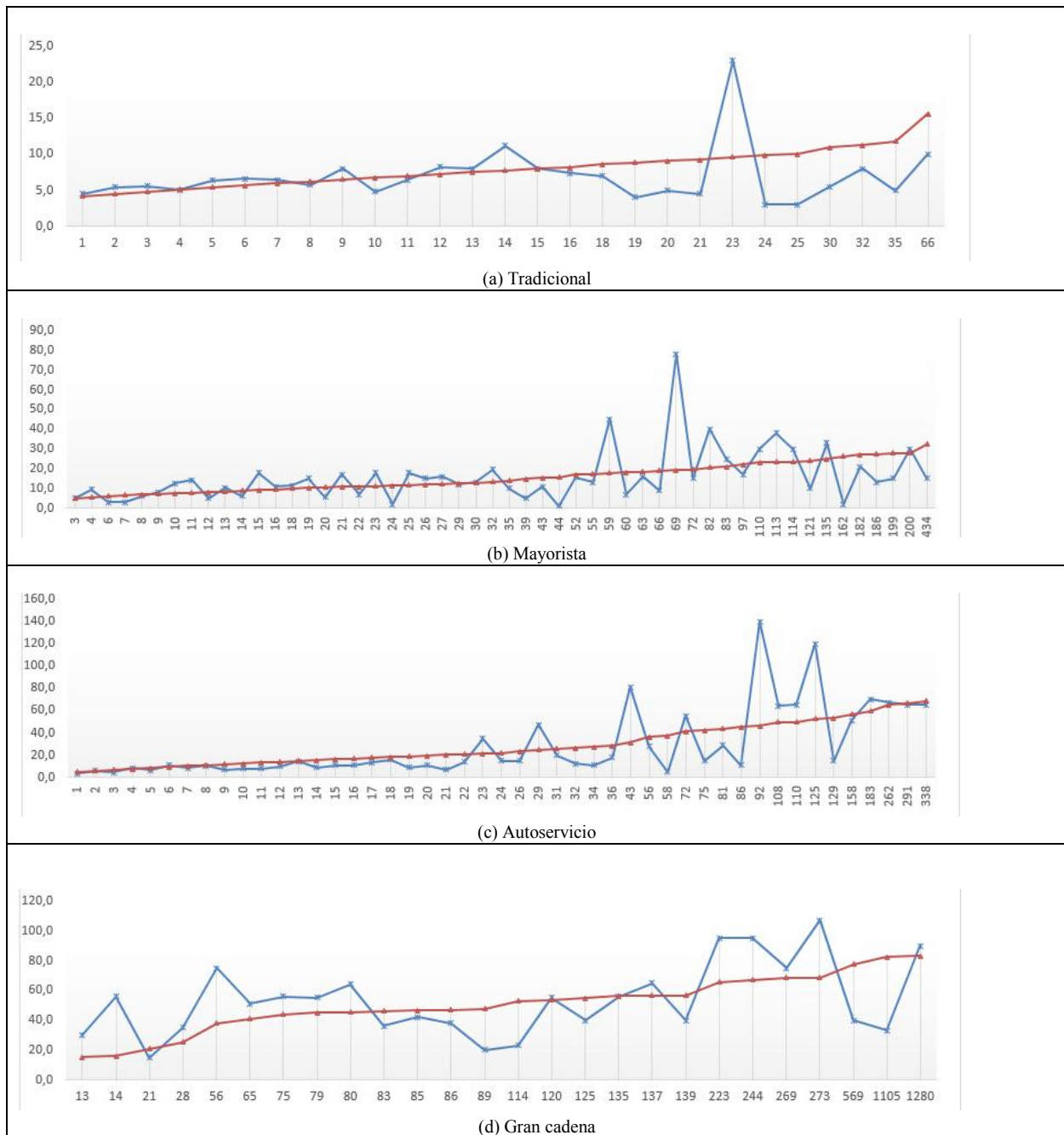


Fig. 8. Estimación de tiempos de entrega por tipo de cliente. Eje x: Tamaño del pedido en Kilogramos, Eje y: Tiempo de entrega en minutos. Valores ajustados en rojo, valores observados en azul.

3.2.2.2 Tiempos de Desplazamiento

Para estimar los tiempos de desplazamiento, inicialmente se obtuvieron las coordenadas de todos los clientes y del CD con la ayuda de algunos sistemas de información geográfica (*ArcGis*, *Google maps*, *EasyMapMaker*, *Power Map de Excel*), esto permite además de conocer la ubicación de los clientes, calcular las distancias entre los puntos.

En la estimación de los tiempos de desplazamiento del CD al territorio de entrega se sigue la metodología descrita, para lo cual fue necesario utilizar el factor mencionado en [5] para convertir distancias rectilíneas (*entre el CD y el centroide de los territorios*) en distancias en circuitos urbanos (*para camiones su valor es 1,83*). Luego se utilizó el factor de conversión para pasar de distancia cartesiana a kilómetros (*1 unidad cartesiana = 110,68 km*) mencionado en la metodología. Posteriormente se tomó la velocidad promedio de cada una de las ciudades en estudio (*30 km/h para la primera ciudad y 23 km/h para la segunda ciudad*) y se dividió por esta velocidad la distancia en kilómetros hallada anteriormente. Para finalmente multiplicar el tiempo obtenido por 2 (*ya que el desplazamiento es de ida y vuelta*). De esta manera se obtiene en el GRASP el tiempo de desplazamiento a los territorios de entrega en ambos casos de estudio.

En cuanto a los tiempos de desplazamiento entre clientes se utilizó la ecuación (2). Para ajustar el factor K_{TSP} se tomó una muestra de 54 rutas operadas actualmente por la compañía, de éstas se midió el tiempo de desplazamiento entre clientes y con un optimizador se ajustó el factor que minimiza la desviación entre las estimaciones de los tiempos de desplazamiento entre clientes y las observaciones realizadas. El resultado obtenido para el valor del factor K_{TSP} fue de 1,273. Con el factor encontrado, el área y el número de clientes para cada territorio, aplicados en la ecuación (2), fueron estimados los tiempos de desplazamiento entre clientes para los casos de estudio. La Tabla 5 muestra el comportamiento de algunas de las estimaciones realizadas para el tiempo de desplazamiento entre clientes comparadas con el tiempo observado.

Ruta	# Clientes	Área (km ²)	Desplazamiento (km)	Tiempo (min)	Desplazamiento estimado	Tiempo estimado
Zona 1Ruta 10	46	2.98	17.55	43.81	14.91	38.89
Zona 1Ruta 3	33	2.80	10.56	24.31	12.23	31.90
Zona 1Ruta 4	33	2.47	11.53	28.13	11.49	29.98
Zona 1Ruta 5	27	1.67	6.18	14.97	8.55	22.30
Zona 1Ruta 8	39	3.33	12.17	32.66	14.50	37.84
Zona 1Ruta 9	32	1.25	8.35	19.35	8.04	20.98
Zona 2Ruta 4	40	10.17	23.62	62.73	25.68	67.00
Zona 2Ruta 7	39	4.62	14.34	37.39	17.09	44.59
Zona 3Ruta 3	50	2.77	13.39	37.37	14.97	39.06
Zona 3Ruta 6	10	5.36	11.92	29.58	9.32	24.30
Zona 3Ruta 7	32	3.64	14.38	34.30	13.74	35.84
Zona 4Ruta 8	27	6.88	18.21	43.79	17.36	45.28

Tabla 5. Comparación de la estimación de algunos tiempos de desplazamiento vs observación en rutas actuales.

3.2.2.3 Zonificación

Para realizar la zonificación de los territorios de entrega en ambos casos se corrió el método GRASP para el balanceo de cargas de trabajo propuesto en la metodología. Sin embargo, aunque para la primera ciudad se realizó la zonificación inmediatamente luego de la definición de los parámetros para los tiempos de entrega y desplazamiento, en el caso de la ciudad con una operación mayor, se decidió trabajar con “macrozonas”. Las macrozonas para la segunda ciudad fueron creadas debido a dos razones: la primera era poder cumplir con el criterio de conectividad, ya que había una frontera marcada que atravesaba la ciudad (*un río*) y se contaba con pocos puentes para cruzar de un lado de la ciudad al otro (*característica que no se presentaba en la primera ciudad*). La segunda razón era tratar de simplificar el problema al dividirlo en problemas más pequeños utilizando “macrozonas” acordes con la operación comercial de la compañía. Para realizar esta división en macrozonas se utilizó un SIG con el que cuenta la compañía de referencia. La Figura 9 muestra la división de los clientes realizada para crear las macrozonas en la segunda ciudad.

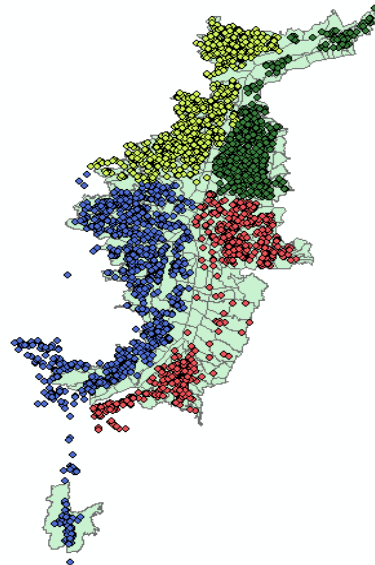


Fig. 9. División de los clientes en 4 macrozonas para la ciudad en el segundo caso.

Luego de realizar las divisiones se obtuvieron 4 macrozonas para la segunda ciudad. Y para garantizar que las jornadas de trabajo fueran homogéneas en las rutas de todas las zonas: se estima la suma de todos los tiempos de entrega de los clientes de cada zona, luego se divide esa suma entre el número de recursos asignados para cada zona; y finalmente se suma el tiempo de desplazamiento desde el CD hasta la zona, a cada una de las sumas de los tiempos en las macrozonas. El número obtenido representa una estimación de lo que debe ser la duración de las jornadas para cada zona. En caso de que las duraciones de las jornadas fueran diferentes entre zonas, se entregan clientes en

la frontera de una zona a otra (*en los casos que aplique*) hasta lograr que las jornadas estimadas para todas las zonas sean similares.

Luego de realizar el procedimiento descrito, se corrió el algoritmo para cada una de las macrozonas creadas en la segunda ciudad.

3.3 Resultados y Análisis

3.3.1 Prueba ciudad pequeña

Al implementar la metodología propuesta en el caso de estudio para la primera ciudad, se observaron los siguientes resultados: la Figura 10 ilustra los territorios de entrega obtenidos al correr el método GRASP con los parámetros ajustados previamente. Tal como se observa en la Figura 11 se obtuvo una mejora en el balance de las jornadas de trabajo. El coeficiente de variación en minutos pasó de 8% para las jornadas actuales a 4% para los territorios propuestos. Así mismo, el rango entre la jornada máxima y la mínima se redujo en un 55,2% pasando de 125 minutos a 56 minutos.

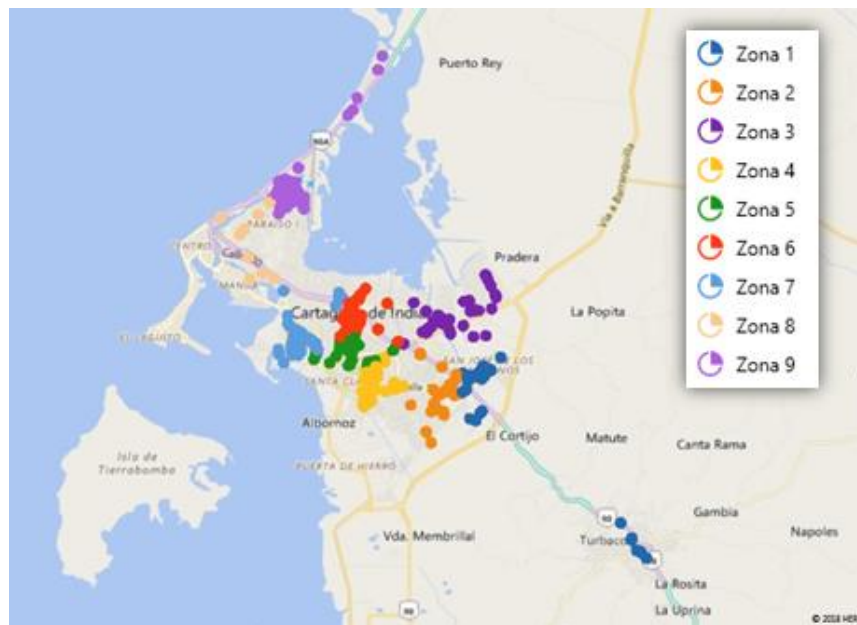
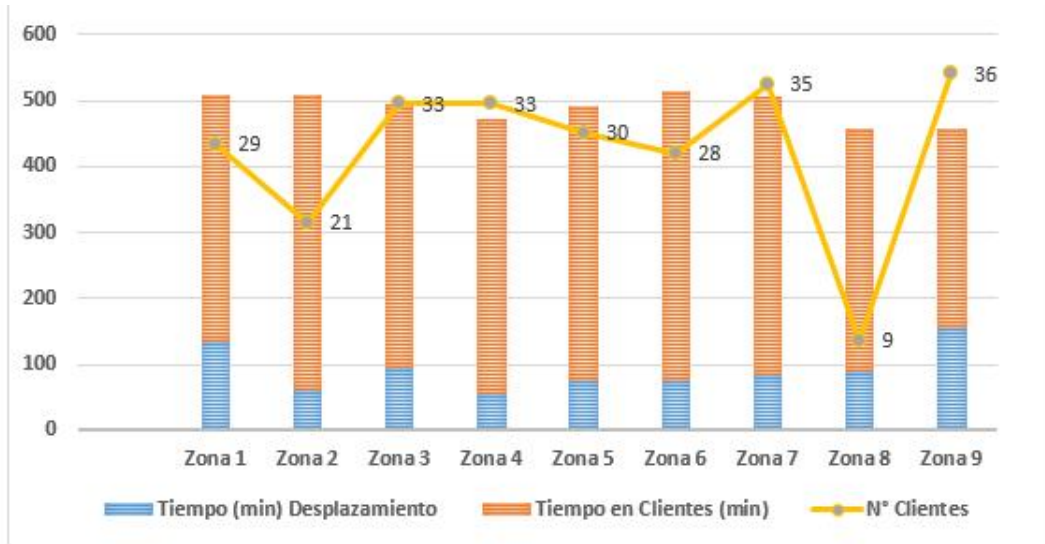


Fig. 10. Territorios de entrega obtenidos para el primer caso de estudio en un mapa de la ciudad.



Promedio	491	Jornada	514	Jornada	458
Jornada (min)		Máxima		Mínima	

Fig 11. Distribución de las jornadas de trabajo (en minutos) para un día promedio en la ciudad del primer caso.

3.3.2 Prueba ciudad grande

Luego de la implementación de la metodología propuesta en el segundo caso de estudio para la ciudad de mayor tamaño, los resultados observados son los siguientes: en la Figura 12 se muestran los territorios de entrega conformados para cada macrozona teniendo en cuenta la estimación de parámetros previa. Posteriormente se observa en las Figuras 13, 14, 15 y 16 el comportamiento y la distribución de las jornadas de trabajo de los territorios de entrega para cada una de las macrozonas creadas para esta ciudad. El coeficiente de variación en minutos pasó de 13% para las jornadas actuales a 3,5% para los territorios propuestos. Así mismo, el rango entre la jornada máxima y la mínima se redujo en un 75% pasando de 244 minutos a 61 minutos.

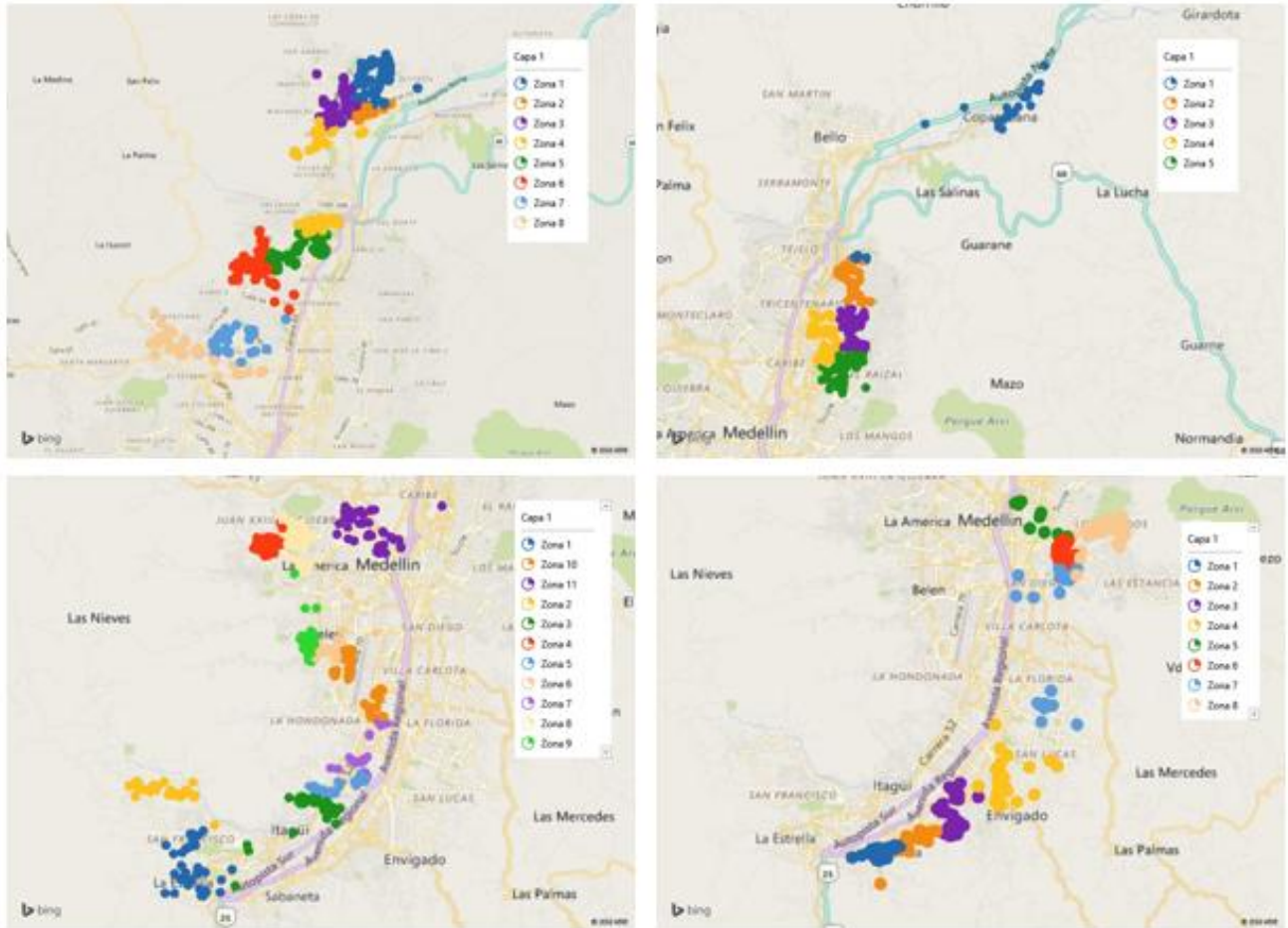
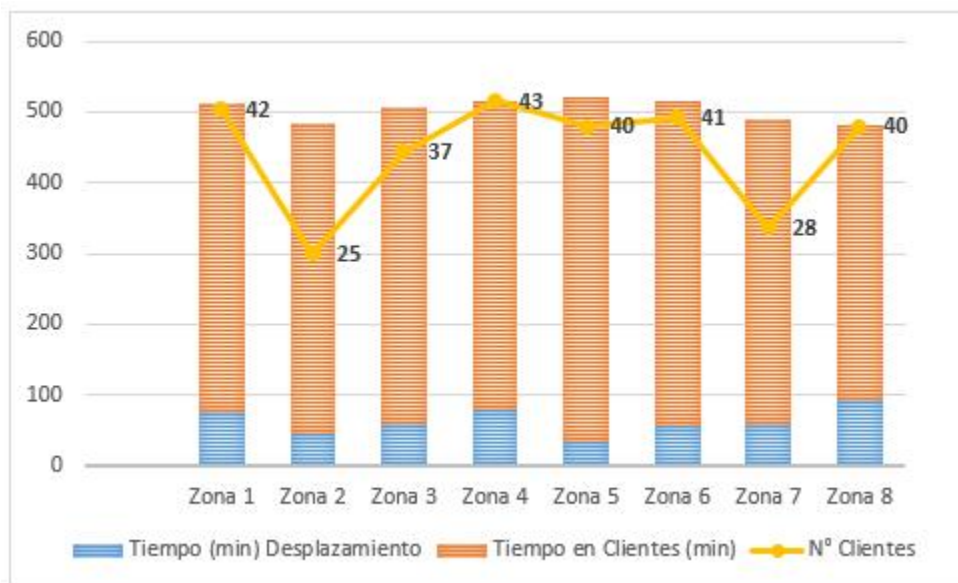
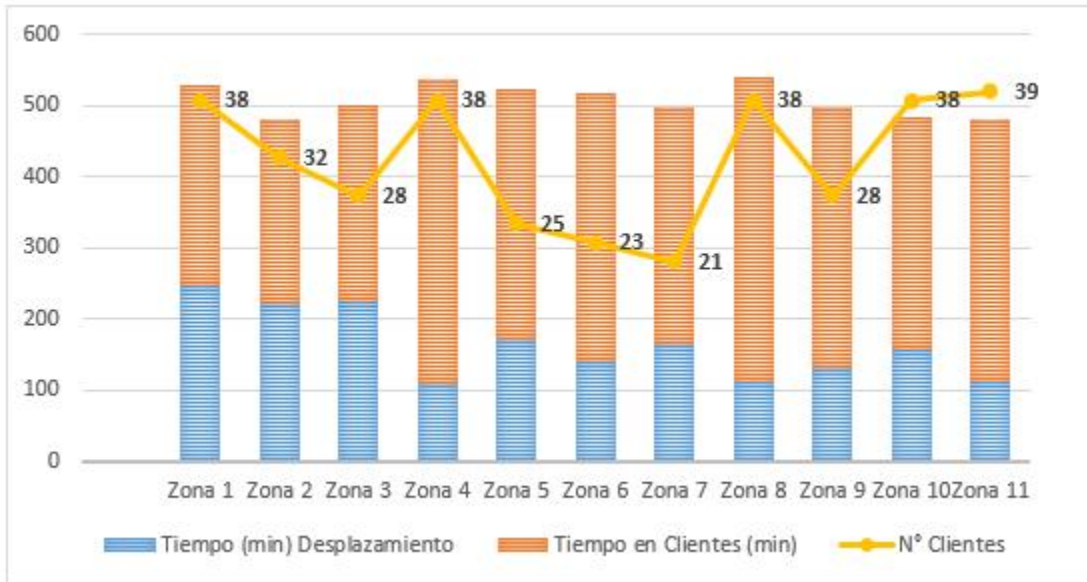


Fig. 12. Territorios de entrega obtenidos para el segundo caso de estudio en un mapa de la ciudad.



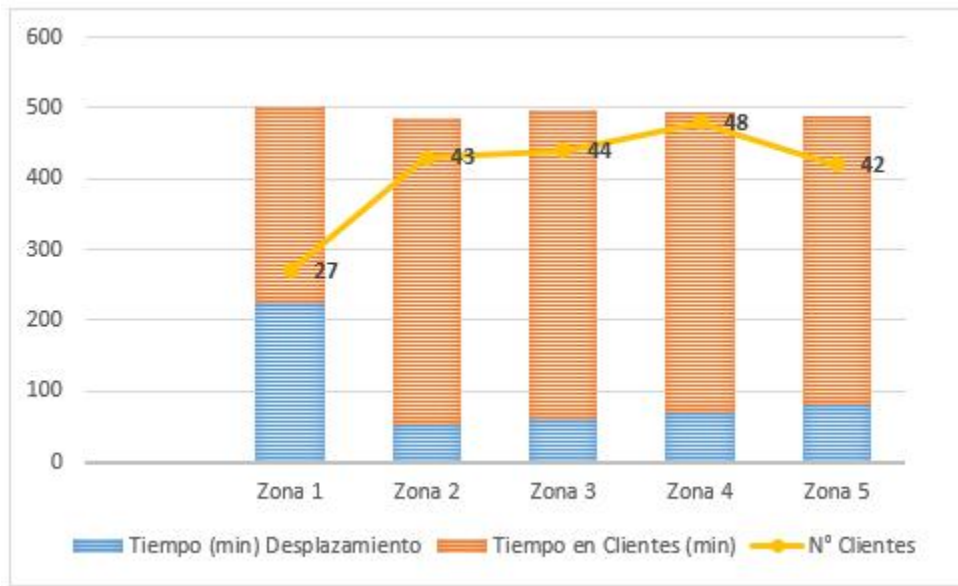
Promedio Jornada (min)	503	Jornada Máxima	520	Jornada Mínima	480
-------------------------------	------------	-----------------------	------------	-----------------------	------------

Fig 13. Distribución de las jornadas de trabajo (en minutos) para un día promedio en la macrozona 1.



Promedio Jornada (min)	508	Jornada Máxima	541	Jornada Mínima	481
-------------------------------	------------	-----------------------	------------	-----------------------	------------

Fig 14. Distribución de las jornadas de trabajo (en minutos) para un día promedio en la macrozona 2.



Promedio Jornada (min)	493	Jornada Máxima	502	Jornada Mínima	485
-------------------------------	------------	-----------------------	------------	-----------------------	------------

Fig 15. Distribución de las jornadas de trabajo (en minutos) para un día promedio en la macrozona 3.

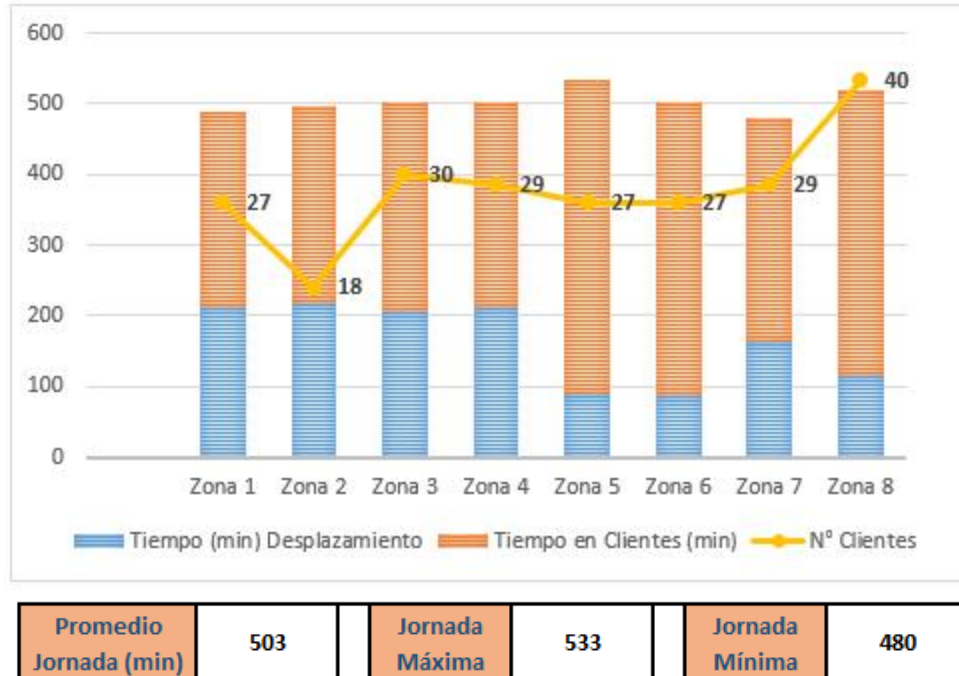


Fig 16. Distribución de las jornadas de trabajo (en minutos) para un día promedio en la macrozona 4.

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo futuro

La metodología de zonificación para la distribución urbana de mercancías propuesta en este trabajo reconoce que contar con buenas estimaciones para los parámetros que inciden en la duración de las jornadas de trabajo ayuda a que al implementar un algoritmo de zonificación los resultados obtenidos estén ajustados al comportamiento real. Por lo tanto, la metodología consta de dos etapas igual de importantes. La primera de ellas se enfoca en la estimación de los tiempos de atención y de desplazamiento. Por su parte, la segunda etapa resuelve un problema de zonificación de clientes utilizando un metaheurístico de tipo GRASP.

En los casos de estudio utilizados para su validación, la metodología permitió obtener jornadas de trabajo mejor balanceadas para los distintos territorios de entrega en comparación con la zonificación previa utilizada por la compañía de referencia. En especial en la operación de mayor tamaño se obtuvo una mejora substancial; logrando equidad en la asignación de las cargas de trabajo y una mejor zonificación de los territorios para los entregadores. Dicha mejora puede evitar que se generen

horas extra por causa de las jornadas que antes eran más extensas y garantiza que los clientes de cada territorio se encuentren en un mismo sector.

Como recomendación para trabajos futuros se busca que gracias a su simplicidad y generalidad, la metodología propuesta pueda ser replicada en otros casos dentro del mismo sector de consumo masivo en los cuales se visitan clientes de distintos tipos concentrados en zonas urbanas. También se sugiere modificar el modelo en algunos aspectos para explorar alternativas de mejora en la solución final, como tratar de integrar múltiples objetivos al algoritmo, donde se tenga en cuenta la mínima desviación entre las jornadas de los territorios y la minimización de la jornada promedio por separado y no de manera integral, como se propone actualmente. Adicional se podría discutir en un futuro la posibilidad de trabajar en una solución que cuente con zonificación y ruteo de forma conjunta. También se plantea la posibilidad de trabajar con la estocasticidad de los tiempos de los tiempos, tanto de entrega como desplazamiento y el impacto del tráfico. Finalmente, aunque la secuenciación de los clientes no fue la prioridad en este caso, se propone en futuras extensiones ampliar el alcance hasta secuenciar los clientes de los territorios sugeridos para encontrar las rutas detalladas de entrega, incluyendo allí las ventanas de tiempo que no fueron consideradas.

Referencias

- [1] Zona Logística, “Análisis del Benchmarking de Grandes Empresas de Consumo Masivo,” *Zona Logística*, 2015. [Online]. Available: <http://www.zonalogistica.com/articulos-especializados/analisis-del-benchmarking-de-grandes-empresas-de-consumo-masivo/>.
- [2] El Heraldo, “Tiendas de barrio, modelo exitoso que compite contra ‘gigantes,’” *Alianza Uninorte con el Heraldo*, 2015. [Online]. Available: <https://www.elheraldo.co/economia/tiendas-de-barri>.
- [3] R. Z. Ríos and H. J. Escalante, “GRASP with Path Relinking for Commercial Districting,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 44, pp. 102–113, 2016.
- [4] B. Fleischmann and J. N. Paraschis, “Solving a large scale districting problem: a case report,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 15, no. 6, pp. 521–533, 1988.
- [5] O. A. S. Cardona, J. D. H. Zea, J. J. S. Chávez, and J. W. Escobar, “Modelos de regresión lineal para estimación de tiempos de viaje en sistemas de transporte masivo,” *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 25, no. 1, pp. 77–89, 2015.
- [6] E. Optimization, O. Computing, P. View, O. Driven, and A. Design, “An improved harmony search algorithm for emergency inspection scheduling An Improved Harmony Search Algorithm for Emergency Inspection Scheduling,” *Eng. Optim.*, vol. 46, no. 11, pp. 1570–1592, 2014.
- [7] J. P. Antún, “Distribución Urbana de Mercancías : Estrategias con Centros Logísticos,” *Inter-American Dev. Bank*, 2013.
- [8] L. B. R. Medina, E. C. G. La Rotta, and J. A. O. Castro, “Una Revisión al Estado del Arte del Problema de Ruteo de Vehículos: Evolución Histórica Y Métodos De Solución,” *Ingeniería*, vol. 16, no. 2, pp. 35–55, 2011.
- [9] M. G. Cedillo-campos, I. Mexicano, A. Bueno-solano, I. Mexicano, and M. G. Cedillo-campos, “Confiabilidad en redes de distribución urbana de mercancías : Un enfoque Markoviano,” in *Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro (CiLOG2014)*, 2014.
- [10] A. A. SINHA, Prabhakant; ZOLTNERS, “Sales-Force Decision Models: Insights from 25 Years of Implementation,” *Interfaces (Providence)*, vol. 31, no. 3_supplement, pp. 7–44, 2001.
- [11] C. W. Bong, W. Y. Chai, and C. W. Wong, “State-of-the-Art Multiobjective Metaheuristic for Redistricting,” in *OCEANS’04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN’04. IEEE*, 2003, pp. 763–769.
- [12] P. Moreno, J. García, and L. D. E. Lacalle, “Estado del Arte en Procesos de Zonificación,” *Rev. Int. Cienc. y Tecnol. la Inf. Geográfica*, pp. 155–181, 2011.
- [13] J. C. Williams, “A zero-one programming model for contiguous land acquisition,” *Geogr. Anal.*, vol. 34, no. 4, pp. 330–349, 2002.

- [14] D. Merchan, E. E. Blanco, and M. Winkenbach, "Transshipment Networks for Last-Mile Delivery in Congested Urban Areas," in *6th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain*, 2016.
- [15] G. Kant, M. Jacks, and C. Aantjes, "Coca-Cola Enterprises optimizes vehicle routes for efficient product delivery," *Interfaces (Providence)*, vol. 38, no. 1, pp. 40–50, 2008.
- [16] E. Fernandez and R. Z. Rios Mercado, "A Reactive GRASP for a Commercial Territory Design Problem with Multiple Balancing Requirements," *Comput. Oper. Res.*, vol. 36, pp. 755–776, 2009.
- [17] D. Merchan and E. E. Blanco, "Urban Metrics for Urban Logistics : Building an Atlas for Urban Freight Policy Makers," in *14th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, Cambridge*, 2015.
- [18] R. H. Ballou and R. H.- Ballou, "Selected country circuitry factors for road travel distance estimation distance estimation," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 36, no. November, pp. 843–848, 2002.
- [19] J. Meredith, "Building Operations Management Theory Through Case and Field Research," *J. Oper. Manag.*, vol. 16, no. 4, pp. 441–454, 1998.
- [20] B. McCune, "Nonparametric Multiplicative Regression for Habitat Modeling," *Oregon State Univ. Oregon*. <<http://www.pcord.com/NPMRintro.pdf>>, pp. 1–52, 2011.
- [21] A. Franceschetti, O. Jabali, and G. Laporte, "Continuous approximation models in freight distribution management," *Soc. Estadística e Investig. Oper.*, vol. 25, pp. 413–433, 2017.
- [22] S. Ansari, M. Başdere, X. Li, Y. Ouyang, and K. Smilowitz, "Advancements in continuous approximation models for logistics and transportation systems: 1996-2016," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 107, pp. 229–252, 2017.
- [23] M. G. C. Resende and C. C. Ribeiro, *Optimization by GRASP: Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2016.
- [24] J. G. Villegas R., "Heurísticos GRASP híbridos para el problema de rutas de vehículos con restricciones de capacidad," UNIVERSIDAD EAFIT, 2008.
- [25] C. S. Albright, "VBA for modelers: developing decision support systems with Microsoft Excel," *Eng. Econ.*, vol. 46, no. (2), p. 162, 2001.
- [26] D. Fylstra, L. Lasdon, J. Watson, and A. Waren, "Design and use of the Microsoft Excel Solver," *Interfaces (Providence)*, vol. 28, no. (5), pp. 29–55, 1998.