

ASIGNACIÓN DE TURNOS EN UNA EMPRESA DE REPARTO A DOMICILIO BASADA EN LA PRODUCTIVIDAD DE LOS CONDUCTORES

Sebastián Genta y Juan Carlos Muñoz
Departamento de Ingeniería de Transporte
Pontificia Universidad Católica de Chile
Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile
Casilla 306, Correo 22
F: (56-2) 354-4270, Fax: (56-2) 553-0281
e-mails: sgenta@puc.cl, jcm@ing.puc.cl

RESUMEN

Considere una empresa que presta un servicio de reparto a domicilio de diversos bienes dentro de una ventana de tiempo. Este artículo propone un método para estimar la productividad de cada conductor de la empresa en cualquier ruta de despacho usando regresiones lineales. La metodología separa el tiempo de viaje de cada repartidor en términos del tiempo que tarda: atendiendo a cada cliente, manejando, y en otras actividades adicionales. Los resultados obtenidos al aplicar la metodología muestran que la productividad, medida en términos del número de clientes servidos por hora, varía dependiendo del conductor, e incluso, para un mismo repartidor, su productividad es distinta dependiendo de la hora del día. Adicionalmente, la misma metodología sirve de base para calibrar curvas que permiten determinar largo y cantidad de clientes promedio por ruta en función de la demanda esperada. Los resultados que se obtienen de aplicar esta metodología pueden ayudar a reducir el error y el sesgo que se producen si los turnos de trabajo semanales de los conductores, se asignan sin considerar las diferencias de productividades que estos presentan.

1. INTRODUCCIÓN

Considérese una empresa que efectúa despachos a domicilio de pequeños pedidos, los cuales tiene un plazo máximo de entrega en cada hogar (por ejemplo, una hora). La entrega de un pedido fuera de plazo significa un costo para la empresa puesto que la firma compensa los atrasos con descuentos en el precio de futuros pedidos, aunque también arriesga perder futuras compras de los clientes afectados. Cada potencial consumidor tiene una baja probabilidad de efectuar un pedido en una hora determinada, y se supondrá que tal probabilidad es la misma para cada cliente. Los pedidos son agrupados en rutas que parten y llegan desde y hasta una o varias bodegas centrales, y son llevados a los consumidores por un conjunto de conductores. El nivel de consolidación de los pedidos en rutas está limitado por el plazo final de entrega de cada despacho. De esta forma, la frecuencia con la que salen los repartidores desde la bodega, y el grado de consolidación de los pedidos en rutas, se ve directamente afectado por la demanda y a veces por la capacidad de los vehículos.

Los conductores de esta empresa poseen jornadas de trabajo semanal flexibles. Es decir, la cantidad de horas que estos trabajan en la semana, así como su distribución en los distintos días, no son fijas, sino que pueden variar de semana a semana, aunque existen una serie restricciones legales que se deben satisfacer siempre. Estas reglas pueden variar de empresa a empresa, pero por lo general tienen que ver con número mínimo y máximo de horas a asignar en un día, semana o mes, pago de horas extraordinarias, turnos de noche, etc.

Para determinar los turnos de trabajo de una semana cualquiera, los repartidores indican a la empresa, con una semana de anticipación, los días y horas en que ellos se encuentran disponibles para trabajar; por otro lado, la firma estima la cantidad de conductores que serán necesarios para satisfacer la demanda en cada hora de la semana, en base a información histórica. Así, la empresa busca asignar un horario de trabajo para cada repartidor, de modo de cubrir la demanda a mínimo costo salarial total, respetando las restricciones legales pertinentes.

Este problema puede ser planteado como una variante de un set covering problem, donde el conjunto de turnos debe cubrir el número de conductores que se necesitan en cada hora. Sin embargo, los conductores no son idénticos entre sí. No sólo tienen salarios y tipos de contratos distintos, sino que también sus rendimientos (medidos en términos de la duración promedio de las rutas recorridas por cada conductor) son distintos. Los conductores usan distintos tipos de vehículos (principalmente autos y motos), conducen a diferentes velocidades, tienen distinto nivel de conocimiento de la red de calles y en promedio se demoran distintas cantidades de tiempo en atender a cada cliente. Además, el rendimiento de un mismo repartidor varía a lo largo del día, puesto que el nivel de consolidación cambia (mientras mas grande es el nivel de consolidación, mayor es la duración de las rutas). Si estos elementos no son considerados en la asignación de turnos, el número de conductores seleccionados en cada hora puede ser tal que no se satisfaga adecuadamente la demanda, es decir, que no sea posible entregar todos los pedidos dentro de la ventana de tiempo preestablecida.

En la literatura los problemas que más se asemejan al que se plantea en este artículo provienen de la industria de las aerolíneas, aunque hay una diferencia fundamental: en las líneas aéreas, el funcionamiento de la empresa no se ve afectado por la asignación de turnos de las tripulaciones, puesto que todos los viajes tienen un itinerario pre-establecido. Este supuesto es también válido

en el transporte caminero y ferroviario, pero no en la industria del reparto a domicilio, donde el número promedio de clientes a visitar por un conductor y la ubicación de estos, varía a lo largo del día, lo cual hace que no tenga sentido tener rutas o itinerarios prefijados.

Buenos ejemplos de como funciona la programación de turnos de las tripulaciones en la industria aérea se pueden encontrar en Vance et al (1997), Barnhart y Sheno (1998), Gamache et al (1998; 1999) y Klabjan et al (2001;2002). Brusco et al (1995) analiza el problema para el personal de tierra de los aeropuertos, mientras que Caprara et al (1998) investiga lo que ocurre con la programación de turnos en la industria ferroviaria. Lourenço et al (2002), entre otros autores, trata con el problema de asignación de turnos en una empresa de buses. En ninguno de estos artículos se considera el desempeño de la tripulación al momento de programar los turnos; principalmente, la asignación se hace en base a la antigüedad de cada conductor. Muñoz (2002) propone una metodología para asignar conductores a viajes en una empresa de buses, considerando una tasa de ausentismo común para todos los conductores.

Este artículo presenta una metodología para estimar la eficiencia de cada conductor basada en su desempeño histórico. Mediante esta estimación, se puede predecir el desempeño de cada conductor en una misma ruta, lo que permite comparar a los conductores sobre una misma base. Con esto, se puede determinar el número de rutas que puede cubrir cualquier conjunto de repartidores en cualquier hora.

La sección 2 de este artículo presenta la metodología. En la sección 3, se presentan los resultados de aplicar tal metodología a un conjunto de conductores provenientes de una empresa de repartido a domicilio. En la sección 4, se muestra la forma en que la misma metodología sirve de base para calibrar curvas para el largo y cantidad de clientes promedio por ruta. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones de este trabajo.

2. METODOLOGÍA PARA ESTIMAR EFICIENCIA DE LOS REPARTIDORES

En esta sección se presenta una metodología que permite estimar el desempeño real de los conductores utilizando la información histórica que se dispone de ellos, para luego poder utilizar ese desempeño como parámetro para asignar los horarios semanales de la empresa. En primer lugar, se ven aspectos preliminares que permiten entender que es lo que se está tratando de medir, y por qué aplicar una nueva metodología para tales efectos. Luego, se presenta la metodología propiamente tal.

2.1. Preliminares

Es claro que la disponibilidad de trabajo de los repartidores es clave para poder construir la asignación de horarios para la semana. También es importante considerar el tipo de contrato al que están adscritos. Pero como se verá más adelante, también el desempeño individual puede variar de repartidor en repartidor, y esta heterogeneidad no es adecuadamente considerada en el proceso de asignación. El desempeño de un conductor depende de su tasa de ausentismo y de su eficiencia, medida en términos del tiempo que él necesita para completar las tareas que le han sido asignadas. Por lo general, el ausentismo se utiliza para despedir conductores (es decir, si un conductor frecuentemente no asiste en horas en que ha sido asignado, entonces se le despide).

Eventualmente, quienes se encargan de confeccionar los turnos pueden tener una noción de qué conductores son los más eficientes del grupo, de modo de asignarles a esos conductores más horas en la semana que a los demás. En esta sección se propone una metodología que permita incorporar la eficiencia en el proceso de asignación.

2.2. Descripción de la Metodología

Dado un conjunto de clientes a ser servidos en un orden pre-especificado por un conductor, el tiempo que demora éste en recorrer la ruta puede ser descompuesta en las 3 siguientes categorías:

- i) Tiempo de atención a los clientes: Es decir, el tiempo total que el repartidor ocupa en entregar el pedido, incluyendo lo que se demora en estacionar y en que el cliente abra la puerta. Este tiempo varía si el domicilio corresponde a una casa o un departamento (típicamente, es mayor en el segundo caso que en el primero), pero se asume que todos los pedidos tienen igual probabilidad de provenir de cada tipo de vivienda. El total de tiempo de atención a los clientes crece en forma proporcional con el número de domicilios visitados en la ruta.
- ii) Tiempo en viaje: Es el tiempo hipotético requerido por el conductor para manejar su vehículo a lo largo de la ruta asignada, si es que no tuviera que detenerse en cada cliente (es decir, si sólo tuviese que pasar frente a cada dirección). Este tiempo crece proporcionalmente con la longitud de la ruta.
- iii) Tiempo fijo por ruta: En esta categoría se incluye el tiempo que transcurre desde que el repartidor recibe los pedidos que debe entregar y la información de los clientes a visitar, hasta que comienza su viaje en el vehículo. También se incluye en esta categoría el tiempo que pasa desde que el repartidor vuelve a la bodega, hasta que los datos de las transacciones efectuadas en la ruta son ingresados al sistema computacional de la empresa. Esta categoría comprende también el tiempo requerido para cualquier otra actividad desarrollada en la ruta que no pueda ser clasificada ni como tiempo de atención al cliente o tiempo en viaje. (ej: cargar gasolina).

Si se supone que el tiempo de atención a cada cliente, la velocidad promedio del viaje (en la calle) y el tiempo fijo por ruta, están regidos por distribuciones normales independientes de la hora o del día en que el viaje se lleva a cabo, entonces se puede proponer una regresión lineal que relacione, para cada repartidor, el tiempo total de una ruta, con el número de clientes y la distancia recorrida por el conductor en esa ruta. Tal relación es la siguiente:

$$r_i^k = \alpha_i + \beta_i n_i^k + \gamma_i l_i^k + \epsilon_i^k \quad (1)$$

Donde:

r_i^k : duración de la k-ésima ruta recorrida por el repartidor i [horas/ruta].

n_i^k : número de clientes visitados en la k-ésima ruta recorrida por el repartidor i [clientes/ruta].

l_i^k : longitud mínima de la k-ésima ruta recorrida por el repartidor i . [kilómetros/ruta].

α_i : tiempo fijo promedio empleado por el repartidor i en una ruta [horas].

β_i : tiempo promedio de detención del repartidor i en cada cliente de una ruta [horas/cliente].

γ_i : tiempo promedio de viaje en la calle para repartidor i [horas/kilómetros], i.e. inverso de la velocidad promedio.

ϵ_i^k : Componente de error. Corresponde a la fracción de tiempo que dura la k-esima ruta del repartidor i , que no puede ser explicada por los 3 primeros términos de la anterior ecuación.

[horas]. Se asume que este error distribuye normal con media 0 y desviación estándar propia para cada repartidor.

Los valores de α_i , β_i y γ_i para un conductor determinado se pueden estimar sólo si el repartidor en el pasado ha hecho suficientes rutas. Cada una de estas rutas posee un trío de valores (r_i^k , n_i^k y l_i^k) que puede obtenerse de los registros históricos de la empresa. Nótese que el valor de l_i^k corresponde a la longitud mínima posible para recorrer la k -ésima ruta del repartidor i , por lo que este valor puede diferir significativamente de la longitud real de la misma. Si se conociera con exactitud el largo del recorrido escogido por el conductor i cuando recorrió la ruta k , entonces se podría identificar que grado de conocimiento de la red tiene ese repartidor, comparando este largo con el largo de la ruta mínima (mientras más parecidos ambos valores, mayor sería el conocimiento de la red que demostraría el repartidor). Sin embargo, las empresas típicamente cuentan con el registro de los clientes servidos por el repartidor en la ruta, pero no de la ruta exacta seguida por éste. Así, para futuros despachos, la ruta a seguir por un repartidor (salvo quizá casos muy contados) es imposible de predecir. Sin embargo, debiera haber una correlación muy significativa entre el largo de las rutas recorridas por un conductor, y el largo mínimo de esas rutas a ojos del modelador. Por este motivo, no se incorpora un error significativo al modelar el tiempo empleado por el conductor sobre el vehículo como proporcional al largo de la ruta más corta. Incluso, si la ruta mínima entre puntos sucesivos fuese difícil de obtener, esta longitud puede estimarse usando la distancia euclidiana entre dichos puntos, ya que la correlación entre esta longitud y la distancia recorrida por el conductor debiera ser significativamente alta. En este caso, el parámetro debe ser reinterpretado como la tardanza promedio del conductor en recorrer un kilómetro euclidiano cualquiera de la red. Un conductor con un γ_i alto se interpretaría como un conductor lento o que no conoce adecuadamente la red.

Una vez que se han estimado los parámetros α_i , β_i y γ_i para cada repartidor, se puede estimar el tiempo total de viaje que tardará este conductor en recorrer cualquier ruta ficticia, dada la longitud y el número de clientes a visitar en tal ruta. Esta estimación permite comparar el desempeño de distintos repartidores en una misma ruta. En particular, resulta interesante estimar el tiempo de viaje para la ruta representativa de la hora t del día d , es decir, una ruta cuya longitud y número de clientes a servir, se estiman en función del número esperado de pedidos que recibe la empresa en esa hora. Si a este tiempo se le denomina R_i^{td} , entonces:

$$R_i^{td} = \alpha_i + \beta_i n(P_{td}) + \gamma_i l(P_{td}) \quad (2)$$

Donde:

$n(P_{td})$: Numero estimado de clientes a visitar en una ruta representativa de la hora t del día d , en la función del número esperado de pedidos a entregar en dicho instante. [clientes/ruta].

$l(P_{td})$ Largo estimado de una ruta representativa de la hora t del día d , en la función del número esperado de pedidos a entregar en dicho instante [kilómetros/ruta].

Puesto que las características de una ruta típica son independientes de los repartidores (dados t y d), el desempeño de cada conductor sobre estas rutas hipotéticas depende exclusivamente de los parámetros α_i , β_i y γ_i . Por lo tanto, esta metodología le permite a la empresa comparar

objetivamente la eficiencia de los repartidores, y de esta forma, calcular de manera efectiva la real capacidad de servicio ofrecida en una hora cualquiera, dado el conjunto de repartidores seleccionados para esa hora. Por otra parte, puesto que R_i^{td} varía no solamente con α_i, β_i y γ_i (que dependen del conductor i), sino que también con $n(P_{td})$ y $l(P_{td})$, un mismo repartidor debiera tener distinto desempeño de acuerdo a la hora del día en la que le corresponda trabajar (puesto que $n(P_{td})$ y $l(P_{td})$ también son variables). Esto debiese permitir seleccionar a los conductores en aquellas horas en que su rapidez sea máxima.

Considerando todos los anteriores elementos, se tiene que para satisfacer adecuadamente la demanda en un instante (t, d) determinado, entonces el conjunto de conductores seleccionados para trabajar en dicho período, A_{td} deberá cumplir la siguiente desigualdad:

$$\sum_{i \in A_{td}} \frac{n(P_{td})}{R_i^{td}} \geq P_{td} \quad (3)$$

Si se define N_{td} como:

$$N_{td} = \frac{P_{td}}{n(P_{td})} \quad (4)$$

entonces la ecuación (3) puede escribirse de la siguiente forma:

$$\sum_{i \in A_{td}} \frac{1}{R_i^{td}} \geq N_{td} \quad (5)$$

El lado derecho de la anterior desigualdad corresponde al número esperado de rutas que es necesario para entregar P_{td} pedidos, suponiendo que el nivel de consolidación promedio en cada ruta es de $n(P_{td})$ pedidos por ruta. Por otro lado, dado que R_i^{td} es una estimación del tiempo que tarda el repartidor i en recorrer una ruta típica para la hora t del día d , entonces el inverso de tal cantidad, representa el número estimado de rutas que el repartidor i puede recorrer en ese instante. Si tal cantidad se suma para todos los repartidores asignados en el instante (t, d) , se tiene que el lado izquierdo de la ecuación (5) corresponde al número total de rutas que pueden recorrer los repartidores asignados en (t, d) , y esta cantidad debe ser a lo menos igual al número esperado de rutas que se necesitan, N_{td} .

3- DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CONSOLIDACIÓN EN FUNCIÓN DE LA DEMANDA ESPERADA

A continuación, se presenta una metodología que permite predecir el índice de consolidación promedio y el largo de ruta promedio como función de la demanda total esperada por hora. Es decir, se desea encontrar funciones $n(P_{td})$ y $l(P_{td})$, donde P_{td} es la demanda esperada para la hora t del día d . Para calibrar las funciones $n(P_{td})$ y $l(P_{td})$, considerar la ecuación (2). Debe recordarse que se busca una fórmula que entregue índice de consolidación y distancia promedio por día y hora, por lo que se debe independizar el cálculo de algún repartidor en particular. Esto implica considerar comportamiento promedio para todos los repartidores, es decir: $\alpha_i = \alpha$, $\beta_i = \beta$, $\gamma_i = \gamma$, $\forall i$.

En general, las empresas consolidan sus pedidos en rutas de modo de agrupar pedidos cercanos entre sí dentro de la misma ruta. Así, el largo de una ruta se puede modelar como la suma de dos partes (Daganzo, 1999): la longitud del viaje ida y vuelta desde la bodega hasta el centro de gravedad de la zona en la que se encuentran agrupados los clientes, más la suma de los recorridos locales. Este último término es equivalente a la multiplicación del número de pedidos a entregar con la distancia promedio entre clientes sucesivos en la ruta. Esta distancia es inversamente proporcional a la densidad de pedidos en el área (que se supone igual para toda la zona de cobertura de la empresa). Es decir:

$$l = 2r + k \left[\frac{(\bar{n} - 1)}{\sqrt{\frac{N}{A}}} \right] \quad (6)$$

En que:

\bar{n} : Índice de consolidación promedio en una hora determinada (pedidos/ruta). Se supondrá igual para todos los repartidores que trabajan en ese instante en la empresa.

r : Distancia promedio desde la bodega hasta el centro de gravedad de una zona cualquiera. (km)

N : Número de pedidos que deben ser entregados en esa hora.

A : Área de cobertura de la empresa. (km²)

k : Constante de proporcionalidad.

De esta forma, y luego de incorporar la variable auxiliar $\alpha' = \alpha + 2r\gamma$, la ecuación (2) se transforma en:

$$R = \alpha + \beta\bar{n} + 2r\gamma + \gamma k \frac{(\bar{n} - 1)}{\sqrt{\frac{N}{A}}} = \alpha' + \beta\bar{n} + \gamma k \frac{(\bar{n} - 1)}{\sqrt{\frac{N}{A}}} \quad (7)$$

Despejando \bar{n} en función de R y N , se obtiene:

$$\bar{n} = \frac{R - \alpha' + \frac{\gamma k}{\sqrt{\frac{N}{A}}}}{\beta + \frac{\gamma k}{\sqrt{\frac{N}{A}}}} = \frac{\frac{R - \alpha'}{\gamma k} \sqrt{\frac{N}{A}} - \frac{\alpha'}{\gamma k} \sqrt{\frac{N}{A}} + 1}{\frac{\beta}{\gamma k} \sqrt{\frac{N}{A}} + 1} \quad (8)$$

Si se llaman c_1, c_2 y c_3 a $\frac{1}{\gamma k \sqrt{A}}, \frac{\alpha'}{\gamma k \sqrt{A}}$ y $\frac{\beta}{\gamma k \sqrt{A}}$, respectivamente, entonces:

$$\bar{n} = \frac{c_1 R \sqrt{N} - c_2 \sqrt{N} + 1}{c_3 \sqrt{N} + 1} \quad (9)$$

Como se puede apreciar, \bar{n} depende de 2 variables: el tiempo promedio por ruta (R), y el número de pedidos a entregar (N). Para continuar, es necesario encontrar una expresión para R en función de k . Luego de observar los datos empíricos, se calibró la siguiente función:

$$R = R_0 \left(\frac{1 + AN}{1 + BN} \right) \quad (10)$$

Esta función tiene 3 propiedades interesantes: es creciente en N , arroja un valor calibrable para $N=0$, y tiende a una asíntota $R_0 \frac{A}{B}$ cuando N es muy elevado.

4- RESULTADOS

4.1- Regresiones

En esta sección se presentan los resultados que se obtuvieron al calcular regresiones lineales para un conjunto de 76 conductores de una empresa de reparto a domicilio. Dichos repartidores, en un lapso de aproximadamente cuatro meses, cubrieron 11279 rutas en las que visitaron un total de 39234 clientes en total. De estas observaciones, se eliminó aproximadamente el 2% por inconsistencia en los datos.

Existe una gran heterogeneidad en los tiempos que toman las distintas rutas cubiertas por los repartidores. En la figura 1 se muestra un histograma en que dichos tiempos están agrupados por intervalos de 2 minutos. Como se puede apreciar, las rutas más largas casi doblan en duración a las más cortas. En la figura 2, en tanto, se muestra la relación entre número de clientes visitados en una ruta (eje horizontal) versus longitud de la misma (eje vertical). Se puede apreciar que existe una correlación clara entre número de clientes por ruta, y longitud promedio de las rutas que sirven una misma cantidad de clientes. Sin embargo, este hecho no invalida la metodología, puesto que longitud y número de clientes son conceptos distintos que explican cada uno por separado aspectos particulares de la duración en tiempo de una ruta

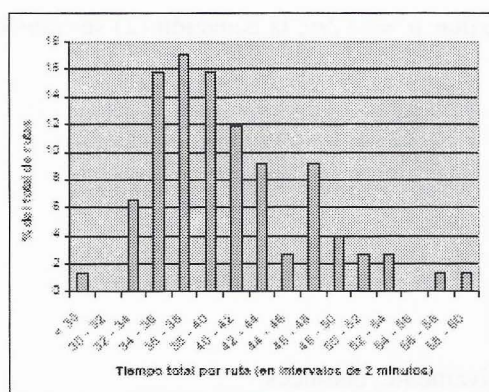


Figura 1: Histograma de la duración las rutas cubiertas por todos los repartidores

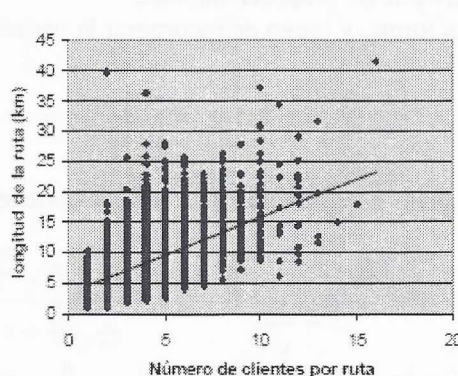


Figura 2: longitud en función de número de clientes en todas las rutas

El nivel de consolidación en una ruta depende fuertemente de la demanda, la cual varía a lo largo de la semana y durante cada día. La figura 3 muestra un histograma con el número de clientes visitados por ruta para aproximadamente 1500 horas de análisis. Por otro lado, la figura 4, muestra un histograma con el número de clientes promedio por ruta, separado para cada una de las 107 horas que opera la empresa en la semana. Se puede observar, por ejemplo, que muchas horas (75%) presentan un nivel de consolidación promedio de entre 2.5 a 4 clientes por ruta, mientras que el 10% presenta menos de 2 o más de 5 clientes por ruta.

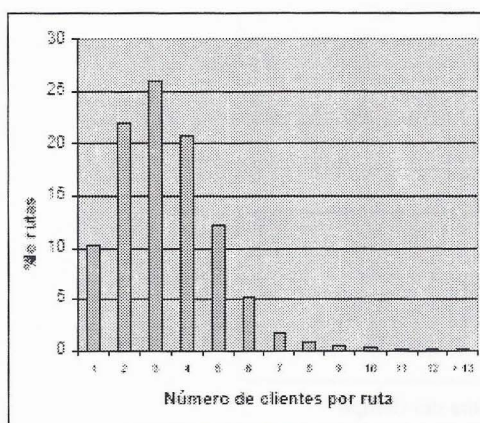


Figura 3: Histograma del número promedio de clientes por ruta para todas las rutas consideradas

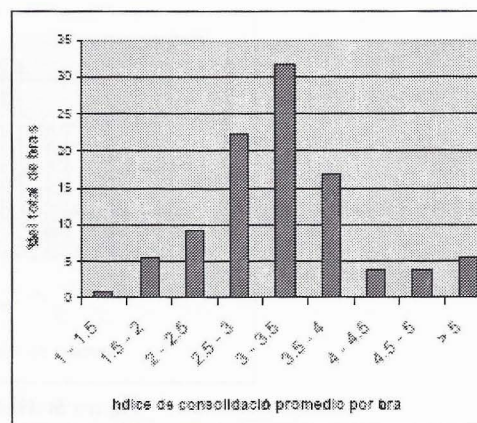


Figura 4: Histograma de consolidación promedio por hora en cada hora de la semana

Para estimar la eficiencia de los conductores, para cada uno de ellos se estimó una regresión lineal como la mostrada en la ecuación (1). En general, los resultados obtenidos fueron altamente satisfactorios, debido a que los valores que se obtuvieron para los coeficientes α_i , β_i y γ_i fueron razonables tanto en signo como en magnitud, y los test estadísticos asociados a los distintos parámetros mostraron que dichos coeficientes son significativamente distintos de cero. Esto se cumplió incluso para repartidores con menos de 30 observaciones por parámetro (Ortúzar, 2000). Adicionalmente, para la mayoría de los repartidores, la distribución de los errores ε_i resultó ser normal con un 95% de confianza, de acuerdo a un test de bondad de ajuste χ^2 . Las figuras 5.a a 5.c muestran histogramas que resumen de qué manera varían los parámetros obtenidos para los distintos repartidores. Como se puede ver, la distribución de los 3 parámetros entre los distintos repartidores presenta bastante dispersión

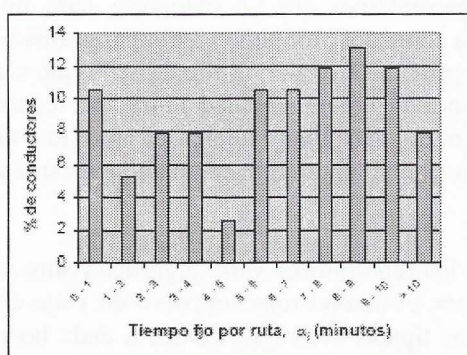


Figura 5a: Histograma del tiempo fijo por ruta α_i , para todos los repartidores

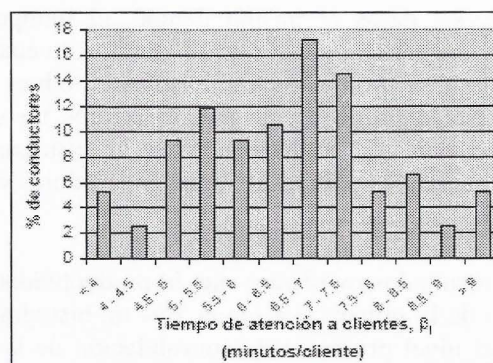


Figura 5b: Histograma del tiempo de atención a los clientes, β_i , para todos los repartidores

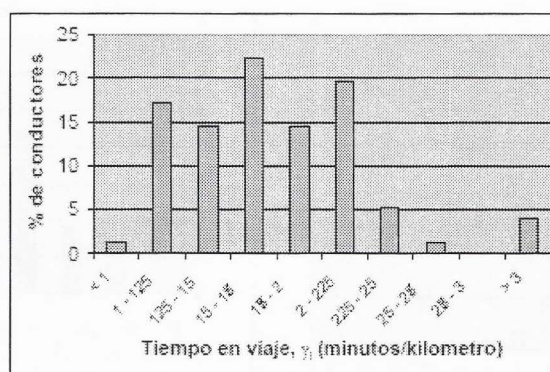


Figura 5c: Histograma del tiempo en viaje, γ_i , para todos los repartidores

Para evaluar de qué manera influyen los parámetros α_i , β_i y γ_i , en los valores que adopta el tiempo representativo para cada repartidor (ecuación (2)), se muestran los resultados de calcular R_i^{td} para:

- i) La ruta promedio de la empresa, incluyendo todas las horas de la semana.
- ii) La ruta promedio de la hora de mayor demanda de la empresa (sábado, de 21:00 a 22:00 horas)

En la figura 6.a se muestra como se distribuyen los tiempos representativos por repartidor para el caso i) y en la figura 6.b se aprecia lo mismo pero para el caso ii). En ambos histogramas, se puede ver que la metodología predice que el valor del tiempo representativo es casi el doble en los repartidores con mayor R_i^{td} , en comparación con los que tienen menor R_i^{td} . La desviación estándar en ambos casos es significativa (15% y 13% del tiempo representativo promedio, respectivamente). Si se calcula una regresión lineal única para todos los repartidores, utilizando todos los datos al mismo tiempo, el tiempo representativo que se obtendría para una ruta promedio sería alrededor de 40 minutos, lo cual está cerca del promedio en el histograma 6.a. Sin embargo, el promedio en el histograma 6.b es de aproximadamente 45 minutos, lo que significa que este enfoque puede generar errores no sólo por la heterogeneidad entre los repartidores (como muestra la dispersión en el histograma 6.a), sino que también a que los tiempos representativos para los distintos repartidores varían dependiendo al instante de la semana para el cual se calculen

Los resultados confirman que la productividad de los repartidores varía significativamente a lo largo de la semana. La figura 7 es un histograma con el tiempo representativo de viaje dividido por el nivel promedio de consolidación de las rutas típicas correspondientes a cada hora de la semana, para el repartidor con mayor número de observaciones. Esta es la mejor estimación de la productividad de un conductor y puede ser utilizada para el proceso de asignación semanal de horarios. Si en este proceso se supone que la productividad de los repartidores es constante a lo largo de la semana, entonces se pueden generar errores significativos en la asignación final

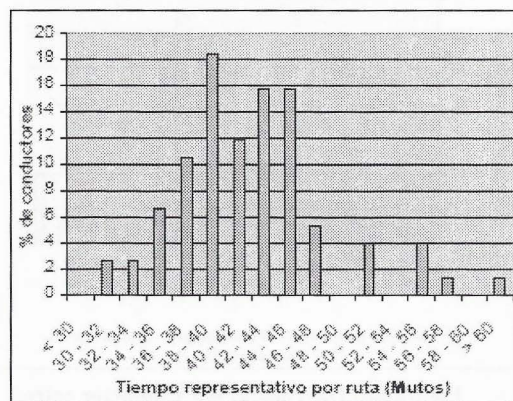


Figura 6a: Tiempo representativo de viaje de conductores para ruta promedio de la semana

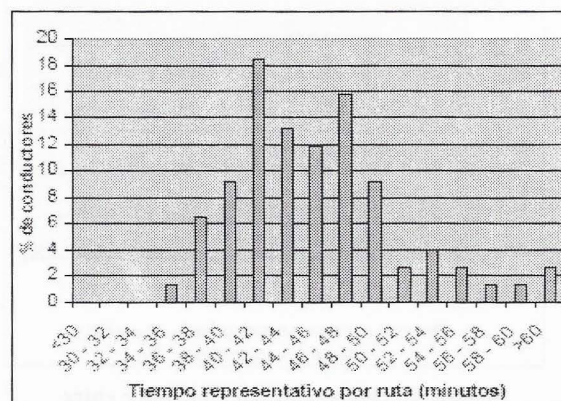


Figura 6b: Tiempo representativo de viaje de conductores para ruta promedio en hora punta

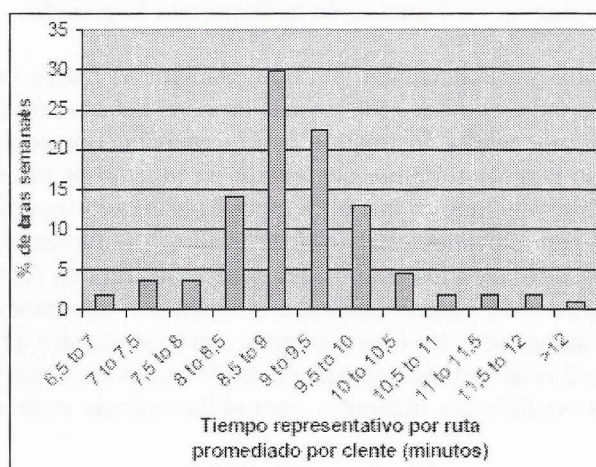


Figura 7: Histograma del promedio de tiempo representativo de viaje por cliente visitado, para un mismo repartidor a lo largo de la semana

Finalmente, se compara el tiempo representativo de cada conductor para la ruta promedio de la empresa, con la duración promedio de todas las rutas recorridas en el pasado por el mismo conductor. La figura 8a muestra como se distribuyen los conductores de acuerdo a la magnitud de la diferencia relativa entre tiempo representativo y tiempo promedio pasado. Se puede apreciar que para algunos repartidores, la diferencia entre el tiempo representativo que se obtiene al usar la regresión, con el tiempo promedio de las rutas anteriormente cubiertas por el repartidor, es mayor a 10 minutos (en valor absoluto), lo cual en términos porcentuales equivale a un 30%. La figura 8b muestra la misma diferencia pero calculada para una hora punta.

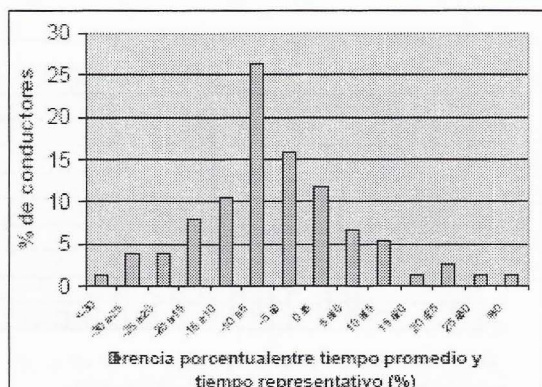


Figura 8a: Diferencias por conductor entre tiempos de viaje promedio y representativo para ruta promedio de la empresa

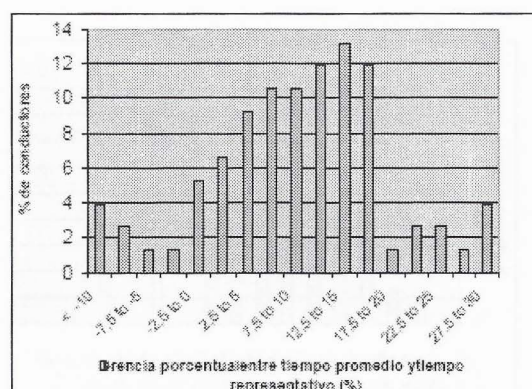


Figura 8b: Diferencias por conductor entre tiempos de viaje promedio y representativo para ruta en horario punta de empresa

4.2- Índice de Consolidación en Función de la Demanda Esperada

Para calibrar la curva dada por la ecuación (9), que relaciona el índice de consolidación con la demanda esperada por período, es necesario estimar primero la ecuación (10), que explica como varía el tiempo promedio por vuelta en función de la demanda. Los coeficientes de esta última ecuación, R_0 , A y B se estiman por mínimos cuadrados, en función de información histórica. Para ello, se eliminaron las observaciones en que el tiempo R observado superaba los 80 minutos, por considerarse que tiempos tan elevados estaban relacionados a fenómenos que no son relevantes en este estudio. Una vez calculados los valores del tiempo por ruta en función de la demanda, se estima la curva de consolidación versus demanda, también por mínimos cuadrados. Para lograr un mejor ajuste, se eliminaron todas las observaciones correspondientes a horas en que en total se hayan efectuado sólo 1 o 2 rutas, y tampoco fueron consideradas las observaciones ya eliminadas en la etapa anterior. Los coeficientes obtenidos para ambas curvas se resumen en las siguientes tablas:

Tabla 1a: Parámetros estimados para tiempo promedio de viaje vs demanda esperada

Parámetro	Valor
R_0	5,282
A	4,235
B	0,328

Tabla 1b: Parámetros estimados para índice de consolidación vs demanda esperada

Parámetro	Valor
c_1	6,642
c_2	3,340
c_3	0,791

Gráficamente, los resultados obtenidos se aprecian en las siguientes figuras. La figura de la izquierda muestra tiempo promedio por ruta vs demanda estimada por hora: se grafican tanto los

valores observados que se usaron para la calibración (1477 observaciones), como también la curva que obtiene al estimar R por la ecuación (10). En la figura de la derecha, en tanto, se muestra el mismo tipo de información para índice de consolidación vs demanda estimada por hora, que era lo que finalmente se estaba buscando. Se aprecia que en ambos casos, las curvas ajustan razonablemente bien a la nube de puntos con las cuales fueron estimadas.

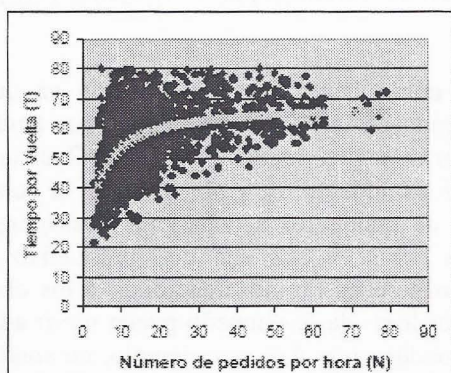


Figura 9: Tiempo promedio por ruta en función de la demanda: valores observados y estimados

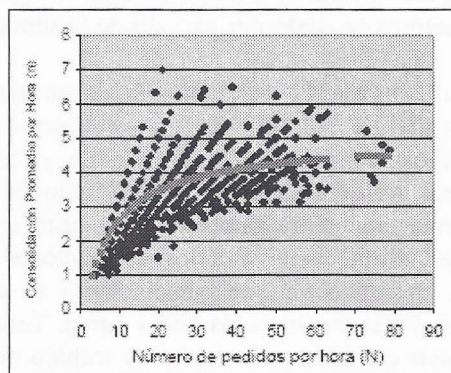


Figura 10 Consolidación promedio por ruta en función de la demanda: valores observados y estimados

En base a los valores obtenidos para c_1 , c_2 y c_3 , es posible obtener los parámetros originales α , β y γ . Por ejemplo, si se supone un valor de $k=0,7$, un área A de cobertura igual a 100km^2 , entonces se obtiene un valor de $\gamma=0,022$ (horas/km), es decir, 1,29 (min/km), es decir, una velocidad de aproximadamente 47 km/hora promedio, que para una red vial como la de Santiago es bastante razonable. Si se supone un valor para r igual a 3 km, el valor que se obtiene para $\alpha=0,374$ (horas/ruta). El parámetro β , en tanto, puede despejarse de la expresión para c_3 . En resumen:

Tabla 2: Parámetros α , β y γ originales

Parámetro	Valor (tiempo en horas)	Valor (tiempo en minutos)
α	0,374 (horas/ruta)	22,426 (minutos/ruta)
β	0,119 (horas/pedido)	7,141 (minutos/pedido)
γ	0,022 (horas/km)	1,290 (minutos/km)

Lo interesante de este resultado es que al utilizar las regresiones se han encontrado valores similares a los presentados en la última tabla para α , β y γ lo cual implica que ambos métodos no se contraponen.

5- CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que la magnitud de la demanda influye en la longitud de las rutas recorridas en los distintos períodos de la semana. Un mismo conductor puede tener distinta productividad en términos de la cantidad de clientes que puede visitar en una hora dependiendo de la hora del día. Adicionalmente, esta productividad varía de repartidor a repartidor. Si estos hechos no se incluyen en la programación de turnos de los conductores, la capacidad de servicio ofrecida puede verse seriamente sesgada.

La metodología propuesta permite a la empresa, por un lado, estimar el desempeño de cada conductor en cualquier hora usando la información histórica disponible, y por otro lado, efectuar una predicción razonable de las características de una ruta típica de una hora determinada (longitud y número de pedidos) . Estas estimaciones pueden ser herramientas útiles para predecir en forma más exacta el número de clientes que pueden ser visitados por un conjunto cualquiera de conductores en cualquier período de la semana.

Los resultados de la metodología sirven también como herramienta de gestión ya que la productividad de cada conductor puede ser desagregada en términos del tiempo que tarda en: atender a los clientes, manejar en la calle, y en realizar otras actividades en bodega. Cada uno de estos ítems presenta considerables variaciones entre los conductores, y por lo tanto, la duración de una ruta cualquiera también varía notablemente de conductor a conductor. Desagregar la eficiencia permite asignar a los conductores en las horas en que son más productivos. Por ejemplo, un conductor que maneja lento su vehículo pero es rápido atendiendo a los clientes puede funcionar mejor en las horas punta. Tener indicadores de desempeño puede servir además para inducir cambios en la forma de trabajo de los conductores. Así, por ejemplo, un conductor con un alto tiempo de atención por cliente puede verse incentivado a disminuir tal cifra para así incrementar su productividad.

Esta metodología se ajusta bien a empresas de reparto de bienes a domicilio en ventanas de tiempo pequeñas, pero también podría ser útil en empresas que operan con ventanas de tiempo mas grandes, como por ejemplo UPS o FedEx.

AGRADECIMIENTOS

Quisiéramos agradecer la ayuda de Juan de Dios Ortúzar en el desarrollo de este trabajo, así como también de FONDECYT (proyecto 1040604) y Fundación Andes, que han proporcionado los fondos necesarios para completar la investigación

REFERENCIAS

- Barnhart, C. and R. J. Sheno. 1998. An Approximate Model and Solution Approach for the Long-Haul Crew Pairing Problem. **Transportation Science** **32**, 221-231.
- Brusco, M. J., J. W. Jacobs, R. J. Bongiorno, D. V. Lyons and B. Tang. 1995. Improving Personnel Scheduling at Airline Stations. **Operations Research** **43**, 741-751.
- Caprara, A., P. Toth, D. Vigo and M. Fischetti. 1998. Modeling and Solving the Crew Rostering Problem. **Operations Research** **46**, 820 - 830.
- Daganzo, C.F.1999. **Logistics Systems Analysis**. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Gamache, M., F. Soumis, D. Villeneuve, J. Desrosiers and E. Gélinas. 1998. The Preferential Bidding System at Air Canada. **Transportation Science** **32**, 246 - 255.

Gamache, M., F. Soumis, G. Marquis and J. Desrosiers. 1999. A column Generation Approach for Large-Scale Aircrew Rostering Problem. **Operations Research** **47**, 247-262.

Klajban, D., E. L. Johnson, G. L. Nemhauser, E. Gelman and S. Ramswamy. 2001. Airline Crew Scheduling with Regularity. **Transportation Science** **35**, 359-374.

Klajban, D., E. L. Johnson, G. L. Nemhauser, E. Gelman and S. Ramswamy. 2002. Airline Crew Scheduling with Time Windows and Plane-Count Constraints. **Transportation Science** **36**, 337-348.

Lourenço, H. R., J. P. Paixao and R. Portugal. 2001. Multiobjective Metaheuristics for the Bus-Driver Scheduling Problem. **Transportation Science** **35**, 331-343.

Muñoz, J.C. 2002. **Crew-Shift Design for Transportation Systems with Uncertain Demand**. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, CA.

Ortúzar, J. de D. 2000. **Modelos Económicos de Elección Discreta**. Ediciones Universidad Católica de Chile.

Vance, P. H., C. Barnhart, E. L. Johnson and G. Nemhauser. 1997. Airline Crew Scheduling: A New Formulation And Decomposition Algorithm. **Operations Research** **45**, 188-200.