
MODELACION DEL COMPORTAMIENTO EN PARADEROS FORMALES

Rodrigo Fernández, Jaime Gibson y Mario Méndez
Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
Casilla 228-3, Santiago
Tel: 6894206; Fax: 6712799

RESUMEN

El diseño facilitades al transporte público de superficie ha tenido hitos importantes en el país el último tiempo. El sistema de paraderos divididos en la Alameda y la construcción del corredor segregado para buses en Av.Grecia, constituyen ambientes organizados de operación de buses. Varios estudios en ejecución sobre los principales ejes de locomoción colectiva en Santiago, requieren de recomendaciones de diseño que consideren estas experiencias.

El objetivo de este trabajo es describir el comportamiento de pasajeros y buses en paraderos formales de alta capacidad bajo condiciones de alta demanda. Esto se aborda por etapas. Primero, se muestra una nueva especificación del modelo para estimar la demora derivada de la transferencia de pasajeros. Se presentan luego distribuciones características de variables de operación: número de detenciones por bus, número de pasajeros que sube y baja por detención. Después, se derivan relaciones entre tasas de pasajeros transferidos. Por último, se analiza el uso de puertas en este tipo de paraderos. Los datos para esta investigación han sido obtenidos del sistema de paradas divididas de la Alameda en Santiago.



1. INTRODUCCION

En muchos lugares del mundo, tanto de países desarrollados como en vías de desarrollo, los buses constituyen el principal sistema de transporte urbano. Otros modos alternativos de transporte público (metros, tranvías, ferrocarriles, etc) se concentran sólo en los centros urbanos más importantes. Aún allí, sólo cubren parte de la ciudad. Es más, en la mayoría de los casos esos sistemas deben ser alimentados por servicios de buses de acercamiento. Como resultado, uno de los principales problemas urbanos que debe ser abordado es proveer un sistema de buses apropiado para las ciudades. Este es un desafío ineludible que deben enfrentar varias disciplinas, desde la planificación urbana a la ingeniería de tránsito.

Considerando lo anterior, el diseño facilitades al transporte público de superficie ha tenido hitos importantes en el país el último tiempo. El sistema de paraderos divididos en la Alameda y la construcción del corredor segregado para buses en Av.Grecia, permiten disponer de ambientes más organizados de operación de buses. Por otra parte, varios estudios en ejecución sobre los principales ejes de locomoción colectiva en Santiago, requieren de recomendaciones de diseño que consideren estas nuevas experiencias.

El objetivo de este trabajo es contribuir a la modelación de paraderos formales, de alta capacidad y operando en condiciones de alta demanda. Éste se puede concretar en tres niveles de análisis. Primero, extender y refinar un modelo para estimar el tiempo que un bus permanece detenido por operaciones de subida y bajada de pasajeros en este tipo de paraderos. Segundo, conocer las distribuciones características de sus variables de operación, en particular aquellas referidas al número de detenciones por bus y al número de pasajeros que sube y baja en cada tipo de detención. Con ello se pueden establecer relaciones entre las tasas de movimientos de pasajeros entre primeras y restantes detenciones y entre detenciones unifuncionales y bifuncionales. Tercero, modelar la forma en que las puertas del bus son usadas en las operaciones de subida y bajada.

Los datos para modelar este comportamiento se obtuvieron de observaciones en dos subparaderos con diferentes características de los paraderos divididos de la Alameda en Santiago: Ahumada y Santa Rosa.

En lo que resta de este documento, en el capítulo siguiente se explica la labor experimental realizada. Luego, se muestran los resultados de este trabajo. Finalmente, se presentan los principales comentarios derivados de la investigación.

2. HIPOTESIS Y TRABAJO EXPERIMENTAL

La demora que experimenta un bus en un paradero producto de la transferencia de pasajeros depende de la cantidad de personas que suben y bajan en cada una de las detenciones que éste realiza en el área de parada. Basado en investigaciones previas (Guenthres y Hamat, 1987; Gibson et al, 1989), se asume una relación lineal del tiempo detenido con el número de pasajeros que sube y baja, como la mostrada en la Ec.(1).



$$t_p = B_o + \max_i \{B_1 p_{si} + B_2 p_{bi}\} \quad (1)$$

donde p_{si} y p_{bi} es el número de pasajeros que suben y bajan por la puerta i y los B_j son parámetros a calibrar.

El número de detenciones y de pasajeros transferidos en cada una de ellas se puede obtener ajustando una función de distribución apropiada a los datos recogidos. Se había sugerido (Baeza, 1989; Baeza y Gibson, 1989) que ambos pueden tratarse como variables aleatorias que siguen una distribución geométrica truncada (Fig. 1) de rango $R=[1, T \cdot X_m]$, donde T es la razón entre el valor máximo y la media (X_m) de la distribución.

Sin embargo, en paraderos más formales que concentran mayor cantidad de pasajeros en lugares bien definidos, se esperaría que se minimicen las detenciones múltiples. Por lo tanto, podría mantenerse la forma de la distribución de esta variable, pero su moda -igual a una detención por bus- tendría una alta probabilidad de ocurrencia, seguida de una fuerte caída para las restantes detenciones, si las hubiera. Asimismo, producto de la concentración de pasajeros, aumentaría el número de personas transferidas en cada detención. Luego, la moda de la distribución de pasajeros por detención podría ser mayor a la unidad. En tales condiciones, esta variable podría quedar mejor representada por otra distribución.

Las posibles modificaciones en las distribuciones de las variables y en los parámetros de los modelos, que implicarían un cambio de comportamiento en paraderos formales de alta demanda, constituyeron la motivación de la investigación. El trabajo experimental para determinar dicho comportamiento en estos paraderos consistió entonces en generar una base de datos sobre el sistema de paradas divididas de la Alameda (ver Méndez, 1995).

Debido a la manifestación dinámica y simultánea de los eventos (detenciones, subidas, bajadas, tiempos, etc), los datos necesarios para la modelación se recogieron mediante la videogramación de dos subparaderos del corredor analizado: el ubicado en la isla de la intersección con Santa Rosa, en la calzada sur; y el situado en la isla de la intersección con Ahumada, en la calzada norte. Ambos presentan características diferentes en cuanto a operación y diseño geométrico (existencia de semáforo aguas abajo, longitud de la plataforma, lugar de acceso de los pasajeros, demanda, uso de pistas). Un rol importante en su selección lo jugó la visibilidad desde un punto elevado para la filmación (Méndez, 1995). En la Tabla 1 se resumen algunas características de la demanda de los lugares y períodos de observación. El procesamiento de las filmaciones permitió generar una detallada base de datos en estos lugares.

Lograr variabilidad en los datos con relación a la demanda requirió que las grabaciones se realizaran a lo largo de las horas de mayor movimiento, pero evitando sus máximos. Así, los períodos de observación correspondieron a la última mitad de la punta de la mañana (0800-0900) y la primera de la punta de la tarde (1700-1800), en días laborales de los meses de septiembre y octubre.



Tabla 1: Características de los subparaderos

SUBPARADERO Y PERIODO		FLUJO (bus/h)	DEMANDA (pax/h)		TASAS (pax/bus)	
			SUBIDA	BAJADA	SUBIDA	BAJADA
Ahumada	PM	139	245	1330	1.8	9.9
	PT	141	1100	825	7.9	5.9
Sta. Rosa	PM	184	870	700	4.2	3.8
	PT	158	780	545	4.9	3.4

3. RESULTADOS

Los datos recogidos en los subparaderos descritos permitieron la calibración de modelos, la obtención de distribuciones características de variables de operación y otros parámetros que representan su comportamiento (ver Fernández et al, 1995).

3.1 MODELO DE TIEMPO DETENIDO

La calibración del modelo de tiempo detenido entregó, en primera instancia, especificaciones como la de la Ec.(1) cuando se analizan separadamente los datos de cada subparadero estudiado. No obstante, hubo fuerte variabilidad espacial y temporal en los valores de los parámetros.

Con el objeto de encontrar una especificación única, se calibró un modelo con los datos agregados de ambos puntos de parada que discriminara las diferencias operacionales entre ellos. El resultado es el modelo no lineal de la Ec.(2), en que los números entre paréntesis representan la desviación estándar del parámetro, todos ellos estadísticamente significativos:

$$t_p = \max_i \{(B_1 + B'_1 d) p_{si} + B_2 (e^{-B'_2 p_{bi}}) p_{bi}\} \quad (2)$$

donde:

- | | | |
|--------|---|--|
| B_1 | = | 2.81 (0.07) [s/pax] |
| B'_1 | = | 1.27 (0.09) [s/pax] |
| B_2 | = | 2.05 (0.10) [s/pax] |
| B'_2 | = | 0.0355 (0.0055) [1/pax] |
| d | = | variable muda (1 si hay alta densidad y desorden de pasajeros en el andén, 0 en otro caso) |



El ajuste obtenido para este modelo resultó $R^2 = 0.93$. El tiempo muerto por detención (B_0) no es significativo para esta especificación, por lo que se puede asumir nulo en estas situaciones de demanda y diseño.

La variable muda d adopta un valor 1 sólo en el período punta tarde del paradero de Ahumada y cero para el resto de los casos. La densidad y distribución desordenada de pasajeros en su andén hace que el tiempo marginal de subida (B_1) aumente en casi un 50%. Así, con una demanda de más de 1000 pasajeros por hora queriendo embarcar, las interacciones que se producen entre los usuarios dificultan las operaciones de subida. Es clara entonces la importancia de un diseño apropiado de los andenes en estas condiciones.

La variación del tiempo marginal de bajada (B_2) se encuentra en la cantidad de pasajeros que hacen esa operación. Disminuye con la cantidad de éstos, pero tiene una cota inferior que tiende a 1 segundo por pasajero. Es el caso de Ahumada en la mañana cuando bajan casi 10 pasajeros por bus. Esto se puede explicar por la generación de una cola en el pasillo del vehículo que aumenta la eficiencia del proceso y produce presión para se realice con rapidez. Sugiere también que un ordenamiento parecido en el proceso de subida (¿una cola frente al lugar de detención del vehículo?) tenga un efecto similar. De nuevo, esto apela a un adecuado diseño y demarcación de andenes y áreas de parada.

3.2 DISTRIBUCION DEL NUMERO DE DETENCIONES POR BUS

El número de detenciones por bus en los paraderos estudiados, confirmó que la distribución que mejor representa el fenómeno es una geométrica truncada.

Aún cuando existen ciertas diferencias en el valor de los parámetros de las distribuciones en cada uno de los paraderos analizados, la moda resultó igual a 1 det/bus y el máximo número de detenciones resultó ser igual al número de sitios (3 en este caso). Asimismo, T resultó ser en promedio 2.28, muy similar al encontrado en paraderos más informales (2.20 según Baeza, 1989). La Fig.1 muestra el tipo de distribuciones encontradas en el período punta tarde de los subparaderos estudiados.

Las diferencias entre los valores de las distribuciones, se explican fundamentalmente por la existencia de un semáforo inmediatamente aguas abajo del subparadero de Santa Rosa. Esto hace aumentar artificialmente el número de detenciones, disminuyendo la probabilidad de la moda, y aumentando la de las segundas detenciones. Sin embargo, la probabilidad de tercera detenciones se mantiene bastante baja (menor al 5%). Asimismo, el efecto de la predominancia de pasajeros embarcando en la hora punta de la tarde, produce un efecto similar, pero menos marcado, en ambos paraderos.

3.3 DISTRIBUCION DEL NUMERO DE PASAJEROS POR DETENCION

La distribución de pasajeros que sube y baja en cada detención presentó algunas diferencias respecto a lo postulado inicialmente. No existiría una forma única para ella y ésta no es una característica del tipo de paradero, sino que dependería de su demanda.

Para bajas demandas la variable sigue mejor la forma de una distribución geométrica truncada (Fig. 2-a). Para altas, en tanto, fue posible ajustar una distribución trapezoidal como la de la Fig. 2-b, derivada de una distribución triangular (Gibson y Santana, 1991). El punto de corte para elegir una u otra estaría sobre los 5 pasajeros que suben o bajan por detención. Se llevan a cabo observaciones adicionales para afinar esta conclusión.

En el caso de distribuciones geométricas, los valores de T resultan ser, en promedio, $T_s=4.11$ para las subidas y $T_b=3.45$ para bajadas. Valores muy similares (4.2 y 3.5, respectivamente) habían sido encontrados en paraderos informales (Baeza, 1989). Es decir, en condiciones de demanda moderada (i.e. 5 o menos pasajeros por detención transferidos), el máximo número de pasajeros movilizados es entre 3 a 4 veces su tasa media por detención.

En el caso de distribuciones trapezoidales, el máximo número de pasajeros movilizados es más estable que en el caso anterior para subidas y bajadas, resultando ser unas 2.5 veces la tasa media por detención.

3.4 RELACIONES ENTRE TASAS DE MOVIMIENTO DE PASAJEROS

La relación entre las medias de pasajeros transferidos tanto en detenciones bifuncionales (para subir y bajar) como en las segundas y terceras, se puede establecer suponiendo relaciones lineales con aquellas unifuncionales (para subir o bajar) y primeras, según lo establecido en la Ec.(3) donde $i=s,b$ y $k=1,n$ (Baeza, 1989).

$$\begin{aligned} MP_{isbk} &= E_i \cdot MP_{ik} \\ MP_{im} &= W_i \cdot MP_{im} \end{aligned} \quad (3)$$

Luego, las relaciones entre tasas de movimientos de pasajeros que se definen para modelar el comportamiento son dos. La primera, E_i , corresponde a la razón entre las tasas de pasajeros transferidos en detenciones bifuncionales y unifuncionales. Se ha supuesto igual para primeras ($k=1$) y restantes detenciones ($k=n$). La otra, W_i , es la razón entre la tasas de pasajeros transferidos en restantes detenciones (segundas y terceras) con respecto a las primeras.

Los resultados encontrados a nivel agregado indican una mayor eficiencia de las detenciones con respecto a las de paraderos informales (ver Baeza, 1989). Los valores de E_i son del orden de 1.0 o más, en contraposición a 0.8 obtenidos previamente en otro tipo de paraderos. Esto significa que la tasa de pasajeros movidos en detenciones bifuncionales es igual o mayor que en las unifuncionales. Es decir, la eficiencia de cada detención aumentó al producirse ahora más subidas y bajadas simultáneas. A su vez, las detenciones unifuncionales son menos.



Además, el supuesto previo de igualdad entre estos parámetros para primeras y restantes detenciones no se mantiene. La tendencia encontrada hasta el momento indica un E_i de las segundas y terceras detenciones mayor que el de las primeras. O sea, de producirse detenciones múltiples, la tasa media de pasajeros transferidos en las bifuncionales es superior a la de las unifuncionales, aún cuando éstas últimas tiendan a ser más cuando hay detenciones múltiples.

El parámetro W_i , por su parte, varía entre 0.4 y 0.6 en estos casos, lo que implicaría que la tasa de pasajeros transferidos en segundas y terceras detenciones es en promedio un 50% de la correspondiente a la primera detención. O sea, hay una tendencia a mover mayor cantidad de pasajeros en la primera detención. De allí la eficiencia del paradero. Esto contrasta con el valor 1.0 encontrado sistemáticamente en paraderos informales, donde la tasa de pasajeros transferidos en la primera y restantes detenciones sería la misma.

A nivel desagregado, valores de E_i y W_i resultan más parecidos a situaciones de paraderos informales cuando las condiciones de operación de paraderos formales tienden a las encontradas en los primeros (menores demandas, mayor número de detenciones).

3.5 MODELO DE USO DE PUERTAS

La descripción del comportamiento en paraderos concluye cuando, una vez asignado los pasajeros a cada tipo de detención, éstos se distribuyen a cada puerta del bus. Se postula que un comportamiento peculiar en el uso de las puertas del vehículo es función de la demanda del paradero.

Se ha asumido a partir de Baeza (1989) que el total de pasajeros que suben lo hacen por la puerta delantera del vehículo. El uso de puertas por parte de los pasajeros que bajan (P_b) puede entonces describirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} P_b &= p_{bd} + p_{bt} \\ p_{bd} &= C + K P_b \end{aligned} \tag{4}$$

donde:

p_{bd}	=	número de pasajeros que baja por puerta delantera
p_{bt}	=	número de pasajeros que baja por puerta trasera
K	=	proporción que baja por la puerta delantera
C	=	constante

El comportamiento agregado en los paraderos estudiados se resumen en la Ec.(5) (con $R^2=0.73$), corroborando que la decisión de la puerta a usar para bajar es independiente de variables externas al vehículo, como el número de pasajeros que embarca. Se podría postular que tiene relación con la tasa de ocupación de los buses o el diseño interno de éstos, pero no se dispone de datos como para comprobar esta hipótesis.



$$P_{bd} = 0.5I + 0.40 P_b \quad (5)$$

En término de la proporción de pasajeros que bajan por la puerta delantera, la Ec.(16) se puede escribir como:

$$\frac{P_{bd}}{P_b} = 0.40 + \frac{0.5I}{P_b} \quad (6)$$

Se observa que el porcentaje de bajadas por delante disminuye a medida que aumenta la cantidad de pasajeros desembarcando, tendiendo a estabilizarse alrededor del 40%. Esto corrobora los antecedentes de paraderos informales, pero donde dicho porcentaje es del orden del 70% (Citra, 1990).

4. COMENTARIOS FINALES

Los principales resultados de la modelación del comportamiento en paraderos formales en condiciones de alta demanda se pueden resumir como sigue.

Se ha obtenido una nueva especificación del modelo de tiempo detenido que da cuenta del efecto que tienen el aumento de pasajeros transferidos, a través de la densidad y desorden en andenes al embarcar y de la cantidad que desembarca. Esto modifica la relación lineal característica obtenida previamente.

Se ha reafirmado, como se había sugerido anteriormente, que las detenciones en paraderos quedan bien representadas por una distribución geométrica truncada con moda igual a uno y máximo igual al número de sitios. La razón entre ese máximo y la media de detenciones por bus ha mostrado ser estable para todo tipo de paraderos (2.2 a 2.3). Pero, la probabilidad de tercera detención, cuando existen, es bastante baja en los casos estudiados (menor al 5%).

Esta misma distribución mantiene su validez al describir las subidas y bajadas por detención cuando hay moderadas a bajas demandas de pasajeros. Pero se modificaría a una nueva distribución (trapezoidal) cuando la tasa pasajeros por detención se eleva. El punto de transferencia de una a otra estaría sobre los 5 pax/det.

Las relaciones entre las tasas medias de pasajeros movidos en detenciones unifuncionales y bifuncionales, así como las correspondientes a primeras y restantes detenciones, muestran una mayor eficiencia de los paraderos analizados. Aumenta el promedio de pasajeros por detención en operaciones de subida y bajada simultáneas, y en las primeras detenciones.



Análisis sobre el uso de puertas muestran indiferencia para bajas demandas. A partir de allí, el uso de la puerta delantera para bajar presenta una disminución con la demanda del paradero, estabilizándose alrededor del 40%.

Los resultados anteriores, aún dado su carácter inicial, muestran que paraderos especialmente diseñados para atender altas demandas de pasajeros y flujos de buses son más eficientes que los tradicionales. Sin embargo, su análisis confirma dos recomendaciones de diseño. Primero, la existencia de un semáforo inmediatamente aguas abajo del área de parada produce un aumento artificial en el número de detenciones. Es por lo tanto perjudicial a la operación. Segundo, el desorden de pasajeros en el andén, producto del uso aleatorio de los sitios de detención, aumenta los tiempos de embarque. Se debe por ende asegurar que el bus utilice el sitio más cercano a la salida y que los pasajeros se concentren en ese lugar.

En resumen, áreas de parada alejadas de semáforos, bien demarcadas y andenes con amenidades en su cabecera, aumentarán la eficiencia de los paraderos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación está siendo financiada por Fondecyt, a través del proyecto 1940518.

REFERENCIAS

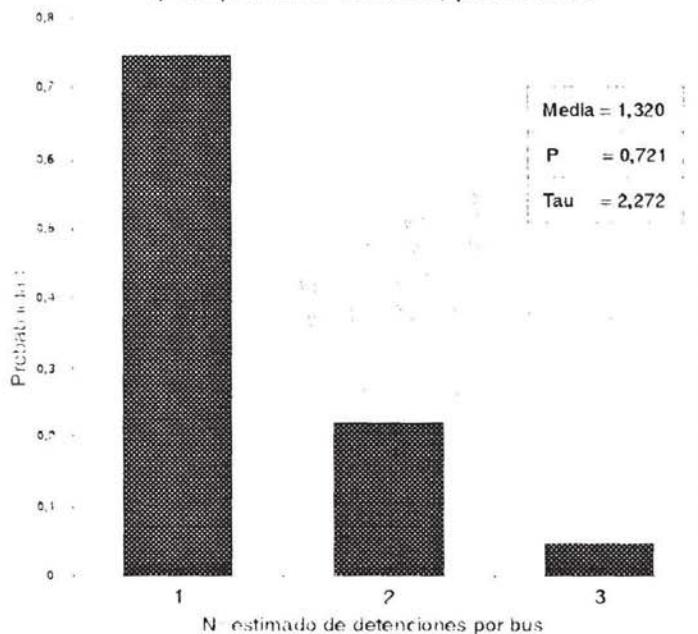
- Baeza I. (1989) **Estimación de la capacidad de paraderos de buses**. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Baeza, I. y Gibson, J. (1989) Modelación de la capacidad y demoras en paraderos de Buses. **Actas del IV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**, Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 3-18.
- Citra (1990) **Estudio Análisis Operacional de Paraderos de Locomoción Colectiva**. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Santiago.
- Fernández R., Gibson J. y Méndez M. (1995) Modelación del comportamiento en paraderos de alta demanda. **Documento de Trabajo ST-INV/01/95**, Sección Ingeniería de Transporte, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago.
- Gibson J. Baeza I. and Willumsen L.G. (1989) Bus-stops, congestion and congested bus-stops. **Traffic Engineering and Control**, 30(6), June 1989, 291-302.
- Gibson, J. y Santana, A. (1991) Predicción de la demanda de estacionamiento en un área. **Actas del V Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**. Universidad de Chile, Santiago, 407-419.



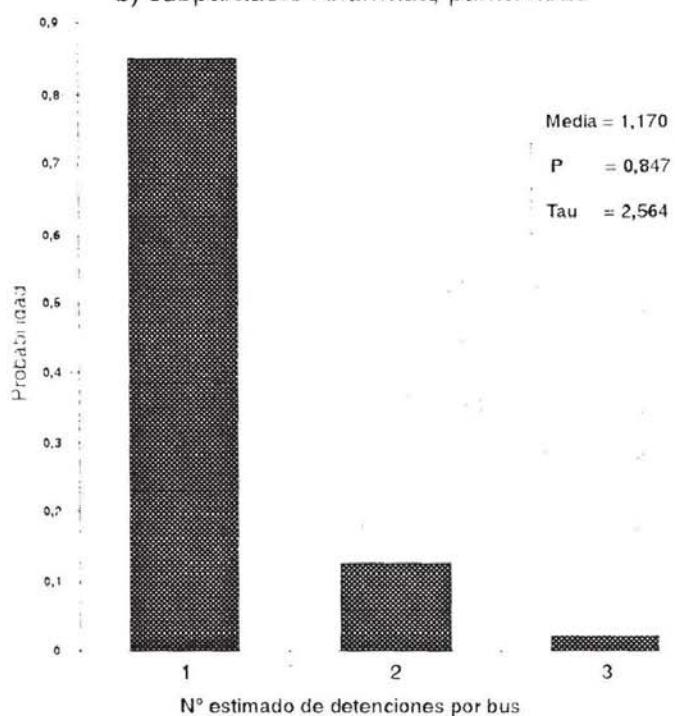
Guenther, R.P. and Hamat, K. (1988) Transit dwell time under complex fare structure. **Journal of Transportation Engineering**, Vol.114 N°3, 367-379.

Méndez M. (1995) **Modelamiento de las detenciones en paraderos de buses de alta capacidad.** Memoria para optar al Titulo de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile, Santiago.

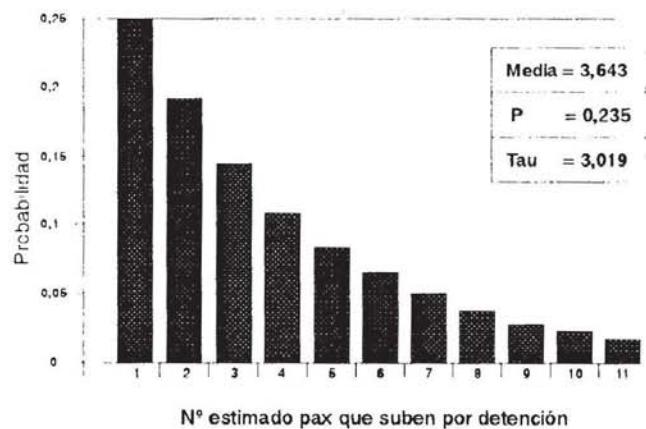
a) subparadero S. Rosa, punta tarde



b) subparadero Ahumada, punta tarde



a) subparadero S. Rosa, punta tarde



b) subparadero Ahumada, punta tarde

