Evaluación cuantitativa de rutas de distribución utilizando técnicas combinadas de optimización

Wilmer Atoche Díaz
Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, watoche@pucp.edu.pe

Gloria Milla Obregón
Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, milla.g@pucp.edu.pe

Marlene Silva Felices
Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, msilvaf@pucp.edu.pe

Walter Silva Sotillo
Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, walter.silva@pucp.edu.pe

RESUMEN

Esta investigación permite resolver dos problemas; primero, determina las rutas óptimas de distribución empleando el algoritmo de Clarke & Wright, luego se calcula el número optimo de recursos o servidores a asignar para cada vehículo de transporte por medio de evaluación de costos totales y métodos de simulación.
Se agrupan los puntos de entrega (clientes) en clústeres teniendo en cuenta el número de clientes atendidos por parada realizada (N) y se determinan las rutas óptimas. Luego, se simula manualmente la atención de cada parada en el recorrido de los camiones teniendo en cuenta que, en cada clúster de parada, se genera un sistema de colas M/G/s/N, en donde los servidores (s) son los repartidores y se tienen N clientes por atender. El análisis muestra que el problema principal es la disminución de los tiempos de reparto en cada parada, pues la repartición acumula alrededor del 80% del tiempo total y los traslados entre punto y punto de parada sólo alrededor del 20%.
Se concluye de la evaluación económica de las alternativas que la inversión en uno o más repartidores por camión ayudan a disminuir los tiempos de reparto total, las horas extras trabajadas y las ventas perdidas por jornada laboral.

Palabras claves: Ruta óptima, sistema de colas, evaluación económica

ABSTRACT

This research can solve two problems: first, determine optimal delivery routes using the Clarke & Wright algorithm, then find the optimal number of resources or servers (s) to be allocated to each transport vehicle using total cost assessment and simulation methods.
Delivery points (customers) are grouped in clusters considering the number of customers served by each stop (N), and with this, optimal paths are determined. Then, the attention of every stop along the routes are manually simulated bearing in mind that each stop cluster generates a queuing system M / G / s / N, where the servers (s) are the dispatchers and the system has N clients to attend. The analysis shows that the main problem is the reduction of delivery time at each stop, which represents about 80% of the total time; on the other hand, transportation itself represents about 20%. The conclusion after the economic evaluation of alternatives is that investment in one or more dispatchers per truck helps to reduce total delivery time, overtime worked and lost sales per workday.

Keywords: Optimal route, queuing system, economic evaluation

1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación busca dar solución a los problemas encontrados en el diseño de rutas y el proceso de entrega en una distribuidora de consumo masivo utilizando el algoritmo de Clarke-Wright y simulación de sistemas de colas, respectivamente. Todo ello con el objetivo de disminuir los tiempos totales de distribución a los clientes (tiempos de traslado y tiempos de reparto).

La empresa en la que se desarrolla el presente trabajo es una distribuidora de capitales peruanos que fue creada hace 7 años y se encuentra ubicada en el Cercado de Lima. La actividad económica de la empresa está basada en la comercialización de productos de consumo masivo (productos de limpieza, papeles, alimentos, confitería entre otros) y en la distribución de los mismos, teniendo como zonas de cobertura, el Callao y Lima Centro.

El éxito que tienen en su rubro ha sido posible a partir de las eficientes relaciones que mantienen con todos los componentes de su cadena de suministros, desde sus proveedores hasta sus clientes. En el caso de proveedores, tienen una amplia gama de selectas empresas del sector (consumo masivo) líderes en el mercado. Son distribuidores exclusivos de grandes empresas como Procter & Gamble S.R.L., empresa con la cual no solo existe una relación de proveedor cliente sino que brinda las capacitaciones a la fuerza de ventas y está siempre pendiente de las mejoras a implantarse en la empresa. También es distribuidor exclusivo de Protisa S.A., Pepsico S.R.L. además de distribuir otros productos de proveedores como Química Suiza, Johnson & Johnson, Clorox, entre otros.

En la actualidad, la distribuidora en estudio abastece a más de mil clientes en Lima y Callao. Por ello, de forma empírica han establecido zonas de venta y transporte las cuales agrupan a clientes que tiene ubicaciones cercanas. Para el presente estudio han sido consideradas las cuatro zonas en donde se tienen más puntos de reparto, por considerarlas zonas representativas.

El diseño de rutas es llevado a cabo por los conductores de cada camión y es basado en los años de experiencia que cada uno de ellos ha adquirido. Para mejorar este proceso, se propone utilizar el algoritmo de Clarke & Wright el cual calcula rutas adecuadas teniendo en cuenta variables como la distancia entre puntos de reparto, la capacidad del camión y máxima distancia a recorrer. Se considera de gran importancia aplicar dicha mejora pues esto contribuirá a disminuir los tiempos de traslado totales.

A pesar que el proceso de transporte es bastante importante para el trabajo de la distribuidora, luego del estudio de tiempos realizado se pudo concluir que el 80% del tiempo de distribución es destinado a la entrega de productos y solo el 20% al traslado entre puntos. Por ello, se considera que la optimización del proceso de entrega tendrá efectos significativos sobre los tiempos totales de distribución. Para mejorar este proceso se propone calcular, utilizando la simulación manual del sistema de reparto y un enfoque de costos totales de transporte, el número de trabajadores que deberá ser asignado a cada camión. De esta manera, se logrará disminuir los costos totales de distribución y optimizar el tiempo de reparto total.

A continuación se presentan los capítulos llamados Estado del Arte y Contribución. En el primero de ellos, se mostrará el algoritmo de Clarke & Wright así como las características especiales que se tuvieron en cuenta para la resolución del problema en particular. Asimismo se mostrará el análisis de sistema de colas generado en cada punto de parada de los camiones.

En el capítulo de Contribución se mostrarán los resultados y las mejoras logradas luego de la aplicación del modelo y el análisis de colas. Finalmente, se mostrarán las conclusiones obtenidas luego del estudio y las recomendaciones que se desprenden del mismo.

2. DESARROLLO DEL MODELO

2.1 APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE CLARKE-WRIGHT [2,3]

El método de Clarke & Wright es un algoritmo heurístico que brinda una solución muy cercana al óptimo. A pesar de no dar un resultado óptimo, tiene gran aplicabilidad en la vida real ya que el tiempo de resolución es menor y menos complejo que el de un algoritmo más exacto. El objetivo del método del ahorro o de Clarke & Wright es minimizar el número de vehículos a utilizar para cubrir las paradas planificadas así como minimizar la distancia total recorrida por cada uno de estos vehículos. Este método se basa en el siguiente algoritmo exacto:

Parámetros:

n Número de clientes.
C_{ij} Costo visitar cliente j después del cliente i.
K Número de vehículos disponibles.
k_o Capacidad de cada vehículo.
d_i Demanda del cliente i.

Variables:

$X_{ijk}=1$ si vehículo k visita j después de i, 0 en cualquier otro caso.

Función Objetivo:

$$Z = \sum_{k=1}^{k} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1, j\neq i}^{n} X_{ijk} C_{ij}$$

Restricciones:

- Entrar a cliente una vez

$$\sum_{k=1, i=0: i\neq j}^{k,n} X_{ijk} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n \qquad (1)$$

- Salir de cliente una vez

$$\sum_{k=1, i=0: i\neq j}^{k,n} X_{ijk} = 1 \quad \forall j = 1, \dots, n \qquad (2)$$

- Eliminación de sub-circuitos

$$\sum_{i,j\in S, k=1}^{k,n} X_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset \{1, \dots, n\} \qquad (3)$$

- El vehículo que entra es el que sale

$$\sum_{i=0, i \neq j}^{n} X_{ijk} - \sum_{i=0, i \neq j}^{n} X_{jik} = 0 \ \forall k = 1, \dots, k \qquad (4)$$

- Cada vehículo sale del origen a lo más una vez

$$\sum_{i=1}^{n} X_{0ik} \leq 1 \qquad \forall k = 1, \dots, k \qquad (5)$$

- Capacidad de los vehículos

$$\sum_{i=1, j=1, i \neq j}^{n} X_{ijk} d_j \leq k_o \qquad \forall = 1, \dots, k \qquad (6)$$

El algoritmo empieza utilizando un vehículo de transporte el cual realiza la ruta de ida a un punto de destino y de retorno al punto de origen, esto se realiza para cada una de las paradas planificadas. Con este primer paso se logra visualizar la distancia máxima de viaje que se podría realizar.

Luego de ello, se intentan combinar dos destinos para que el uso de un vehículo pueda eliminarse y la distancia de viaje se reduzca. Para evaluar esta potencial ruta se calcula la distancia recorrida antes y después de la combinación y se determina la distancia ahorrada, como se muestra en la figura 1:

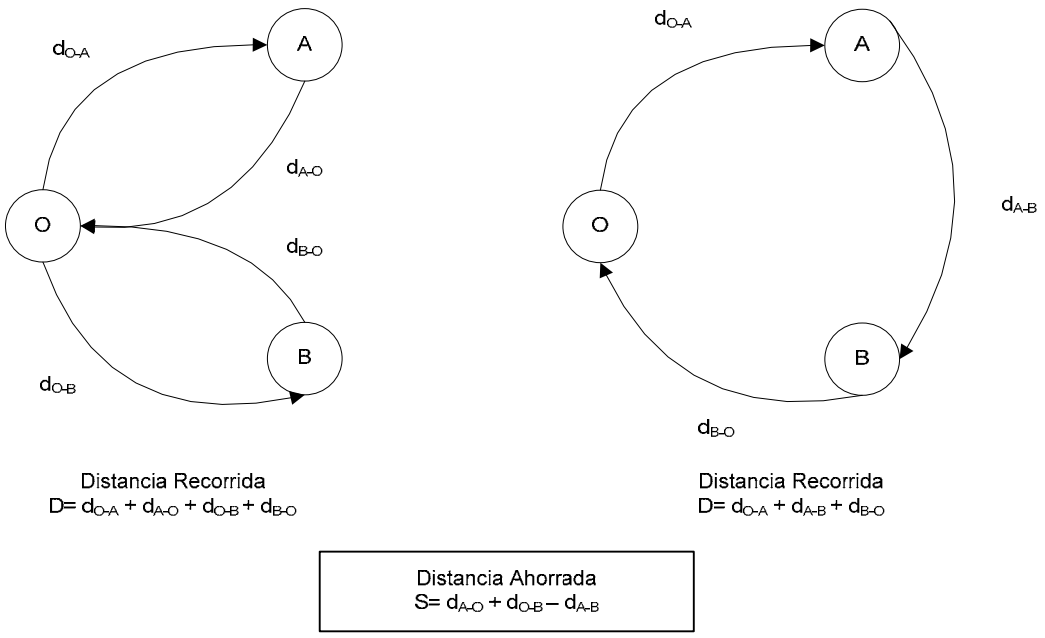

Figura 1: Distancia ahorrada mediante la combinación de destinos

Para la inclusión de un destino nuevo en una ruta se identifica el ahorro potencial más grande.
A partir del algoritmo antes descrito, se añadieron algunas consideraciones propias de la naturaleza del problema. Por ejemplo, se consideró el hecho que los vehículos de transporte no hacen paradas en cada cliente de reparto; sino que realizan paradas en puntos fijos con la finalidad de agrupar clientes y disminuir de esta manera los traslados innecesarios y el consumo de combustible. Teniendo en cuenta esto, nace la necesidad de generar clústeres o agrupaciones de clientes y a partir de estas paradas fijas, establecer las rutas más adecuadas.

A continuación, se presenta un cuadro resumen (tabla 1) en donde se puede observar la frecuencia en el tamaño de clúster (número de clientes por clúster)

Tabla 1: Número de clientes por clúster

# clientes/clúster	Frecuencia de clústeres	
1	69	67.60%
2	22	21.60%
3	7	6.90%
4	2	2.00%
5	2	2.00%

Dada esta naturaleza, se decidió trabajar las variables relevantes a nivel de clúster que serán detalladas a continuación:

- Ubicación geográfica de los puntos de reparto (clústeres):

Se utilizaron planos a escala de la ciudad de Lima y se ubicaron todos los clientes de las zonas en estudio. A partir de ello, se calculó teniendo como origen de coordenadas a la distribuidora las distancias entre este punto y cada uno de los clientes. Finalmente, teniendo en cuenta cada clúster de clientes observado, se determinó el centro de gravedad de cada uno de ellos.

- Demanda de los puntos de reparto (clústeres):

Se calculó la demanda agregada sumando la venta de cada cliente que pertenece a cada clúster.

- Capacidad de los camiones (en soles):

La capacidad de los camiones está dada por la cantidad de mercadería en soles que estos pueden transportar durante su recorrido. Esto se debe a que en la base de datos de los productos no se tiene mayor información logística sobre estas variables (peso y este volumen de los SKU´s). Por todo ello, se obtuvo que la capacidad máxima sería 12000 soles; monto establecido por la distribuidora tomando en cuenta criterios adicionales a los logísticos como el monto máximo por el cual está asegurada la mercadería en los camiones.

- Distancia máxima a ser recorrida (en metros):

Para la determinación de la distancia máxima a ser recorrida por cada camión se utilizó básicamente un criterio de tiempo. Se estableció que el tiempo máximo que podría ser recorrido sería 11 horas diarias por camión, pues posterior a esto los clientes de la distribuidora (bodegas y farmacias) ya no reciben mercaderías, es más, algunos de ellos ya se encuentran cerrados.

2.2 APLICACIÓN DE SIMULACIÓN DE SISTEMA DE COLAS PARA EL PROCESO DE ENTREGA

Luego de establecer las rutas más adecuadas para cada una de las zonas de transporte, se consideró necesario evaluar dicha solución utilizando herramientas de simulación de sistemas. Como se mencionó anteriormente, los transportistas realizan paradas en puntos fijos a partir de los cuales se realiza el proceso de entrega a los clientes que conforman cada una de las agrupaciones o clústeres.

Se consideró que en cada parada se genera un sistema de colas en donde los transportistas o servidores deben realizar el reparto a los N clientes del clúster. Para entender mejor el proceso, se presenta la figura 2:

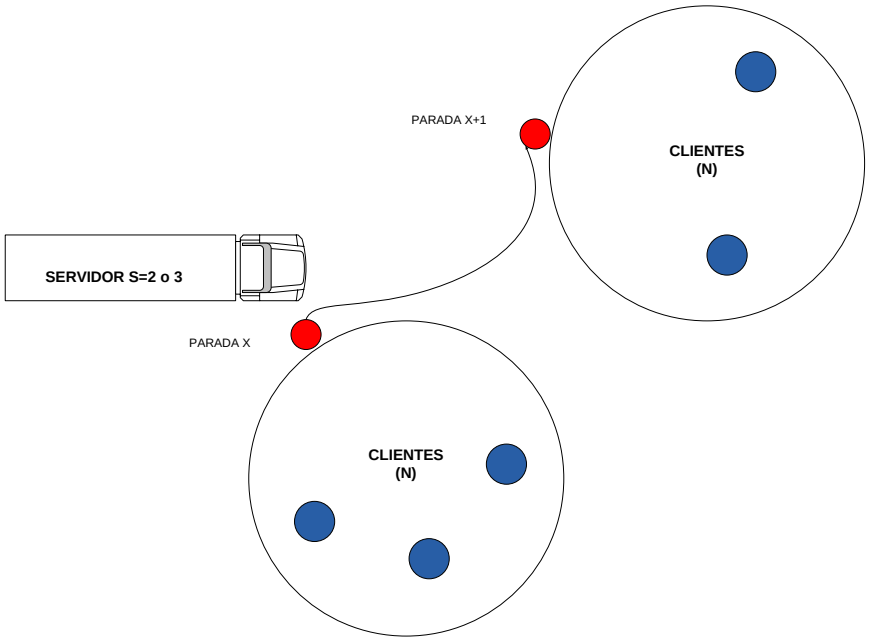

Figura 2: Sistemas de colas generados en cada parada

Dados los tiempos de traslado entre clústeres y reparto observados en la realidad, se realizaron pruebas de bondad de ajuste y se obtuvieron las distribuciones de probabilidad.

- Para el tiempo entre llegadas: No se realizó la prueba de bondad, debido a que este tiempo es nulo. Los clientes aparecen en el mismo momento en el que el camión llega al clúster.
- Para el tiempo de transporte: Resultó una distribución Lognormal (1.71, 1.55).
- Para el tiempo de reparto: Resultó una distribución Weibull (9.54, 1.09).

Mediante dichas distribuciones se logró simular los tiempos de traslado así como los tiempos de entrega, que en este caso serían equivalentes a los tiempos de servicio.

La simulación manual de los sistemas de colas fue realizada considerando dos valores distintos de servidores o repartidores (s= 2 y 3). La primera alternativa (s = 2), representa la situación actual de la distribuidora. La segunda, (s = 3) ha sido determinada considerando la capacidad máxima de transporte de pasajeros en este tipo de camiones, siguiendo la normatividad de las leyes peruanas. En la actualidad, la distribuidora asigna a dos repartidores por camión; por ello, se quiso evaluar qué tan beneficiosa era dicha asignación y si sería adecuado invertir en un trabajador más para disminuir los tiempos extra y la venta perdida.

3. CONTRIBUCIÓN DEL MODELO

Las herramientas utilizadas para el desarrollo de la presente investigación permitieron generar contribuciones prácticas para la distribuidora. Como se mencionó al principio del artículo, el objetivo del estudio es la minimización de los tiempos de distribución totales aplicando para ello mejora en los procesos de diseño de rutas y entrega de pedidos.

Para poder lograr resultados realmente apreciables se debieron aplicar las mejoras de manera simultánea; de esta manera se propuso optimizar las rutas y elevar el número de repartidores a tres, pues a pesar que implica una inversión en el aspecto salarial, el ahorro que conlleva hace a esta opción verdaderamente factible.

Luego de la aplicación del algoritmo de Clarke & Wright para las cuatro zonas en mención se obtuvieron dos rutas las cuales pueden ser apreciadas en la figura 3:

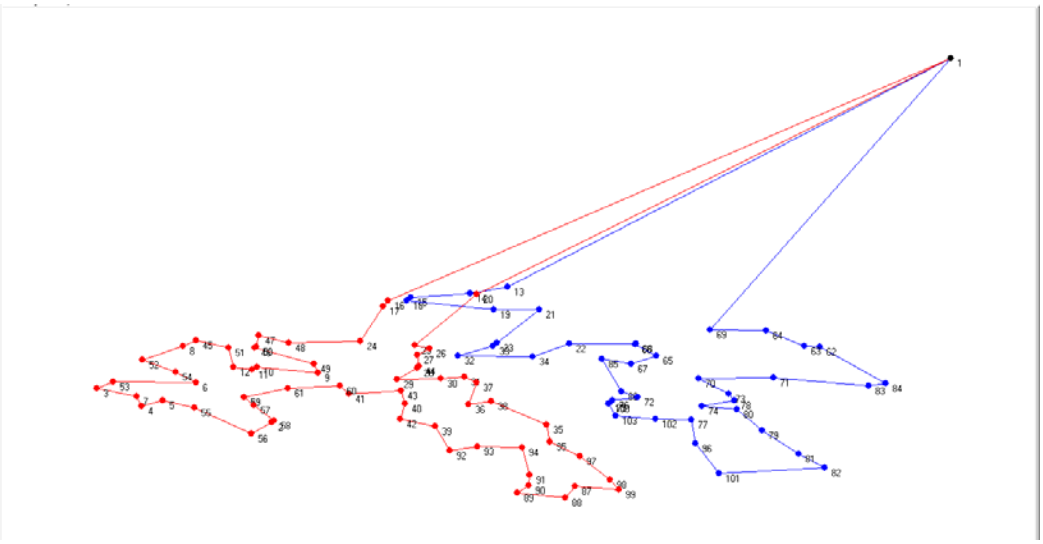

Figura 3: Rutas resultantes de la aplicación del algoritmo de Clarke & Wright

En la figura 3 se aprecian las dos rutas resultantes de la aplicación del algoritmo de Clarke & Wright (la primera en rojo y la segunda en azul); asimismo, el orden en el que deben ser recorridas. Nótese que la numeración de las rutas está referida al número de clúster a ser visitado.

A partir del resultado hallado por el método de Clarke & Wright se realizó una comparación entre la distancia recorrida entre clústeres en la actualidad y la que sería recorrida de implementar la propuesta de solución. A continuación se muestra un cuadro comparativo para las cuatros zonas en estudio y sus respectivas rutas:

Tabla 2. Comparación de recorrido actual y propuesto

Recorrido Actual					**Recorrido Propuesto**				
Ruta 1					**Ruta 1**				
	60	clústeres	20.81	Km		49	clústeres	13.37	Km
Ruta 2					**Ruta 2**				
	42	clústeres	17.15	Km		53	clústeres	14.84	Km
		Total	**37.96**	**Km**			**Total**	**28.21**	**Km**

En la actualidad, cada una de las dos rutas que cubren las cuatro zonas en estudio toma un promedio de 14,5 horas de recorrido, provocando con ello no solo el pago de horas extra a los trabajadores de la empresa sino provocando que haya ventas perdidas. Al implementar las nuevas rutas sugeridas e invertir en un transportista más, el cual ayude al reparto de pedidos, se logra bajar el tiempo de recorrido promedio a 11,8 horas. Además se puede apreciar que los costos totales de transporte, los cuales incluye salarios, horas extra, alquiler de camiones y ventas perdidas disminuyen con dicha mejora.

Tabla 3: Comparación de tiempos y costos totales de distribución para 2 y 3 transportistas

Con 2 recursos **Tiempo promedio de recorrido: 14,5 horas**	
Costos Relevantes (PEN S/. diarios)	
Salarios (1chofer+1liquidador+1repartidor)	780
Horas Extra	218.29
Costo Camiones	1200
Venta perdida	3998
Total (PEN)	**6196.29**

Con 3 recursos **Tiempo promedio de recorrido: 11,8 horas**	
Costos Relevantes (PEN S/. diarios)	
Salarios (1chofer+1liquidador+2repartidor)	1007.5
Horas Extra	177.34
Costo Camiones	1200
Venta perdida	664
Total (PEN)	**3048.84**

Se puede observar que la combinación de ambas mejoras contribuye a disminuir el tiempo de distribución promedio por camión en 18,62%. Por otro lado, se puede observar que la disminución de costos totales de distribución es alrededor del 50%. Este ahorro se debe principalmente a la disminución significativa del nivel de venta perdida que se puede alcanzar al llegar a tiempo al reparto del cliente.

Para la determinación del valor de venta perdida, hemos considerado que ello ocurre cuando los clientes cierran sus puestos, es decir desde las 20:00horas y no aceptan proveedor alguno. Este valor, representa una oportunidad perdida en dicho día para generar utilidades.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego de realizado el estudio se concluye que se logran mejoras significativas en disminución de tiempos y costos al aplicar de forma integral y coordinada la optimización de rutas y del proceso de entrega. En este caso, se pudo demostrar que la disminución en el tiempo total de distribución es de alrededor del 18% y en los costos totales de distribución es de alrededor del 50%.

Dada la naturaleza del proceso de distribución y entrega, se considera un acierto haber realizado el estudio basándonos en la aplicación de agrupaciones de puntos de entrega o clústeres. Con este supuesto se logró un modelo más acercado a la realidad y por ende resultados más confiables.

La simulación de los sistemas de colas generados en cada parada nos demuestra que la inversión en asignar un recurso más al reparto genera la disminución significativa de los tiempos totales. Por otro lado, también genera ahorros en los costos totales de distribución pues la venta pérdida y el pago de horas extra disminuye. Se concluye que esta mejora es viable.

Si se tiene un caso similar se debe examinar el tiempo de ruta y el tiempo total de entregas, antes de plantear el modelo presentado en este articulo, puesto que es recomendable aplicarlo cuando el tiempo total de entregas es porcentualmente significativo en la jornada laboral.

REFERENCIAS

[1] Carter, R. J / Price P. M./ Emmett S. A. (2005), *Stores & Distribution management.* Bromborough : Liverpool Business

[2] Winston W. L. (2005), *Investigación de operaciones: Aplicaciones y Algoritmos,* Mexico:Thomson

[3] Ballou, R (2004), *Logística: Administración de la cadena de suministro.* Naucalpan de Juárez : Pearson Educación.

[4] Hillier F. S. / Lieberman G.J (2002) *Investigación de operaciones*, Mexico:McGraw-Hill.

[5] Eppen, G., Gould, F., Schmidt, C., Moore, J. y Weatherford, L.(2000), *Investigación de operaciones en la ciencia administrativa,* Mexico: Prentice Hall.

[6] Ross, S. M. (1999) *Simulación*, Mexico: Prentice Hall.

Autorización y Renuncia

Los autores, Wilmer Atoche, Gloria Milla, Marlene Silva y Walter Silva, autorizan a LACCEI para publicar el escrito en los procedimientos
de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito.

Authorization and Disclaimer

Authors, Wilmer Atoche, Gloria Milla, Marlene Silva & Walter Silva authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings.
Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.