

# Ruteo costo-efectivo para la supervisión de un sistema de formación flexible para población vulnerable de la costa norte de Colombia

Rueda Gómez, Leidy Marcela, Ingeniera Industrial<sup>1</sup>, Porto Solano, Andrés Felipe, Magíster en Ingeniería Industrial<sup>2</sup> y Porto Solano, Roberto Porto, Magíster en Desarrollo de Software<sup>3</sup>  
Corporación Universitaria Americana, Colombia, [rueidaleidy@coruniamericana.edu.co](mailto:rueidaleidy@coruniamericana.edu.co)<sup>1</sup>, [aporto@coruniamericana.edu.co](mailto:aporto@coruniamericana.edu.co)<sup>2</sup>, [rporto@coruniamericana.edu.co](mailto:rporto@coruniamericana.edu.co)<sup>3</sup>

*Abstract– The Colombian Ministry of National Education assumes great challenges and focuses a special interest in responding to the interests and needs of the most vulnerable population. The Colombian north coast, in line with the work headed nationally by the Ministry of Education for the reduction of socio-economic gaps, promotes the Macro-Project called "FLEXIBLE TRAINING SYSTEM FOR THE VULNERABLE POPULATION THROUGH A DIALOGICAL, SYSTEMIC AND INTERDISCIPLINARY APPROACH SCI". This research project is conceived with the aim of modeling through mathematical programming a logistics strategy, which allows planning a cost-effective routing for supervisors to different routes of the towns involved in the Macro-Project for the Colombian north coast.*

*Keywords-- Cost-effective routing, Mathematical Programming, VRP, Flexible Education.*

## I. INTRODUCCIÓN

La educación es el pilar fundamental del desarrollo sostenible y sustentable de las comunidades, de ella se desprenden los principales avances que permiten que los ciudadanos se inserten en la vida social y comunitaria, así como de la organización del estado y su gestión como parte de la nación. En este sentido, los modelos educativos flexibles, como propuestas de educación formal, permiten atender a poblaciones diversas o en condiciones de vulnerabilidad, que presentan dificultades para participar en la oferta educativa tradicional.

Sin embargo, en Colombia hay actualmente 2.7 millones de personas analfabetas, lo que equivale al 5.8% de la población, según cifras del 2017 proporcionadas por (Cardona, 2017), y en la costa norte de Colombia, específicamente en el departamento del Atlántico (i.e., delimitación geográfica gubernamental), los índices de analfabetismo son muy altos (Gobernación del Atlántico, 2016). Ahora, para que la Unesco declare un territorio libre de analfabetismo la cifra debe estar por debajo del 4%, lo que quiere decir que para 2019 alrededor de un millón de personas deben ser alfabetizadas en Colombia.

El Macro-Proyecto “SISTEMA DE FORMACIÓN FLEXIBLE PARA LA POBLACIÓN VULNERABLE A TRAVÉS DE UN ENFOQUE DIALÓGICO, SISTÉMICO E INTERDISCIPLINAR SCI” busca contribuir e impactar significativamente la tasa de analfabetismo en la costa norte del país, a través de la incorporación del aprendizaje (jóvenes y adultos) de los ciclos de educación básica secundaria y de educación media en los municipios no certificados (i.e., pueblos que conforman un departamento) de esta zona de Colombia. Para un correcto desarrollo de este proyecto se

requiere que un personal supervisor evalúe de forma activa (i.e., constante y periódicamente) las actividades académicas, para ello, se necesitan rutas de viaje hacia todas las instituciones ubicadas en las inmediaciones de los municipios considerados en el Macro-Proyecto.

Considerando el escenario planteado previamente, este proyecto de investigación formula una estrategia logística que permite la planificación de un ruteo costo-efectivo para dicho personal. Como solución, se plantea un modelo de programación matemática resuelto a través de un algoritmo que considerando un conjunto de restricciones de acceso, movilidad y horarios de operación.

## II. EL PROBLEMA

Programar rutas para procesos de supervisión que evidencien el cumplimiento de las actividades de acuerdo a planes de estudios establecidos en distintos lugares puede parecer sencillo, sin embargo, cuando se lleva a la práctica, el tiempo y el costo se convierten en factores primordiales para su ejecución. Por tanto, el problema que aborda este proyecto de investigación consiste en modelar matemáticamente un ruteo costo-efectivo, teniendo en cuenta que no son consideradas las fluctuaciones de tiempo en los viajes entre nodos, las restricciones horarias de los supervisores y la flexibilidad por parte de la gobernación del departamento del Atlántico con los facilitadores (i.e., docentes encargados) en cuanto a la asignación de horarios de clase, entre otras. La solución del problema debe incorporar la modelación matemáticamente a través de programación entera que permita obtener rutas óptimas de supervisión (i.e., al menor tiempo y costo) a todos y cada uno de los municipios implicados en el Macro-Proyecto donde se encuentren los facilitadores impartiendo clases.

## III. DISCUSIÓN DE LA LITERATURA

En cuanto a la formulación de diferentes modelos matemáticos que permitan la optimización de variables como tiempo, distancia y/o costos, y el considerable esfuerzo realizado en el diseño de rutas, es posible encontrar una extensa literatura sobre problemas clásicos de ruteo, como el problema de enrutamiento de vehículos (En inglés conocido como Vehicle Routing Problem, VRP) o como el problema del agente viajero (En inglés conocido Traveling Salesman Problem, TSP). A continuación se presenta una breve discusión de la literatura estudiada.

Krstev D. et al., (2014) proponen, crear un conjunto de rutas y un conjunto para cada vehículo con su velocidad debido a que, un nodo puede designarse solo para un vehículo, pero el vehículo tiene más de un nodo y no presenta restricciones en el tamaño de la carga que el vehículo puede transportar, por tanto, la solución al problema da el orden en que cada vehículo debe visitar los nodos marcados, desarrollando un conjunto de rutas con gastos mínimos, donde el costo se pueda presentar en euros o dólares, la distancia o el tiempo de conducción. Por otra parte menciona que, si se limita la capacidad de varios vehículos y se fusiona con la posibilidad de tener necesidades variables de cada nodo, el problema se clasifica y se denomina Problema de enrutamiento del vehículo (VRP), o el problema del enrutamiento del vehículo, el cual es resuelto utilizando diferentes métodos de optimización como optimización dinámica, optimización lineal, teoría de gráficos, teoría de juegos, teniendo en cuenta para el criterio de optimización, el consumo mínimo de combustible.

Feillet et al., (2005) revisan la literatura existente y proponen un enfoque en TSPs con beneficios, que han sido ampliamente estudiados. El TSPs con ganancias pueden ser vistos como TSPs bicriterios, es decir, con dos objetivos opuestos, uno empujando al vendedor a viajar para recaudar ganancias y el otro incitar para minimizar los costos de viaje. Visto desde esta perspectiva, resolviendo TSPs con las ganancias deben resultar en la búsqueda de una solución no inferior a un conjunto de soluciones factibles tales que ni se puede mejorar el objetivo sin deteriorarse el otro.

En un conjunto de nodos, si  $m$  vendedores están ubicados en un solo nodo-depósito, los restantes que serán visitados, se denominan nodos intermedios, por ello, el mTSP consiste en encontrar rutas para todos los  $m$  vendedores, quienes comienzan y terminan en el depósito, de manera que cada nodo intermedio es visitado exactamente una vez, minimizando el costo total de visitar todos los nodos Tolgas Bektas, (2004). La métrica del costo se puede definir en términos de distancia, tiempo, entre otras.

En resumen, se hallaron distintos artículos en los cuales se muestra la literatura sobre el problema del agente viajero (TSP), y el problema de enrutamiento de vehículos (VRP), cada uno de estos con diferentes características asociadas a la solución óptima y posterior operacionalización de dichos problemas, mostrando la formulación de modelos matemáticos cuyas funciones de minimización.

#### IV. METODOLOGÍA

La metodología propuesta busca estructurar a través de programación matemática una estrategia logística de ruteo, permitiendo planificar un ruteo costo-efectivo de personal supervisor para distintos recorridos hacia los municipios y corregimientos del departamento del Atlántico implicados en el Macro-Proyecto. La subsección A presentará el enfoque y la manera para modelar la programación semanal de rutas de

supervisión, la cual mostrará la metodología de solución propuesta para resolver el problema abordado en esta investigación.

##### A. Programación semanal de rutas de supervisión

Esta subsección presentará las implicaciones que trae consigo la programación semanal de rutas de supervisión y las características asociadas a nuestro problema, (i.e., visitar al menos una vez al mes cada uno de los nodos para la supervisión y evaluación de las actividades académicas impartidas por los facilitadores) lo que nos hace preguntar: "¿Cuál es el conjunto óptimo de rutas para supervisores, que debe visitar un conjunto de nodos para la minimización de tiempo y costo?". Esta necesidad nos lleva a pensar como enfoque de modelamiento, y por tanto solución, en un VRP, problema de enrutamiento de vehículos, considerando a los supervisores como unidades móviles con capacidad limitada que deben visitar un conjunto de nodos, restringidos por tiempo.

La subsección B presentará un algoritmo para generar programación semanal de recorridos. Esta subsección está conformada a su vez por la subsección C, correspondiente al problema de enrutamiento de vehículos – VRP.

##### B. Algoritmo para generar programación semanal de recorridos

Entradas:

- Ubicación de las instituciones
- Cronograma de trabajo semanal por institución
- Restricción de transporte relacionada con horario y cobertura
- Matriz de tiempo entre nodos

En la tabla I, se presenta el algoritmo realizado para considerar variables de flexibilidad que permite la generación de recorridos durante la semana.

**TABLA I.** Rutina para generar programación semanal de recorridos (PSR)

<p><b>Algoritmo 1: Rutina para generar programación semanal de recorridos (PSR)</b></p> <p><b>Fase 1: Inicialización</b>  <i>Paso 1:</i> Declarar la información inicial de nodos.</p> <p><b>Fase 2: Generación de PSR</b>  <i>Paso 2:</i> Cruzar las programaciones semanales de clases con el número de instituciones por día de los corregimientos y municipios del departamento del Atlántico.            Para el cruce de horarios se debe tener en cuenta:            - Contemplar la información establecida en el archivo base adjunto correspondiente a los horarios de clases de todas las instituciones del departamento implicadas en el Macro-Proyecto.            - Garantizar que la programación semanal de recorridos relacione la visita a todos los nodos con todo el personal supervisor.</p> <p><i>Paso 3:</i> Aplicación del modelo VRP propuesto (subsección E).</p>
---

**Fase 3: Término**

Paso 4: Retornar rutas por facilitadores por días  
 $X_{ijd} \forall i \in I, j \in J, d \in D$

Debido a que las condiciones presentadas son bastantes flexibles, se ajusta el modelo con un algoritmo paso a paso que relaciona toda la información suministrada, correspondiente a las actividades del programa académico, garantizando que se realice una óptima programación semanal de recorridos.

Paso 1) Este primer paso se organizan todos y cada uno de los departamentos junto con las instituciones educativas que serán visitadas y se tiene en cuenta las restricciones que hay en términos de flota de transporte y horarios de los supervisores asignados al Macro-Proyecto educativo.

Paso 2) Este paso implica el cruce de horarios de trabajos correspondiente a dos vehículos, (i.e., los dos supervisores encargados), con el número de instituciones por día de los corregimientos y municipios del departamento del Atlántico.

Paso 3) Dentro de este paso se aplica el modelo VRP propuesto más adelante en la subsección C.

Paso 4) El objeto de este paso es la entrega de la programación semanal de rutas asociadas a los supervisores por día, buscando el cumplimiento oportuno de las visitas y evaluaciones en las instituciones educativas del departamento del Atlántico implicadas en el Macro-Proyecto en curso.

### C. Modelamiento matemático para el problema de enrutamiento de vehículos – VRP

A continuación se presentan los supuestos que considera el modelamiento matemático: (1) Los supervisores solo pueden trabajar 8 horas al día, pero es posible tener flexibilidad de extensión de jornada. (2) No son consideradas las fluctuaciones de tiempo en los viajes entre nodos (i.e., entre instituciones a visitar). (3) Los supervisores deben retornar al lugar de depósito (i.e., Barranquilla), una vez finalicen las visitas a todos los nodos. (4) No se asume que los supervisores tienen autonomía de transporte, lo que indica que no cuentan con un vehículo asociado. (5) La demanda asociada a cada uno de las instituciones a visitar está expresada en horas (i.e., representa el tiempo de supervisión) y que se asume igual para todos los nodos en 0,25 horas. (6) Aquellas rutas que se encuentren a más de 0,90 horas en tiempo de trayecto entre nodos distinto al origen (i.e., Barranquilla) son descartadas del conjunto de posibilidades de asignación. (7) Las estimaciones de los tiempos y distancias entre los nodos se realizan a través del servidor gratuito Google Maps.

### D. Formulación matemática del ruteo para programación semanal

#### Conjuntos

D Destino indexado por  $j \in \{1, 2, \dots, 35\}$

O Origen indexado por  $i \in \{1, 2, \dots, 35\}$

#### Parámetros

$T_{ij}$  Tiempo indexado por  $d \in \{0, 1\}$  para todos los arcos posibles entre origen y destino

$A_{ij}$  Matriz binaria para reducir el problema combinatorial  $\in \{1, 0\}$

$dda_j$  Demanda indexado por  $i \in \{1, 2, 3, \dots, 35\}$

Cap Capacidad

K Constante, número de supervisores

#### Variables

$U_j$  Variable auxiliar  $\in \mathbb{Z}^+$  para evitar subciclos

$U_i$  Variable auxiliar  $\in \mathbb{Z}^+$  para evitar subciclos

$X_{ij}$  Arcos de ruta asignada

#### Función Objetivo

$$\text{Min} \sum_{i \in O} \sum_{j \in D, i \neq j} T_{ij} * X_{ij} \quad (1)$$

#### Restricciones

$$\sum_{i \in O, i \neq j} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in D \quad (2)$$

$$\sum_{j \in D, j \neq i} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in O \quad (3)$$

$$\sum_{j \in D} X_{oj} \leq K \quad (4)$$

$$U_j - U_i + \text{Cap} * X_{ij} \leq \text{Cap} - dda_j - T_{ij} * X_{ij} \quad \forall i \in O, j \in D: i \neq j \quad (5)$$

$$dda_i \leq U_i \leq \text{Cap} \quad \forall i \in O \quad (6)$$

$$X_{ij} \leq A_{ij} \quad \forall i \in O, j \in D \quad (7)$$

La función objetivo minimiza (1) las asignaciones de nodos de origen y destino en función de los tiempos de enrutamiento. La restricción (2) garantiza que a un origen se le asigne un destino. La restricción (3) garantiza que a un destino se le asigne un origen. La restricción (4) garantiza que no se puede asignar un mayor número de rutas que el número de vehículos que se tiene disponibles. La restricción (5) evita que se hagan subciclos y que se generen, de acuerdo las restricciones de capacidad y demanda, el número de rutas adecuadas. La restricción (6) evita subciclos. La restricción (7) minimiza los arcos posibles y reduce el problema combinatorial. Lo que se busca con esta restricción es bloquear aquellas rutas que a priori son consideradas muy distantes, por tanto, se evita con esta programación que computacionalmente se evalúen rutas no óptimas.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta subsección se presentarán los resultados y la discusión obtenida al desarrollar el modelo matemático propuesto, dentro de la cual se conforma a su vez por las subsecciones F y G donde se mostrará la programación

semanal de rutas de supervisión y la propuesta de programación semanal de rutas con único supervisor.

### E. Programación semanal de rutas de supervisión

A continuación, se presentan una tabla ejemplo asociada a los recorridos diarios programados para el personal supervisor el día lunes, que de forma análoga se plantea para los días martes, miércoles, jueves, viernes y sábado.

**TABLA II.** Ruteo del día lunes para supervisores

DÍA	RUTA/ Supervisor	NODOS	TIEMPO (hr)		DISTANCIA (km)	
			Tiempo de supervisión por nodo	Tiempo total de supervisión	Distancia por trayecto	Distancia total recorrida
Lunes	Barranquilla - Juan de Acosta	Juan de Acosta	1,28		47,7	
	Acosta - Puerto Colombia	Puerto Colombia	1,47	3,27	34	100,6
	Colombia - Barranquilla	Barranquilla	0,52		18,9	
	Barranquilla - Sabanalarga	Sabanalarga	2,84		88,4	
	Sabanalarga - Barranquilla	Barranquilla	1,08	3,92	50,7	139,1
	Barranquilla	Barranquilla				

En la tabla II, se puede apreciar la programación semanal de rutas realizada para los dos supervisores. El tiempo de supervisión por nodo implica: tiempo de traslado entre las instituciones de un nodo (i.e., un único municipio) y adicionalmente, el tiempo de supervisión a facilitadores estipulado en 15 minutos o 0,25 horas. La distancia por trayecto hace referencia a los kilómetros recorridos entre instituciones, partiendo desde el punto de origen y retornando al mismo (i.e., Barranquilla). En esta se observa que el tiempo requerido para la operacionalización de actividades no superan las 8 horas laborales.

### F. Propuesta de programación semanal de rutas con único supervisor

A continuación, en la tabla III se presentará una propuesta para el recorrido semanal a todos los nodos e instituciones involucrados en el proyecto.

**TABLA III.** Ruteo semanal para único supervisor

DÍA	RUTA	NODOS	TIEMPO (hr)		DISTANCIA (km)	
			Tiempo de supervisión por nodo	Tiempo total de supervisión	Distancia por trayecto	Distancia total recorrida
Lunes	Barranquilla - Juan de Acosta	Juan de Acosta	1,28		47,7	
	Acosta - Puerto Colombia	Puerto Colombia	1,47	6,96	34	233,5
	Colombia - Sabanalarga	Sabanalarga	3,13		101,1	
	Sabanalarga - Barranquilla	Barranquilla	1,08		50,7	
	Barranquilla	Barranquilla				
	Barranquilla	Barranquilla				

Tal como se mencionó en la tabla 4 de ruteo por día para supervisores, esta tabla relaciona la misma información, sin embargo, al no superarse las 8 horas de jornada laboral contratada para los supervisores de este proyecto, un aspecto importante a resaltar es que se decide unificar la programación de recorridos diarios para la operacionalización con único supervisor. En este ruteo

semanal se puede observar que los días miércoles y jueves superan las horas asociadas a la jornada laboral (i.e., 8 horas diarias), aun así, esto no es una mayor restricción porque la labor de los empleados es sujeta a contrato por prestación de servicios.

## VI. CONCLUSIÓN

La programación incorpora la supervisión y evaluación a facilitadores y estudiantes pertenecientes al Macro-Proyecto, permitiendo mitigar los efectos negativos del sobre costo y la ineffectividad del personal supervisor. Estos efectos son generados por fenómenos predecibles como la asignación de clases en la semana y la flexibilidad de extensión de jornada de los supervisores y no predecibles como las fluctuaciones de tiempo en los viajes entre nodos (i.e., entre instituciones a visitar), la incertidumbre en la flota o sistema de transporte intermunicipal y/o el ausentismo no programado personal supervisor, que finalmente se traducen en sobrecostos de operación e ineffectividad. Por ello, se puede concluir que:

- El modelo matemático permite que se realice un ruteo para supervisión de actividades en 6 días de la semana, en relación a escenarios en donde es considerado la disponibilidad de dos supervisores.

- El modelo matemático sugiere como solución óptima la aplicación de la propuesta de programación semanal de rutas con único supervisor, reduciendo considerablemente el monto presupuestal hasta un 50%.

- Se identifica un punto óptimo de localización como nodo principal para futuros ruteos en el departamento: Sabanalarga.

## VII. REFERENCIAS

- [1] Cardona, L. S. (2017). En 2018 Colombia estaría libre de analfabetismo. Periódico *EL PAÍS*, p. 1-2.
- [2] Gobernación del Atlántico (2016). Plan de desarrollo 2016-2019. Programa *Atlántico líder*. p. 16-212.
- [3] Krstev, D., Pop-Andonov, G., Krstev, A., Dzidrov, M., Krstev, B., & Pavlov, S. (2014). The multiple travelling salesman problem and vehicle routing problem for different domestic drinks. *International Journal for Science, Technics and Innovations for the Industry MTM (Machines, Technologies, Materials)*, 22(3), p. 96-98.
- [4] Feillet, D., Dejax, P., & Gendreau, M. (2005). Traveling salesman problems with profits. *Transportation science*, 39(2), p. 188-205.
- [5] Bektas, T. (2006). The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 34(3), p. 209-219.