



## PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Proyecto Interno  Proyecto Semilla  Proyecto Junior  Proyecto Multi e Inter Disciplinario

Investigación Básica  Investigación Aplicada  Investigación Pedagógica  Innovación

**DEPARTAMENTO(S):**

**Departamento de Matemática / Centro de Modelización Matemática MODEMAT**

**LINEA(S) DE INVESTIGACIÓN:**

- 1. Optimización matemática y control**
- 2. Transporte y contaminación**

### 1 Proyecto de Investigación

**Título: Modelos de enrutamiento vehicular para la planificación de rutas y la asignación de carga a encuestadores en el INEC.**

**Resumen del proyecto (máximo 200 palabras)**

En este proyecto se propone el estudio teórico-aplicado de un problema de enrutamiento de vehículos (VRP) sujeto a restricciones de capacidad, ventanas de tiempo, depósitos múltiples y uso múltiple de los vehículos para la cobertura de rutas. En general, el VRP es un problema clásico de la Optimización Combinatoria que consiste en encontrar rutas para atender un conjunto de clientes empleando una flota de vehículos, de tal manera que se satisfagan requerimientos adicionales y se minimice alguna función objetivo, generalmente la distancia total recorrida por los vehículos o los costos operativos totales. Este tipo de problemas tienen diferentes aplicaciones prácticas en sistemas productivos y de manejo logístico, sistemas postales y de couriers, sistemas de transporte puerta a puerta, recolección de información y planificación de encuestas, entre otros. En esta investigación abordaremos un tipo de VRP que aparece en una aplicación práctica concreta, en el contexto de la planificación de rutas y asignación de carga a encuestadores del Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos (INEC). Los resultados de este proyecto serán aplicados en la determinación de rutas de los encuestadores para el cálculo del índice al precio del consumidor (IPC) y pueden ser replicados en otros problemas logísticos similares.

**Palabras clave (4-6):** Enrutamiento de vehículos, modelos de programación lineal entera y mixta



## 5.1 Objetivos

### 5.1.1 Objetivo General

Abordar desde un punto teórico y práctico un problema de enrutamiento de vehículos (VRP) capacitado con varios depósitos y uso múltiple de vehículos.

### 5.1.2 Objetivos Específicos

- Establecer un modelo matemático para el problema planteado.
- Estudiar la complejidad computacional del problema.
- Diseñar algoritmos eficientes para la solución del tema investigativo.
- Realizar experimentos computacionales usando datos relacionados a una aplicación práctica del problema: el diseño de rutas de recolección de datos y asignación de carga a encuestadores en el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC).
- Fortalecer los programas de posgrado del Departamento de Matemática, especialmente la Maestría en Optimización Matemática.

## 5.2 Relevancia de esta propuesta de investigación y su relación con la(s) Línea(s) de investigación asociadas.

Esta propuesta de investigación se encuentra enmarcada dentro de los objetivos y líneas de investigación del Departamento de Matemática de la EPN y del Centro de Modelización Matemática (ModeMat). En efecto, este proyecto contribuirá a la línea de investigación relacionada con los modelos de transporte y contaminación, que es de interés para el Departamento de Matemática. Por otro lado, contribuirá al área de Logística y Transporte del ModeMat y su línea de investigación de problemas de enrutamiento.

Además, este proyecto de investigación, al ser de carácter teórico-aplicado, concuerda plenamente con uno de los objetivos generales del Departamento de Matemática de la EPN: “realizar investigación pura y aplicada en matemática para aquellos campos del conocimiento que requieren el desarrollo estratégico de las fuerzas productivas y de servicios del país”. Finalmente, este proyecto brindará soporte al programa Maestría en Optimización Matemática al vincular como investigador al menos a un estudiante, quien trabajará conjuntamente con los profesores del Departamento de Matemática.

## 5.3 Productos esperados

- |   |   |
|---|---|
| a. Publicaciones científicas (obligatorio);   | ■ |
| b. Disertación a la Comunidad Politécnica;  | ■ |
| c. Proyecto de Titulación;  | □ |
| d. Tesis de Grado (maestría o doctorado);   | ■ |
| e. Aplicación tecnológica construida o implementada;                                    | ■ |
| f. Patente presentada;  | □ |
| g. Perfil de proyecto de mayor impacto científico, técnico, pedagógico o de innovación. | ■ |

## 5.4 Detalle de los resultados esperados (con relación a los objetivos)

- Este proyecto de investigación es de carácter teórico-aplicado. En la parte teórica se espera estudiar una variante de un VRP que no ha sido aún abordado en la literatura y por ende contribuir al desarrollo de la misma.
- Se espera desarrollar algoritmos eficientes para la solución del problema: heurísticas, Branch & Bound & Cut, Column Generation, etc.
- Se espera la vinculación de un estudiante de la recientemente creada maestría en Optimización Matemática de la EPN, para que realice su tesis respecto al tema de investigación de este proyecto.
- Como resultado de la investigación se espera escribir al menos dos artículos científicos con los modelos y métodos obtenidos a partir de la investigación.
- Dentro de la parte práctica se espera resolver el problema de diseño de rutas de recolección de datos y asignación de carga a encuestadores del INEC, demostrando la superioridad de la Programación Matemática frente al método empírico.



6	<p><b>Descripción, metodología y cronograma de trabajo</b></p> <p><b>Descripción del proyecto: (Máximo 2 carillas con metodología y diseño)</b></p> <p>En una gran cantidad de sistemas logísticos se debe considerar el problema de decidir las rutas óptimas entre puntos de una red. La asignación de estas rutas puede ahorrar cantidades considerables de tiempo y dinero así como determinar una adecuada organización para la prestación de un servicio.</p> <p>En particular, el problema de enrutamiento de vehículos, ha sido estudiado desde hace más de 50 años y ha mostrado tener una gran gama de aplicaciones y variantes que surgen cada día en los sistemas de manejo logístico.</p> <p>En este estudio, se propone el análisis teórico y práctico de una variante del problema de enrutamiento de vehículos. En la contraparte práctica, presentaremos el estudio del diseño de rutas de recolección de datos y asignación de carga a encuestadores para recolectar información asociada al Índice de Precios al Consumidor (IPC) por parte del INEC en varias ciudades de nuestro país. El IPC es un indicador económico que mide la evolución del nivel general de precios, correspondiente al conjunto de artículos (bienes y servicios) de consumo adquirido por los hogares del área urbana del país y su recolección se realiza de forma mensual.</p> <p>El problema de manera general consiste en la determinación de las rutas óptimas y asignación de tareas (carga) para los encuestadores. En este contexto, los encuestadores parten al inicio de su jornada desde un centro de operaciones. Empleando vehículos, ellos son transportados hasta puntos específicos donde inician rutas pedestres de recolección de datos. Terminadas estas rutas, los encuestadores son recogidos por los vehículos para ser trasladados ya sea a otros puntos donde pueden iniciar nuevas rutas pedestres, o al centro de operaciones, cuando su jornada haya finalizado. En la contraparte teórica, el problema se puede enmarcar dentro de dos tipos especiales de problemas de enrutamiento de vehículos: el problema de recolección y entrega (Static Pickup and Delivery Problem [2,9]) y el problema de enrutamiento de vehículos capacitado con uso múltiple de vehículos[8].</p> <p>Formalmente, definimos una <i>tarea</i> como la visita consecutiva de un encuestador (llamado en adelante agente) a varios negocios o almacenes para recoger información. Al realizar una tarea, el encuestador parte de un punto específico de inicio, recorre una ruta a pie visitando los negocios, y finaliza en otro punto luego de un tiempo determinado. De esta manera, una tarea está caracterizada por un punto de partida, un punto de llegada y una duración. En una primera versión del problema, consideraremos que todas las tareas han sido previamente asignadas a un conjunto de agentes. Definimos un grafo dirigido completo <math>G=(V, A)</math> donde el conjunto de vértices <math>V</math> contiene todos los puntos de partida y de llegada de las distintas tareas, además de un vértice específico que representa al centro de operaciones (en adelante llamado depósito). Cada arco en el conjunto <math>A</math> tiene asociado un costo, que representa el tiempo de viaje. Asociamos a cada vértice <math>i</math> en el conjunto <math>V</math> un valor de oferta, que corresponde a la cantidad de tareas que tienen al vértice <math>i</math> como punto de llegada (notar que este valor es igual a la cantidad de agentes que tendrán que ser recogidos en <math>i</math> por un vehículo). De manera similar, la demanda del vértice <math>i</math> es la cantidad de tareas que tienen al vértice <math>i</math> como punto de partida. El problema consiste en determinar rutas para una flota de vehículos para transportar agentes desde el depósito hacia los vértices del grafo, tal que se satisfagan la oferta y la demanda en cada vértice. Cada ruta debe iniciar y terminar en el depósito y debe respetar la capacidad del vehículo. Cada agente debe ser transportado desde el depósito hasta el punto de partida de su primera tarea asignada, luego desde el punto de llegada de su primera tarea hasta el punto de partida de su segunda tarea, y así sucesivamente. Al finalizar su última tarea, el agente debe ser transportado de regreso al depósito. Los transportes de cada agente pueden ser realizados por vehículos distintos. Finalmente, las rutas de los vehículos deben visitar los vértices del grafo en tiempos que sean compatibles con la duración de las distintas tareas programadas. Para este problema se pueden definir varias funciones objetivo, como por ejemplo minimizar el tamaño de la flota, minimizar la distancia total recorrida por la flota, o minimizar los costos operativos, entre otros.</p> <p>Adicionalmente, se considerarán los problemas de la asignación de las tareas a agentes para garantizar una carga balanceada de trabajo, y el cálculo de rutas (pedestres) óptimas de los agentes para la ejecución de las tareas. Se estudiará además una extensión del problema que considere la existencia de múltiples depósitos.</p> <p>Se formularán modelos de optimización para estos problemas, se desarrollarán algoritmos eficientes de solución y los mismos serán implementados computacionalmente. Finalmente, los algoritmos desarrollados serán probados sobre instancias reales provistas por el INEC para Guayaquil, Manta y Santo Domingo.</p>
---	---



• Metodología y diseño de la investigación

Se considera una variante de un problema clásico de la optimización combinatoria, el problema de enrutamiento de vehículos (VRP), donde un vehículo puede ser asignado a varias rutas [8]. Así, en el presente trabajo se estudiará una generalización del problema anterior conocida como el Problema VRP capacitado con varios depósitos con uso múltiple de vehículos. Este tipo de problemas aparecen en diversas aplicaciones prácticas, como aquellas descritas en las secciones anteriores. Estudios relacionados al problema VRP han sido extensamente reportados en la literatura. Trabajos iniciales sobre este tema fueron desarrollados a finales de la década de los cincuenta [4,5]. Durante las últimas décadas, diferentes generalizaciones han sido formuladas: el VRP capacitado [1], el VRP con ventanas de tiempo [10], el VRP con varios depósitos [6,7], o el VRP con flota heterogénea. En este proyecto planteamos realizar un aporte en el diseño de nuevas formulaciones y métodos de solución de estos problemas. Además, se propone la aplicación de los algoritmos diseñados a instancias de un problema real.

La metodología a emplearse en el presente proyecto es la usualmente aplicada en los proyectos de investigación en el campo de la optimización combinatoria. Así, nosotros seguiremos los siguientes pasos:

1. Realizar una completa investigación bibliográfica del estado del arte en cuanto a las técnicas y modelos de optimización usados en el estudio de las distintas variantes del problema de enrutamiento de vehículos y métodos de solución reportados.
2. Formular un modelo de programación lineal y entera para el problema VRP capacitado con varios depósitos y uso múltiple de vehículos.
3. Implementar el modelo propuesto en un solver de programación lineal y entera de código abierto (SCIP) y un solver comercial (GUROBI). Esta tarea es realizada para verificar la validez de la formulación.
4. Seleccionar instancias adecuadas y recopilar la información necesaria para la experimentación del modelo propuesto en base a los datos proporcionados por el INEC. A partir de estos experimentos computacionales el modelo será calibrado, y de ser el caso reformulado.
5. Estudiar teóricamente el modelo formulado, con el fin de identificar propiedades y estructuras especiales de la formulación que podrían ayudar en el diseño de algoritmos de solución. Esta actividad incluye el estudio teórico del poliedro asociado al problema, la demostración de desigualdades válidas y el desarrollo de algoritmos de separación de cortes. Los estudios anteriores pueden ser usados para diseñar métodos de solución basados en esquemas de Branch & Bound, Branch & Cut, planos cortantes o métodos heurísticos.
6. Implementar computacionalmente los algoritmos generados en el lenguaje de programación C++ y plataformas de programación entera.
7. Ejecutar experimentos computacionales basados en instancias reales y así obtener conclusiones sobre el desempeño de los algoritmos.
8. Producir al menos dos artículos científicos en revistas indexadas (ISI o SCOPUS) con los resultados del proyecto.
9. Presentar los resultados obtenidos en el presente proyecto en conferencias internacionales especializadas.

Referencias:

- [1] R. Baldacci, E. Hadjiconstantinou and A. Mingozzi, "An Exact Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem Based on a Two-Commodity Network Flow Formulation," *Operations Research*, Vol. 52, No. 5, 2004, pp. 723- 738.
- [2] Berbeglia, G., Cordeau, J. F., Gribkovskaia, I., & Laporte, G. (2007). Static pickup and delivery problems: a classification scheme and survey. *Top*, 15(1), 1-31.
- [3]Christofides, N. (1976). The vehicle routing problem. *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle*, 10(1), 55-70.
- [4] G. Dantzig and J. Ramser, "The Truck Dispatching Problem," *Management Science*, Vol. 6, No. 1, 1959, pp. 80-91.
- [5] G. Clarke and J. R. Wright, "Scheduling of Vehicle Routing Problem from a Central Depot to a Number of Delivery Points," *Operations Research*, Vol. 12, No. 4, 1964, pp. 568- 581.
- [6] G. Laporte, Y. Nobert, and D. Arpin. Optimal solutions to capacitated multi-depot vehicle routing problems. *Congressus Numerantium*, 44:283–292, 1984.
- [7] G. Laporte, Y. Nobert, and S. Taillefer. Solving a family of multi-depot vehicle routing and location-routing problems. *Transportation Science*, 22:161–172, 1988.
- [8] D. Taillard, G. Laporte, M. Gendreau, Vehicle routing with multiple use of vehicles, *Journal of the Operational Research Society* 47 (1996) 1065–1070.
- [9]Savelsbergh, M. W., & Sol, M. (1995). The general pickup and delivery problem. *Transportation science*, 29(1), 17-29.
- [10] M. Solomon, "Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Window Constraints," *Operations Research*, Vol. 35, No. 2, 1987, pp. 254-265.





7	<b>Fechas de inicio y fin</b>
	Inicio: 1 de febrero de 2016 Fin: 1 de febrero de 2018

8	<b>Tiempo de dedicación de docentes, infraestructura, equipos y fondos adicionales.</b>
	<b>8.1 Tiempo máximo de dedicación semestral del Director del proyecto, de los docentes participantes y otros colaboradores.</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Tiempos de dedicación semestral del Director de proyecto, de los docentes participantes y otros colaboradores.</li><li>- Dra. Sandra Gutiérrez (Directora): 400 horas</li><li>- Dr. Diego Recalde (Colaborador): 200 horas</li><li>- Dr. Ramiro Torres (Colaborador): 200 horas</li><li>- Dr. Luis Miguel Torres (Colaborador): 200 horas</li></ul>
	<b>8.2 Infraestructura y equipos</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Oficinas de trabajo para los participantes del proyecto</li><li>- Suministros básicos de oficina (EPN).</li><li>- Laboratorio del departamento de Matemática para digitación de bases de datos, equipado con 16 computadores.</li><li>- Biblioteca física y virtual de la EPN con acceso a algunas revistas y bases de datos especializadas (ver <a href="http://biblioteca.epn.edu.ec">http://biblioteca.epn.edu.ec</a>)</li><li>- Acceso al computador de alto rendimiento Quinde del Laboratorio Nacional de Cálculo Científico del ModeMat. Este sistema blade posee actualmente 3 chasis HP C7000, el primero alberga 7 servidores blades (5 blades HP ProLiant BL460c G7 y 2 blades HP ProLiant BL460c Gen8), el segundo chasis alberga 8 servidores blades HP ProLiant BL660c Gen8 de altura completa, en el tercer chasis se encuentran 16 blades BL460c Gen8, dos Storages de gran capacidad de almacenamiento (HP 3PAR 7200 Y HP 3PAR 7400), un front end (DL380e Gen 8), equipos de conectividad y administración local y remota.</li></ul>
	<b>8.3 Breve justificación del equipo requerido</b> <p>Se solicitan 4 computadores de escritorio, con la finalidad de proveer a los asistentes de investigación y colaboradores de computadores actualizados para la ejecución del proyecto. Se incluye además la adquisición de un proyector para la realización de sesiones de trabajo del proyecto.</p> <b>8.4 Fondos Adicionales</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Otros fondos de otros organismos (si los hubiere)</i></li></ul>

9	<b>Presupuesto estimado para la ejecución del presente proyecto (anual)</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Los costos para la elaboración del presupuesto estimado no deben incluir IVA.</i></li><li>- <i>Las maquinarias y equipos deberán tener una proforma local con un representante autorizado en el país.</i></li><li>- <i>En el caso de PIMI, se deberá aclarar en cual departamento permanecerán las maquinarias y equipos</i></li></ul>		
	<b><u>Primer Año</u></b>		
	Lista de ítems	Cantidad solicitada (US \$)	Porcentaje (%)



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**VICERECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN SOCIAL**

	1. Contratación Servicios Personales por Contrato <i>1 Asistente de Investigación (Estudiante de Pregrado)</i> <i>1 Asistente de Investigación (Estudiante de Maestría en Optimización Matemática)</i>	5180 14544	7 19
	<b>Subtotal</b>	19724	26
	2. Maquinaria y Equipos		
	4 computadores de escritorio	8282,40	11
	1 proyector	694.32	1
	<b>Subtotal</b>	8976.72	12
	3. Reactivos y materiales de laboratorio		
	<b>Subtotal</b>		
	4. Literatura especializada		
	<b>Libros para soporte de investigación</b>	<b>4000</b>	<b>5</b>
	<b>Subtotal</b>	<b>4000</b>	<b>5</b>
	5. Viajes técnicos y de muestreo		
	<b>Recolección de datos</b>	6000	8
	<b>Subtotal</b>		8
	6. Presentación de ponencias en congresos internacionales y publicaciones	12000	16
	<b>Subtotal</b>	<b>12000</b>	<b>16</b>
	<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>	<b>50700.72+ IVA</b>	<b>66%</b>
<b>9</b>	<b><u>segundo año</u></b>		
	Lista de ítems	<b>Cantidad solicitada (US \$)</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
	7. Contratación Servicios Personales por Contrato <i>1 Asistente de Investigación (Estudiante de Maestría en Optimización Matemática)</i>	14544	19
	<b>Subtotal</b>	14544	19
	8. Presentación de ponencias en congresos internacionales y publicaciones	12000	16
	<b>Subtotal</b>	<b>26544</b>	<b>16</b>
	<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>	<b>77244.72+ IVA</b>	<b>100</b>

<b>10</b>	<b>Lugar y Fecha / Firma del Director del Proyecto</b>	
	Quito, ...10... de ...julio.... del 2015  Nombre: Sandra Gutiérrez CC:1714305438	<b>Firma del Director</b>


**HOJA DE VIDA DEL DIRECTOR DEL PROYECTO**