



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**Propuesta de un modelo matemático para la optimización de los  
tiempos de evacuación del personal vulnerable ante emergencia  
volcánica en el área de influencia del volcán Tungurahua**

**VÍCTOR SANTIAGO SAIGUA PÉREZ**

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGÍSTER EN MATEMÁTICA MENCIÓN MODELACIÓN Y  
DOCENCIA**

**RIOBAMBA -ECUADOR**

**JUNIO - 2024**

Yo, Víctor Santiago Saigua Pérez, declaro que el presente Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que previenen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, junio de 2024



Víctor Santiago Saigua Pérez

0401210067

**©2024, Víctor Santiago Saigua Pérez**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

### EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Trabajo de titulación modalidad Proyecto de Investigación y Desarrollo, titulado: Propuesta de un modelo matemático para la optimización de los tiempos de evacuación del personal vulnerable ante emergencia volcánica en el área de influencia del volcán Tungurahua, de responsabilidad del señor Víctor Santiago Saigua Pérez, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

Lic. Carlos Eduardo Cova Salaya, M.Sc,  
**PRESIDENTE**



Ing. Yasmany Fernández Fernández, M.Sc,  
**TUTOR**



Dra. Narcisa de Jesús Salazar Álvarez, Mgtr,  
**MIEMBRO**

NARCISA DE JESUS SALAZAR ALVAREZ  
Firmado digitalmente por  
NARCISA DE JESUS SALAZAR  
ALVAREZ  
Fecha: 2024.06.14 19:50:55 -05'00'

Ing. Cristina Estefanía Ramos Araujo, M.Sc,  
**MIEMBRO**



Riobamba, junio 2024

## **DEDICATORIA**

A mi esposa Sofía Córdor por brindarme todo su apoyo y comprensión, a mis hijas Katherine y Camila que son ser siempre la luz que guían mis pasos y la fuerza para seguir siempre adelante.  
A mi madre por brindarme todo su apoyo y motivación.

Santiago.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por haberme brindado la oportunidad de alcanzar un objetivo más y cumplir una meta tan anhelada.

Al M. Sc. Yasmany Fernández Fernández por impartir todos sus conocimientos tiempo y paciencia durante todo el desarrollo de la investigación.

A los miembros del tribunal, Dra. Narcisa Salazar e Ing. Cristina Ramos quienes aportaron con sus ideas para poder desarrollar esta investigación.

Santiago.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....xiii

SUMMARY .....xiv

### CAPÍTULO 1

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Planteamiento del Problema .....	1
1.2	Formulación del problema .....	4
1.3	Preguntas directrices o específicas de la investigación .....	4
1.4	Justificación de la Investigación.....	5
1.5	Objetivos.....	5
1.5.1	<i>Objetivo General</i> .....	5
1.5.2	<i>Objetivos Específicos</i> .....	6
1.6	Hipótesis .....	6

### CAPÍTULO II

2	MARCO TEÓRICO .....	7
2.1.	Antecedentes.....	7
2.2.	Enfoques Matemáticos para abordar el Problema Principal .....	10
2.2.1.	<i>Optimización Lineal</i> .....	11
2.2.2.	<i>Modelo de Redes.</i> .....	13
2.2.3.	<i>Modelos optimización Multiobjetivo</i> .....	15
2.2.4.	<i>Modelo optimización estocástica</i> .....	16
2.3.	Comparación de enfoques de Modelos de optimización .....	22
2.4.	Comparación de Modelos de optimización con software de aplicación. ....	23
2.5.	Identificación de Variables.....	27

2.6.	Operacionalización de variables. ....	27
2.7.	Matriz de consistencia .....	29

### CAPÍTULO III

3	<b>METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>34</b>
3.1	Metodología.....	34
3.2	Tipos de Investigación .....	34
3.2.1	<i>Exploratoria.</i> .....	34
3.2.2	<i>Documental.</i> .....	34
3.2.3	<i>Analítico.</i> .....	34
3.3	Hipótesis de Investigación. ....	35
3.4	Diseño de la Investigación. ....	35
3.5	Esquema de optimización de tiempos ante evacuación volcánica. ....	36
3.6	Software para el análisis del modelo de optimización. ....	38

### CAPÍTULO IV

4	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>39</b>
4.1	Componentes del modelo.....	39
4.1.2	<i>Ubicaciones</i> .....	39
4.1.3	<i>Vehículos</i> .....	39
4.1.4	<i>Albergues</i> .....	40
4.2	Formulación del modelo. ....	40
4.3	Propuesta Prototipo plan de emergencias para la evacuación de personal vulnerable. .....	.....
	....	49
4.3.1	Objetivo. ....	49
4.3.2	<i>Esquema de actuación.</i> .....	49



4.3.3	<i>Descripción del riesgo</i> .....	50
4.3.4	<i>Vías de Evacuación</i> .....	51
4.3.5	<i>Zonas de seguridad</i> .....	51
4.3.6	<i>Cálculos tiempo de evacuación</i> .....	51
4.3.7	<i>Implantación</i> .....	52
4.3.8	<i>Simulacros</i> .....	52
4.3.9	<i>Recomendaciones</i> .....	52
4.4	<b>Validación de la Hipótesis</b> .....	52

## **CAPÍTULO V**

5.	<b>PROPUESTA</b> .....	54
5.1	<b>Descripción del modelo matemático propuesto para optimización de tiempos</b> ....	54
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	55
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	56

## **GLOSARIO**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Planes de contingencia trabajados por el SENPLADES .....	2
<b>Tabla 2-1:</b> Controles por parte del COE Tungurahua.....	2
<b>Tabla 1-2:</b> Estados de Alerta ante erupción volcánica.....	9
<b>Tabla 2-2:</b> Características de Enfoques de optimización.....	22
<b>Tabla 3-2:</b> Comparación métodos de optimización sobre software utilizado .....	23
<b>Tabla 4-2:</b> Operacionalización de la variable independiente .....	27
<b>Tabla 5-2:</b> Matriz de consistencia .....	28
<b>Tabla 6-2:</b> Operacionalización de la variable dependiente .....	29
<b>Tabla 7-2:</b> Modelos de evacuación.....	31
<b>Tabla 1-4:</b> Capacidad de Albergues .....	40
<b>Tabla 2-4:</b> Tiempo hacia los diferentes albergues (modelo 1).....	44
<b>Tabla 3-4:</b> Tiempo hacia los diferentes albergues con 4 vehículos (modelo 2) .....	47
<b>Tabla 4-4:</b> Tiempo hacia los diferentes albergues con 4 vehículos (modelo 3) .....	48
<b>Tabla 5-4:</b> Tiempo hacia los diferentes albergues con 4 vehículos (modelo 4) .....	48
<b>Tabla 6-4:</b> Comparación tiempos distintos modelos.....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Registro de Erupciones Volcánicas. ....	1
<b>Figura 2-1:</b> Zonas de riesgo volcán Tungurahua .....	3
<b>Figura 3-1:</b> Plan nacional de respuesta ante desastres ante una evacuación volcánica .....	10
<b>Figura 4-1:</b> Elementos de un modelo de programación lineal. ....	11
<b>Figura 1-2:</b> Algoritmo de Floyd .....	13
<b>Figura 2-2:</b> Descripción Programación con Restricciones .....	21
<b>Figura 1-3:</b> Optimización de tiempos ante evacuación Volcánica.....	36
<b>Figura 1-4:</b> Lugares o zonas de riesgo .....	39
<b>Figura 2-4:</b> Vehículos utilizados ante emergencia volcánica .....	39
<b>Figura 3-4:</b> Declaración variables parámetros optimización con restricciones .....	42
<b>Figura 4-4:</b> Asignación de datos forma aleatoria, distancias entre albergues .....	44
<b>Figura 5-4:</b> Sumatoria de Procesos máxima tarea .....	45
<b>Figura 6-4:</b> Verificación de restricciones .....	45
<b>Figura 7-4:</b> Asignación de Tareas a cada vehículo.....	46
<b>Figura 8-4:</b> Resultado optimización de recursos .....	46
<b>Figura 9-4:</b> Resultado optimización de tiempos .....	47

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A.** ASIGNACIÓN DE 1 RECURSO (VEHÍCULO) A CADA CANTÓN (CEVALLOS, PELILEO) Y 2 RECURSOS (VEHÍCULOS) AL CANTÓN (BAÑOS).

**ANEXO B.** ASIGNACIÓN DE 2 RECURSOS (VEHÍCULO) A CADA CANTÓN (CEVALLOS, PELILEO) Y 1 RECURSOS (VEHÍCULOS) AL CANTÓN (BAÑOS).

**ANEXO C.** ASIGNACIÓN DE 2 RECURSOS (VEHÍCULO) A CADA CANTÓN (CEVALLOS, PELILEO Y BAÑOS)

## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue desarrollar una propuesta de un modelo matemático para la optimización de los tiempos de evacuación del personal vulnerable ante una emergencia volcánica en el área de influencia del volcán Tungurahua, por lo que se realizó un análisis bibliométrico para recopilar información y datos que permitieron desarrollar el modelo propuesto, se utilizó un modelo de programación por restricciones que buscó minimizar el tiempo total para completar las tareas de evacuación asignando eficientemente los tiempos y recursos. Así también se desarrolló un plan de emergencia para la evacuación de personal vulnerable en donde se identificaron los roles para los diferentes actores en el proceso de información previo a una la asignación de recursos (vehículos) a los cantones para minimizar el tiempo de evacuación de personal vulnerable. Con este modelo, se pudo optimizar los tiempos asignados a cada una de las tareas para la distribución del personal vulnerable en diferentes ubicaciones en función de las capacidades de evacuación y las poblaciones. El modelo obtenido se lo desarrollo mediante el software AIMMS (Sistema Avanzado Integrado de Modelado Multidimensional), asegurando una respuesta más eficiente y rápida en situaciones de evacuación ante emergencias volcánicas en el área de influencia del volcán Tungurahua en Ecuador. El modelo fue adaptado para otros escenarios en los que se requiera distribución de recursos en situaciones de emergencia. Es importante tener en cuenta que el modelo tiene limitaciones y se requieren de más pruebas de evaluaciones cualitativas para establecer resultados óptimos.

**Palabras claves:** <MODELO MATEMÁTICO>, <ENFOQUES MATEMÁTICOS>, <PERSONAL VULNERABLE>, <EVACUACIÓN VOLCÁNICA>, <EMERGENCIA VOLCÁNICA>



Desarrollado por:  
CRISTHIAN FERNANDO  
CASTILLO RUIZ

0046-DBRAI-UPT-DP-2024

06-06-2024

## SUMMARY

The objective of this study was to develop a proposal for a mathematical model for the optimization of evacuation times of vulnerable personnel during a volcanic emergency in the area of influence of the Tungurahua volcano. A bibliometric analysis was carried out to gather information and data that allowed the development of the proposed model. A constraint programming model was used to minimize the total time to complete the evacuation tasks by efficiently allocating time and resources. An emergency plan was also developed for the evacuation of vulnerable personnel in which the roles of the different actors in the information process were identified prior to assigning resources (vehicles) to the cantons to minimize the evacuation time of vulnerable personnel. With this model, it was possible to optimize the time assigned to each of the tasks for the distribution of vulnerable personnel in different locations according to evacuation capacities and populations.

The obtained model was developed using AIMMS (Advanced Integrated Multidimensional Modeling System) software, ensuring a more efficient and rapid response in evacuation situations in volcanic emergencies in the area of influence of the Tungurahua volcano in Ecuador. The model was adapted for other scenarios requiring resource distribution in emergency situations. It is important to keep in mind that the model has limitations and further qualitative evaluation tests are required to establish optimal results.

**Keywords:** <MATHEMATICAL MODEL>, <MATHEMATICAL FOCUS>, <VULNERABLE PERSONNEL>, <VOLCANIC EVACUATION>, <VOLCANIC EMERGENCY>

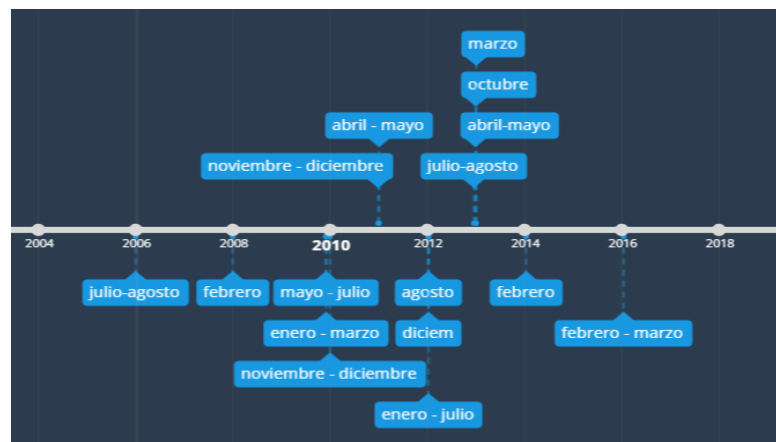
# CAPÍTULO 1

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del Problema

Las emergencias volcánicas son eventos de extraordinaria grandeza y riesgo que se producen como consecuencia del movimiento eruptivo de un volcán. Estas peculiaridades suponen un enorme peligro para las comunidades locales y exigen una reacción competente y rápida para limitar estas desgracias (Vera1 et al., 2023).

“Ecuador se encuentra dentro de una región con una alta actividad volcánica donde suponen un gran peligro para la población y requieren una protección en el proceso eruptivo para su evacuación”. Uno de los volcanes que hace varios años provoco graves daños en el país, durante su erupción fue el volcán Tungurahua como hace referencia (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2023). (Ramos 2022).



**Figura 1-1** Registro de Erupciones Volcánicas.

*Fuente:*(Proceso eruptivo, Ramos 2023),

Producto de estos eventos catastróficos explica (López Supe 2022), que estos sucesos provocan muertes, lesiones y daños a las personas más vulnerables, por lo que son obligados a movilizarse a lugares más seguros lo que implica desocupar sus viviendas produciendo para estas personas alteraciones en su sistema nervioso, como solución serían los albergues temporales para mitigar sus preocupaciones y evitar los problemas en su salud.

Cómo parte de alternativas ante estos eventos y crecimiento poblacional con el volcán Tungurahua, el SENPLADES (Secretaría Nacional de Desarrollo y Planificación) nos indica los temas que han trabajado ante estas emergencias.

**Tabla 1-1:** Planes de contingencia trabajados por el SENPLADES

<b>PLAN DE CONTINGENCIA</b>	<b>INTERVENCIÓN</b>
7 planes Cantonales	Ante amenaza volcánica en los cantones Tisaleo, Quero, Mocha, Cevallos, Patate Baños y Pelileo.
1 plan de Contingencia	En las áreas de trabajo principalmente operativas se encuentran las instituciones (ministerios) que van a intervenir en las diferentes situaciones de emergencia.
7 unidades Municipales de Gestión de Riesgo	Realizar actividades de prevención, reducción de riesgos, interactuando conas diferentes entidades encargadas de proporcionar información ante eventos volcánicos.

**Fuente:** Secretaría Nacional de Desarrollo y Planificación  
**Realizado por:** Saigua, Víctor, 2024

Y por su parte el COE (Centro de Operaciones de Emergencia) de Tungurahua mantiene los siguientes controles:

**Tabla 2-1:** Controles por parte del COE Tungurahua

<b>N°</b>	<b>Actividades</b>
1	Llevar la información actualizada proporcionada por los equipos EDANES e enviar a las salas de sistematización en los diferentes horarios.
2	Realizar seguimiento entre el MIDUVI con los GAD's en la legalización de viviendas para reasentamientos.
3	Informar a las parroquias sobre la llegada de brigadas de salud para la atención a familias de zonas afectadas.
4	Con los ministerios encargados de las obras realizar mantenimientos a las vías de evacuación.
5	Comunicación con el Ministerio de Inclusión Económica, donde se mantendrá el 100% de albergues operables.
6	Con la secretaria nacional de Riegos y ministerios de inclusión, entrega mascarillas en centros infantiles.
7	El comandante provincial de bomberos trabajará en conjunto con la Brigada Blindada Galápagos para organizar la configuración de los radios de comunicación, utilizando las frecuencias utilizadas por el SAT.
8	El MAGAP presentará un plan para trasladar el ganado de un lugar a otro de manera organizada y planificada.
9	La Subsecretaría de la Vicepresidencia se compromete a proporcionar los registros o recuentos de las personas con vulnerabilidad en las áreas de mayor riesgo a la SNGR, y a su vez, esta última los entregará a las MTT.
10	El COE Parroquial Cotaló presentará una copia de resoluciones a cada uno de los Coordinadores de las MTT, para atención de acuerdo a su competencia
11	La Dirección Distrital de Educación cuenta con el respaldo para permitir a los directores de los establecimientos educativos tomar la decisión de suspender las actividades académicas en caso de que haya algún impacto debido a la actividad eruptiva del volcán Tungurahua
12	Pedir a los COEs parroquiales y cantonales que envíen informes periódicos sobre la coordinación e intervención de las MTT.
13	Solicitar al MTOP que coordine con el Gobierno Provincial para llevar a cabo labores de mantenimiento en las carreteras de evacuación de las rutas Triunfo--Libertad.
14	El COE provincial, a través de la Gobernación, convocará reuniones en las Asambleas Parroquiales y Comunales con el fin de brindar información de la situación actual del volcán Tungurahua y los riesgos potenciales que pueden representar para aquellos que permanezcan en las zonas de peligro.

**Fuente:** Centro de Operaciones de Emergencia de Tungurahua  
**Realizado por:** Saigua, Víctor, 2024



Las zonas de riesgo identificadas antes una erupción volcánica proporcionada por su portal (IGEPN, 2023), hace referencia a:

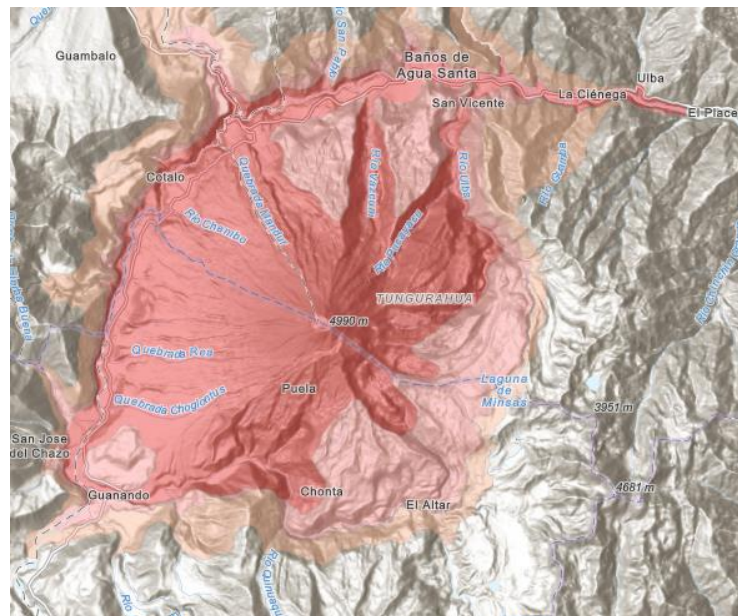
**Zona de mayor peligro.** Entre las zonas de alto riesgo aledañas al volcán tenemos: Los valles denominados:

- Al norte: Ulba / Vascún
- Al Nor Occidente: Juive Grande hasta Mapayacu
- Al Sur-Occidente: Poblaciones de El Salado, Bilbao, Puela y Palitahua.

**La zona de peligro intermedio:** Son las que se encuentran ahora en las planadas de los lugares de:

- En la parte Occidental de Baños Runtún y Pondoá,
- En la parte oriental de la ciudad de Baños en el flanco Norte,
- En el flanco Suroccidental Puela

**La zona de menor peligro:** Son las poblaciones de Cotaló, Puñapí, Altar, Pillate.



**Figura 2-1.** Zonas de riesgo volcán Tungurahua  
*Fuente:* (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2023).

Además, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Tungurahua en su portal nos indica que las vías de evacuación se encuentran en buen estado, lo que garantizará una correcta circulación de vehículos, y si hubiera modificación en los tipos de alerta en las poblaciones cercanas al volcán, se establecerán las siguientes rutas consideradas para la evacuación:

1. Guadalupe
2. San Javier
3. Puñapi
4. Lligua
5. Pitite
6. Ulba
7. El Triunfo
8. Patate
9. Puente San Francisco.
10. Cusúa – límite provincial con Chimborazo.

## **1.2 Formulación del problema**

¿Cómo un Modelo de optimización para evacuación de la población vulnerable de los cantones de Baños, Cevallos, Mocha, Quero, Pelileo, contribuye a mitigar los efectos causados por una emergencia volcánica, en el área de influencia del volcán Tungurahua?

## **1.3 Preguntas directrices o específicas de la investigación**

- ¿Cuál es la finalidad de diseñar un modelo de optimización para evacuación de la población vulnerable ante emergencia volcánica?
- ¿Cómo un modelo matemático mejoraría el proceso de evacuación de personal vulnerable ante una emergencia volcánica?
- ¿Existe un plan de emergencias para la evacuación basado en modelamiento matemático?

## **1.4 Justificación de la Investigación**

El objetivo de este análisis es contribuir y enriquecer las investigaciones existentes a nivel local y nacional en relación con la importancia de diseñar un modelo de optimización con énfasis en el manejo de emergencias. Para lograrlo, se empleará una metodología respaldada por un análisis exhaustivo de los datos disponibles, teniendo en cuenta tanto las particularidades de la población como la zona de estudio.

Para fines aplicativos, esta investigación busca disminuir tiempos de respuesta ante una evacuación que serán de gran utilidad para las autoridades de la provincia de Tungurahua en la toma de decisiones. Los resultados obtenidos podrán ser integrados en el plan de evacuación de personas vulnerables, especialmente por el crecimiento poblacional en las zonas circundantes, mejorando la seguridad de personal vulnerable de las comunidades aledañas.

Las personas que se beneficiarán de este estudio serán los pobladores vulnerables que residen a los alrededores del volcán Tungurahua. A través de la información recopilada y las soluciones propuestas, se espera mejorar la planificación y ejecución de medidas de protección y evacuación para salvaguardar la vida y el bienestar de estas poblaciones en caso de una situación de riesgo, este estudio también puede ser utilizado como base para otras provincias que tienen similares eventos, mejoras y posibles estrategias para las evacuaciones volcánicas para personal vulnerable.

## **1.5 Objetivos**

### ***1.5.1 Objetivo General***

Proponer un modelo matemático para la optimización de los tiempos de evacuación del personal vulnerable ante emergencia volcánica en el área de influencia del volcán Tungurahua.

### **1.5.2 *Objetivos Específicos***

- Realizar un análisis documental bibliométrico sobre modelos matemáticos útiles en la gestión de catástrofes naturales, focalizando las ocasionadas por erupción volcánica.
- Plantear un modelo de optimización matemática; que sea soporte en las decisiones de evacuación de personal vulnerable ante una erupción volcánica.
- Proponer un plan de emergencias para la evacuación de personal vulnerable ante un evento volcánico basado en modelamiento matemático.

### **1.6 Hipótesis**

Un modelo de optimización matemática mejora el tiempo de evacuación de personal vulnerable ante una emergencia volcánica en el área de influencia del volcán Tungurahua

En resumen, en el Capítulo I, se ha explicado la importancia del estudio de la investigación, estableciendo los principales objetivos que esta acarrea. Por otro lado, se hace énfasis en las zonas de mayor riesgo identificada ante una erupción volcánica; se propone una optimización matemática para intervenir en evacuaciones de personas vulnerables en el área afectada por emergencias volcánicas, particularmente en el volcán Tungurahua en el que facilitará un adecuado proceso al momento de gestionar las emergencias.

## **CAPÍTULO II**

### **2 MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes**

Una emergencia volcánica, como manifiesta, en su libro (Mothes et al. 2010) explica que son situaciones en donde existe una amenaza inminente relacionada con la actividad volcánica, donde se expone al peligro a las poblaciones aledañas, las que pueden ser afectadas dependiendo de la magnitud de la erupción, produciendo consecuencias como traslado de las poblaciones hacia refugios temporales movilizándose por rutas de escape minimizando los riesgos y maximizando la protección de las personas.

Recalcando (Vergara Perneth y Acosta Andrade 2019), manifestaban que las emergencias volcánicas son peligros que afectan a ciertas zonas donde se toman medidas que permiten dar respuestas rápida y apropiada durante un desastre que debe ser estudiado sobre un marco logístico para la atención de personal de forma presurosa, teniendo una asignación en el servicio de transporte en el menor tiempo evitando pérdidas humanas.

#### **Los procedimientos que han optado algunos países de Sudamérica:**

En el libro, (Morales y Ensenada 2021), realiza un estudio sobre algunos métodos que permitan anticipar el inicio de un evento eruptivo, se basó en el uso de un software para la extracción de datos de las estaciones registradoras. Una vez concluida la investigación se determinó que el método denominado DFA es más eficiente frente a otros métodos.

Con el estudio, (Perales-Palacios et al. 2021), se compara los diferentes eventos que puede ocasionar una erupción volcánica, la cual está aplicada para estudiantes secundarios, mediante la aplicación de modelos de representación a escala en 3D con escenarios similares a los eventos reales logrando una inclusión de educación sobre riesgos volcánicos con oportunidades para contribuir con conocimientos ante estos eventos catastróficos.

Con su artículo (Santana-Robles, Granillo-Macias, Armas-Alvarez y Rodríguez 2023), se estudia el impacto social o económico que sufren las poblaciones, con modelos matemáticos de evacuación con optimización, obteniendo como resultado que el 52% fueron investigaciones realizadas sin optimización matemática los cuales están enfocados a diferentes estrategias de evacuación como la incertidumbre en la predicción de desastres, y el 48% fueron estudios realizados con optimización matemática basados en algoritmos simuladores y variables, siendo este modelo el que tiene más interés de aceptación ya que, disminuye los tiempos de espera ante una evacuación.

(Delgado Bravo et al. 2022a) indica que una vez que haya ocurrido cualquier desastre natural, inmediatamente debe activarse el sistema de movilización de personas vulnerables ocasionada por cualquier desastre natural, prestando todos los recursos necesarios para su evacuación, este modelo se basa en parámetros y variables de decisión sobre centros de transferencia humana.

### **Los procedimientos que han optado a Nivel Nacional:**

Por su parte (Gallo Sánchez, Brayan Edmundo y Romero Patiño 2023) indican que de haber un evento volcánico del Cotopaxi produciría un incremento en el tráfico vehicular en las rutas de evacuación por lo que ocasionaría congestión y aumento de tiempos en la evacuación de personal”, para lo cual proponen un modelo de movilidad vehicular basado en simuladores donde intervienen: la tecnología como redes de comunicación, estaciones emisoras y receptoras de información; comprobando que al ser esto una simulación proporcionaron menor movilidad y mejora de tiempos en rutas de evacuación pero, debería comprobarse aplicando escenarios de la vida real.

En el análisis C(Carvajal, 2022), se resalta una investigación educativa sobre los procesos eruptivos del volcán Tungurahua mediante metodologías cualitativas como entrevistas a vigías a cargo del monitoreo, logrando con esto recopilar información de los saberes y transmitirlos por

cualquier medio a las autoridades para que puedan tomar decisiones acertadas en este tipo de eventos.

### ¿Cómo se procede a la evacuación ante una erupción volcánica?

La Secretaría de Gestión de Riesgos, en su “Plan nacional de respuesta ante desastres”, se obtiene un correcto procedimiento ante una evacuación se debe concientizar estos eventos partiendo desde el grupo familiar, población, realizando una comunicación con sectores públicos y privados para optimizar recursos / capacidades y culminando con autoridades encargadas de la evaluación de estos procesos.

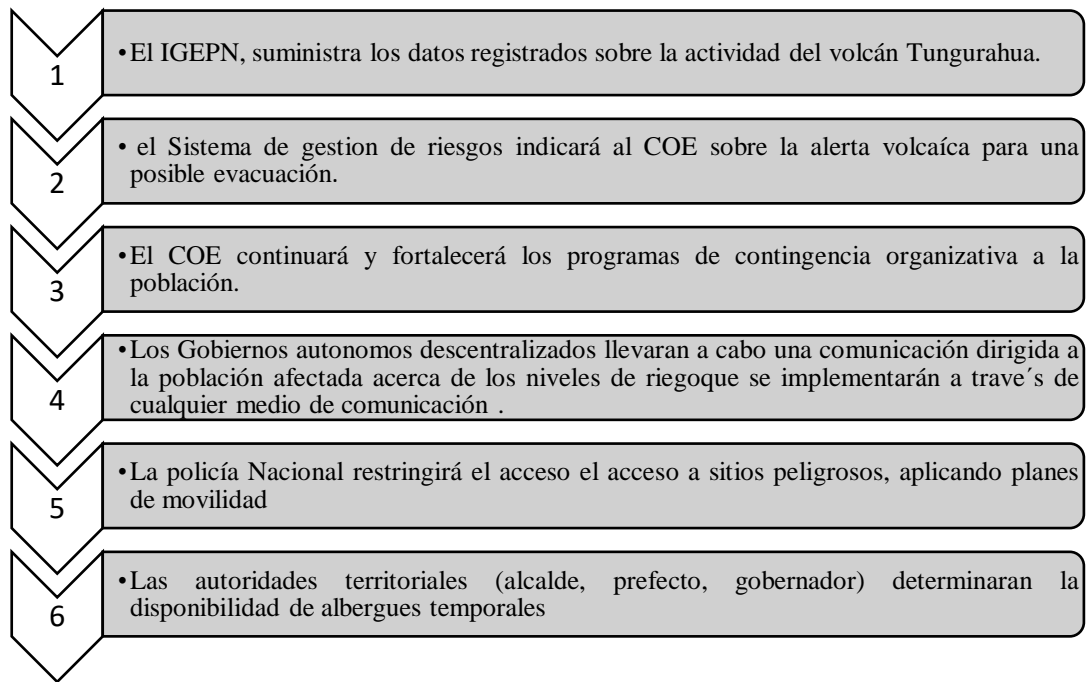
Para estos mecanismos de alerta se han establecido 3 niveles de estados, siendo catalogados por colores según su categoría:

**Tabla 1-2:** Estados de Alerta ante erupción volcánica

Evolución de estados de Alerta	
Color	Estado
Amarillo	Indican que en esta situación hay un evento bajo que afecte la población.
Naranja	Indican que la materialización es inminente. La posibilidad de eventos peligrosos a la población aumenta.
Rojo	La erupción se produjo monitoreando su impacto .

**Fuente:** Plan Nacional de Respuesta ante desastres  
**Realizado por:** Saigua, Víctor, 2024

La secuencia para la toma de decisiones ante una evacuación volcánica que refiere el Plan Nacional de Respuesta ante desastres (Secretaría de Gestión de Riesgos 2018) es:



**Figura 3-1.** Plan nacional de respuesta ante desastres ante una evacuación volcánica

*Fuente:* (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2018).

Esto garantizará que las personas se encuentren a salvo de cualquier peligro en las zonas establecidas como seguras, aquí se brinda un apoyo emocional ante situaciones adversas, asegurando que tengan lo necesario para sobrevivir para luego reconstruir sus vidas.

## 2.2. Enfoques Matemáticos para abordar el Problema Principal

Debido a los problemas que se encuentran en evacuaciones producidas por desastres naturales, como las erupciones volcánicas se han llevado a cabo capacitaciones sobre el volcán y sus fenómenos, sin embargo, la falta de retroalimentación, ocasionan confusiones en el campo de la educación. En base a lo mencionado, se vio necesario la utilización de modelos matemáticos de optimización, el cual permitió reducir tiempos y optimizar recursos, deduciendo que para la optimización estos se debe considerar los diferentes escenarios, métodos o técnicas para resolver dichos problemas y enfocarlos en estrategias y herramientas de solución, analizado por (Santana-Robles, Granillo-Macias, Armas-Alvarez y Beltrán Rodríguez 2023)

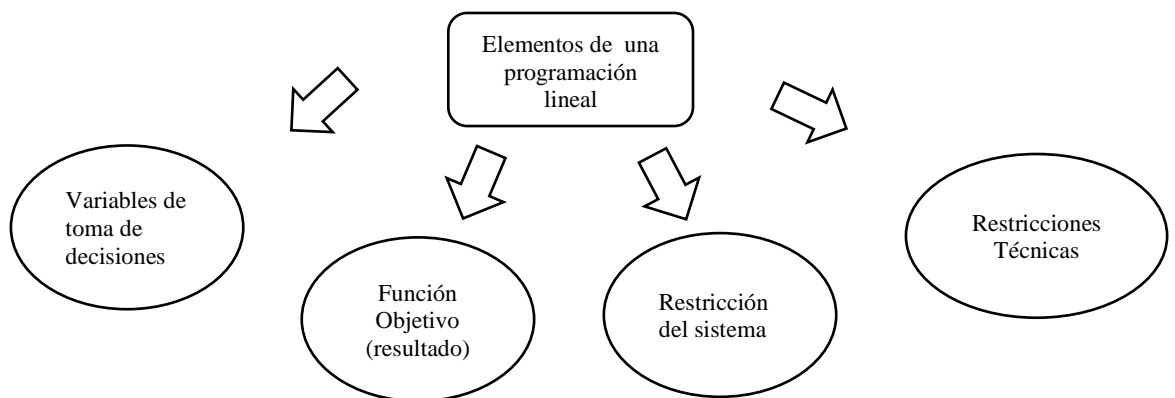


### 2.2.1. Optimización Lineal

La optimización lineal está vinculada con procesos que desarrollarán una maximización o minimización de una función lineal, basándose en restricciones a las que estarán sujetas las variables, aportando a modelos de balance, economía y análisis en estrategias, como lo sugiere (Carlos Espinoza, Ana Castillo 2020)

En este modelo matemático se aplican variables que presentan ciertas restricciones tomando valores aleatorios en la forma de plantear cada problema. Estos modelos según sus datos de variabilidad se presentan gráficamente una curva. Una característica en común de estos modelos es que los parámetros desconocidos son funcionales estimados por una muestra finita indica (Choque 2023) .

Otra manera de interpretar la programación lineal, de solución para la toma de decisiones que pueden ser utilizadas por ejemplo en la producción de textiles se aplica una función lineal con algunas condiciones obteniendo respuestas según casos reales con parámetros desconocidos. En donde la programación lineal son datos cuantitativos que indica la situación que se está investigando (Lluncor et al. 2020)



**Figura 4-1.** Elementos de un modelo de programación lineal.

*Fuente:* (Santana-Robles, Granillo-Macias, Armas-Álvarez, & Beltrán Rodríguez, 2023)

En la formulación del problema de programación lineal se considera que existe diversas formas de representar el problema siendo las más utilizadas la forma estándar/ canónica, en la

programación lineal estándar su función objetivo es la minimización en donde todas sus condiciones se presentan como desigualdades y todas sus variables son positivas, en cambio, la forma canónica depende si su resultado es minimización donde sus variables son no negativas y sus condiciones son mayor igual ( $\geq$ ), y para el caso cuando la función objetivo es maximizar las variables deben ser positivas pero, sus restricciones deben ser de tipo ( $\leq$ ), (Flores Rojas, Luigi Alejandro; Rojas Polo, 2019).

La representación de un modelo de programación lineal se presenta por matrices en este caso tenemos:

$$\text{Minimizar:} \quad Z = C^T X \quad (1)$$

$$\text{Sujeto a:} \quad D^T X = B \quad (2)$$

$$X \geq 0 \quad (3)$$

Dónde:

Z= Función Objetivo

C= Vector de las columna que contiene los “n” coeficientes

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

X= Vector de las columnas o denominado vector de decisión con sus “n” alternativas

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

D= Matriz de restricciones de orden m x n con coeficientes

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

B= Vector columna o lado derecho, que corresponde a los “m” requerimientos

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

Complementando:

$F$ = Conjunto factible para que cumpla la condición con  $F \neq 0$ :

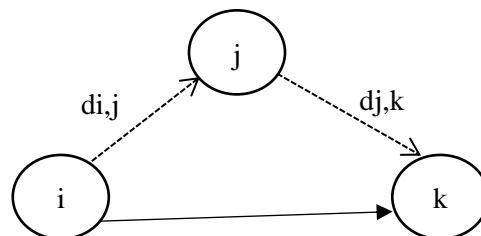
$$F = \{x \in R^n | Ax = B, x \geq 0\} \quad (8)$$

### 2.2.2. Modelo de Redes.

Para el análisis en el modelo de redes se establecieron puntos o nodos de referencia entre las zonas de evacuación entre un origen y un destino asignado entre ellos una distancia positiva, evaluando de esta forma una ruta más corta en cualquiera de los puntos que se conecten. Con el Modelo de Redes se establece minimizar distancias totales, costo de recursos, secuencia de actividades explicadas por (García Avellaneda 2019a).

A este método se aplica el algoritmo de Floyd que opera mediante la comparación de distancias entre todos los pares de nodos. En este contexto, consideramos tres nodos distintos, denotados como  $i$ ,  $j$  y  $k$ , y sus respectivas distancias:  $d_{ij}$  (distancia entre  $i$  y  $j$ ),  $d_{jk}$  (distancia entre  $j$  y  $k$ ) y  $d_{ik}$  (distancia entre  $i$  y  $k$ ).

Dados tres nodos  $i$ ,  $j$ ,  $k$  y sus respectivas distancias  $d_{ij}$ ,  $d_{jk}$  y  $d_{ik}$ , el algoritmo de Floyd actualiza las distancias entre los nodos  $i$  y  $j$  considerando la posibilidad de un nodo intermedio  $k$  tal que se verifique que  $d_{ik} \leftarrow \min(d_{ik}, d_{ij} + d_{jk})$ , o en otras palabras; se deberá establecer si la distancia:  $d_{ij} + d_{jk} < d_{ik}$  es la óptima, caso contrario se elegiría la distancia  $d_{ik}$  (Ver Figura 4-2).



**Figura 1 -2.** Algoritmo de Floyd

Fuente: (Diseño Plan de evacuación, 2019)

Según (Rivera, Heredia y Rica 2019) los modelos de redes son de tipo cuantitativo en donde se busca encontrar una ruta de evacuación más segura en un corto tiempo verificándose la población, cantidad de viviendas, lugares donde serán ubicados los refugios temporales.

Dichos modelos han sido analizados por medio de la herramienta en el empleo de sistemas de información geográfica (SIG) conocida como Network análisis, la cual permite determinar la mejor ruta en el menor tiempo posible, concluyendo que la evacuación de personal que se encuentre en zonas más alejadas puede ser óptima con este análisis.

Por su parte (Miños 2022) explica que del modelo de redes establece una ruta óptima de evacuación mediante enfoques estáticos y dinámicos como también determinísticos o estocásticos, este modelo utiliza interfaz soportado por su sistema Quadstone Paramics a través de la interfaz de programación PARAMICS, lo cual permite la integración de distintos escenarios y estrategias de evacuación, logrando una modelación de forma realista con circulación vehicular y peatonal ante eventos de emergencia donde el impacto de las estrategias desarrolladas es positivo, ya que no solo se busca mejoras en los tiempos sino orden en la evacuación.

Para la formulación matemática se realiza utilizando el tiempo en cada distancia, se explica cada restricción basada en el algoritmo de Floyd aplicado por (García Avellaneda 2019b), que indica que:

$X_{ij}$  = Cantidad de flujo de la distancia (i,j) donde el valor de 1 indica que el arco se encuentra en la distancia más corta y el valor de 0 indica lo contrario.

$C_{ij}$  = Longitud del arco (i,j).

La función objetivo del programa lineal es:

Presentando la 
$$Min \left[ \frac{\sum C_{ij}X_{ij}}{\text{todos los arcos definidos (i,j)}} \right] \quad (9)$$
 siguiente restricción

para la ecuación de la conservación del flujo en cada nodo:

$$\text{Flujo de entrada} = \text{Flujo de salida Total} \quad (10)$$

Matemáticamente para el nodo  $j$  se obtendrá:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Entrada externa} \\ \text{al nodo } j \end{array} \right) + \sum_{\text{arcos } (i,j)} X_{ij} = \left( \begin{array}{c} \text{Salida externa} \\ \text{del nodo } j \end{array} \right) + \sum_{\text{arcos } (j,k)} X_{jk} \quad (11)$$

### 2.2.3. Modelos optimización Multiobjetivo

En la revista (Calvo Uribe 2020), se referencia a evacuaciones de infraestructuras físicas que se hayan ocasionado por eventos sísmicos, en la que realiza decisiones bajo un modelo matemático de optimización multiobjetivo el cual se base en 3 objetivos: 1) Escuelas sanas y seguras, 2) Espacios óptimos para el aprendizaje, 3) Escuelas que se adapten a los reglamentos, con base a pesos ponderados tomar las decisiones más óptimas, concluyendo que esta metodología permite mejorar la toma de decisiones en cortos tiempos.

De la misma forma (VILLA 2020), se determina algunas formas de energía, uso óptimo de servicios externos y las especificaciones del sistema y a la vez tener en cuenta los objetivos económicos, ambientales y sociales, el cual aplica un modelo de algoritmos genéticos y programación lineal, indicando que este método de optimización multiobjetivo permite generar sistemas de cogeneración mediante la aplicación de curvas de Pareto, donde el investigador además de tener una decisión óptima, puede tener información de otros eventos la cual puede ser aceptada o no.

En la formulación del problema (Cárdenas 2020), indica proceso de optimización vectorial que puede simularse de la siguiente manera:

$$\text{Min}_x F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)] \quad (12)$$

$$g_j \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1, \dots, q \quad (14)$$

En dónde:

k: representa es el número de resultados,

m: restricciones (desigualdad)

q: restricciones (igualdad).

x: vector de variables es  $x \in \mathbb{R}^n$ , donde n es el número de variables independientes

$F(x)$ : vector de funciones objetivo,  $I$

Indicando que en la optimización multiobjetivo se encontró con múltiples soluciones en las cuales se deberá determinar la que más se ajuste a la solución deseada.

#### **2.2.4. Modelo optimización estocástica.**

En un estudio para la optimización de producción de ingresos económicos en áreas subterráneas donde se utiliza un modelo estocástico con algunas variables aleatorias utilizando simulación Monte Carlo para obtener un incremento en el ritmo de producción y por ende en la utilidad de la empresa (Vila Valenzuela y Zafra Siancas 2019)

En la modelación estocástica (Miños 2022), utiliza una micro simulación de tráfico, el cual realiza un modelamiento de evacuación de vehículos, obteniendo la maximización del número de evacuados con respecto al tiempo y una y minimización de tiempo necesario para evacuación vehicular.

Según (Vila Valenzuela y Zafra Siancas 2019), consideran que algunos de los parámetros del modelo estocástico, donde sus funciones son no lineales son difíciles de resolver con algoritmos básicos en tiempos reducidos, para la cual aplica la simulación de Monte Carlo, el cual evalúa

muchos escenarios con situaciones complejas y de alto costo computacional. Las variables por considerar se ajustan a distribuciones de probabilidad como Bernoulli, Binomial, Poisson, etc.

Para la formulación del problema (Ramos Andrés 2016), toma de decisiones relevante en base a minimización de costos donde se puede expresar.

$$\text{Min}_x E \left[ \sum_{t=1}^T c_t(X_t, \xi_t) \right] \quad (15)$$

En Dónde:

$x$ : es un vector de variables de decisión

$c_t(X_t, \xi_t)$ : es la función de costo en la etapa  $t$  que depende de las decisiones  $x_t$

$\xi_t$ : variables aleatorias asociadas a esa etapa

$E$ : representa el operador de esperanza matemática sobre todas las variables aleatorias  $\xi_t$

a lo largo de las etapas

Además, el problema debe cumplir con restricciones tanto a nivel de cada etapa como a nivel global:

$$\begin{aligned} \text{Sujeto a: } g_t(X_t, \xi_t) &\leq 0, & t=1,2,\dots,T \\ h(x) &\leq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Dónde  $g_t(X_t, \xi_t)$  son restricciones en la etapa  $t$  y  $h(x)$  son las restricciones globales.

### 2.2.5. Optimización Robusta.

Para la optimización robusta se ha trabajado con parámetros de incertidumbre el cual puede tener una solución incluso para el peor escenario incierto, es decir se puede encontrar una solución factible dentro de los criterios establecidos, pero estos modelos trabajando con instancias pequeñas se obtiene resultados óptimos con cortos tiempos de ejecución, pero al incrementar su

tamaño incrementó los tiempos en sus resultados, ocasionando elevados costos computacionales (Yelvita 2022).

Una posible solución puede darse ante peores escenarios sin importar la probabilidad, siendo esta optimización robusta, un nuevo método de soluciones determinísticas o estocásticas, en donde se garantizó un resultado óptimo, se espera que en el futuro este método de optimización pueda abarcar la mayoría de las problemáticas en sistemas de mayor dimensión en reducidos tiempos y costos (Aguilar, 2r22).

Un problema de programación lineal puede ser expresado de la siguiente manera (Consolación 2019).

$$\min c^s x \quad (17)$$

$$s. a \quad A^s x = b^s \quad (18)$$

$$x \geq 0$$

El problema de minimización o maximización relativo a la programación robusta sería

$$\min y \quad (19)$$

$$s. a \quad c^s x \leq (y + 1)z^s \quad (20)$$

$$A^s x = b^s$$

$$x \geq 0$$

Dónde  $c$  es un vector de coeficientes y  $x$  es un vector variable de decisión

$A$ : es una matriz.

$s$ : Vector de variables de holgura

$b$ : Vector de constantes

La restricción  $A^s x = b^s$  impone una relación lineal, de modo que su producto sea igual al vector  $b$ . Esto permite modelar las restricciones específicas del problema y limitar las soluciones factibles.



### 2.2.6. Programación Lineal en Enteros.

En la aplicación de esta programación lineal, se deduce que en un problema las variables de decisión toman únicamente valores entre 0 - 1, la que es aplicada para la resolución de problemas para la toma decisiones y entre su campo de aplicación se obtuvo: formulación de inversiones, planificación de turnos, diseño de producción, despachos de envíos, logrando una mejor asignación de cartera para una pequeña cantidad de variables (Callupe Artica Mireya Melany 2021).

De igual manera (Vasquez Cieza 2021), concluye que la programación lineal es una herramienta que en los últimos años ha tendido una gran aceptación ya que, ha permitido reducir costos y asignar óptimamente los recursos, estableciendo parámetros conocidos de decisión, restricciones y su función objetivo, logrando obtener una representación costos/beneficios rentables para las empresas.

Para el estudio de programación entera (Devia C 2011), se aplica una técnica denominada Gomory la cual platea la solución del problema mediante la relajación a las restricciones, ha permitido obtener una solución fraccional, fácil de resolver, aplica los métodos tablas Simplex y mediante iteraciones mejora continuamente la solución hasta encontrar la óptima, siendo esta de la siguiente manera:

En la aplicación de una programación lineal entera, se trabaja  $n$  variables y  $m$  restricciones, logrando hallar valores a las variables  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

$$(\text{máx o min}) Z = C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n \quad (21)$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq (\geq) (=) b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq (\geq) (=) b_2$$

.....

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq (\geq) (=) b_m \quad (22)$$

Dónde:

J: Es un subconjunto de  $\{1, \dots, n\}$ , restringiendo a tomar valores enteros.

Los problemas de programación lineal entera se pueden clasificar en tres tipos:

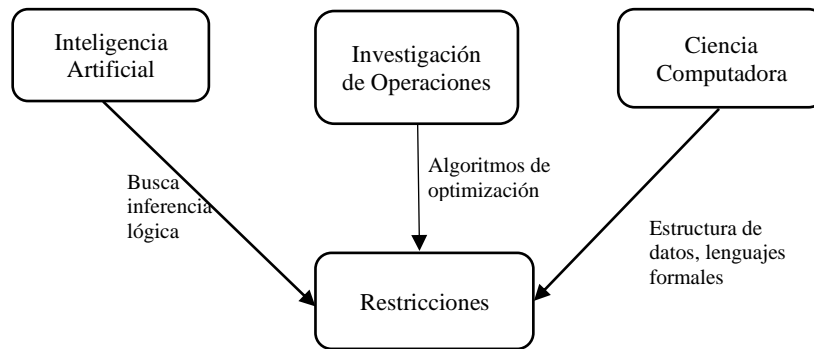
1. Problemas directos donde las variables de decisión son variables cuantitativas.
2. Problemas codificados cuyas variables de decisión son variables cualitativas y se cuantifican mediante variables binarias.
3. Modelos transformados donde se utilizan variables enteras facilitando así un mejor estudio del modelo.

#### 2.2.7. *Modelo de Optimización con restricciones.*

En este tipo de procesos permitió mejorar e incrementar la productividad para que sean más competitivas, pero en estos procesos existen restricciones que se convierten en cuellos de botella limitando obtener el resultado deseado, concluyendo que este método mejora la productividad no en todas sus fases sino en aquellas que requieran mayor atención (Enrique Soto-Chávez, William Ugalde-Vicuña III y Holger Zambrano-Silva 2021).

Por su parte, en su estudio (Mesa, Correa-Vélez y Barba-Ortega 2022), aplica el método de optimización por enjambre que considera desarrollar una amplia búsqueda de alternativas para el campo de la optimización.

En la formulación del problema, el método de Branch and Bound se considera efectivo para problemas combinatorios y puede adaptarse a una variedad de problemas de optimización. Se utiliza en combinación con otros métodos, como programación lineal o métodos heurísticos, dependiendo de la naturaleza específica del problema, se basa en ramificación de la relajación lineal entero para encontrar el valor deseado. En la programación con restricciones se observa la siguiente descripción (Calleja Mirasierra, 2020)



**Figura 2-2** Descripción Programación con Restricciones

Fuente: (Calleja Mirasierra, 2020)

El modelado de las variables se considera binario, entero y continuo, con restricciones en expresiones algebraicas, en tablas, en elementos, también restricciones lógicas, el cual en un problema de programación consiste en Minimizar, Maximizar (costos, tiempos) bajo restricciones temporales como de recursos, en donde su ejecución puede realizarse mediante una ejecución a la vez, varios procesos ejecutados en paralelo, bajo una programación preventiva y no preventiva. Denotando una función objetivo de la forma siguiente (Romero-Rojas, Ortiz-Triana y Caicedo-Rolón 2019):

Maximizar demanda de envíos

$$Max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T U_i * C_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^N Tr_{ip} * C_{ij} \leq T_d, \forall j$$

$$\sum_c x_{pc} \geq D_c, \forall c$$

$$C_{ij} \geq D_{ij} \quad \forall p, c$$

n estas expresiones:

$U_i$ : Producto fabricado

$D_{ij}$ : Demanda  $i$  en período  $j$

$T_{ip}$ :Tiempo requerido  $i$  en proceso  $p$

$T_{dpj}$ : Tiempo disponible de cada proceso  $p$  en  $j$

### 2.3. Comparación de enfoques de Modelos de optimización

Se presenta una comparación entre los distintos modelos de optimización matemática.

**Tabla 2-2:** Características de Enfoques de optimización.

Enfoques de optimización						
Optimización	Naturaleza de la incertidumbre	Objetivo	Toma de decisiones	Modelado de incertidumbre	Métodos comunes	Ejemplo
Optimización Lineal	Determinista	Maximizar o Minimizar	Decisiones determinísticas	No incorpora incertidumbre	Método simplex, programación lineal.	Asignación de recursos
Optimización Estocástica	Incertidumbre	Optimizar con incertidumbre	Decisiones probabilísticas	Incorpora incertidumbre	Programación estocástica	Gestión de cartera de inversiones
Optimización Multiobjetivo	Determinista	Optimizar múltiples objetivos simultáneamente	Considera múltiples objetivos con compromiso	Considera múltiples objetivos y sus ponderaciones.	Programación multiobjetivo, algoritmos evolutivos	Diseño de productos
Optimización con Restricciones	Determinista	Maximizar o minimizar una función lineal o no lineal	Decisiones determinísticas	No incorpora incertidumbre	Métodos de programación lineal y no lineal	Planificación de la producción
Optimización Robusta	Incertidumbre	Maximizar o minimizar bajo incertidumbre	Decisiones resistentes	Modelo de incertidumbre como un conjunto de valores	Programación robusta, teoría de juegos robustos.	Diseño de redes de transporte robustas.

Realizado por: Saigua, Víctor, 2024

## 2.4. Comparación de Modelos de optimización con software de aplicación.

Se describe una comparación de los métodos de optimización anteriormente analizados, en relación diferentes softwares de desarrollo.

**Tabla 3-2:** Comparación métodos de optimización sobre software utilizado

	Software aplicado	Costo/Beneficio	Ventajas	Desventajas	Sitio Web
Optimización lineal	IBM CPLEX Optimization Studio	Costoso / alto rendimiento.	Rendimiento óptimo, Capacidad de manejar problemas complejos. Amplia documentación	Costo elevado, no adecuado para proyectos de código abierto	<a href="https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer">https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer</a>
	Gurobi	Costoso, alto rendimiento	Rendimiento óptimo en problemas lineales grande, Amplia documentación y soporte técnico	Costo elevado, no adecuado para proyectos de código abierto	<a href="https://www.gurobi.com/">https://www.gurobi.com/</a>
	Microsoft Excel Solver	Gratuito	Integrado en Microsoft Excel.	Limitaciones en problemas complejos	<a href="https://support.microsoft.com/en-us/excel">https://support.microsoft.com/en-us/excel</a>
	MATLAB Optimization Toolbox	Requiere licencia de MATLAB.	Amplia funcionalidad en MATLAB, Soporte técnico de MathWorks, amplia comunidad	Requiere licencia de MATLAB	<a href="https://www.mathworks.com/products/optimization.html">https://www.mathworks.com/products/optimization.html</a>
	AIMMS	Gratuito para comunidad aplicado a la docencia	Plataforma de modelado y optimización que permite implementar una amplia variedad de métodos de optimización, Amplio soporte a la comunidad de usuarios	No ofrece acceso al código fuente, lo que limita la capacidad de personalización y adaptación avanzada del software.	<a href="https://www.aimms.com/">https://www.aimms.com/</a>
Optimización estocástica	IBM CPLEX Optimization Studio	Costoso, alto	Rendimiento óptimo en problemas estocásticos grandes. Capacidad de manejar problemas complejos con incertidumbre.	Costo elevado, no adecuado para proyectos de código abierto	<a href="https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer">https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer</a>

	-Gurobi	Costoso, alto rendimiento.	Capacidad de manejar problemas complejos con incertidumbre	Costo elevado, no adecuado para proyectos de código abierto.	<a href="https://www.gurobi.com/">https://www.gurobi.com/</a>
	R (con paquetes como "stochprog")	Gratuito (software de código abierto).	versátil para programación estocástica. Integración con paquetes estadísticos	Curva de aprendizaje en R.	<a href="https://www.r-project.org/">https://www.r-project.org/</a>
	SAS (utilizado para programación estocástica)	Costoso (requiere licencia de SAS).	Amplia funcionalidad para programación estocástica. Amplia documentación y soporte técnico de SAS	Requiere licencia de SAS.	<a href="https://www.sas.com/en_us/home.html">https://www.sas.com/en_us/home.html</a>
	AIMMS	Gratuito para comunidad aplicado a la docencia	Plataforma de modelado y optimización que permite implementar una amplia variedad de métodos de optimización, Amplio soporte a la comunidad de usuarios	No ofrece acceso al código fuente, lo que limita la capacidad de personalización y adaptación avanzada del software.	<a href="https://www.aimms.com/">https://www.aimms.com/</a>
	MOEA Framework	Gratuito,	versátil para optimización multiobjetivo. Capacidad de manejar problemas multiobjetivo complejos.	Limitaciones en términos de funcionalidad en comparación con soluciones comerciales	<a href="http://moeaframework.org/">http://moeaframework.org/</a>
Optimización multiobjetivo	MATLAB Multi-Objective Optimization Toolbox	Requiere licencia de MATLAB.	Soporte técnico de MathWorks, Soporte técnico y documentación en línea	Requiere licencia de MATLAB	<a href="https://www.mathworks.com/products/global-optimization.html">https://www.mathworks.com/products/global-optimization.html</a>
	NSGA-II (algoritmo evolutivo)	Gratuito (software de código abierto).	Implementa algoritmo NSGA-II altamente eficiente. Flexibilidad en la configuración de algoritmos	Requiere ajuste de parámetros para el rendimiento óptimo.	<a href="https://ieeexplore.ieee.org/document/9960">https://ieeexplore.ieee.org/document/9960</a>
	AIMMS	Gratuito para comunidad aplicado a la docencia	Plataforma de modelado y optimización que permite implementar una amplia variedad de métodos de optimización,	No ofrece acceso al código fuente, lo que limita la capacidad de personalización y	<a href="https://www.aimms.com/">https://www.aimms.com/</a>

			Amplio soporte a la comunidad de usuarios	adaptación avanzada del software.	
	IBM CPLEX Optimization Studio	Costoso, alto rendimiento.	Capacidad de manejar problemas complejos con variables enteras. Amplia documentación y soporte técnico.	Costo elevado, no adecuado para proyectos de código abierto	<a href="https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer">https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer</a>
	Gurobi	Costoso, alto rendimiento.	Rendimiento óptimo en problemas de programación lineal entera, Capacidad de manejar problemas complejos con variables enteras.	Costo elevado, no adecuado para proyectos de código abierto.	<a href="https://www.gurobi.com/">https://www.gurobi.com/</a>
Optimización lineal entera	GLPK (GNU Linear Programming Kit)	Gratuito (software de código abierto).	Gratis y de código abierto. Amplia comunidad de usuarios activa.	Menos eficientes en problemas masivos y complejos.	<a href="https://www.gnu.org/software/glpk/">https://www.gnu.org/software/glpk/</a>
	SCIP (Solving Constraint Integer Programs)	Gratuito (software de código abierto).	Implementa eficientemente algoritmos de programación lineal entera	Requiere ajuste de parámetros para el rendimiento óptimo.	<a href="https://www.scipopt.org/">https://www.scipopt.org/</a>
	AIMMS	Gratuito para comunidad aplicado a la docencia	Plataforma de modelado y optimización que permite implementar una amplia variedad de métodos de optimización, Amplio soporte a la comunidad de usuarios	No ofrece acceso al código fuente, lo que limita la capacidad de personalización y adaptación avanzada del software.	<a href="https://www.aimms.com/">https://www.aimms.com/</a>
Optimización Robusta	IBM CPLEX Optimization Studio	Costoso, alto rendimiento.	Rendimiento óptimo en problemas de optimización robusta. Capacidad de manejar problemas complejos con incertidumbre.	Costo elevado, no adecuado para proyectos de código abierto.	<a href="https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer">https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer</a>
	Gurobi	Costoso, alto rendimiento.	Rendimiento óptimo en problemas de optimización robusta.	Costo elevado, no adecuado para proyectos de código abierto.	<a href="https://www.gurobi.com/">https://www.gurobi.com/</a>

			Capacidad de manejar problemas complejos con incertidumbre.		
	Robust Optimization Library (ROL)	Gratuito (software de código abierto).	Implementar algoritmos robustos. Flexibilidad en modelado robusto.	Menos funcionalidad en comparación con soluciones comerciales.	<a href="https://www.ml.nccs.gov/rol/">https://www.ml.nccs.gov/rol/</a>
	Julia (con paquetes para optimización robusta)	Gratuito (software de código abierto).	Amplia comunidad de usuarios en Julia. Amplia documentación y paquetes para optimización robusta	Curva de aprendizaje en Julia	<a href="https://julialang.org/">https://julialang.org/</a>
	AIMMS	AIMMS	Gratuito para comunidad aplicado a la docencia	Plataforma de modelado y optimización que permite a los usuarios implementar una amplia variedad de métodos de optimización. Amplio soporte a la comunidad de usuarios registrados	<a href="https://www.aimms.com/">https://www.aimms.com/</a>
	IBM CPLEX Optimization Studio	Costoso, alto rendimiento	Rendimiento óptimo en problemas de optimización con restricciones, Amplia documentación y soporte técnico	Costo elevado, no adecuado para proyectos de código abierto.	<a href="https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer">https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio/cplex-optimizer</a>
	Gurobi	Costoso, alto rendimiento.	Rendimiento óptimo en problemas de optimización robusta. Capacidad de manejar problemas complejos con incertidumbre.	Costo elevado, no adecuado para proyectos de código abierto.	<a href="https://www.gurobi.com/">https://www.gurobi.com/</a>
Optimización con restricciones	Microsoft Excel Solver	Gratuito	Integrado en Microsoft Excel.	Limitaciones en problemas complejos	<a href="https://support.microsoft.com/en-us/excel">https://support.microsoft.com/en-us/excel</a>
	AIMMS	Gratuito para comunidad aplicado a la docencia	Plataforma de modelado y optimización que permite implementar una amplia variedad	No ofrece acceso al código fuente.	<a href="https://www.aimms.com/">https://www.aimms.com/</a>



de métodos de optimización,  
Amplio soporte a la comunidad de  
usuarios

Realizado por: Saigua, Víctor, 2024

## 2.5. Identificación de Variables.

Variable Independiente: Modelo de optimización matemática.

Variable Dependiente: Tiempos de evacuación.

## 2.6. Operacionalización de variables.

Tabla 4-2 Operacionalización de la variable independiente

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES	CRITERIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTO	ESCALA
Modelo de optimización matemática.	Es una herramienta o técnica que utiliza principios matemáticos para encontrar la mejor solución posible a un problema dado, sujeto a una serie de restricciones o limitaciones.	Sistema de Ecuaciones  Restricciones matemáticas	Procesos de modelación	Conjunto de instrucciones que un modelador ordena para ejecutar en un computador	Capacidad de aplicación del modelo  Interpretación y resultados	Simulación	Software	Análisis Funcionamiento

Realizado por: Saigua, Víctor, 2024

**Tabla 5-2** Matriz de consistencia

<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>CONCEPTUALIZACIÓN</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES</b>	<b>CRITERIO DE MEDICIÓN</b>	<b>TÉCNICA</b>	<b>INSTRUMENTO</b>	<b>ESCALA</b>
Tiempos de evacuación.	Estudia la optimización de sistemas que evolucionan en el tiempo. Se trata de guiar o controlar el sistema de manera óptima a lo largo de un horizonte temporal dado de acuerdo a un objetivo previamente fijado.	Optimización	Programación con restricciones	Herramienta matemática que ofrece soluciones a los problemas formulados en sistemas con restricciones	Método Simplex	Programación lineal	Software	De intervalo

**Realizado por:** Saigua, Víctor, 2024

## 2.7. Matriz de consistencia

**Tabla 6- 2** Operacionalización de la variable dependiente

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
¿Cómo un Modelo de optimización para evacuación de la población vulnerable de la parroquia contribuye para mitigar los efectos causados por una emergencia volcánica, en el área de influencia del volcán Tungurahua?	Proponer un modelo matemático para la optimización de los tiempos de evacuación del personal vulnerable ante emergencia volcánica en el área de influencia del volcán Tungurahua.	Un modelo de optimización matemática mejora el tiempo de evacuación de personal vulnerable ante una emergencia volcánica en el área de influencia del volcán Tungurahua	<b>V Ind.</b>	Programación con restricciones	Programación lineal	Software
			Modelo de optimización matemática			
			<b>V. Dep</b>	Adultos mayores	Análisis de documentos	Base de datos
			Tiempos de evacuación	Niños discapacidad		

Realizado por: Saigua, Víctor, 2024

Luego de haber realizado un análisis sobre los diferentes métodos de optimización matemática detallados en la tabla 5-2, se concluye que la optimización con restricciones nos presenta un enfoque más eficiente, se puede trabajar con diferentes variables y restricciones con datos determinísticos, obteniendo como resultado una fácil interpretación del problema ya que, permite su comprensión en la implementación de su solución y la aplicación en las diferentes áreas como: planificación de distribución, gestión de inventarios y especialmente logística humanitaria, puede aplicarse con la disponibilidad del software AIMMS (Sistema Avanzado Integrado de Modelado Multidimensional) especializada diferentes tipos de modelación y optimización permitiendo la integración de datos relacionados con el mundo real sin la necesidad de tener habilidades en programación, ofreciendo un soporte de asistencia a usuarios en línea lo que mejoró la comunicación para el área educativa y especialmente para el área industrial.

**Tabla 7-2:** Modelos de evacuación

<b>Autor (es)/Cita</b>	<b>Problema abordado</b>	<b>Área de aplicación</b>	<b>Método de solución</b>	<b>Función Objetivo</b>	<b>Resultado</b>
(Santana-Robles, Granillo-Macias, Armas-Alvarez y Beltrán Rodríguez 2023)	Evacuación de personas en la cadena de suministro humanitaria	Desastres Naturales	Modelo de optimización multiobjetivo	Minimizar tiempos de evacuación	Estudiar diferentes estrategias de evacuación considerando diferentes escenarios
(Miños 2022)	Plan de evacuación para aluviones	Aluviones	Optimización Estocástica	Maximizar número de evacuados y Minimizar tiempos de evacuación	Maximizar personal de evacuados y minimizar el tiempo para evacuar los recursos.
(García Avellaneda 2019b)	Evacuación en caso de emergencia por tsunami	Tsunami	Modelo de selección de rutas	Minimizar tiempos de evacuación	Optimizar una salida teniendo en cuenta las rutas adecuadas y lugar en que se encuentre el afectado
(Escudero 2021)	Optimizar las rutas de recorrido del proceso de recolección de desechos	Logística	Programación lineal entera binaria	Minimizar costo de servicio	Reducción de costos de operación en un 18.15%
(Delgado Bravo et al. 2022b)	Localización y ruteo vehicular.	Desastres Naturales	Modelo de optimización con restricciones	Minimizar costos logísticos de distribución de la ayuda humanitaria	Disminución tiempos de respuesta ayuda humanitaria, con diferentes escenarios el problema abordado puede aplicarse con modelos de optimización robustos o estocásticos que

(Vergara Perneth y Acosta Andrade 2019)	Logística el transporte y distribución de ayudas utilizando programación entera mixta.	Desastres Naturales	Modelo matemático de programación entera mixta	Optimizando el tiempo de entrega para atender las necesidades de las personas afectadas	Minimizar los tiempos de respuestas de los recursos al personal afectado.
(Verde et al. 2023)	Ayuda humanitaria ante un desastre natural	Eventos sísmicos Tsunami	Programación entera mixta	Maximizar número de viajes para distribución a puntos de entrega	Mejorar el modelo utilizado, los eventos reales
(Bravo 2019)	Rutas de evacuación en caso de inundaciones	Inundaciones	Modelo de selección de rutas	Minimizar los costos de traslado	La reducción de tiempos y costos sino también para el confort de los damnificados teniendo una atención en tiempo y forma.
(Felipe y Florez 2022)	Suministros en Eventos Disruptivos	Eventos disruptivos	Métodos de programación estocástico y robusto	Minimización de pérdida de recursos y costos	El método estocástico ayuda en el proceso, pero con el modelo de optimización robusta mejora en la toma de decisiones
(Mata 2022)	Distribución eléctrico ante una erupción volcánica.	Erupción Volcánica	Programación Lineal	Minimizar costos de energía no suministrada	Minimización de costos en pruebas y esperan en futuro aplicar a la vida real

---

**Fuente:** Centro de Operaciones de Emergencia de Tungurahua  
**Realizado por:** Saigua, Víctor, 2024

En el Capítulo II, se describe cómo diferentes autores presentan los procedimientos de evacuación ante emergencias, mostrando procedimientos que han adoptado para salvaguardar la vida humana, para nuestro caso la Secretaría de Gestión de Riesgo emite la información relacionada con el volcán Tungurahua estableciendo 3 niveles de estados categorizados por colores que indican la toma de decisiones ante una evacuación volcánica, además se analizan diferentes modelos matemáticos realizando comparaciones entre sus características y software de aplicación, con esto se estableció el modelo más óptimo para desarrollo de la investigación.

## **CAPÍTULO III**

### **3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

#### **3.1 Metodología.**

El presente estudio se apoyó en la metodología de la investigación de Sampieri, la que define a la hipótesis, como una “hipótesis de investigación, para estudios descriptivos”, analizando datos que se adapta a la elaboración de la investigación (Collado, 2014), con el objetivo de proponer un modelo matemático para la optimización de los tiempos de evacuación ante emergencias volcánicas:

#### **3.2 Tipos de Investigación**

##### **3.2.1 *Exploratoria.***

Debido a que se realizó una búsqueda de un modelo matemático que no ha sido estudiado muy a fondo, nos permitió de esta forma obtener información de datos posible que indican patrones que brindarán la explicación con sustento teórico y práctico, permitiendo desarrollar una propuesta de modelo matemático, logrando así el objetivo de este estudio.

##### **3.2.2 *Documental.***

Se recopiló información de investigaciones obtenidas de distintas fuentes bibliográficas textos, libros, revistas que permitió fundamentar teóricamente la investigación, así como establecer los requerimientos para una evacuación del personal vulnerable ante una emergencia volcánica y generar un modelo matemático.

##### **3.2.3 *Analítico.***

Este método permitió establecer los tiempos de respuesta en la evacuación del personal desde las distintas locaciones.



### **3.3 Hipótesis de Investigación.**

Se indica que no es una hipótesis estadística lo que se está tratando de comprobar si no se define como: “Proposiciones tentativas sobre las posibles relaciones entre dos o más variables”

(Collado, 2014).

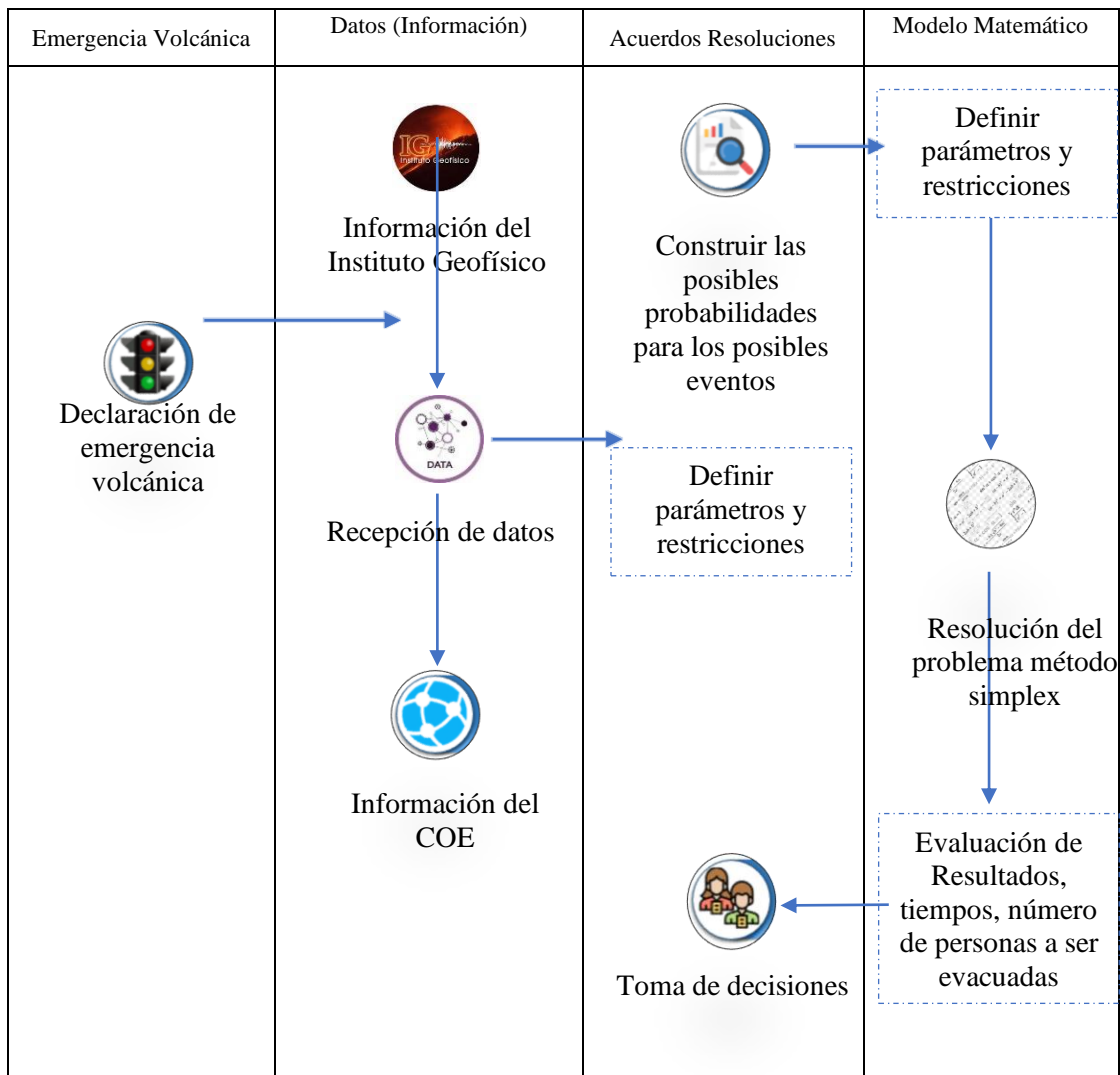
La siguiente hipótesis es de enfoque cuantitativo ya que tiene una función objetivo, la cual se obtiene datos empíricos para pronosticar resultados en sus variables.

Un modelo de optimización matemática mejora el tiempo de evacuación del personal vulnerable ante una emergencia volcánica en el área de influencia del volcán Tungurahua.

### **3.4 Diseño de la Investigación.**

Este estudio al ser no experimental y al ser de diseño transversal, es decir obtener datos en un instante se analizan las variables e interpretar su incidencia en ese momento específico. El objetivo final es verificar hipótesis planteada, utilizando datos observacionales como la asignación de diferentes rutas y recursos.

### 3.5 Esquema de optimización de tiempos ante evacuación volcánica.



**Figura 1 - 3.** Optimización de tiempos ante evacuación Volcánica  
*Fuente: (Propia)*

### **Declaración de Emergencia Volcánica:**

- **Objetivo:** Reconocer y declarar oficialmente el estado de emergencia volcánica.
- **Acciones:** Monitoreo continuo de actividad volcánica, Evaluación de riesgos y amenazas asociadas, comunicación y notificación a las autoridades pertinentes y al público.

### **Datos e Información:**

- **Instituto Geofísico:** Recopila y realiza un análisis de datos sísmicos, genera informes de alertas y situación del volcán Tungurahua distribuye los datos y otras fuentes relevantes, las cuales son entregadas al COE (Centro de Operaciones de Emergencia):

### **Acuerdos y Soluciones:**

- Evaluación de escenarios y probabilidades asociadas a diferentes eventos volcánicos.
- Identificación de áreas de riesgo y poblaciones vulnerables.
- Establecimiento de criterios, límites, en la toma de decisiones.
- Basado en análisis de la información, realizar una evaluación de riesgos, y escenarios probables, tomar decisiones informadas y estratégicas para gestionar la emergencia.

### **Modelo Matemático:**

- Establecer variables, parámetros, y restricciones para el modelo de optimización y planificación de evacuación.
- Aplicar técnicas de optimización para obtener la mejor estrategia de evacuación, asignación de recursos, y gestión de la emergencia.

### **Evaluación de Resultados:**

Analizar los resultados para establecer los tiempos de evacuación de personas vulnerables, rutas óptimas, tiempos de respuesta, y otros indicadores clave.

### **Conexiones y Enlaces:**

Establecer y mantener comunicación entre las diferentes fases y componentes de la metodología para garantizar una integración de datos, y coordinación efectiva entre las partes involucradas.

### **3.6 Software para el análisis del modelo de optimización.**

En el análisis se aplica el método cuantitativo y técnicas de análisis de minimización de tiempos mediante programación lineal definida por restricciones manejando el método simplex basado en un algoritmo complejo utilizado en optimización, la cual esta información es procesada por el software AIMMS (Sistema Avanzado Integrado de Modelado Multidimensional) versión 4.92.10.1 la que se dispone licencia gratuita para investigaciones educativas.

En el Capítulo III, se propone una investigación de un modelo matemático para optimizar tiempos de evacuación en situaciones de emergencias volcánicas, con una metodología de fase exploratoria en búsqueda de una optimización poco estudiada mediante una fase documental de diferentes fuentes bibliográficas con la presentación de un esquema estableciendo las conexiones y enlaces de los procesos de evacuación.

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Componentes del modelo.

##### 4.1.1 Ubicaciones



**Figura 1-4** Lugares o zonas de riesgo  
*Fuente: (Municipio Baños de Agua Santa, 2024)*

##### 4.1.2 Vehículos.



**Figura 2 - 4** Vehículos utilizados ante emergencia volcánica  
*Fuente: (Cuerpo de Compañía x1Tungurahua, 2024)*

### 4.1.3 Albergues

Tabla 1-4: Capacidad de Albergues

Albergues Cantón	Parroquia	Sector	Nombre de establecimiento	Capacidad por familia	
				Familia	Personas
Cevallos	Cevallos	Matriz	Albergue Cevallos Centro	57	227
Cevallos	Cevallos	Matriz	Albergue Cevallos la unión	57	227
Cevallos	Cevallos	Matriz	Albergue Cevallos Vines	57	227
Baños	Rio Negro	Vía Baños - Puyo	Coliseo Río Negro Centro	28	111
Baños	Rio Negro	Enrique Monje	Ex cibv nuevas Semillitas Casa Comunal	13	50
Pelileo	Huambaló	10 de agosto	Refugio	14	57
Pelileo	Cotaló	Vía a Riobamba Penipe	Refugio	17	69
Pelileo	Cotaló	Vía a Riobamba Penipe y las Queseras	Refugio Temporal	20	80

Fuente: Censo Ecuador 2022

Realizado por: Saigua, Víctor, 2024

## 4.2 Formulación del modelo.

El modelo matemático representa una optimización de tiempos en la evacuación de personal teniendo en cuenta algunas restricciones a considerar.

El modelo matemático que expresaría de una forma textual sería lo siguiente:

**Objetivo Principal:** Minimizar los tiempos de evacuación de todas tareas asignadas a cada recurso (vehículos).

### Conjuntos y Parámetros

*i*: Representa la cantidad de tareas.

*m*: Representa la cantidad de vehículos

*o*: Presenta los pedidos o recorridos

### **Variables de Decisión:**

“*Tarea(i,m)*”: Variable que representa la actividad asociada con la tarea *i* y el vehículo *m*.

“*duracionTareaConVehic(i,m)*”: Parámetro que indica la duración de la tarea *i* y el vehículo *m*.

“*Pedidos(i,o)*”: Variable que indica la secuencia de pedidos para la tarea *i*.

“*FechaTopeMaxima*”: Parámetro que establece la fecha tope máxima.

### **Función Objetivo:**

Minimizar el tiempo total de evacuación, que se expresa como la suma ponderada de los tiempos de viaje multiplicados por la cantidad de personas que se están moviendo en ese tramo.

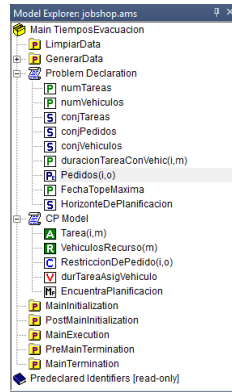
$$\text{Minimizar} \left( \text{Max} \left( \sum_i \sum_m Tarea_{im} \right) \right)$$

### **Restricciones:**

$$\sum_i \sum_o Tarea(i, Pedidos(i, o)) \leq Tarea(i, Pedidos(i, o + 1))$$

Para la elaboración del modelo matemático se establece las Tareas como: los pedidos hacia los albergues donde deben realizar las evacuaciones y los vehículos hacia los lugares iniciales donde se procede la evacuación del personal vulnerable.

Para la minimización el resultado de la función objetivo aplicada en el software de modelación AIMMS es necesario describir algunos parámetros, conjuntos, variables en el cual se realizan algunas operaciones que describiremos:



**Figura 3-4** Declaración variables parámetros optimización con restricciones  
*Fuente: (Software Aimms, 2024 )*

### Parámetros:

"numTareas" (el número de tareas que se deben realizar).

"numVehiculos" (el número de vehículos disponibles para realizar las tareas).

"duracionTareaConVehic" (el tiempo que tarda cada tarea).

"FechaTopeMaxima" se define como la suma de estas duraciones de tareas más largas para cada vehículo en todas las tareas.

### Conjuntos:

“conjTareas”: Es un conjunto que representa las tareas, con índices  $i$  y  $j$ .

“conjPedidos”: Es un conjunto que representa los pedidos, siendo un subconjunto de los números enteros.

“conjVehiculos”: Es un conjunto que representa los vehículos. "HorizonteDePlanificacion”: Es la programación de tareas la cual asegura que todas las tareas puedan completarse dentro del límite de las actividades asociadas

### Actividad:



“Tarea(i,m)”: Representa el tiempo de finalización de la actividad de movilización hacia los albergues

**Recurso:**

“VehiculosRecurso(m)”: Es un recurso que se utiliza para programar las tareas según la disponibilidad de vehículos.

**Restricción:**

“RestriccionDePedido(i,o)”: Es una restricción que se utiliza para asegurar que los vehículos se utilicen en el orden correcto según la secuencia de pedidos.

**Variable:**

“durTareaAsigVehiculo”: Nos permite determinar el tiempo total para completar todas las tareas.

**Elemento parámetro:**

“Pedidos(i,o)”: Nos indica la secuencia de pedidos para la realización de las tareas.

**Programa Matemático:**

“EncuentraPlanificacion”: es el programa matemático que se utiliza para encontrar una solución de minimización del problema

En la realización de la solución aplicado en el software AIMMS en el árbol inicial del modelo quedaría de la siguiente manera:

Para la inicialización de modelo estableceremos 7 tareas con 3 vehículos ubicados uno en cada cantón

**Tabla 2-4:** Tiempo hacia los diferentes albergues (modelo 1)

		V-1	V-2	V-3
		Cevallos	Baños	Pelileo
1	Albergue1	5	52	26
2	Albergue2	10	57	31
3	Albergue3	15	62	35
4	Rio Negro	130	5	36
5	Casa Comunal	140	10	40
6	Refugio1	28	34	5
7	Refugio2	30	38	10

Realizado por: Saigua, Víctor, 2024

Con la opción Generar Data:

```
GenerarData
Empty AllVariables, duracionTareaConVehic, Pedidos;
for (i,m) do
  duracionTareaConVehic(i,m) := Round(Uniform(10,100));
endfor;
for i do
  TempMachineSet := conjVehiculos;
  for o do
    TempIdx := Ceil(Uniform(0, Card(TempMachineSet)-0.00001)+0.00001);
    Pedidos(i,o) := Element(TempMachineSet, TempIdx);
    TempMachineSet -= Pedidos(i,o);
  endfor;
endfor;
```

**Figura 4-4.** Asignación de datos forma aleatoria, distancias entre albergues  
Fuente: (Software Aimms, 2024 )

Nos permite generar valores aleatorios para la asignación de duración de las tareas y la secuencia de pedidos, de esta forma se proporcionan datos iniciales para la aplicación del modelo, los datos o información se generan de manera aleatoria garantizando que las tareas tengan una duración y una secuencia de pedidos específicas.

En la opción FechaTopeMaxima:

Type	Parameter
Identifier	FechaTopeMaxima
Index domain	
Text	
Range	integer
Unit	
Default	
Property	
<input checked="" type="radio"/> Definition	<code>sum(i, Max(m, duracionTareaConVehic(i, m)))</code>
<input type="radio"/> Initial data	

**Figura 5-4.** Sumatoria de Procesos máxima tarea  
Fuente: (Software Aimms, 2024 )

Permite calcular la suma de las duraciones máximas de todas las tareas, representa el tiempo más tardío en que se puede completar todas las tareas.

Con la RestriccionDePedido(i,o):

Type	Constraint
Identifier	RestriccionDePedido
Index domain	<code>(i,o)   o &lt; Last(conjPedidos)</code>
Text	
Unit	
Property	
Definition	<code>cp::EndBeforeBegin( Tarea(i, Pedidos(i, o)), Tarea(i, Pedidos(i,o+1)))</code>

**Figura 6-4.** Verificación de restricciones  
Fuente: (Software Aimms, 2024 )

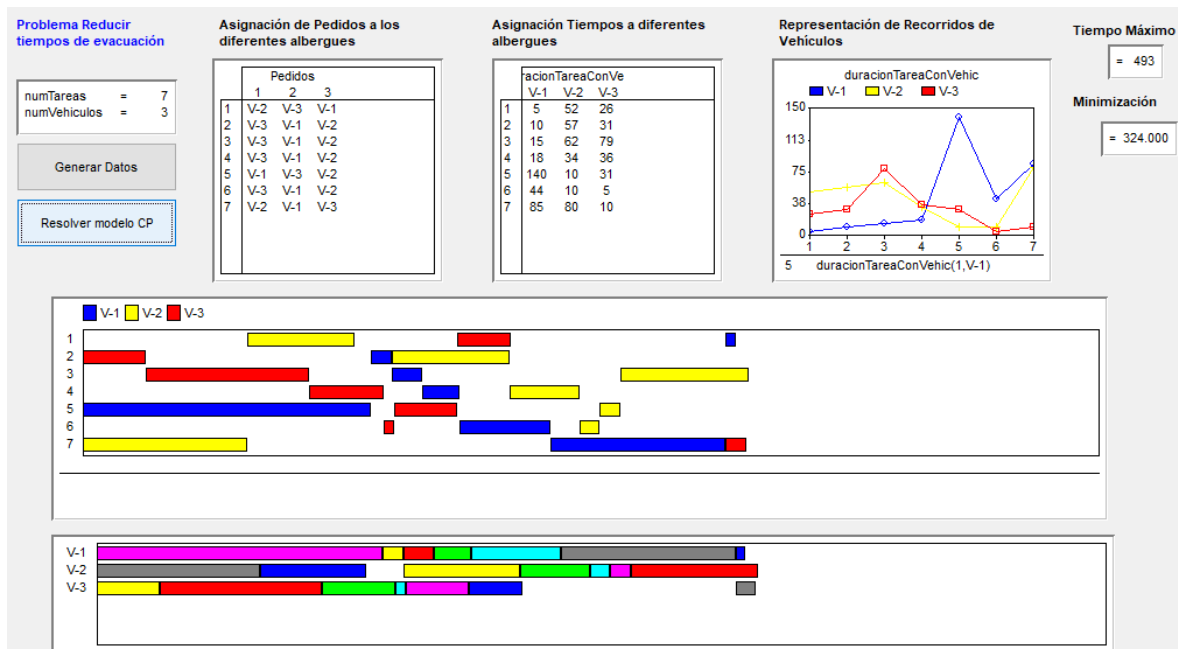
Asegura que los vehículos se utilicen en el orden correcto de acuerdo con la asignación

En la variable durTareaAsigVehiculo:

Type	Variable
Identifier	durTareaAsigVehiculo
Index domain	
Text	
Range	free
Unit	
Default	
Property	
Priority	
Nonvar status	
Definition	$\text{Max}(i, m), \text{Tarea}(i, m).\text{End}$

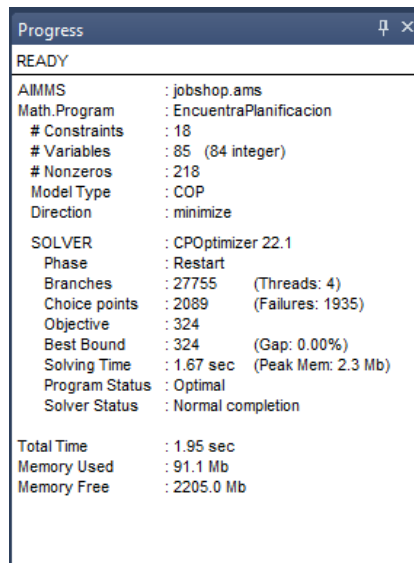
**Figura 7- 4** Asignación de Tareas a cada vehículo  
Fuente: (Software Aimms, 2024 )

Determina el tiempo total que se necesita para completar todas las tareas. Una vez ingresada la información podemos observar mediante su diseño de interfaz gráfica, la cual podemos generar datos de acuerdo a las diferentes necesidades, sea para la modificación de localizaciones o vehículos o generación de pedidos.



**Figura 8- 4** Resultado optimización de recursos  
Fuente: (Software Aimms, 2024 )

Alcanzando el objetivo deseado en la minimización de tiempos, según datos establecidos entre las diferentes localidades.



**Figura 9- 4 Resultado optimización de tiempos**

Fuente: (Software Aimms, 2024 )

Aplicaremos este modelo a diferentes casos para poder observar su comportamiento:

**Tabla 3- 4:** Tiempo hacia los diferentes albergues con 4 vehículos (modelo 2)

		V-1	V-2	V-3	V-4
		Cevallos	Baños	V-Baños	V-Pelileo
1	Albergue1	5	52	50	26
2	Albergue2	10	57	56	31
3	Albergue3	15	62	60	35
4	Rio Negro	130	5	4	36
5	Casa Comunal	140	10	9	40
6	Refugio1	28	34	33	5
7	Refugio2	30	38	30	10

Realizado por: Saigua, Víctor, 2024

**Tabla 4- 4:** Tiempo hacia los diferentes albergues con 4 vehículos (modelo 3)

		V-1	V-2	V-3	V-4	V-5
		Cevallos	Cevallos	Baños	V-Baños	V-Pelileo
1	Albergue1	5	10	52	50	26
2	Albergue2	10	15	57	56	31
3	Albergue3	15	10	62	60	35
4	Rio Negro	130	120	5	4	36
5	Casa Comunal	140	150	10	9	40
6	Refugio1	28	30	34	33	5
7	Refugio2	30	37	38	30	10

Realizado por: Saigua, Víctor,2024

**Tabla 5- 4:** Tiempo hacia los diferentes albergues con 4 vehículos (modelo 4)

		V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6
		Cevallos	Cevallos	Baños	V-Baños	V-Pelileo	V-Pelileo
1	Albergue1	5	10	52	50	26	30
2	Albergue2	10	15	57	56	31	36
3	Albergue3	15	10	62	60	35	40
4	Rio Negro	130	120	5	4	36	41
5	Casa Comunal	140	150	10	9	40	45
6	Refugio1	28	30	34	33	5	10
7	Refugio2	30	37	38	30	10	15

Realizado por: Saigua, Víctor,2024

Observaremos los tiempos máximos asignados a cada tarea en relación con las tareas minimizadas.

**Tabla 6- 4:** Comparación tiempos distintos modelos

Modelo	Tiempo Máximo Asignado	Tiempo asignado en la minimización de tareas	Tiempo Optimizado
1	493	324	169
2	533	328	205
3	525	443	82
4	525	438	87

Realizado por: Saigua, Víctor,2024

El modelo de optimización con restricciones es aplicado para poder planificar tiempos en evacuación en una situación de emergencia ante una erupción volcánica que depende de factores

como el número de tareas que se deben realizar, el número de vehículos que están disponibles, y el tiempo necesario para completar cada tarea, el objetivo del modelo es minimizar el tiempo total necesario para completar todas las tareas de evacuación con éxito minimizando los tiempos de evacuación a todas las personas, luego de que se procesen todos los datos y realizar cálculos complejos, se encontró un tiempo de reducción ante las tareas asignadas, lo que significa que este modelo es capaz de asignar eficientemente vehículos y recursos a diferentes tareas para minimizar el tiempo total necesario para completar la evacuación.

### **4.3 Propuesta Prototipo plan de emergencias para la evacuación de personal vulnerable.**

#### **4.3.1 Objetivo.**

El prototipo de plan de emergencias para evacuación de personal vulnerable se lo establece con la finalidad de crear criterios de evacuación, garantizando la atención oportuna a la población ante una erupción del volcán Tungurahua.

#### **4.3.2 Esquema de actuación.**

El Sistema de Gestión de Riesgo a través del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional IGEPN, proporciona los registros de información de actividad del volcán Tungurahua los cuales notificarán al COE (Comité de operaciones de emergencia) el tipo de amenaza con la finalidad de implementar si amerita o no una evacuación, el COE mantendrá y aplicará los planes de preparación organizacional y poblacional y los gobiernos autónomos descentralizados realizarán una comunicación a la población de la zona afectada, sobre el estado de alerta y medidas a ser aplicadas mediante boletines periódicos u otros medios, por su parte la policía Nacional restringirá el acceso a sitios peligrosos, aplicando planes de movilidad y con las autoridades territoriales (alcalde, prefecto, gobernador) determinarán la disponibilidad de albergues temporales

### **Sistemas de emergencia.**

Los servicios de Fuerzas Armadas, Policía Nacional y Servicios de Auxilio (ECU911) coordinan conjuntamente la movilización del personal a los distintos puntos de evacuación, restringiendo el acceso a zonas peligrosas.

### **Comités de Emergencia.**

Las autoridades de la provincia analizan la situación emergente y generan constantemente información veraz y oportuna a la población para mantenerlos informados.

#### **4.3.3 Descripción del riesgo.**

Se presentan los registros de monitoreos para poder enfrentar distintas situaciones como, ceniza, lahares, erupciones, de esta forma tomar acciones a seguir.

**Antes:** Se preparan los kits de emergencia, como linterna, botiquín, protección respiratoria (mascarillas), protección para ojos (gafas).

Se designa recursos (vehículos) a los cantones de Baños, Pelileo y Cevallos para el traslado de personal vulnerable.

**Durante:** Estar atentos a los diferentes comunicados oficiales para conocer la situación actual, buscar un refugio y alejarse de zonas restringidas.

Los COE cantonal genera la logística para la asignación de tareas (movilización a los albergues) en términos de distribución de número de personas en los vehículos, frecuencia de traslado a las locaciones, y selección del tipo de vehículo de acuerdo con la magnitud de riesgo.

**Después:** Mantenerse en zonas de seguridad, evitar conducir hacia lugares peligrosos, realizar solo llamadas de emergencia.

Los COE cantonal realizarán una evaluación del personal vulnerable trasladado a los albergues, para la asignación de recursos como alimentos y medicamentos necesarios.



#### 4.3.4 Vías de Evacuación.

El comité de operaciones establece las rutas ya determinadas en el plan, para proceder a la evacuación de las zonas de alto riesgo, intermedio y menor peligro.

#### 4.3.5 Zonas de seguridad.

Se realiza la distribución en las distintos albergues asignados tanto en el cantón Cevallos, cantón Baños y cantón Pelileo para la seguridad de la población.

#### 4.3.6 Cálculos tiempo de evacuación.

Aplicando el modelo de optimización con restricciones para la reducción de tiempos en la evacuación de personal vulnerable es el siguiente:

$$\text{Minimizar} \left( \text{Max} \left( \sum_i \sum_m Tarea_{im} \right) \right)$$

Variables:

$i$ : Representa la cantidad de tareas.

$m$ : Representa la cantidad de vehículos.

$o$ : Presenta los pedidos o recorridos.

Parámetros:

“ $Tarea(i,m)$ ”: Variable que representa la actividad asociada con la tarea  $i$  y el vehículo  $m$ .

“ $duracionTareaConVehic(i,m)$ ”: Parámetro que indica la duración de la tarea para la tarea  $i$  y el vehículo  $m$ .

“ $Pedidos(i,o)$ ”: Variable que indica la secuencia de pedidos para la tarea  $i$ .

“ $FechaTopeMaxima$ ”: Parámetro que establece la fecha tope máxima.

*Restricciones:*

$$\sum_i \sum_o \text{Tarea}(i, \text{Pedidos}(i, o)) \leq \text{Tarea}(i, \text{Pedidos}(i, o + 1))$$

Obteniendo tiempo de respuestas óptimas en relación con tiempos y recursos utilizados.

#### **4.3.7 Implantación.**

La implantación del plan de emergencia se da cuando se activen los procesos eruptivos, entregando la información necesaria como albergues y vehículos asignados a cada cantón, además realizando capacitaciones permanentes para un óptimo desarrollo de este.

#### **4.3.8 Simulacros.**

Se deben realizar simulacros como charlas, practicar salidas de emergencia para poder evaluar la respuesta en tiempos de evacuación de personal, asimismo establecer el número de vehículos con la capacidad necesaria para el traslado a los diferentes albergues que se asignen según las diferentes necesidades.

#### **4.3.9 Recomendaciones.**

Los planes de emergencia son de vital importancia ante una erupción volcánica, todo el personal inmerso como la población aledaña al volcán Tungurahua deben conocer con certeza que acciones tomar distinguir los lugares altos, medio y baja peligrosidad, mantener una señalización adecuada de los albergues, solo hacer caso de información que sea emitida por fuentes fidedignas, de esta forma cumplir con las expectativas planteadas y evitar condiciones desfavorables.

### **4.4 Validación de la Hipótesis.**

De acuerdo con los antecedentes proporcionados, se puede argumentar que para validar la hipótesis planteada en esta investigación no es necesario realizar una prueba de hipótesis estadística formal.

La estrategia de investigación empleada es "No Experimental" y del tipo "Aquí y Ahora", lo que implica que los datos obtenidos son generados a partir de la simulación de escenarios y no de la manipulación directa de variables en un experimento controlado detalla tabla 14-4. Según la clasificación de hipótesis propuesta por Hernández Sampieri (Collado, 2014), la hipótesis planteada en este estudio corresponde a una "Hipótesis de Investigación descriptiva de un valor o dato pronosticado", dado que se busca predecir el comportamiento de la variable dependiente (Tiempos de Evacuación) a partir de la manipulación de la variable independiente (Modelo de optimización matemática).

Con toda esta información recopilada y la solución propuesta se mejora la planificación y ejecución de los planes de protección y evacuación para garantizar la seguridad y el bienestar de estas comunidades en situaciones de riesgo.

En el Capítulo IV, se aplica un modelo con optimización con restricciones que busca minimizar los tiempos de evacuación de todas las tareas asignadas a cada vehículo durante una situación de emergencia causada por una erupción volcánica, el escenario más óptimo es cuando se asignan vehículos de manera eficiente para completar todas las tareas en el menor tiempo posible, Los resultados con las variables permiten la asignación de tareas a vehículos, secuencia de pedidos para cada tarea, y tiempos de evacuación calculados para cada escenario comparando los tiempos máximos asignados a cada tarea con los tiempos obtenidos tras la minimización, demostrando la efectividad del modelo en reducir los tiempos de evacuación.

## **CAPÍTULO V**

### **5. PROPUESTA**

Al ser una investigación exploratoria, documental, analítica en el presente capítulo se explica de mejor manera la propuesta, relacionando los objetivos para el diseño para la investigación desarrollada

Propuesta de un modelo matemático para la optimización de los tiempos de evacuación del personal vulnerable ante emergencia volcánica en el área de influencia del volcán Tungurahua.

#### **5.1 Descripción del modelo matemático propuesto para optimización de tiempos**

El uso de este modelo de optimización con restricciones tiene como finalidad reducir los tiempos de evacuación en una emergencia causada por una erupción volcánica. Este modelo ayuda a asignar de manera eficiente las tareas a cada vehículo para que todas se completen lo más rápido posible. Los resultados muestran cómo se distribuyen las tareas entre los vehículos, el orden en que deben realizarse y los tiempos calculados para cada escenario. Al comparar los tiempos máximos previstos para cada tarea con los tiempos optimizados, se demuestra que el modelo es efectivo en reducir los tiempos de evacuación. Con un buen plan de emergencia, se puede mejorar significativamente la evacuación del personal.

## CONCLUSIONES

- Se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva de los métodos y enfoques existentes los cuales fueron indicadores relevantes para el estudio a desarrollar en base a las necesidades establecidas, observándose una limitada aplicación de modelos matemáticos orientados a las evacuaciones volcánicas, esto puede deberse al alto costo que implica el estudio de las variables y el tiempo de ejecución.
- Se aplicó el modelo matemático de optimización mediante el software de aplicación AIMMS con base a una optimización con restricciones, planteado como función objetivo las variables (tiempo), la utilización de recursos (vehículos), debido a su adaptabilidad a la evacuación ante erupciones volcánicas, mejora en tiempos de programación y ejecución, logrando así anticipar y responder de manera proactiva a emergencias, evitando congestiones y maximizando la seguridad, con una optimización del 49% en tiempo, se traduce en una mejora en la gestión de procesos para salvaguardar la vida de la población del Ecuador.
- La propuesta de un plan de emergencia para la evacuación de personal vulnerable identifica el rol de los diferentes actores en el proceso de información. Se definió la necesidad de coordinación del plan de evacuación por parte de los comités de emergencia con instrucciones claras ejecutadas antes, durante y después de la evacuación, previa la asignación de recursos (vehículos) a los cantones para minimizar el tiempo de evacuación de personal vulnerable.

## RECOMENDACIONES

- El modelo es susceptible de mejoras, es importante ampliar la presente investigación con nuevas variables y diferentes escenarios así contribuir a la construcción de herramientas valiosas para prevenir pérdidas humanas.
- Considerando que el modelo propuesto como cualquier otro presenta limitaciones, pues asume ciertas condiciones y simplificaciones que podrían no reflejar totalmente la complejidad de una situación de evacuación real, es esencial aplicar este modelo bajo condiciones de procesos eruptivos reales para validar su funcionalidad y realizar los ajustes necesarios.
- El modelo propuesto se puede aplicar ante otros escenarios de riesgo como inundaciones, planificación urbana, y logística de eventos masivos, debido a su adaptabilidad, se recomienda la difusión y socialización de las bondades para salvaguardar la vida de las personas vulnerables.
- Efectuar campañas de divulgación y sensibilización a la población tungurahuese, del plan de emergencias para la evacuación de ante un evento volcánico, en especial énfasis a las poblaciones en situación de vulnerabilidad, para garantizar una actuación favorable y coordinada de la comunidad y autoridades.

## **GLOSARIO**

**Modelo matemático:** Herramienta que utiliza conceptos y técnicas matemáticas para representar y resolver problemas de manera sistemática.

**Optimización:** Proceso de hacer algo lo más eficiente o efectivo posible.

**Tiempos de evacuación:** Duración que se tarda en evacuar a las personas de una zona de peligro.

**Personal vulnerable:** Personas que tienen mayor riesgo en situaciones de emergencia, como ancianos, niños, y personas con discapacidades.

**Análisis bibliométrico:** Estudio que recopila y analiza datos e información de publicaciones científicas.

**Programación por restricciones:** Técnica de optimización que busca encontrar la mejor solución dentro de un conjunto de restricciones o limitaciones.

**Plan de emergencia:** Estrategia organizada para manejar situaciones de peligro y evacuar a las personas de manera segura y rápida.

**Roles de los actores:** Funciones y responsabilidades de las personas involucradas en el proceso de evacuación.

**Capacidades de evacuación:** Habilidad o infraestructura disponible para evacuar a las personas de una zona de peligro.

**Software AIMMS (Sistema Avanzado Integrado de Modelado Multidimensional):** Herramienta de software utilizada para desarrollar y resolver modelos matemáticos complejos.

**Distribución de recursos:** Asignación y uso eficiente de los elementos necesarios para llevar a cabo una tarea o enfrentar una emergencia.

## BIBLIOGRAFÍA

**AGUILAR SIERRA, Juan Esteban.** Despacho Económico Robusto ante Fuentes Renovables Intermitentes con Incertidumbre. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de Antioquia. Medellín-Colombia 2022. pag.10 [Consulta: 2023-10-17]: Disponible en: [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/28374/2/Sierra-Aguilar\\_Juan\\_2022\\_robusta\\_afin\\_ajustable.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/28374/2/Sierra-Aguilar_Juan_2022_robusta_afin_ajustable.pdf).

**BRAVO, Erwin;** et al. “Modelo de optimización para el problema de localización y ruteo vehicular en la distribución de ayuda humanitaria”. *Revista Tecnológica Espol* [en línea], 2022, (Ecuador), vol. 34 (2), pág. 170. [Consulta: 15 julio 2022]. ISSN 0257-1749. Disponible en: <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/890/611>.

**CALLUPE ARTICA, Mireya Melany.** Modelo de optimización mediante programación lineal entera binaria para la asignación de la cartera de clientes a supervisores en una empresa de saneamiento ambiental. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima-Perú 2021. pag.1. [Consulta: 2023-11-06]: Disponible en: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/18472>.

**CALVO URIBE, Andrés Felipe.** Estrategia Óptima para la Mitigación del Riesgo Sísmico y Mejoramiento de la Infraestructura Educativa. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de los Andes. Cali-Colombia 2020. pag.2. [Consulta: 2023-08-06]: Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/43922>.

**CÁRDENAS RIFFO, José Ignacio.** Diseño de un programa de optimización multiobjetivo para la planificación Forestal En El Valle De Sousa, Portugal. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de los Andes. Santiago-Chile 2020. pag.27. [Consulta: 2023-08-06]: Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/175233>

**CORDERO, Carlos;** et al. *Decisiones estratégicas soportadas en estudios del futuro* [en línea]. Quito-Ecuador: Universo Sur, 2020. [Consulta: 07 octubre 2023]. Disponible en:



<https://repositorio.umet.edu.ec/bitstream/67000/47/1/Decisiones%20estrategicas%20soportadas%20en%20estudio%20del%20futuro.pdf>.

**CARVAJAL SALGADO, Liliana Paulina.** El podcast como estrategia para difundir el conocimiento comunitario sobre peligros volcánicos. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de los Andes. Santiago-Chile 2020. pag.16. [Consulta: 2023-07-29]: Disponible en: <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/9154/1/T4007-METIC-Troncoso-El%20podcast.pdf>.

**CHOQUE, Federico Tomás.** Métodos de estimación para el modelo lineal funcional truncado. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires-Argentina 2023. pag.20. [Consulta: 2023-08-02]: Disponible en: [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/seminario/seminario\\_nMAT000653\\_Choque.pdf](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/seminario/seminario_nMAT000653_Choque.pdf)

**CONSOLACIÓN MARTÍNEZ, Cristina.** Introducción a la Optimización Robusta. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de Sevilla. Sevilla-España 2019. pag.35. [Consulta: 2023-02-13]: Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/374291150\\_Introduccion\\_a\\_la\\_optimizacion\\_robusta\\_e\\_ingenieria\\_predictiva\\_una\\_revision\\_de\\_literatura](https://www.researchgate.net/publication/374291150_Introduccion_a_la_optimizacion_robusta_e_ingenieria_predictiva_una_revision_de_literatura)

**DEVIA, Nelson.** "Programación Entera". *Modelamiento y Optimización*, vol. 02, n° 01, (2011), (Chile). págs. 12-21.

**ENRIQUE SOTO, Luis;** et al. "Teoría de las restricciones y su impacto en las mejoras de la productividad". *Polo del Conocimiento*. [en línea], 2021, (Ecuador), vol. 6 (11), pág. 403. [Consulta: 15 julio 2022]. ISSN 2550-682X. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8219338>.

**ESCUADERO ANDINO, Flavio Fernando.** Diseño de un modelo matemático para optimizar las rutas de recorrido del proceso de recolección de desechos sólidos para el cantón Valencia. [en

línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad Técnica de Ambato. Ambato-Ecuador 2021. pag.44. [Consulta: 2023-10-05]: Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/32215/1/t1761mma.pdf>

**FELIPE CLAVIJO, Andrés.** Identificación y Análisis del riesgo para cadenas de suministro en eventos disruptivos. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá-Colombia 2022. pag.30. [Consulta: 2023-10-05]: Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/43681>

**FLORES ROJAS, Luigi Alejandro.** Propuesta de localización y determinación de la capacidad de almacenes para la distribución de ayuda humanitaria en los principales departamentos del Perú afectados por heladas y friajes mediante el uso de herramientas de investigación de operaciones. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad Católica de Perú. Lima-Perú 2019. pag.22. [Consulta: 2023-10-07]: Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14235>

**GALLO SANCHEZ, Brayan Edmundo & ROMERO PATIÑO, Javier Alejandro.** Caracterización del canal de comunicaciones V2X en ambientes de alta densidad vehicular en el caso de erupción del volcán Cotopaxi. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Quito-Ecuador 2023. pag.18. [Consulta: 2023-07-23]: Disponible en: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/36518/1/T-ESPE-058061.pdf>

**GARCÍA AVELLANEDA, José Alejandro.** Diseño de un plan de evacuación en caso de emergencia por tsunami en el distrito La Punta usando métodos de optimización. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima-Perú 2023. pag.07. [Consulta: 2023-08-23]: Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/14019>

**LLUNCO COLLANTES, José Enrique.** Aplicación de la programación lineal para maximizar la utilidad de una empresa molinera lambayecana, 2020. [en línea]. (Trabajo de titulación)

(Maestría), Universidad Señor de Sipán. Pimentel-Perú 2022. pag.19. [Consulta: 2023-08-04]:  
Disponible en: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/9325>

**MATA TIPÁN, Javier Fernando.** Mejora de la resiliencia operativa de un sistema de distribución eléctrico ante una erupción volcánica mediante la gestión de la demanda eléctrica. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga-Ecuador 2022. pag.30. [Consulta: 2023-08-10]: Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9555>

**MEZA, Fernando;** et al. “Optimización de ecuaciones con restricciones no lineales: comparativo entre técnicas heurística y convexa”. [en línea], 2022, (Ecuador), vol. 21 (2), pág. 54. [Consulta: 7 agosto 2023]. ISSN 2145-8456. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5537/553772634005/>

**MIÑOS YBAR TIPÁN, Javiera Antonia.** Diseño de un plan de evacuación para aluviones en la cuenca del río Salado (Atacama) usando micro simulación de tráfico. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de Chile. Santiago de Chile-Chile 2022. pag.22. [Consulta: 2023-08-06]: Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185568>

**MORALES CASTRO, Jorge Daniel.** Diseño de un plan de evacuación para aluviones en la cuenca del río Salado (Atacama) usando micro simulación de tráfico. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Ensenada, Baja California-México 2021. pag.15. [Consulta: 2023-07-22]: Disponible en: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3549>

**MOTHES, Giovanni.** " Tungurahua: un año después". *Flacso*, vol 1 (2), (2010), (país). págs. 11-12.

**MEZA, Fernando;** et al. “Los volcanes: algunas perspectivas para un conocimiento científico y didáctico”. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las Ciencias* [en línea], 2021,

(España), pág. 54. [Consulta: 29 julio 2023]. ISSN 1697-011X. Disponible en:  
<https://revistas.uca.es/index.php/eureka/article/view/7173>

**RAMOS, Andrés & CERISOLA, Santiago.** Optimización Estocástica. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad Pontificia Comillas, Madrid-España 2016. pag.16. [Consulta: 2023-11-06]: Disponible en:  
[https://www.academia.edu/3567177/Optimizaci%C3%B3n\\_estoc%C3%A1stica](https://www.academia.edu/3567177/Optimizaci%C3%B3n_estoc%C3%A1stica)

**RAMOS CHERREZ, Emily & CERISOLA, Santiago.** Caracterización de los dinamismos eruptivos del periodo eruptivo de enero a marzo de 2010 del volcán Tungurahua con base en el estudio geoquímico de los depósitos de ceniza y su relación con parámetros geofísicos, granulométricos y de componentes: laboratorio mixto internacional sismos y volcanes en los andes del norte. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador 2022. pag.2. [Consulta: 2023-07-29]: Disponible en:  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23398>

**RIVERA CERDAS, Flavio.** Modelo de rutas de evacuación en caso de tsunamis para la comunidad de Sámara. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad Nacional, Heredia-Costa Rica 2019. pag.19. [Consulta: 2023-08-03]: Disponible en  
<https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/18159>

**ROMERO ROJAS, Juan David.** “La Teoría de Restricciones y la Optimización como Herramientas Gerenciales para la Programación de la Producción. Una Aplicación en la Industria de Muebles”. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*. [en línea], 2019, (Colombia), vol. 27 (5), pág. 82. [Consulta: 28 enero 2023]. ISSN 1886-516X. Disponible en:  
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7029293>

**SANTANA ROBLES, Francisca.** “La Teoría de Restricciones y la Optimización como Herramientas Gerenciales para la Programación de la Producción. Una Aplicación en la Industria de Muebles”. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*.

[en línea], 2023, (México), vol. 10 (19), pág. 54. [Consulta: 28 enero 2023]. ISSN 2207-784X.

Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7029293>

**SECRETARIA DE GESTIÓN DE RIESGO.** "Plan Nacional de respuesta ante desastres".

*Secretaría General de Riesgos*, vol. 01, n° 01, (2018), (Ecuador). págs. 53-57.

**VASQUEZ, Cieza.** Planeación de la producción aplicando programación lineal para la optimización de costos en la empresa producciones nacionales. [en línea]. (Trabajo de titulación)

(Maestría), Universidad Señor de Sipán, Pimentel-Perú 2021. pag.121. [Consulta: 2023-11-06]:

Disponible en: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/8460>

**VERDE RAYMUNDO, Gianmarco.** Estimación de la demanda para la ayuda humanitaria ante

un desastre natural en la Costa Verde, distrito de Miraflores. [en línea]. (Trabajo de titulación)

(Maestría), Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú 2022. pag.18. [Consulta: 2023-

11-06]: Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/24090>

**VERGARA PERNETH, Jennifer Paola.** Formulación de un modelo de logística humanitaria

para el transporte y distribución de ayudas utilizando programación entera mixta en la ciudad de

Bogotá D.C. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de la Salle, Bogotá-

Colombia 2019. pag.20. [Consulta: 2023-10-05]: Disponible en:

[https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_industrial/118/](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_industrial/118/)

**VERGARA PERNETH, Jennifer Paola.** Formulación de un modelo de logística humanitaria

para el transporte y distribución de ayudas utilizando programación entera mixta en la ciudad de

Bogotá D.C. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de la Salle, Bogotá-

Colombia 2019. pag.20. [Consulta: 2023-10-05]: Disponible en:

[https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_industrial/118/](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_industrial/118/)

**VILA VALENZUELA, Jerry Ángel & ZAFRA SIANCAS, José Antonio.** Optimización de

beneficios con gestión de riesgos en las minas subterráneas - Grupo Volcán. [en línea]. (Trabajo

de titulación) (Maestría), Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú 2019. pag.66.

[Consulta: 2023-08-30]: Disponible en:

<https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/16077>

**YELVITA INSUNZA, Azucena Marcela.** Modelo de optimización robusto para el diseño de redes bajo condiciones de equilibrio. [en línea]. (Trabajo de titulación) (Maestría), Universidad de Chile, Santiago de Chile-Chile 2022. pag.11. [Consulta: 2023-10-17]: Disponible en:

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184685>

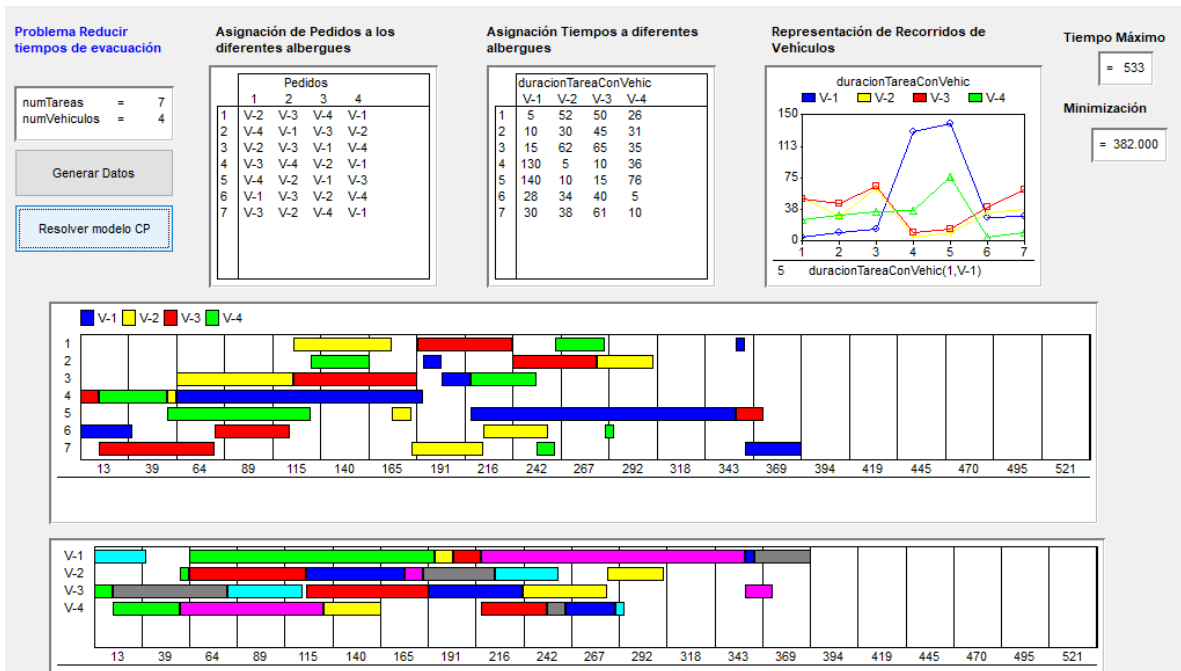
**Total 35 referencias bibliográficas**

# ANEXOS

## ANEXO A.

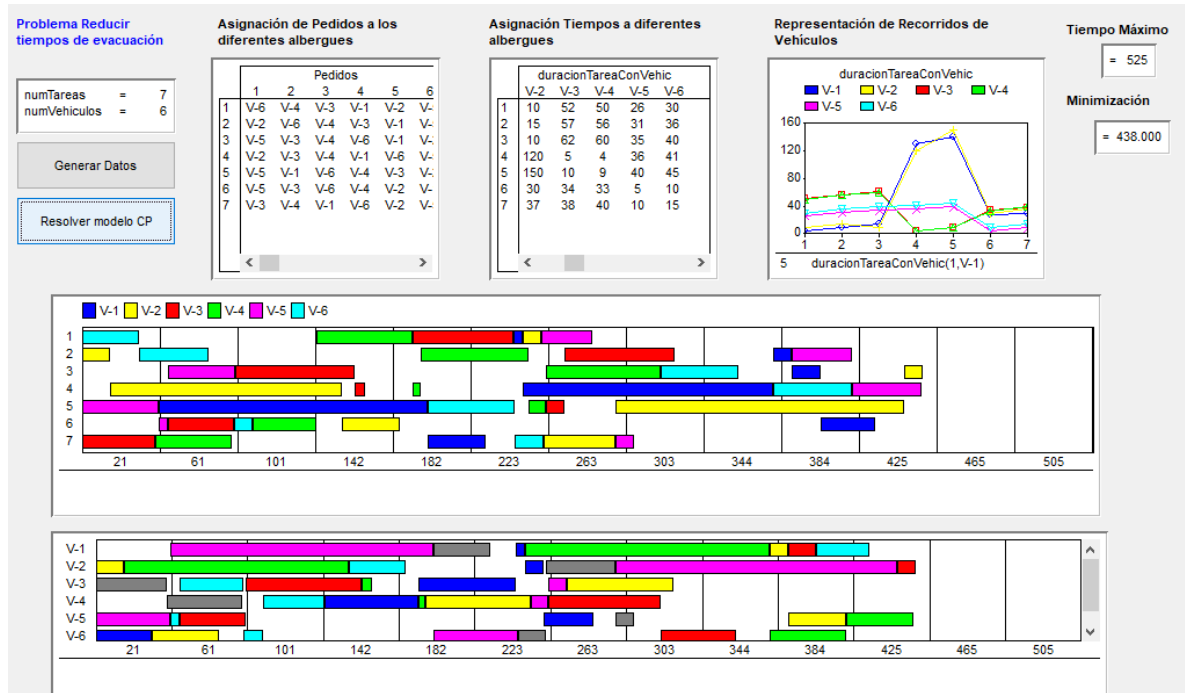
ASIGNACIÓN DE 1 RECURSO (VEHÍCULO) A CADA CANTÓN (CEVALLOS, PELILEO)

Y 2 RECURSOS (VEHÍCULOS) AL CANTÓN (BAÑOS)



## ANEXO B.

ASIGNACIÓN DE 2 RECURSOS (VEHÍCULO) A CADA CANTÓN (CEVALLOS, PELILEO Y BAÑOS)

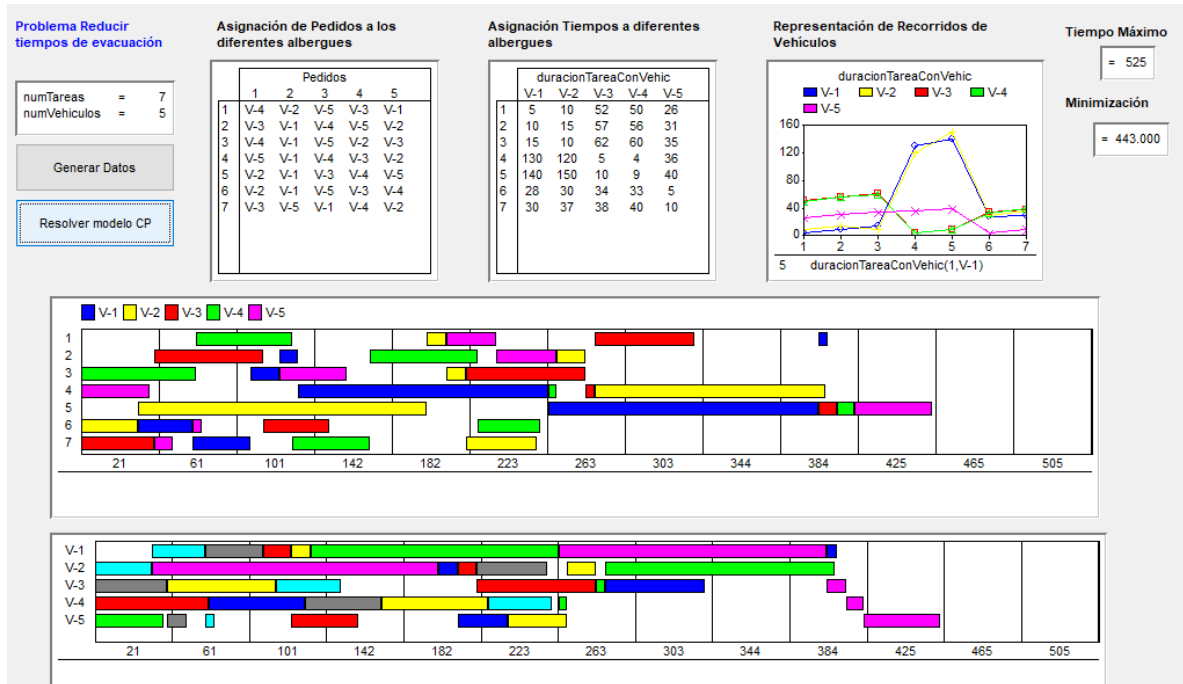




# ANEXO C.

ASIGNACIÓN DE 2 RECURSOS (VEHÍCULO) A CADA CANTÓN (CEVALLOS, BAÑOS)

Y 1 RECURSOS (VEHÍCULOS) AL CANTÓN (PELILEO)

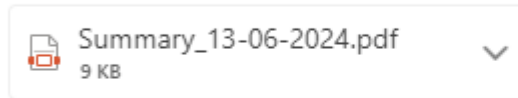
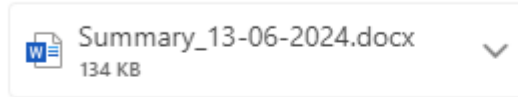




CRISTIAN JAVIER LOGROÑO BOLAÑOS  
Para: VICTOR SANTIAGO SAIGUA PEREZ  
CC: Centro de Idiomas



Jue 13/6/2024 11:13



⤴ 2 archivos adjuntos (144 KB)

☁ Guardar todo en OneDrive - ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO

⬇ Descargar todo

Saludos cordiales,  
Adjunto traducción solicitada  
Atentamente,  
Cristian Logroño.