

Modelo matemático para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempos para automatizar el proceso de ordenamiento y creación de ruta de INMALUXE

Alexander Valenzuela Klenner

Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile

Alexander.vk@outlook.com

RESUMEN

En el presente trabajo de optimización de rutas realizadas por la empresa INMALUXE, se abordó el problema de transporte de productos e insumos respetando la disponibilidad horaria de cada destino. Se utilizó para resolver el problema un modelo matemático de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, que es ejecutado a través de un software programado para recopilar los datos de entrada, entregarlos al programa de optimización y disponer los resultados en un informe de ruta, permitiendo así tener una solución óptima en un tiempo reducido y que es mejor al actual invertido en el cálculo manual. El software permite ingresar los destinos que se deben visitar a través de una interfaz de usuario amigable, y opera todas las sub tareas necesarias para parametrizar los datos y respetar las limitaciones del problema presentado. En la estructura del presente artículo se hace referencia al modelo base de ruteo de vehículos (VRP) y su extensión con ventanas de tiempo (VRPTW), se utiliza la programación de Excel - VBA (Visual Basic Application) para recopilar y entregar los parámetros necesarios para el modelo matemático que es resuelto con LINGO Systems mediante la automatización OLE (Object Linking and Embedding). Por último, se realizó el mapeo de clientes, proveedores y servicios, y se implementó impreso para presentar físicamente la distribución de los destinos y discutir la localización de los mismos. Se logró disminuir en más del 50% el tiempo total utilizado para la ejecución de este proceso, disminuyendo los costos directos e indirectos de mano de obra administrativa y mejorando el desempeño de la ruta y del departamento de Planificación.

Palabras claves: *Automatización, Ciclo iterativo, Diagrama de flujo, Modelo matemático, Ruta óptima.*

ABSTRACT

In the present work of routes optimization carried out by the company INMALUXE, the problem of transporting products and supplies was addressed, respecting the hourly availability of each destination. To solve the problem, a mathematical model of vehicle routing with time windows was used, which is executed through software programmed to collect the input data, deliver them to the optimization program and arrange the results in a route report, allowing this to have an optimal solution in a short time and which is better than the current one invested in the manual calculation. The software allows entering the destinations that must be visited through a friendly user interface, and operates all the sub-tasks necessary to parameterize the data and respect the limitations of the presented problem. In the structure of this article, reference was made to the base model of vehicle routing (VRP) and its extension with time windows (VRPTW), Excel programming is used - VBA (Visual Basic Application) to collect and deliver the necessary parameters for the mathematical model that is solved with LINGO Systems through OLE automation (Object Linking and Embedding). Finally, the mapping of customers, suppliers and services was carried out, and was printed to physically present the distribution of the destinations and discuss their location. The total time used for the execution of this process was reduced by more than 50 percent, reducing direct and indirect administrative labor costs and improving the performance of the route and department of Planning.

Keywords: *Automation, Iterative cycle, Flowchart, Mathematical model, Optimal path.*

1 INTRODUCCIÓN

El transporte ha sido materia de estudio desde el siglo XIX, la industrialización ha hecho necesario mover mayores cantidades de mercancías y productos de forma óptima, llevando consigo mayores márgenes de utilidad en menor tiempo. Entre los estudios de ruteo de vehículos se encuentran diversos modelos matemáticos, que mediante una función objetivo y un conjunto de restricciones optimizan las distancias o tiempos de ruta, logrando reducir los costos totales de transporte.

El primer problema de ruteo planteado fue el TSP (Travelling Salesman Problem), introducido por Flood [1] en 1956, este se describe por un agente viajero que debe visitar un número de destinos en un solo viaje, iniciando y regresando a su punto de partida habiendo visitado a cada destino solo una vez, procurando que el recorrido sea el de tiempo o distancia mínima recorrida.

Según Toth y Vigo [2] en 2002, un VRP (Vehicle Routing Problem) determina el conjunto óptimo de rutas a ser realizadas por un determinado número de vehículos que sirven a los clientes, indican además que este es uno de los problemas más fuertemente estudiados por distintos matemáticos desde hace más de 40 años y corresponde a uno de los problemas de optimización combinatoria más importantes desde que Dantzig y Ramser [3] en 1959 presentaron el problema, donde años más tarde en 1964 Clarke y Wright [4] propusieron el primer algoritmo para la resolución este. Posterior a esto, se han realizado numerosos casos que han enriquecido el problema base, contribuyendo a la

investigación de operaciones métodos de resolución para los problemas de ruteo.

Otra extensión del VRP es el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, conocido como VRPWT (por sus siglas en inglés The Vehicle Routing Problem with Windows Time). Este consiste en recorrer un determinado número de destinos, pasando exactamente una sola vez por cada uno de forma que la ruta inicia y termina en el depósito, (para nuestro problema el depósito es INMALUXE). Además de recorrer los destinos, lo hace dentro de la disponibilidad horaria de cada uno, y considerando que cada visita a los destinos debe ser realizada una vez iniciada la jornada de INMALUXE. Cabe mencionar que el problema en estudio es asimétrico, debido a que la distancia y el tiempo de ida entre cada par de destinos son distintos a los de regreso.

Toth y Vigo, presentan el VRP con ventanas de tiempo como una extensión del CVRP (Problema de Ruteo de Vehículos con restricciones de Capacidad), donde cada cliente está asociado a un intervalo de tiempo en el que debe ser atendido, que en el caso de que el vehículo llegue antes del inicio de este intervalo de tiempo debe esperar, y por último consideran un tiempo de servicio para cada cliente.

En el primer capítulo del presente artículo, se describe más a cabalidad el problema presentado, indicando la metodología actual utilizada, la metodología nueva a implementar y las limitaciones del problema.

En el segundo capítulo se explica la metodología del software implementado, además de mostrar las características principales de este como es la interfaz de usuario, metodología de programación en VBA, utilización de un script de comandos LINGO para disponer el modelo de ruteo y la automatización OLE, que liga el desarrollo de Excel con LINGO.

En el tercer y último capítulo se presenta el modelo matemático a utilizar (VRPWT), indicando las variables de decisión, parámetros de entrada, índices y conjuntos.

Presentación de la Empresa

INMALUXE es una empresa ubicada en la comuna de Tomé – VIII Región, que desde sus inicios en el año 2.000 ha estado dedicada a diseñar e implementar soluciones innovadoras a equipos y procesos del área agroindustrial a través de sistemas de transporte y estructuras en general, abordando los constantes desafíos que les presentan sus clientes y procesos a los cuales hacen frente.

Para poder entender cuáles son las tareas realizadas por la empresa, es que se presentan las 3 áreas que la caracterizan, a decir: metalmecánica, inyección de plástico y diseño, esta última considera todo tipo de elaboración de logos, señaléticas y estampados. Actualmente cuenta con 7 trabajadores en el área metalmecánica, 2 en diseño, 2 en administración, 1 en planificación y 1 en gerencia.

Desde sus inicios por ser una pequeña empresa, INMALUXE sostenía sus

operaciones en la Administración y Gerencia por parte de los hermanos Esmirna y Javier Luengo respectivamente, pero con el crecimiento de la demanda, ha aumentado el personal y se ha visto en la necesidad de ir separando las funciones, áreas y procesos de la empresa para poder tener un mejor control y manejo de las operaciones. Es por lo anterior que se crea el Departamento de Planificación, el que toma la tarea de administrar los trabajos del área metalmecánica principalmente, programando estos según importancia y fechas de entrega para poder mantener mejor control sobre los tiempos y relaciones con los clientes. El Departamento de Planificación recibe las solicitudes de cotización, evalúa los costos, tiempos de ejecución y entrega, tipos y cantidad de materiales, cantidad de mano de obra, y envía la cotización al solicitante previo visto bueno del gerente. Además controla los trabajos que están en ejecución, evaluando la calidad de estos mismos, haciendo reingeniería y controlando la falta de insumos para la elaboración de cada producto en fabricación. Una vez aceptada la cotización por parte del cliente, el trabajo pasa de un estado “cotizado” a “en ejecución” y antes de ser entregado a los trabajadores para ser ejecutado se realizan las compras de insumos correspondientes según la evaluación hecha a priori en la cotización.

Por ser una empresa pequeña, ha existido una tendencia a que los trabajadores realicen tareas de diversas áreas (lo que se ha intentado reducir últimamente), actualmente cuando hay ruta es el ayudante de diseño quien la realiza una vez que se tiene un número adecuado de

destinos (proveedores, clientes o servicios), llámese número considerable a más de 3 destinos. Producto de esto, en el acto de mejorar los procesos de la empresa, nace el estudio de implementar un programa de ruteo que permita reducir el tiempo de creación de la ruta (en la mañana) y la ejecución de esta (a lo largo del día).

Para optimizar el proceso de creación del informe de ruta y orden de los destinos, pasando de una intervención manual (actual) a un sistema automatizado y eficaz en el tiempo de ejecución (mejora), se realizará un programa en Excel, donde una vez seleccionados los puntos a visitar se procederá a ejecutar el programa en VBA y LINGO para generar un informe final que contenga el listado de destinos que debe seguir el conductor del vehículo, minimizando así el tiempo de ruta total.

2 METODOLOGÍA

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El problema consiste en reducir la intervención manual al momento de crear la ruta, dado que en la actualidad toma alrededor de una a dos horas para entregar el informe de ruta. Para esto se buscó implementa el sistema automatizado de ordenamiento de los destinos de forma que se reduzca tanto el tiempo de creación del informe como el tiempo de ejecución de la ruta. Es así que para implementar este sistema se recopiló la información necesaria respectiva al proceso en estudio, a decir, direcciones, contactos, horarios de atención, forma de pago, distancias y tiempos entre los destinos

concurrentes en la provincia del Bío-Bío. Teniendo acceso a toda esta información fue posible realizar el levantamiento de un sistema automatizado de generación de ruta.

Los requerimientos de compra que se van ingresando al sistema diariamente (Planilla de “COMPRAS” y sus respectivos estados: “Cotizar”, “Comprar”, “Comprado”, “Ruta”, “Ok”) son gestionados con prontitud, generando a su paso un conjunto de destinos que deben ser visitados según urgencia del requerimiento o cantidad de destinos en lista (ver mapa de proceso de compra en Anexo A). Cabe notar que se debe verificar la disponibilidad de los requerimientos antes de enviar al vehículo a cada destino. En INMALUXE se realizan aproximadamente dos rutas por semanas, siendo idealmente ejecutadas la primera el día martes y la segunda el día jueves. Cada ruta que se genera es única y distinta de otra dada la variabilidad de trabajos realizados en taller.

Sea el caso en que se tiene un número menor a tres destinos para ser visitados, es posible realizar ruta si los ítems lo ameritan (entiéndase aquí a que al menos uno tiene estado de urgente, puesto que, si no es así, se espera a que ingresen más destinos a la lista. Si solo se tienen uno o dos destinos urgentes a visitar y son clientes, se les puede despachar los productos vía courier.

Para realizar la ruta se cuenta con un vehículo (Partner Maxi Diesel 2014, Cap. de carga: 800 kg) que sale desde la empresa ubicada en Collén N°56, Comuna de Tomé y pasa por los

proveedores y clientes respetando sus horarios de atención, y vuelve a la empresa, en lo posible, dentro de la jornada ordinaria de trabajo (08:30 a 18:00 hrs.). De las 2 rutas que se realizan por semana, cada ruta no sobrepasa un número de 7 destinos por día, lo cual aun siendo un número pequeño de destinos, se producen demoras en la elaboración del informe de ruta y retraso en la salida del conductor.

2.2 LIMITACIONES

Si bien se indica la capacidad de carga del vehículo, se debe tener presente que no es un factor que sea considerado por la empresa al momento de ordenar la ruta, puesto que si existe carga que sobrepase la capacidad del vehículo, se divide en 2 tandas. Por lo general en los casos de compra, los proveedores facilitan la tarea despachando a domicilio dado que son casos puntuales y de poca ocurrencia, estos casos son de poca ocurrencia y por lo general corresponden a los proveedores Acermet, Multiaceros y Salomon Sack.

No se considera como destino en ninguna ruta pasar a servicentros a cargar el vehículo con combustible, esta tarea es realizada en días que no se realiza ruta.

2.3 DESAROLLO

En primera instancia teniendo los clientes, proveedores y servicios más visitados dentro de la provincia de Concepción, donde la mayor parte se concentran en las comunas de Concepción y Talcahuano, se procedió a ubicar a cada destino en Google Earth (figura N°1), además de calcular las

distancias y tiempos entre cada par de destinos.

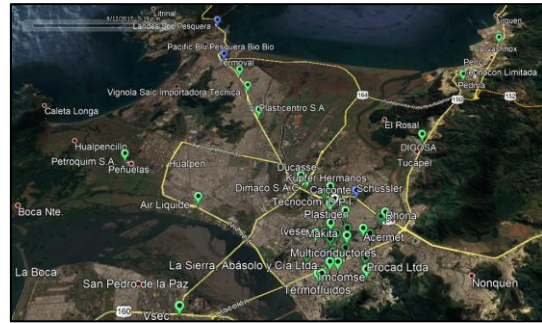


Figura 1: Mapa de Concepción con Proveedores (verde), Servicios (blanco) y Clientes (azul).

Fuente: elaboración propia en base a Google Earth

También se recopiló información como los horarios de apertura y cierre, el tiempo de servicio, forma de pago y persona destinataria o receptor del envío, esta información es útil para la elaboración del modelo matemático y del informe de ruta que debe ser entregado al conductor.

El programa creado opera con dos libros de Excel, el principal administra parámetros y ejecuta las instrucciones del usuario, y el libro secundario contiene el informe de ruta.

2.3.1 INTERFAZ DE USUARIO

Para la administración de los destinos que son ingresados a ruta, se realizó una interfaz de usuario en el libro principal (Figura N°2), donde se clasifican los 3 tipos de destinos (clientes, proveedores y servicios):

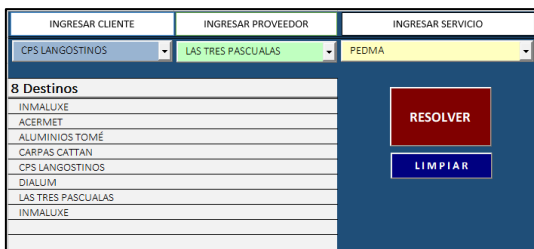


Figura 2: Interfaz de usuario para la asignación de destinos que ingresan a ruta.

Fuente: elaboración propia

Ésta interfaz genera un listado recopilando los destinos ingresados desde las listas. El número de destinos a recorrer se muestra en la etiqueta de la lista.

Sea el caso que un proveedor es ingresado por segunda vez, el programa desplegará un aviso mediante una ventana indicando “*Proveedor ya Registrado!*”, según muestra la siguiente figura:

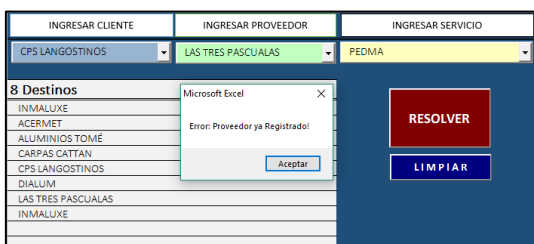


Figura 3: Aviso de error para multiplicidad de destinos.

Fuente: elaboración propia

El punto de partida “INMALUXE” es ingresado automáticamente al inicio y final del listado a modo de contextualizar el modelo matemático como una serie de puntos distintos a visitar, considerando que debe salir y llegar a la empresa.

2.3.2 PROGRAMACIÓN EN VBA

El programa generador de ruta creado en Excel posee 3 macros principales en VBA, estas a través de arreglos, contadores y ciclos iterativos ejecutan sub-tareas que dan instancias de

búsqueda y entrega de los datos recopilados, generando un segundo libro Excel con el informe de ruta que debe recorrer el conductor. Este libro es guardado con la fecha de ejecución en el nombre del archivo.

Todas las instrucciones en VBA son ejecutadas a través de un botón de comando “RESOLVER” ubicado en la interfaz de usuario.

2.3.2.1 RECOPIACIÓN DE PARÁMETROS PARA EL MODELO

A continuación se presenta una breve descripción de la secuencia de códigos de programación en VBA. En primera instancia se asignan los destinos como etiquetas para la matriz “tiempos de recorridos” en la hoja “Datos” del libro Excel secundario, esto en función del número de destinos seleccionados. Posterior a esto se disponen las etiquetas para las listas de tiempos de servicio, horarios de apertura, cierre y horarios de colación.

La primera macro descrita de forma general, recopila la información de los destinos ingresados, crea sub-matrices y listas de datos necesarias para alimentar el modelo de optimización “VRPTW”, de esta forma cada vez que se requiere visitar un número determinado de destinos, el programa ajusta el tamaño de las matrices y listas.

El diagrama N°1 muestra el proceso iterativo que extrae de la lista inicial los destinos seleccionados. Cada uno de estos es guardado en un arreglo llamado arribo,

denotado por “a()”. A continuación se muestra este proceso:



Diagrama 1: Recolección de destinos ingresados para ruta.

Fuente: elaboración propia

2.3.2.2 CREACIÓN DE LIBRO EXCEL PARA RESOLUCIÓN DEL MODELO Y GENERACIÓN DE INFORMES DE RUTA

Sean los destinos seleccionados en la interfaz de usuario, más el punto de partida y llegada (la empresa propiamente tal), el programa procede a crear y guardar un nuevo libro Excel conteniendo los parámetros para resolver el modelo y el informe de ruta con todos los indicadores y datos complementarios útiles al momento de presentarse en cada destino.

2.3.2.3 ASIGNACIÓN DE NOMBRES A RANGOS DE CELDAS SEGÚN DATOS

A cada conjunto de datos le es asignado un nombre correspondiente al rango de celdas en el que se encuentran. Estos rangos son administrados desde la barra de tareas como sigue: “Fórmulas → Administrador de nombres”, de donde se despliega la siguiente ventana:

Figura 4: Resumen de nombres de rangos de celdas en Excel (para entregar datos a LINGO).

Fuente: elaboración propia

2.3.2.4 RECOLECCIÓN DE DATOS

Teniendo los tiempos de servicio, horarios de apertura y horarios de cierre en el libro principal según muestra la siguiente figura:

INSTITUCIÓN	VENTANA DE TIEMPO [min]				
	MAÑANA		TARDE		TPO. SERVICIO
	HR. INICIO	HR. TERMINO	HR. INICIO	HR. TERMINO	
AGUNSA	540.0	840.0	840.0	1200.0	31.0
ALISTER	540.0	780.0	780.0	1200.0	19.0
BLUMAR COLON	480.0	900.0	900.0	1200.0	38.0
BLUMAR ISLA ROCUANT	540.0	900.0	900.0	1320.0	18.0
BLUMAR PLANTA HARINA CORONEL	540.0	840.0	840.0	1200.0	42.0
CAMANCHA ETIQUETADO	600.0	840.0	840.0	1260.0	39.0
CAMANCHA HG	480.0	900.0	900.0	1140.0	22.0
CONGELADOS PACIFICO	480.0	780.0	780.0	1260.0	17.0
CONSTRUCTORA ANTIHUE	480.0	900.0	900.0	1140.0	48.0
CPS CORONEL	540.0	900.0	900.0	1380.0	52.0
CPS LANGOSTINOS	540.0	840.0	840.0	1140.0	47.0
CROSSVILLE	480.0	840.0	840.0	1320.0	18.0
FIMETAL	480.0	900.0	900.0	1320.0	43.0
FOOD CORP (MARFOOD)	480.0	900.0	900.0	1140.0	45.0
FRIG. PACIFICO SAN PEDRO	480.0	900.0	900.0	1260.0	42.0
FRIG. PACIFICO THNG	540.0	840.0	840.0	1380.0	34.0
INCHALAM	540.0	840.0	840.0	1260.0	18.0
ISOGAMA	540.0	840.0	840.0	1380.0	43.0
IVESE	480.0	900.0	900.0	1380.0	16.0
KANGURU	960.0	1020.0	1020.0	1320.0	54.0
LANDES	480.0	900.0	900.0	1140.0	19.0
LANDING	480.0	900.0	900.0	1380.0	29.0
MEGA CHURRASCO	540.0	780.0	780.0	1140.0	55.0
ORIZON	480.0	720.0	720.0	1140.0	37.0
REPORT	480.0	900.0	900.0	1380.0	39.0
SALMONES BLUMAR BODEGA	480.0	540.0	540.0	720.0	33.0

Figura 5: Horarios de atención de los destinos, en [minutos], a contar de las 00:00 hrs.

Fuente: elaboración propia

Se asignan los datos a los vectores $e()$, $ea()$, $la()$, $l()$ y $s()$, respectivamente. El ciclo iterativo utilizado para realizar esta tarea, tiene por acción la sentencia “bucarv” en VBA, que asigna los datos a cada vector según destinos seleccionados, como se presenta en el diagrama de flujo a continuación:

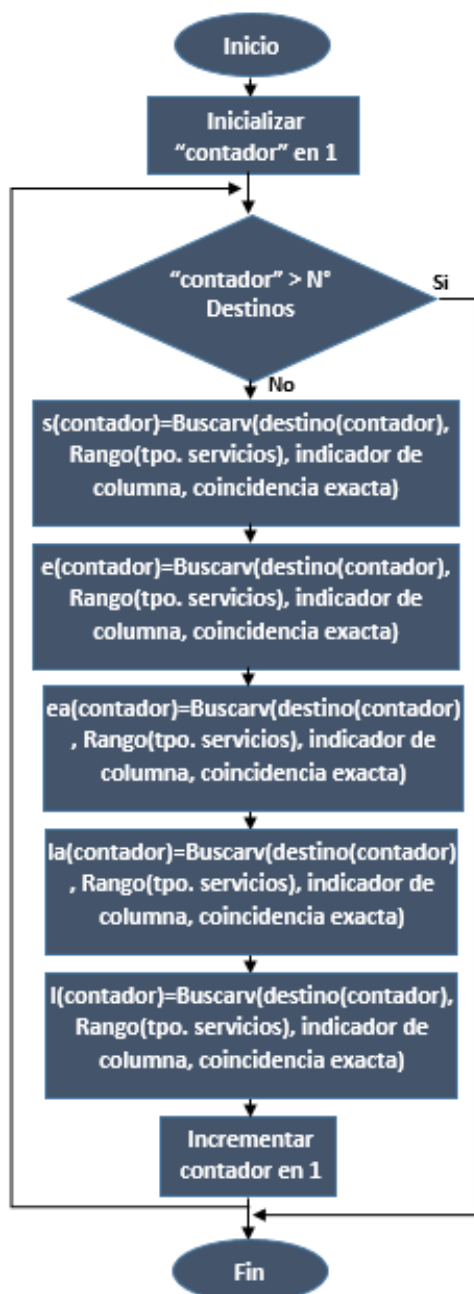


Diagrama 2: Recolección de tiempos de servicio y horarios de atención según destinos seleccionados.

Fuente: elaboración propia

Después de haber realizado la búsqueda de datos necesarios para el modelo de optimización (destinos, tiempos de recorrido, tiempos de servicio y horarios de apertura y cierre), se realizan instrucciones para disponer la información recopilada de forma que pueda ser extraída por LINGO, esto en forma matricial o de listas (vectorial) especificando el nombre del rango de los datos cómo se indicaba anteriormente.

Como ejemplo a continuación se muestran los parámetros para resolver el modelo matemático en base a un número de 3 proveedores: Acermet, Aluminios Tomé y Bel Ray Chile:

	INMALUXE	ACERMET	ALUMINIOS TOMÉ	BEL RAY CHILE	INMALUXE
INMALUXE	1000	37	6	43	1000
ACERMET	52	1000	37	9	52
ALUMINIOS TOMÉ	4	34	1000	40	4
BEL RAY CHILE	44	10	40	1000	44
INMALUXE	1000	37	6	43	1000
DESTINO	T.SERVICIO	HR. APERTURA	HR. INICIO ALM.	HR. TERM. ALM.	HR. CIERRE
INMALUXE	5	540	780	810	1080
ACERMET	33	540	900	930	1320
ALUMINIOS TOMÉ	40	480	780	810	1140
BEL RAY CHILE	44	600	840	870	1320
INMALUXE	5	540	780	810	1080

Figura 6: Datos para lectura de LINGO en [minutos], ejemplo de 3 proveedores.

Fuente: elaboración propia

Donde en verde se muestra la *matriz de tiempos*, en rojo el *tiempo de servicio* y en naranja los *horarios de apertura y cierre* considerando el horario de colación correspondiente a cada proveedor.

2.3.2.5 ASIGNACIÓN DE ETIQUETAS A MATRIZ DE TIEMPOS DE RECORRIDO

Para asignar las etiquetas (nombres de los destinos) a las filas - columnas de la matriz con los tiempos de recorrido, se realiza un ciclo iterativo que recoge los

destinos de la lista inicial y los asigna como etiquetas – filas y etiquetas – columnas según se muestra en la figura N°6, el procedimiento del ciclo iterativo se muestra en el siguiente diagrama:

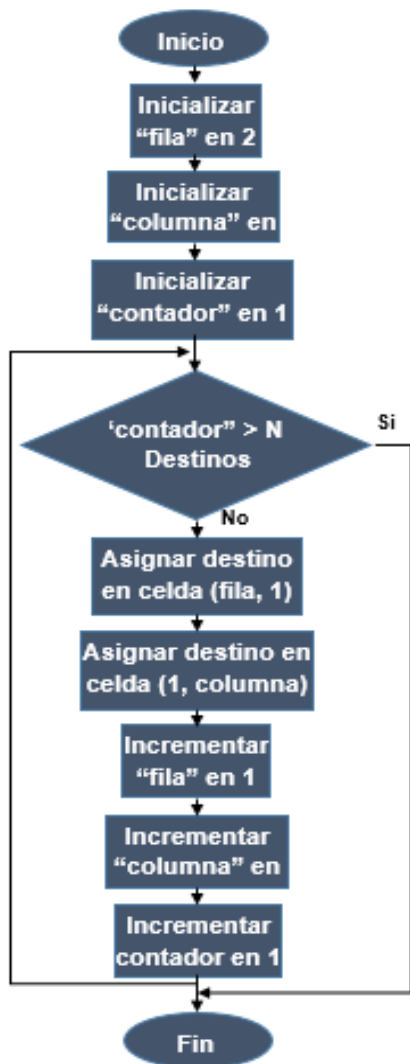


Diagrama 3: Asignación de etiquetas para la matriz de tiempos de recorrido.

Fuente: elaboración propia

Además de la matriz de tiempos de recorrido, en la figura N°6 se muestran las listas de datos correspondientes a los tiempos de servicios, horarios de apertura, cierre y horarios de colación de los destinos seleccionados. Estos datos al igual que los de la matriz de tiempos de recorrido sirven como parámetros de entrada para el modelo de optimización.

El diagrama de flujo a continuación muestra la asignación de etiquetas para estas listas de datos:

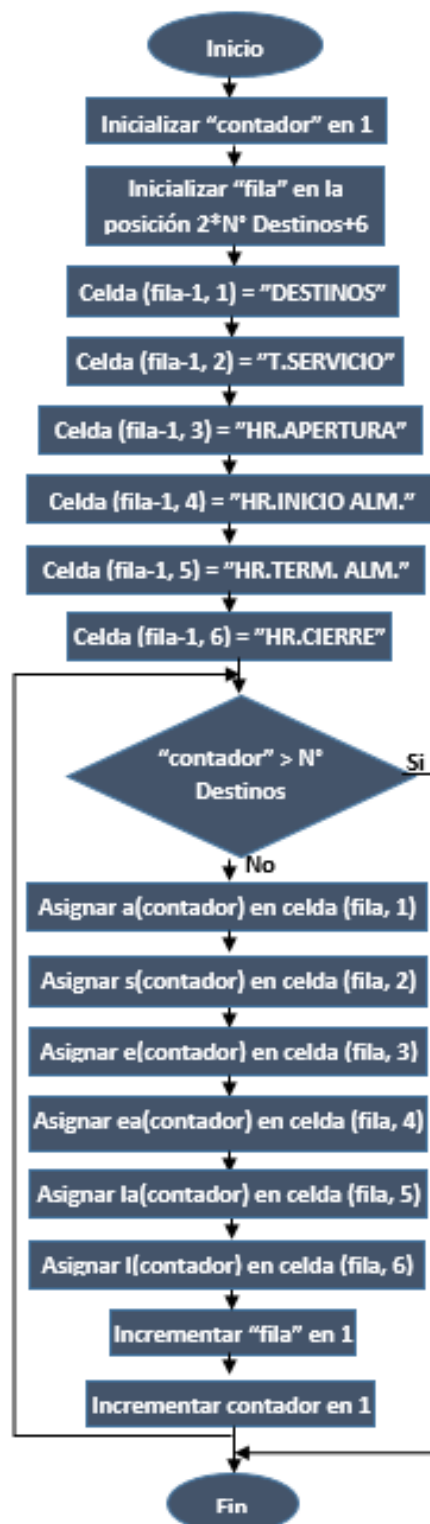


Diagrama 4: Asignación de etiquetas a listas de datos tiempos de servicios, hora de apertura, cierre y horario de colación.

Fuente: elaboración propia

recorren un número de $(N+1)$ etiquetas - filas (N : número de destinos a visitar, sin considerar el depósito). Para los destinos que se muestran en la Figura N°8, el proceso enunciado anteriormente sigue de la siguiente forma.

Se muestran $N+1$ tablas correspondientes a las iteraciones realizadas según el número de destinos en lista a ser recorridos:

Tabla 1: Salida desde el nodo 0 al destino 1.

	INMALUXE	ACERMET	CHILEXPRESS TOMÉ	BEL RAY CHILE	INMALUXE
INMALUXE	→ 0	→ 1↑	0	0	0
ACERMET	0	0	0	1	0
CHILEXPRESS TOMÉ	0	0	0	0	1
BEL RAY CHILE	0	0	1	0	0
INMALUXE	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia

Tabla 2: Salida desde el destino 1 al destino 2.

	INMALUXE	ACERMET	CHILEXPRESS TOMÉ	BEL RAY CHILE	INMALUXE
INMALUXE	↓ 0	1	0	0↑	0
ACERMET	→ 0	0	0	→ 1↑	0
CHILEXPRESS TOMÉ	0	0	0	0	1
BEL RAY CHILE	0	0	1	0	0
INMALUXE	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia

Tabla 3: Salida desde el destino 2 al destino 3.

	INMALUXE	ACERMET	CHILEXPRESS TOMÉ	BEL RAY CHILE	INMALUXE
INMALUXE	↓ 0	1	0↑	0	0
ACERMET	↓ 0	0	0	1	0
CHILEXPRESS TOMÉ	↓ 0	0	0	0	1
BEL RAY CHILE	→ 0	0	→ 1↑	0	0
INMALUXE	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia

Tabla 4: Salida desde el destino 3 al nodo final.

	INMALUXE	ACERMET	CHILEXPRESS TOMÉ	BEL RAY CHILE	INMALUXE
INMALUXE	↓ 0	1	0	0	0↑
ACERMET	↓ 0	0	0	1	0
CHILEXPRESS TOMÉ	→ 0	→ 0	→ 0	→ 0	→ 1↑
BEL RAY CHILE	0	0	1	0	0
INMALUXE	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia

Una vez concluido este proceso, se procede a entregar los destinos en la interfaz de informe final según el orden en que fueron guardados.

El diagrama N°5 muestra cómo se asignan en informe de ruta los destinos desde el vector de arribo “ $a()$ ”. El receptor, medio de pago y hora de arribo se asignan realizando una búsqueda con el comando “`buscarv`” en VBA, el que extrae los datos desde los resultados de LINGO:

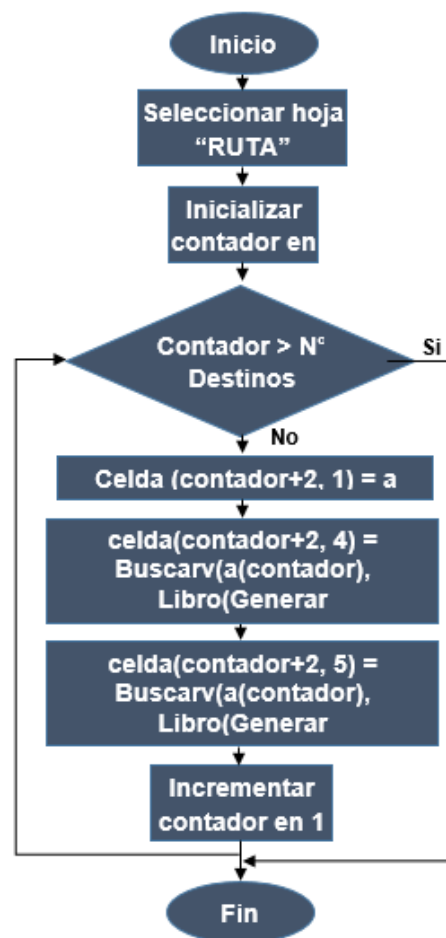


Diagrama 5: Entrega de destinos, según resultados de LINGO.

Fuente: elaboración propia

Finalmente el valor del vector de arribo que regresa al depósito, representa el tiempo de total de ruta en minutos, y es obtenido a través del software LINGO, este es expresado en formato [HH:MM] como indicador “Hora de Llegada” en el informe de ruta, cómo se muestra en la siguiente figura:

INFORME DE RUTA				Hr.Salida: 09:00 Tpo. Ruta: 04:16 Hr. Llegada: 12:46		
N° INSTITUCIÓN	OPERACIÓN	DOCUMENTO	PERSONA	MEDIO DE PAGO	ARRIBO	TPO. ESPERA
1	CARPAS CATTAN		DOMINGO CATAN	CHEQUE	9,7	0
2	DPI		JOSE LUIS RIQUELME	CHEQUE	10,1	0
3	ACERMET		OMAR FLORES	CREDITO	10,6	0
4	DIALUM		CRISTIAN VASQUEZ	TRANSFERENCIA	11,0	0
5	ALUMINIOS TOMÉ		CARLOS	EFFECTIVO	12,3	0

Figura 9: Informe de ruta con utilidades administrativas, como el destinatario y el medio de pago.

Fuente: software de ruta

La tercera macro tiene la característica principal de ser una macro global y contener el comando de ejecución del Script que contiene el modelo. Además de ejecutar el comando LINGO que resuelve el problema de ruteo, traspasa el script de Excel a LINGO por medio de OLE Automation. En primera instancia se llama a la primera macro para obtener la información pertinente a los destinos seleccionados. Una vez resuelto el modelo, se llama a la segunda macro para extraer los resultados de LINGO y transformarlos en el listado final de ruta, como se mostró en el método iterativo de la tabla 1 a la 4.

2.3.3 ESTRUCTURA DEL SCRIPT

Para disponer del Script de comandos LINGO, se establece un rango de celdas, y posteriormente se establecen las siguientes comandos: primera línea: SET ECHOIN 1 (activa el traspaso de las sentencias desde Excel a LINGO), antepenúltima línea: SET ECHOIN 0 (desactiva el traspaso de sentencias), penúltima línea: GO (ejecuta el modelo con el solver de LINGO) y última línea: QUIT (termina con el proceso de lectura de sentencias).

2.3.4 AUTOMATIZACIÓN OLE (OBJECT LINKING AND EMBEDDING)

La Automatización OLE opera como conector entre el software Excel y LINGO. Esta, a través del comando “RunScriptRange” en VBA, llama a LINGO y le entrega el rango del Script que contiene la programación matemática y le traspasa código por código hasta que se encuentra con el comando “QUIT” o hasta que no quedan más códigos en el rango definido.

2.4 HERRAMIENTAS MATEMÁTICAS

Para resolver el problema de ruta de INMALUXE se utilizó una herramienta matemática definida como Programación Matemática, que a través de modelos preconcebidos lleva una función objetivo que se busca minimizar o maximizar según sea el caso, la cual está sujeta a un conjunto de restricciones que modelan y delimitan el problema para tener resultados que se aproximen a lo real. Estas restricciones suelen ser de capacidad, de flujo, temporales, de demanda, entre otras, dando así un resultado factible u óptimo al problema planteado. Lo que busca el modelo matemático para este tipo de problemas de ruteo, es crear un camino o ciclo Hamiltoniano que contenga todos los vértices N (destinos) de un grafo $G = (N, A)$, de forma que el vehículo recorra todos los arcos en A que unen los vértices, sin repetir ninguno.

Los modelos matemáticos de optimización combinatoria son de complejidad NP-Hard, donde a medida

que aumenta el número de nodos o destinos, aumenta el número de variables de forma exponencial. Para obtener un resultado en un tiempo razonable mediante una CPU, se debe operar el modelo matemático solo para un número pequeño de nodos.

2.4.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA (VRPWT)

Para resolver el problema presentado, se utilizó un modelo de programación lineal entera con restricciones lógicas para los tiempos de espera y horarios de colación.

En la formulación matemática se presentan cinco secciones básicas que se requieren para tener una visión detallada del modelo utilizado, a saber: índices y conjuntos, parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones según sigue:

Índices y Conjuntos

i : Nodo de origen en el arco (i, j) .

j : Nodo de destino en el arco (i, j) .

N : Conjunto de nodos en la red, excepto el depósito, con $N = \{1, 2, \dots, N\}$.

V : Conjunto de nodos en la red, donde 0 y $N + 1$ se refieren al depósito, $V = \{0, 1, \dots, N, N + 1\}$.

A : Conjunto de arcos (i, j) en la red.

Parámetros

T_{ij} : Tiempo de ir desde el nodo i al j .

S_i : Tiempo de duración del servicio en el nodo i .

e_i : Hora de inicio del nodo i , con $e_0 = e_{N+1} = E$.

ea_i : Hora de inicio de almuerzo en el nodo i .

la_i : Hora de término de almuerzo en el nodo i .

l_i : Hora de cierre del nodo i .

Variables

u_i : Tiempo de arribo al nodo i .

w_i : Tiempo de espera en el nodo i .

X_{ij} : $\begin{cases} 1: \text{si se va desde el nodo } i \text{ al } j. \\ 0: \text{e. o. c.} \end{cases}$

Función Objetivo

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (T_{ij} * X_{ij} + u_{N+1}) \quad (1)$$

Restricciones

$$\sum_{j=0}^{N+1} x_{ij} = 1 \quad \dots \forall_i \in N, i \neq j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^{N+1} x_{0j} = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^{N+1} x_{ij} - \sum_{i=0}^{N+1} x_{ji} = 0 \quad \dots \forall_j \in N, i \neq j \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^N x_{i,N+1} = 1 \quad (5)$$

$$u_j \geq u_i + s_i + t_{ij} + w_i - M(1 - x_{ij}) \quad \dots \forall_{ij} (i \neq j) \quad (6)$$

$$e_i \leq u_i \leq (l_i - s_i) \quad \dots \forall_i \in N \quad (7)$$

$$E \leq u_i \quad \dots \forall_i \in V \quad (8)$$

$$\text{if}(ea_i - s_i * 0,75 < u_i < la_i \text{ and } ea_i \neq 0 \text{ and } la_i \neq 0; w_i = la_i - u_i; 0) \quad \dots \forall_i \in \{1, 2, \dots, N, N + 1\} \quad (9)$$

$$\text{if}(ea_i < u_i < la_i \text{ and } x_{ij} = 1; u_j \geq la_i + s_i + t_{ij}; 0) \quad \dots \forall_{ij} (i \neq j) \quad (10)$$

x_{ij} : binaria $\dots \forall_{ij} \in A$ (11)

2.4.2 DESCRIPCIÓN

La función objetivo (1) es la suma del tiempo total asociado a cada arco recorrido (i, j) más el tiempo de llegada asociado a los tiempos de servicio y espera en cada nodo. Las restricciones (2) y (3) aseguran que el vehículo salga desde el depósito y de cada cliente solo una vez. La restricción (4) es de flujo y hace que todo lo que entra al nodo i es igual a lo que sale, aquí se considera que del nodo (0) solo se puede salir y al nodo $(N+1)$ solo se puede llegar. La restricción (5) indica que al nodo $(N+1)$ solo se va a llegar desde un posible destino. Sea M una constante lo suficientemente grande, la restricción (6) que es de secuencia de visitas, asegura que si el vehículo viaja desde i hasta j , no puede llegar a j antes de $u_i + s_i + t_{ij}$. Por otro lado esta restricción evita que se formen sub-ciclos en la ruta óptima escogida. En (7) se limitan las visitas a los clientes en el intervalo de tiempo $[e_i, l_i]$ que ellos disponen. Así también la restricción (8) limita a que las visitas realizadas a los destinos sean posterior al tiempo en el que el depósito abre. Las restricciones lógicas en (9) y (10) indican que si se llega al nodo i en el horario de almuerzo del destino i , se deberá esperar hasta que abra al término de la colación (aquí se debe considerar que el momento más tardío de llegada al nodo i para ser atendido antes de la hora de almuerzo, debe ser a lo sumo $e a_i - s_i * 75\%$). El 75% es una relajación del tiempo de servicio debido a que estos son variables dentro del 25% del tiempo parametrizado en la base de datos. Los horarios de colación con valor cero en la base de datos, corresponden a los destinos con horario de atención continuado. Por último, la restricción (11) indica que cada variable de decisión x_{ij} puede tomar

valor 1 si es que se va desde i hasta j y 0 si es que no se recorre ese arco.

3 RESULTADOS

3.1 MAPEO DE PROVEEDORES, CLIENTES Y SERVICIOS

Se implementó el mapeo de proveedores, clientes y servicios de la provincia del Biobío en Google Earth figuras 10 - 13, facilitando la ubicación y análisis visual de los destinos al personal de planificación. Además se dispuso de forma física en la oficina de planificación bajo un diseño de ampliación sectorizadas, como se muestra en la figura N°14.

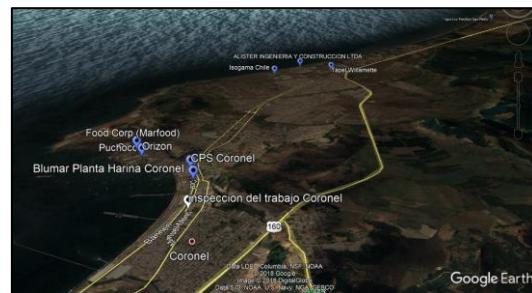


Figura 10: Mapa de destinos, Comuna de Coronel.

Fuente: elaboración propia en base a Google Earth

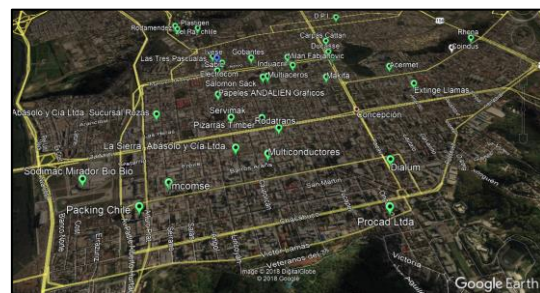


Figura 11: Mapa de destinos, Comuna de Concepción.

Fuente: elaboración propia en base a Google Earth

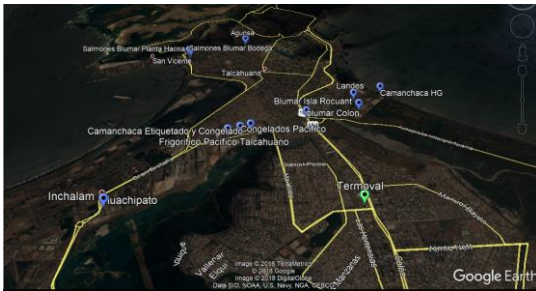


Figura 12: Mapa de destinos, Comuna de Talcahuano.

Fuente: elaboración propia en base a Google Earth



Figura 13: Mapa de destinos, Comuna de Tomé.

Fuente: elaboración propia en base a Google Earth

Esto permitió mejorar el trabajo efectivo del departamento en soporte del software de optimización creado, ayudando a realizar planificaciones de los despachos y entregas de forma más rápida y asertiva, prestando así un servicio de transporte ordenado y a tiempo.



Figura 14: Mapa de destinos, impreso en adhesivo avery matte base zincaluminio 0,5 mm.

Fuente: Diseñadora Gráfica, Daniela Caamaño.

3.2 SOFTWARE DE RUTA

El software de ruta, que principalmente opera sobre la programación de VBA y LINGO, modela la información del problema, y la procesa para que a través de la teoría de optimización de rutas (VRPTW) se asigne el recorrido que minimiza el tiempo total de ruta. Cada vez que se ejecutó el software se entregó el resultado en un informe de ruta con sus respectivos.

3.2.1 INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz de usuario facilitó el manejo del programa y su comprensión, el que puede ser mejorado según las necesidades variables que nacen en el tiempo.

La interfaz utiliza principalmente tres listas desplegables, cada una con los destinos correspondientes, a decir, proveedores, clientes y servicios, en donde una vez seleccionados los destinos a visitar estos son ubicados como una lista de ruta inicial en la misma interfaz, para posteriormente ser procesada por el software, entregando así la ruta final en el informe de ruta como se muestra a continuación:

INGRESAR CLIENTE	INGRESAR PROVEEDOR	INGRESAR SERVICIO
CPS LANGOSTINOS	LAS TRES PASCUALAS	PEDMA
8 Destinos		
INMALUXE		
ACERMET		
ALUMINIOS TOMÉ		
CARPAS CATTAN		
CPS LANGOSTINOS		
DIALUM		
LAS TRES PASCUALAS		
INMALUXE		
		RESOLVER
		LIMPIAR

Figura 15: Interfaz de usuario para la selección de destinos a rutiar.

Fuente: elaboración propia

3.3 BENEFICIOS DE LA AUTOMATIZACIÓN

La automatización a través de sistemas computarizados realiza estas tareas repetitivas en un tiempo considerablemente reducido mejorando la eficacia del proceso.

En el proceso de agilizar las tareas de INMALUXE, concentrándonos en las rutas realizadas semanalmente, el programa diseñado para la creación de rutas mejoradas u óptimas reduce en más de la mitad el tiempo utilizado para realizar esta tarea, a decir, de 1,5 horas a 20 minutos considerando el trabajo posterior de revisión e impresión de la hoja de ruta, generando seguridad y reducción del costo de horas hombre invertidas.

El programa de ruta toma los destinos seleccionados para ser visitados, y busca los datos correspondientes a cada uno de estos. Estos datos son entregados a LINGO, para obtener los resultados y el listado de destinos a visitar “Informe de Ruta”. Todo este proceso toma alrededor de 15 segundos a contar del momento en el que se presiona el botón de comando principal de programa. El resto del tiempo (19 min 45 segundos) es asignación del tipo de operación y el número y tipo de documento a presentar en el destino.

Tabla 5: Ahorro generado en HH.

Tiempo incurrido [Hrs]	
Antes	1,5
Despues	0,33
Ahorro	1,17
Datos	
Rutas / Sem	2
Sem / Mes	4
Rutas / Mes	8
Ahorro [Hrs / Mes]	9,3
Sueldo [\$]	1.090.000
Ahorro Monetario	
Valor Hora [\$ / Hr]	6.056
Ahorro [\$ / Mes]	56.519
Ahorro [\$ / Año]	678.222

Fuente: elaboración propia en Excel

El ahorro generado que se indica en la tabla corresponde a un ahorro indirecto, el cual reduce el tiempo de trabajo que puede ser utilizado en la realización de otras tareas o actividades. El costo de Mano de Obra administrativo es un costo indirecto, debido a que no interviene directamente en la producción, Sapag y Sapag [5]. El ahorro generado si bien es cuantificado monetariamente, puede ser mayor, debido a que en el mismo intervalo de tiempo incurrido antes, ahora se puede realizar la misma tarea más otras que aumenten el beneficio de la empresa. Por lo tanto, de forma estimativa solo se hace referencia al ahorro generado producto de la disminución en el tiempo invertido para esta tarea.

3.4 INFORME DE RUTA Y SUS UTILIDADES

El informe de ruta es una de las utilidades creadas para mejorar el orden del proceso en estudio y para ser entregado al conductor del vehículo, este informe fue implementado en 2017 y ha sido generado manualmente desde entonces, entre sus características está indicar:

- Nombre o giro de los destinos.
- Operación a ser realizada (retirar, entregar, despachar, comprar directo, cambio).
- Documento a retirar o entregar (factura, guía de despacho, orden de compra, cotización).
- Persona (vendedor, recepcionista, cliente directo).
- Medio de pago en caso de ser proveedor o servicio (efectivo, tarjeta, cheque, crédito, transferencia, nota de crédito).
- Tiempo total de ruta o de llegada a depósito.
- Hora de arribo a cada destino.

A continuación se muestra el informe de ruta arrojado por el software, junto con las utilidades mencionadas anteriormente:

INFORME DE RUTA				Hr. Salida: 09:00 Tpo. Ruta: 05:57 Hr. Llegada: 14:27	
N° INSTITUCIÓN	OPERACIÓN	DOCUMENTO PERSONA	MEDIO DE PAGO	HR. ARRIBO	TPO. ESPERA
1. ACEPINET		OMAR FLORES	CREDITO	9,6	0
2. DIALUM		CRISTIAN VASQUEZ	TRANSFERENCIA	10,0	0
3. CARRAS CATTAN		DOMINGO CATAN	CHEQUE	10,7	0
4. CPS LANGOSTINOS		-	-	11,8	0
5. ALUMINIOS TOMÉ		CARLOS	EFFECTIVO	12,6	82

Figura 16: Informe de ruta del software y sus utilidades.

Fuente: software de ruta

4 CONCLUSIONES

El estudio de optimización del proceso de ruta de INMALUXE, no había sido realizado hasta el momento en el que se creó el departamento de planificación. Se creó un programa en Excel, programando las tareas de recolección y entrega de datos en VBA (Visual Basic Application), facilitando la realización de las sub-tareas que componen este proceso.

El tiempo incurrido para la planificación de la ruta se vio reducido en más del 50%,

permitiendo gestionar otras tareas por el departamento de planificación y mantener un mejor control de las labores que se realizan en paralelo. Este ahorro además se vio reflejado en las rutas generadas por el programa.

Gracias a que el programa se creó adaptado al problema real, es que es posible realizar mejoras en la interfaz y en las utilidades del informe de ruta. INMALUXE ha estado en constantes cambios y mejoramientos de sus procesos, eso ha permitido implementar nuevas alternativas para la realización sus procesos y actividades.

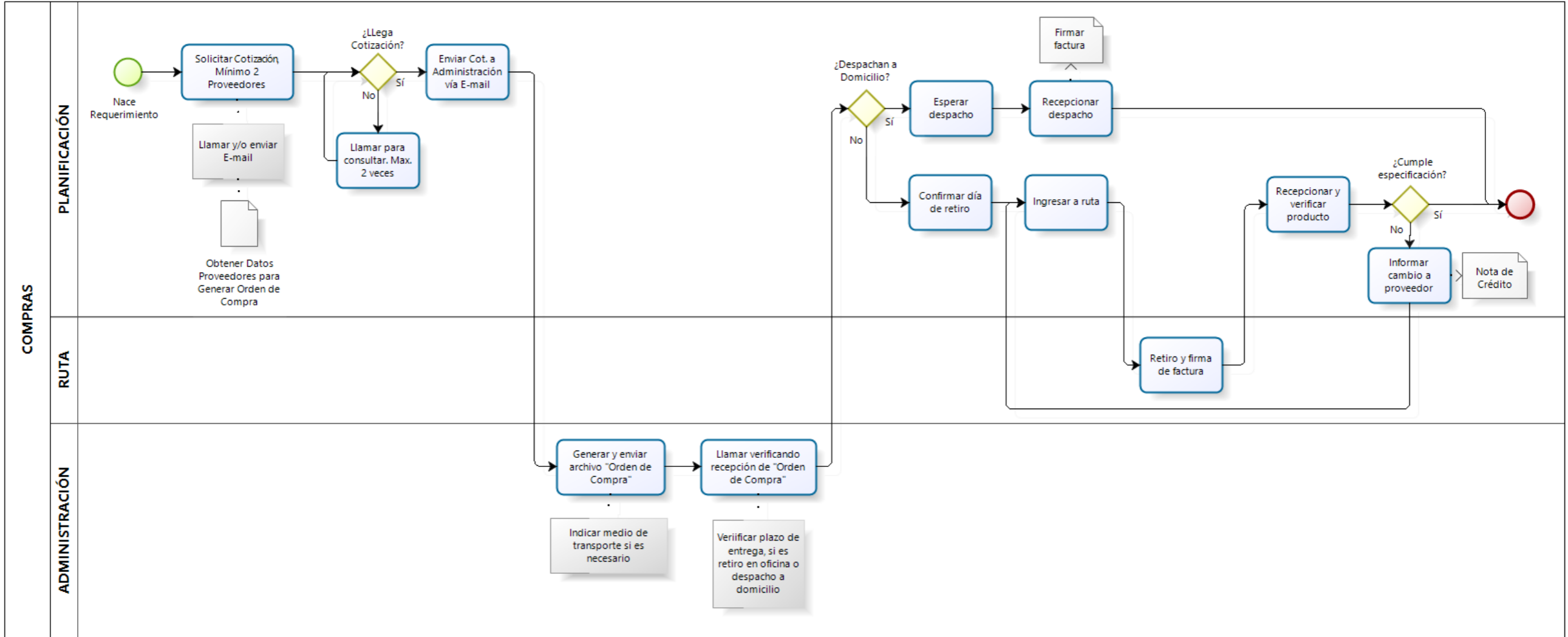
El desarrollo de la programación en VBA contribuyó considerablemente a la ejecución de sub-tareas, permitiendo liberar de la intervención manual el proceso de ruta. Las múltiples utilidades y adaptaciones de la programación, resultan ser muy atractivas para la implementación de nuevos programas, generando beneficios de reducción de costos y tiempos.

La construcción del Software y la implementación del modelo matemático de ruteo de vehículos, permitieron obtener los indicadores (hora de salida, tiempo de ruta, hora de llegada a INMALUXE), además indica el horario de llegada a cada destino. Esto generó un valor agregado al proyecto, el cual puede ser mejorado en el futuro.

Finalmente, los resultados obtenidos en este trabajo permitieron comprender que las mejoras asociadas a la optimización de procesos permiten mejorar las tareas de los trabajadores, la rentabilidad de los procesos de producción y administrativo, y una serie de parámetros asociados al sistema o área de la empresa en el que se implementen.

Anexo A

Mapa Proceso de Compra



Referencias

- [1] Flood, M. (1956), The traveling-salesman problem. *Operations Research*, 4-61.

- [2] Toth P. y Vigo D. (2002), *The Vehicle Routing Problem*, EE.UU, Society for Industrial & Applied.

- [3] Dantzig, G. y Ramser, J. (1959), The truck dispatching problem. *Management science*, Vol 6, N°1, 80-91.

- [4] Clarke, G. y Wright W. (1964), Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, 568–581.

- [5] Sapag N. y Sapag R. (2008), *Preparación y evaluación de proyectos*, 5ª. ed., México, Mc Graw-Hil.