

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Instituto de Ingeniería y Tecnología

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación

Desarrollo tecnológico FWTREA: *Framework for Water-Truck*

Routing through Evolutionary Algorithms

Usuario: Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez

Estudiante:

Ing. Osvaldo Alvarado Amaya

Director:

Dr. Gilberto Rivera Zárate

Codirectora:

Dra. Julia Patricia Sánchez Solís

Febrero 2021

Tabla de contenido

1. Introducción.....	6
2. Descripción del Organismo Público Descentralizado Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez.....	8
3. Caso de estudio.....	8
4. Justificación.....	10
5. Desarrollo tecnológico propuesto.....	12
5.1 Objetivos.....	12
5.2 Metodología de solución.....	13
5.3 Prototipo del <i>framework</i> desarrollado.....	16
5.3.1 FWTREA.....	17
5.3.1.1 Fase de conectividad.....	18
5.3.1.2 Fase de implementación del algoritmo evolutivo.....	19
5.3.1.3 Integración con la plataforma.....	26
5.3.2 Visualización de las operaciones.....	28
5.3.2.1 Experimentación interna de FWTREA.....	33
6. Conclusiones y trabajo futuro.....	34
Referencias.....	35

Lista de figuras

Figura 1. Identificación del flujo de trabajo con los elementos que participan actualm	14
Figura 2. Aplicación de muestreo de datos para pruebas reales	15
Figura 3. Pantallas principales del <i>framework</i>	16
Figura 4. El modelo cascada.....	17
Figura 5. Ejemplo de un método para inicio de sesión.....	19
Figura 6. Mapa de los sectores actuales para reparto de agua en Ciudad Juárez	20
Figura 7. Centro principal de recarga de agua ubicado en Av. de las Torres y calle Santiago Blancas	21
Figura 8. Recarga en el camino de cisternas con capacidad de 10,000 litros, con una de 35,000 para ahorro de tiempo en regresar al punto de recarga central	22
Figura 9. Estructura de un algoritmo genético general.....	22
Figura 10. Arreglo maestro generado por cada población inicial para optimización de generación de matriz de distancias	25
Figura 11. Estructura de los archivos web de FWTR EA	27
Figura 13. Inicio de sesión	29
Figura 14. Módulo de edición de usuarios	29
Figura 15. Módulo de avisos	30
Figura 16. Generador de rutas, de arriba hacia abajo, se muestra la tabla de visitas iniciales, en medio se observan los puntos disponibles para entrega, y al final un conjunto de rutas	31
Figura 17. Configuración de la capacidad del vehículo cisterna y efectividad de búsqueda (Número de generaciones del algoritmo)	32
Figura 18. Vista de la interfaz de campo.....	33

Lista de Algoritmos

Algoritmo 1. Pseudocódigo de algoritmo genético implementado	23
Algoritmo 2. Pseudocódigo para generar la población inicial.....	24
Algoritmo 3. Pseudocódigo de la implementación de Búsqueda Tabú.....	26

Lista de tablas

Tabla 1. Comparativo con muestras capturadas de las papeletas de viaje con la ejecución del algoritmo evolutivo.....	34
---	----

1. Introducción

Actualmente, el diseño de un sistema de transporte es una de las piezas clave para las organizaciones que tienen como tarea el traslado de productos de cualquier tipo. La inversión en dicho sistema dependerá de diversos factores, entre los más destacables se encuentran el producto que se distribuye y su demanda. Los vehículos son el medio para transportar los productos y las materias primas hacia las personas y los clientes, los cuales se encuentran en diferentes puntos de un mapa geográfico. Lograr la calidad en este proceso añade valor al producto de entrega y al servicio. De la misma manera, se genera un efecto dominó: tener un cliente satisfecho implica obtener más clientes (y más ganancias para la empresa); por ende, la logística es uno de los puntos más representativos y, además, tiene uno de los costos más elevados en empresas involucradas en el transporte (Liu et al., 2013).

Existen empresas que actualmente ofrecen servicios a organizaciones para llevar un control de los vehículos, por ejemplo: localización vía satelital, monitoreo de límites de velocidad, revisión de la temperatura del motor, creación de geo-cercas, entre otros. Según datos del Instituto Mexicano de Transporte (IMT) publicados en un reporte técnico sobre el análisis del uso de tecnologías en empresas de autotransporte, México destaca su participación en organizaciones que involucran transporte hombre-máquina implementando tecnologías emergentes para dar solución a las áreas de oportunidad de las empresas. Por otro lado, pese al aumento de la inseguridad en los últimos años que vive la población mexicana, no se ha visto frenada la implementación de herramientas tecnológicas referentes al monitoreo de transporte; por el contrario, estadísticas del IMT mencionan que dichas soluciones (tales como rastreo de vehículos, sistema de posicionamiento global, generadores de rutas de entrega-recolección, entre otros) son los principales servicios que se solicitan a organizaciones de desarrollo de tecnologías (Bastida et al., 2018).

Identificar áreas de oportunidad para la implementación de tecnologías es, generalmente, un proceso meticuloso que comprende desde la investigación de mercado, la identificación alcances y limitaciones del dominio, el análisis de vulnerabilidades, riesgo e incertidumbre, y la modelación matemática.

El proyecto tecnológico reportado en el presente documento surge a petición del Organismo Público Descentralizado “Junta Municipal de Agua y Saneamiento” (JMAS) de Ciudad Juárez— el cual se enfoca en desarrollar un *framework* para el enrutamiento de vehículos mediante la implementación de algoritmos evolutivos. El software es llamado FWTREA (acrónimo de *Framework for Water Truck Routing through Evolutionary Algorithms*), cuyo objetivo es incorporar modelos de enrutamiento que permitan una solución integral al problema de entrega de agua potable en zonas donde no se cuenta con infraestructura de red hidráulica. Esta distribución se lleva a cabo con vehículos cisterna (coloquialmente llamados pipas), y este proyecto busca generar un beneficio organizacional y económico para el Departamento de Distribución de Agua y Seguridad Industrial, el cual es el responsable de este proceso.

FWTREA facilita el control de vehículos y de personal en el área; además, como objetivo principal, permite la generación de rutas para el reparto de agua. Los datos de entrada del algoritmo son el número de vehículos, su capacidad, los puntos destino, y la demanda, de tal forma que podrá generar una solución diferente según la necesidad del personal administrativo en turno. Para facilitar su accesibilidad, FWTREA se encuentra alojado totalmente en la nube, es decir, el acceso puede llevarse a cabo desde cualquier navegador con acceso a Internet, de igual manera, el mantenimiento se simplifica debido a la actualización en tiempo real. Con lo anterior, se cumple una de las necesidades principales que consiste en el acceso a los datos de forma instantánea. Considerando la necesidad de tener la información desde cualquier dispositivo, se implementó una página responsiva que permitirá la visualización desde pequeños equipos móviles hasta computadoras de escritorio. La implementación de este *framework* permite a los usuarios:

1. Controlar el inventario y funcionamiento de los vehículos de la empresa.
2. Acceder a la posición mediante la latitud y longitud capturada por el dispositivo móvil de cada vehículo.
3. Actualizar la información de los clientes del organismo durante el reparto de agua.
4. Generar un mapa con el orden de las visitas que tienen que realizar los repartidores.
5. Digitalizar los documentos y formatos que actualmente se llenan en una papeleta que indica el número de cada ruta, su hora de inicio y la hora de término.

6. Generar una evidencia fotográfica de las entregas especiales de agua.

2. Descripción del Organismo Público Descentralizado Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Ciudad Juárez

JMAS Juárez es un organismo público descentralizado de la Junta Central de Agua y Saneamiento, que tiene como sede Ciudad Juárez, Chihuahua. Este organismo público — representado por el C.P. Jorge Domínguez Cortés, en su carácter de Director Ejecutivo— tiene como principal objetivo entregar a los habitantes de Juárez los servicios de: (a) agua potable y recuperada, (b) drenaje, y (c) saneamiento.

Uno de los enfoques principales de la actual administración es la integración de nuevas tecnologías en las diferentes áreas del organismo, con el fin de optimizar procesos de trabajo administrativo y apoyo en las tareas de campo que actualmente se desempeñan. Con el cumplimiento de estos objetivos se tendrán datos que permitirán mejorar la toma de decisiones dentro y fuera del organismo.

Actualmente, se considera a la JMAS Juárez como uno de los organismos del estado con una administración y una operación saludables según las evaluaciones de “*Fitch Ratings México*”, su perspectiva es estable a nivel general como empresa que brinda servicios públicos. El panorama es positivo para lograr la implementación de técnicas de Inteligencia Artificial en el Departamento de Distribución de Agua y Seguridad Industrial, lo que permitirá gradualmente integrar otras tecnologías para el beneficio de los usuarios.

El presente reporte técnico se enmarca en el área de implementación de metaheurísticas, como algoritmos evolutivos, para dar solución a problemas de enrutamiento de vehículos. En este reporte se describe la implementación del *framework* (FWTREA) para la generación de rutas de reparto de agua potable en vehículos cisterna.

3. Caso de estudio

Para el diseño de un *framework* de este tipo es necesario determinar el alcance del producto final con respecto al dominio de aplicación. En este caso, se debe determinar el tipo de problema de enrutamiento de vehículos (VRP, *Vehicle Routing Problem*) que se está

encarando; algunas variantes son: (a) el VRP con recolección y entrega de productos (VRPPD por sus siglas en inglés), el VRP con ventanas de tiempo (VRPTW por sus siglas en inglés), VRP con flota heterogénea (HVRP por sus siglas en inglés), entre otras posibles variables que definen el tipo de algoritmo a implementar según el problema que se encara (Pisinger y Ropke, 2007). Posteriormente, se debe definir la plataforma en donde se llevará a cabo la implementación del *framework*; actualmente, los desarrollos están orientados para múltiples dispositivos; sin embargo, este tipo de herramientas tienen un consumo elevado de recursos de procesamiento y, normalmente, se opta por aplicaciones de escritorio, las cuales obtienen los recursos del dispositivo donde se encuentran instaladas. Considerando lo anterior, el uso eficiente de los recursos del servidor se visualiza como un desafío tecnológico adicional para que FWTREA funcione adecuadamente para todas las peticiones que se realicen diariamente. Es importante resaltar que la literatura señala que el VRP despliega características de ser un problema *NP-Hard*; debido a dicha complejidad computacional, una alternativa viable para resolver este problema conlleva la aplicación de métodos aproximados de tiempo polinómico para instancias en la alta escala (Aarts et al., 2003).

Considerando el dominio de aplicación, la empresa debe llevar agua mediante pipas a 5024, y cuenta con 27 vehículos cisterna con capacidad heterogénea, los cuales van desde los 10,000 litros hasta los 35,000 litros. Estos últimos de mayor capacidad funcionan como un depósito móvil para recarga de agua; sin embargo, no todos los vehículos pueden recargar en este depósito móvil, por esta razón, el suministro de agua se realiza generalmente en el centro de carga del departamento. Otra consideración para el software es la distancia que existe entre cada cliente y su respectivo centro de recarga, ya que se pretende generar el mayor número de rutas con menor distancia, esto con la finalidad de hacer más recorridos al día. Actualmente se realizan de cinco a seis recorridos diarios en temporadas normales de reparto, por otro lado, en temporada de verano, sube la cantidad de recorridos, provocando el pago de horas extras a los operadores.

Con relación al trabajo que actualmente realiza el Departamento de Distribución de Agua y Seguridad Industrial, cabe mencionar que la demanda y entrega de agua es una labor de los 365 días del año. Asimismo, existen tareas que el personal lleva a cabo en papelería física; como una consecuencia indirecta, la implementación de FWTREA apoya a estas tareas como

objetivo secundario, generando datos de forma digital para constituir un proceso que se conecte con los actuales sistemas que tiene el organismo.

Debido a que no se tiene un historial digital de las rutas que realiza cada conductor, la comparación del *framework* se ve reducida al conocimiento tácito sobre las rutas por parte de los conductores.

Adicionalmente, se implementó un módulo alternativo dentro de la herramienta que consiste en la captura de la población para alimentar el algoritmo, la cual se integra de una muestra de 150 familias diferentes obteniendo como datos principales la demanda de agua, la ubicación mediante latitud y longitud del usuario y finalmente el trazo de las rutas. La información real fue codificada para las pruebas del algoritmo evolutivo y su integración con FWTREA.

Una vez definida la flota de vehículos, la capacidad de cada uno de ellos, la muestra de la población y la demanda de agua, se formó el conjunto de valores iniciales para construir un esquema de solución factible. Después de haber elegido a los algoritmos genéticos como la técnica de solución más adecuada, se llevó a cabo el diseño de una arquitectura que integre todos los elementos (dispositivos móviles, servidor de aplicación, servicios web y la seguridad de conexión de datos).

4. Justificación

Este tipo de problema ha sido ampliamente estudiado en la literatura científica. El origen del VRP data del año 1959 y fue introducido por Dantzig & Ramser (1959), quienes representaron una aplicación real relacionada con la entrega de gasolina a las estaciones de servicio e hicieron una formulación matemática a este problema. Posteriormente surge como una generalización del problema clásico del agente viajero, en el que un vendedor tiene que recorrer una serie de clientes una sola vez para luego volver al lugar de partida.

Debido a la complejidad que existe al generar rutas conforme se agregan más puntos de entrega, resulta la necesidad de una aplicación que automatice la generación de dichas rutas, simplificando el trabajo en esta etapa del proceso general de distribución de agua. Actualmente, el procedimiento está definido como parte de la experiencia con la que cuenta el operador (chofer) de los camiones; además, la digitalización y estructuración de las

instancias VRP para alimentar el sistema formarían parte del mejoramiento de las aportaciones del sistema completo.

Para propósitos específicos del desarrollo, se identifica una forma sistemática de introducir soluciones delimitadas por la estructura hídrica previamente analizada y los alcances geográficos que integra la generación de dichas soluciones a través de una ruta brindada a través de la plataforma. Las características más importantes de la implementación están conformadas por: las dimensiones del vehículo, la carga máxima, la distancia de cada punto destino y del origen. Las metodologías basadas en VRP son utilizadas por agencias logísticas de este tipo, donde uno de los objetivos es minimizar la pérdida de ganancias (Xie et al., 2018).

La distribución de agua potable es un problema de gran importancia para todas las ciudades del mundo, específicamente para las ciudades de bajos recursos urbanos que subsisten en zonas áridas. Así, el aumento en la temperatura y el crecimiento de la población tienden a agravar aún más este problema, a tal grado que los países se ven forzados a desplegar contingencias para mitigar este problema. Según la ONU, el 9% de la población mundial no tiene acceso a agua potable. Se espera que para el 2050, al menos el 25% de la población mundial tenga un problema agravado derivado de la continua escasez de agua dulce (Naciones Unidas, 2017). México es uno de los primeros siete países con problemas de insuficiencia de agua. Noventa millones de mexicanos, que representan el 75% de la población, viven con escasez de este recurso. De ese porcentaje, 20 millones padecen por falta de este líquido vital durante todo el año, lo que provoca que México aparezca en los primeros lugares de habitantes con una escasez severa durante todo el año (Sin embargo, 2016). Actualmente, existen empresas donde la infraestructura de distribución de agua no llega a todas las zonas de la ciudad. En un sistema de distribución de agua, para planear las visitas que realiza cada vehículo cisterna a las distintas colonias se deben considerar los tiempos de viaje, la cantidad aproximada de combustible y capacidad de agua para el reparto. Es apremiante la implementación de un algoritmo que permita utilizar métodos aproximados para la asignación de rutas y disminución de gastos de operación (como tiempo extra o consumo adicional de combustible).

La eficiencia de entrega de un punto de la ciudad a otro está directamente correlacionada con aspectos que restringen la generación de una ruta eficiente. Estas restricciones involucran condiciones geográficas, velocidad, capacidad de los vehículos y distancias (García-Isidro, et al. 2016). FWTREA integra un algoritmo de aproximación que involucra métodos metaheurísticos, algoritmos evolutivos en este caso, para optimizar distancias en los recorridos de cada vehículo de transporte de agua y, a la par, disminuir los gastos de operación.

5. Desarrollo tecnológico propuesto

El desarrollo de FWTREA se divide en cuatro aspectos principales: (1) comunicación con la base de datos del organismo y la del *framework*, (2) captura de información detallada de los usuarios, tal como ubicación, demanda de agua y número de familias, (3) generación de las rutas o puntos de entrega mediante el algoritmo evolutivo, y (4) visualización en los dispositivos móviles. La finalidad de este proyecto es llevar a cabo la implementación de estas cuatro necesidades en conjunto. La herramienta principal está montada en un servidor web local, el cual tiene un puerto configurado con salida a la red externa, esto para llevar a cabo la comunicación de los dispositivos móviles en cada vehículo. La aplicación para los equipos móviles funciona siempre y cuando exista conexión a Internet mediante un plan de datos. Respecto al sistema operativo, se diseñó para Android en sus versiones 4.4 y superiores. Los servicios web están integrados en el mismo servidor local con un puerto asignado para conexiones externas. Estos elementos en coordinación integran el *framework* junto con las tecnologías de desarrollo del algoritmo evolutivo, ofreciendo al usuario una interfaz con datos sobre las entregas de agua (ubicación, volumen de la demanda y número de familias). También proporciona la opción para registrar la evidencia de la visita en el sitio.

5.1 Objetivos

El proyecto tiene como objetivo general implementar un *framework* que integra una metaheurística basada en algoritmos evolutivos que permita optimizar distancias en los recorridos que se proponen para el reparto de agua en diversas zonas donde no se tiene una estructura hídrica para la distribución de esta.

Como objetivos específicos se plantean los siguientes:

- Desarrollar una metaheurística basada en algoritmos evolutivos para resolver el VRP.
- Permitir al usuario configurar los valores de entrada del algoritmo evolutivo.
- Integrar el procedimiento de evidencias de reparto en forma digital (Formatos y papeletas de entrega).

5.2 Metodología de solución

La arquitectura de solución integra diversos elementos que permiten visualizar en un mapa los resultados generados, además de llevar a cabo la comunicación con los servidores internos y, sobre todo, implementar con seguridad las conexiones del *framework* con la tecnología que utiliza la JMAS llevando a cabo el uso de servicios web.

A continuación, se describe la metodología implementada para el desarrollo de FWTREA:

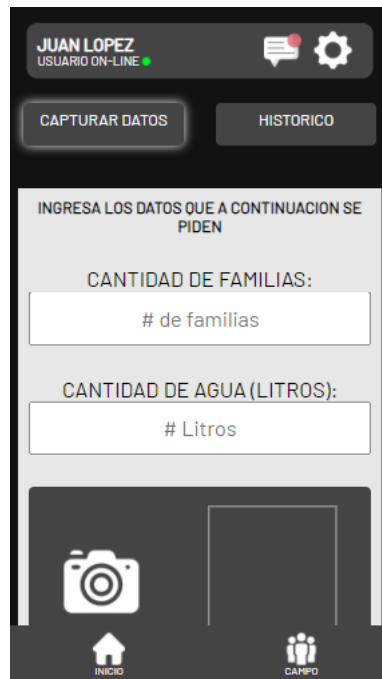
1. Se lleva a cabo un primer análisis sobre el proceso que actualmente se realiza en el departamento de distribución de agua, obteniendo como resultado datos informativos tales como áreas de reparto, tipo de vehículos, tamaño de las cisternas, horarios de reparto, cantidad de agua por domicilio.
2. Los elementos identificados se representan en un esquema ordenado por el flujo de trabajo de cada uno para tener una mejor visualización del desarrollo, la cual se muestra en la Figura 1 y se detalla a continuación: 1) Inicialmente existe un responsable de generar la información diaria de las entregas en los sectores de la ciudad. 2) Se le entrega la información al conductor. 3) El camión cisterna se dirige al área de recarga de agua (comúnmente conocida como garzas de agua por la forma de su estructura), en donde se recarga totalmente la cisterna. 5) El conductor visualiza la zona de entrega para programar el inicio de su recorrido. 6) Repite el tercer, cuarto y quinto paso durante el horario laboral. 7) Al final del día se entrega una papeleta con las rutas que realizó, así como el dato de la hora salida y la hora de llegada.

Figura 1. Identificación del flujo de trabajo con los elementos que participan actualmente



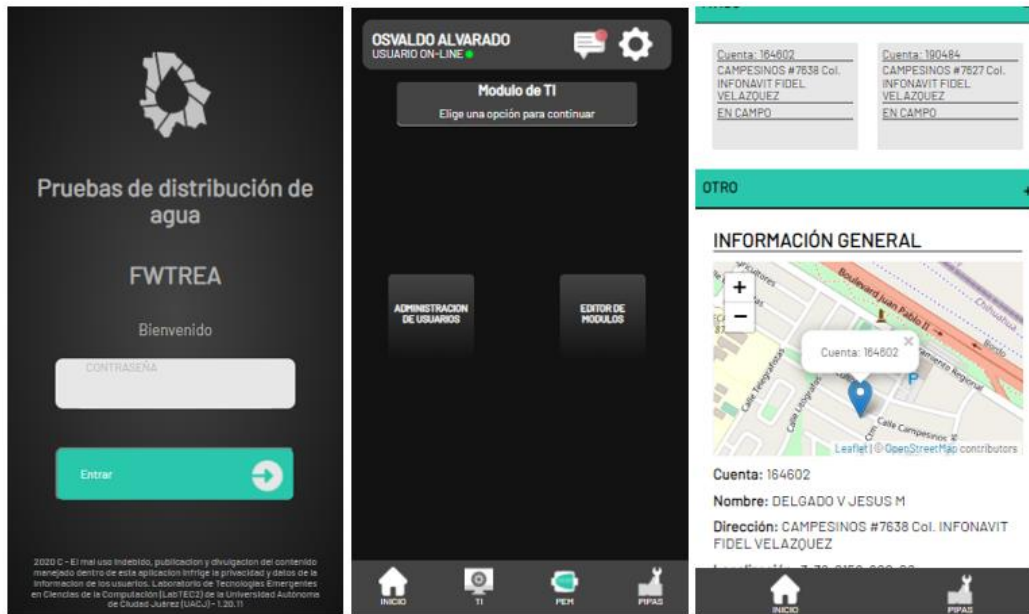
3. Una vez que se identificaron los elementos, se elaboró un análisis de las posibles soluciones al problema, en este caso, se realizó una investigación y se determinó que los resultados arrojados mediante la implementación de algoritmos evolutivos para VRP han sido exitosos al abordar casos reales similares. (e.g., Luo et al., 2015; Yusuf et al., 2014; Mohammed et al., 2017).
4. Para recabar los datos reales, como ubicaciones y demanda de agua, se integró una aplicación móvil donde se capturan únicamente tres datos, ubicación mediante latitud y longitud, cantidad de agua de cada domicilio y el número de familias en el mismo; se levantó una muestra de 150 habitantes respecto a la población total de las zonas de entrega. La Figura 2, muestra una captura de pantalla de la aplicación móvil utilizada para el muestreo.

Figura 2. Aplicación de muestreo de datos para pruebas reales



5. Los datos de muestra sirven para probar el motor del algoritmo evolutivo; sin embargo, ajustes de capacidad y ubicación de los centros de recarga estarían sujetos a modificación, en caso de querer variabilidad en las rutas.
6. Teniendo resultados reales y aproximados, se lleva a cabo la integración con la interfaz de la plataforma de la JMÁS, lo que conlleva la implementación de medidas de seguridad en las conexiones a las bases de datos y a los puertos de salida en la red, tales como el uso de servicios web, conexiones cifradas con algoritmo de encriptación SHA1 y base64.
7. Por último, se utilizan los elementos en conjunto para conformar el *framework*, donde el usuario final tiene la funcionalidad de administrar usuarios, verificar la ubicación de los vehículos, y asignar los puntos de entrega. La Figura 3 (detalla de izquierda a derecha) la pantalla de inicio de sesión de la aplicación móvil, el módulo de administración de usuarios y, finalmente, un punto de entrega de agua visualizado en un mapa con datos de prueba.

Figura 3. Pantallas principales del *framework*.



5.3 Prototipo del *framework* desarrollado

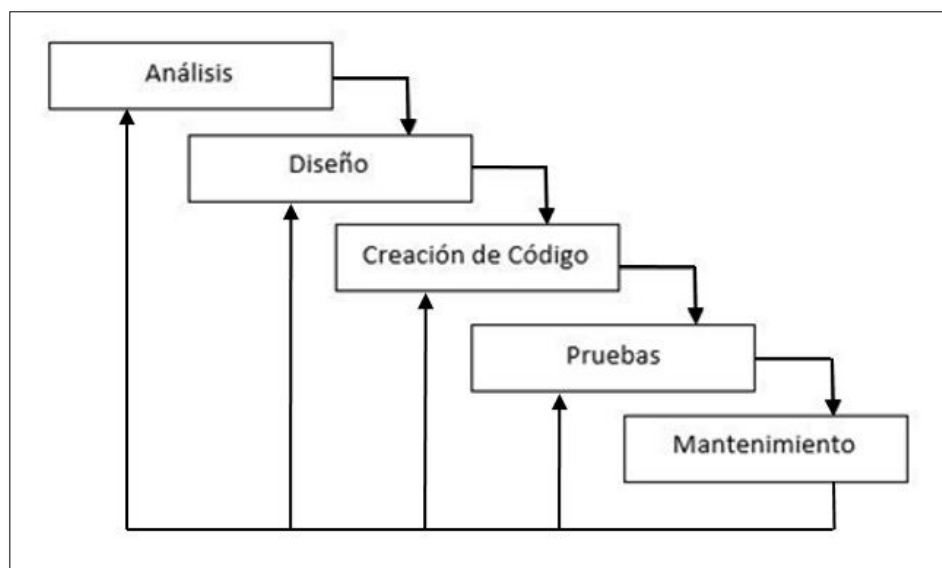
El diseño de la herramienta está basado en directrices que se tienen que seguir dentro de la JMAS; por lo tanto, existe un límite de libertad para realizar cambios en el proceso. Cada una de las fases que involucra el prototipo del *framework* se rige por la modularización de solución propuesta, la cual es descrita a continuación:

- Fase de conectividad: se encarga de gestionar las conexiones con las bases de datos, en este caso existen son dos, una local del proyecto y una interna del organismo, de modo que, la base de datos interna cuenta con el padrón de usuarios y el padrón de vehículos; por otro lado, la base de datos del *framework* contiene los registros de conexión, las rutas generadas y detalles extras que se introducen con el *framework*.
- Fase de implementación del algoritmo evolutivo: es el encargado de llevar a cabo todo el proceso evolutivo del algoritmo, arrojando como resultado soluciones diversas.
- Fase de pruebas: es la última fase, y lo destacable de esta es que se basa en el grado de usabilidad que tenga respecto a los usuarios; en este punto, los cambios que el

usuario final considere importantes sobre la interfaz y en los módulos son viables, ya que el ciclo de uso se completa y se pueden tomar decisiones.

Cabe mencionar que el diseño de estas fases implicó el uso de una metodología de desarrollo en cascada. Aunque el proceso es largo, es efectivo, ya que las consultas sobre las entregas y los cambios tenían que pasar un ciclo completo y volver a analizar las afectaciones correspondientes. La Figura 4 visualiza la metodología de desarrollo de software mejor adaptada al *framework*.

Figura 4. El modelo cascada



Fuente: Rojas y Boucchechter (2005).

5.3.1 FWTREA

A continuación, se describen de manera detallada las tecnologías aplicadas y a su vez el software implementado para la consolidación del *framework* final.

5.3.1.1 Fase de conectividad

Los organismos públicos, con el propósito de mantener la información de los usuarios segura, llevan a cabo la configuración de tecnologías que protejan las diferentes áreas y desarrollos con las que se cuenta. En este caso, el acceso a datos como usuarios, nombres, direcciones, ubicación y accesos forma parte de una de las tareas que FWTREA tiene como responsable dentro del software. Para reducir el costo de desarrollo y modelación de múltiples interfaces que lleven a cabo transacciones de acceso a los datos, muchas organizaciones tienden a implementar servicios web proporcionados por alguno de los entes que interactúan entre sí, esto significa la reutilización de servicios para una o más empresas que deseen llevar a cabo interacción entre datos. Entre los beneficios conocidos esta la confiabilidad de las conexiones internas y externas que se lleven a cabo sobre los servicios que se brindan en las diversas plataformas (Calvo, Gracia, & Bayo, 2017).

FWTREA se basa en una arquitectura orientada a servicios (SOA por sus siglas en inglés), la cual proporciona datos de conectividad para inicios de sesión de usuarios y consultas generales en caso de tener una cuenta o número de servicio de agua existente. En este caso, no existen números de servicio definidos; sin embargo, se tiene la opción para poder consultar inicios de sesión y consultar tanto conductores como vehículos en el padrón correspondiente a cada uno para llevar a cabo la administración de los mismos. Según Mohammadi & Mukhtar (2013), hay tres elementos fundamentales en SOA, el que provee el servicio, el que consume el servicio y el agente de servicios. El proveedor de servicios publica una descripción del servicio y proporciona la implementación para el servicio, un solicitante de servicio (consumidor) encuentra una descripción del servicio en el registro de servicio, luego vincula e invoca el servicio, y, por último, el agente de servicio proporciona el registro del servicio. El acceso a los datos involucra el uso de servicios web que utilizan los protocolos HTTP (HyperText Transfer Protocol), SOAP y WSDL para lograr una comunicación segura (Halili & Ramadani, 2018).

Por consiguiente, se determinó a Apache Tomcat como servidor que publicará las funciones de conexión. Este es utilizado para proyectos en lenguaje Java y puede funcionar de manera autónoma. Previamente, se montó en una máquina virtual alojada en un servidor físico con

las siguientes características: Xeon (R) CPU E5-2640, sistema operativo Windows Server 2003 R2 Enterprise Edition con 4 Gb de memoria RAM.

El desarrollo del software se llevó a cabo en la plataforma Eclipse Mars 2, en lenguaje Java, teniendo como resultado dos métodos. La Figura 5 muestra el método llamado logg, donde se lleva a cabo la validación de los usuarios que ingresan a la aplicación, recibiendo una petición externa que contiene el usuario y la contraseña.

Figura 5. Ejemplo de un método para inicio de sesión.

```
/** Web service operation */
/*WEB SERVICE OSWALDO----
@WebMethod(operationName = "logg") //Operacion iniciar en la app PIPAS 2020-10-29

public static String createCallWebPruebas(@WebParam(name = "usser" ) string usuario,
                                           @WebParam(name = "pass" ) string password)
throws SQLException
```

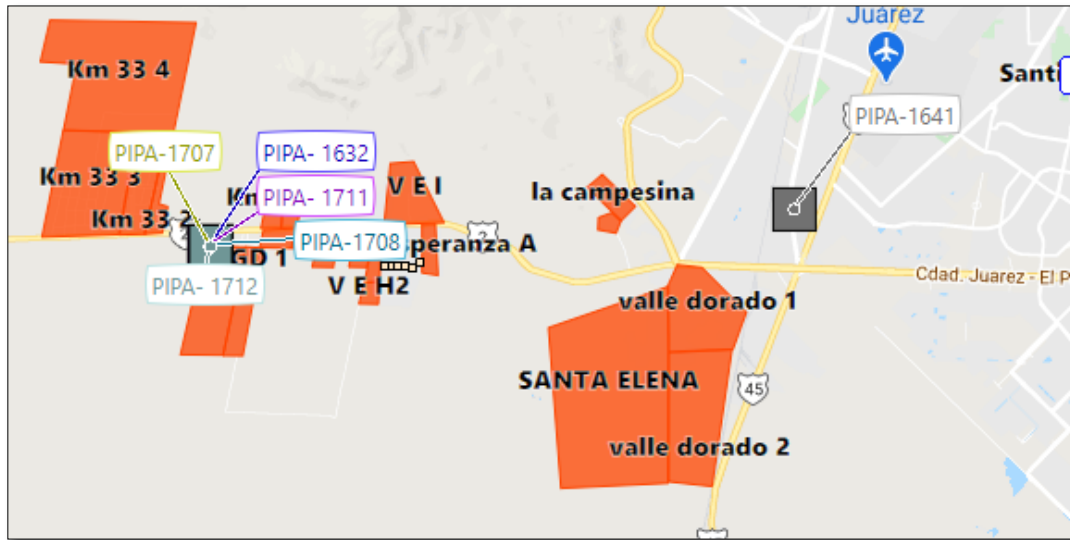
En el caso de la conexión directa con la base de datos, se desarrolló un archivo en formato web que cuenta con las cadenas de conexión necesarias para extraer datos de las tablas. Actualmente, esta es la que tiene un uso más amplio de funciones por su mejor versatilidad en lo que respecta a cambios y modificaciones. Esta última conexión fue desarrollada en un archivo de texto en formato PHP (*Hypertext Preprocessor*) que posteriormente se subió al servidor donde se ubica FWTREA.

5.3.1.2 Fase de implementación del algoritmo evolutivo

El módulo que involucra la implementación del algoritmo evolutivo tiene como origen cumplir con el objetivo principal del proyecto, dando solución al problema de ruteo de vehículos tipo cisterna para el transporte de agua. Actualmente, el procedimiento que lleva el organismo público para el reparto de agua consta de una subdivisión de áreas geográficas (como lo muestra la Figura 6), donde se tiene el inconveniente de falta de estructura hídrica y, por ende, se lleva a cabo la tarea de transportar el vital líquido. Posteriormente, los vehículos recorren la ciudad desde el punto de recarga de agua, considerando que, para el presente proyecto, se tomó en cuenta únicamente el punto de recarga principal, ya que en el

lugar se encuentra el personal administrativo que cuenta con información que sirve para efectos de la implementación.

Figura 6. Mapa de los sectores actuales para reparto de agua en Ciudad Juárez



La identificación de estos centros de recarga permite obtener los primeros datos para alimentar al algoritmo, principalmente la ubicación. Partiendo desde este punto, los conductores llenan los vehículos cisterna completamente, como se muestra en la Figura 7, iniciando de esta manera la ruta que le corresponde.

Posteriormente, hay que llevar a cabo el registro de las características de los vehículos, de acuerdo con la literatura (y para efectos de prueba del algoritmo) son necesarios dos datos: la ubicación y la demanda de agua. Dentro de la estructura de la JMAS, estos dos datos son separados en más variables, la primera es la latitud, seguido de la longitud, el número de familias que viven en el lugar y, finalmente, la cantidad de agua que les corresponde. Es importante resaltar que este servicio de entrega de agua brindado por la JMAS a través de los vehículos de la empresa es totalmente gratuito. También se debe tener en cuenta que existe un límite de 2000 litros de agua por familia a la semana y únicamente es entregada a las casas habitación; los negocios, las granjas y maquilas quedan exentos de este servicio. Dicho lo anterior, existe la posibilidad que en un predio vivan dos o más familias, aumentando al doble la demanda por semana.

Figura 7. Centro principal de recarga de agua ubicado en Av. de las Torres y calle Santiago Blancas



La capacidad de los tanques que tiene cada vehículo es variable. En la Figura 8 se puede observar la dimensión de dos vehículos con cisternas de 10,000 litros y una de 35,000. Normalmente, las de mayor capacidad se llenan en su totalidad para acercarse a puntos donde se realizan entregas y sirven para rellenar algunos tanques, evitando así regresar al sitio central, la capacidad de la cisterna alcanza para llenar 3 vehículos, de un total de 24 que conforma la flotilla de reparto.

Finalmente, un dato importante sobre el que trabaja el algoritmo es el padrón de predios. El reparto que actualmente se hace involucra 5024 domicilios, que por el crecimiento demográfico y el asentamiento en esas zonas ha ido aumentando cada vez más. En esta parte se tomó una muestra de 150 personas, de las cuales se utilizó la ubicación y su demanda.

Como se ha mencionado brevemente, hay tres elementos que intervienen en el VRP: los clientes, los depósitos y la flota de vehículos (Toth & Vigo, 2002). Sin embargo, existen factores externos que no se tiene control sobre ellos, tal es el caso del clima. En temporada de lluvias son comunes los atascos de vehículos. Otro factor de riesgo son los repentinos

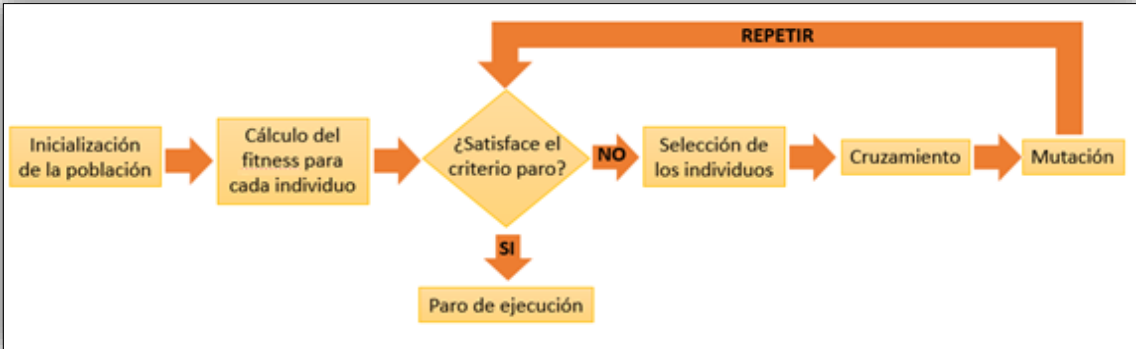
desvíos de calles, accidentes viales, entre una gran variedad de factores ajenos que no son actualmente contemplados en el *framework*.

Figura 8. Recarga en el camino de cisternas con capacidad de 10,000 litros, con una de 35,000 para ahorro de tiempo en regresar al punto de recarga central



La herramienta implementa la estructura de un algoritmo evolutivo general como se muestra en la Figura 9 y en el Algoritmo 1, basados en el estudio de Baker & Ayechev, 2003. La solución aplicada involucra la generación de rutas por cada vehículo. Para el proyecto se consideró que diariamente se brinda el servicio de entrega de agua de 40 a 45 familias, obteniendo como resultado cinco a seis rutas.

Figura 9. Estructura de un algoritmo genético general



Algoritmo 1. Pseudocódigo de algoritmo genético implementado

Entrada: Conjunto de datos de ubicación, demanda e identificación de los clientes de la base de datos

```
1. viaje ← null (arreglo)           # viaje: variable para resultado final
2. arregloLat ← latitud             # arregloLat: Coordenada polar
3. arregloLon ← longitud            # arregloLon: Coordenada polar
4. arregloDemanda ← cantidad_agua  # arregloDemanda: En litros
5. arregloIdCliente ← cliente      # arregloIdCliente: Identificador cliente
6. numClientes ← contar(arregloClientes) # arregloIdCliente: Identificador cliente
7. capacidadVehiculo ← capacidad
   # capacidadVehiculo: Puede ser constante o variable dependiendo de los vehículos para salir a
   campo,
8. pob ← generar_poblacioninicial (arreglo) # pob: Arreglo bidimensional
9. mpadre ← matrizDistancia[pob]      # mpadre: matriz distancia principal
10. fitness ← calculoFitness(mpadre) # fitness: cálculo de fitness para la población inicial
11. contador ← 0                      # contador: inicializado en cero para cada ciclo del genético
Repetir
12.   padres ← evaluación (mpadre[contador], mpadre[contador++])
13.   descendencia ← cruzaPadres (padres)
14.   descendencia_renovada ← mutacion[descendencia]
   # La mutación ocurre con los genes más cercanos al pivote es decir no se hace
   aleatoriamente, respetando el proceso evolutivo
15.   viaje ← descendencia_renovada (arreglo)
16.   viaje ← busquedaTabu ( viaje )
17.   contador ← contador + 1
Mientras criterio_paro < N generaciones
   # La generaciones son variables entre más generaciones se definan más tiempo ocupa para
   arrojar el resultado final
18.   Print viaje
```

La generación de una población inicial robusta diversifica el buen comienzo del proceso genético, la cual forma parte de un ciclo con una gran probabilidad de obtener soluciones aceptables. Son 80 predios los que se integran en el algoritmo evolutivo, siendo esta la cantidad de individuos que se generan en la población inicial. Existen investigaciones que mencionan las mejoras en el desempeño al integrar búsqueda tabú en la búsqueda local del algoritmo, razón por la cual también fue integrada por el *framework*.

El algoritmo genético debe tomar en cuenta las siguientes especificaciones:

- a) Crear una población inicial aleatoria de N individuos. En este caso, cada individuo representa el inicio de la generación de un cromosoma o una ruta posible. Como se muestra en el Algoritmo 2, se extrae de un arreglo previamente cargado con los clientes que componen los individuos.

Algoritmo 2. Pseudocódigo para generar la población inicial

Entrada: Arreglo con los clientes que cuentan con una visita programada

1. longitudClientes \leftarrow clientes (arreglo)
 2. clientesOrdenado \leftarrow ordenamiento(clientes)
 3. poblacionInicial \leftarrow (arreglo)
 4. capacidad \leftarrow 10000
 5. **Para cada** clientesOrdenado[i] < longitudClientes , $i \leftarrow 0$
Se genera N número de rutas como N número de clientes
 6. poblacionInicial[i] \leftarrow clientesOrdenado
poblacionInicial[i]: se agrega cada cliente con su respectiva demanda de agua al arreglo de población inicial
 7. capacidad $i \leftarrow$ capacidad - poblacionInicial[i].capacidad
capacidad: se resta la capacidad de cada vehículo para generar N número de rutas cuidando la violación a la restricción de capacidad
 8. **Fin Para cada**
 9. Print poblacionInicial
-

- b) Calcular el fitness de cada individuo de la población. El fitness está relacionado con el valor de la función objetivo para cada individuo. Para el fitness, se contempla el mayor número de rutas generadas, es decir, el que tenga menor número de rutas tendrá un peor fitness.
- c) Se lleva a cabo el cálculo de la matriz de distancias por cada nuevo elemento generado, esto implica mayor tiempo de cómputo en el primer ciclo de cada individuo. La matriz con todas las posibles combinaciones se reutiliza para la comparación en cada ciclo posterior; en la Figura 10 se muestra el arreglo en PHP, el cual se estructura de la siguiente manera: Elemento_Salida-Elemento_Llegada|Distancia.
- d) Seleccionar dos individuos de la población existente, donde la probabilidad de selección es proporcional al *fitness* de los individuos, es decir se eligen los mejores del ciclo.
- e) Cruzar los dos individuos seleccionados para generar un nuevo descendiente mediante la cruce con dos puntos de corte.
- f) Aplicar el proceso de mutación aleatorio sobre el nuevo individuo considerando que se trata de un individuo cercano, respetando el proceso evolutivo.
- g) Se añade el nuevo individuo a la nueva población, sustituyendo al peor de la población anterior.

- h) Se implementa búsqueda tabú en la mejor solución de la población, este algoritmo es representado en el Algoritmo 3 para su mejor comprensión.
- i) El criterio de parada son 30 generaciones, por eso el proceso de ejecución es rápido.

Figura 10. Arreglo maestro generado por cada población inicial para optimización de generación de matriz de distancias

```
[0] => Array
(
  [0] => 99999-99999|0
  [1] => 99999-3|14.6906
  [2] => 99999-1|14.7381
  [3] => 99999-2|14.7031
  [4] => 3-99999|14.6906
  [5] => 3-3|0
  [6] => 3-1|0.1345
  [7] => 3-2|0.1351
  [8] => 1-99999|14.7381
  [9] => 1-3|0.1345
  [10] => 1-1|0
  [11] => 1-2|0.0361
  [12] => 2-99999|14.7031
  [13] => 2-3|0.1351
  [14] => 2-1|0.0361
  [15] => 2-2|0
)
```

Este *framework* integra la búsqueda tabú, cuya principal característica es su lista tabú que ayuda a mejorar la eficiencia, respecto al control del número de ciclos basándonos en una lista de movimientos prohibidos. Una vez definido el *tenure tabu*, se toman las rutas del primer individuo como la mejor opción hasta el momento, cada comparación con los siguientes nodos determina cada posible cambio. Este proceso de evaluación continua hasta que el índice *tenure tabu* llegue a cero (Chen et al., 2017). En el Algoritmo 3 se presenta con mayor detalle.

Algoritmo 3. Pseudocódigo de la implementación de Búsqueda Tabú

Entrada: Conjunto de datos previamente evaluados del proceso evolutivo

```
10. mejorSolucion ← solucion                                # mejorSolucion: previamente evaluada
11. maxValorListaTabu ← valor1
12. ListaTabu ← arreglo
13. TabuTenure ← Valor2
    Repetir
        Para cada mejorSolucion.ruta[i] < mejorSolucion.ruta[longitudMax]
14.         nodoCandidato ← nodoAleatorio
15.         nuevaDistancia ← comparaDistanciaNodo(nodoCandidato, nodo_vecinoElegido)
16.         Si nuevaDistancia < distanciaOriginal Entonces
17.             mejorSolucion.ruta[i] ← cambiaNodos(nodoCandidato, nodo_vecinoElegido)
18.         Fin Si
19.         Si longitud(longitudListaTabu >= maxValorListaTabu Entonces
20.             ListaTabu.RemoveUltimo(nodoCandidato y nodo_vecinoElegido)
21.         Fin Si
22.         ListaTabu.Agregar(nodoCandidato, nodo_vecinoElegido)
23.         i++
24.     Fin Para cada
25.     TabuTenure --
26. Mientras TabuTenure > 0
27. Print mejorSolucion
```

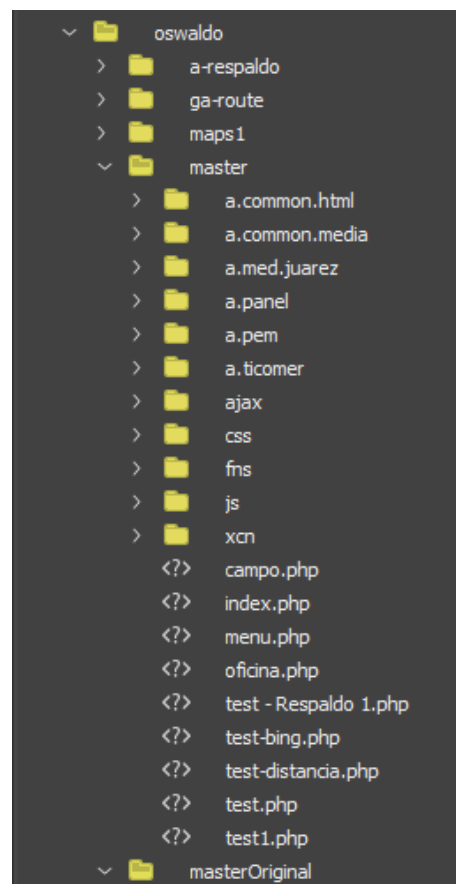
5.3.1.3 Integración con la plataforma

FWTREA está desarrollado para un ambiente web y móvil, interactuando de manera transparente con las diferentes plataformas y navegadores. En lo que respecta a la plataforma móvil, fue desarrollada en el lenguaje de programación Java a través del software de Android Studio en su versión 4.1. Su integración con las funcionalidades de ubicación involucró el desarrollo de un módulo en JavaScript (comunicación dual con el GPS físico del dispositivo y el *framework* del servidor). La finalidad de este módulo es llevar a cabo el envío de alertas, así como mejorar la precisión de la ubicación en campo utilizando todo el potencial de cada equipo. Respecto a los dispositivos móviles, el *framework* puede ejecutarse únicamente para equipos Android en versiones 4.4 y superiores.

Por otra parte, la versión web se desarrolló en lenguaje PHP, involucrando tecnologías del tipo AJAX (*Asynchronous JavaScript and XML*), JavaScript, JSON (*JavaScript Object Notation*), HTML (*HyperText Markup Language*) y CSS (*Cascading Style Sheets*), utilizando el software de Dreamweaver en su versión 2019, el cual brinda un manejo rápido en lo que respecta a las conexiones con el servidor.

Para la estructura de los archivos web se implementó un método de reutilización de código propuesto por el equipo de trabajo para poder llevar a cabo la división de tareas. En la Figura 11 se muestra un esquema general del servidor.

Figura 11. Estructura de los archivos web de FWTREA



5.3.2 Visualización de las operaciones

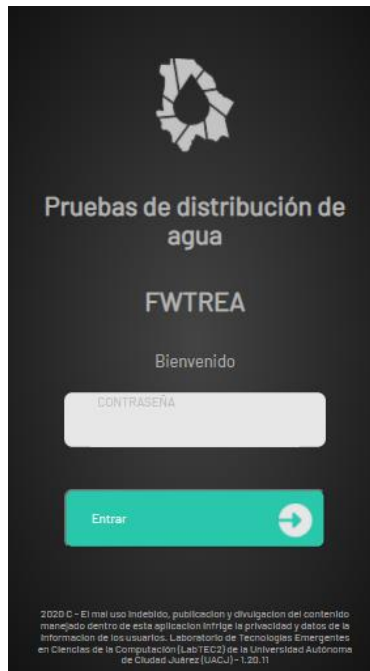
El funcionamiento del *framework* se basa en las necesidades propias de la JMAS, apegadas al manual de procedimientos interno que se actualiza anualmente. Con el cumplimiento de estos requisitos, se tiene una interfaz donde el usuario podrá iniciar sesión; existen dos tipos de usuario: el de oficina y el usuario de campo. El usuario de oficina podrá tener el control sobre el personal del departamento, esto con el objetivo de que en algún futuro pudieran generarse reportes personalizados de entregas y tiempos de viaje, también pudiera extenderse para procesar aclaraciones de usuarios; el tipo de aclaración más común es respecto a las visitas. Respecto a este último punto, cabe aclarar que el conductor de la JMAS no entra a los domicilios ni destapa los contenedores, el usuario debe tener sus depósitos al frente y destapados al menos el día que pasa el camión cisterna; en la Figura 12 se muestra el reparto a un domicilio.

Figura 12. Reparto de agua en el Km 29 al sureste de la ciudad. El usuario ya tiene preparado un hueco en su malla y el conductor únicamente ingresa la manguera al depósito



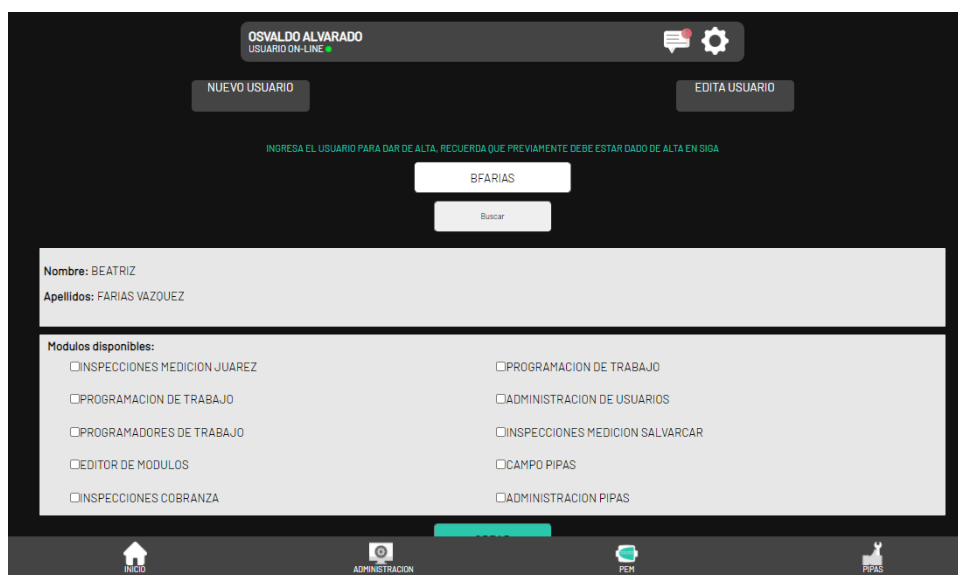
El primer paso de FWTREA es el inicio de sesión; previamente al personal de la JMAS se le asignó un usuario del dominio interno, el cual se ingresa a la par de su contraseña. El enfoque del *framework*, por petición de la jefatura del departamento, es “menos trabajo para el conductor”, por este motivo se realizó el cruce con un pin único ligado a cada usuario, la Figura 13 muestra la pantalla de acceso.

Figura 12. Inicio de sesión



El usuario administrador puede ingresar a otros usuarios que soliciten acceso a la aplicación, es muy común que se haga intercambio temporal de personal para apoyar a otras áreas, este módulo fue solicitado para tener un control de acceso, sin necesidad de que un área de TI tenga que brindar este control. La Figura 14 muestra el módulo.

Figura 13. Módulo de edición de usuarios



El *framework* cuenta con una sección principal de avisos generales, comúnmente la comunicación es realizada por aplicaciones como Whatsapp, aquí se envían avisos oficiales ya que los empleados que realizan la labor de campo no tienen correo institucional con fácil acceso. La Figura 15 muestra el módulo.

Figura 14. Módulo de avisos



Con el objetivo de facilitar la generación de rutas, se creó el módulo automático de ruteo. Este funciona únicamente entrando a la opción de *Generación de Rutas*, e internamente realiza la conexión a la base de datos y posteriormente ejecuta el algoritmo, el usuario asigna la solución obtenida. Cabe resaltar que cada conductor tiene asignado un sector específico para el reparto. En caso de llegar a ocurrir el siniestro en el que un vehículo deje de funcionar, se asigna al conductor a otro vehículo y la ruta sigue siendo la misma dado que no afecta el vehículo, si no el sector previamente asignado. En la Figura 16 se muestra una visión inicial de cada una de las rutas, la variabilidad para el usuario dependerá de la flota heterogénea de pipas, que de la misma manera es configurable; sin embargo, estará sujeto a disponibilidad para el usuario, en la Figura 17 se muestra dicha configuración.

Figura 15. Generador de rutas, de arriba hacia abajo, se muestra la tabla de visitas iniciales, en medio se observan los puntos disponibles para entrega, y al final un conjunto de rutas

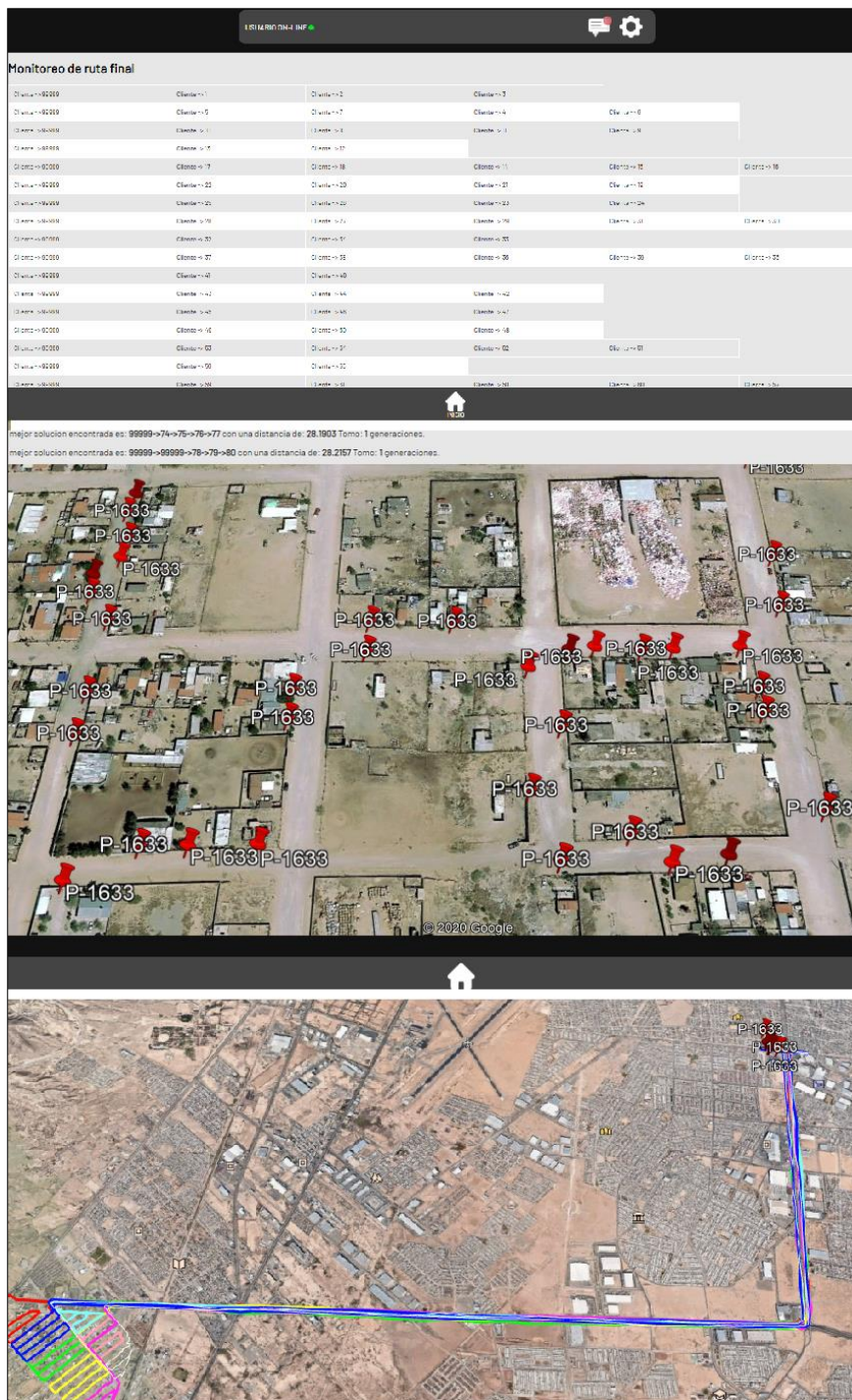
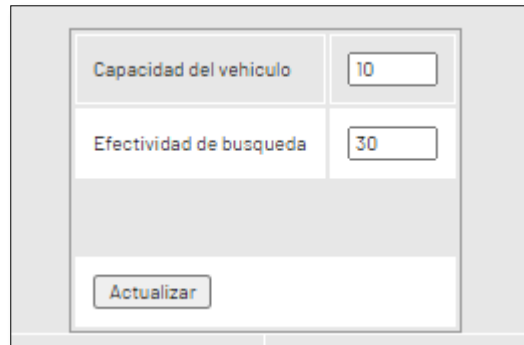


Figura 16. Configuración de la capacidad del vehículo cisterna y efectividad de búsqueda (Número de generaciones del algoritmo)



The image shows a configuration window with a light gray background. It contains two input fields: 'Capacidad del vehiculo' with the value '10' and 'Efectividad de busqueda' with the value '30'. Below these fields is a button labeled 'Actualizar'.

Capacidad del vehiculo	10
Efectividad de busqueda	30
Actualizar	

La vista del usuario de campo fue diseñada para que no tuviera que capturar ningún dato si no era necesario, por instrucción del personal que coordina a los conductores, el proceso debe ser rápido, sin afectar el tiempo de operatividad en los domicilios. Consecuentemente, la aplicación guarda en segundo plano los datos de ubicación en todo momento. El funcionamiento de este es el siguiente: 1) El usuario ingresa a la opción de campo. 2) Le aparece una opción con una barra llamada “reparto”. 3) El usuario encontrará la ruta que generó el algoritmo y que posteriormente el personal de oficina le asignó al conductor. 4) Se tendrá la opción de agregar una evidencia fotográfica en caso de entregas especiales, no significa que sea obligatorio para todas las entregas. 5) Cambia de color a amarillo en cada entrega realizada. La Figura 18 representa la sección del usuario de campo.

Figura 17. Vista de la interfaz de campo



5.3.2.1 Experimentación interna de FWTREA

Debido a que no existe un historial de rutas realizadas de forma digital (el registro histórico que se maneja se basa en las papeletas entregadas por cada conductor con datos que muestra el número de ruta, sector, familias y kilometraje inicial del día laboral), se realizaron pruebas controladas para la generación de rutas, y, por este medio, poder observar la efectividad del algoritmo. Para esto se creó un módulo de pruebas para recabar las instancias iniciales respecto al entorno real. En la Tabla 1 se observan los resultados obtenidos en base a una muestra promedio de 160 familias, a las cuales se les brindó el servicio de entrega de agua, obteniendo una mejora del 12.5% respecto al número de rutas atendidas, es decir, en el

horario laboral normal se realizan de cinco a seis rutas promedio, esta solución arroja la posibilidad de poder atender una ruta más, sin necesidad de exceder el horario de trabajo.

Tabla 1. Comparativo con muestras capturadas de las papeletas de viaje con la ejecución del algoritmo evolutivo

RESULTADOS FWTREA - JMAS JUÁREZ						
Cantidad de usuarios	# ciclos de ejecución	Tiempo (seg)	Rutas generadas (horario laboral)		Distancia (horario laboral)	
			FWTREA	Método tradicional	FWTREA (promedio por ruta en el KM 30)	Método tradicional (promedio por ruta en el KM30)
41	30	8.3	6	7	29 km	33 km
50	30	8.5	7	8	30 km	33 km
80	30	9.1	11	13	30 km	34 km
100	30	9.4	14	16	32 km	34 km

Es importante mencionar que por cuestiones de seguridad, la aplicación solo se instalará en la oficinas de la JMAS, el acceso se restringe mediante detección de IP, los datos de las figuras anteriores fueron anonimizados por instrucción de los encargados del área; sin embargo, los datos de localización, número de familias y demanda de agua son reales y en conformidad con el artículo 63 de la Ley de Protección de Datos Personales del Estado de Chihuahua (Periódico Oficial del Estado, 2017).

6. Conclusiones y trabajo futuro

El proyecto reportado en este documento surge a partir de la necesidad de repartir agua potable en vehículos cisterna mediante la integración de la tecnología. Además del desarrollo del algoritmo genético dentro de un *framework*, se proporciona una plataforma web con diversos controles para la gestión del proceso de reparto de agua. Las ventajas que se obtienen del *framework* son las siguientes:

- Mejora del tiempo en ruta.
- Potencial ahorro de combustible.
- Virtualización de la información de las rutas.

El principal reto que se presenta en la práctica es la resistencia al cambio y la persistencia en usos y costumbres en la organización, seguido de los retos técnicos relacionados con la estandarización y el buen diseño de los métodos y de las clases, de tal forma que este desarrollo sea aplicable a toda una familia de problemas similares de optimización. Otro reto importante, es la integración de la herramienta dentro del sistema oficial del organismo público JMAS.

Esta herramienta funge como una plataforma inicial para agregar diversas funcionalidades de gestión. Como trabajo futuro, se pretende incorporar FWTREA al sistema de administración comercial, donde no solo impacte en el área de gestiones administrativas, sino también llevar a cabo la incorporación de algunos sensores para la medición de indicadores como el combustible, la temperatura de motor, los niveles de aceite, el odómetro, entre otras posibles mediciones que se pudieran recabar.

Referencias

- Aarts, E., Aarts, E. H., & Lenstra, J. K. (Eds.) (2003). *Local search in combinatorial optimization*. Princeton University Press. 525 p.
- Baker, B. M., & Ayechev, M. A. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 30(5), 787-800. doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00051-5
- Barrón, M., De la Torre, E., & Solano, A. B. (2018). Instituto Mexicano del Transporte (IMT). Análisis exploratorio sobre el uso de soluciones tecnológicas en las empresas de autotransporte de carga. Publicación técnica No. 531. Sanfandila, Querétaro, México.
- Calvo, J., Gracia, J., & Bayo, E. (2017). Robust design to optimize client-server bi-directional communication for structural analysis web applications or services. *Advances in Engineering Software*, (págs. 136–146). doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.04.010

- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1), 80-91. doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80
- García-Isidro, F., Martínez-Lugo, J., Ochoa, A., & Hernández-Aguilar, J. A. (2016). Implementation of an Algorithm for the Transfer of Citrus Using an Intelligent Model for Trains. *Research in Computing Science*, 122, 49-62.
- Google. (s.f.). Mapa de Ciudad Juarez, Chihuahua en Google maps. Recuperado el 18 de Noviembre, 2020, de: <https://goo.gl/maps/nGk6swK7AseSXGsr9>.
- Halili, F., & Ramadani, E. (2018). Web services: a comparison of soap and rest services. *Modern Applied Science*, 12(3), 175. doi.org/10.5539/mas.v12n3p175
- Ley de Protección de Datos Personales del Estado de Chihuahua, del 6 de septiembre de 2017. Periódico Oficial del Estado No. 71, Art. 65, 6 de Septiembre del 2017. <http://www.congresochihuahua2.gob.mx/biblioteca/leyes/archivosLeyes/1342.pdf>
- Liu, R., Xie, X., Augusto, V., & Rodriguez, C. (2013). Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care. *European Journal of Operational Research*, 230(3), 475-486.
- Luo, J., Li, X., Chen, M. R., & Liu, H. (2015). A novel hybrid shuffled frog leaping algorithm for vehicle routing problem with time windows. *Information Sciences*, 316, 266-292.
- Mohammed, M. A., Abd Ghani, M. K., Hamed, R. I., Mostafa, S. A., Ahmad, M. S., & Ibrahim, D. A. (2017). Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution. *Journal of computational science*, 21, 255-262. doi: 10.1016/j.jocs.2017.04.003
- Mohammadi, M., & Mukhtar, M. (2013). A Review of SOA Modeling Approaches for Enterprise Information Systems. *Procedia Technology*, 794 – 800. doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.260
- Naciones Unidas (2017). La Agenda 2030, haciendo frente a una amenaza global. <http://www.onu.org.mx/haciendo-frente-a-una-amenaza-global/>, 2017. [Online; accessed 10-April-2018].
- Pisinger, D., & Ropke, S. (2007). A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers & operations research*, 34(8), 2403-2435. doi: 10.1016/j.cor.2005.09.012
- Rojas, R & Boucchechter, I. (2005). Ingeniería del Software. Ciclo de vida, Mallorca, España

- Sin embargo. (2016). México está entre los países que enfrentan escasez de agua: 90 millones padecen desabasto. Octubre 2018, de Sin Embargo Sitio web: <http://www.sinembargo.mx/06-03-2016/1630781>
- Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2002). The vehicle routing problem. Society for Industrial and Applied Mathematics. *Society for Industrial and Applied Mathematics*. doi.org/10.1137/1.9780898718515
- Xie, J., Carrillo, L. R. G., & Jin, L. (2018). An integrated traveling salesman and coverage path planning problem for unmanned aircraft systems. *IEEE control systems letters*, 3(1), 67-72. doi: 10.1109/LCSYS.2018.2851661
- Yusuf, I., Baba, M. S., & Iksan, N. (2014). Applied genetic algorithm for solving rich VRP. *Applied Artificial Intelligence*, 28(10), 957-991. doi: 10.1080/08839514.2014.927680