



Título:

Desarrollo de una Herramienta informática para la ubicación óptima de plantas de recuperación de residuos en zonas rurales

PROYECTO

presentado para optar
al Título de Grado en Ingeniería en Organización Industrial
por

Alumno Leonardo Tammaro

bajo la supervisión de

Profesor Ion Irizar

Donostia-San Sebastián, marzo de 2021



tecnun
Universidad
de Navarra



tecnun Universidad de Navarra

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA
PARA LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE PLANTAS DE RECUPERACIÓN
DE RESIDUOS EN ZONAS RURALES**

PROYECTO FINAL DE GRADO

Presentado por el alumno

Leonardo Tamarro

Bajo la supervisión de

Ion Irizar

San Sebastián, septiembre de 2021

AGRADECIMIENTOS

Primero me gustaría agradecerles a mis padres por su constante apoyo y dedicación en estos años de carrera.

Gracias a mi director de tesis Ion Irizar por su dedicación para el desarrollo de este proyecto y todos los conocimientos que me otorgo durante la elaboración. Me gustaría agradecer también a la Universidad de Navarra por abrirme sus puertas y a todos los profesores por brindarme sus consejos y enseñanzas.

Finalmente, me gustaría agradecerles a todas las personas que estuvieron presentes en estos últimos años, especialmente a mis amigos por su apoyo y buenos momentos compartidos.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	2
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	3
2.1 . Tratamiento de aguas residuales.....	3
2.2 . Digestión anaerobia	4
2.3 . Características de la depuración en el ámbito rural	5
2.4 . Ubicación de la instalación	6
3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DEL ESTUDIO.....	9
3.1 . Descripción general de Badajoz	9
3.2 . Datos entrada.....	9
4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN	17
4.1 . Pretratamiento de datos (Clustering)	17
4.2 . Formulación matemática del optimizador	19
5. PRESENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA	27
5.1 . Diseño de la herramienta.....	27
5.2 . Programación de la herramienta	30
6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	40
7. CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS	45
REFERENCIAS	46
ANEXOS.....	48
Algoritmo de Clustering desarrollado en Python	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.1 Proceso de purificación de agua en una depuradora.....	3
Figura 2.2.1 Proceso de digestión anaeróbica	5
Figura 2.4.1 Clasificación de diferentes métodos de optimización	7
Figura 2.4.2 Descripción de un óptimo local	8
Figura 3.1.1 Ubicación de Badajoz.....	9
Figura 3.2.1 Fórmula de la distancia euclídea	13
Figura 3.2.2 Zonas de Badajoz en el sistema de referencia ETRS89	14
Figura 4.1.1 Método del codo	18
Figura 4.1.2 Solución gráfica del clúster.....	18
Figura 4.2.1 Modelo de consumo de combustible en l/100 km	21
Figura 4.2.2 Calculo del Número de km de cada clúster a la planta	22
Figura 4.2.3 Calculo del %Q de lodo transportado a la planta 1	23
Figura 4.2.4 Función sigmoide.....	23
Figura 4.2.5 Comportamiento de la función sigmoide.....	24
Figura 4.2.6 Comportamiento de la función de euros/m3.....	26
Figura 5.1.1 Vista ventana inicial.....	27
Figura 5.1.2 Ventana de introducción	27
Figura 5.1.3 Ventana de herramienta	28
Figura 5.1.4 Ventana de resultados.....	29
Figura 5.2.1 Programación de los botones.....	30
Figura 5.2.2 Creación del solver	31
Figura 5.2.3 Configuración de algunos parámetros del solver.....	33
Figura 5.2.4 Otras configuraciones del solver	34
Figura 5.2.5 Primera y segunda parte de la macro ResolverSolver ()	35
Figura 5.2.6 Función inicializar valores.....	36
Figura 5.2.7 Función AplicarRuido.....	37
Figura 5.2.8 Tercera parte de la macro ResolverSolver ()	38
Figura 6.1.1 Resultados obtenidos para la planta 1	40
Figura 6.1.2 Resultados obtenidos para 2 plantas	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.2.1 Datos de entrada de las depuradoras	10
Tabla 3.2.2 Datos de entrada de las industrias agroalimentarias	11
Tabla 3.2.3 Datos simplificados para el optimizador de las depuradoras	12
Tabla 3.2.4 Datos simplificados para el optimizador de las industrias agroalimentarias ...	12
Tabla 3.2.5 Convertidor de coordenadas ETRS89 a latitud y longitud	14
Tabla 3.2.6 Datos de entrada de las ubicaciones de las depuradoras modificados	15
Tabla 3.2.7 Calculadora de distancias de latitud y longitud	15
Tabla 3.2.8 Coordenadas de latitud y longitud de las industrias agroalimentarias	16
Tabla 4.1.1 Resultados finales del pretratamiento de datos	19
Tabla 4.2.1 Función objetivo creada en el optimizador	20
Tabla 5.2.1 Transformación de unidades en la función objetivo y sus parámetros	34

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de fin de grado tiene como objetivo principal resolver el problema de la ubicación óptima para situar una o varias plantas centralizadas, donde se gestionarán los lodos y residuos provenientes de las depuradoras y las industrias agroalimentarias ubicadas en zonas rurales. Dicho problema, consiste en seleccionar las ubicaciones de las instalaciones recuperadoras de residuos potencialmente factibles, considerando que las mismas deben satisfacer la demanda de diferentes puntos distribuidos geográficamente.

El presente trabajo surgió gracias al proyecto CircRural 4.0, el cual forma parte de un proyecto europeo que busca implementar en áreas rurales modelos de gestión de agua residual y de residuos agroalimentarios que traten de priorizar la optimización energética y la recuperación de residuos. Para conseguir este objetivo, el proyecto propone la construcción de una o varias instalaciones centralizadas que permitan gestionar los residuos generados por las depuradoras de dicha zona, que llegan a dicha instalación en forma de lodos, y las industrias agroalimentarias provenientes de fábricas de frutas, tomates, aceite de oliva, vino, arroz y corchos. El tratamiento de dichos lodos y residuos es de gran relevancia, ya que de ellos se puede extraer productos de valor como biometano y fertilizantes que se pueden reciclar para ser usados en otras actividades, como por ejemplo reutilizarlos para otros procesos o para producir metano, que se puede utilizar para generar electricidad que posteriormente puede ser vendida a la red eléctrica. Esta propuesta ayudaría a las zonas rurales a afianzar e introducir el concepto de economía circular, el cual plantea un modelo de gestión que se basa en la circulación de los recursos/residuos para disminuir o eliminar su generación para ser más sostenibles.

La solución propuesta para el problema se estudiará para la provincia de Badajoz, la cual se caracteriza por tener una gran extensión geográfica, donde las instalaciones de las depuradoras de aguas residuales son pequeñas y se encuentran muy dispersas a lo largo de la provincia. También, cuenta con una actividad agroindustrial bastante relevante lo que supone una gran generación de residuos. Es por ello, que se justifica implementar una herramienta de optimización que permita establecer un modelo que logre la gestión de lodos y residuos para esta provincia. A su vez el modelo creado, puede servir de ejemplo para otras zonas con características similares a la misma.

La herramienta informática de optimización se diseñará y programará en Excel. Para el desarrollo de la misma, se usará información recopilada de las depuradoras y las industrias agroalimentarias, como su localización, tamaño y producción de residuos. De esta forma, la herramienta devuelve como resultado el tamaño, la ubicación de cada una de ellas, el beneficio obtenido, los costes desglosados y las restricciones a cumplir.

1. OBJETIVOS

Este proyecto persigue los objetivos que se detallan a continuación:

- 1.1 Establecer la formulación matemática del problema de optimización para el caso de uso del proyecto CircRural, que a su vez incluye la creación de la función objetivo y sus respectivas restricciones.
- 1.2 Crear la resolución y encontrar solución del problema formulado mediante un algoritmo de optimización.
- 1.3 Diseñar y programar una “herramienta amigable” para el usuario, que le permita el cálculo de las ubicaciones óptimas y tamaño de las plantas centralizadas.
- 1.4 Investigación sobre distintas maneras de abordar los problemas de optimización.

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

2.1. Tratamiento de aguas residuales

El objetivo principal de las depuradoras de tratamiento de aguas residuales es purificar el agua sucia que llega a dichas plantas provenientes de las actividades humanas, como hogares, agricultura, entre otros. Sin embargo, este proceso a la que se somete el agua da lugar a un lodo, el cual es susceptible de generar productos de valor como el metano que posteriormente se puede utilizar para generar electricidad. Estos lodos son tratados en digestores anaerobios. Las depuradoras están ubicadas tanto en el ámbito rural como urbano. Sin embargo, las depuradoras en el ámbito urbano cuentan con digestores anaerobios mientras que en la zona rural no se gestiona dicho lodo. Por lo tanto, una de las motivaciones por la cual se justifica la realización del proyecto es implementar un modelo de aprovechamiento de lodos provenientes de las depuradoras en zonas rurales.

Para conocer cómo se generan dichos lodos, se explicará el proceso que se puede ver reflejado en la figura 2.1.1. En esta imagen, se observa el proceso de una depuradora ubicada en una zona urbana, pero dicho proceso es el mismo para las depuradoras de las zonas rurales. La única diferencia es que los digestores de lodos que se presentan en la figura no están presentes en las zonas rurales.



Figura 2.1.1 Proceso de purificación de agua en una depuradora

A través de los desagües sanitarios o separados, el agua se transporta a las plantas de tratamiento. Una vez llegada, la primera etapa consiste en el pretratamiento, es decir el retiro de arena, partículas sólidas, y sólidos grandes. Esto se logra pasando el agua por la criba (1) que consisten en unas rejillas que permiten únicamente el paso del agua, no el paso de la basura como puede ser residuos sólidos grandes. A continuación, el agua continúa su trayecto hacia un depósito (2) en el

que reduciendo el flujo del agua se consigue que las arenas se hundan y las grasas floten. Además, se inyectan microburbujas de aire para acelerar la flotación de grasas. Posteriormente, la arena en forma de fango se extrae y se transporta al digestor de lodos para su tratado y las grasas se extraen con una herramienta.

La siguiente etapa es la depuración primaria. Esta consiste en un depósito grande llamado decantador (3) donde se guarda el agua por un tiempo determinado. Luego, en este depósito la decantación provoca que las partículas con mayor densidad que la del agua se vayan al fondo creando una especie de fango. Posteriormente, este fango se extrae y se manda a un digestor de lodo para su tratado independiente. Durante la etapa del pretratamiento y la depuración primaria se consigue retirar aproximadamente el 15% de los contaminantes.

Posteriormente, el agua llega a la próxima etapa que es la depuración secundaria. Al llegar a esta etapa, el agua pasa por un tratamiento biológico (4) donde se inyectan grandes cantidades de aire, que permiten acelerar el crecimiento de microorganismos útiles que consumen la materia orgánica dañina presente en el agua residual. Posteriormente, el agua vuelve a pasar por un depósito decantador (5) donde se extrae el nuevo fango creado y a su vez es llevado al digestor de lodos. El objetivo después de esta etapa es lograr la evacuación del 80% a 90% de los contaminantes. Por último, antes de que salga el agua purificada ocurre la desinfección, que consiste en agregarle un desinfectante como el cloro para terminar de matar a los organismos causantes de enfermedades en el agua. En este fase, se terminan de eliminar el 20% o 10% de los contaminantes restantes y una vez purificada el agua es llevada para los usos necesarios o inclusive se devuelve a las fuentes naturales tales como el mar o río [1].

2.2. Digestión anaerobia

En el punto anterior, se explicó cómo se generan lodos a partir del proceso de purificación del agua. En este apartado, se explicará de qué manera se puede gestionar dicho lodo para la obtención de productos de valor como el metano, la cual consiste en un proceso denominado digestión anaerobia. Este proceso en las zonas urbanas se realiza dentro de la misma instalación. Ello se debe a que es rentable económicamente ubicarlo dentro de la misma planta, debido a la gran cantidad de lodos provenientes del gran volumen de entrada de agua de las depuradoras. Por el contrario, al no existir este proceso en las zonas rurales, el proyecto propone implementarlo en una o varias plantas centralizadas, donde se transportarían todos los lodos provenientes de cada depuradora.

El proceso de digestión anaerobia se presenta cuando los microorganismos descomponen la materia biodegradable en ausencia de oxígeno y su resultado es la generación de diversos gases, primordialmente metano y dióxido de carbono que puede ser utilizado para generar electricidad [2]. Hay que tener en cuenta que es un proceso muy complejo, tanto por el número de reacciones bioquímicas que ocurre como por la cantidad de bacterias involucradas, en la que más de 17 familias distintas de bacterias trabajan de forma secuencial o simultáneamente dentro de un reactor biológico.

El procedimiento ocurre en cuatro etapas como se presenta en la figura 2.2.1. La primera fase es la Hidrólisis, que es una reacción química entre una molécula de agua y una macromolécula, y es donde la materia orgánica es transformada en moléculas de menor peso molecular como azúcares, aminoácidos, alcoholes, y ácidos grasos de cadena larga, que son aquellos con más de 12 átomos de carbono. Luego, le sigue la etapa acidogénica o fermentativa, que consiste en hidrolizar estos

compuestos más sencillos vía fermentación y en ausencia de oxígeno dando lugar a ácidos grasos de cadena corta, que son aquellos con menos de 8 átomos de carbono, como propiónico o butírico. A continuación, ocurre la siguiente etapa denominada acetogénesis, en la cual se transforma mediante bacterias acetogénicas estos compuestos a ácido acético, hidrógeno, y dióxido de carbono. Por último, acontece la etapa metanogénica, los compuestos anteriores se transforman en metano y dióxido de carbono. En esta etapa, participan dos bacterias. La primera son las bacterias metanogénicas acetoclásticas, que utilizan el hidrógeno para reducir el dióxido de carbono y producir metano. Y la segunda son las bacterias hidrogenotróficas, que hidrolizan el acetato oxidando el grupo carbonilo a dióxido de carbono y disminuyen el grupo metilo a metano [3].

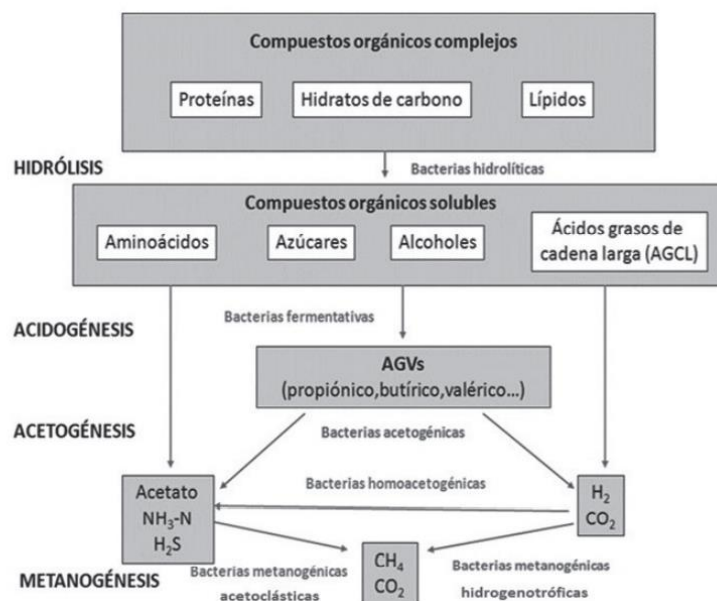


Figura 2.2.1 Proceso de digestión anaeróbica [3]

Para que el proceso ocurra exitosamente, hay algunos parámetros que se deben controlar. Existen dos tipos de parámetros: los ambientales y los operacionales. Los parámetros ambientales se basan en las condiciones que deben de mantenerse para el desarrollo del proceso. Entre ellos, se tienen el pH que es una medida de acidez, la alcalinidad que es la medida de la capacidad para neutralizar los ácidos, el nivel de nutrientes para tener un valor que asegure el crecimiento de los microorganismos, y el nivel de concentración tóxica que puede afectar a que se desarrolle el proceso. Los parámetros operacionales consisten en las condiciones de trabajo de los reactores. Entre ellos, la temperatura que se tiene dentro del reactor, el tiempo de retención hidráulica que es el tiempo que debe permanecer el compuesto dentro del reactor, y la velocidad de carga orgánica que es la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo [4].

2.3. Características de la depuración en el ámbito rural

El siguiente proyecto busca brindar una herramienta informática que permita un modelo de gestión de residuos para las zonas rurales. Por lo tanto, es de suma importancia conocer las características específicas que contiene dicha zona, que a su vez la distingue de la establecida en el ámbito urbano. La característica primordial es que la cantidad que generan las depuradoras es tan pequeña que no tienen ningún digestor de lodos debido a que no les es rentable económicamente, por lo tanto,

carece de un modelo de gestión que pueda resolver este problema. Por consiguiente, el objetivo de este proyecto consiste en resolver la ubicación de las plantas centralizadas. Lo que se propuso fue establecer una o varias plantas centralizadas donde se puedan llevar las pequeñas cantidades de cada una de las depuradoras. De esta forma la cantidad total va a ser suficiente para poder gestionar la planta de tratamiento. En resumen, se planteó llevar la propuesta de las plantas de depuración de agua del ámbito urbano, que consistía en aprovechar los lodos restantes, a las zonas rurales.

Por otra parte, para el establecimiento del modelo de gestión en las zonas rurales además de gestionar las cantidades de lodos, se planteó incluir los residuos de las industrias agroalimentarias dentro del tratamiento en las plantas centralizadas. Esto es debido a que la actividad de la industria agroalimentaria genera grandes cantidades de residuos, que al igual que el lodo puede ser utilizado para generar productos de valor como el metano. Esta inclusión en las plantas centralizadas ayuda a aumentar la cantidad de residuos que llegan para incrementar la producción de metano. Por el contrario, en las zonas urbanas la gestión de residuos y de lodos se realiza por separado, debido al gran tamaño de las plantas.

2.4. Ubicación de la instalación

A la hora de ubicar las plantas centralizadas surge una pregunta clave que es dónde ubicarlas para obtener los mayores beneficios posibles. Para dar respuesta a esta problemática, se propone el desarrollo de una herramienta informática donde el objetivo consiste en encontrar el punto de ubicación de la planta de tratamiento donde el coste final sea el mínimo posible. Para ello, todos los parámetros de la función fueron minimizados. De esta forma se abordan los objetivos planteados en el proyecto, creando un algoritmo de optimización y elaborando la formulación matemática del modelo. A continuación, se abordarán estos conceptos.

Un algoritmo de optimización es el conjunto ordenado y finito de operaciones que permiten resolver un problema, en este caso se soluciona el problema de la ubicación. Existen distintos métodos para resolver un algoritmo de optimización que encuentre la ubicación óptima de una o varias plantas centralizadas teniendo en cuenta algunos parámetros relevantes como por ejemplo los costes de construcción, costes de combustible producto de la transportación, entre otros. Parte de los objetivos consistía en explorar dichos métodos. En la figura 2.4.1, se observa los diferentes métodos desarrollados hasta la actualidad para resolver los problemas de optimización. A continuación, se explicará de manera resumida cada uno de ellos.

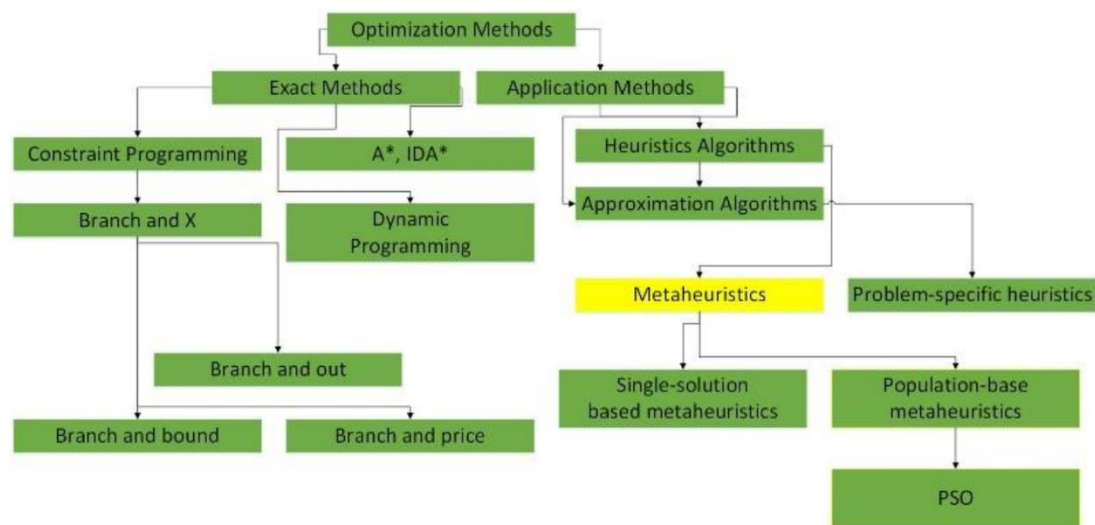


Figura 2.4.1 Clasificación de diferentes métodos de optimización [5]

Los métodos de optimización se dividen en dos: métodos exactos y métodos de aplicación, que a su vez consisten en heurísticos y algoritmos de aproximación. Los algoritmos que se basan en métodos exactos aseguran la obtención de la solución óptima del problema, pero debido al alto tiempo de computación que consumen, solo es apropiado para problemas pequeños. Estos algoritmos siempre encuentran una solución única, es decir, no importa cuantas veces se repita el programa siempre llegara a la misma solución. Un ejemplo de este tipo de métodos es el “Branch and bound”, que consiste en la creación de un árbol con todas las soluciones y las ramas son eliminadas si no son las óptimas. El método finaliza cuando se examinaron todas las ramas [6].

Los algoritmos de aproximación son una alternativa para aquellos problemas en los que se tienen unos espacios de búsqueda tan grande que resulta imposible utilizar métodos exactos. También, se utiliza cuando el problema es muy complejo debido a sus restricciones. Estos algoritmos emplean técnicas heurísticas, pero sacrifican la seguridad de encontrar una solución óptima, a cambio de velocidad y certeza de encontrar una solución aproximada [6].

El otro grupo restante son los heurísticos, los cuales son tipos de algoritmos que mediante pasos sencillos solucionan un problema determinado. Una de las ventajas que se obtiene de este tipo de algoritmos frente a los métodos exactos es que permiten mayor flexibilidad en el control de las características del problema [6]. Por el contrario, contienen más de una solución óptima, es decir cada vez que se repita el programa no dará la misma solución, pero dará otra solución que pertenece a la zona óptima. Una de las principales limitaciones que poseen estos métodos es quedarse atascado en un mínimo local como se muestra en la figura 2.4.2, en vez de encontrar el mínimo global de la función. Esto los hace depender en gran parte de las condiciones iniciales.

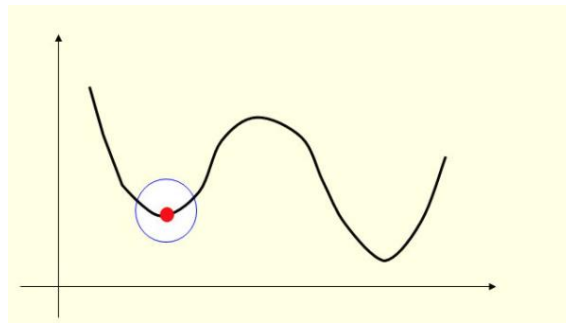


Figura 2.4.2 Descripción de un óptimo local

Debido a las limitaciones por parte de los heurísticos para encontrar el óptimo global, aunque en la mayoría de los casos presentan soluciones óptimas, se desarrolló algoritmos más inteligentes llamados metaheurísticos. Los metaheurísticos son estrategias que combinan diversas técnicas para explorar con mayor profundidad el espacio de soluciones a un coste computacional más alto. Las técnicas de estos algoritmos se basan en dos grandes tipos y todas tienen la obligación de partir de unas soluciones iniciales e ir explorando soluciones más óptimas. Los dos grandes tipos son la metaheurística de vecindario y la metaheurística multiarranque. Las de vecindario se basan en búsqueda secuencial de entornos, de manera que van indagando soluciones vecinas hasta llegar a la más óptima. Y los de multiarranque consisten en generar de forma iterativa diferentes soluciones [6].

En conclusión, se observa que hay varias alternativas que el desarrollador puede escoger a la hora de abordar el problema de la ubicación óptima, sin embargo, el método escogido para solucionar el problema planteado en este proyecto fue el método del gradiente que forma parte de los métodos exactos. En la sección 5.2 correspondiente a la programación de la herramienta, se explicará con mayor detalle en que consiste este método.

3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DEL ESTUDIO

3.1. Descripción general de Badajoz

La herramienta informática propuesta se estudiará para la zona rural de Badajoz. En la figura 3.1.1, se observa la ubicación de la provincia en el mapa de España. La provincia está situada al sur de España siendo frontera con Portugal y cuenta con una población de 150.984 habitantes[7]. Sin embargo, a pesar no ser una provincia muy poblada y considerarse una zona rural, posee una gran extensión geográfica lo que permite que exista una gran actividad industrial proveniente de las industrias agroalimentarias y depuradoras, lo que supone un gran aprovechamiento de residuos. Es por ello, que se eligió implementar este proyecto para dicha provincia.



Figura 3.1.1 Ubicación de Badajoz

3.2. Datos entrada

Una característica principal de los algoritmos de optimización es que depende de los datos de entrada. Dichos datos son muy importantes ya que son la base del algoritmo y son aquellos los que establecen el punto de comienzo, y a partir de ahí el algoritmo los modifica para encontrar la solución óptima. Para el desarrollo de esta herramienta se requirió de varios datos de entradas, como las ubicaciones de las depuradoras o las cantidades de residuos. Los datos de entrada de la herramienta vienen expresados únicamente en cantidades anuales y en la herramienta no se tomó en cuenta ningún otro horizonte temporal, como datos mensuales o semanales. Esto fue para simplificar el algoritmo.

A continuación, se explicarán los datos de entrada de la herramienta y los inconvenientes que surgieron con la información de entrada. En la tabla 3.2.1, se observa la información obtenida sobre las depuradoras otorgada por el representante de Badajoz el cual forma parte del proyecto CircRural 4.0 (en la figura se muestra dos de las cuatro zonas estudiadas). A primera vista se observa la gran cantidad de información, sin embargo, los campos necesarios para el optimizador son las coordenadas (X,Y) dadas en el sistema de referencia ETRS89 (el cual es un sistema geodésico de

referencia tridimensional utilizado como un estándar para la georreferenciación GPS de alta precisión en Europa [8]), la cantidad de lodo que produce cada depuradora dadas en unidades de m³, y el caudal de agua que trata cada depuradora también dada en m³.

Zona	EDAR	COORDENADAS UTM (ETRS89)		Lodos 2018 (m ³)	Lodos 2019 (m ³)	Sequedad	Fósforo total (mg P2O5/kg.s.)	Nitrógeno total (%Sm.S)	CAUDAL AGUA (m ³)	
		X	Y						Entrada	Salida
Vegas Bajas	ALANGE	737499.58	4297505.18	260	240				85,130	79,716
	ALBUERA	689761.83	4288455.33	273	234	14.82	3.2 %	7.90	128,919	128,401
	ARROYO	719795.92	4304160.51	620	860	18.57	3.25 %	5.65	350,181	332,672
	LA CODOSERA	659571.94	4341689.12	13	13	20.00	2.24 %	5.00	341,593	295,828
	FERIA	713441.30	4265951.40	65	30	17.50	4.00 %	6.00	92,693	82,371
	MONTIJO-PUEBLA DE LA CALZADA	704089.15	4304963.16	760	920	15.03	1.57 %	8.40	2,294,641	2,086,038
	PUEBLONUEVO	693434.09	4309531.61	122	260	17.00	2.80 %	6.20	467,546	445,835
	PUEBLA DE OBANDO	704655.04	4339271.20	78	104	22.16	3.32 %	5.65	214,853	192,338
	SOLANA	714647.99	4290141.01	300	340	14.20	3.04 %	8.22	100,836	89,153
	TORRE MAYOR	712819.84	4308061.99	460	400	15.00	2.50 %	6.22	375,322	372,579
	VALVERDE DE LEGANÉS	674704.16	4283516.20	299	312	13.00	3.02 %	7.55	386,289	366,975
	VILLALBA DE LOS BARROS	717215.23	4277482.31	140	340	17.00	2.20 %	5.00	127,083	120,054
	VILLAR DEL REY	684122.34	4332959.09	169	169	16.50	2.87 %	7.60	167,321	153,373
	ZARZA	741179.30	4301543.79		580	14.40	3.00 %	5.80	309,910	294,415
Siberia	DON BENITO-VILLANUEVA DE LA SERENA	249690.00	4219647.00	875	2,375				5,614,469	5,104,063
	GARBAYUELA	326545.09	4323016.87	0	0				44,464	46,954
	HERRERA DEL DUQUE	322944.00	4338855.00	90	96				520,154	502,286
	LA CORONADA	267855.75	4312740.39	154	182				286,245	127,423
	MEDELLIN	243729.74	4316834.33	0	14				118,725	82,423
	NAVALVILLAR DE PELA	286280.72	4332699.12	304	368				627,333	407,897
	PELOCHE	315350.6	4339824.47	0	0				26,984	19,638
	SANTA AMALIA	236681.44	4323050.14	32	32				536,907	512,486
	SIRUELA	321367.56	4317028.08	96	80				221,797	149,532
	TALARRUBIAS	305621.48	4324694.50	318	288				499,805	547,682
	VEGAS ALTAS	278373.90	4333582.21	0	0				32,756	*
	FUENLABRADA DE LOS MONTES			0	0				83,835	78,092

Tabla 3.2.1 Datos de entrada de las depuradoras

En el caso de las industrias agroalimentarias, los datos de entrada originales se presentan en la tabla 3.2.2. Entre las industrias se incluyen las de procesamiento de fruta, tomates, aceite de oliva, vino,

arroz, y corcho. En la figura anteriormente mencionada, se muestran los datos de entrada para algunas de ellas (fruta, tomate, y aceite de oliva). Los datos útiles para el optimizador son las coordenadas de cada industria y la cantidad de residuo que produce cada industria en toneladas por año.

INDUSTRIA AGROALIMENTARIA	FRUTA	TOMATE	ACEITE OLIVA
PROCEDENCIA	TOMATES DEL GUADIANA Carretera Yelbes s/n, 06410 Santa Amalia, Badajoz	CONESA GROUP Carretera Villafranco- Balboa, Km 1,5, 06195 Badajoz	TROIL VEGAS ALTAS Calle Don Benito, 13, 06474 Valdetorres, Badajoz
SITUACIÓN	38°59'53.8"N 6°00'40.7"W	38°54'02.6"N 6°51'33.3"W	38°52'19.8"N 6°02'57.1"W
CÓDIGO	F2	T1	A1
Definición del co-residuo	Subproducto refinado conc. fruta	Subproducto refinado conc. tomate	Alperujo almacenado en balsa
Co-residue definition	Fruit refination	Tomato peels and seeds	Olive oil mill wastewaters
Producción	24.500 tm fruta de destrio	323.158 tm /año tomate	
Residuo (%)	10%	4%	
Residuo (cantidad)	2450 tm/año	12.926 tm/año	57.000 tm /año alperujo

Tabla 3.2.2 Datos de entrada de las industrias agroalimentarias

Debido a que los datos anteriores se presentaron con algunas columnas con datos que no resultaban de interés para la consecución de este proyecto en particular, se decidió reestructurar y filtrar algunos datos que formarían parte de los datos de entrada del optimizador. Los datos resultantes para una de las cuatro zonas se exponen en la tabla 3.2.3 correspondiente a las depuradoras y la tabla 3.2.4 con las industrias agroalimentarias. Únicamente faltarían las coordenadas de ubicación que se muestran más adelante.

Desarrollo de una herramienta de optimización

		(m ³ /Año)	(m ³ /Año)	%	(Tn / Año)	(kWh / m ³)	%	gP/ m ³	%	(Kg O ₂ /m ³)	(kWh / año)	(tn O ₂ / año)	(Kg P/año)
Zona	EDAR	Caudal Tratado	Lodos	Sequedad	Lodos	Consumo Energía	Ahorro Energía	PT inf	P recu p.	DBO lodo	Consumo	Carga DBO	Carga P
Vegas Bajas	ALANGE	85129.8	240	16%	229.0	0.7	20 %	10	35 %	0.1	47672.7	8.5	298.0
	ALBUERA	128919	234	16%	223.3	0.7	20 %	10	35 %	0.1	72194.6	12.9	451.2
	ARROYO	350181	860	16%	820.7	0.7	20 %	10	35 %	0.1	196101.4	35.0	1225.6
	LA CODOSERA	341593	600	16%	572.6	0.7	20 %	10	35 %	0.1	191292.1	34.2	1195.6
	FERIA	92693	500	16%	477.1	0.7	20 %	10	35 %	0.1	51908.1	9.3	324.4
	MONTIJO-PUEBLA DE LA CALZADA	2294641	920	16%	877.9	0.7	20 %	10	35 %	0.1	1284999.0	229.5	8031.2
	PUEBLONUEVO	467546	260	16%	248.1	0.7	20 %	10	35 %	0.1	261825.8	46.8	1636.4
	PUEBLA DE OBANDO	214853	104	16%	99.2	0.7	20 %	10	35 %	0.1	120317.7	21.5	752.0
	SOLANA	100836	340	16%	324.5	0.7	20 %	10	35 %	0.1	56468.2	10.1	352.9
	TORREMAYOR	375322	400	16%	381.7	0.7	20 %	10	35 %	0.1	210180.3	37.5	1313.6
	VALVERDE DE LEGANÉS	386289	312	16%	297.7	0.7	20 %	10	35 %	0.1	216321.8	38.6	1352.0
	VILLALBA DE LOS BARROS	127083	340	16%	324.5	0.7	20 %	10	35 %	0.1	71166.5	12.7	444.8
	VILLAR DEL REY	167321	169	16%	161.3	0.7	20 %	10	35 %	0.1	93699.8	16.7	585.6
	ZARZA	309910	580	16%	553.5	0.7	20 %	10	35 %	0.1	173549.6	31.0	1084.7

Tabla 3.2.3 Datos simplificados para el optimizador de las depuradoras

		tn/año	%	tn/m ³	m ³ /año	g P/m ³	kg O ₂ /m ³ res.	tn O ₂ /año	kg P/año
Zona	Industria	Residuos	Sequedad	Densidad	Residuos	PT inf	DBO lodo	Carga DBO	Carga P
Vegas Bajas	FRUTA	2450	18%	1.03	2378.6	189	51	121.3	449.6
	TOMATE	13000	23%	0.27	48148.1	203	9	433.3	9774.1
	ACEITE DE OLIVA	57000	12%	0.92	61956.5	14	15.9	985.1	867.4
	VINO	7300	25%	0.99	7373.7	60	75	553.0	442.4
	ARROZ	11300	90%	0.9	12555.6	500	70	878.9	6277.8
	CORCHO	2470	0.3%	1	2470.0	224	1.5	3.7	553.3

Tabla 3.2.4 Datos simplificados para el optimizador de las industrias agroalimentarias

Además de los datos explicados anteriormente para el optimizador, se añadió otro dato de entrada importante que es la carga de DBO (Demanda biológica del oxígeno) y viene expresado en toneladas de oxígeno al año. Para el cálculo de este valor se utilizó la siguiente formula:

Caso de las depuradoras:

$$Carga\ DBO\ [Tn\ O_2\ /\ año] = Caudal\ tratado \times DBO\ lodo\ /\ 1000$$

Caso de industrias agroalimentarias:

$$\text{Carga DBO [Tn O}_2 \text{ / año]} = \text{residuos} \times \text{DBO residuos} / 1000$$

El DBO representa la cantidad de oxígeno que los microorganismos contenidos en la muestra, como bacterias u hongos, consumen durante el proceso de degradación de las sustancias orgánicas que se pueden extraer de los lodos y residuos [9]. Este dato se utiliza para calcular los Kg CH₄ que se pueden generar al año. Este dato servirá posteriormente para predecir la electricidad producida al año, la cual constituye una variable relevante en la función objetivo.

El porcentaje de sequedad que se utilizó para las depuradoras fue un valor constante del 16%. Este dato se empleó para obtener la densidad y poder convertir de una unidad a otra, debido a que el optimizador utilizó tanto las cantidades de lodos y residuos en m³ al año para el tratamiento de la planta y en Kg al año para la estimación del consumo de combustible. En el caso de las industrias agroalimentarias se emplearon valores de sequedad distintos, ya que el porcentaje variaba mucho dependiendo del tipo de industria. Por ejemplo, se puede observar como la industria del arroz tenía 90% de sequedad, mientras que la industria del aceite de oliva poseía un 12%.

También, se optó por asegurar que las ubicaciones de las depuradoras e industrias agroalimentarias brindadas eran coherentes. Para ello, se calculó la matriz de distancia entre todas las ubicaciones de la 1 hasta la 59, sin embargo, una vez obtenida la matriz de distancia había algunas distancias entre ciertas ubicaciones que no se correspondían con las brindadas. Por ejemplo, algunas que representaban de un extremo a otro de Badajoz salían mayor a 350 km, lo cual no era lógico ya que Badajoz no es una provincia con tal extensión. Este inconveniente mostró el problema que se tenía con respecto al método que se estaba utilizando para calcular las distancias entre una ubicación y otra, una fórmula que luego sería importante para el optimizador para poder predecir de manera correcta el consumo de combustible del clúster a la ubicación optima. Para el cálculo de las distancias, se utilizó la ecuación de la distancia euclídea, que se muestra en la figura 3.2.1, donde P₁ y P₂ representan dos ubicaciones cualesquiera.

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Figura 3.2.1 Fórmula de la distancia euclídea [10]

El método de la distancia euclídea no resultó efectivo, porque el sistema ETRS89 está dividido por diferentes zonas y si las ubicaciones se encuentran en distintas zonas, como sucedió, el uso de la distancia euclídea es muy ineficaz. Con la fórmula, en el sistema de coordenadas ETRS89 la coordenada Y se calculaba perfectamente ya que no le afectaba las diferentes zonas del sistema de referencia, debido a que se encuentra referenciada al ecuador es decir la ubicación entre el punto y la línea del ecuador. Sin embargo, con la coordenada X no se calculaba de manera correcta ya que sí le afectaba al estar situada entre el punto y el punto de origen de cada zona. Luego, aquí fue donde surgió el origen del problema debido que Badajoz contiene dos zonas, las cuales son 29 N y 30 N como se observa en la figura 3.2.2. Hay que destacar que cuando las ubicaciones se encontraban dentro la misma zona, 29 o 30, el método de la distancia euclídea si funcionaba.



Figura 3.2.2 Zonas de Badajoz en el sistema de referencia ETRS89

Para corregir este inconveniente, la solución propuesta fue primero identificar en qué zonas se encontraban cada depuradora, si la 29 o la 30, y luego con la ayuda de una calculadora automática en Excel que se muestra en la tabla 3.2.5, se consiguió convertir las coordenadas ETRS89 a coordenadas de latitud y longitud. En el convertidor, en primer lugar, se le introducía la zona, 29 o 30, en “Entry data” y posteriormente en la columna East se introducía la coordenada X y en la columna North se introducía la coordenada Y.

UTM			Decimal Degrees		Degrees, minutes and seconds	
East	North	Band Lat.	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
737499.58	4297505.18	S	38.79432237	-6.26537501	-38° -47' -39.561" S	6° 15' 55.35" W
689761.83	4288455.33	S	38.72439732	-6.81710560	-38° -43' -27.83" S	6° 49' 1.58" W

ENTRY DATA	
Zone	29
Hemisphere	N

Tabla 3.2.5 Convertidor de coordenadas ETRS89 a latitud y longitud

Como resultado de convertir todas las ubicaciones, en la siguiente tabla 3.2.6 se observa como quedaron las coordenadas de algunas depuradoras. Con estos datos de entrada transformados, entonces se procedió a realizar la técnica Clustering que se explica más adelante. También, se seleccionó algunas ubicaciones de las depuradoras escogidas al azar y se comprobaron con las coordenadas de Google maps que efectivamente las coordenadas coincidieran.

EDAR	Zona (ETRS89)	Zona	Coordenadas UTM (X)	Coordenadas UTM (Y)	Latitud	longitud	Latitud Decimal	Longitud Decimal
ALANGE	29	Campiña Sur	737499.58	4297505.18	-38° -47' -39.561" S	6° 15' 55.35" W	38.772344	-6.2654
ALBUERA	29	Vegas bajas	689761.83	4288455.33	-38° -43' -27.83" S	6° 49' 1.58" W	38.724397	-6.8171
ARROYO	29	Vegas bajas	719795.92	4304160.51	-38° -51' -31.79" S	6° 28' 0.85" W	38.858831	-6.4669
LA CODOSERA	29	Vegas bajas	659571.94	4341689.12	-39° -12' -35.38" S	7° 9' 6.43" W	39.209828	-7.1518
MONTIJO-PUEBLA DE LA CALZADA	29	Vegas bajas	704089.15	4304963.16	-38° -52' -11.434" S	6° 38' 51.122" W	38.869843	-6.6475
PUEBLONUEVO	29	Vegas bajas	693434.09	4309531.61	-38° -54' -48.2" S	6° 46' 8.31" W	38.913389	-6.7690
PUEBLA DE OBANDO	29	Vegas bajas	704655.04	4339271.20	-39° -10' -42.989" S	6° 37' 50.599" W	39.178608	-6.6307
SOLANA	29	Vegas bajas	714647.99	4290141.01	-38° -44' -1.971" S	6° 31' 49.95" W	38.733881	-6.5305
TORRE MAYOR	29	Vegas bajas	712819.84	4308061.99	-38° -53' -44.42" S	6° 32' 45.68" W	38.895672	-6.5460
VALVERDE DE LEGANÉS	29	Vegas bajas	674704.16	4283516.20	-38° -40' -58.87" S	6° 59' 29.26" W	38.683019	-6.9915
VILLALBA DE LOS BARROS	29	Suroeste	717215.23	4277482.31	-38° -37' -9.42" S	6° 30' 17.98" W	38.619283	-6.5050
VILLAR DEL REY	29	Vegas bajas	684122.34	4332959.09	-39° -7' -34.891" S	6° 52' 11.93" W	39.126359	-6.8700
ZARZA	29	Campiña Sur	741179.30	4301543.79	-38° -49' -46.831" S	6° 13' 17.9" W	38.829675	-6.2216

Tabla 3.2.6 Datos de entrada de las ubicaciones de las depuradoras modificados

Posteriormente, una vez obtenido las coordenadas en el sistema de referencia de latitud y longitud se buscó una calculadora de distancias de Excel que se observa en la tabla 3.2.7 para calcular las distancias entre dos puntos indistintamente entre las zonas 29 o 30. La importancia de esta fórmula radica en que permite calcular los kilómetros entre la ubicación de los clústeres y las plantas centralizadas en el optimizador. La calculadora utiliza una macro que llama a una función llamada "distvincenty ()", y dicha función utiliza las fórmulas de Vincenty, el cual es un algoritmo muy eficiente para el cálculo de la distancia entre dos puntos [11]. Como parámetros de entrada a la función, se le introducía primero las coordenadas (X, Y) de la primera ubicación y luego las coordenadas de (X, Y) de la segunda ubicación.

	Latitud	Longitud
Origin Point	37~ 57' 3.7203" S	144° 25' 29.5244" E
Destination Point	37° 39' 10.1561" S	143~ 55' 35.3839" E
Distance in Meters:	54972.271	

Tabla 3.2.7 Calculadora de distancias de latitud y longitud

Una vez hallado otro método para el cálculo de las distancias, se comprobó que funcionara correctamente y que las distancias obtenidas entre los puntos eran razonables. Con este método de las fórmulas Vincenty, la distancia máxima que se obtuvo entre un extremo y otro fue de 207.89 kilómetros. Si se compara los dos métodos utilizados, se observa que este último a diferencia del otro si fue preciso.

Por otro lado, en el caso de las ubicaciones de las industrias agroalimentarias se simplificó el problema de cambiar las coordenadas ETRS89 a coordenadas de latitud y longitud, y simplemente

Desarrollo de una herramienta de optimización

se buscó las coordenadas en Google maps que se muestran en la tabla 3.2.8 y se trabajó con dichas coordenadas.

EDAR	Zona	Latitud	longitud	Latitud Decimal	Longitud Decimal
FRUTA	Campiña Sur	-38° -59' -55.464" S	6° 0' 39.636" W	38.99874	-6.01101
TOMATE	Vegas bajas	-38° -54' -2.988" S	6° 51' 32.832" W	38.90083	-6.85912
ACEITE DE OLIVA	Campiña Sur	-38° -52' -19.56" S	6° 2' 57.12" W	38.8721	-6.0492
VINO	Campiña Sur	-38° -34' -6.816" S	6° 19' 56.244" W	38.56856	-6.33229
ARROZ	Siberia	-39° -8' -8.232" S	5° 56' 31.488" W	39.13562	-5.94208
CORCHO	Vegas bajas	-39° -22' -32.124" S	7° 7' 9.732" W	39.37559	-7.11937

Tabla 3.2.8 Coordenadas de latitud y longitud de las industrias agroalimentarias

4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

4.1. Pretratamiento de datos (Clustering)

Al ser uno de los principales objetivos del proyecto encontrar la ubicación óptima de la instalación centralizada donde se gestionará tanto el lodo como los residuos, se optó por utilizar la herramienta de Clustering como pretratamiento de datos. Esta herramienta es un tipo de aprendizaje no supervisado de machine learning. La diferencia entre un algoritmo supervisado y uno no supervisado es que el no supervisado no se le asigna ejemplos de entrada ni la solución deseada para que el algoritmo aprenda la regla general que convierte los datos de entrada en la solución, por el contrario, el algoritmo es capaz de aprender por sí solo la estructura de los datos y encuentra una solución [12].

El Clustering permite agrupar objetos similares entre sí que sean distintos a los objetos de otros clústeres. Luego, esta técnica permitió agrupar aquellas ubicaciones que eran muy parecidas entre sí, y aquellas que no eran tan parecidas las agruparía en otros clústeres. Cada clúster representaría una zona específica. En este caso, todas las ubicaciones proporcionadas se encontraban a lo largo de 4 zonas que representaría el número total de clústeres. Las zonas eran Suroeste, Campiña Sur, Siberia, Vegas bajas.

El algoritmo que se utilizó fue el K-means utilizando el programa de Python en Google colab. Los pasos que sigue este algoritmo en su resolución son los que se detallan a continuación. Primero, se escogen k-centroides aleatoriamente y forman k-grupos asignando cada punto al centroide más cercano. El valor de k representa el número total de clústeres, y es un dato de entrada que se le especifica al algoritmo. Luego, el algoritmo con un proceso iterativo va cambiando los centroides en base al cálculo de las distancias de todos los puntos a los k centroides. Se vuelve a formar k-grupos asignándolo al centroide más cercano, y vuelve a recalcular los centroides. Este proceso lo hace sucesivamente hasta que el algoritmo encuentra las ubicaciones óptimas de los centroides con respecto a los puntos [12].

En este caso el número de clústeres es conocido y son las 4 zonas mencionadas anteriormente, sin embargo, en el caso de que el número total de clústeres sea desconocido, se puede utilizar el método del codo. Este método que consiste en representar las inercias, que son la suma de las distancias al cuadrado de cada objeto del clúster a su centroide, como se observa en la figura 4.1.1, y donde ocurre ese cambio significativo en la inercia es el número de clústeres óptimo para esos datos.

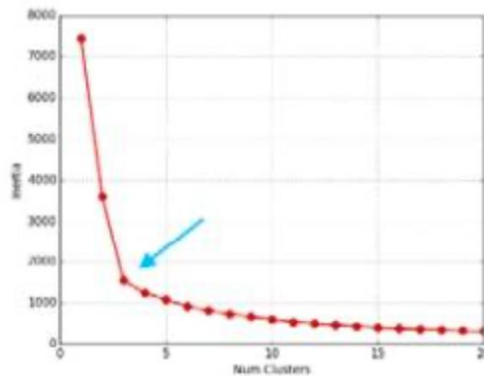


Figura 4.1.1 Método del codo

En la figura 4.1.2, se muestra el resultado del Clustering, en el que el eje Y es la longitud y el eje X la latitud. Adicionalmente, se aprecia las separaciones de las distintas ubicaciones de las zonas con colores distintos. De esta manera, gracias al pretratamiento de datos se simplificó el problema de 59 ubicaciones a solo 4, lo que facilitaría al optimizador en base a estas cuatro ubicaciones encontrar la ubicación óptima de las instalaciones centralizadas. Hay que tener en cuenta que la distancia entre los clústeres y las instalaciones centralizadas ha de ser la mínima posible.

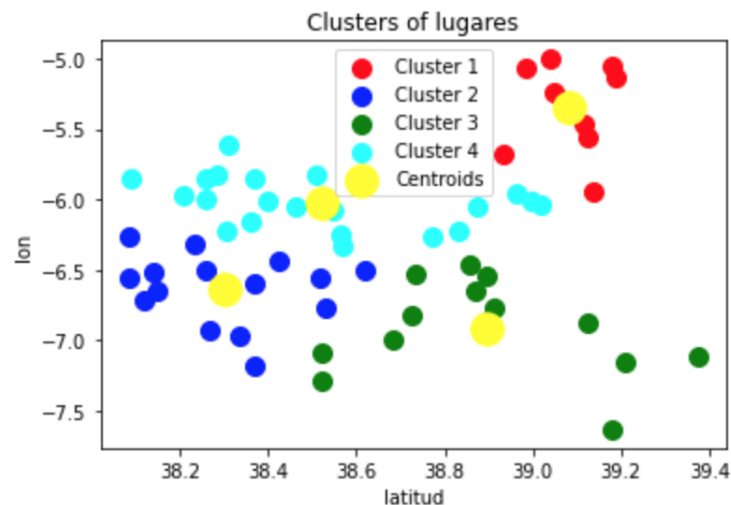


Figura 4.1.2 Solución gráfica del clúster

Por último, en la tabla 4.1.1 se agruparon los datos de entrada finales que necesita el optimizador que son los centroides de cada clúster, las cantidades de lodos y residuos en m³ y en toneladas al año y las cargas de DBO. Hay que aclarar que en cuanto a las cantidades de lodo y residuos y carga de BDO lo que se hizo fue sumar las cantidades que generaban cada depuradora e industria agroalimentaria al clúster que correspondían, es decir las cantidades que producían el clúster 1 era el total de la suma de todas las pequeñas cantidades de cada depuradora e industria agroalimentaria que conformaba ese clúster. Si se desea aplicar la herramienta para otro caso de uso únicamente se necesitarían como datos de entrada los mencionados al principio del párrafo, y a la misma vez se tendría que realizar un análisis Clustering para simplificar las ubicaciones a solo 4 clústeres, que es el número con el que está diseñado la herramienta.

Zona	Latitud	Longitud	Color en la solución grafica del clúster	Lodo + Residuo (m ³ /Año)	Lodo + Residuo (Tn /Año)	Carga DBO (Demanda biológica de oxígeno) (Tn O ₂ /Año)
Clúster 1 (Vegas bajas)	38.89383679	-6.91272071	Verde	54,915	19,570.5	1,104.8
Clúster 2 (Suroeste)	38.29955413	-6.63084667	Azul oscuro	5,022	4,792.3	542.2
Clúster 3 (Siberia)	39.08341744	-5.35075333	Rojo	13,660	12,353.5	945.7
Clúster 4 (Campiña sur)	38.52122214	-6.02143333	Celeste	78,286.95	73,027.60	2,585.7

Tabla 4.1.1 Resultados finales del pretratamiento de datos

4.2. Formulación matemática del optimizador

El optimizador se basa en una función objetivo, en donde se busca encontrar el valor mínimo posible. La función consiste en 3 parámetros y a cada uno de ellos se le asignó unas fórmulas particulares capaces de predecir su valor. A continuación, se explicará el significado y la formulación tanto de la función objetivo como de cada parámetro que la constituye.

Función objetivo general:

$$\text{MINIMIZAR } (F(x)) = (CDC - VE) \times \text{Período de explotación de la planta} + CP$$

$F(x) \rightarrow$ Resultado final de la función objetivo y representa el coste total de todo lo que supone crear una o más instalaciones centralizadas. Dicho valor depende de los 3 parámetros que se observan: coste de combustible (CDC), venta de electricidad (VE), y coste de construcción de la planta (CP). El objetivo es que los costes sean los mínimos posibles, inclusive cuanto más negativa sea esta variable, se tendrá un mayor ahorro o beneficios (en euros).

$CDC \rightarrow$ Costes de combustible derivados de transportar tanto los lodos como los residuos de los clústeres a las instalaciones centralizadas (en euros).

$VE \rightarrow$ Cantidad de electricidad que se puede vender, proveniente de la producción de metano. Esta variable se le resta a la función objetivo, ya que representa los beneficios obtenidos de la carga orgánica de los lodos o residuos que se pueden gestionar. Este parámetro permite incluir los otros costes (en euros).

Desarrollo de una herramienta de optimización

CP → Coste de la construcción de la o las instalaciones centralizadas (en euros).

Periodo de explotación → Tiempo en años que la instalación centralizada durara hasta volver hacerle remodelaciones o reparos. Se asumió un periodo fijo de 15 años.

Para el caso de uso en específico, se estableció únicamente la construcción de 2 plantas, por lo que la función objetivo correspondiente se expresó de la siguiente forma:

$$\text{MINIMIZAR } (F(x)) = (CDC - VE1 - VE2) \times \text{Periodo de explotación de la planta} + CP1 + CP2$$

F(x) → Resultado final.

CDC → Costes de combustible derivados de transportar tanto los lodos como los residuos a la planta 1 o 2.

VE1 → Cantidad de electricidad que se puede vender, proveniente de la gestión de la carga orgánica en la planta 1.

VE2 → Cantidad de electricidad que se puede vender, producto de la gestión de la carga orgánica en la planta 2.

Periodo de explotación → Periodo fijo de 15 años.

CP1 → Coste de construir la planta 1.

CP2 → Coste de construir la planta 2.

En la tabla 4.2.1, se muestra el resultado de la función objetivo y el valor de cada de parámetro de esta. Adicionalmente, los valores se encuentran en kilo euros por una razón específica que se explicara a detalle en el punto 5.2 que se refiere a la programación de la herramienta

	Costes
Gastos Combustible (Kilo Euros / año)	\$715
VentaElectricidadP1 (Kilo euros / año)	\$-509
VentaElectricidadP2 (Kilo euros / año)	\$-2376
Construcción planta 1 (Kilo euros)	\$159
Construcción planta 2 (Kilo euros)	\$341
Periodo de explotación para los gastos de combustible y la venta de la electricidad (años)	15
Función Objetivo	-1,670 €

Tabla 4.2.1 Función objetivo creada en el optimizador

Los parámetros de la función objetivo son:

Costes de combustible (CDC)

Para la estimación del coste de combustible, se buscó una ecuación que fuera capaz de estimar el consumo de combustible en base a unas variables de entrada. La ecuación proveniente de la fuente [13] se refleja en la figura 4.2.1. Dicha función se basa en un modelo predictivo de regresión creado a partir de la base de datos de HBEFA, el cual es un manual creado por un instituto suizo que contiene datos del consumo de combustible de todos los vehículos y sus características asociadas.

$$\text{CONSUMO} = -25,745 + 1 \times (11,945 + 4,09 \times 10^{-4} \times \text{MMA} + 6,05 \times 10^{-4} \times \text{CU}) + 0,967 \times (51,616 - 0,812 \times V + 0,00568 \times V^2)$$

Características generales vehículo \nearrow
Velocidad \nearrow

Figura 4.2.1 Modelo de consumo de combustible en l/100 km [13]

Hay que tener en cuenta que esta ecuación únicamente aplica para vehículos de tipo N2/N3 de gasóleo. Este tipo de vehículos son utilizados para el transporte de mercancía. N2 es que la masa máxima sea mayor que 3,5 toneladas y menor que 12 toneladas. Mientras que N3, son aquellos cuya masa máxima es mayor a 12 toneladas. En este caso, los camiones necesarios para el transporte de lodos y residuos a las plantas entran en estas categorías.

El consumo viene dado en unidades de litros cada 100 km y dicha ecuación se basa en dos características principales. La primera son las características generales del vehículo, que en este caso al tratarse de un camión pesado con carga lo que más afectaba al consumo se encuentra relacionado con el peso del vehículo. La variable MMA significa la máxima carga autorizada, y se calcula de la siguiente forma:

$$\text{MMA} = \text{Peso bruto del vehículo al estar vacío} + \text{la carga útil.}$$

La variable CU expresa la carga útil que transporta el camión a las plantas. Ambos parámetros tanto MMA como CU vienen dados en unidades de Kg. En el caso, en que se quiere calcular el consumo de combustible cuando los camiones están de regreso la carga útil (CU) es cero, sin embargo, la carga máxima autorizada (MMA) sería la misma de ida que de regreso.

La segunda variable, se refiere a las características del recorrido, y la variable V significa la velocidad con la que se transporta la mercancía. La unidad de dicha velocidad viene dada en unidades de Km / hora.

Desarrollo de una herramienta de optimización

Una vez obtenida la ecuación que predeciría el consumo de combustible, se calculó el consumo de cada clúster a su respectiva planta:

$$CL \text{ de clúster } i = (\text{Consumo Combustible}/100 \times N \text{ Km} \times N \text{ viajes}) \text{ Ida} \\ + (\text{Consumo Combustible}/100 \times N \text{ Km} \times N \text{ viajes}) \text{ Vuelta}$$

CL de clúster i → Consumo de cada clúster e incluye tanto la ida como la vuelta del camión. La unidad es litros. La i representa el número de clúster.

Consumo Combustible → Valor que se obtiene de aplicar la fórmula que se muestra en la figura 4.2.2. Este valor se calcula dos veces y corresponde uno de ida y otra de vuelta y no debería de coincidir el valor en la ida y en la vuelta, debido a que la carga útil (CU) de regreso es 0. La unidad es litros / 100 km.

N Km → Número de kilómetros recorridos del clúster a la planta 1 o 2, dependiendo a cuál vaya. En la figura 4.2.2, se enseña la fórmula para hallar este valor. Se consiguió una macro llamada “distvincenty ()” [11], y es una función que te permite el cálculo de las distancias entre dos puntos. Además, se utilizó la función “VLOOKUP” de Excel para calcular las distancias entre el clúster y la ubicación optima, dependiendo si dicho clúster le correspondía a la planta 1 o 2. Se dividió entre 1000 para pasarlo a unidad de kilómetros.

$$= \text{distVincenty}(\text{VLOOKUP}(E6, \$B\$14:\$D\$15, 2), \text{VLOOKUP}(E6, \$B\$14:\$D\$15, 3), B6, C6) / 1000$$

Figura 4.2.2 Calculo del Número de km de cada clúster a la planta

N viajes → Número de viajes que el camión tiene que hacer hacia la planta. La unidad es viajes / año. Este valor se calcula de la siguiente forma:

$$N \text{ viajes} = \frac{\text{cantidad de lodo que se produce en ese clúster}}{\text{carga útil que se puede realizar por viaje}}$$

Luego de obtener las ecuaciones descriptas anteriormente, el valor final en la función objetivo en la parte de costes de combustible se consigue así:

$$CDC = CLT \times \text{Coste del gasóleo}$$

CDC → Resultado constituye la variable de costes de combustible en la función objetivo. Considera el recorrido tanto de ida como de vuelta del camión, y representa el coste del transporte de los 4 clústeres a sus respectivas plantas. La unidad es en euros / año.

CLT → Cantidad consumida al año de los 4 clústeres a sus respectivas plantas. Este valor se calcula de la siguiente forma:

$$CLT = \sum_{i=1}^4 CL \text{ de clúster } i$$

Coste del gasóleo → Coste del gasóleo en ese momento. El valor que se utilizó fue 0.989.

Venta de electricidad (VE) y construcción de las plantas (CF)

En primer lugar, se comentará la formulación matemática de la venta de la electricidad. Para simplificar, únicamente se explicará las fórmulas de la planta 1, pero los cálculos de la planta 2 se obtienen de la misma forma con los datos correspondiente de dicha planta.

Primero, se estableció el volumen del reactor que es el tanque donde se gestionaran los lodos y se calcula de esta manera:

$$\text{Volumen de reactor 1} = (\text{HRT1}) \times (\text{Cantidad lodo transportado} \times \%Q \text{ de lodo transportado a la planta 1} / 365)$$

Volumen de reactor 1 → Volumen del tanque que trataría los lodos y residuos de la planta 1. La unidad es m³.

Cantidad lodo transportado → Cantidad de lodo y residuos totales que se transportaran para las plantas. Para este caso de uso, la cantidad es 151,883.65. La unidad es m³/año y se divide por 365 para obtener m³ / día para tener las mismas unidades que HRT1.

% Q de lodo transportado a la planta 1 → Porcentaje que indicará la cantidad de lodo y residuo que llega a la planta 1. En la figura 4.2.3, se indica como se calcula este valor. Simplemente, se suman las cantidades de cada clúster cuyo destino sea la planta 1 y se divide sobre la cantidad total. Para lograr esto, se utilizó la función “sumif” que proporciona Excel.

=SUMIF(\$E\$6:\$E\$9,"=" & B14,\$F\$6:F9)/\$F\$10

Figura 4.2.3 Calculo del %Q de lodo transportado a la planta 1

HRT1 → Tiempo de retención hidráulica para la planta 1. Y es una medida del promedio de tiempo que un compuesto permanece en un tanque de tratamiento. La unidad es en días.

Luego, se tiene el factor de eficiencia que se necesita después para determinar la eficiencia del reactor. Para conseguir este valor, se eligió utilizar la función sigmoide que se muestra en la figura 4.2.4.

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

$S(x)$ = sigmoid function
 e = Euler's number

Figura 4.2.4 Función sigmoide

Ajustando dicha ecuación al modelo, el factor de eficiencia se calcularía así:

$$\text{Factor de eficiencia} = 1 / (1 + \text{EXP}(-\text{Alfa} \times (\text{HRT1} - 10)))$$

Factor de eficiencia → Valor entre 0 y 1 que se utilizara para calcular la eficiencia del reactor.

Alfa → Factor que se utiliza para regular la velocidad con la que la eficiencia cambia con respecto al HRT1. El valor que se fijo fue de 0.15. Si se tiene un valor de alfa mayor quiere decir que el factor de eficiencia tendera más rápido a 1 con un valor menor de HRT1. Si, por el contrario, se tiene un

Desarrollo de una herramienta de optimización

valor menor a 0.15 el factor de eficiencia necesitara un HRT1 mayor para poder alcanzar el valor de 1.

HRT1 → Tiempo de retención hidráulica y se le resta 10, ya que es el número mínimo de días que se estableció que puede estar el compuesto en el tanque.

EXP → Es la manera de decirle a Excel que se trata de una exponencial.

En la figura 4.2.5, se observa un gráfico que representa el comportamiento de la función acoplada al modelo. Dicha función únicamente puede tomar valores entre 0 y 1. Además, sirve para controlar el parámetro del tiempo de retención hidráulica. Por ejemplo, se ve cuanto mayor es este valor mayor es el factor de eficiencia, sin embargo, llega un punto que el HRT es tan grande que no importa cuánto valga el valor, el factor de eficiencia va a hacer igual a 1. El HRT es un parámetro muy importante para la producción de metano, ya que si se tiene un HRT muy pequeño todos los microorganismos activos que producen metano se escaparían del reactor [14]. Debido a que el comportamiento de esta función se ajusta perfectamente al valor que puede tomar el factor de eficiencia, y a su vez permite controlar el parámetro HRT, que es esencial en la producción de metano, se decidió por emplear la siguiente función sigmoide para conseguir su valor más óptimo.

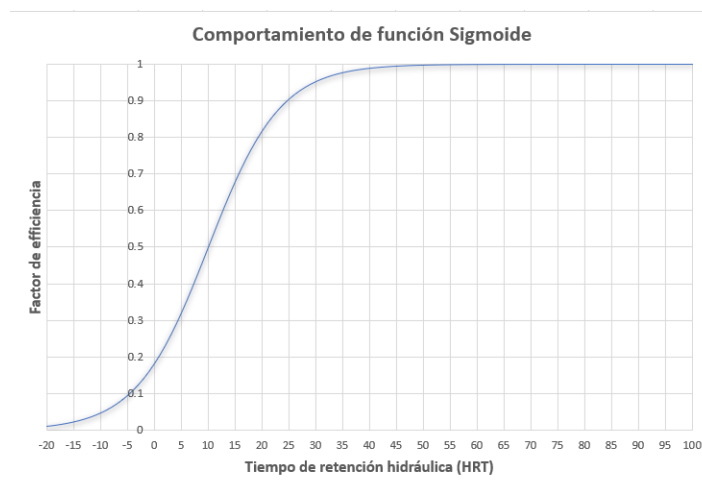


Figura 4.2.5 Comportamiento de la función sigmoide

Una vez obtenido el factor de eficiencia, se calcula la eficiencia del reactor 1:

$$\text{Eficiencia del reactor 1} = \text{Factor de eficiencia} \times \text{Máxima eficiencia}$$

Eficiencia del reactor 1 → Valor entre 0 y 1 que representa la eficiencia del reactor.

Factor de eficiencia → Valor encontrado utilizando la formula anterior.

Máxima eficiencia → Valor máximo de eficiencia que puede llegar el reactor. Se asumió que era 85%.

Luego conociendo la eficiencia del reactor, se calcula los kg de CH₄ al año que se pueden producir:

$$kg \text{ de } CH_4 = Eficiencia \text{ del reactor } 1 \times Cantidad \text{ de } DBO \times \% DBO \text{ transportado a la planta } 1 \times (16/64)$$

kg de CH₄ → Valor aproximado de cuántos kilogramos de metano se puede quemar para generar electricidad. La unidad es en kg.

Cantidad de DBO → Cantidad de carga orgánica total que se pueden gestionar. La unidad es en Kg O₂ / año.

% DBO transportado a la planta 1 → Porcentaje que determina la cantidad de carga orgánica que se transporta a la planta 1. Para calcular este valor se suma las cantidades de DBO que irían a la planta 1 y se divide entre la cantidad total.

16/64 → número que transforma los kg de O₂ en kg de metano.

A partir de los kg de CH₄, se puede calcular cuantos kilovatios hora (kWh) se pueden generar:

$$kWh / año = kg \text{ de } CH_4 \times kWh/kg \text{ } CH_4$$

kWh / año → Cantidad de kilovatios al año que se pueden producir.

kg de CH₄ → Valor encontrado utilizando la formula anterior. La unidad es kg CH₄ / año.

kWh/kg CH₄ → Valor constante que representa cuantos kilovatios hora se puede producir por cada kilogramo de metano. El valor que se utilizo fue 13.89.

Después de conseguir los kilovatios al año (kWh / año), el valor de la venta de electricidad de la planta 1 que iría en la función objetivo se calcula así:

$$VE1 = kWh / año \times € / kWh$$

VE1 → Venta de electricidad de la planta 1. La unidad es euros / año.

kWh / año → Valor encontrado utilizando la formula anterior.

€ / kWh → Euros recibidos por la venta de la electricidad. El valor que se utilizo fue 0.013.

Ahora, se procederá a explicar la formulación matemática que estimaría los costes de construcción de la planta 1. Al igual que la venta de la electricidad solo se enseñará para la planta 1, pero el cálculo de la planta 2 es el mismo:

Primero, se calcula los euros / m³:

$$euros / m^3 = C_{\text{mínimo}} + (C_{\text{max}} - C_{\text{mínimo}}) \times (HRT1)^{\alpha}$$

C_{mínimo} → Coste mínimo en euros y para este caso se utilizó el valor de 30.

C_{max} → Coste máximo en euros y se utilizó el valor de 90.

Desarrollo de una herramienta de optimización

Alfa → Este valor marca la sensibilidad de la curva exponencial con respecto al coste mínimo. Se asumió un valor fijo de 0.6. Si se tiene un valor por debajo cuanto mayor sea HRT, más se aleja el coste mínimo de 30. Por el contrario, si se tiene un valor por encima cuanto mayor sea HRT más se acerca al coste mínimo de 30.

HRT1 → Tiempo de retención hidráulica.

La función que se eligió para describir el coste de euros por m³ se presenta en la figura 4.2.6. Como se observa, es una exponencial negativa y se decidió utilizar esta función porque se basa en la idea de cuanto mayor es una planta menor coste supone al requerir de una mayor construcción. Por el contrario, cuanto menor sea la planta más variará su precio. En este caso, el volumen de la planta viene controlado por la variable HRT. Por ello, se ve que cuanto mayor es HRT más tiende acercarse al coste mínimo. Por otro lado, cuanto menor es HRT más se acerca al coste máximo. Debido a que el comportamiento de esta función se ajusta muy bien a esta idea y permite expresarla en función de HRT se optó por emplearla.

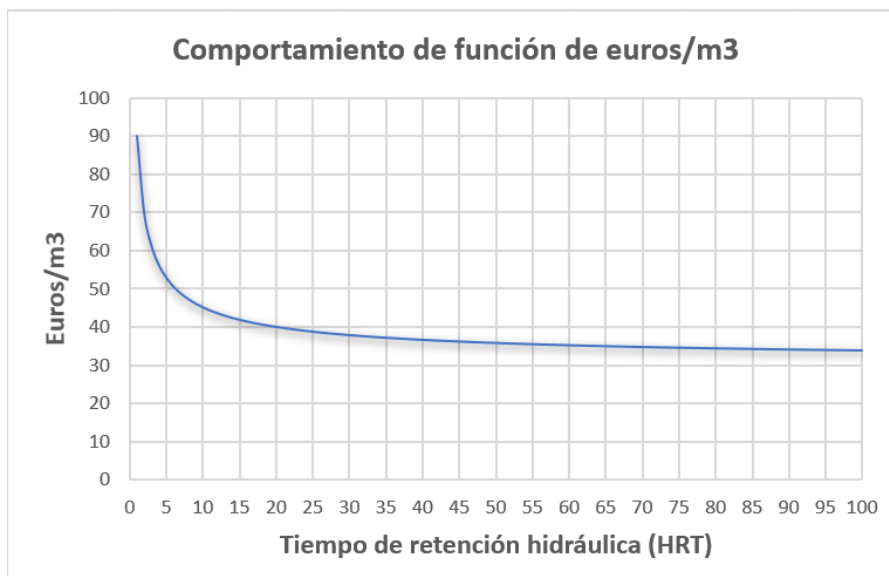


Figura 4.2.6 Comportamiento de la función de euros/m3

Una vez encontrado el valor de los euros / m³, el valor final del coste de la instalación 1 en la función objetivo es el siguiente:

$$CP1 = \text{volumen reactor 1} \times \text{euros} / m^3$$

CP1 → Valor resultante que representa el coste de construcción de la planta 1.

euros / m³ → Valor encontrado al utilizar la formula anterior.

Volumen reactor 1 → Fórmula que se encuentra en la formulación matemática de la venta de la electricidad. La unidad es en m³.

5. PRESENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA

5.1. Diseño de la herramienta

Para poder resolver el optimizador, se creó una herramienta que le facilite al usuario el cálculo de las ubicaciones de las instalaciones centralizadas y sus tamaños. A la hora de crear la herramienta se consideraron dos aspectos. El primero fue el diseño general de la herramienta, que es con lo que el usuario debe interactuar, y el segundo se explicará más adelante, la cual refiere a la programación de la herramienta para facilitarle al usuario moverse dentro de ella, y resolver el optimizador. En la figura 5.1.1 se muestra la pantalla inicial de la herramienta. Como se observa, es una herramienta bastante sencilla y simple de usar, lo que permitió cumplir con otros de los objetivos mencionados en 1.



Figura 5.1.1 Vista ventana inicial

La herramienta contiene dos botones principales. El primero: introducción y su función apenas el usuario lo presione es dirigirse a la ventana de introducción y es la que se muestra en la figura 5.1.2.

Introducción:



Objetivo:

Esta herramienta fue creada con el propósito de implementar modelos de gestión de aguas residuales provenientes de las depuradoras y de los residuos agroalimentarios que traten de priorizar la optimización energética y la recuperación de recursos.

Como resultado final en base a un pre-tratamiento de datos de entrada que se explica al lado derecho de la hoja, dicha herramienta proporciona la ubicación óptima y el tamaño de la institución centralizada para gestionar los residuos provenientes de las depuradoras y las industrias agroalimentarias.



Metodología:

El optimizador consiste en una función objetivo, donde la meta es minimizar los costes totales. Esto se consigue a través de la utilización de la herramienta SOLVER de excel. Dicha función objetivo consta de tres partes:



Pre-tratamiento de datos de entrada:

Una parte importante de la herramienta es el pre-tratamiento de los datos de entrada. Los pasos que se siguieron fueron los siguientes:

1. Se recibió las ubicaciones con sus coordenadas y las cantidades que producía cada depuradora o industria agroalimentaria. En base a esto, se optó por utilizar la técnica del clustering. El clustering permite agrupar objetos similares entre si que sean distintos a los objetos de otro clusters.
2. Con el clustering, se optó por crear 4 clusters diferentes que representaran un grupo o zona en específico. A la misma vez, las cantidades de lodo o residuo, y de DBO que producía cada cluster era igual a la suma de todas las depuradora o industrias que pertenecieran a dicho cluster.



Instrucciones:

Dos características importantes a conocer de la herramienta son: la primera es que solo contiene 4 clusters y la segunda es que únicamente se trabaja con 2 instituciones centralizadas para tratar el lodo o los residuos.

Volver Inicio

Comenzar
herramienta

Figura 5.1.2 Ventana de introducción

Esta ventana se incluyó a modo informativo para el usuario, ya que la herramienta fue pensada para que pueda ser manejada por cualquier usuario necesidad de requerir de algún conocimiento



Desarrollo de una herramienta de optimización

específico. En esta hoja se abordan 4 puntos. El primero pone en contexto al usuario sobre el objetivo y el propósito de la herramienta. El segundo explica un paso necesario que se tiene que hacer antes de resolver el optimizador que se denomina pretratamiento de datos, y se explicó en el punto 4.1. Esta parte es muy importante ya que los datos de entrada del optimizador de las ubicaciones de las depuradoras se consiguen en esta etapa.

El tercer punto habla muy modo general de la metodología implementada en el optimizador, es decir, cómo se creó la función objetivo y por cuales parámetros está compuesta. Y el último, son las instrucciones paso a paso para resolver y obtener los resultados del optimizador. Esta ventana se creó para despejar todas las dudas del usuario y de modo breve explicarle la información más relevante que debería saber.

El segundo botón que tiene la pantalla principal es donde dice herramienta, y su función es cuando el usuario lo oprima dirigirse a la ventana de herramienta, que se presenta en la figura 5.1.3. Esta hoja está protegida y significa que hay casillas en las que el usuario no las podrá editar, es decir el usuario en la hoja de herramienta solo podrá modificar los campos de carga máxima, peso bruto del camión, y las 3 columnas de cantidades. Esto se diseñó de esa forma para evitar inconvenientes y para que el usuario no modifique las ubicaciones de los clústeres y afecte en el resultado.

Herramienta de cálculo:

 Si tiene duda de algunos de los datos, coloque el cursor sobre el encabezado de la columna.  Unicamente podrá editar las cantidades de lodo+residuo, de DBO y los datos de entrada del camión, lo demás viene predefinido en el pre-tratamiento de datos

Datos entrada del camión:

Carga Máxima (Kg) Peso bruto del camión (Kg)

Resultados del pre-tratamiento de

Nombre	Latitud	Longitud	Cantidad de lodo+Residuo (m3/año)	Cantidad de lodo+Residuo (tn/año)	Cantidad de DBO (tn O2/año)
Cluster 1	38.89383679	-6.91272071	54,915.1	19570.5	945.7
Cluster 2	38.29955413	-6.63084667	5,022	4792.3	542.2
Cluster 3	39.08341744	-5.35075333	13,659.6	12353.5	1104.8
Cluster 4	38.52122214	-6.02143333	78,286.95	73027.6	2585.7

Figura 5.1.3 Ventana de herramienta

Los únicos datos de entrada que tiene que introducir el usuario son la carga máxima y el peso bruto del camión en kilogramos. Estos datos corresponden al camión que se va a utilizar para transportar los lodos y residuos. En este caso, se utilizó un peso bruto del camión de 25000 Kg y una carga máxima de 16716.5 Kg.

Justo debajo de datos de entrada del camión, se encuentra otra tabla llamada resultado de pretratamiento de datos y son los datos obtenidos en el pretratamiento. Las ubicaciones se consiguen con la técnica de Clustering y las columnas de cantidades se obtendrían también en el pretratamiento al sumar a cada clúster la cantidad correspondiente de cada depuradora que le pertenece a dicho clúster. Sin embargo, las tres columnas de cantidades se dejaron disponible para que el usuario las pueda modificar a modo de prueba, por si quiere intentar distintas cantidades para ver cómo responde el optimizador. Adicionalmente, en la esquina superior de algunas casillas el triángulo pequeño rojo que se observa cumple la función de informar al usuario de los valores

que tiene que introducir. Por lo tanto, si el usuario tiene una duda de un campo en específico a rellenar simplemente pone el ratón encima de la casilla y le saldrá una breve descripción.

Una vez que el usuario tenga los datos correctamente en cada casilla, al presionar el botón de “resolver” el optimizador comenzará a buscar solución. La ventana del optimizador es una hoja oculta que el usuario no podrá ver y se diseñó así para que el usuario no tuviera que interactuar en lo absoluto con el optimizador. Mientras que el optimizador busca solución el usuario se quedará en la pestaña de herramienta y debajo a la izquierda en la barra saldrán dos elementos. El primero es “Trial solution” y consiste en las iteraciones que hace el optimizador para encontrar el resultado y el segundo es “objective cell” y reflejará el valor final de la función objetivo en cada iteración. Apenas el optimizador termine, se dirigirá directamente a la ventana de resultados donde el usuario podrá ver los resultados obtenidos.

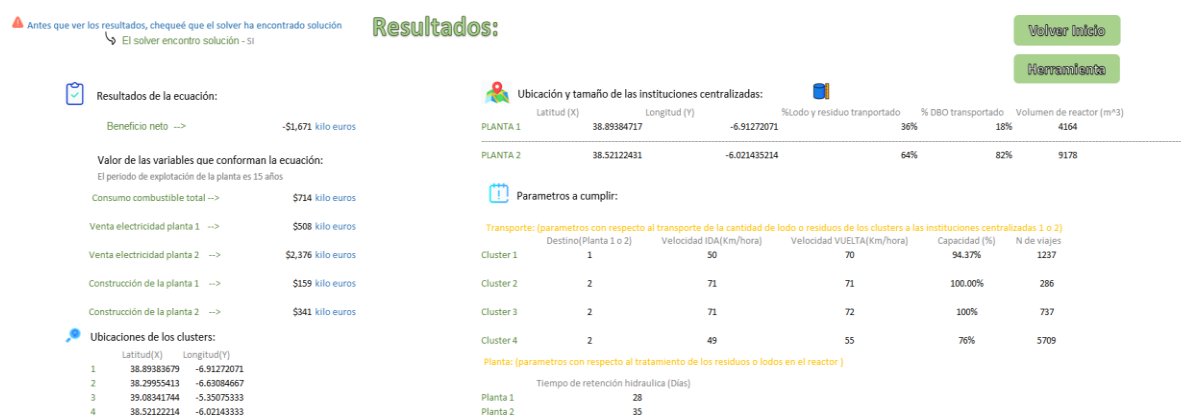


Figura 5.1.4 Ventana de resultados

En la figura 5.1.4, se observa la ventana de resultados en donde se muestran las conclusiones que consigue el optimizador. Antes de comenzar a analizar el resultado, la primera casilla que debe ver el usuario es si el solver encontró una solución en el margen de arriba a la derecha. Esta es una condición que se programó para informar al usuario. Si el optimizador encontró una solución, que es cuando obtiene un valor igual a 1 o 0, se le indicara con la afirmación “SI”. Por el contrario, si el optimizador no encontró una solución, que es otro valor distinto de 1 o 0, se le indicara con un “No”. Si no se encuentra solución, lo que quedaría es volver a revisar los datos de entrada en la ventana de herramienta para corroborar si están correctamente introducidos o revisar si se cometió algún error en la etapa de pretratamiento de datos.

Una vez que el optimizador haya encontrado solución, los resultados reflejados se basan en los cuatro puntos más importantes del optimizador. El primero se halla relacionado con el valor total de la función objetivo y de cada uno de los parámetros que lo conforman. Hay que tener en cuenta que cada variable que conforma la función objetivo representa el coste o ahorro por un periodo de 15 años, ya que es el periodo de explotación que se asume que durarían las plantas para gestionar los residuos.

El segundo punto es solo a modo informativo y de comodidad para que el usuario no tenga que volver a la ventana de herramienta para ver las ubicaciones de los clústeres y compararlos con las ubicaciones óptimas. El tercer punto es uno parámetros más relevantes que calcula el optimizador y son las ubicaciones de las instalaciones centralizadas y el tamaño de cada reactor necesario para gestionar las cantidades de residuos y de DBO que le llegarían a dicha planta. Por último, el cuarto corresponde a las restricciones que se tienen que cumplir para poder obtener los valores mostrados en la función objetivo. En este punto, habría dos tipos de restricciones.

La primera asociada a restricciones con respecto al transporte de los lodos hacia las plantas. Entre ellas, tenemos el destino de cada clúster, la velocidad promedio que tiene que ir el camión tanto de ida como de regreso a la planta, la capacidad de carga de cada camión de ida, y el número viajes que tiene que hacer de cada clúster a cada planta. La segunda restricción se encuentra relacionada con el tratamiento de los lodos en las plantas. Y es el tiempo de retención hidráulica, que representa el tiempo promedio que un compuesto debe quedarse en el tanque de tratamiento para ser capaces que los microorganismos generen metano.

5.2. Programación de la herramienta

El segundo aspecto que se consideró a la hora de diseñar la herramienta fue la programación para permitir al usuario que se moviera en ella con facilidad y a la misma vez fuera lo más amigable posible. También, parte de la programación consistía en intentar elaborar el algoritmo lo más robusto posible para que fuera capaz de encontrar un mínimo global y no uno local. Para la programación de esta herramienta, se utilizó los macros de Excel, que son un conjunto de instrucciones que llevan a cabo una serie de tareas sobre la misma aplicación.

```
Sub IraIntroduccion()  
'  
' IraIntroduccion Macro  
'  
'  
    Sheets("Introduccion").Select  
End Sub  
Sub IraInicio()  
'  
' IraInicio Macro  
'  
'  
    Sheets("Inicio").Select  
End Sub  
Sub IraHerramienta()  
'  
' IraHerramienta Macro  
'  
'  
    Sheets("Herramienta").Select  
End Sub
```

Figura 5.2.1 Programación de los botones

En la figura 5.2.1, se observa la primera parte del código y simplemente lo que se hizo fue crear distintos botones que permitirían al usuario desplazarse a las distintas pestañas de las herramientas sin necesidad de estar presionándolas con el ratón. Esto se consiguió con el código "sheets ("""). select", donde en sheets se especificaba la ventana que se quería seleccionar y con el método ". select" Excel selecciona dicha pestaña.

Antes de comentar la segunda parte del código, se explicará la creación del solver, que es una herramienta de optimización que ofrece Excel en el que se utiliza para alcanzar un resultado deseado cambiando las suposiciones y estableciendo unas restricciones de un modelo.

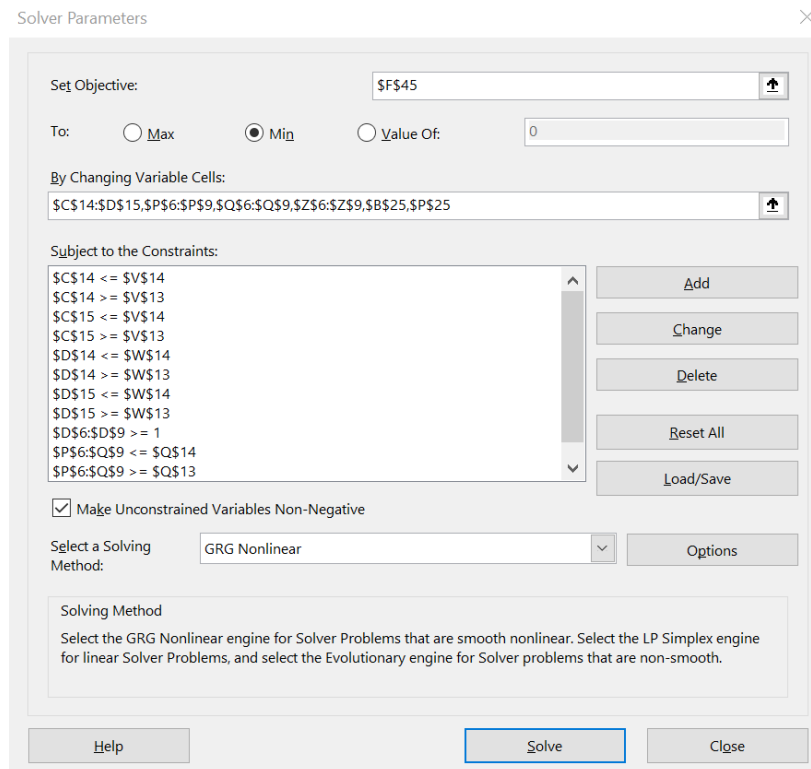


Figura 5.2.2 Creación del solver

En la figura 5.2.2, se contempla la implantación del algoritmo de optimización en Excel. En la casilla de “set objective”, se estableció la función objetivo antes mencionada en la formulación matemática del modelo en el punto 4.2. Luego, se fijó que el objetivo era minimizar dicha función con el optimizador cambiando unos parámetros y encontrando sus valores óptimos para que el valor de la función sea el mínimo posible. Esta parte se implantó en la casilla de “By changing variable cells”. Los parámetros que modifica el solver son:

- ✚ Ubicación de la planta 1: Representa la primera instalación centralizada
- ✚ Ubicación de la planta 2: Simboliza la segunda instalación centralizada
- ✚ V IDA: Velocidad de ida de los clústeres a la instalación centralizada 1 o 2. En este caso en concreto, el optimizador modificaría 4 valores de velocidad de ida, ya que hay 4 clústeres.
- ✚ V Vuelta: Al igual que V IDA, solo que representa la velocidad de vuelta de la instalación a los clústeres.
- ✚ Capacidad: Capacidad que debe tener el camión a la hora de transportar la mercancía a las distintas plantas. Son cuatro valores y cada uno corresponde a cada clúster.
- ✚ HRT1: Tiempo de retención hidráulica de la planta 1.
- ✚ HRT2: Tiempo de retención hidráulica de la planta 2.

Cabe destacar que la variable destino, la cual solo puede tomar el valor de 1 o 2, representa la planta a la que se gestionaran los lodos de cada clúster y esta no la modifica el solver. La justificación

de ello radica en no complicar el algoritmo de optimización con variables enteras. Sin embargo, al ser una variable muy importante se consiguió la combinación optima probando y observando cual era la que mejor valor le otorgaba a la función objetivo. Para esta variable, se tienen 4 valores y cada uno de ellos representa la planta hacia donde se dirige el clúster. La combinación optima encontrada fue que el clúster 1 se dirigía a la planta 1 y los demás clústeres, el 2, 3, y 4, se dirigían a la planta 2.

Una vez establecida las variables que tiene que controlar el solver para obtener la solución óptima, se creó las restricciones que debe cumplir. Dichas restricciones son:

Ubicación de la planta 1 \geq Mínima ubicación de los 4 clústeres (1)

Ubicación de la planta 1 $<$ Máxima ubicación de los 4 clústeres (2)

Ubicación de la planta 2 $<$ Máxima ubicación de los 4 clústeres (3)

Ubicación de la planta 2 \geq Mínima ubicación de los 4 clústeres (4)

Capacidad de cada clúster ≤ 1 (5)

V IDA de cada cluster > 40 (6)

V IDA de cada cluster < 80 (7)

V VUELTA de cada clúster > 40 (8)

V VUELTA de cada clúster < 80 (9)

Las restricciones (1) a la (4), son para ubicar al optimizador a la hora de encontrar las ubicaciones optimas de las dos plantas y se le exige que dichas ubicaciones estén dentro del mínimo y el máximo de las ubicaciones de los 4 clústeres. Con respecto a la restricción (5), es para decirle al optimizador que la capacidad de cada clúster tiene que ser como máximo 1, es decir, un 100%. Las restricciones de la (6) a la (9) es para establecer los límites de velocidad por los que están sometidos los camiones de carga.

Después de las restricciones, se eligió el método con el que se quería resolver el problema de optimización. Dicho método es el "GRG Nonlinear", que significa el método del gradiente reducido generalizado y se utiliza para funciones que no son lineales. Este se fija en el gradiente o pendiente de la función mientras cambian sus valores de entrada y considera que consiguió una solución óptima cuando las derivadas parciales de la función son iguales a cero [15]. Un detalle importante para tener en cuenta es que este método depende mucho de las condiciones iniciales.

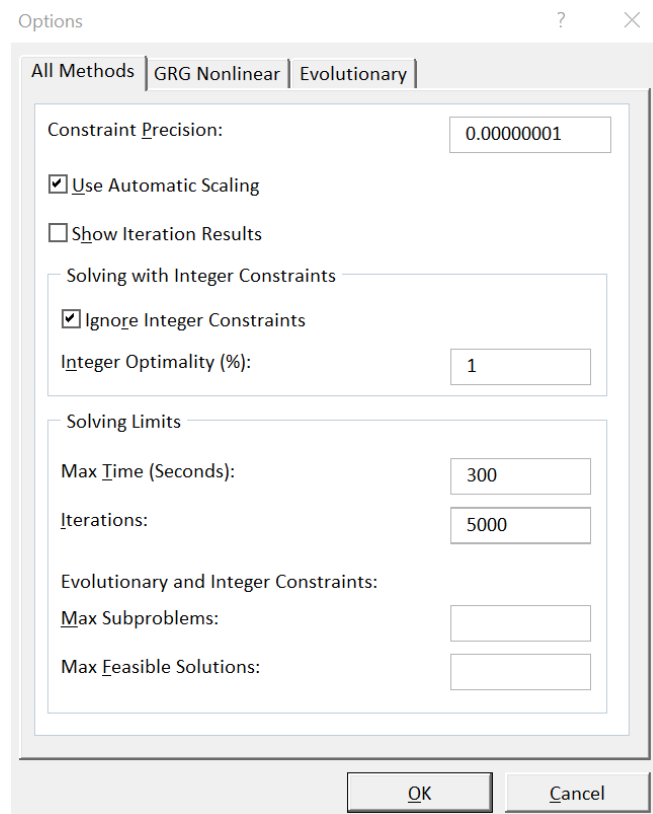


Figura 5.2.3 Configuración de algunos parámetros del solver

Luego de fijar los parámetros y el método, se asignó algunas configuraciones, que se muestra en la figura 5.2.3, para que el algoritmo fuese lo más eficiente posible. La primera fue la precisión de las restricciones en donde dice “constraint precision”. En este campo se especifica un número entre 0 y 1 y significa el grado de precisión con el que se deben de cumplir las restricciones. El valor predefinido que marca Excel es de 0.000001 y cuanto menor sea este valor mayor es el grado de precisión, pero a la misma vez más tiempo le toma al algoritmo en llegar a una solución. Se optó por tener una mayor precisión por lo tanto, se estableció un valor de 0.00000001.

La segunda fue “use automatic scaling” y esto se refiere que Excel coloca todos los valores en el mismo orden de magnitud a la hora de resolver el problema. Esto es importante porque en el optimizador se tienen valores de orden de magnitud distintas. Esto puede complicar y confundir al algoritmo a encontrar la solución más optima. Es por ello, que se decidió activar esta opción. Inclusive, como se observa en la tabla 5.2.1, en el optimizador en la función objetivo y sus variables se estableció las unidades en kilo euros y no en millones de euros para lograr tener el orden de magnitud lo más parecido posible, de esta manera se le facilita al optimizador a encontrar un mejor resultado.

	Costes
Gastos Combustible (Kilo Euros / año)	\$715
VentaElectricidadP1 (Kilo euros / año)	\$-509
VentaElectricidadP2 (Kilo euros / año)	\$-2376
Construcción planta 1 (Kilo euros)	\$159
Construcción planta 2 (Kilo euros)	\$341
Periodo de explotación para los gastos de combustible y la venta de la electricidad (años)	15
Función Objetivo	-1,670 €

Tabla 5.2.1 Transformación de unidades en la función objetivo y sus parámetros

La tercera configuración fue para poner los límites del solver a la hora de la resolución. Se fijaron dos medidas, el “Max time” y “iterations”. La primera es el tiempo máximo que puede tardar el algoritmo en encontrar solución y se estableció un tiempo de 5 minutos, que serían 300 segundos. Y la segunda es el número de iteraciones máxima que puede utilizar el algoritmo para hallar el resultado y se impuso como mucho 5000 iteraciones.

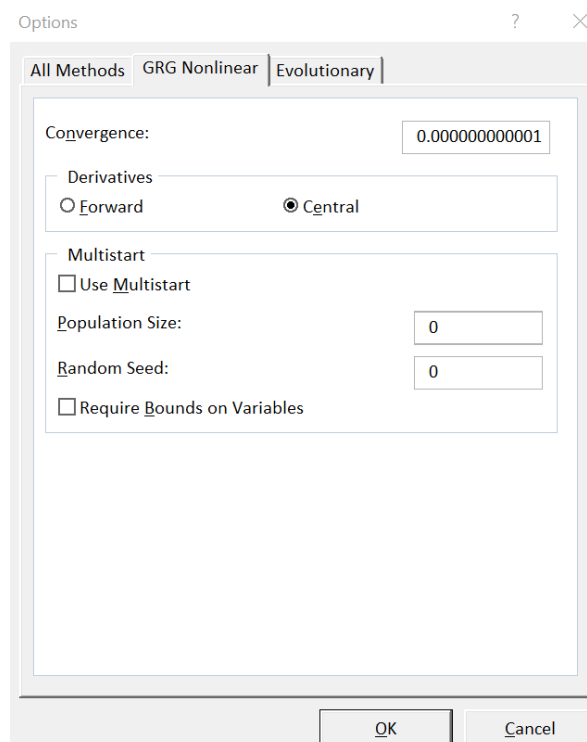


Figura 5.2.4 Otras configuraciones del solver

En la figura 5.2.4, se presentan las últimas configuraciones que se hicieron en el algoritmo de optimización. El solver determina que ha llegado a la solución óptima utilizando un criterio de convergencia, es decir encuentra resultado óptimo cuando no puede mejorar la solución actual más del criterio establecido [16], que se fija al lado de donde dice “convergence”. Y este es un valor entre 0 y 1 donde cuanto menor sea más preciso será, pero más tiempo se tomará. El valor predefinido es de 0.0001, y se decidió establecer un valor de 0.000000000001 para poder alcanzar una mayor precisión.

La última configuración “Derivatives” y simboliza el método que utiliza solver para calcular las derivadas parciales de la función objetivo. Solver ofrece dos opciones “forward” y “central”. La diferencia radica en la manera en que se calculan las derivadas y que una es más precisa que la otra, pero conlleva a un mayor tiempo de resolución. Las derivadas centrales ofrecen una mejor solución, ya que son un promedio de las derivadas hacia adelante y hacia atrás [17]. Es por ello, que se optó por emplear este tipo de derivadas.

A continuación, se procederá a explicar la segunda parte del código que se programó en la herramienta. Toda esta pertenece a la macro llamada “ResolverSolver ()” y consistía en tres partes. La primera es llamar al solver creado y descrito anteriormente. La segunda consiste en crear un código que hiciera al algoritmo desarrollado más eficiente y robusto. Y la tercera hacer un código que copiara los datos más importantes del optimizador y los pegara en una ventana donde se mostrarían los resultados al usuario.

```
Sub ResolverSolver()

    ' ResolverSolver Macro
    Dim Resultado As Integer, wshSolver As Worksheet, wshResultados As Worksheet
    Dim i As Integer, idcContador_1 As Integer, idcContador_2 As Integer
    Randomize

    Application.ScreenUpdating = False

    With ThisWorkbook
        Set wshSolver = .Worksheets("Solver")
        Set wshResultados = .Worksheets("Resultados")
    End With

    ' inicializamos el optimizador en unos valores random
    InicializarValores wshSolver

    idcContador_1 = 0
    idcContador_2 = 0

    wshSolver.Visible = True
    wshSolver.Activate

    'se hizo un for
    Do
        Resultado = SolverSolve(UserFinish:=True)
        If Resultado <= 1 Then
            If idcContador_1 < 4 Then
                AplicarRuido (0.015)
            End If
            idcContador_1 = idcContador_1 + 1
        Else
            InicializarValores (wshSolver)
        End If

        idcContador_2 = idcContador_2 + 1
    Loop While (idcContador_1 < 5 And idcContador_2 < 10)
```

Figura 5.2.5 Primera y segunda parte de la macro ResolverSolver ()

En la figura 5.2.5, se observa la primera y segunda parte de la macro ResolverSolver. A continuación, se explicará paso a paso el código. Esta macro está asociada al botón “resolver” de la ventana de herramienta explicado en el punto 5.1, que cuando el usuario lo presione se ejecutaría dicha macro. Comienza en la línea “application. screenupdating=false”, para que se mantenga en la misma hoja mientras se ejecuta el solver. Por ello, cuando comience el solver el usuario permanecerá en la ventana de “herramienta”. La siguiente línea “with” es para inicializar dos variables que representarían las hojas de solver y resultados, es decir cuando se quiera llamar a estas hojas se utilizan estas variables.

Luego, se llama a la función “InicializarValores” y se le pasa como argumento de entrada la variable que corresponde a la hoja del solver. Esta función lo que hace, como se muestra en la figura 5.2.6, es inicializar los valores en la hoja del optimizador. Estos valores son aquellos que modifica el optimizador. Dichos valores son las ubicaciones óptimas, las velocidades de ida y vuelta, las distintas capacidades de cada clúster, y los tiempos de retención hidráulica. Para la inicialización de estos valores, se utilizó funciones definidas por Excel que generan números aleatorios en dichos campos. Este paso es importante, ya que el algoritmo antes dependía en gran parte de las condiciones iniciales. Es por ello, que se decidió inicializar los campos con valores aleatorios.

```
Private Sub InicializarValores(wsh As Worksheet)

    With wsh
        .Range("C14").Value = 38.2996 + Rnd * 0.7838
        .Range("D14").Value = -6.9127 + Rnd * (1.5619)
        .Range("C15").Value = 38.2996 + Rnd * 0.7838
        .Range("D15").Value = -6.9127 + Rnd * (1.5619)
        .Range("B25").Value = WorksheetFunction.RandBetween(29, 35)
        .Range("P25").Value = WorksheetFunction.RandBetween(29, 35)
        .Range("P6").Value = WorksheetFunction.RandBetween(40, 75)
        .Range("P7").Value = WorksheetFunction.RandBetween(40, 75)
        .Range("P8").Value = WorksheetFunction.RandBetween(40, 75)
        .Range("P9").Value = WorksheetFunction.RandBetween(40, 75)
        .Range("Q6").Value = WorksheetFunction.RandBetween(40, 75)
        .Range("Q7").Value = WorksheetFunction.RandBetween(40, 75)
        .Range("Q8").Value = WorksheetFunction.RandBetween(40, 75)
        .Range("Q9").Value = WorksheetFunction.RandBetween(40, 75)
        .Range("Z6").Value = 0.5 + Rnd * 0.5
        .Range("Z7").Value = 0.5 + Rnd * 0.5
        .Range("Z8").Value = 0.5 + Rnd * 0.5
        .Range("Z9").Value = 0.5 + Rnd * 0.5
    End With
End Sub
```

Figura 5.2.6 Función inicializar valores

Las siguientes dos líneas “idccontador_1” y “idccontador_2” es para inicializar unos contadores que se utilizaran en el bucle while. Posteriormente, en las otras dos líneas siguientes “wshSolver.Visible = True” y “wshSolver.Activate” permiten hacer visible la ventana del solver, ya que es un requisito de Excel para que pueda comenzar a resolver el problema de optimización.

Una vez activa la hoja del optimizador, se decidió implementar un bucle while para poder lograr un algoritmo mucho más robusto. El bucle while permite que el algoritmo corra infinitamente hasta que se cumpla una condición y salga de él. Este bucle consiste en correr el programa 5 veces seguidas para poder asegurar que se ha encontrado la solución más cercana a un mínimo global y no local. Se empieza el bucle con la línea “Do”. Luego, la línea que sigue “Resultado = SolverSolve (UserFinish: =True)” es para empezar a resolver el solver y la parte de “UserFinish: =True” es para

que una vez finalizado el solver no le salga la tabla al usuario que diga que ha encontrado solución. La siguiente línea “If Resultado <= 1 Then” establece una condición y entraría si el resultado del solver resuelto es 0 o 1. Hay que tener en cuenta que el solver devuelve estos valores si ha encontrado solución, si por el contrario no ha encontrado solución devolverá un valor distinto de 0 o 1.

Cuando entra en la primera condición, se creó otra condición “If idcContador_1 < 4 Then” y esta representa que si el contador es menor a 4 entraría en esta segunda condición y se llamaría a la función “AplicarRuido (0.015)”, que tiene como argumento de entrada un factor que vendría siendo un porcentaje. En este caso, se estableció el porcentaje de 0.015. La función “AplicarRuido”, como se presenta en la figura 5.2.7, lo que hace es modificar un poco la solución actual encontrada por el optimizador, es decir los resultados encontrados cambiarían por un porcentaje demasiado pequeño y esto permite que cuando se vuelva ejecutar el solver comience de otros puntos distintos al óptimo encontrado. De esta manera, se asegura que el solver no se quede estancado en la misma solución óptima que ha encontrado. Puede darse el caso que el solver llegue a la misma solución y si luego de terminar el bucle la solución sigue siendo la misma quiere decir que es la solución óptima.

```
Private Function AplicarRuido(dblFactor As Double)

    Range("C14").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("C14").Value
    Range("D14").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("D14").Value
    Range("C15").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("C15").Value
    Range("D15").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("D15").Value

    Range("B25").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("B25").Value
    Range("P25").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("P25").Value
    Range("P6").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("P6").Value
    Range("P7").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("P7").Value
    Range("P8").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("P8").Value
    Range("P9").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("P9").Value
    Range("Q6").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("Q6").Value
    Range("Q7").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("Q7").Value
    Range("Q8").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("Q8").Value
    Range("Q9").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 0.5)) * Range("Q9").Value

    Range("Z6").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 1)) * Range("Z6").Value
    Range("Z7").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 1)) * Range("Z7").Value
    Range("Z8").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 1)) * Range("Z8").Value
    Range("Z9").Value = (1 + dblFactor * (Rnd - 1)) * Range("Z9").Value

End Function
```

Figura 5.2.7 Función AplicarRuido

Una vez entre en la condición y se aplique el ruido se finaliza dicha condición con un “end if”. La siguiente línea sería “idcContador_1 = idcContador_1 + 1” y consiste en ir incrementando el primer contador en 1 a medida que se reinicie el bucle, para así cuando dicho contador sea igual a 4 se finalice el bucle. A continuación de esta línea, se tiene el “else” que corresponde a la primera condición establecida, es decir entraría aquí si no se cumple la condición de “If Resultado <= 1 Then” y quiere decir que el solver no ha encontrado una solución. Si entra en este else no entraría en la segunda condición de “If idcContador_1 < 4 Then” y se cumpliría esta línea “InicializarValores (wshSolver)”, que significa que se vuelve a llamar a la función “IniciarValores” y se volverían a inicializar los valores en el optimizador.

Luego, se cierra la condición con el “end if” y pasaría a la siguiente línea “idcContador_2 = idcContador_2 + 1”, que lo que hace es ir incrementando el valor del segundo contador en 1 a medida que se reinicie el bucle. Por último, se tiene la línea “Loop While (idcContador_1 < 5 And

Desarrollo de una herramienta de optimización

idcContador_2 < 10)”, que es donde se crea el bucle infinito hasta que el primer contador sea igual a 5 o el segundo contador sea igual a 10. El segundo contador se implementó para asegurar que en dado caso que el solver no encuentre solución no se quede estancado en el bucle infinito.

```
With wshResultados
    .Range("ValorFinal").Value = wshSolver.Range("F45").Value
    .Range("ConsumoComb").Value = wshSolver.Range("F38").Value * wshSolver.Range("J38").Value
    'consumo de combustible
    'venta de electricidad
    .Range("ElecF1").Value = wshSolver.Range("F40").Value * wshSolver.Range("J38").Value
    .Range("ElecF2").Value = wshSolver.Range("F41").Value * wshSolver.Range("J38").Value
    'construccion de plantas
    .Range("ConstF1").Value = wshSolver.Range("F42").Value
    .Range("ConstF2").Value = wshSolver.Range("F43").Value
    'latitud y longitud planta 1
    .Range("LatF1").Value = wshSolver.Range("C14").Value
    .Range("LongF1").Value = wshSolver.Range("D14").Value
    'latitud y longitud planta 2
    .Range("LatF2").Value = wshSolver.Range("C15").Value
    .Range("LongF2").Value = wshSolver.Range("D15").Value
    'porcentaje de lodo
    .Range("CdadF1").Value = wshSolver.Range("E14").Value
    .Range("CdadF2").Value = wshSolver.Range("E15").Value
    'porcentaje de DBO
    .Range("CdadDBOF1").Value = wshSolver.Range("F14").Value
    .Range("CdadDBOF2").Value = wshSolver.Range("F15").Value
    'volumen de reactor
    .Range("VolF1").Value = wshSolver.Range("B26").Value
    .Range("VolF2").Value = wshSolver.Range("B26").Value
    'destino
    .Range("Destil1").Value = wshSolver.Range("D6").Value
    .Range("Destil2").Value = wshSolver.Range("D7").Value
    .Range("Destil3").Value = wshSolver.Range("D8").Value
    .Range("Destil4").Value = wshSolver.Range("D9").Value
    'velocidad de ida
    .Range("VIDA1").Value = wshSolver.Range("F6").Value
    .Range("VIDA2").Value = wshSolver.Range("F7").Value
    .Range("VIDA3").Value = wshSolver.Range("F8").Value
    .Range("VIDA4").Value = wshSolver.Range("F9").Value
    'velocidad de vuelta
    .Range("VVuelta1").Value = wshSolver.Range("Q6").Value
    .Range("VVuelta2").Value = wshSolver.Range("Q7").Value
    .Range("VVuelta3").Value = wshSolver.Range("Q8").Value
    .Range("VVuelta4").Value = wshSolver.Range("Q9").Value
    'Capacidad
    .Range("Capaci1").Value = wshSolver.Range("Z6").Value
    .Range("Capaci2").Value = wshSolver.Range("Z7").Value
    .Range("Capaci3").Value = wshSolver.Range("Z8").Value
    .Range("Capaci4").Value = wshSolver.Range("Z9").Value
    'tratamiento
    .Range("HRTreten1").Value = wshSolver.Range("B25").Value
    .Range("HRTreten2").Value = wshSolver.Range("F25").Value
    'viajes
    .Range("Nviaje1").Value = wshSolver.Range("N6").Value
    .Range("Nviaje2").Value = wshSolver.Range("N7").Value
    .Range("Nviaje3").Value = wshSolver.Range("N8").Value
    .Range("Nviaje4").Value = wshSolver.Range("N9").Value
    'latitud clusters
    .Range("LatC1").Value = wshSolver.Range("B6").Value
    .Range("LatC2").Value = wshSolver.Range("B7").Value
    .Range("LatC3").Value = wshSolver.Range("B8").Value
    .Range("LatC4").Value = wshSolver.Range("B9").Value
    'longitud clusters
    .Range("LongC1").Value = wshSolver.Range("C6").Value
    .Range("LongC2").Value = wshSolver.Range("C7").Value
    .Range("LongC3").Value = wshSolver.Range("C8").Value
    .Range("LongC4").Value = wshSolver.Range("C9").Value
    If Resultado <= 1 Then
        .Range("SiNO").Value = "SI"
    Else
        .Range("SiNO").Value = "NO"
    End If
End With
'Mostrar Pagina resultado
wshSolver.Visible = False
wshResultados.Activate
Application.ScreenUpdating = True
End Sub
```

Figura 5.2.8 Tercera parte de la macro ResolverSolver ()

En la figura 5.2.8, se contempla el tercer punto de la macro ResolverSolver. Este código lo que hace es, una vez finalizado y encontrado la solución óptima, copiar y pegar los valores del solver en la ventana de resultados. Esto se logra primero con el código “with wshResultados” se llama a la ventana de resultado y luego con el código “. Range("ValorFinal"). Value = wshSolver.Range("F45"). Value” se consigue traspasar los datos de la hoja de solver a la hoja de resultados. Se utiliza la variable “wshSolver” para poder acceder a la hoja del optimizador. Adicionalmente, se creó una

condición que se ve en la línea “If Resultado \leq 1 Then”, que sirve para informar al usuario si solver ha podido encontrar una solución.

Luego, se finaliza la copiada y pegada con la línea “end with”. Posteriormente, en la siguiente línea “wshSolver.Visible = False”, se esconde la hoja del optimizador y se vuelve oculta. Después, con la línea “wshResultados.Activate”, se activa y dirige al usuario a la ventana de resultados para visualice la solución. Y por último, con la línea “Application.ScreenUpdating = True”, se vuelve activar la actualización de pantalla.

6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

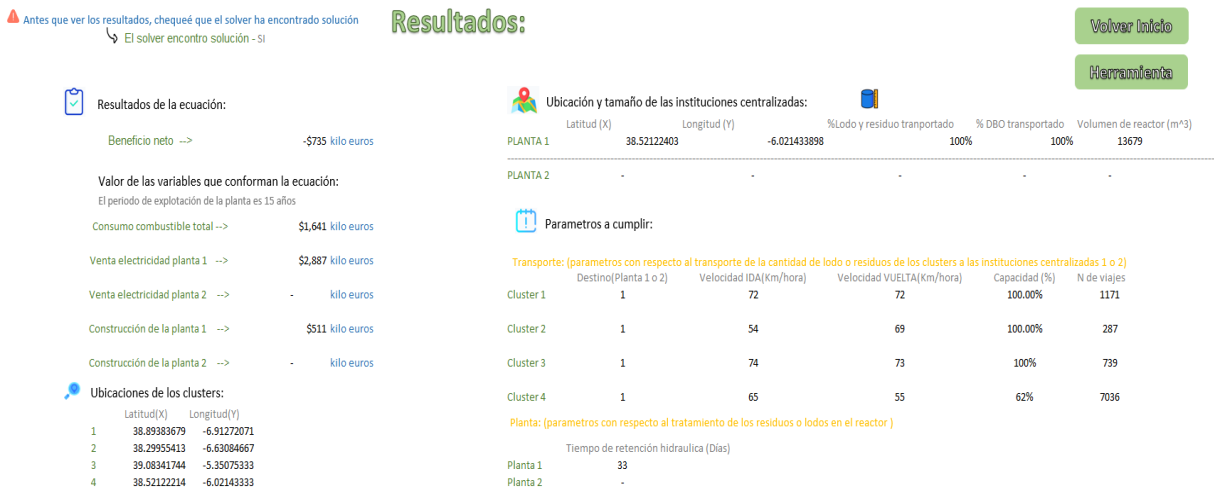


Figura 6.1.1 Resultados obtenidos para la planta 1

A la hora de crear el optimizador, se comenzó desde lo más simple posible y poco a poco se le fue aumentando el grado de dificultad. Al comienzo, se diseñó el optimizador con una sola instalación centralizada. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.1.1. Lo importante es ver qué datos interesantes o conclusiones se pueden obtener de estos resultados.

El optimizador otorgó la ubicación de la planta centralizada muy cerca del clúster 4, debido a que era el clúster que más cantidad de residuos y lodos producía. Las distancias en kilómetros entre la planta y los distintos clústeres son: Del clúster 1 y la planta 87.9 km, del clúster 2 y la planta 58.6 km, del clúster 3 y la planta 85.4 km, y del clúster 4 y la planta 0.0002 km. También, el optimizador optó por tener una capacidad del 62% con respecto al 4 clúster porque la planta está ubicada muy cerca. Por el contrario, con respecto a los otros clústeres estableció una capacidad del 100%, porque están ubicados a bastantes kilómetros. El tiempo de retención hidráulica que fijo el optimizador fue de 33 días.

Luego, se observa que para el caso de 1 planta el beneficio obtenido es de -735 kilo euros. Al ser negativo el resultado indica un ahorro, por lo que la implementación de este proyecto sigue siendo atractiva.

Posteriormente de haber realizado el algoritmo de optimización para una planta, se pensó en implementar dos plantas y analizar y ver que tal eran los resultados obtenidos. En la figura 6.1.2, se observa los resultados obtenidos para el caso de dos plantas.

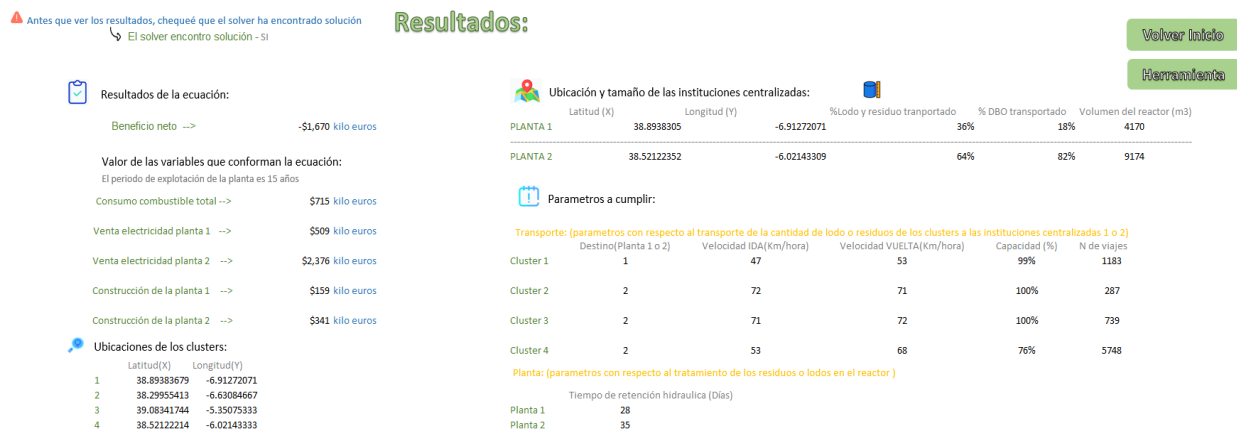


Figura 6.1.2 Resultados obtenidos para 2 plantas

Luego de intentar distintas combinaciones del destino de los clústeres manualmente, se concluyó que la combinación optima o la que le permitía encontrar al optimizador el mayor valor mínimo de la función objetivo era ubicar el primer clúster a la planta 1 y los otros tres clústeres a la planta 2. El clúster 1 producía 19570.5 toneladas al año. El clúster 2 generaba 4792.3 toneladas al año. El clúster 3 tenía 12353.5. El clúster 4 producía 73027.6. Aunque a simple vista parecía que la ubicación del clúster 3 estaba ubicada más lejos y tenía sentido ubicar una planta cerca de esta ubicación, al comparar las cantidades que generaban cada clúster, se vio que el clúster 1 tenía mayor cantidad de residuos que el clúster 3 y que el clúster 2, por lo tanto, la combinación optima fue ubicar las plantas una cerca del clúster 4, que era la que más cantidad tenía, y otra cerca del clúster 1 que era la segunda que más generaba.

Otra conclusión interesante de observar es que cuando la ubicación entre la depuradora y la de la planta están muy cercas merece hacer más viajes y con menor capacidad para consumir menos. Esto es debido a que el peso del camión influye mucho en el consumo del combustible y se observa como la ubicación del clúster 4 y la de la planta 2 están relativamente cerca y la capacidad que propone el optimizador es del 76%. Por el contrario, con las ubicaciones del clúster 2 y 3 la capacidad merecer que sea del 100%, debido a que la distancia en kilómetros es mucho mayor. La distancia en kilómetros del clúster 1 a la planta 1 es de aproximadamente 0.0007 kilómetros, la del clúster 2 a la planta 2 es de 58.6 kilómetros, la del clúster 3 a la planta 2 es de 85.4 kilómetros, y la del clúster 4 a la planta 2 es de 0.0002 kilómetros.

En el caso de las velocidades, se ve que cuanto menor es la distancia menor es la velocidad óptima de los camiones. Esto se debe a que una mayor velocidad afectaría más al consumo. En el caso del clúster 2 y 3 al estar lejos de la planta 2 merece la pena ir a una mayor velocidad.

Con respecto a las plantas de tratamiento, una conclusión relevante es que cuanto mayor es el volumen del reactor, mayor es el tiempo de retención hidráulica. Lo cual tiene sentido, ya que al haber una mayor cantidad de microorganismos tomara más tiempo en que todos produzcan metano. Esta consecuencia se puede ver en los resultados obtenidos, como el tiempo para la planta 1, que tiene un volumen de reactor de 4170 m³ y es menor que la planta 2, es de 28 días y para la planta 2 es de 35 días y tiene un volumen de reactor de 9174 m³.

Desarrollo de una herramienta de optimización

Quedaría por analizar los valores de la función objetivo. Esto es un estimado para un período de explotación de las plantas que se asumió que serían de 15 años aproximadamente. A simple vista con los resultados obtenidos se ve que es un proyecto que puede llegar a ser muy rentable y a la misma vez fortalecería a introducir cada vez más el concepto de economía circular y distintas maneras de gestionar los residuos restantes.

A modo comparativo, para el caso de 1 o 2 plantas, se vio que es más rentable la implementación de dos instalaciones centralizadas. La diferencia es que con las dos plantas se consiguió 935 kilo euros más en el beneficio neto. Esto se debe a que se redujo considerablemente los gastos de combustible con las dos plantas, ya que se ubicó las dos plantas muy cerca de la ubicación de los clústeres. En cuanto a la velocidad y la capacidad no hubo mucha diferencia, y los días de retención hidráulica salieron parecidos. Como salió más rentable la implementación de dos plantas, el algoritmo de optimización que presenta la herramienta está diseñado para dos instalaciones centralizadas.

Por último, se realizará un análisis de sensibilidad para observar cuáles son las variables más críticas en el modelo creado. La variable más crítica es aquella que más influye en el cambio del resultado. El análisis se hará con el optimizador de dos plantas.

La primera variable que se examinó fue la de destino. Esta era una variable que solo puede tomar el valor de 1 o 2, dependiendo a qué planta vayan los lodos y residuos. A continuación, se muestran varias combinaciones para ver su efecto en el resultado.

(óptimo)

	Latitud (x)	Longitud (y)	Destino
Clúster 1	38.8938368	-6.9127207	1
Clúster 2	38.2995541	-6.6308467	2
Clúster 3	39.0834174	-5.3507533	2
Clúster 4	38.5212221	-6.0214333	2

→ Función objetivo: -1,670 kilo euros
(Esta es la solución óptima dada por el optimizador)

1)

	Latitud (x)	Longitud (y)	Destino
Clúster 1	38.8938368	-6.9127207	1
Clúster 2	38.2995541	-6.6308467	1
Clúster 3	39.0834174	-5.3507533	2
Clúster 4	38.5212221	-6.0214333	2

→ Función objetivo: -1,630 kilo euros
(Se observa un cambio pequeño)

2)

	Latitud (x)	Longitud (y)	Destino
Clúster 1	38.8938368	-6.9127207	2
Clúster 2	38.2995541	-6.6308467	1
Clúster 3	39.0834174	-5.3507533	2
Clúster 4	38.5212221	-6.0214333	2

→ Función objetivo: -610 kilo euros
(Se observa un cambio mayor)

3)

	Latitud (x)	Longitud (y)	Destino
Clúster 1	38.8938368	-6.9127207	2
Clúster 2	38.2995541	-6.6308467	1
Clúster 3	39.0834174	-5.3507533	2
Clúster 4	38.5212221	-6.0214333	1

→ Función objetivo: 3,891 kilo euros
(Se observa un cambio muy significativo. Inclusive pasa a ser positivo)

Después de probar diferentes combinaciones, se puede afirmar que esta es una variable crítica, ya que se observa como en la combinación (4) el valor de la función objetivo se dispara. Ello se debe gran parte porque la solución de las ubicaciones óptimas es muy sensible con respecto a los clústeres. Las ubicaciones de los clústeres 2, 3, y 4 las ubicaciones son muy sensibles a la ubicación de la planta 2. Mientras que el clúster 1 es sensible a la ubicación de la planta 1.

Se analizará para el tiempo de retención hidráulica, en este caso se aumentará y disminuirá 2 días para ver su efecto en la función objetivo. El incremento o disminución se realizó conjuntamente entre ambas plantas.

(Óptimo)

	Días
Tiempo de retención hidráulica Para la planta 1	28
Tiempo de retención hidráulica Para la planta 2	35



Función objetivo: -1,670 kilo euros

(Aumento 2 días)

	Días
Tiempo de retención hidráulica Para la planta 1	30
Tiempo de retención hidráulica Para la planta 2	37



Función objetivo: -1,666 kilo euros

(Disminuyo 2 días)

	Días
Tiempo de retención hidráulica Para la planta 1	26
Tiempo de retención hidráulica Para la planta 2	33



Función objetivo: -1,665 kilo euros

En este caso, si bien es una variable importante del modelo, se puede observar que no es una variable crítica, ya que la función objetivo no es “tan sensible”. Esto significa que igual se puede ajustar la variable un poco más o un poco menos y la solución será similar. Lo mismo pasa con la variable de la velocidad, como se puede observar debajo.

(óptimo)

	Velocidad IDA (Km / h)	Velocidad VUELTA (Km / h)
Clúster 1 a la planta 1	47	53
Clúster 2 a la planta 2	72	71
Clúster 3 a la planta 2	71	72
Clúster 4 a la planta 2	53	68



Función objetivo: -1,670 kilo euros

(Disminución de 2 km/h)

	Velocidad IDA (Km / h)	Velocidad VUELTA (Km / h)
Clúster 1 a la planta 1	45	51
Clúster 2 a la planta 2	70	69
Clúster 3 a la planta 2	69	70
Clúster 4 a la planta 2	51	66



Función objetivo: -1,669 kilo euros

Desarrollo de una herramienta de optimización

(Aumento en 2 km/h)

	Velocidad IDA (Km / h)	Velocidad VUELTA (Km / h)
Clúster 1 a la planta 1	49	55
Clúster 2 a la planta 2	74	73
Clúster 3 a la planta 2	73	74
Clúster 4 a la planta 2	55	70

Función objetivo: -1,669 kilo euros

Para finalizar la parte de análisis de resultado, se procederá analizar la sensibilidad de las ubicaciones óptimas.

(óptimo)

	Latitud (x)	Longitud (y)
Planta 1	38.8938305	-6.91272071
Planta 2	38.5212235	-6.02143309

Función objetivo: -1,670 kilo euros

(Aumento en 0.1 ambas plantas)

	Latitud (x)	Longitud (y)
Planta 1	38.9938305	-7
Planta 2	38.6212235	-6.12143309

Función objetivo: -806 kilo euros

(Disminución en 0.1 ambas plantas)

	Latitud (x)	Longitud (y)
Planta 1	38.7938305	-6.81272071
Planta 2	38.4212235	-5.9

Función objetivo: -692 kilo euros

Como se vio reflejado, las ubicaciones óptimas son parte de las variables críticas del modelo debido a la alta sensibilidad por parte de la función objetivo con respecto a la variación de dichas variables.

A modo de resumen, las variables más críticas del modelo son las ubicaciones óptimas que consigue el optimizador y el destino de cada clúster a la planta, que se consiguió manualmente. Esto se debe, ya que de ellas depende mucho el consumo de combustible y si las distancias entre los clústeres y las plantas son muy lejanas el consumo de combustible se dispara. Para finalizar, con el análisis de resultado se observó que la herramienta de optimización fue capaz de encontrar solución, dando así por cumplido otro de los objetivos mencionados en el punto 1.

7. CONCLUSIÓN Y LÍNEAS FUTURAS

En conclusión, se ha presentado en este proyecto una herramienta y un modelo de optimización que es capaz de calcular las ubicaciones óptimas de 2 instalaciones centralizadas, el tamaño de cada una de las plantas que se utilizara para gestionar lodos y residuos, el porcentaje de cantidad que ira a cada planta, los beneficios obtenidos, los costes desglosados, y las restricciones a cumplir. A lo largo de esta memoria, se pudo ver como se logró conseguir cada uno de los objetivos mencionados en el punto 1, entre ellos que el algoritmo fuera capaz de encontrar un resultado, diseñar una herramienta amigable para el usuario, establecer la formulación del problema de optimización y brindar una solución al problema de la ubicación para la zona rural de Badajoz.

Además, dicha herramienta cuenta con una programación que hace el algoritmo mucho más robusto y fiable. La visión de esta herramienta fue muy clara, y era crear un modelo de partida que permitiera la gestión de los residuos y calculara un aproximado de cuanto iban hacer sus costes. Este modelo puede servir como ejemplo para la creación de un modelo más complejo y preciso.

Como líneas futuras, quedaría pendiente intentar resolver este problema probando distintos tipos de metaheurísticos e ir analizando sus respectivos comportamientos y ver cuál de ellos es el que resulta más efectivo. Además, sería interesante comparar el rendimiento de dichos metaheurísticos frente a esta herramienta implementada. Para lograr establecer una herramienta con metaheurísticos, haría falta la programación de un algoritmo de optimización en otra herramienta distinta que el solver de Excel. En este caso, solo era posible crear un número fijado antes de instalaciones centralizadas, luego también queda pendiente el crear una herramienta que incluya una parte que te calcule el número óptimo de plantas centralizadas que se podrían implementar. Con esto, el grado de dificultad aumentaría significativamente.

Por último, otro aspecto interesante a considerar sería el consumo de combustible de las distancias de las depuradoras a los distintos clústeres, ya que se asumió para simplificar el problema que los camiones saldrían de las ubicaciones de los clústeres hacia las plantas. Con esto, se tendría que pensar implementar otro método que incluyera incluir dichas distancias.

REFERENCIAS

1. Belzona Tratamiento de Aguas Residuales Available online: https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf (accessed on Jul 16, 2021).
2. Webscolar Tratamiento de fangos, digestión anaeróbica y aeróbica Available online: <https://www.webscolar.com/tratamiento-de-fangos-digestion-anaerobica-y-aerobica> (accessed on Jun 15, 2021).
3. Camino Fernández Rodríguez; Elia Judith Martínez Torres Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. *Rev. Ion* **2016**, doi:DOI: <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016004>.
4. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía Digestión anaerobia. Proceso de producción de biogás Available online: <https://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/digestion-anaerobia-proceso-de-produccion-de-biogas-biocombustibles-energias-renovables/> (accessed on Aug 12, 2021).
5. Yinka-Banjo, C.; Opesemowo, B. Metaheuristics for solving facility location optimization problem. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.* **2018**, doi:10.25046/aj030639.
6. Maria Grifé Singla Resolución de un Problema de Ruteo de vehículos mediante algoritmos genéticos, Tecnun, Escuela de Ingenieros de la Universidad de Navarra, 2012.
7. Ciudad, F. Demografía Badajoz Available online: <https://www.foro-ciudad.com/badajoz/badajoz/habitantes.html> (accessed on Jul 12, 2021).
8. Instituto cartográfico geología de Cataluña Aspectos geodésicos del ETRS89 Available online: <https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Herramientas/Cambia-coordenada-formato/ETRS89/Aspectos-geodesicos-del-ETRS89> (accessed on Jul 9, 2021).
9. Induanálisis DBO y DQO Available online: https://www.induanalisis.com/publicacion/detalle/dbo_y_dqo_31 (accessed on Jul 5, 2021).
10. Candelario, B. Medición de distancia entre variables y sujetos Available online: <https://slideplayer.es/slide/2316630/> (accessed on Aug 15, 2021).
11. EcuRed Fórmulas de Vincenty Available online: https://www.ecured.cu/Fórmulas_de_Vincenty (accessed on Jul 10, 2021).
12. Class notes *Machine Learning*; 2020;
13. José María López Martínez; Javier Sánchez Alejo Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por coche y camión Available online: https://investigacion-ffe.es/documentos/enertrans/EnerTrans_Transporte_coche_y_camion.pdf (accessed on May 15, 2021).
14. ScienceDirect Hydraulic Retention Time Available online: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hydraulic-retention-time> (accessed on Jul 16, 2021).
15. Young, C. EXCEL SOLVER: WHICH SOLVING METHOD SHOULD I CHOOSE? Available online: <https://engineerexcel.com/excel-solver-solving-method-choose/> (accessed on Jul 20, 2021).
16. College, W. Using the Excel Solver on a Single Variable Unconstrained Optimization Problem Available online: <http://www3.wabash.edu/econapp/econ75/chapters/chap04/c4lab.pdf> (accessed on Jul 22, 2021).
17. McMaster University Forward, backward and central differences for derivatives Available online: <https://dmpeli.math.mcmaster.ca/Matlab/Math4Q3/NumMethods/Lecture3->

1.html (accessed on Aug 13, 2021).

ANEXOS

1. Algoritmo de Clustering desarrollado en Python

```
[ ] import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
```

Importing dataset

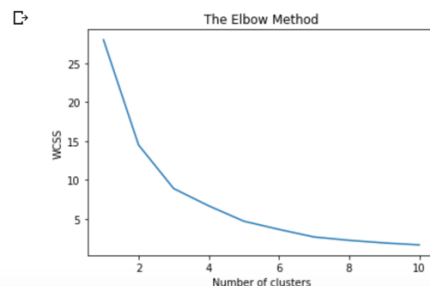
```
dataset = pd.read_excel('ClusteringLatLong.xlsx')

X = dataset.iloc[:, [5,6]].values

print(X)
```

```
[[38.772344 -6.2654]
 [38.724397 -6.8171]
 [38.858831 -6.4669]
 [39.209828 -7.1518]
 [38.869843 -6.6475]
 [38.913389 -6.769]
 [39.178608 -7.6307]
 [38.733881 -6.5305]
 [38.895672 -6.546]]
```

```
from sklearn.cluster import KMeans
wcss = []
for i in range(1, 11):
    kmeans = KMeans(n_clusters = i, init = 'k-means++', random_state = 42)
    kmeans.fit(X)
    wcss.append(kmeans.inertia_)
plt.plot(range(1, 11), wcss)
plt.title('The Elbow Method')
plt.xlabel('Number of clusters')
plt.ylabel('WCSS')
plt.show()
```



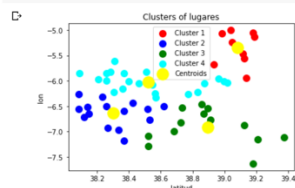
Training el modelo:

```
[ ] kmeans = KMeans(n_clusters = 4, init = 'k-means++', random_state = 42)
y_kmeans = kmeans.fit_predict(X)
```

```
[ ] print(y_kmeans)
```

```
[3 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 2 3 3 0 0 0 3 0 0 3 0 0 0 3 3 1 3 3 3 1 3 3 3 3 3
 3 3 2 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 3 2 3 3 0 2]
```

```
plt.scatter(X[y_kmeans == 0, 0], X[y_kmeans == 0, 1], s = 100, c = 'red', label = 'Cluster 1')
plt.scatter(X[y_kmeans == 1, 0], X[y_kmeans == 1, 1], s = 100, c = 'blue', label = 'Cluster 2')
plt.scatter(X[y_kmeans == 2, 0], X[y_kmeans == 2, 1], s = 100, c = 'green', label = 'Cluster 3')
plt.scatter(X[y_kmeans == 3, 0], X[y_kmeans == 3, 1], s = 100, c = 'cyan', label = 'Cluster 4')
plt.scatter(kmeans.cluster_centers_[0, 0], kmeans.cluster_centers_[0, 1], s = 300, c = 'yellow', label = 'Centroids')
plt.title('Clusters of lugares')
plt.xlabel('latitud')
plt.ylabel('lon')
plt.legend()
plt.show()
```




```
[ ] print(kmeans.cluster_centers_)  
[[39.08341744 -5.35075333]  
 [38.29955413 -6.63084667]  
 [38.89383679 -6.91272071]  
 [38.52122214 -6.02143333]]
```