



Mejora del Servicio de Agricultura de Precisión mediante el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados

Trabajo Final de la carrera de Ingeniería
Industrial

Brizuela, Ruy P.

Sala, Santiago

Departamento de Ingeniería Industrial

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Mar del Plata

Mar del Plata - 22 de Septiembre de 2017



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Mejora del Servicio de Agricultura de Precisión mediante el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados

Trabajo Final de la carrera de Ingeniería
Industrial

Brizuela, Ruy P.

Sala, Santiago

Departamento de Ingeniería Industrial

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Mar del Plata

Mar del Plata - 22 de Septiembre de 2017

Mejora del Servicio de Agricultura de Precisión mediante el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados

Autores: Ruy Patricio Brizuela
Santiago Sala

Director: Ing. Verónica Mortara
Departamento de Ingeniería Industrial
Facultad de Ingeniería, UNMDP.

Co-Director: Lic. Juan Carlos García
Departamento de Ingeniería Industrial
Facultad de Ingeniería, UNMDP.

Evaluable: Ing. Alejandra María Esteban
Departamento de Ingeniería Industrial
Facultad de Ingeniería, UNMDP.

Mg. Ing. Adolfo Eduardo Onaine
Departamento de Ingeniería Industrial
Facultad de Ingeniería, UNMDP.

ÍNDICE

ÍNDICE	III
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
TABLA DE SIGLAS	IX
RESUMEN	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Agricultura de precisión:.....	5
2.2. Índice verde:	5
2.3. Vehículo Aéreo No Tripulado	5
2.4. Legislación vigente.....	6
2.5. Programación Lineal General.....	6
2.5.1. Supuestos básicos de un modelo de Programación Lineal	6
2.5.2. Características de un modelo de Programación Lineal General.....	6
2.5.3. Resolución de problemas: Método Simplex	7
2.6. Programación Lineal Entera.....	8
2.7. Algoritmo <i>Branch and Bound</i>	8
2.8. Agente viajero	9
2.9. Macro.....	10
2.10. El proceso de servicio:	10
2.10.1. Contacto con el cliente.....	11
2.10.2. Incertidumbre aportada por el cliente.....	13
2.10.3. Paquete servicio-producto	13
2.10.4. Recupero y garantía del servicio.....	14
2.10.5. Matriz de servicios	15
2.11. Análisis FODA.....	16
2.12. Método del Proceso Analítico de Jerarquías	18
2.12.1 Pasos del Proceso analítico de jerarquías	18
2.12.2 Estructura jerárquica.....	19
2.12.3 Consistencia	20
3. DESARROLLO.....	23
3.1. Agricultura de precisión como servicio	23
3.1.1 Dimensiones de contacto con el cliente	24
3.1.2. Momentos de la verdad	25
3.1.3. Incertidumbre.....	26

3.1.4. Paquete servicio-producto	26
3.1.5. Recupero y garantías del servicio	26
3.1.6. Empleados.....	27
3.1.7. Matriz de servicios	27
3.2. Diagnóstico de la situación actual	27
3.2.1. Análisis FODA	27
3.2.2. Estrategias a partir del FODA	30
3.3. Ruta Óptima.....	31
3.3.1. Definición.....	31
3.3.2. Método de Obtención de la Ruta Óptima	32
3.3.3. Entorno de Desarrollo del Sistema Informático.	32
3.3.4. Código Fuente	32
3.3.5. Parámetros de Entrada.....	32
3.3.6. Resolución del Sistema Actual.....	34
3.4. Parámetros para la selección de equipos.....	36
3.5. Oferta de Vehículos Aéreos No Tripulados en el mercado	37
3.5.1. Equipos a considerar en la selección	37
3.5.1.I. Cámara Multiespectral Parrot SEQUOIA	37
3.6. Selección de Vehículos Aéreos No tripulados – Proceso Analítico de Jerarquías	38
3.6.1. Proceso analítico de jerarquías – criterios a analizar	39
3.7. Dispositivos elegidos.....	42
3.7.1. Vehículos Aéreos no Tripulados	42
3.8. Modelo de Programación Lineal.....	44
3.8.I. Función Objetivo.....	44
3.8.2. Restricciones Estructurales.....	45
3.8.2.I. Volumen	45
3.8.3. Modelo matemático de Programación Lineal	49
3.8.4. Solución Óptima	50
3.9. Descripción del nuevo servicio	50
3.9.1. Dimensiones de contacto con el cliente	51
3.9.2. Momentos de la verdad	52
3.9.3. Incertidumbre.....	52
3.9.4. Paquete servicio-producto	52
3.10. Aplicación del servicio	54
3.10.1. Inversión inicial	54

3.10.2. Volumen del mix	54
3.10.3. Abastecimiento de energía	54
3.10.4. Personal a cargo de la nueva tarea	56
3.11. Utilización de software	57
3.11.1. Determinación de rutas	57
3.11.2. Selección de clientes	58
3.11.3. Eliminar clientes de los campos seleccionados.....	58
3.11.4. Cálculo del sistema y presentación de resultados.....	58
3.11.5. Ingreso de nuevos datos.....	60
4. CONCLUSIÓN	62
5. BIBLIOGRAFÍA	63
6. ANEXOS	65
6. I. Códigos fuente del sistema informático.....	65
6. II. Distancia entre campos.....	81
6. III. Proceso Analítico de Jerarquías.....	86
6. IV. Programación Lineal General	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala de las comparaciones pareadas para las preferencias en el PAJ.....	19
Tabla 2. Tabla de Índice de consistencia aleatoria.	22
Tabla 3. Análisis FODA.	28
Tabla 4. Parámetros de Entrada Puntos 1 a 50.	33
Tabla 5. Código y Nombre de Establecimientos.	34
Tabla 6. Ruta Óptima.	35
Tabla 7. Categorías de VANTs según su peso.	36
Tabla 8. Prioridades para los criterios.	41
Tabla 9. Resultados análisis de consistencia.	41
Tabla 10. Tiempo entre fotografías en función de su velocidad a 120 m de altura.....	47
Tabla 11. Overlap en función a la distancia entre imágenes.....	47
Tabla 12. Cálculo de hectárea por hora volado por los VANTs.....	48
Tabla 13. Cálculo de hectárea por hora efectiva por los VANTs.....	49
Tabla 14. Horas de vuelo netas posibles con las baterías cargadas.....	55
Tabla II.1. Distancia entre Nodos 1-25 a 1-25.	82
Tabla II.2. Distancia entre Nodos 26-50 a 1-25.	83
Tabla II.3. Distancia entre Nodos 1-25 a 26-50.	84
Tabla II.4. Distancia entre Nodos 26-50 a 26-50.....	85
Tabla III.1. Características de los VANTs.	86
Tabla III.2. Datos a utilizar en análisis de decisión por jerarquías.....	87
Tabla III.3. Jerarquía de las alternativas.....	88
Tabla III.4. Comparación entre criterios.....	89
Tabla III.5. Matriz normalizada de comparación entre criterios.....	89
Tabla III.6. Relación de consistencia entre criterios.....	90
Tabla III.7. Comparación pareada en función de la Velocidad.....	91
Tabla III.8. Matriz normalizada del criterio velocidad.	92
Tabla III.9. Relación de consistencia del criterio velocidad.	92
Tabla III.10. Comparación pareada en función del volumen.....	93
Tabla III.11. Matriz normalizada del criterio volumen.....	94
Tabla III.12. Relación de consistencia del criterio volumen.....	94
Tabla III.13. Comparación pareada en función de la autonomía.....	95
Tabla III.14. Matriz normalizada del criterio autonomía.....	96
Tabla III.15. Relación de consistencia del criterio autonomía.	96
Tabla III.16. Comparación pareada en función del precio.....	97
Tabla III.17. Matriz normalizada del criterio precio.....	98
Tabla III.18. Relación de consistencia del criterio precio.	98

Tabla IV.1. Parámetros de entrada Programación lineal.....	99
Tabla IV.2. Solución óptima PLG.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Organigrama de la Empresa de Referencia.....	2
Figura 2. Establecimientos Sudeste de Buenos Aires.....	4
Figura 3. Modelo de agente viajero.	9
Figura 4. Matriz de servicios.....	15
Figura 5. Tabla ejemplo de análisis FODA.	17
Figura 6. Árbol de Jerarquías.	18
Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de servicio.	23
Figura 8. Parrot SEQUOIA.	38
Figura 9. Árbol de Jerarquías.	40
Figura 10. Jerarquización global de VANTs.....	42
Figura 11. DJI Inspire 2.	43
Figura 12. Ebee SQ.....	43
Figura 13. Parrot Disco PRO AG.....	44
Figura 14. Ecuación de tiempo entre imágenes en función de la velocidad.	47
Figura 15. Overlap en función a los metros recorridos por fotografía tomada.	48
Figura 16. Diagrama de flujo del servicio con el sistema de VANTs.	50
Figura 17. Display del programa para el cálculo del TSP.	58
Figura 18. Presentación de recorridos.....	59
Figura 19. Presentación de recorridos con distancia total a recorrer.	60

TABLA DE SIGLAS

ANAC: Administración Nacional de Aviación Civil

FADA: Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina.

FCAGR: Facultad de Ciencias Agrarias de Rosario.

FODA: Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas.

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (sigla del inglés *National Aeronautics and Space Administration*).

PAJ: Proceso Analítico de Jerarquías.

PLG: Programación Lineal General.

PLE: Programación Lineal Entera.

TSP: Problema del Agente Viajero (sigla del inglés *Traveling Salesman Problem*).

VANT: Vehículo Aéreo no Tripulado.

RESUMEN

El presente trabajo estudia la mejora del sistema de producción de un servicio de agricultura de precisión, en una empresa localizada en la ciudad de Tandil. El servicio es generado a través de un sistema de imágenes satelitales, obtenidas de proveedores internacionales, en periodos de 15 días. La problemática actual radica en que estas imágenes pueden no ser utilizables debido a factores climáticos, como la nubosidad, que alteran su calidad. Debiendo entonces la empresa aguardar otro periodo para obtener la misma. El objetivo de este trabajo es proponer la utilización de un sistema de vehículos aéreos no tripulados (VANTs), como tecnología alternativa y complementaria a los satélites. Ya que estos pueden ser utilizados en el momento que la empresa lo desee y en alturas inferiores a los sistemas nubosos, obteniendo imágenes de alta calidad. Para esto se analiza la situación actual de la empresa en general y de la producción del servicio en particular. Luego a través de herramientas de investigación operativa se desarrolla un sistema informático que automatiza el cálculo de la ruta óptima de recorrido de la cartera de clientes, minimizando los tiempos de producción de servicio. A su vez, mediante un Proceso Analítico de Jerarquías y una programación lineal, se determina la conformación óptima, en cuanto a cantidad y modelos, del sistema de VANTs, en función de las características requeridas y el costo mínimo de adquisición. Finalmente se describen y analizan las condiciones necesarias para aplicar el nuevo sistema en la producción del servicio.

1. INTRODUCCIÓN

El sector agrícola argentino representa aproximadamente el 9% del Producto Bruto Interno (PBI) tomando en cuenta la agricultura, la pesca y la ganadería. Este valor es muy elevado con respecto a otros países de América Latina, lo que indica la gran importancia que tiene esta actividad en la economía nacional. (Fundación Agropecuaria para el Desarrollo Argentino, 2016)

Argentina se destaca por la enorme variabilidad en las condiciones climáticas, situación que propicia la existencia de gran variedad en los tipos de cultivos. La región pampeana cuenta con producción de trigo, maíz, avena y soja, debido a su clima templado, con suelos fértiles y lluvias suficientes para el desarrollo de la siembra. La región Mesopotámica, que presenta un clima cálido y con abundantes lluvias se especializa en el cultivo de productos como arroz, té y yerba mate. La región Andina con sus climas áridos basa su producción principalmente en vid y olivo.

Las tecnologías emergentes permiten disponer de más recursos para optimizar y aumentar la producción agrícola. Este fenómeno puede apreciarse en el servicio de agricultura de precisión, cuyo objetivo principal es aumentar significativamente la eficiencia en la producción agrícola. Para estudiar este fenómeno, nos centramos en una PYME (Pequeña Y Mediana Empresa) que está radicada en la ciudad de Tandil, provincia de Buenos Aires. La misma se dedica al desarrollo de AGRICULTURA DE PRECISION para la producción agrícola. El grueso de su cartera de clientes se ubica mayoritariamente en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. Siguiéndole en importancia las provincias de Córdoba y Santa Fe. Esto convierte a la empresa en una de las más importantes a nivel nacional en el rubro de la agricultura de precisión. También cuenta con una gran cantidad de clientes en la República Oriental del Uruguay, y algunos en el resto del mundo, en países como Estados Unidos, Francia, Polonia y China.

En la Figura 1 se presenta un organigrama de la compañía:

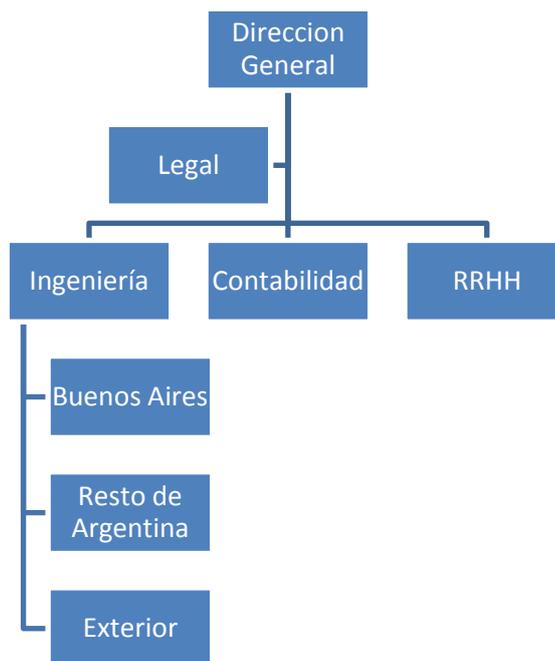


Figura 1: Organigrama de la Empresa de Referencia.
Fuente: Elaboración Propia.

La compañía cuenta con el dueño como director general, que es el encargado del contacto con el cliente y las reuniones preliminares donde se acuerda el trabajo a realizar. Este se encarga de la aprobación de los trabajos y de los informes finales a entregar y presentar a los clientes.

El área de recursos humanos está compuesta por una persona a cargo de todas las tareas inherentes a los empleados de la compañía. Entre ellas se pueden destacar el alta y baja de personal.

Contabilidad se encarga de las finanzas de la empresa y está compuesto por una persona. En esta área se destacan las tareas de pagos, realización del flujo de caja de la compañía, facturación y seguimiento de los clientes a la hora de recibir los pagos.

El área legal se encuentra a cargo de un abogado que trabaja de forma externa a la empresa.

El área de Ingeniería está departamentalizada geográficamente según la ubicación del cliente. Se divide en provincia de Buenos Aires, resto del país y exterior. Se dispone de un ingeniero agrónomo por zona y tiene a cargo los trabajos de obtención y procesamiento de imágenes en función de la ubicación geográfica del cliente. Las áreas se dividen en provincia de Buenos Aires, resto de Argentina y resto del mundo. Cabe aclarar que esta

división es flexible, por lo que existe colaboración entre el personal de las distintas áreas de ingeniería en el caso de que sea necesario.

El objetivo de la empresa es asistir al cliente en las tareas que requieren implementación de procesos de agricultura de precisión. El servicio principal de la compañía es la realización de mapas de productividad, para poder utilizar los recursos que se disponen para la producción agropecuaria de la forma más eficiente posible. Entre los servicios se encuentran las mensuras de precisión, donde el productor agropecuario puede realizar mensuras topográficas de alta calidad. Entre estos se tiene como principal herramienta el análisis de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o Índice Verde. Para este servicio se utilizan imágenes satelitales que permiten delimitar, medir y ubicar los establecimientos y equipos de forma precisa y rápida. También mediante imágenes satelitales (kit – geográfico) se puede acceder al historial en cada zona del planeta. De esta forma se pueden realizar estudios geo – estadísticos para obtener mapas de productividad, mapas de riesgo hídrico, mapas de heladas, entre otros. Estos resultados permiten optimizar la toma de decisiones en la producción. También se toman muestras de suelo a sitios específicos, donde se obtienen resultados de la calidad del mismo y poder identificar las zonas de alta, media y baja productividad. Por otra parte también se realiza prescripción de insumos, auditorias de aplicaciones variables y fijas, así como ensayos para evaluar diferentes insumos. Otros trabajos realizados son el monitoreo de rendimiento, la geo - estadística, la clasificación regional de usos de suelo y el análisis económico al brindar los servicios anteriormente mencionados.

Actualmente la empresa obtiene las fotografías de forma gratuita de un satélite de la NASA. A través de éste la empresa recibe una imagen satelital cada 15 días. Aquellos días en que existe un elevado índice de nubosidad en los campos en cuestión, la imagen no es útil para realizar el análisis de índice verde. El sistema a implementar deberá sustituir la imagen satelital, con una propia generada dentro del rango de esos 15 días. El análisis se realizara enfocado como sistema sustituto, al de imágenes satelitales que se utiliza actualmente.

Este trabajo se centra en la puesta en marcha de un sistema de VANTs para la generación de imágenes de índice verde, la principal herramienta de la empresa. Se tendrán también en cuenta los tiempos necesarios para acceder a los campos por parte del operador de los VANTs por vía terrestre y a su vez se determinan las características de los equipos a utilizar (velocidad de vuelo, costo, autonomía, cantidad.) que minimice los costos de aplicación. De acuerdo a los requerimientos de la empresa el análisis se enfocará, únicamente en los establecimientos ubicados en el sudeste de la provincia de Buenos Aires.

Esto se debe a la necesidad de atender eficazmente la demanda en el área, donde se concentra la mayor cantidad de clientes, así como también un aprovechamiento de la ubicación estratégica de las oficinas de la empresa en la ciudad de Tandil.

En la Figura 2, se presenta un mapa con las ubicaciones de los establecimientos en la provincia de Buenos Aires.

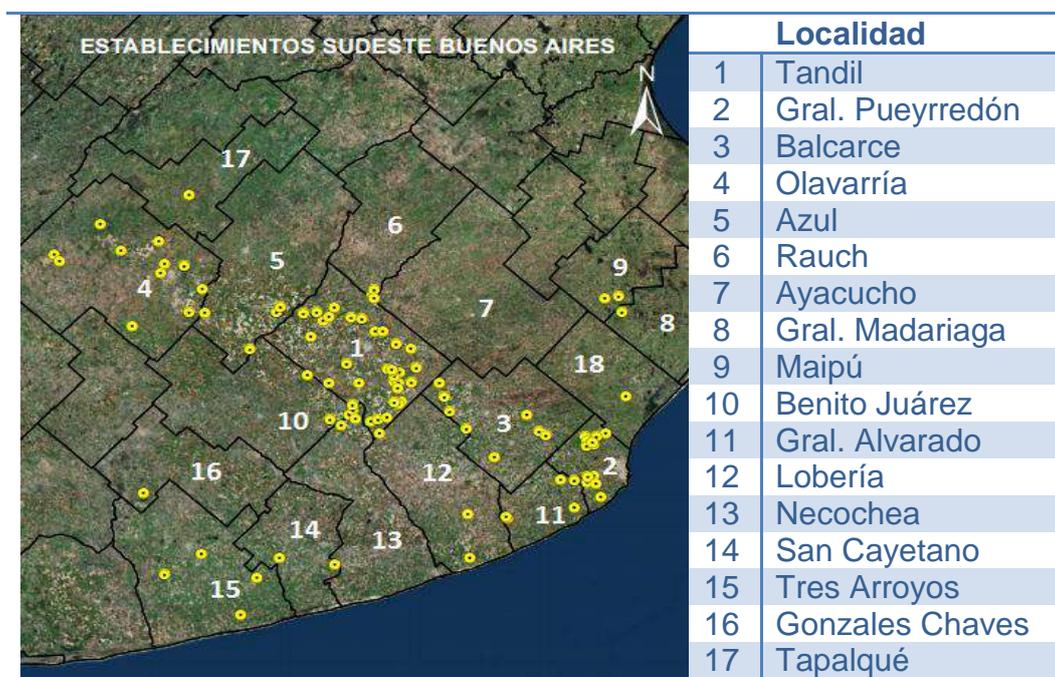


Figura 2. Establecimientos Sudeste de Buenos Aires.
Fuente: Empresa de referencia.

Una vez obtenida una solución para el modelo propuesto se procederá a analizar las condiciones actuales de la empresa y las acciones necesarias a llevarse a cabo, para implementar el servicio dentro de la estructura actual.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Agricultura de precisión:

La Agricultura de Precisión (AP) es un concepto agronómico de gestión de parcelas agrícolas, basado en la existencia de variabilidad en campo. Requiere el uso de las tecnologías de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores, satélites e imágenes aéreas junto con Sistemas de Información Geográfico (SIG) para estimar, evaluar y entender dichas variaciones. La información recolectada puede ser usada para evaluar con mayor precisión la densidad óptima de siembra, estimar fertilizantes y otras entradas necesarias, y predecir con más exactitud la producción de los cultivos. (FCAGR, 2015)

2.2. Índice verde:

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, también llamado **Índice Verde**, es derivado de información captada por sensores remotos, y está asociado a la fracción de la radiación solar absorbida por las plantas. Por este motivo, existe una fuerte relación del índice verde con algunas características de la vegetación como puede ser la biomasa, el índice de área foliar (área de las hojas de un cultivo sobre el área de suelo sobre el cual se encuentra establecido) o la productividad, entre otras. Conocer dichas variables en el tiempo y para los distintos lotes o potreros permite, por ejemplo, estimar la oferta forrajera, definir la carga animal óptima y planificar otras prácticas de manejo en los sistemas ganaderos; o predecir el rendimiento de los cultivos, asignar diferencialmente los recursos y comparar la campaña actual con anteriores en los sistemas agrícolas. (INTA, 2017)

2.3. Vehículo Aéreo No Tripulado

Un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) es una aeronave que no cuenta con tripulación humana y puede ser totalmente autónomo u operado por control remoto, esta definición es una adaptación del sustantivo inglés DRONE, que literalmente traduce “zángano”. Otra denominación posible es *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV),

A pesar de sus posibles similitudes estructurales, un UAV no es un aeromodelo, puesto que su uso no está relacionado con dicha actividad deportiva. Mientras que el aeromodelo es un objeto de diversión —controlado remotamente y de vuelo restringido técnica y legalmente—, el VANT fue concebido con fines militares y posteriormente ha tenido aplicaciones comerciales. (Superintendencia de Industria y Comercio, 2015)

2.4. Legislación vigente

La operación de este tipo de sistemas está regida por el reglamento Provisional de los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANTs) dentro de la Resolución 527/2015 emitida por la Administración Nacional de Aviación Civil. (ANAC, 2015)

2.5. Programación Lineal General

La *Programación Lineal General* pertenece al campo de la optimización matemática. Puede ser usada para resolver una extensa variedad de problemas propios de los negocios, ya sea para maximizar beneficios o para minimizar costos. En cada caso, la solución óptima nos explica cómo podrían ser asignados los recursos para obtener un objetivo establecido. (Anderson, 2011)

2.5.1. Supuestos básicos de un modelo de Programación Lineal

- Certeza, significa que se conocen los valores numéricos en el objetivo y restricciones y no cambian durante el periodo que se está estudiando
- Proporcionalidad significa que el aporte a la función objetivo y la cantidad de recursos que se utilizan son proporcionales al valor de cada variable decisional.
- Aditividad significa que es posible encontrar el valor de la función objetivo y el total de los recursos sumando la contribución de la función objetivo y los recursos que se utilizan, para todas las variables de decisión.
- Divisibilidad, es decir que las variables deben ser divisibles a cualquier nivel fraccionario
- Optimalidad, significa que la solución óptima siempre ocurre en uno de los vértices del conjunto de soluciones factibles

2.5.2. Características de un modelo de Programación Lineal General

Un modelo de programación lineal es un modelo de programación matemática en el cual, la función a optimizar (maximizar o minimizar) es lineal, y cuyas variables (no negativas) están sujetas a un conjunto de restricciones lineales, expresadas como desigualdades del tipo \geq , \leq o igualdades.

- Una función objetivo lineal a maximizar o minimizar
- Un conjunto de restricciones lineales
- Variables restringidas a valores no negativos

A continuación se presenta el modelo matemático de PLG en forma canónica.

$$\text{F.O. (max)} = \sum_j^n C_j \cdot X_j$$

sujeto a

$$a_{i1} \cdot X_1 + \dots + a_{ij} \cdot X_j + \dots + a_{in} \cdot X_n \leq b_i$$

$$X_j \geq 0$$

con: $i=1\dots m$ y $j=1\dots n$

Dónde:

$$\text{F.O. (min)} = \sum_j^n C_j \cdot X_j$$

sujeto a

$$a_{i1} \cdot X_1 + \dots + a_{ij} \cdot X_j + \dots + a_{in} \cdot X_n \leq b_i$$

$$X_j \geq 0$$

con: $i=1\dots m$ y $j=1\dots n$

X_j son variables de decisión del modelo

C_j son parámetros que preceden a las variables en la función objetivo y por lo general representan beneficios, ingresos o costos unitarios.

a_{ij} son parámetros que representan coeficientes técnicos en las restricciones.

b_i son los términos independientes de las restricciones. Estos parámetros generalmente representan disponibilidades de insumos o requerimientos necesarios.

2.5.3. Resolución de problemas: Método Simplex

Resolver un problema de PLG significa encontrar un conjunto de valores para las variables de decisión que cumpliendo con todas las restricciones, incluidas las de no negatividad, optimicen a la función objetivo. Si el problema tiene solo dos variables de decisión se puede resolver utilizando un procedimiento gráfico de solución. Sin embargo, la mayoría de los problemas de programación lineal son demasiado grandes como para solucionarlos en forma gráfica, y, por ello, se utiliza un procedimiento algebraico. El método algebraico de mayor difusión para resolver problemas de PLG es el denominado método simplex.

Este método, desarrollado por George Dantzig en 1947, permite encontrar la solución óptima de cualquier programa lineal, cualquiera sea el número de variables y ecuaciones que lo forman, e identificar aquellos problemas que no tienen solución, o cuya solución no es acotada.

El algoritmo parte de una solución básica inicial, y a través de sucesivas iteraciones, explora sistemáticamente los vértices del poliedro de soluciones del Problema lineal hasta identificar la solución óptima. (Alberto & Carignano, 2013)

2.6. Programación Lineal Entera

La Programación Lineal Entera (PLE), se refiere a modelos que pueden ser formulados y resueltos como modelos de Programación Lineal General, con la condición de que algunas o todas sus variables tienen que asumir valores enteros.

Uno de los supuestos de los modelos de PLG es la divisibilidad, es decir que las variables pueden asumir valores fraccionarios. En el mundo real, frecuentemente nos encontramos con problemas en los cuales las variables deben ser enteras. En tal caso, se llegará a un valor objetivo óptimo menor (en caso de maximización) al del problema que acepta soluciones continuas, salvo algún caso en particular en el cual la solución óptima resulta entera.

Resumiendo, podemos decir que el modelo de Programación Entera es un modelo de Programación Lineal donde las variables deben asumir valores enteros. Si solo es necesario que algunas variables sean enteras, se trata de un problema de programación entera mixta.

La resolución de este problema se obtiene analizando las posibles alternativas de valores enteros de esas variables en un entorno alrededor de la solución obtenida considerando las variables reales. Muchas veces la solución del programa lineal truncado está lejos de ser el óptimo entero, por lo que se hace necesario usar algún algoritmo para hallar esta solución de forma exacta. El más utilizado es el método de 'Ramificar y Acotar' o *Branch and Bound* por su nombre en inglés. (Alberto & Carignano, 2013)

2.7. Algoritmo *Branch and Bound*

El algoritmo *branch and bound* considera el conjunto de todos los circuitos y los descompone en subconjuntos cada vez más pequeños. Se calcula para cada uno de ellos la cota inferior y el costo o distancia del circuito óptimo. Las cotas guían la partición de subconjuntos y eventualmente se identifican con el circuito óptimo. Cuando el subconjunto contiene una etapa única cuyo costo es menor o igual al de las cotas inferiores, se obtiene el circuito óptimo. Los subconjuntos se representan como nodos de una arborescencia y el proceso de partición como una ramificación de la misma. (Valiente, 2003).

2.8. Agente viajero

El problema del agente viajero tiene como objetivo encontrar un recorrido completo que conecte todos los “n” nodos de una red, visitándolos tan solo una vez y volviendo al punto de partida, y que además minimice la distancia total de la ruta.

Se aplica este método en el ámbito de la logística y distribución, así como en la programación de curvas de producción, programación de tareas de máquinas, fabricación de microchips, control de semáforos, optimización de rutas en el problema de enrutamiento de vehículos, entre otros.

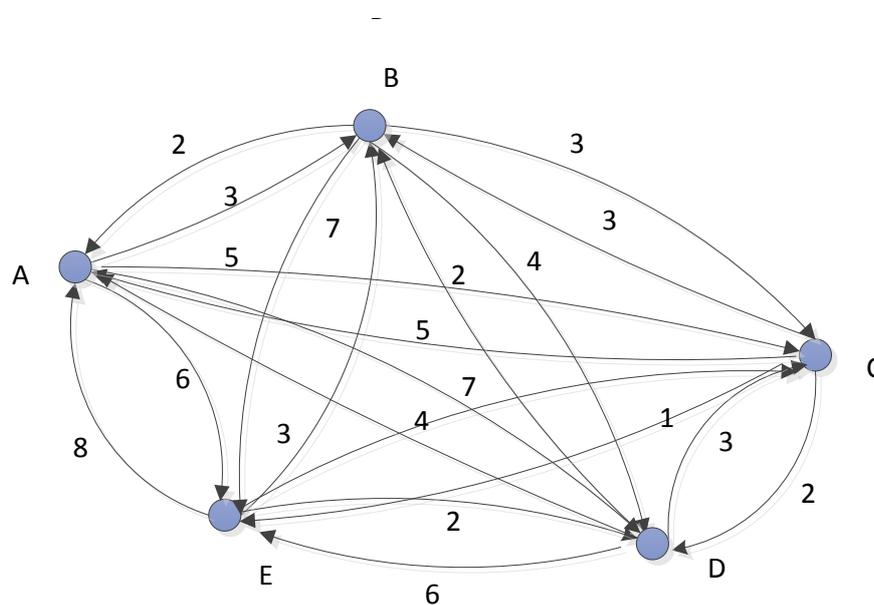


Figura 3. Modelo de agente viajero.
Fuente: Valiente, 2003.

El proceso elemental para encontrar la solución óptima es realizar la enumeración completa de todas las soluciones y de ellas elegir las que cumplen las restricciones (las que son factibles) y luego hallar el costo asociado a cada una de ellas y optar por las mejores soluciones según el óptimo buscado.

Una solución trivial es uno de los $(n-1)!$ circuitos posibles, pues se supone que la matriz es asimétrica, uno o más debe tener valuación mínima.

Esta valuación mínima debe conservarse finita, ya que convencionalmente se considera que una etapa tiene costo infinito si no se conectan los nodos en forma directa o la etapa que tiene como origen y destino el mismo nodo. (Valiente, 2003).

El modelo matemático se define de la siguiente forma

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si se llega del nodo } i \text{ al nodo } j \\ 0, & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Si d_{ij} es la distancia del nodo i al nodo j , el modelo del agente viajero es el siguiente:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} X_{ij}, \quad d_{ij} = q \text{ para } i = j$$

Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, \quad i=1,2,\dots, n \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j=1,2,\dots, n \quad (2)$$

$$X_{ij} = (0,1) \quad (3)$$

$$\text{La solución forma un circuito (4)}$$

Las restricciones (1), (2) y (3) definen un modelo regular de asignación. En general, el problema de asignación producirá soluciones de subcircuito, más que un circuito completo que abarque todas los n nodos. Si las asignaciones forman una solución de circuito, el circuito es óptimo. En caso contrario se agregan más restricciones al modelo de asignación para eliminar los subcircuitos. (Taha, 2003).

2.9. Macro

Una macro es una acción o un conjunto de acciones que se puede ejecutar todas las veces que desee, con el fin de automatizar tareas repetitivas.

Es un conjunto de comandos que se almacena en un lugar especial de Excel de manera que están siempre disponibles para ejecutarse.

Las macros se escriben en un lenguaje de computadora especial que es conocido como Visual Basic for Applications (VBA). Este lenguaje permite acceder a prácticamente todas las funcionalidades de Excel y con ello también ampliar la funcionalidad del programa. (Micorsoft, 2017)

2.10. El proceso de servicio:

Un servicio es un acto o desempeño que ofrece una parte a otra. Los servicios son actividades económicas que crean valor y proporcionan beneficios a los clientes en tiempos y lugares específicos como resultado de producir un cambio deseado en el receptor del servicio (o a favor de él).

“Es importante distinguir entre los procesos de servicios que corresponden a las oficinas del frente y los que pertenecen a las oficinas del fondo. Los procesos que requieren de la presencia o de la interacción con el consumidor son procesos de servicios de la oficina del frente, mientras que aquellos que no implican la presencia del cliente son procesos de la oficina del fondo; por lo tanto, la importancia de una producción y un consumo simultáneos se aplica a los servicios de la oficina del frente porque el cliente está participando en el proceso.” (Schroeder, 2011).

El proceso de servicio implica el uso de recursos para obtener y brindar el servicio al cliente. Se trata de la selección y gestión de los recursos humanos, equipo, servicios subcontratados, materiales, flujos de trabajo y métodos que transformarán los insumos y recursos en un producto o servicio. Una de las primeras decisiones que toma un gerente para diseñar un proceso que funcione bien es elegir el tipo de proceso que realiza mejor la importancia relativa de la calidad, tiempo, flexibilidad y costo de dicho proceso. (Krajewsky, 2008).

Para la representación del proceso de servicio se utiliza un diagrama de flujo del proceso. El mismo se refiere a la creación de un diagrama visual para describir un proceso de transformación. Este tipo de documentación visual puede ayudar a identificar la manera en la que puede mejorarse el proceso de transformación cambiando alguno o la totalidad de los elementos utilizados.

Para el diseño de los diagramas de flujo se utilizan símbolos que representan Procesos, toma de decisión y evaluación, flujo y finalización del proceso de servicio. (Schroeder, 2011).

2.10.1. Contacto con el cliente

“El contacto con el cliente es la medida en que el cliente está presente, participa activamente y recibe atención personal durante el proceso de servicio.” El cliente puede ser parte significativa del propio proceso. El concepto de procesos anidados aplica al contacto con el cliente, porque algunas partes de un proceso pueden requerir poco contacto y otras mucho. Incluso un subproceso puede tener un nivel alto de contacto en algunas dimensiones y bajo en otras. El contacto con el cliente puede determinarse también mediante los *Momentos de la verdad*. Este concepto hace referencia a las interacciones de la compañía con el cliente, donde este último puede percibir el servicio que se le está brindando, intervenir en el proceso y comprobar la calidad del servicio. El grado de contacto

con el cliente se puede medir analizando cinco dimensiones en forma conjunta, según se detallan en el siguiente apartado. (Krajewsky, 2008).

2.10.1.I. Dimensiones de contacto con el cliente

- **Presencia física:** Hace referencia a si el cliente está físicamente presente durante el proceso. La cantidad de contacto puede definirse como el porcentaje del tiempo que el cliente está en el proceso en relación al tiempo total del proceso.
- **Que se procesa:** Los servicios que involucran gente en el proceso son aquellos que se proporcionan a la persona y no para la persona, y por lo tanto requieren la presencia física. Los clientes se convierten en parte del proceso, por lo que la producción y el consumo del servicio se realizan de modo simultáneo. Por otra parte los servicios que procesan posesiones se tratan se acciones sobre objetos físicos que proporcionan valor al cliente. El objeto debe estar presente durante el procesamiento pero no el cliente. De esta forma el servicio se consume después de que se termina el proceso.
- **Intensidad de contacto:** Es el grado en el cual el proceso da cabida al cliente e implica un nivel considerable de interacción y personalización del servicio. El contacto activo significa que el cliente participa en gran medida en la creación del servicio y afecta el propio proceso del servicio. El cliente puede personalizar el servicio para ajustarlo a sus necesidades específicas e incluso decidir en parte como se realizará el proceso. En general el contacto activo implica que el proceso es visible para el cliente. El contacto pasivo significa que el cliente no interviene en la adaptación del proceso para satisfacer necesidades especiales o en cómo se realiza el proceso.
- **Atención personal:** Implica un contacto más íntimo entre el proveedor del servicio y el cliente, así como también un intercambio más rico de información. Por otra parte el contacto impersonal es un proceso menos íntimo con menos intercambio entre las partes.
- **Método de entrega:** En un proceso de alto contacto se utilizan canales de entrega de tipo cara a cara o por teléfono, lo que garantiza más claridad en la identificación de necesidades del cliente y la entrega del servicio. En un proceso de bajo contacto se utilizan medios más impersonales y estandarizados.

2.10.2. Incertidumbre aportada por el cliente

Altos niveles de contacto con el cliente pueden introducir variabilidad dentro de un proceso. La variabilidad dificulta la planeación de la capacidad y puede dar como resultado líneas de espera. La variabilidad dentro del proceso es el resultado de la incertidumbre introducida por los clientes, la cual se manifiesta en muchas formas. (Schroeder, 2011)

Según Frei (2006) la variabilidad introducida por el cliente se puede clasificar de la siguiente manera:

- **Variabilidad en cuanto a la llegada:** incertidumbre en relación con el momento en el que los clientes llegarán para consumir un servicio.
- **Variabilidad en cuanto a la solicitud:** incertidumbre en relación con lo que los clientes pedirán en el paquete de servicio-producto.
- **Variabilidad en cuanto a la capacidad:** incertidumbre en relación con la capacidad de los clientes para participar en un servicio.
- **Variabilidad en cuanto al esfuerzo:** incertidumbre en relación con la disposición de los clientes para ejecutar las acciones apropiadas.
- **Variabilidad en cuanto a preferencias subjetivas:** incertidumbre en relación con las preferencias intangibles de los clientes en cuanto a cómo se lleva a cabo el servicio.

2.10.3. Paquete servicio-producto

El paquete servicio-producto consta de tres elementos (Schroeder, 2011):

- El servicio tangible (servicio explícito): Se trata del servicio que el cliente espera obtener cuando decide contratarlo. Este elemento se trata del servicio sensorial, aquel que el cliente percibe con sus cinco sentidos.
- Los beneficios intangibles o psicológicos del servicio (servicio implícito): Son las sensaciones que se generan en el cliente a partir del entorno y la interacción con el mismo.
- Los bienes físicos (la expedición de bienes): Son los bienes involucrados en los procesos de servicios.

2.10.4. Recupero y garantía del servicio

El recupero de servicio hace referencia a la corrección de un problema que afecta la calidad del servicio brindado al cliente.

Un servicio efectivo de recuperación de clientes descontentos requiere buenos procedimientos para resolver los problemas y tratar a los clientes insatisfechos. Es crucial para las empresas tener estrategias efectivas de recuperación, ya que un único problema de servicio puede destruir la confianza de un cliente, sobre todo cuando se dan en los siguientes tres casos.

- La falla es importante (por ejemplo, una actitud descarada y deshonesta por parte del proveedor)
- El problema concuerda con un patrón de comportamiento común en la compañía y no con un incidente aislado.
- Los intentos de recuperación son débiles, pretendiendo camuflar el problema original en vez de tratar de corregirlo.

La garantía de servicio es una herramienta que muchas compañías utilizan para contrarrestar las inconformidades de los clientes. Se basa en que el cliente tiene un derecho a recibir una o más formas de compensación, ya sea el reembolso, el cambio o el abono en cuenta. Las compañías deben comunicar a sus clientes de la existencia de las garantías antes de que el mismo contrate el servicio, para que de esta forma el cliente sepa que puede acudir a ella en caso de ser necesario. (Lovelock, 2004)

Según Hart (1990) las razones por las que las garantías son muy importantes para brindar un servicio de calidad son las siguientes:

- Las garantías obligan a las empresas a centrarse en lo que sus clientes realmente quieren y esperan en cada paso del servicio.
- Las garantías definen unos determinados niveles de calidad, transmitiendo tanto a los clientes como a los empleados lo que la empresa quiere y representa. Las recompensas a los clientes por un servicio de mala calidad hace que los directivos se tomen en serio las garantías, ya que quedan reflejados en los costos financieros de las fallas de calidad.
- Las garantías requieren el desarrollo de un sistema que haga que el cliente genere información de retroalimentación llena de sentido sobre la que la empresa pueda actuar.

- Las garantías ayudan a las empresas a identificar y superar sus fallas.
- Las garantías se consideran una fuerza de marketing porque reducen el riesgo en la decisión de compra. También ayudan a construir una relación de lealtad a largo plazo.

2.10.5. Matriz de servicios

La matriz de servicios clasifica a los mismos en función de las necesidades y deseos del cliente y el sistema de servicio con el que cuenta la empresa. A continuación se muestra en la Figura 4 la matriz de servicio propuesta por Schroeder (2011).

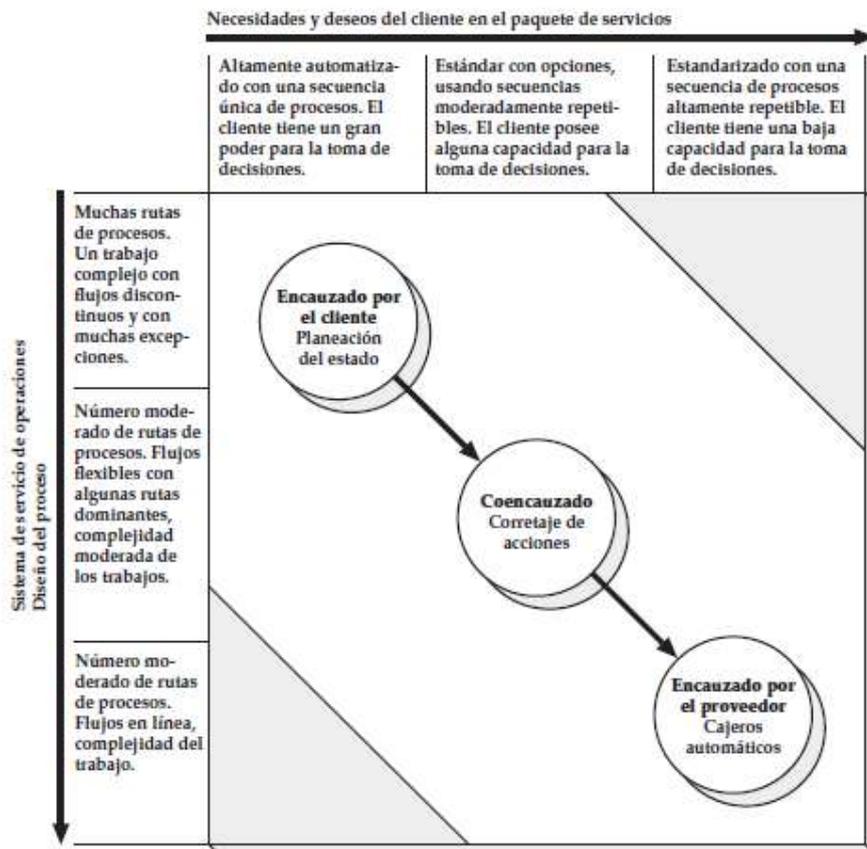


Figura 4. Matriz de servicios.
Fuente: Schroeder, 2011.

En la parte superior de la matriz se localiza la dimensión de *las necesidades y deseos del cliente*, que captura el paquete de servicios (o paquete servicio-producto) que están buscando los consumidores. Tal dimensión incorpora la cualidad única de las demandas de un cliente a otro, una indicación de la incertidumbre y de la variación introducida en las operaciones por los clientes individuales. Los consumidores que poseen

básicamente las mismas necesidades y deseos pueden ser atendidos por procesos que son altamente estandarizados y rutinarios, mientras que aquellos con deseos y necesidades de tipo único deben atenderse por procesos que permitan una gran variedad de modificaciones y altos niveles de personalización.

El lado vertical de la matriz de servicios representa el *sistema de servicios de operaciones* que incluye al diseño del proceso. Esta dimensión captura el número de distintas rutas que pueden tomar los clientes en el proceso de servicio. (Schroeder, 2011)

Analizando la matriz se pueden identificar tres tipos de servicios:

Los **servicios encauzados por el cliente** son aquellos que son altamente personalizados por el cliente. Este ocupa un rol fundamental en la toma de decisiones acerca de los componentes del servicio, el momento en que es brindado y la forma.

Los **servicios coencausados** ofrecen un número limitado de alternativas para los consumidores con procesos moderadamente estandarizados. En este caso la administración diseña una secuencia de acción para brindar el servicio, pero de todas maneras el cliente posee cierto grado de poder de decisión.

Los **servicios encauzados por el proveedor** son altamente estandarizados. Poseen pocas alternativas de acción y decisión por parte del cliente y están apuntados a personas cuyas necesidades son muy parecidas entre sí.

2.11. Análisis FODA

El análisis FODA consiste en realizar una evaluación de los factores fuertes y débiles que, en su conjunto, diagnostican la situación interna de una organización, así como su evaluación externa, es decir, las oportunidades y amenazas. También es una herramienta que puede considerarse sencilla y que permite obtener una perspectiva general de la situación estratégica de una organización determinada. El análisis FODA estima el efecto que una estrategia tiene para lograr un equilibrio o ajuste entre la capacidad interna de la organización y su situación externa, esto es, las oportunidades y amenazas.

Las fortalezas de una compañía son las características que hacen que la misma funcione de manera correcta, como lo son habilidades y capacidades del personal o atributos con los que cuenta la empresa que le permiten obtener una ventaja competitiva.

Una debilidad se define como un factor que hace vulnerable a la organización o simplemente una actividad que la empresa realiza en forma deficiente, lo que la coloca en una situación débil.

Las oportunidades constituyen aquellas fuerzas ambientales de carácter externo no controlables por la organización, pero que representan elementos potenciales de crecimiento o mejoría. La oportunidad en el medio es un factor de gran importancia que permite de alguna manera moldear las estrategias de las organizaciones. Las amenazas son lo contrario de lo anterior, y representan la suma de las fuerzas ambientales no controlables por la organización, pero que representan fuerzas o aspectos negativos y problemas potenciales. (Ponce Talancón, 2007).

A continuación en la Figura 5 se presenta un modelo de tabla de análisis FODA:

FORTALEZAS	DEBILIDADES
OPORTUNIDADES	AMENAZAS

Figura 5. Tabla ejemplo de análisis FODA.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez estudiados estos cuatro aspectos, se debe realizar un análisis acerca de cómo contrarrestar las debilidades y amenazas, con las fortalezas y oportunidades con las que la empresa cuenta.

2.12. Método del Proceso Analítico de Jerarquías

El proceso analítico de jerarquías (PAJ) está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples. El proceso requiere que quien toma las decisiones proporcione evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que luego se especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión y para cada criterio. El resultado del PAJ es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión.

El PAJ está diseñado para casos en los que las ideas, sentimientos y emociones se cuantifican con base en juicios subjetivos para obtener una escala numérica y de este modo poder dar prioridades a las alternativas de decisión.

Este método se constituye a partir del llamado “Árbol de jerarquías”. Se parte de una Meta Global, para la cual se aplican distintos criterios de decisión. Para cada criterio, se tiene una determinada cantidad de alternativas para tomar la decisión. A continuación se presenta la Figura 6 donde se muestra el árbol de jerarquías.

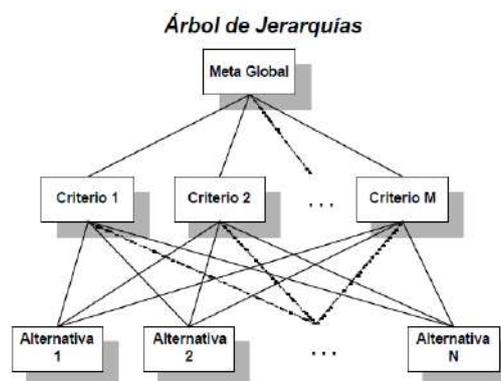


Figura 6. Árbol de Jerarquías.
Fuente: Toskano Hurtado, 2005.

2.12.1 Pasos del Proceso analítico de jerarquías

1. Definir el problema, estableciendo sus componentes o elementos relevantes.
2. Estructurar la jerarquía del problema. Para ello, se elabora una representación gráfica del problema en función de la meta global, los criterios a ser usados y las alternativas de decisión. Se deben identificar los criterios más generales hasta los más particulares.

3. Establecer las preferencias: El PAJ requiere a quien toma las decisiones, señalar un juicio de valor con respecto a todos los elementos de un nivel, referido a cada uno de los elementos del nivel inmediato superior. Se utilizan matrices de comparaciones pareadas para establecer dichas preferencias. Las comparaciones pareadas son las bases fundamentales del PAJ. Se emplea la escala de Saaty con valores de 1 a 9, para calificar las preferencias relativas de los elementos, como se puede ver en la Tabla 1.

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuerte a extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre Fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente Preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Tabla 1. Escala de las comparaciones pareadas para las preferencias en el PAJ.
Fuente: Elaboración propia en base a Anderson, 1993.

4. Priorizar y sintetizar: en un problema jerarquizado, las prioridades pueden ser locales, globales o totales. A través de un proceso matemático se calculan las prioridades relativas locales de cada elemento para cada nodo de la estructura jerárquica. Se utiliza el principio de composición jerárquica para calcular las prioridades globales de los criterios para cada nodo respecto de la meta. Por último se realiza la síntesis del problema para obtener la prioridad total de las alternativas mediante la agregación multiaditiva de las prioridades globales. Esto permite ordenar el conjunto de las alternativas consideradas y seleccionar la mejor alternativa para obtener la meta buscada.

2.12.2 Estructura jerárquica

Es necesario seleccionar los factores que son importantes para la decisión. En el PAJ, estos factores una vez seleccionados son arreglados en una estructura jerárquica descendente, la cual va desde la meta global, criterios, subcriterios y alternativas en niveles sucesivos. Cuando se construye la jerarquía se debe incluir suficiente detalle relevante para:

- Representar el problema tan a fondo como sean posible pero no tanto como para perder sensibilidad en el cambio de elementos.
- Considerar el medioambiente circundante al problema.
- Identificar las cuestiones o atributos que contribuyen a la solución.
- Identificar los participantes asociados al problema.

La jerarquía no debe estar completa, es decir un elemento de un nivel no tiene que ser función como atributo o criterio para todos los elementos del nivel inferior. La jerarquía no es un árbol tradicional. Cada nivel debe representar un corte en el problema. Por ejemplo un nivel puede representar factores sociales y otro, factores políticos a ser evaluados en términos de factores sociales o viceversa. Los elementos globales se representan en niveles superiores y otros más específicos se desarrollan más abajo.

2.12.3 Consistencia

Es raro que todas las matrices de comparación sean consistentes. En realidad, como el juicio humano es la base de la construcción de esas matrices, cabe esperar cierto grado de inconsistencia, que se debe tolerar siempre que no sea irrazonable.

Para determinar si un nivel de consistencia es razonable, se debe establecer una medida cuantificable para la matriz de comparación A.

Siendo

$$N = \begin{pmatrix} w_1 & w_1 & \cdots & w_1 \\ w_2 & w_2 & \cdots & w_2 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_n & w_n & \cdots & w_n \end{pmatrix}$$

Se ve entonces que se puede determinar la matriz correspondiente A a partir de N, dividiendo los elementos de la columna i entre w_i , (proceso inverso a obtener N). Entonces se tiene que:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

La matriz $A = (a_{ij})$, $a_{ij} = w_i/w_j$, $i, j = 1, 2, \dots, n$. Tiene entradas positivas y satisface la propiedad de reciprocidad, $a_{ij} = 1/a_{ji}$, además es consistente.

Entonces, se multiplica A por $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$

$$\begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ \vdots \\ nw_n \end{pmatrix} = n \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}$$

Siendo w el vector columna de pesos relativos w_i , donde $i = 1, 2, 3, \dots, n$. En forma más compacta, se dice que A es consistente si y solo si:

$$Aw = nw$$

Donde w es el autovector y n el autovalor de A.

Para el caso de que A no sea consistente, el peso relativo w_i se determina aproximadamente por el promedio de los n elementos del renglón i en la matriz normalizada N. Si w es la estimación calculada, se puede demostrar que:

$$A\bar{w} = n_{max}\bar{w}, n_{max} \geq n$$

En este caso, mientras más se acerquen n_{max} y n , la matriz de comparación A es más consistente. En el PAJ se calcula la relación de consistencia, siguiente:

$$RC = IC/IA$$

El valor de n_{max} se calcula a partir de:

$$A\bar{w} = n_{max}\bar{w}$$

Observando que la i -ésima ecuación es:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}\bar{w}_j = n_{max}\bar{w}_i, i = 1, 2, \dots, n$$

Dado que

$$\sum_{j=1}^n \bar{w}_j = 1$$

Se obtiene:

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}\bar{w}_j \right) = n_{max} \sum_{i=1}^n \bar{w}_i = n_{max}$$

Esto significa que el n_{max} es igual a la suma de los elementos de la columna del vector:

$$A\bar{w}$$

Donde IC es el índice de consistencia de la matriz de comparación.

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1}$$

IA es el índice de consistencia aleatoria de la matriz de comparaciones pareadas, y depende del número de elementos a comparar, como se presenta a continuación en la Tabla 2.

N° de Elementos que se comparan	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatorio de consistencia (IA)	0	0	0.58	0.89	1.11	1.24	1.32	1.40	1.45	1.49

Tabla 2. Tabla de Índice de consistencia aleatoria.
Fuente: Elaboración propia en base a Toskano Hurtado, 2005.

También puede calcularse el IA mediante la siguiente fórmula

$$IA = \frac{1.98(n-2)}{n}$$

Luego de realizar los cálculos, si el RC resulta ser menor o igual a 0.1, se puede afirmar que la comparación de elementos resulta consistente y no están sesgados por el decisor, por lo que se puede proceder a continuar con el análisis del PAJ.

3. DESARROLLO

3.1. Agricultura de precisión como servicio

Sin lugar a dudas, la agricultura de precisión corresponde a un servicio que consiste en la realización de estudios sobre las tierras de los productores, dando como resultado un programa de cultivo que maximiza la eficiencia y la productividad de los campos.

A continuación en la Figura 7 se presenta un diagrama de flujo que describe el proceso general del servicio.

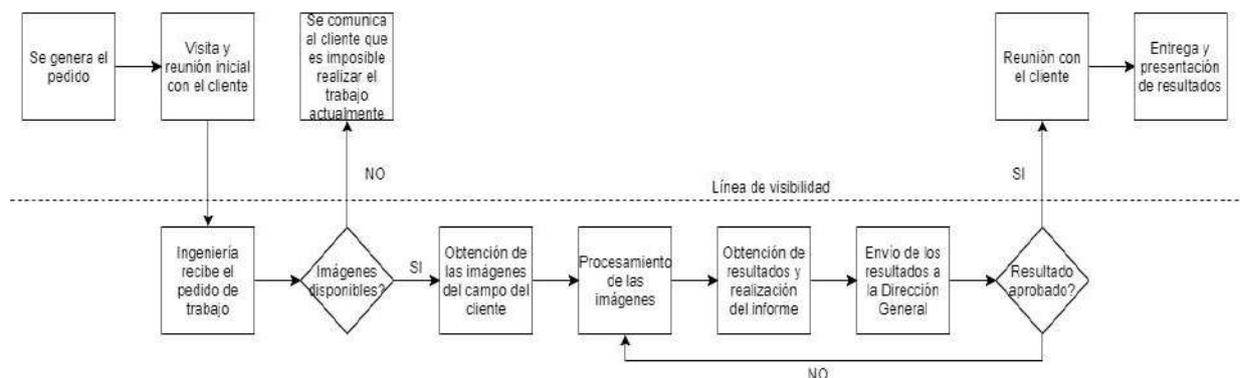


Figura 7. Diagrama de flujo del proceso de servicio.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso comienza con la generación del pedido por parte del cliente a la compañía. Luego se coordina una visita al cliente para conocer las tierras y tener una reunión inicial donde se determinan las tareas a realizar. Una vez coordinadas las actividades, el área de ingeniería recibe el pedido de trabajo para comenzar con las tareas de obtención y procesamiento de las imágenes del campo. En el caso de que las imágenes no estén disponibles debido a las condiciones climáticas al momento de las capturas fotográficas del satélite, se le comunica al cliente que en ese momento será imposible realizar el trabajo. Si las imágenes pueden ser obtenidas, las mismas son descargadas del satélite de la NASA, para luego ser procesadas con el software especializado con el que cuenta la empresa. Una vez obtenidos los resultados, se prepara un informe que es enviado a la dirección general para su aprobación. En el caso de que los resultados no estén aprobados por la dirección, se deberán reprocessar las imágenes y obtener nuevos resultados. Una vez que se tiene la aprobación de la dirección, se pacta una reunión con el cliente donde se les entrega y presenta el informe y sus resultados.

Hay que tener en cuenta que todas las actividades relacionadas con la obtención y procesamiento de imágenes y la realización y chequeo de informes y resultados son no visibles para el cliente. Las etapas visibles corresponden solo a las reuniones inicial y final.

3.1.1 Dimensiones de contacto con el cliente

El contacto con el cliente se caracteriza por ser de bajo contacto, que se limita solamente al contacto inicial (cuando se conoce al productor y el campo a estudiar) y al final (entrega de resultados). Durante el proceso productivo el cliente no tiene ningún tipo de injerencia, haciendo que el trabajo sea altamente estandarizado. Si bien los campos y las producciones son diferentes entre ellas, el procesamiento de datos resulta ser prácticamente el mismo para todos los casos.

3.1.1. I. Presencia física

Durante la obtención y procesamiento de las imágenes satelitales, la presencia física del cliente es nula. Al obtenerse las fotografías por medio de un satélite y ser procesadas con un software particular de la compañía, no es necesaria la presencia de los clientes durante la ejecución de dichas actividades.

Por otra parte, existe una alta presencia del cliente en las etapas de reunión con el cliente, ya sea la inicial como el encuentro final donde se presentan los resultados del estudio.

3.1.1. II. Qué se procesa

En el proceso de servicio, se procesan posesiones, en este caso, las imágenes satelitales, por lo que el cliente no debe estar presente durante dicha etapa. El servicio en este caso (el programa de cultivo para maximizar la eficiencia y su productividad), es consumido por el cliente una vez finalizado su procesamiento, y no durante el mismo. Si bien hay etapas en las que el cliente se encuentra presente, no forma parte del servicio y el mismo no está focalizado en él.

3.1.1. III. Intensidad de contacto

El contacto con el cliente durante el proceso es pasivo. Este no interviene en el desarrollo del proceso y no puede efectuar modificaciones acorde a sus preferencias.

3.1.1. IV. Atención personal

El contacto durante el proceso es personal. Si bien se puede apreciar que el cliente no influye durante el proceso de obtención y procesamiento de las imágenes, y que dichas tareas se realizan de forma altamente estandarizada, hay que destacar que cada cliente es único en cuanto a sus características, por lo que el resultado del servicio también es único e irreplicable. El resultado de esta instancia del proceso de servicio, siempre es diferente entre los distintos clientes.

3.1.1. V. Método de entrega

Una vez finalizado el procesamiento de las imágenes y la realización del informe final, la empresa se reúne con el cliente para comunicarle y explicarle los resultados, y guiarlo para la ejecución de las tareas que la compañía contratada propone. De esta forma la empresa se asegura transmitir los resultados con claridad al cliente.

3.1.2. Momentos de la verdad

Si analizamos la totalidad del proceso de servicio de agricultura de precisión, se puede observar un momento de la verdad durante el primer encuentro con el cliente. En esa instancia, la compañía le brinda a su potencial cliente todos los argumentos necesarios para que el mismo quede convencido de que el servicio solicitado funcionará. En ese momento la empresa le otorga al cliente datos relevantes que indiquen la eficacia de su servicio, así como también resultados de estudios anteriores que den prueba de que se está brindando un servicio de calidad.

Por otra parte, sin nos centramos en la instancia de obtención y procesamiento de las imágenes, el momento de la verdad se puede identificar en la instancia siguiente en la que la empresa le brinda los resultados finales al cliente con las propuestas de mejora a aplicar en su campo. En este momento el cliente tiene toda la información que necesita para concluir de forma preliminar si el servicio brindado por la empresa es de calidad. En esta instancia el cliente corrobora de acuerdo a su criterio si los resultados brindados son factibles y convincentes, pero no puede constatar que el servicio haya sido exitoso.

Cabe aclarar que el momento en el que el cliente tiene pruebas fehacientes de que el resultado del servicio fue exitoso y de calidad, es tiempo después cuando las propuestas de mejora brindadas por la compañía ya fueron aplicadas y se puede cuantificar el rendimiento final de los cultivos. Si el rendimiento del cultivo luego del servicio de

agricultura de precisión es superior al de años anteriores en los que no se utilizó dicho servicio, se puede definir al servicio brindado como exitoso.

3.1.3. Incertidumbre

La incertidumbre aportada por el cliente es prácticamente nula. Si bien pueden brindar al contratista muchos datos de interés para el estudio, los sistemas utilizados para el cálculo de índice verde y su posterior procesamiento dependen pura y exclusivamente de la empresa contratada para realizar el trabajo.

3.1.4. Paquete servicio-producto

Una vez definido qué tipo de servicio se trata la agricultura de precisión, se determina el paquete servicio-producto:

El servicio implícito puede identificarse como la claridad en la comunicación y la información que brinda el contratista a su cliente. Se trata de una rama de la agricultura que tiene poca historia en Argentina, sumado a que los productores trabajan en su mayoría con métodos tradicionales en el cultivo por lo que son muy conservadores a la hora de innovar con nuevos métodos o tecnologías. Es por eso que ofrecer seguridad y hablar en un lenguaje que el productor entienda es fundamental para el brindar un buen servicio. Es imprescindible en este tipo de actividad que el cliente pueda establecer una relación de confianza con el contratista.

El servicio explícito en este servicio es la entrega a tiempo de los resultados, que los mismos sean claros y sencillos de aplicar.

Por último, los **bienes facilitadores** utilizados para la realización son los vehículos para ingresar a los campos, así como también los equipos y software empleados para la obtención de los resultados, las imágenes satelitales obtenidas, los satélites de los cuales se obtienen las fotografías, los informes finales con los resultados a presentar a los clientes y las oficinas donde se realiza el procesamiento de las imágenes satelitales.

3.1.5. Recupero y garantías del servicio

Un punto a tener en cuenta en esta actividad es el recupero y las garantías del servicio. El resultado final de la agricultura de precisión se puede apreciar solo meses después de realizado su estudio, cuando se tengan los rindes finales y los relativos en función a años anteriores. Si el resultado brindado por la empresa no resulta ser de utilidad para el cliente, poco se puede hacer.

Puede realizarse un análisis de los clientes insatisfechos, tomando en cuenta sus reclamos, para centrar los esfuerzos en realizar el trabajo para evitar ciertos factores que pueden afectar al resultado. Pero desgraciadamente, la agricultura está sometida a muchas inclemencias climáticas que resultan poco predecibles para el cliente y la compañía y que pueden afectar seriamente el rendimiento de los cultivos. Es posible que el análisis sea acertado, pero el resultado puede no ser el esperado.

Por estos motivos actualmente la empresa no cuenta con un sistema de recupero y garantías del servicio.

3.1.6. Empleados

Otro aspecto a tener en cuenta son los empleados. Deben tener alto conocimiento sobre la actividad que realizan. Como ya se mencionó anteriormente, la rama productora agropecuaria Argentina es muy conservadora por lo que las personas que se acerquen a brindar el servicio deben proyectar seguridad y capacidad de respuesta ante cualquier consulta o inquietud que se presente por parte del cliente.

3.1.7. Matriz de servicios

Tomando en cuenta la matriz de servicios, la empresa se encuentra en una posición de servicios encauzados por el proveedor. Esto se debe a la baja incidencia que tiene el cliente en la producción del servicio. Ellos solicitan el servicio para obtener los índices verdes en los distintos lotes que desean monitorear, según la etapa en que se encuentre un determinado cultivo.

La empresa genera sus propias imágenes, para luego procesarlas en las oficinas, y finalmente entregar los resultados a los clientes. El trabajo de procesamiento tiende a ser estandarizado, porque independiente del campo analizado, los flujos de proceso en el manejo del software son lineales. Si bien los empleados deben contar con capacitación en software de imagen, una vez que esta es adquirida, el trabajo es relativamente sencillo.

3.2. Diagnóstico de la situación actual

3.2.1. Análisis FODA

A continuación se presenta en la Tabla 3 el diagnóstico de la situación actual mediante el uso de la matriz FODA.

Fortalezas	Debilidades
<ul style="list-style-type: none"> • Capital humano e intelectual fuertemente desarrollado en el procesamiento de imágenes aéreas. • Ubicación Geográfica. • Baja inversión inicial. • Empresa líder en el mercado. • Actividad altamente estandarizada. • Estacionalidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Dependencia de servicios externos. • Falta de velocidad de respuesta ante emergencias. • Resultado atado a la subjetividad del cliente, difícil de cuantificar. • Clientes reticentes a innovar. • Decisiones centralizadas es una sola persona.
Oportunidades	Amenazas
<ul style="list-style-type: none"> • Avances tecnológicos. • Créditos a la industria. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de potenciales competidores. • Cambio en la condiciones de contratación de servicios externos. • Variabilidad de las condiciones climáticas.

Tabla 3. Análisis FODA.
Fuente: Elaboración Propia.

3.2.1.I. Fortalezas:

La empresa estudiada dispone de un capital humano e intelectual fuertemente desarrollado en el procesamiento de imágenes aéreas. Las empresas dedicadas a la agricultura de precisión disponen de personal que tienen un alto conocimiento, tanto en agricultura como en manejo del software especializado. Por este motivo, cualquier cambio o modificación en la estructura de la organización no requeriría una inversión desmedida en capital intelectual. El área donde se encuentra ubicada en la zona sudeste de la provincia de Buenos Aires, en las cercanías de la ciudad de Tandil. Esta se caracteriza por la excelente calidad de suelo y en consecuencia por su gran explotación agrícola. Esto hace que clientes muy importantes estén cerca de la empresa. Como se mencionó anteriormente, las imágenes actualmente se descargan de la base de datos de la NASA y de forma totalmente gratuita. Esto hace que la inversión se limite a los viajes a los distintos campos para visitar a los productores, y los derechos de uso de los *softwares* de procesamiento de imágenes, además del mantenimiento de las oficinas centrales. La agricultura de precisión actualmente

no representa una inversión inicial desmedida. El segmento de mercado abordado por la empresa es relativamente nuevo e innovador dentro del área de producción agropecuaria. Esto hace que no se encuentren muchas compañías dedicadas a esta actividad, por lo que la empresa estudiada resulta ser de cabecera en el mercado. Otro aspecto importante es que se trata de una actividad altamente estandarizada. Si bien se estudian diferentes tipos de cultivos en regiones totalmente incomparables, el procesamiento de la imagen responde siempre al mismo tratamiento. También se puede destacar la estacionalidad de la actividad, lo que permite realizar una correcta planificación de los trabajos.

3.2.1.II. Oportunidades:

Los grandes avances tecnológicos que aparecen día a día hacen que se presente un enorme abanico de posibilidades si es que se decide innovar dentro de la actividad, o si se desea abarcar algún otro segmento del mercado. Esta situación también está propiciada por los créditos a la industria que facilitarían enormemente la inversión en nuevas tecnologías aplicadas.

3.2.1.III. Debilidades:

El servicio de agricultura de precisión hoy depende de servicios externos. Como ya se mencionó la imagen es descargada de la base de datos gratuita de la NASA. Esto podría traer problemas en un futuro si es que se decide restringir el acceso a la base de datos. Otro problema del servicio actual es la velocidad de respuesta ante emergencia. Si por alguna inclemencia climática una región con muchos clientes juntos (como el sudeste de la provincia de Buenos Aires) es afectada, la empresa no dispone de la estructura como para atender todas las necesidades a la vez. Otro aspecto a tener en cuenta es la difícil cuantificación del resultado. El proveedor brinda las imágenes procesadas con la sugerencia de cultivo, pero el resultado real (y el que realmente le interesa al cliente) se da a la hora de la cosecha. Este resultado viene atado a las condiciones climáticas durante el cultivo, así como también a la productividad de años anteriores, por lo que resulta muy difícil saber si el trabajo de la empresa dio realmente el resultado que se esperaba. Otra debilidad más es que los clientes en general son productores con tradición agropecuaria de muchas generaciones, por lo que les resulta difícil abandonar sus propios métodos y criterios de cultivo para confiarle las decisiones a una empresa externa. Es por este motivo que el proveedor debe ser muy claro y conciso a la hora de brindar el servicio al cliente. También puede destacarse que la empresa dispone de decisiones centralizadas, lo que podría llevar a tomas de decisiones no tan acertadas en ciertas situaciones. Todas las decisiones que se

toman, pasan por la aprobación de la dirección general, ya sea la inclusión de nuevos clientes o la aprobación de los informes finales antes de ser entregados y presentados.

3.2.1.IV. Amenazas:

Debido a la baja inversión inicial que se requiere para comenzar este tipo de actividad, los potenciales competidores resultan una enorme amenaza. También es una amenaza un posible cambio en las condiciones de uso de los servicios externos utilizados para la realización de los trabajos. Por último, la variabilidad de las condiciones climáticas hace que la calidad del trabajo sea difícil de medir haciendo que un gran estudio sea opacado por una inclemencia climática. Por otra parte, lo más importante con respecto a esto es que la imagen satelital es brindada cada 15 días, por lo que si durante la toma de la imagen se presentan estas condiciones, resulta imposible generar la fotografía y en consecuencia realizar el estudio.

Al ser una empresa líder en el mercado de la agricultura de precisión es muy importante que no se quede en el camino y que los competidores le saquen porcentaje del mercado. Hacer uso de las tecnologías emergentes sería una buena opción para obtener ventaja a los competidores. Utilizar los créditos del estado es una buena alternativa en caso de no disponer con el capital necesario para realizar la inversión. Es importante recalcar que la organización ya dispone de un capital humano e intelectual muy elevado, por lo que lo ideal sería innovar desde una perspectiva en la que los empleados no necesiten ampliar demasiado sus conocimientos en tratamientos de imágenes y en agricultura, y tampoco romper con la estandarización que dispone actualmente la compañía.

Posiblemente los problemas más significativos que tiene hoy la empresa son la dependencia casi absoluta de servicios externos y de las condiciones climáticas. Si en un hipotético caso la NASA decide no brindar más las imágenes de forma abierta, sería imposible seguir con el negocio tal cual están las condiciones actuales. Por otra parte, el estudio también depende de la nubosidad en el momento de que el satélite capta la imagen. Si la nubosidad impide la generación de la fotografía satelital, el estudio no puede realizarse de ninguna forma alternativa.

3.2.2. Estrategias a partir del FODA

Ante los aspectos previamente presentados, se propone la implementación de VANTs para la captación de imágenes y su posterior procesamiento. Los mismos anularán la problemática de la dependencia de las condiciones de nubosidad y del servicio de las imágenes del satélite de la NASA para la obtención de las imágenes. Además no se

presenta una diferencia en el capital intelectual requerido, por lo que los empleados de la empresa solo necesitarán una capacitación para el uso de las aeronaves, pero el tratamiento de la imagen sería exactamente el mismo. Poder brindar el servicio sin necesidad de esperar buenas condiciones de nubosidad, también representa una ventaja a la hora de vender el servicio a los productores, ya que los mismos pueden asegurarse de que el estudio será realizado sin importar las condiciones climáticas. Además es un movimiento audaz ante los competidores.

Como se explica en el apartado anterior el servicio busca brindar una imagen área de producción de los clientes agropecuarios, para determinar el índice verde de dichas zonas. Para esto un operador será el encargado de acceder a las zonas en cuestión y operar los VANTs, para que estos obtengan dicha imagen. El operador contará con uno o más VANTs (según lo que determine el análisis), que podrán ser de variadas características. Es importante aclarar que se determinan una cantidad límite de equipos, en función de la capacidad del transporte. Teniendo en cuenta que los dispositivos operan de forma autónoma, la capacidad del operador para su manipulación simultánea, no será una restricción.

Lo mencionado en el párrafo anterior marca la diferencia más sustancial entre el servicio brindado mediante imágenes de satélite y aquellas generadas in situ por la empresa. El hecho de tener que recorrer uno a uno todos los campos, que se deban relevar, insume un tiempo adicional a la generación del servicio. Teniendo en cuenta la extensión de la Provincia de Buenos Aires y la distribución de los clientes en la misma, este tiempo no es despreciable, por lo que debe ser evaluado en pos de minimizarlo y lograr la máxima eficiencia.

3.3. Ruta Óptima

3.3.1. Definición

La ruta óptima del sistema a implementar es aquella que pasa una sola vez por todos los campos del sistema y vuelve al punto de partida, minimizando la distancia total del recorrido y por ende el tiempo utilizado. Las oficinas de la empresa, ubicadas en la ciudad de Tandil, son el origen y la finalización de la ruta. Pudiéndose entonces resolver el sistema como un Problema de Agente Viajero (TSP).

3.3.2. Método de Obtención de la Ruta Óptima

Dentro de los varios métodos existentes, se determina la solución al Problema de Agente Viajero planteado cada vez que se desea accionar el sistema, mediante un algoritmo de Ramificación y Acotación, o *Branch & Bound* por su definición en Inglés. Esto se debe al bajo error presente en sus soluciones y la simplicidad de los cálculos asociados al método. Siendo este último factor importante para el desarrollo de un software que automatice el sistema, permitiendo recalcularlo rápidamente si hay cambios en la cartera de clientes.

3.3.3. Entorno de Desarrollo del Sistema Informático.

Existen varios lenguajes informáticos adecuados para el desarrollo de esta aplicación de resolución del TSP. Sin embargo, con el fin de utilizar una plataforma sencilla y de fácil acceso para cualquier PYME en el medio, se desarrolla una aplicación en el lenguaje informático VBA (*Visual Basic for Applications*), mediante el software Microsoft Excel® con el que ya cuenta la empresa.

3.3.4. Código Fuente

El Código Fuente del sistema está compuesto por 2 Módulos y 2 Formularios. Los Módulos se denominan "*Module 1*" y "*BranchBound*". En el primero se encuentran aquellos procedimientos referidos a la selección de los datos a procesar, cada vez que el usuario requiere una nueva ruta. El segundo, como su nombre lo indica, es la estructura principal del Algoritmo de Ramificación y Acotación desarrollado.

Por su parte los formularios se denominan "*UserForm1*" y "*UserForm2*". El primero es el que se activa al inicializar el software, y en él se realiza la manipulación de datos de entrada por parte del usuario. El segundo, por su parte, muestra en pantalla los resultados obtenidos a través del cálculo.

Los códigos fuente de los atributos mencionados se muestran en el Anexo 6.I.

3.3.5. Parámetros de Entrada

Actualmente la empresa cuenta con 50 establecimientos bajo su atención. Los parámetros de entrada son las distancias de cada cliente, de ahora en adelante denominado campo o punto, con el resto. Esta información se calcula a través del software Google Earth. Y a modo de ejemplo se muestra a continuación en la Tabla 4 una versión reducida de la tabla de distancias. Los datos se expresan en kilómetros (km).

	1	2	3	4	5	...	50
1	1000000	213,00	25,10	29,80	116,00	...	146
2	213,00	1000000	151,80	146,00	122,70	...	57,8
3	25,10	151,80	1000000	7,40	31,50	...	94,126
4	29,80	146,00	7,40	1000000	53,90	...	88,28
5	116,00	122,70	31,50	53,90	1000000	...	65,93
...	1000000	...
50	146	57,8	94,126	88,28	65,93	...	1000000

Tabla 4. Parámetros de Entrada Puntos 1 a 50.
Fuente: Elaboración Propia.

Estos datos deberán estar cargados en la Hoja 1 del libro de Microsoft Excel ® en que se ejecuta el código. Cada fila y columna representa uno de los establecimientos que trabaja la compañía, cuenta con un código numérico de identificación. La Tabla 5 muestra los nombres de los establecimientos y sus respectivos códigos de identificación.

Código	Nombre	Código	Nombre
1	La Tranquera	26	Isla Negra
2	El Mago	27	La Adelita
3	Las 3 Cruces	28	La Porra
4	El Duro	29	La Salamandra
5	La Niña Bonita	30	Rosalinda
6	El Minero	31	Pampero
7	El Triangulo	32	El Yuyo
8	La Alvariza	33	Los Girasoles
9	La María	34	El Bravo
10	El Sapo	35	El Estribo
11	La Carreta	36	Los Teros
12	El Molino	37	La Morita
13	El Viento	38	El Loco
14	Santa Rosa	39	El Raro
15	Don Pedro	40	El Filo
16	El Establo	41	La Alambrada
17	El Palenque	42	El Pato
18	El Recado	43	El Gordo
19	El Facón	44	La Lluvia
20	Los Cardos	45	Oficina Central
21	La Virazón	46	La Mercedes
22	La Gaviota	47	La Amanda
23	La Faca	48	El Peligro
24	El Capitán	49	Zorzal
25	Don Ricardo	50	Benteveo

Tabla 5. Código y Nombre de Establecimientos.
Fuente: Elaboración Propia.

3.3.6. Resolución del Sistema Actual

La Tabla 6 muestra la Ruta Optima, obtenida a través del sistema informático, para la cartera de clientes actual. Las distancias entre campos se presentan en las tablas del Anexo 6.II.

ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA (km)	ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA (km)
Oficina Central	El Recado	3,22	Las 3 Cruces	La Carreta	7,1
El Recado	La Salamandra	1,33	La Carreta	El Palenque	214,55
La Salamandra	El Facón	3,16	El Palenque	La Alambrada	33,3
El Facón	El Peligro	2,68	La Alambrada	La Virazón	23,91
El Peligro	Rosalinda	11,89	La Virazón	Los Cardos	47,92
Rosalinda	Benteveo	23,62	Los Cardos	La Faca	50,37
Benteveo	La Lluvia	31,04	La Faca	El Capitán	101,25
La Lluvia	El Gordo	34,11	El Capitán	El Loco	60,22
El Gordo	La Niña Bonita	16,262	El Loco	Los Teros	5,11
La Niña Bonita	El Bravo	21,39	Los Teros	Don Ricardo	33,76
El Bravo	El Minero	2,76	Don Ricardo	La Morita	50,11
El Minero	El Triangulo	84,016	La Morita	Zorzal	32,34
El Triangulo	Santa Rosa	7,64	Zorzal	El Filo	14,03
Santa Rosa	La Alvariza	10,01	El Filo	El Pato	25,65
La Alvariza	Don Pedro	50,9	El Pato	El Raro	15,77
Don Pedro	El Molino	24,89	El Raro	El Estribo	8,47
El Molino	El Sapo	26,52	El Estribo	La Amanda	105,1
El Sapo	La Gaviota	3,63	La Amanda	La Mercedes	0,82
La Gaviota	La María	0,5	La Mercedes	La Adelita	44,47
La María	Isla Negra	6	La Adelita	El Viento	7,33
Isla Negra	La Tranquera	30,2	El Viento	Pampero	9,88
La Tranquera	Los Girasoles	46	Pampero	El Mago	16,3
Los Girasoles	El Yuyo	1,24	El Mago	El Establo	35,1
El Yuyo	El Duro	37,1	El Establo	La Porra	1,11
El Duro	Las 3 Cruces	7,4	La Porra	Oficina Central	3,68
				TOTAL	1435,158

Tabla 6. Ruta Óptima.
Fuente: Elaboración Propia.

3.4. Parámetros para la selección de equipos

El uso de VANTs está regulado por la ANAC. Esta clasifica, a los mismos, en tres categorías según su peso en vacío, que se detallan en la Tabla 7.

Categorías	
Pequeños	Peso \leq 10 kg
Medianos	10kg < Peso \leq 150 kg
Grandes	Peso > 150 kg

Tabla 7. Categorías de VANTs según su peso.

Fuente: Elaboración propia en base a información obtenida de ANAC.

El presente trabajo limita la selección de posibles equipos a utilizar entre modelos que se encuentren en la categoría "Pequeños". Esto se debe a que las categorías Medianos y Grandes cuentan con una serie de regulaciones que la categoría "Pequeños" no. Entre ellas se destacan que el operador del Vehículo cuente con una licencia que autorice su uso, también el hecho de tener que solicitar permiso de vuelo ante la ANAC cada vez que se desee hacer un vuelo y contar con un Manual de Operaciones y Sistema de Gestión de Riesgos. Cumplir con estas regulaciones implicaría un aumento significativo en los costos de aplicación del sistema, así como también un aumento en los tiempos de trabajo.

Los vehículos de la categoría "Pequeños" cuentan con menos regulaciones que los medianos o grandes, debido a su mayor simplicidad de operación, así como también menores riesgos asociados a sus vuelos. Esto significa que los operadores de los mismos no deben contar con una capacitación tan avanzada como las de las categorías superiores. Siendo este otro motivo para seleccionar vehículos "Pequeños" que requieren una capacitación de personal menos compleja, siendo más fácil insertarlos en los sistemas actuales de la empresa.

Obviamente los vehículos de las categorías superiores a 10 kilogramos cuentan con mejores desempeños en vuelo. Pudiendo desarrollar mayores velocidades, así como con una mayor autonomía. Sin embargo, como se mostrará más adelante, los vehículos "Pequeños" cuentan con las características suficientes para desarrollar la tarea según las necesidades requeridas.

Por otra parte también hay que destacar que dentro del análisis de selección de los VANTs, se adquieren la cantidad suficiente de baterías como para que ningún DRONE deba permanecer ocioso aguardando la recarga. De esta manera solo existe tiempo ocioso en el cambio de baterías entre vuelos. Este análisis, determina la cantidad de baterías necesarias

para el caso en que deban que ser cambiadas en el mismo establecimiento mientras se realizan los trabajos. De esta forma se busca que, independientemente del tamaño del campo y las horas de vuelo requeridas, las baterías agotadas sean cargadas a medida que los VANTS vuelan para que estén disponibles cuando se requieran, y no recaer en tiempos de recarga con el VANT en tierra.

3.5. Oferta de Vehículos Aéreos No Tripulados en el mercado

En función de las categorías mencionadas anteriormente, se describe la oferta de equipos pertenecientes a la categoría “Pequeños”, en el mercado.

En primer lugar es importante aclarar que si bien la oferta de VANTS inferiores a los 10 kg de peso es variada, podemos separar a los mismos en dos categorías. Aquellos de uso aficionado y aquellos de uso profesional. La mayoría de los equipos inferiores a los 10 kilogramos no están equipados con los sensores necesarios para realizar la toma de imágenes de múltiple espectro para analizar el índice verde. Es por eso que al precio de mercado de los mismos se les agrega el precio de los sensores con los que deben ser equipados para poder realizar la toma de las mismas. Existen en el mercado algunos modelos con equipamiento de uso profesional, especialmente diseñados para utilizarlos en agricultura de precisión.

3.5.1. Equipos a considerar en la selección

3.5.1.1. Cámara Multiespectral Parrot SEQUOIA

La cámara de imágenes multiespectrales a utilizar es la SEQUOIA de la marca Parrot. La elección de dicha cámara es debido a que en la actualidad ya existen algunos VANTS especializados en la agricultura de precisión que utilizan este dispositivo para captar las imágenes. Con el fin de estandarizar el análisis, se decidió que esta cámara sea utilizada con todos aquellos VANTS que no cuenten con la cámara incorporada.

En pos de evitar el incremento de costos, en el paquete informático, es importante que el software sea estandarizado para todos los VANTS. Esto a su vez salva errores de compatibilidad entre las imágenes obtenidas por los distintos equipos que se seleccionan.

En la Figura 8 se muestra una imagen de la cámara.



Figura 8. Parrot SEQUOIA.
Fuente: Pagina web oficial de Parrot.

Esta cámara tiene un costo de € 3.850, y capta cuatro tipos de ancho de banda: Verde, rojo, borde rojo e infrarrojo cercano. Es adaptable a cualquier tipo de VANT independientemente del modelo o la marca, y sirve no solo para optimizar el uso de grano a la hora de realizar los cultivos, sino que también aporta información para mejorar el aporte de fertilizante variando la cantidad según las necesidades, así como también para reducir el aporte de pesticidas únicamente en las parcelas que lo requieran. También analiza la evolución de las plantas tras el riego, entre otras funciones.

Se realiza una investigación de mercado en la que se determinan 8 equipos entre los cuales se realiza la selección del sistema a utilizar. Los modelos y sus características se presentan en la Tabla III.1 del Anexo 6.III.

3.6. Selección de Vehículos Aéreos No tripulados – Proceso Analítico de Jerarquías

Luego de realizar la búsqueda de los VANTs que se adaptan a las características del servicio a brindar (Tabla III.2 del Anexo 6.III) se seleccionan los tres mejores por medio del proceso analítico de jerarquías (PAJ). A partir de esta selección se determina el mix óptimo de VANTs mediante la aplicación de Programación Lineal General (PLG).

3.6.1. Proceso analítico de jerarquías – criterios a analizar

- **Velocidad:** La velocidad de trabajo de los distintos modelos es muy importante al momento de realizar el análisis. A mayor velocidad de trabajo, son más las hectáreas que el VANT podrá barrer en un determinado tiempo.
- **Volumen:** Se busca tener el menor volumen posible de los VANTs a utilizar para facilitar el transporte de los mismos y poder contar con la mayor cantidad posible.
- **Autonomía:** Esta variable resulta de gran importancia, ya que es la que define el tiempo de vuelo máximo ininterrumpido de los equipos. A mayor autonomía, se reducen las paradas para cambios de baterías, optimizando así la cantidad de hectáreas por hora barridas por cada VANT.

Precio: Es importante también que, si bien el presente trabajo no está siendo llevado a cabo en función a un análisis económico, ninguna compañía dispone de capital infinito para invertir, por lo que el precio de cada unidad analizada resulta de gran relevancia a la hora de su selección. En el precio se toma en cuenta el valor mismo del VANT, sumado a las baterías y cargadores adicionales.

A continuación se presenta en la Figura 9 el árbol de jerarquías para este proceso de selección de alternativas.

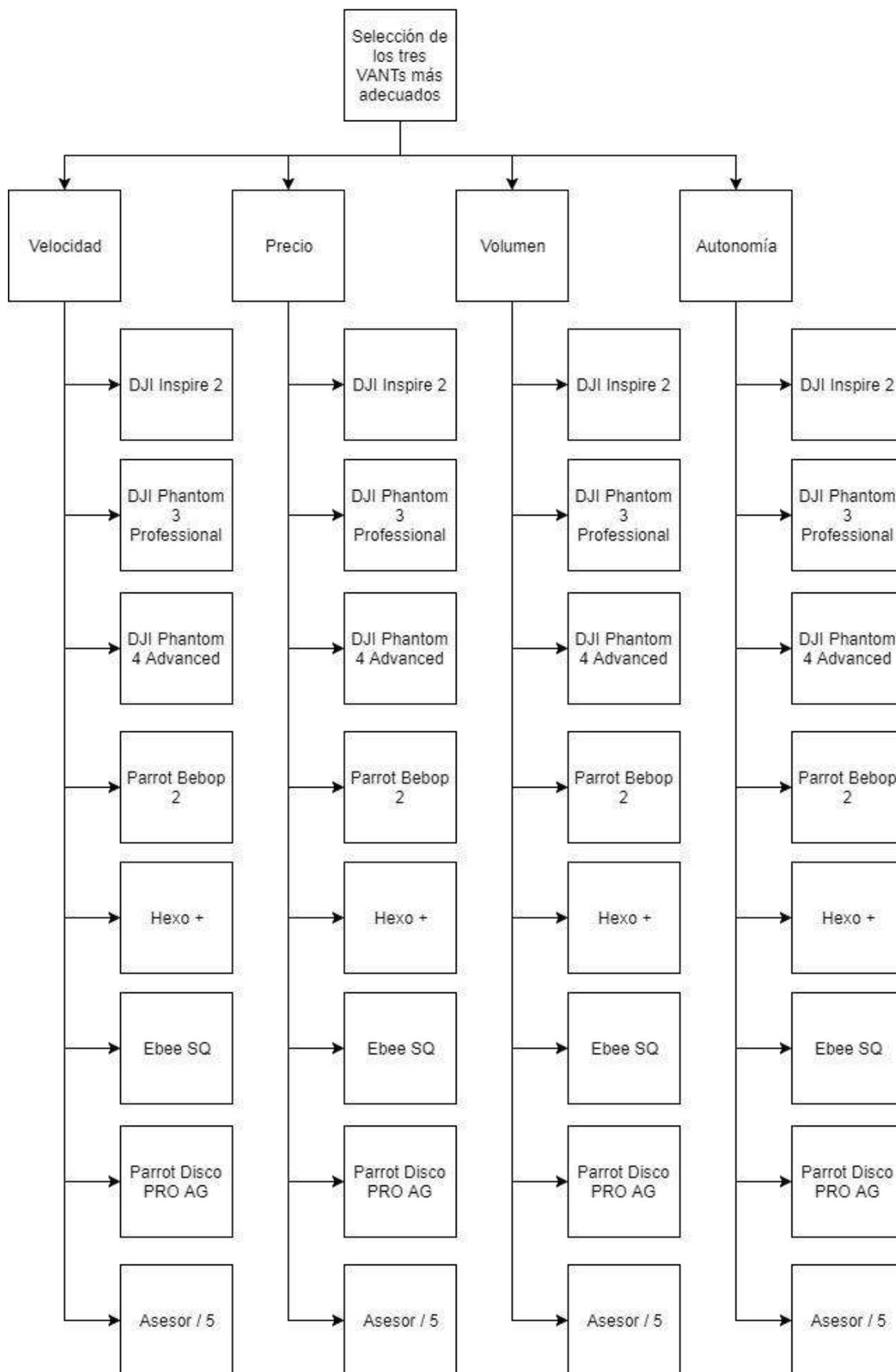


Figura 9. Árbol de Jerarquías.
Fuente: Elaboración propia.

Se realiza la comparación de los distintos criterios a analizar (Tabla III.4 y Tabla III.5 del Anexo 6.III). A continuación en la Tabla 8 se presentan las prioridades para los cuatro criterios que dan como resultado de la comparación.

Criterio	Valor Promedio
Velocidad (m/s)	0,35
Precio (Euros)	0,35
Volumen (m3)	0,10
Autonomía (min)	0,21

Tabla 8. Prioridades para los criterios.
Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los criterios precio (0,35) y velocidad (0,35) son los de mayor peso en la decisión sobre la elección de los VANTs. Le siguen en importancia la Autonomía (0,21) y el Volumen (0,10).

En función a la Tabla III.2 presentada en el Anexo 6.III, se realiza la comparación entre cada una de las alternativas en función a cada criterio por separado (Tablas III.7 a Tablas III.18. en Anexo 6.III).

Luego de cada comparación pareada, se realiza un análisis de consistencia para corroborar que las ponderaciones indicadas en cada comparación no estén sesgadas por el decisor. A continuación se presenta la Tabla 9 donde se puede apreciar que cada cálculo de consistencia es inferior a 0.1, por lo que se afirma que el análisis es consistente.

	RC	ESTADO
Criterios	0,02	CONSISTENTE
Velocidad	0,06	CONSISTENTE
Volumen	0,08	CONSISTENTE
Autonomía	0,05	CONSISTENTE
Precio	0,08	CONSISTENTE

Tabla 9. Resultados análisis de consistencia.
Fuente: Elaboración propia.

Al finalizar las comparaciones pareadas en función a cada criterio y de la confirmación de la consistencia del análisis, se obtiene como resultado la siguiente jerarquización global de alternativas presentadas en forma de gráfico en la Figura 10.

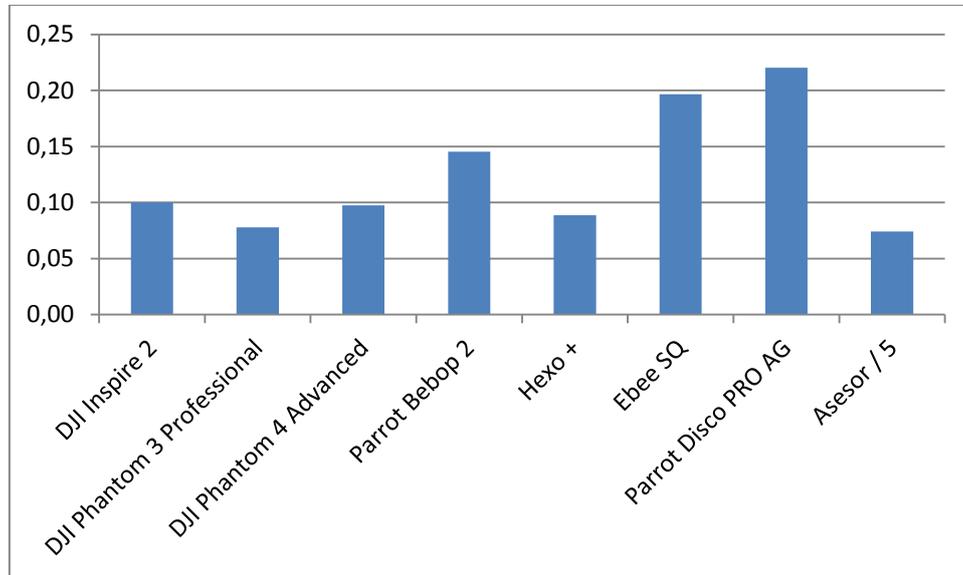


Figura 10. Jerarquización global de VANTs.
Fuente: Elaboración propia.

Del anterior análisis se eligen los 3 modelos mejor ponderados, el DJI Inspire 2, el Ebee SQ y el Parrot Disco PRO AG de las 8 alternativas posibles. Estos modelos son los elegidos para realizar la programación lineal y de esta forma determinar el mix de VANTs óptimo a utilizar.

3.7. Dispositivos elegidos

3.7.1. Vehículos Aéreos no Tripulados

Los VANTs determinados en el análisis por jerarquías corresponden a un cuadricóptero en el caso del Inspire 2 de DJI, y un ala fija en el SQ y el Disco PRO AG de las marcas Ebee y Parrot respectivamente. A continuación se presentan en las Figuras 11 a 13 respectivamente.



Figura 11. DJI Inspire 2.
Fuente: Página web oficial de DJI.



Figura 12. Ebee SQ.
Fuente: Página web oficial de Ebee.



Figura 13. Parrot Disco PRO AG.
Fuente: Página web oficial de Parrot.

El SQ de Ebee y el Parrot Disco tienen la particularidad de que son VANTs especializados para realizar trabajos de agricultura de precisión, por lo que la cámara SEQUOIA de Parrot ya viene incluida en el dispositivo. En el caso del Inspire 2 la cámara debe incluirse a parte. Igualmente este análisis ya fue realizado para llevar a cabo el PAJ.

3.8. Modelo de Programación Lineal

El Modelo de Programación Lineal que se describe a continuación, calcula la cantidad de cada uno de los Modelos de VANTs derivados del análisis del PAJ. Obteniéndose una Solución Óptima, según las condiciones que se plantean a continuación.

3.8.1. Función Objetivo

La función objetivo busca una minimización del costo de adquisición del sistema, cumpliendo con la cobertura del total de hectáreas a relevar en un tiempo de 15 días.

$$F. O. (\min) = P_1 \cdot X_1[\text{€}] + P_2 \cdot X_2[\text{€}] + P_3 \cdot X_3[\text{€}]$$

Siendo:

P_1 = Precio del VANT Tipo 1

P_2 = Precio del VANT Tipo 2

P_3 = Precio del VANT Tipo 3

X_1 = Cantidad de VANTs Tipo 1

X_2 =Cantidad de VANTs Tipo 2

X_3 =Cantidad de VANTs Tipo 3

3.8.2. Restricciones Estructurales

3.8.2.I. Volumen

El volumen de los VANTs no debe superar el volumen máximo de carga en la caja del vehículo con que actualmente cuenta la empresa, que asciende a 1,2 m³.

$$V_1 \cdot X_1[m^3] + V_2 \cdot X_2[m^3] + V_3 \cdot X_3[m^3] \leq 1.2 [m^3]$$

Siendo:

V_1 = Volumen de VANT 1

V_2 = Volumen de VANT 2

V_3 = Volumen de VANT 3

3.8.2.II. Hectáreas Totales a relevar

La ruta óptima determinada por el sistema informático es de 1435 km. Esta es la distancia total que debe recorrer el operario para relevar todos los campos de la cartera de clientes. Este recorrido de la ruta óptima se realiza dentro de un periodo de 15 días, para igualar al de obtención de imágenes satelitales que se sustituye.

Teniendo en cuenta que en periodo de 15 hay dos fines de semana, y que el operario a cargo trabaja media jornada los sábados, se cuenta con 12 días netos para realizar el recorrido. Considerando una jornada de 9 horas de trabajo, resulta entonces que son 108 las horas netas de trabajo disponibles.

$$(15 \text{ días} - 3 \text{ días francos}) * 9 \text{ horas de jornada laborales} = 108 \text{ horas netas de trabajo}$$

Debido a que varios de los caminos que se transitan son caminos vecinales, y si se tiene en cuenta paradas y contratiempos durante el trayecto, se supone que el operario viaja aproximadamente a 60 km/h. A esta velocidad, se necesitan 24 horas de viaje para recorrer

todo el sistema. Dejando 84 horas para la obtención de las imágenes, mediante el sistema de VANTs.

$$108 \text{ horas netas de trabajo} - \left(\frac{1435 \text{ km}}{60 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right) = 84 \text{ horas para operación}$$

La cartera de clientes cuenta con un total de 56.000 ha que se relevan en las 84 horas de operación. Por lo que se tiene un total de 667 ha/hora a relevar.

$$\left(\frac{56.000 \text{ ha/h}}{84 \text{ h}} \right) = 667 \text{ ha/h}$$

Siendo entonces la restricción correspondiente.

$$H_1 \cdot X_1 [\text{Ha/h}] + H_2 \cdot X_2 [\text{Ha/h}] + H_3 \cdot X_3 [\text{Ha/h}] \geq 667 [\text{Ha/h}]$$

Siendo:

H₁= Cantidad de hectáreas relevables por VANT 1 en una hora.

H₂= Cantidad de hectáreas relevables por VANT 2 en una hora.

H₃= Cantidad de hectáreas relevables por VANT 3 en una hora.

Para determinar el número de hectáreas que cada DRONE es capaz de relevar en una hora, se analizan los parámetros del sensor Parrot Sequoia con que están equipados. A 120 m de altura el sensor tiene una resolución de aproximadamente 10 cm por lado de pixel, siendo entonces 0.01 m² por pixel. El tamaño de imagen del sensor es de 1.2 Mpix. Por lo tanto con esta resolución se tiene una imagen de 12000 m² o 1.2 ha.

Otro punto a tener en cuenta es el *Overlapping* o Superposición que las imágenes deben tener entre sí, para poder ser procesables. A partir de parámetros a ciertas velocidades específicas, suministrados por los fabricantes del sensor, se interpolan los valores de tiempo transcurrido entre dos imágenes, y del respectivo porcentaje de superposición en esas condiciones. A continuación se presenta la Tabla 10, donde se muestra el tiempo entre fotografías en función de su velocidad a 120 m de altura. Luego en la Figura 14 se presenta de forma gráfica dicha relación.

Velocidad [m/s]	Segundos
5	4,4
10	2,2
13	1,7
20	1,1

Tabla 10. Tiempo entre fotografías en función de su velocidad a 120 m de altura
Fuente: Elaboración propia

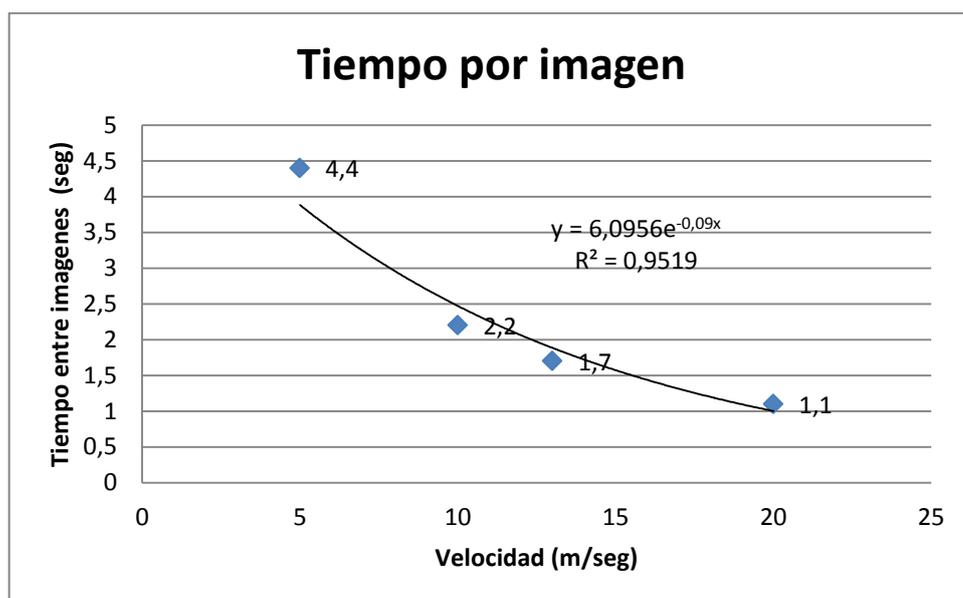


Figura 14. Ecuación de tiempo entre imágenes en función de la velocidad.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la tabla 11 se presenta el Overlapping en función a la distancia entre imágenes.

Distancia entre imágenes (m)	Overlapping (%)
33,7	70
28	75
22,4	80
16,8	85

Tabla 11. Overlap en función a la distancia entre imágenes.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 15 se presenta el overlap en función a los metros recorridos por fotografía tomada.

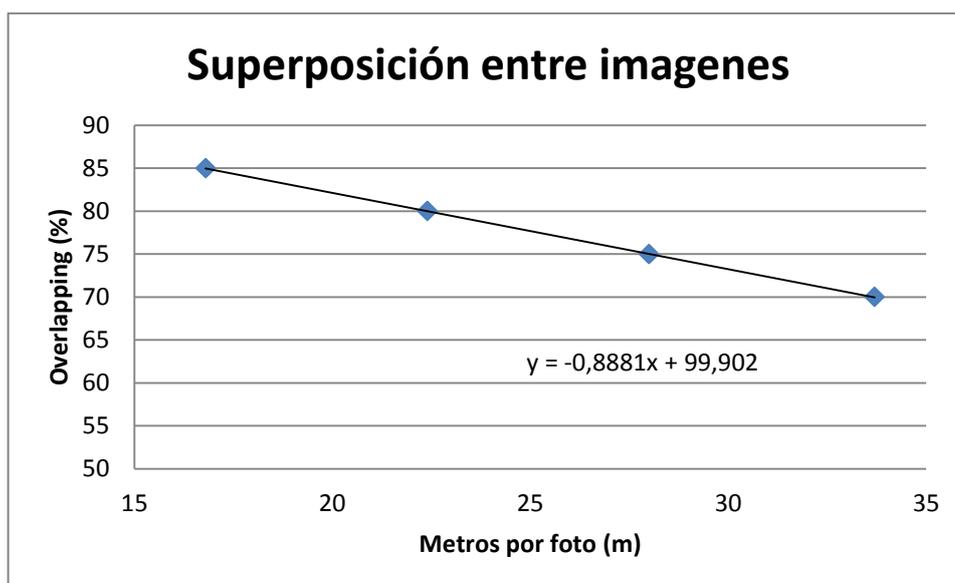


Figura 15. Overlap en función a los metros recorridos por fotografía tomada.
Fuente: Elaboración propia.

En función del tamaño de imagen que brinda el dispositivo a 120 m de altura y los datos obtenidos por interpolación lineal, se obtienen los siguientes parámetros de vuelo para los modelos en análisis. Los mismos se presentan en la Tabla 12.

Modelo	Velocidad(m/s)	seg/foto	m/foto	Overlap(%)	Ha/Foto	Foto/Ha	seg/Ha	Ha/seg	Ha/h
DJI Inspire 2	18,12	1,19	21,62	80,70	0,23	4,32	5,15	0,19	698,74
Ebee SQ	21,39	0,89	19,02	83,01	0,20	4,91	4,36	0,23	825,41
Parrot Disco PRO AG	19,90	1,02	20,23	81,93	0,22	4,61	4,69	0,21	767,65

Tabla 12. Cálculo de hectárea por hora volado por los VANTs.
Fuente: Elaboración propia.

Estos datos se corrigen según resultados empíricos, que informan los fabricantes, y se consultan y validan con expertos en la operación de los equipos en agricultura de precisión. Si bien son resultados precisos para una trayectoria infinitamente recta, sin retorno al origen de despegue, en la práctica esto no sucede. Las distintas formas de los terrenos a estudiar, los puntos de despegue en relación al terreno y la forma en que los sistemas autónomos definen las trayectorias óptimas, reducen el área efectiva que se recorre. Esta corrección es del 50% aproximadamente, según se recomienda.

A su vez se descuenta el tiempo de recambio de baterías correspondiente a cada modelo. En función de su autonomía los modelos DJI Inspire II y el Parrot Disco Pro AG deberían realizar dos recambios por hora de trabajo, mientras que el Ebee SQ solo una. A cada cambio se le adjudica un tiempo aproximado de 5 minutos.

La Tabla 13 muestra estas dos últimas correcciones y los rendimientos obtenidos.

Modelo	Ha/h	Rendimiento	Ha/h efectivo
DJI Inspire 2	698,74	174,68	145,57
Ebee SQ	825,41	206,35	189,16
Parrot Disco PRO AG	767,65	191,91	159,93

Tabla 13. Cálculo de hectárea por hora efectiva por los VANTs.
Fuente: Elaboración propia.

3.8.2.III. Capacidad máxima de Vehículos Aéreos No Tripulados a gestionar simultáneamente por operario

En función de que, si bien la operación de los equipos, una vez desplegados, es autónoma, estos requieren un monitoreo constante en cuanto cuestiones de seguridad y rendimiento. Es por eso que se determina una cantidad máxima de 4 equipos a operar por operario. Siendo entonces la respectiva restricción.

$$X_1[u] + X_2[u] + X_3[u] \leq 4[u]$$

3.8.3. Modelo matemático de Programación Lineal

El modelo matemático que se desarrolla está compuesto de la Función Objetivo a minimizar y 4 inequaciones que representan las restricciones estructurales.

3.8.3.I. Función Objetivo

$$F. O. (\min) = 8366. X_1[\text{€}] + 4555. X_2[\text{€}] + 10590. X_3[\text{€}]$$

3.8.3.II. Restricciones

$$\left\{ \begin{array}{l} 0,06. X_1[m^3] + 0,08. X_2[m^3] + 0,09. X_3[m^3] \leq 1,2 [m^3] \\ 145,57. X_1 \left[\frac{Ha}{h} \right] + 189,16. X_2 \left[\frac{Ha}{h} \right] + 159,93. X_3 \left[\frac{Ha}{h} \right] \leq 667 \left[\frac{Ha}{h} \right] \\ X_1[u] + X_2[u] + X_3[u] \leq 4[u] \\ X_1, X_2, X_3 \geq 0 \text{ y Enteros} \end{array} \right.$$

3.8.4. Solución Óptima

La solución óptima obtenida ingresando el modelo en el software Microsoft Excel® y resolviéndolo con la herramienta *Solver*. Está compuesta por 3 VANTs Parrot Disco Pro Ag y 1 Ebee SQ. Las tablas de datos de entrada y salida de este modelo se muestran en la Tabla IV.1 y la Tabla IV.2 del Anexo 6.IV.

3.9. Descripción del nuevo servicio

El servicio brindado por la empresa con la nueva implementación de VANTs para ejecutar el análisis de las tierras es siempre el mismo, pero hay que resaltar ciertas diferencias con respecto al servicio antes de la propuesta de mejora.

Como primera medida, la obtención de las imágenes pasa de ser “no visible” a “visible” para el cliente en el caso de que se deba incurrir a la alternativa de utilizar los VANTs para tomar las fotografías.

A continuación en la Figura 16 se presenta el diagrama de flujo del proceso de servicio modificado con la inclusión de esta alternativa.

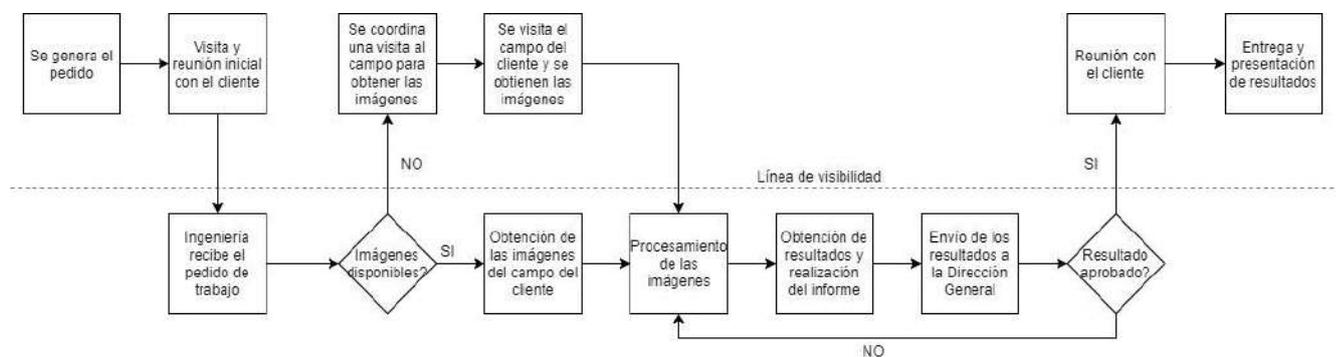


Figura 16. Diagrama de flujo del servicio con el sistema de VANTs.

Fuente: Elaboración propia.

Un aspecto que varía con respecto al análisis inicial es el contacto con el cliente. Con la inclusión de los VANTs al servicio, el contacto aumenta drásticamente, ya que personal de la empresa debe estar presente realizando el relevamiento de las tierras a analizar.

3.9.1. Dimensiones de contacto con el cliente

3.9.1.I. Presencia física

Si se necesita del uso de VANTs para la obtención de imágenes de las tierras, el cliente pasa a estar presente si lo desea durante esta etapa del proceso. De esta forma puede intervenir en ciertas decisiones durante la ejecución de las tareas, como sugerencias en el recorrido del campo que puede hacer más eficiente el desarrollo de la actividad.

3.9.1.II. Que se procesa

Durante esta etapa, se siguen procesando posesiones. La diferencia en este caso es que no solo se deben utilizar las imágenes, sino que también es necesario procesar las tierras de los clientes. Para esta etapa igualmente no es necesaria la presencia del cliente, pero puede estar presente si lo desea para aportar sugerencias o supervisar la calidad de la actividad.

3.9.1.III. Intensidad del contacto

En este caso, la intensidad de contacto pasa a ser de tipo activa durante la obtención de las imágenes (no así en su procesamiento). Si bien el cliente no interviene durante la creación del servicio, puede afectar el proceso del mismo en el caso en que decida estar presente durante la obtención de las imágenes. Puede aportar modificaciones en el recorrido del campo, tomando en cuenta sus características, que sirvan de ayuda para la compañía. También puede aportar ayuda al acceso de las facilidades de la propiedad, así como también soporte en caso de algún tipo de urgencia.

3.9.1.IV. Atención personal

Aplicando la utilización de VANTs para la obtención de las imágenes, la atención sigue siendo personal. No solo por los puntos analizados en “3.1.1.IV. Atención Personal”, sino que para esta instancia ahora se debe visitar personalmente a los clientes, haciendo que la compañía deba adaptarse aún más a las necesidades y preferencias del cliente.

3.9.1.V. Método de entrega

La forma de entrega de los resultados sigue siendo cara a cara. El informe final es entregado y presentado al cliente de forma personal donde se explican las propuestas a aplicar en los cultivos, tal como se explica en “3.1.1.V. Método de entrega”.

3.9.2. Momentos de la verdad

A los momentos de la verdad que se detallan en “3.1.2. Momentos de la verdad”, hay que agregarle el momento en el que personal de la compañía visita al cliente para obtener las imágenes. En esta etapa el cliente es testigo de la forma de operar que tiene la empresa, por lo que puede sacar conclusiones parciales acerca de la calidad del servicio brindado.

3.9.3. Incertidumbre

En el caso de que se necesite utilizar la flota de VANTs para obtener las imágenes, el cliente puede estar junto al personal durante la captura de las fotografías durante gran parte del tiempo de ejecución, lo que podría aportar variabilidad al servicio.

Es probable que exista variabilidad en la llegada, que en este caso la empresa va hacia el cliente y no en sentido opuesto.

También puede haber variabilidad en función al esfuerzo, ya que el cliente puede estar o no dispuesto a ciertas propuestas de la empresa, como puede ser la accesibilidad a las instalaciones del establecimiento agropecuario (por ejemplo, para cargar las baterías de los VANTs).

Otra incertidumbre que se puede presentar es la variabilidad en función a las preferencias subjetivas, en el caso de que el cliente desee aportar sus experiencias o sugerencias en la aplicación y la llevada a cabo del proceso.

Por otra parte también puede existir variabilidad en cuanto a la capacidad, ya que es posible que el personal de la empresa necesite de la presencia del cliente en ciertos momentos de la ejecución del servicio (como para acceder a ciertos sectores del campo o a las instalaciones auxiliares), pero el mismo no tenga la capacidad de satisfacer dicha necesidad.

El aumento en el contacto con el cliente puede afectar la eficiencia del servicio por lo que se debe tener en cuenta la incertidumbre que el consumidor aporta.

3.9.4. Paquete servicio-producto

El **servicio implícito** sigue siendo el mismo pero debe incluir también a esta nueva alternativa. La introducción de los VANTs como solución antes ciertas inclemencias no desvían el objetivo de transmitir una sensación de confianza y seguridad en los trabajos

realizados, pero es necesario también informar y convencer a los consumidores del motivo por el cual se está utilizando esta nueva herramienta para brindar el servicio. Los clientes están acostumbrados a prácticamente no tratar con la empresa personalmente a excepción del contacto inicial y la entrega de resultados, por lo que podría resultar llamativo que el personal de la compañía deba pasar varias horas, e incluso días dentro de las tierras de los clientes. Los mismos deben preparar con antelación las instalaciones para recibir a las personas encargadas de realizar el trabajo: ya sea dejar las entradas abiertas para el libre ingreso y egreso del campo, brindar soluciones a necesidades básicas como instalaciones sanitarias de ser necesarias, instalaciones eléctricas para la carga de los VANTs, y cualquier otra necesidad que se requiera a la hora de la realización del trabajo. También es posible que el encargado o dueño del establecimiento desee estar presente durante el proceso, lo que le consumiría mucho de su tiempo. Estas situaciones pueden resultar tediosas para un cliente, por lo que es de gran importancia transmitirle los motivos y la relevancia de la aplicación de esta nueva manera de brindar el servicio ante ciertas situaciones. Por otra parte es importante proyectar una imagen extremadamente confiable en el aspecto ético y moral del personal a cargo de realizar la tarea, ya que en definitiva son personas desconocidas para los consumidores las que estarán dentro su propiedad durante todo ese tiempo.

El **servicio explícito** permanece invariante. Como ya se explicó anteriormente, la inclusión de VANTs en el servicio sirve de alternativa para ciertas situaciones donde la utilización de la imagen satelital resulte inviable, pero el resultado que el consumidor obtiene es siempre el mismo.

Por otra parte, los **bienes facilitadores** permanecen iguales, a excepción de los mismos VANTs que deban ser utilizados.

Otro aspecto a tener en cuenta es la capacitación de los empleados que deberán realizar los relevamientos. Deben tener los conocimientos necesarios en manejo de VANTs: esto incluye programar los vuelos, su correcto y eficaz montaje para efectuar los vuelos y una gran velocidad en cambio de baterías para perder la menor cantidad de tiempo posible intercambiándolas entre cada vuelo. Por otra parte también deben contar con ciertos conocimientos tecnológicos acerca de las aeronaves utilizadas, para poder estar preparados para realizar algún tipo de reparación menor en el caso de que alguno de los VANTs falle.

Por otra parte también es necesario que el personal sea capacitado en aspectos de trato con clientes para que la estadía en los establecimientos agropecuarios sea lo más

armoniosa posible, y así también dejar una confiable y buena imagen de la empresa para no generar dudas acerca del servicio brindado al cliente.

3.10. Aplicación del servicio

3.10.1. Inversión inicial

Como primera medida en la implementación de esta nueva alternativa al servicio de agricultura de precisión, se debe realizar la inversión inicial en los distintos VANTs y sus respectivos accesorios. El costo total aproximado que tiene dicha inversión es de 24.255 Euros. De este valor se puede desglosar que:

- Es necesario comprar 3 VANTs Parrot Disco AG Pro con un costo total de 13.655 Euros, con sus accesorios incluidos. Se estima que estos 3 cubrirían un área de trabajo de 479.78 hectáreas por hora en total.
- Se adquirirá por otra parte un DRONE Ebee SQ con un costo total de 10.590 Euros con sus accesorios incluidos. Se calcula que este modelo podría trabajar 189.16 hectáreas por hora.
- En cuanto al DJI Inspire 2, el análisis indico no adquirir ningún equipo en el mix.

3.10.2. Volumen del mix

Otro aspecto a tener en cuenta es el volumen total del mix de VANTs concretado. Como ya se mencionó con anterioridad, la camioneta que utiliza la empresa para recorrer los distintos establecimientos agropecuarios es de tipo doble cabina y dispone de una caja que puede transportar de forma cubierta hasta 1,2 metros cúbicos en total. El volumen total del mix de VANTs es aproximadamente de 0.327 metros cúbicos por lo que caben perfectamente dentro de la caja.

3.10.3. Abastecimiento de energía

Como ya se explicó en el apartado “3.4. Parámetros para la selección de equipos”, el criterio utilizado para el abastecimiento energético de los VANTs es que no tengan que sufrir tiempo ocioso para la recarga de la batería.

Como primera instancia se arribará al establecimiento agropecuario con todas las baterías cargadas al 100%, para así de esta forma poder cumplir con un ciclo de vuelo completo sin complicaciones o interrupciones. La cantidad de baterías adicionales que se

necesitan en función al tiempo de recarga que requiere cada tipo se puede detallar a continuación:

- Para el DJI Inspire 2 se necesitan 4 baterías en total para que el DRONE pueda volar sin necesidad de detenerse para recargar la batería. Cada batería tarda 90 minutos en cargarse completamente.
- El Parrot Disco PRO AG y el Ebee SQ necesitan por otra parte 2 baterías en total, y para ambos casos el tiempo de carga es de 60 minutos por batería.

Con estos datos se calculan los siguientes tiempos netos totales de vuelo con las cantidades de baterías completamente cargadas al llegar al establecimiento agropecuario:

Minutos de vuelo netos sin recargar baterías	
DJI Inspire 2	108
Ebee SQ	110
Parrot Disco PRO AG	60

Tabla 14. Horas de vuelo netas posibles con las baterías cargadas.
Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 14 se deduce que arribando al campo con todas las baterías completamente cargadas, el Ebee SQ tiene un tiempo neto de vuelo de 110 minutos contando todas las baterías, el Parrot Disco PRO AG tiene un tiempo neto de 60 minutos y el DJI Inspire 2 un tiempo neto de 108 minutos.

Por otra parte, considerando los datos obtenidos y representados en la “Tabla 13: Cálculo de hectárea por hora efectiva por los VANTs”, se puede afirmar que bajo la condición de utilizar todas las baterías cargadas al momento de arribar al establecimiento agropecuario, el Ebee SQ podrá procesar 346,79 hectáreas sin necesidad de recargar sus baterías. Sin embargo el Parrot Disco PRO AG puede trabajar 159,93 hectáreas sin tener que recargar sus baterías. De esta forma, tomando en cuenta que el análisis dio como resultado utilizar tres VANTs de este tipo, en total se pueden volar 479,79 hectáreas utilizando dicha cantidad de equipos de este modelo sin recargar las baterías en el sitio.

En base a los números mostrados anteriormente, se calcula que el mix de VANTS está capacitado para trabajar 826,58 hectáreas en total con todas sus baterías cargadas al momento de iniciar los trabajos y sin necesidad de realizar recargas en el sitio.

De esta forma hay que considerar que en el caso de que el establecimiento agropecuario del cliente supere las 826.58 hectáreas de amplitud, se debe tener en cuenta que se necesitará realizar recargas en el sitio, por lo que es necesario que el establecimiento cuente con las instalaciones necesarias para la recarga de las baterías, así como también el personal de la empresa necesita estar autorizado y tener acceso a dichas instalaciones para llevar a cabo la recarga.

También es necesario contar con el acceso a las instalaciones en el caso de que ese mismo día se trabaje el campo de un cliente distinto. En ese caso también es de suma importancia recargar las baterías a medida que se hace el trabajo para no incurrir en tiempos de espera de recarga cuando se trabaje el siguiente establecimiento. De esta forma se llegará con el otro cliente con casi la totalidad de las baterías cargadas, a excepción de las últimas utilizadas en el campo anterior, que sin problemas pueden ser recargadas en el sitio del segundo trabajo de ser necesario mientras se realizan los vuelos.

3.10.4. Personal a cargo de la nueva tarea

Para llevar a cabo esta nueva rama dentro del servicio es necesario contar con un mínimo de dos personas a cargo y con un nuevo empleado a cargo de dicha tarea. El mismo debe disponer de una capacitación previa en el uso de los VANTS, manejo del software y su configuración, cambio de baterías, ensamble previo al uso y desarme para retirarse, así como también un conocimiento mínimo en cuanto a funcionamiento y recambio de repuestos en caso de que ocurra algún incidente como puede ser la ruptura de una aspa, entre otros imponderables.

Cabe destacar también que el personal a cargo debe tener un buen contacto con el cliente, ya que como se explicó en el apartado “3.9. Descripción del nuevo servicio”, en el caso de que el cliente o algún representante desee estar presente durante el proceso o en parte del mismo.

Otro aspecto a tener en cuenta es que los empleados necesitan tener un conocimiento aceptable del rubro al que se dedica la empresa. Por eso mismo es inevitable que uno de los dos encargados de la obtención de las imágenes sea de la compañía y trabaje dentro del área de ingeniería. Esta persona estará a cargo de todos los procesos dentro del establecimiento agropecuario, conociendo con exactitud qué sectores del campo serán trabajados, a que indicadores ponerles más atención y también como interlocutor entre la empresa y el cliente o representante. Es importante que si el cliente tiene alguna duda o consulta acerca del servicio, la persona a cargo esté capacitada para responder lo

que el cliente desea conocer. Esta persona también estaría capacitada para el procesamiento de los datos obtenidos durante las recorridas.

3.11. Utilización de software

Es necesario que la empresa este capacitada para el cálculo automatizado de nuevos resultados a través de un software realizado en Visual Basic para Microsoft Excel. Es importante aclarar que no todos los clientes cultivan el mismo tipo de grano, por lo que lo más probable es que haya que seleccionar los campos que se deberán visitar en la recorrida, y así conocer la ruta óptima para los clientes seleccionados.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta es que los clientes pueden variar. Es posible que se añadan nuevos establecimientos para trabajar, así como también es posible la pérdida de algún cliente. Llegado a alguno de los dos casos mencionados, el personal de la compañía podrá realizar modificaciones para obtener los nuevos resultados.

3.11.1. Determinación de rutas

Como primera instancia se debe asegurar de que todas las planillas de cálculo y las listas de clientes en la macro estén vacías y listas para la ejecución de un nuevo sistema. Para ello se debe presionar el botón “Borrar Todo” antes de realizar algún cálculo o ingresar cualquier dato al programa.

Para el cálculo de la ruta óptima, hay que seleccionar los clientes que se necesitan visitar. En la List Box “Campos Disponibles” se presenta la lista completa de los clientes que dispone la empresa. A su lado, en la List Box “Campos Seleccionados” se ingresa la lista de clientes que deberán ser visitados. Esta lista es la utilizada para la realización de los cálculos. Para la selección de los campos a visitar se presentan a la derecha un mapa completo de la provincia de Buenos Aires con la totalidad de los clientes, y una secuencia de mapas con los sectores de la provincia más detallados para la correcta selección de los campos. A continuación en la Figura 17 se presenta el display del programa.

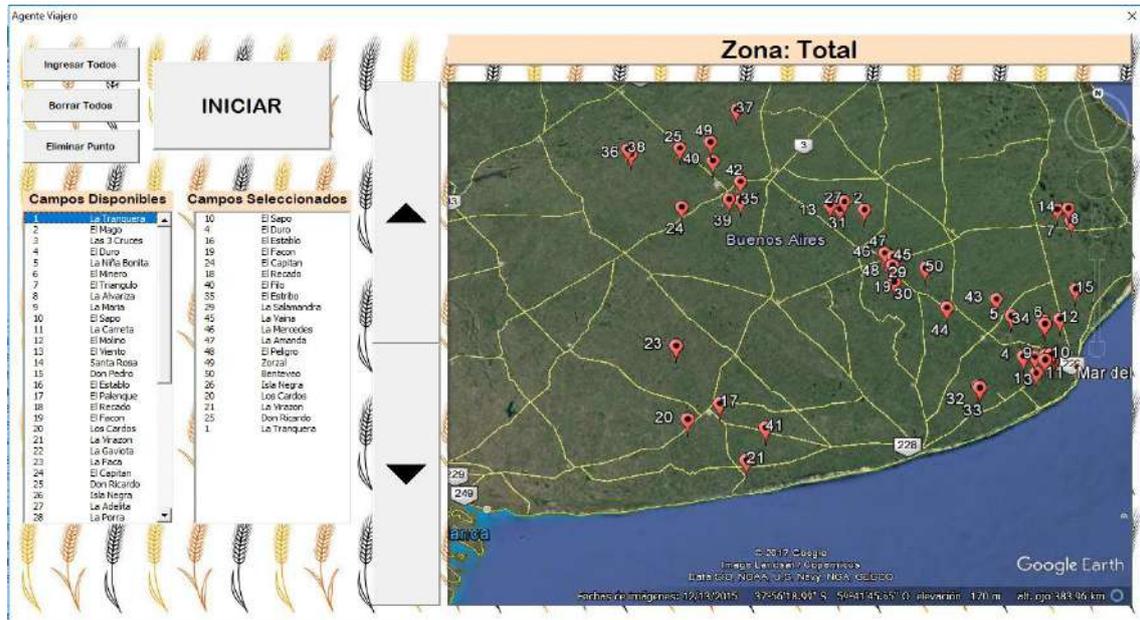


Figura 17. Display del programa para el cálculo del TSP.
Fuente: Elaboración propia.

3.11.2. Selección de clientes

Para la selección de los clientes a visitar existen dos alternativas:

- La más sencilla es seleccionar cada cliente de la lista “Campos Disponibles”, que ante la ejecución del click izquierdo del mouse sobre el mismo, automáticamente se transferirá a la lista “Campos Seleccionados”
- La otra opción es presionar el botón “Ingresar Todos” que transferirá todos los campos disponibles a la lista “Campos Seleccionados”.

En el caso de que se seleccione el mismo cliente más de una vez, el campo no será transferido a la lista de ejecución y aparecerá un cartel indicando que ese cliente ya fue seleccionado con anterioridad.

3.11.3. Eliminar clientes de los campos seleccionados

En el caso de que se desee eliminar alguno de los clientes elegidos para los cálculos, se debe seleccionar el campo a extraer y luego presionar el botón “Eliminar Punto”.

3.11.4. Cálculo del sistema y presentación de resultados

Una vez que se dispone de la lista de clientes que necesitan ser visitados, se procede a presionar el botón “INICIAR”. De esta forma se comienzan a realizar los cálculos correspondientes para el cálculo del agente viajero.

Una vez finalizada la ejecución de los cálculos, una nueva ventana se presenta con los resultados correspondientes. La misma cuenta con un cuadro de datos con tres

columnas. En la primer columna aparece el campo de origen, en la segunda se presenta el siguiente cliente a visitar y en la tercer columna la distancia entre los dos campos presentados (Ver Figura 18).

Resultados

ORIGEN	DESTINO	DISTANCIA
La Vaina	El Recado	3,22
El Recado	La Salamandra	1,33
La Salamandra	El Facon	3,16
El Facon	El Peligro	2,68
El Peligro	Rosalinda	11,89
Rosalinda	Benteveo	23,62
Benteveo	La Lluvia	31,04
La Lluvia	El Gordo	34,11
El Gordo	La Niña Bonita	16,262
La Niña Bonita	El Bravo	21,39
El Bravo	El Minero	2,76
El Minero	El Triangulo	84,016
El Triangulo	Santa Rosa	7,64
Santa Rosa	La Alvariza	10,01
La Alvariza	Don Pedro	50,9
Don Pedro	El Molino	24,89
El Molino	El Sapo	26,52
El Sapo	La Gaviota	3,63
La Gaviota	La Maria	0,5
La Maria	Isla Negra	6
Isla Negra	La Tranquera	30,2
La Tranquera	Los Girasoles	46
Los Girasoles	El Yuyo	1,24
El Yuyo	El Duro	37,1
El Duro	Las 3 Cruces	7,4
Las 3 Cruces	La Carreta	7,1
La Carreta	El Palenque	214,55
El Palenque	La Alabrada	33,3
La Alabrada	La Virazon	23,91
La Virazon	Los Cardos	47,92
Los Cardos	La Faca	50,37
La Faca	El Capitan	101,25
El Capitan	El Loco	60,22
El Loco	Los Teros	5,11
Los Teros	Don Ricardo	33,76
Don Ricardo	La Morita	50,11
La Morita	Zorzal	32,34
Zorzal	El Filo	14,03

Reiniciar

Figura 18. Presentación de recorridos.
Fuente: Elaboración propia.

Al finalizar la totalidad de los recorridos, se indica la distancia total recorrida para todo el tour.

Resultados

El Triangulo	Santa Rosa	7,64
Santa Rosa	La Alvariza	10,01
La Alvariza	Don Pedro	50,9
Don Pedro	El Molino	24,89
El Molino	El Sapo	26,52
El Sapo	La Gaviota	3,63
La Gaviota	La Maria	0,5
La Maria	Isla Negra	6
Isla Negra	La Tranquera	30,2
La Tranquera	Los Girasoles	46
Los Girasoles	El Yuyo	1,24
El Yuyo	El Duro	37,1
El Duro	Las 3 Cruces	7,4
Las 3 Cruces	La Carreta	7,1
La Carreta	El Palenque	214,55
El Palenque	La Alambrada	33,3
La Alambrada	La Virazon	23,91
La Virazon	Los Cardos	47,92
Los Cardos	La Faca	50,37
La Faca	El Capitan	101,25
El Capitan	El Loco	60,22
El Loco	Los Teros	5,11
Los Teros	Don Ricardo	33,76
Don Ricardo	La Morita	50,11
La Morita	Zorzal	32,34
Zorzal	El Filo	14,03
El Filo	El Pato	25,65
El Pato	El Raro	15,77
El Raro	El Estribo	8,47
El Estribo	La Amanda	105,1
La Amanda	La Mercedes	0,82
La Mercedes	La Adelita	44,47
La Adelita	El Viento	7,33
El Viento	Pampero	9,88
Pampero	El Mago	16,3
El Mago	El Establo	35,1
El Establo	La Porra	1,11
La Porra	La Vaina	3,68
TOTAL		1435,158

Reiniciar

Figura 19. Presentación de recorridos con distancia total a recorrer.
Fuente: Elaboración propia.

3.11.5. Ingreso de nuevos datos

Es casi inevitable pensar que la cartera de clientes de la empresa va a ir variando con el tiempo, ya sea incorporando nuevos campos a trabajar, o por la pérdida de antiguos clientes.

En este caso, se debe modificar el archivo de Excel donde se presentan la lista de clientes que la empresa dispone, con las respectivas distancias entre ellos. Para efectuar alguna modificación se debe abrir la pestaña “campos” en el archivo.

Para la adición de un nuevo cliente es necesario agregar una fila y una columna a la matriz de campos, y se ingresa la distancia de ese nuevo campo con el resto de los clientes.

En el caso de que se desee eliminar un campo, es necesario eliminar la fila y columna que corresponde al cliente a extraer.

Es importante tener especial cuidado al momento de añadir o quitar clientes ya que el programa utiliza dicha matriz para la realización de los cálculos.

Por otra parte, para facilitar los cálculos, la matriz de clientes en la hoja “campos”, llama a cada campo con un número. Si se desea asignar un nombre a cada cliente, se debe abrir en el mismo archivo de Excel la hoja “Nombres”. En ella se le puede asignar a cada campo numerado un nombre de referencia.

Cabe aclarar que en las listas para la selección de clientes previo a la ejecución del programa, se indica cada campo numerado con su nombre asociado, facilitando la selección de los mismos. En la ventana de presentación de resultados, la ruta aparece referenciada con los nombres de los campos, dejando afuera su número de referencia.

4. CONCLUSIÓN

A través del análisis de la empresa, se observa una fuerte dependencia, de factores ajenos a la misma, para la producción de su servicio principal. Debido a esto se plantea la necesidad de desarrollar métodos que reduzcan o anulen la dependencia de estos.

De esta situación deriva el concepto de un sistema sustituto para la generación de imágenes aéreas de Índice Verde. Teniendo en cuenta tecnologías alternativas, se establece un sistema de VANTs equipados con cámaras Multiespectrales, capaces de obtener dichas imágenes, bajo condiciones no aptas para los satélites. A su vez mediante herramientas de Investigación Operativa se establecen el mejor conjunto de VANTs para el trabajo y las rutas óptimas que minimicen los tiempos de producción.

El conjunto en cuestión se compone de 4 equipos. De los cuales 3 son del modelo Parrot Disco PRO AG y el restante es un eBee SQ. Estos VANTs salieron favorecidos en el análisis, respecto de los otros modelos, porque están diseñados específicamente para tareas de control de cultivos y vienen equipados de fábrica con los sensores pertinentes, reduciendo considerablemente sus costos de adquisición.

Por otra parte, mientras el software desarrollado automatiza, de una forma amigable para el operario, el cálculo de la ruta óptima minimizando los tiempos de recorrido, para cualesquiera sean los clientes que se deseen relevar. El trabajo brinda los lineamientos que se deben seguir, para insertar los nuevos métodos de producción en la empresa, teniendo en cuenta su estructura actual y proponiendo los cambios necesarios para la correcta implementación de las mejoras planteadas.

5. BIBLIOGRAFÍA

ALBERTO,C. ; CARIGNANO C. (2013) Apoyo cuantitativo a las decisiones. Capítulo 3: Programación Lineal. Capítulo 6: Programación lineal entera. Capítulo 12: Decisión Multicriterio discreta. Asociación Cooperadora de la facultad de Ciencias Económicas de U.N.C. Córdoba.

ANDERSON,D (2011). Introducción a los modelos cuantitativos para administración. Capítulo 5: Programación Lineal. El método Simplex. Capítulo 8: programación Lineal en enteros. Capítulo 15: Problemas de decisión de criterios múltiples. Grupo editorial Iberoamericana, S.A de C.V. México.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Extraído el 12 de Mayo de 2017, de http://climayagua.inta.gob.ar/indices_de_vegetaci%C3%B3n.

HURTADO, T. Y BRUNO, G. El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores. Extraído el 2 de Junio de 2017, de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Basic/toskano_hg/cap3.PDF

Fundación Agropecuaria para el Desarrollo Argentino. Extraído el 21 de Septiembre de 2017 de <http://fundacionfada.org/gacetillas/el-campo-argentino-en-numeros-2/>.

SCHROEDER, RG (2011). Administración de Operaciones. Capítulo 5: Diseño del Proceso de Servicio (pp. 83 – 104), México DF, Mc. Graw Hill.

Superintendencia de Industria y Comercio. DRONES, Vehículos Aéreos no Tripulados y sus sistemas de comunicación. Boletín Tecnológico. Septiembre 2015. Bogotá.

TAHA, H. (2004) Investigación de Operaciones. Capítulo 9: Programación Lineal Entera. Pearson Educación. México.

TALANCÓN, HP (2007). La matriz FODA: Alternativa de diagnóstico y determinación de estrategias de intervención en diversas organizaciones. Volumen 12 (enero – junio). Xalapa.

VALIENTE, SM (2003). Temas de Investigación Operativa, Problemas de Asignación – El problema del Agente Viajero. Argentina. Librería El Libroto.

LOVELOCK, C. REYNOSO, J. D'ANDREA, G.HUETE,L. (2004). Administración de Servicios. Estrategias de marketing, operaciones y recursos humanos.México, Pearson Educación.

KRAJEWSKI, L. RITZMAN, L. MALHOTRA, M. (2008). Administración de Operaciones. Procesos y cadenas de valor. México, Pearson Educación.

Facultad de Ciencias Agrarias de Rosario. Seminario: "Agricultura Inteligente como Nueva Perspectiva Tecnológica. Uso de Drones en Actividades Agropecuarias". Julio 2016. Rosario.

6. ANEXOS

6. I. Códigos fuente del sistema informático.

A continuación se muestra el código del Algoritmo de Ramificación y Acotación desarrollado, el módulo de operaciones auxiliares y los dos formularios correspondientes a la interfaz de entrada y salida de datos.

```
Attribute VB_Name = "BrunchBound"
```

```
Public Minf(100), Minc(100), hf, hc, w0, ielim, jelim, subbrutas As Double
```

```
Public n As Integer
```

```
Public RecalcularAs Boolean
```

```
Sub Programa()
```

```
    hc = 0
```

```
    hf = 0
```

```
    n = 0 'Es el número de arcos encontrados hasta el momento.
```

```
    subbrutas = 0
```

```
    CallLlenar_Indices 'Se establecen los índices de fila y columna para los puntos seleccionados.
```

```
    While n < ctemporales - 1
```

```
        Repetir:
```

```
            Recalcular = False
```

```
            If n = 0 Then
```

```
                CallMinimof(2) 'Se calculan los valores mínimos de cada fila en la iteración inicial.
```

```
                CallRestar_Minimof(2) 'Se resta el mínimo valor de la fila a todos los puntos en la tabla inicial.
```

```
            Else
```

```
                CallMinimof(3) 'Se calculan los valores mínimos de cada fila en el resto de las iteraciones.
```

```
                CallRestar_Minimof(3) 'Se resta el mínimo valor de la fila en el resto de las iteraciones.
```

```
            EndIf
```

```
            CallMinimoc 'Se calculan los valores mínimos de columna en todas las iteraciones.
```

```
CallRestar_Minimoc 'Se resta el minimo valor de columna en todas las iteraciones.
CallMostrarSumar 'Se escribe La reducción de La iteración.
Call Verificar 'Se verifica que Los retornos de Los arcos calculados hasta el momento no sean ceros.
Call Calcular 'Se calcula La máxima reducción posible.
If Recalcular = True ThenGoTo Repetir 'La variable recalcular es verdadera cuando La solución actual genera una subruta, entonces se repite La iteración anulando dicha ruta.
Call Verificar 'Se verifica que el retorno, del arco calculado, no sea cero.
Call eliminar 'Se elimina el arco calculado de La Matriz.
n = n + 1
Wend
If n = ctemporales - 1 Then
Sheets(7).Cells(ctemporales,1) = Sheets(3).Cells(2,1) 'Se escribe el ultimo arco, obtenido de La matriz final.
Sheets(7).Cells(ctemporales,2) = Sheets(3).Cells(1,2)
    Sheets(7).Cells(1,5)=Sheets(5).Cells(1,12).Value+
Sheets(3).Cells(2,2).Value
End If
End Sub
Sub Llenar_Indices()
For i = 1 Toctemporales
Sheets(3).Cells(i+1,1).Value = Sheets(2).Cells(i+1,1).Value
Next i
For j = 1 Toctemporales
Sheets(3).Cells(1, j + 1).Value=Sheets(2).Cells(1,j+1).Value
Next j
For i = 1 Toctemporales
Sheets(4).Cells(i+1,1).Value = Sheets(3).Cells(i+1,1).Value
Next i
For j = 1 Toctemporales
Sheets(4).Cells(1,j+1).Value = Sheets(3).Cells(1,j+1).Value
Next j
For i = 1 Toctemporales + 1
```

```
    For j = 1 Toctemporales + 1
        If i = j Then
            Sheets(3).Cells(i,j).Value = 1000000
        End If
    Next j
Next i
```

End Sub

Sub Minimof(h As Integer)

```
    For i = 1 Toctemporales - n
        Minf(i) = Sheets(h).Cells(i+1,2).Value
        For j = 1 Toctemporales - n
            If Minf(i) > Sheets(h).Cells(i+1,j+1).Value Then
                Minf(i) = Sheets(h).Cells(i+1,j+1).Value
            End If
        Next j
        hf = hf + Minf(i)
    Next i
```

End Sub

Sub Restar_Minimof(h As Integer)

```
    For i = 1 Toctemporales - n
        For j = 1 Toctemporales - n
            If Sheets(h).Cells(i+1,j+1).Value <> 1000000 Then
                Sheets(3).Cells(i+1,j+1).Value =
                Sheets(h).Cells(i+1,j+1).Value - Minf(i)
            End If
        Next j
    Next i
```

End Sub

Sub Minimoc()

```
    For j = 1 Toctemporales - n
```

```
Minc(j) = Sheets(3).Cells(2,j+1).Value
  For i = 1 Toctemporales - n
    If Minc(j) > Sheets(3).Cells(i+1,j+1).Value Then
Minc(j) = Sheets(3).Cells(i+1,j+1).Value
    End If
  Next i
hc = hc + Minc(j)
Next j
End Sub
```

```
Sub Restar_Minimoc()
For j = 1 Toctemporales - n
  For i = 1 Toctemporales - n
    If Sheets(3).Cells(i+1,j+1).Value <> 1000000 Then
Sheets(3).Cells(i+1,j+1).Value = Sheets(3).Cells(i+1,j+1).Value -
Minc(j)
    End If
  Next i
Next j
End Sub
```

```
Sub MostrarSumar()
Sheets(5).Cells(1,10).Value = hf
Sheets(5).Cells(1,11).Value = hc
Sheets(5).Cells(1,12).Value = (hf+hc)
End Sub
```

```
Sub Calcular()
Dimicol, ifil, MinCol, MinFil, contInfinitos As Integer
w0 = -1
contInfinitos = 0
contInfinitos1 = 0
Sheets(4).Activate
ActiveSheet.Range("B2:AZ1000").ClearContents
For i = 1 Toctemporales - n
  For j = 1 Toctemporales - n
```

```
    If Sheets(3).Cells(i+1,j+1).Value = 0 Then
    icol = j + 1
    ifil = i + 1
    MinCol = 10000
    MinFil = 10000
        For h = 1 Toctemporales - n
            If h + 1 <>icol Then
                If MinFil>Sheets(3).Cells(ifil,h+1).Value Then
    MinFil = Sheets(3).Cells(ifil,h+1).Value
                End If
            Else
                End If
        Next h
        For k = 1 Toctemporales - n
            If k + 1 <>ifil Then
                If MinCol>Sheets(3).Cells(k+1,icol).Value Then
    MinCol = Sheets(3).Cells(k+1,icol).Value
                End If
            Else
                End If
        Next k
    Sheets(4).Cells(i+1,j+1).Value = MinFil + MinCol
    End If
    If w0 <Sheets(4).Cells(i+1,j+1).Value Then
        w0 = Sheets(4).Cells(i+1,j+1)
    ielim = i
    jelim = j
    Else
        If w0 = Sheets(4).Cells(i+1,j+1).Value Then
            For k = 1 Toctemporales - n
                If Sheets(3).Cells(k+1,j+1).Value = 1000000 Then
    contInfinitos = contInfinitos + 1
                End If
                If Sheets(3).Cells(k+1,jelim).Value = 1000000 Then
                    contInfinitos1 = contInfinitos1 + 1
                End If
            End If
        End If
    End If
```

```
        Next k
        For h = 1 To ctemporales - n
            If Sheets(3).Cells(i+1,h+1).Value = 1000000 Then
contInfinitos = contInfinitos + 1
            End If
            If Sheets(3).Cells(ielim,h+1).Value = 1000000 Then
                contInfinitos1 = contInfinitos1 + 1
            End If
        Next h
        If contInfinitos > contInfinitos1 Then
            w0 = Sheets(4).Cells(i+1,j+1)
ielim = i
jelim = j
            End If
        End If
    End If
Next j
Next i
Call Verificar_Rutas

If Recalcular = False Then
Sheets(5).Cells(n+1,1).Value = Sheets(3).Cells(ielim+1,1) 'Esta es la
solución en un sentido de recorrido.
Sheets(5).Cells(n+1,2).Value = Sheets(3).Cells(1,jelim+1)

Sheets(5).Cells(n+1,5).Value = Sheets(3).Cells(ielim+1,1) 'Esta es la
solución en el otro sentido de recorrido.
Sheets(5).Cells(n+1,4).Value = Sheets(3).Cells(1,jelim+1)
EndIf

End Sub

Sub Verificar_Rutas()

Dim llegada, jllegada As Integer 'Coordenadas del nuevo punto en La Hoja 7
Dim arco As Integer 'Tramo de un punto a otro
```

Dim salsanave As Boolean

```
If subrutas = 0 Then
  Sheets(7).Cells(1,1).Value = Sheets(3).Cells(ielim+1,1) 'Esto es la
  ida de la primer iteracion
  Sheets(7).Cells(1,2).Value = Sheets(3).Cells(1,jelim+1)
  subrutas = 1 'Una subruta es un par de columnas origen-destino
Else
  salsanave = False
  controla = 1
  For c = 1 To subrutas
    arco = 0
    For y = 1 To n 'No puede haber mas arcos que iteraciones
      If Sheets(7).Cells(y,2*c) <> 0 Then 'Cuenta las celdas no vacias
        arco = arco + 1
      End If
    Next y
    If Sheets(3).Cells(ielim+1,1) = Sheets(7).Cells(arco,2*c) Then 'Si el
    origen del nuevo arco es igual al destino del ultimo arco de la
    subruta
      salsanave = True 'Variable de control
      If Sheets(3).Cells(1,jelim+1) <> Sheets(7).Cells(1,2*c-1) Then 'si el
      destino del nuevo arco es distinto al punto de inicio de la subruta
        Sheets(7).Cells(arco+1,2*c-1) = Sheets(3).Cells(ielim+1,1) 'Coloco el
        nuevo arco en la subruta
        Sheets(7).Cells(arco+1,2*c) = Sheets(3).Cells(1, jelim+1)
        illegada = arco + 1
        jllegada = 2 * c
      Exit For
    Else
      Sheets(3).Cells(ielim+1,jelim+1) = 1000000
      Recalcular = True
    End If
  Next c
  If controla = subrutas Then
```

```
Sheets(7).Cells(1,2*(subrutas+1))=Sheets(3).Cells(ielim+1,1)
Sheets(7).Cells(1,2*(subrutas+1))=Sheets(3).Cells(1,jelim+1)
EndIf
controla = controla + 1
illegada = 1
jllegada = 2 * (subrutas + 1)
End If
    Next c
    If salsanave = False Then
Recalcular = False
subrutas = c
    End If
    If Recalcular = False Then
CallOrdenar(illegada, jllegada, Recalcular) 'Este procedimiento
verifica que el nuevo arco no cierre el circuito y lo coloca en su
tramo correspondiente.
End If
End If
End Sub
Sub Ordenar(ill, jll As Integer, Rec As Boolean)
Dim c As Integer

For c = 1 To subrutas
arco = 0
For y = 1 To n 'No puede haber mas arcos que iteraciones
If Sheets(7).Cells(y, 2 * c) <> 0 Then 'Cuenta Las celdas no vacias
arco = arco + 1
        End If
    Next y
If Sheets(7).Cells(ill,jll)=Sheets(7).Cells(1,2*c-1) And jll<>(2*c)
Then 'Si el destino del nuevo arco es igual al origen del ultimo arco
de la subruta
If Sheets(7).Cells(1,jll-1)<>Sheets(7).Cells(arco,2*c) Then
        For h = 1 To arco
Sheets(7).Cells(ill+h,jll-1)= Sheets(7).Cells(h, 2*c-1)
Sheets(7).Cells(ill+h,jll)=Sheets(7).Cells(h,2* c)
```

```
                Next h
    Sheets(7).Activate
    Columns(2*c).Select
    Selection.Delete shift:=xlLeft
    Columns(2*c-1).Select
    Selection.Delete shift:=xlLeft
    subrutas = subrutas - 1
                Exit For
            Else
    Sheets(3).Cells(ielim+1,jelim+1) = 1000000
    Sheets(7).Cells(ill,jll).ClearContents
    Sheets(7).Cells(ill,jll-1).ClearContents
    subrutas = subrutas - 1
                Rec = True
                Exit For
            End If
        End If
    Next c
End Sub

Sub Verificar()

    For h = 1 To n + 1
        icolumna = 0
        ifila = 0
            For i = 1 Toctemporales - n
                If Sheets(3).Cells(1,i+1).Value=Sheets(5).Cells(h,5).Value Then
                    icolumna = i + 1
                End If
            Next i
            For j = 1 Toctemporales - n
                If Sheets(3).Cells(j+1,1).Value=Sheets(5).Cells(h, 4).Value
                    Then
                        ifila = j + 1
                    End If
                Next j
            End If
        End If
    Next h
End Sub
```

```
        If icolumna<> 0 And ifila<> 0 Then
            If Sheets(3).Cells(ifila,icolumna).Value = 0 Then
                Sheets(3).Cells(ifila,icolumna).Value = 100000
            End If
        End If
    Next h

End Sub
```

```
Sub eliminar()

    Sheets(3).Select
    Rows(ielim + 1).Select
    Selection.Delete shift:=xlUp
    Columns(jelim + 1).Select
    Selection.Delete shift:=xlLeft

End Sub
```

```
Attribute VB_Name = "Auxiliar"
```

```
Public ciudades, ctemporales As Integer
Public cvciudades(100), vctemporales(100) As Integer
Dim ListBox1 As ListBox
```

```
Sub ContarCiudades()

    Sheets(1).Activate
    ciudades = WorksheetFunction.CountA(Range("A2:A1000"))
End Sub

Sub Checklist()
    Dim iAs Integer
    For i = 1 To ciudades
        UserForm1.ListBox1.AddItem (Sheets(1).Cells(i + 1, 1))
    Next i
    UserForm1.Show
End Sub
```

End Sub

SubMatriz()

Dim c As Integer

nprima = ciudades - ctemporales

For i = 1 To ciudades + 1

For j = 1 To ciudades + 1

If i = j Then

Sheets(1).Cells(i, j).Value = 1000000

End If

Sheets(2).Cells(i, j).Value = Sheets(1).Cells(i, j).Value

Next j

Next i

If nprima <> 0 Then

Sheets(2).Select

t = -1

For k = 1 To nprima

c = vctemporales(k) - t

Rows(c).Select

Selection.Delete shift:=xlUp

Columns(c).Select

Selection.Delete shift:=xlLeft

t = t + 1

Next k

End If

End Sub

Sub Resultado()

Dim ifila(100), icolumna(100) As Double

Sum = 0

For i = 1 To ctemporales

```
        ifila(i) = Sheets(5).Cells(i, 1).Value
        icolumna(i) = Sheets(5).Cells(i, 2).Value
        Sheets(5).Cells(i, 7).Value = Sheets(1).Cells(ifila(i) + 1,
        icolumna(i) + 1).Value
        Sum = Sheets(5).Cells(i, 7).Value + Sum
    Next i
    Sheets(5).Cells(1, 8).Value = Sum
End Sub

Sub mostrar()
    Sheets(5).Cells(1, 16) = "ORIGEN"
    Sheets(5).Cells(1, 17) = "DESTINO"
    Sheets(5).Cells(1, 18) = "DISTANCIA"
    suma = 0
    For i = 1 To ctemporales
        org = Sheets(7).Cells(i, 1)
        des = Sheets(7).Cells(i, 2)
        Sheets(5).Cells(i + 1, 16) = Sheets(6).Cells(org, 2)
        Sheets(5).Cells(i + 1, 17) = Sheets(6).Cells(des, 2)
        Sheets(5).Cells(i + 1, 18) = Sheets(1).Cells(org + 1, des + 1)
        suma = suma + Sheets(1).Cells(org + 1, des + 1)
    Next i
    Sheets(5).Cells(ctemporales + 2, 17) = "TOTAL"
    Sheets(5).Cells(ctemporales + 2, 18) = suma 'Range("R2:R"
    &ctemporales)
    Sheets(5).Activate
    UserForm2.ListBox1.RowSource = "P1:R" &ctemporales + 2
    UserForm2.Show
End Sub

Attribute VB_Name = "UserForm1"
Private Sub CommandButton2_Click()

    For i = 0 To ListBox2.ListCount - 1
        ListBox2.Clear
    Next i
```

```
        For i = 0 To ListBox1.ListCount - 1
posicion = i
            For j = 0 To ListBox2.ListCount - 1
                If ListBox1.List(posicion, 1) = ListBox2.List(j, 1) Then
MsgBox "Ese punto ya fue seleccionado"
Exit Sub
                Else
                    End If
            Next j
            ListBox2.AddItem ListBox1.List(posicion, 0)
            e = i
ListBox2.List(e, 1) = ListBox1.List(posicion, 1)
        Next i

End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()
    For i = 0 To ListBox2.ListCount - 1
        ListBox2.Clear
    Next i
End Sub

Private Sub CommandButton4_Click()
    If ListBox2.ListIndex = -1 Then Exit Sub
    With ListBox2
        .RemoveItem .ListIndex
        .ListIndex = -1
    End With

End Sub

Private Sub Iniciar_Click()
Dim nprima As Integer

Application.ScreenUpdating = False
For i = 0 To ListBox2.ListCount - 1
```

```
vciudades(i) = ListBox2.List(i, 0)
Next i
ctemporales = ListBox2.ListCount
nprima = ciudades - ctemporales
If ctemporales = 0 Then
MsgBox "Primero seleccione los puntos que desea recorrer"
Exit Sub
Else
End If
cctemp = 1
For i = 0 To ListBox1.ListCount - 1
contador = 0
    For j = 0 To ListBox2.ListCount - 1
        If ListBox1.List(i, 1) <> ListBox2.List(j, 1) Then
contador = contador + 1
        End If
    Next j
    If contador = ctemporales Then
vctemporales(cctemp) = ListBox1.List(i, 0)
        If cctemp <> nprima Then
cctemp = cctemp + 1
        End If
    End If
Next i
Sheets(5).Activate
ActiveSheet.Range("A1:AZ1000").ClearContents
Sheets(7).Activate
ActiveSheet.Range("A1:AZ1000").ClearContents
Call Matriz
Call Programa
Call mostrar
End Sub

Private Sub ListBox1_Click()
```

```
For i = 0 To ListBox1.ListCount - 1
    If ListBox1.Selected(i) Then
    posicion = ListBox1.ListIndex
        For j = 0 To ListBox2.ListCount - 1
            If ListBox1.List(posicion, 1) = ListBox2.List(j, 1) Then
                MsgBox "Ese punto ya fue seleccionado"
                Exit Sub
            Else
                End If
        Next j
        ListBox2.AddItem ListBox1.List(posicion, 0)
        e = ListBox2.ListCount - 1
        ListBox2.List(e, 1) = ListBox1.List(posicion, 1)
    End If
Next i

End Sub

Private Sub SpinButton1_Change()

If SpinButton1.Value = 11 Then
    SpinButton1.Value = 1
End If
If SpinButton1.Value = 0 Then
    SpinButton1.Value = 10
End If

i = SpinButton1.Value
Image1.Picture = LoadPicture("C:\Users\Ruy\Desktop\TSP Solver\" &i&
".jpg")
Label3.Caption = "Zona: " &Sheets(6).Cells(i, 4)

End Sub

Public Sub UserForm_Activate()
```

```
For i = 0 To ListBox2.ListCount - 1
    ListBox2.Clear
Next i
i = 1
Image1.Picture = LoadPicture("C:\Users\Ruy\Desktop\TSP Solver\" &i&
".jpg")
Label3.Caption = "Zona: Total"
ListBox1.ColumnCount = 2
Call ContarCiudades
Sheets("Nombres").Activate
ListBox1.RowSource = "A1:B" &ciudades

End Sub

Attribute VB_Name = "UserForm2"

Private Sub CommandButton1_Click()

UserForm2.Hide
i = 0
    For i = 0 To UserForm1.ListBox2.ListCount - 1
        UserForm1.ListBox2.Clear
    Next i

End Sub
```

6. II. Distancia entre campos.

A continuación se muestran las tablas completas de las distancias entre todos los campos que componen la cartera de clientes.

Mejora del Servicio de Agricultura de Precisión mediante el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	∞	213,00	25,10	29,80	116,00	73,60	172,00	154,00	31,30	41,50	33,20	78,40	231,00	179,00	110,00	176,00	224,00	173,00	172,00	260,00	222,00	31,20	283,00	373,00	362,00
2	213,00	∞	151,80	146,00	122,70	143,50	133,10	141,90	155,50	158,50	157,80	150,00	24,50	140,80	151,80	35,10	167,00	38,30	42,10	187,90	190,60	155,50	158,80	125,10	137,40
3	25,10	151,80	∞	7,40	31,50	25,20	111,30	105,10	7,60	11,20	7,10	33,30	173,30	114,30	58,20	120,00	207,81	117,05	115,00	230,02	198,9	7533,00	234,78	258,48	283,49
4	29,80	146,00	7,40	∞	53,90	59,70	158,00	207,00	17,30	27,50	29,70	39,40	236,00	140,00	95,90	181,00	233,00	178,00	177,00	269,00	231,00	17,20	292,00	251,46	276,91
5	116,00	122,70	31,50	53,90	∞	22,82	88,61	85,10	33,40	36,01	36,22	32,58	145,18	93,10	49,48	92,78	200,85	90,22	88,86	223,83	198,43	33,40	221,95	234,95	257,04
6	73,60	143,50	25,20	59,70	22,82	∞	84,02	77,73	23,97	24,36	27,62	11,34	164,24	86,92	32,85	112,75	220,70	110,34	109,28	243,53	216,28	23,97	242,97	255,73	276,75
7	172,00	133,10	111,30	158,00	88,61	84,02	∞	12,39	108,19	107,34	111,33	81,41	156,95	7,64	60,17	123,74	268,57	124,19	125,45	291,80	275,31	107,70	277,42	258,09	265,21
8	154,00	141,90	105,10	207,00	85,10	77,73	12,39	∞	110,73	109,65	104,41	73,72	166,00	10,01	50,90	130,03	271,68	129,40	131,12	294,96	276,56	110,26	282,56	266,96	275,42
9	31,30	155,50	7,60	17,30	33,40	23,97	108,19	110,73	∞	3,60	3,14	28,15	177,90	110,73	52,97	124,77	215,36	122,00	120,14	237,59	206,44	0,50	242,09	264,44	288,74
10	41,50	158,50	11,20	27,50	36,01	24,36	107,34	109,65	3,60	∞	5,28	26,52	180,54	109,65	51,11	127,54	218,99	124,81	123,02	241,21	209,96	3,63	245,69	267,60	291,61
11	33,20	157,80	7,10	29,70	36,22	27,62	111,33	104,41	3,14	5,28	∞	31,16	179,53	113,85	55,93	121,99	214,55	123,49	121,53	236,68	205,05	3,14	241,83	265,39	290,01
12	78,40	150,00	33,30	39,40	32,58	11,34	81,41	73,72	28,15	26,52	31,16	∞	173,43	83,36	24,89	122,64	231,91	120,34	119,47	254,70	226,96	28,15	254,31	266,06	286,26
13	231,00	24,50	173,30	236,00	145,18	164,24	156,95	166,00	177,90	180,54	179,53	173,43	∞	164,59	175,71	53,62	159,39	56,64	59,43	178,77	187,48	177,89	144,60	101,17	113,17
14	179,00	140,80	114,30	140,00	93,10	86,92	7,64	10,01	110,73	109,65	113,85	83,36	164,59	∞	60,84	131,41	275,71	131,02	133,04	298,96	281,93	110,73	284,97	265,74	272,56
15	110,00	151,80	58,20	95,90	49,48	32,85	60,17	50,90	52,97	51,11	55,93	24,89	175,71	60,84	∞	128,46	250,00	126,64	126,63	273,06	247,77	52,97	269,14	272,34	288,83
16	176,00	35,10	120,00	181,00	92,78	112,75	123,74	130,03	124,77	127,54	121,99	122,64	53,62	131,41	128,46	∞	152,25	3,25	7,41	174,73	169,28	124,77	154,43	144,01	164,27
17	224,00	167,00	207,81	233,00	200,85	220,70	268,57	271,68	215,36	218,99	214,55	231,91	159,39	275,71	250,00	152,25	∞	141,18	147,76	23,29	42,10	215,36	48,74	143,22	188,86
18	173,00	38,30	117,05	178,00	90,22	110,34	124,19	129,40	122,00	124,81	123,49	120,34	56,64	131,02	126,64	3,25	141,18	∞	4,46	173,77	167,51	122,00	154,39	146,03	166,89
19	172,00	42,10	115,00	177,00	88,86	109,28	125,45	131,12	120,14	123,02	121,53	119,47	59,43	133,04	126,63	7,41	147,76	4,46	∞	170,45	163,49	120,14	152,08	146,62	168,60
20	260,00	187,90	230,02	269,00	223,83	243,53	291,80	294,96	237,59	241,21	236,68	254,70	178,77	298,96	273,06	174,73	23,29	173,77	170,45	∞	47,92	237,59	50,37	151,12	197,08
21	222,00	190,60	198,9	231,00	198,43	216,28	275,31	276,56	206,44	209,96	205,05	226,96	187,48	281,93	247,77	169,28	42,10	167,51	163,49	47,92	∞	206,44	90,48	184,21	229,48
22	31,20	155,50	7533,00	17,20	33,40	23,97	107,70	110,26	0,50	3,63	3,14	28,15	177,89	110,73	52,97	124,77	215,36	122,00	120,14	237,59	206,44	∞	242,09	264,44	288,74
23	283,00	158,80	234,78	292,00	221,95	242,97	277,42	282,56	242,09	245,69	241,83	254,31	144,60	284,97	269,14	154,43	48,74	154,39	152,08	50,37	90,48	242,09	∞	101,25	147,14
24	373,00	125,10	258,48	251,46	234,95	255,73	258,09	266,96	264,44	267,60	265,39	266,06	101,17	265,74	272,34	144,01	143,22	146,03	146,62	151,12	184,21	264,44	101,25	∞	45,97
25	362,00	137,40	283,49	276,91	257,04	276,75	265,21	275,42	288,74	291,61	290,01	286,26	113,17	272,56	288,83	164,27	188,86	166,89	168,60	197,08	229,48	288,74	147,14	45,97	∞

Tabla II.1. Distancia entre Nodos 1-25 a 1-25.

Fuente: Elaboración Propia.

Mejora del Servicio de Agricultura de Precisión mediante el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
26	30,20	162,00	11853,00	19,27	39,90	29,03	111,87	104,51	6,00	4,67	4,73	30,83	183,84	114,09	55,17	130,68	218,94	127,90	126,00	241,01	209,02	6,00	246,45	270,04	294,58
27	222,00	17,50	166,12	160,05	137,92	156,93	150,23	159,32	170,69	173,32	172,36	166,11	7,33	158,09	168,44	46,66	159,51	49,74	52,69	179,44	186,25	170,69	146,94	107,68	120,48
28	175,00	36,20	118,86	116,04	91,82	111,83	123,47	129,67	123,75	126,53	125,26	121,75	54,69	131,13	127,72	1,11	152,01	2,15	6,43	174,50	168,79	123,75	154,55	144,80	165,24
29	173,00	39,30	116,65	110,31	90,01	109,28	124,19	130,11	121,66	124,49	123,11	120,30	57,25	131,81	126,86	4,32	150,00	1,33	3,16	172,64	166,23	121,66	153,49	145,96	167,16
30	170,00	55,00	251,50	98,78	81,21	102,21	127,24	131,79	111,05	114,10	112,22	112,84	71,21	134,65	122,28	20,21	142,52	17,06	12,86	165,54	155,59	111,05	150,86	153,82	178,18
31	226,00	16,30	167,66	161,67	138,89	157,44	147,43	156,64	172,00	174,53	173,76	166,35	9,88	155,05	167,71	49,21	166,07	52,38	55,70	185,97	192,73	172,00	153,15	110,81	121,19
32	47,90	143,60	43,16	37,10	54,02	65,01	142,60	138,97	50,56	54,00	48,99	74,19	161,17	147,11	97,86	108,69	167,39	105,48	102,10	189,03	156,12	50,56	198,08	234,34	264,63
33	46,00	144,80	42,83	36,91	54,45	65,06	143,05	139,32	50,20	53,61	48,56	74,12	162,41	147,51	97,90	109,91	168,18	106,69	103,33	189,76	156,64	50,20	199,05	235,55	265,87
34	78,60	141,10	27,37	29,65	21,39	2,76	84,02	77,73	24,49	24,36	27,61	11,34	164,24	86,92	32,85	112,75	220,70	110,34	109,28	243,53	216,28	24,50	242,97	255,75	276,75
35	307,00	85,30	225,19	218,46	199,79	220,05	217,96	227,05	230,70	233,68	231,92	230,00	61,05	225,59	234,65	107,35	145,76	109,71	110,94	159,20	183,12	230,70	113,75	40,51	59,49
36	232,80	167,70	309,83	303,01	284,67	304,90	297,55	307,05	315,44	318,46	316,60	314,77	143,26	304,97	318,72	192,16	193,03	194,56	195,81	197,35	234,89	315,44	147,11	55,17	33,76
37	365,00	120,00	271,76	265,90	242,61	260,47	234,94	246,12	275,98	274,44	277,80	268,76	99,35	241,81	267,20	152,84	217,36	155,92	158,77	229,58	255,14	275,98	181,91	85,05	50,11
38	430,00	171,60	314,33	307,53	289,01	309,18	300,90	310,94	319,90	322,91	321,09	318,99	147,30	308,29	322,72	196,43	198,02	198,86	200,17	202,18	239,89	319,90	151,97	60,22	36,21
39	312,00	93,70	233,03	226,24	207,87	228,21	226,38	235,50	238,60	241,61	239,78	238,20	69,50	234,00	243,03	115,56	146,48	117,38	119,02	158,85	184,79	238,60	112,12	32,40	52,84
40	330,00	112,20	258,83	252,31	232,10	251,71	240,67	250,73	263,98	266,82	265,38	261,17	88,01	248,07	263,67	139,36	176,86	142,03	143,85	187,66	216,05	263,98	139,15	41,62	25,17
41	212,00	166,70	182,52	175,57	179,39	198,12	253,70	255,45	190,10	193,68	188,97	209,02	163,90	260,47	228,86	145,59	33,30	143,88	139,91	50,19	23,91	190,10	80,26	166,78	211,25
42	319,00	88,40	233,34	226,79	206,89	228,79	219,22	228,85	238,56	241,44	239,93	236,30	63,95	226,74	239,54	114,11	160,43	116,72	118,42	173,59	197,86	238,56	127,50	44,43	50,18
43	106,00	107,20	47,63	43,83	16,26	36,48	81,84	80,54	50,18	52,18	52,48	44,34	130,00	87,34	54,93	78,41	196,36	76,05	75,12	219,59	197,34	50,18	214,23	221,72	242,40
44	110,00	87,70	66,70	60,11	43,50	66,30	108,91	110,10	72,21	75,27	73,39	75,92	107,58	115,41	89,01	53,97	163,00	50,96	48,54	186,27	166,54	72,21	180,13	192,44	216,82
45	168,00	38,40	115,63	109,44	88,36	110,33	120,20	126,27	120,44	123,19	121,99	118,16	57,74	127,84	124,05	4,48	154,28	3,22	6,82	176,90	170,03	120,44	157,60	148,46	168,69
46	179,00	33,50	122,31	116,03	95,32	117,35	125,97	132,37	127,22	130,01	128,73	125,23	51,36	133,64	131,06	2,61	150,90	5,29	9,00	173,30	168,50	127,22	152,45	141,40	161,74
47	179,00	33,20	122,17	115,93	95,06	117,02	125,24	131,67	127,05	129,83	128,57	124,89	51,38	132,92	130,59	2,28	151,72	5,31	8,66	174,11	169,29	127,05	153,23	141,84	161,98
48	171,00	43,70	112,53	106,14	82,24	108,56	123,19	128,74	117,62	120,49	119,04	116,80	61,60	170,76	123,96	8,60	149,37	5,35	2,68	172,13	164,52	117,62	154,25	149,30	171,13
49	352,00	119,80	268,64	262,27	241,24	262,67	245,33	255,76	273,57	276,73	275,08	269,64	96,23	252,59	271,06	148,81	190,82	151,60	153,69	201,37	230,08	273,57	152,58	53,36	21,54
50	146,00	57,80	94,13	88,28	65,93	87,69	103,62	108,25	98,56	101,18	100,26	95,44	79,36	111,03	101,81	27,20	165,73	25,02	24,84	188,84	176,76	98,56	174,72	171,05	191,21

Tabla II.2. Distancia entre Nodos 26-50 a 1-25.
Fuente: Elaboración Propia.

Mejora del Servicio de Agricultura de Precisión mediante el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados

	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
1	30,20	222,00	175,00	173,00	170,00	226,00	47,90	46,00	78,60	307,00	232,80	365,00	430,00	312,00	330,00	212,00	319,00	106,00	110,00	168,00	179,00	179,00	171,00	352,00	146,00
2	162,00	17,50	36,20	39,30	55,00	16,30	143,60	144,80	141,10	85,30	167,70	120,00	171,60	93,70	112,20	166,70	88,40	107,20	87,70	38,40	33,50	33,20	43,70	119,80	57,80
3	11,85	166,12	118,86	116,65	251,50	167,66	43,16	42,83	27,37	225,19	309,83	271,76	314,33	233,03	258,83	182,52	233,34	47,63	66,70	115,63	122,31	122,17	112,53	268,64	94,13
4	19,27	160,05	116,04	110,31	98,78	161,67	37,10	36,91	29,65	218,46	303,01	265,90	307,53	226,24	252,31	175,57	226,79	43,83	60,11	109,44	116,03	115,93	106,14	262,27	88,28
5	39,90	137,92	91,82	90,01	81,21	138,89	54,02	54,45	21,39	199,79	284,67	242,61	289,01	207,87	232,10	179,39	206,89	16,26	43,50	88,36	95,32	95,06	82,24	241,24	65,93
6	29,03	156,93	111,83	109,28	102,21	157,44	65,01	65,06	2,76	220,05	304,90	260,47	309,18	228,21	251,71	198,12	228,79	36,48	66,30	110,33	117,35	117,02	108,56	262,67	87,69
7	111,87	150,23	123,47	124,19	127,24	147,43	142,60	143,05	84,02	217,96	297,55	234,94	300,90	226,38	240,67	253,70	219,22	81,84	108,91	120,20	125,97	125,24	123,19	245,33	103,62
8	104,51	159,32	129,67	130,11	131,79	156,64	138,97	139,32	77,73	227,05	307,05	246,12	310,94	235,50	250,73	255,45	228,85	80,54	110,10	126,27	132,37	131,67	128,74	255,76	108,25
9	6,00	170,69	123,75	121,66	111,05	172,00	50,56	50,20	24,49	230,70	315,44	275,98	319,90	238,60	263,98	190,10	238,56	50,18	72,21	120,44	127,22	127,05	117,62	273,57	98,56
10	4,67	173,32	126,53	124,49	114,10	174,53	54,00	53,61	24,36	233,68	318,46	274,44	322,91	241,61	266,82	193,68	241,44	52,18	75,27	123,19	130,01	129,83	120,49	276,73	101,18
11	4,73	172,36	125,26	123,11	112,22	173,76	48,99	48,56	27,61	231,92	316,60	277,80	321,09	239,78	265,38	188,97	239,93	52,48	73,39	121,99	128,73	128,57	119,04	275,08	100,26
12	30,83	166,11	121,75	120,30	112,84	166,35	74,19	74,12	11,34	230,00	314,77	268,76	318,99	238,20	261,17	209,02	236,30	44,34	75,92	118,16	125,23	124,89	116,80	269,64	95,44
13	183,84	7,33	54,69	57,25	71,21	9,88	161,17	162,41	164,24	61,05	143,26	99,35	147,30	69,50	88,01	163,90	63,95	130,00	107,58	57,74	51,36	51,38	61,60	96,23	79,36
14	114,09	158,09	131,13	131,81	134,65	155,05	147,11	147,51	86,92	225,59	304,97	241,81	308,29	234,00	248,07	260,47	226,74	87,34	115,41	127,84	133,64	132,92	170,76	252,59	111,03
15	55,17	168,44	127,72	126,86	122,28	167,71	97,86	97,90	32,85	234,65	318,72	267,20	322,72	243,03	263,67	228,86	239,54	54,93	89,01	124,05	131,06	130,59	123,96	271,06	101,81
16	130,68	46,66	1,11	4,32	20,21	49,21	108,69	109,91	112,75	107,35	192,16	152,84	196,43	115,56	139,36	145,59	114,11	78,41	53,97	4,48	2,61	2,28	8,60	148,81	27,20
17	218,94	159,51	152,01	150,00	142,52	166,07	167,39	168,18	220,70	145,76	193,03	217,36	198,02	146,48	176,86	33,30	160,43	196,36	163,00	154,28	150,90	151,72	149,37	190,82	165,73
18	127,90	49,74	2,15	1,33	17,06	52,38	105,48	106,69	110,34	109,71	194,56	155,92	198,86	117,38	142,03	143,88	116,72	76,05	50,96	3,22	5,29	5,31	5,35	151,60	25,02
19	126,00	52,69	6,43	3,16	12,86	55,70	102,10	103,33	109,28	110,94	195,81	158,77	200,17	119,02	143,85	139,91	118,42	75,12	48,54	6,82	9,00	8,66	2,68	153,69	24,84
20	241,01	179,44	174,50	172,64	165,54	185,97	189,03	189,76	243,53	159,20	197,35	229,58	202,18	158,85	187,66	50,19	173,59	219,59	186,27	176,90	173,30	174,11	172,13	201,37	188,84
21	209,02	186,25	168,79	166,23	155,59	192,73	156,12	156,64	216,28	183,12	234,89	255,14	239,89	184,79	216,05	23,91	197,86	197,34	166,54	170,03	168,50	169,29	164,52	230,08	176,76
22	6,00	170,69	123,75	121,66	111,05	172,00	50,56	50,20	24,50	230,70	315,44	275,98	319,90	238,60	263,98	190,10	238,56	50,18	72,21	120,44	127,22	127,05	117,62	273,57	98,56
23	246,45	146,94	154,55	153,49	150,86	153,15	198,08	199,05	242,97	113,75	147,11	181,91	151,97	112,12	139,15	80,26	127,50	214,23	180,13	157,60	152,45	153,23	154,25	152,58	174,72
24	270,04	107,68	144,80	145,96	153,82	110,81	234,34	235,55	255,75	40,51	55,17	85,05	60,22	32,40	41,62	166,78	44,43	221,72	192,44	148,46	141,40	141,84	149,30	53,36	171,05
25	294,58	120,48	165,24	167,16	178,18	121,19	264,63	265,87	276,75	59,49	33,76	50,11	36,21	52,84	25,17	211,25	50,18	242,40	216,82	168,69	161,74	161,98	171,13	21,54	191,21

Tabla II.3. Distancia entre Nodos 1-25 a 26-50.

Fuente: Elaboración Propia.

Mejora del Servicio de Agricultura de Precisión mediante el uso de Vehículos Aéreos no Tripulados

	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
26	∞	176,65	129,66	127,54	116,79	177,98	52,89	52,40	29,03	236,47	321,18	281,97	325,66	244,35	269,85	193,15	244,41	56,14	77,95	126,36	132,96	133,13	123,49	279,49	104,52
27	176,65	∞	47,75	50,40	64,72	6,56	154,66	155,89	156,93	67,80	150,45	106,18	154,35	76,26	95,32	162,53	71,16	122,71	100,61	50,71	44,47	44,45	54,78	103,55	72,14
28	129,66	47,75	∞	3,29	19,17	50,31	107,58	108,80	111,83	108,24	193,07	153,93	197,34	116,44	140,34	145,13	115,08	77,51	52,89	3,68	3,50	3,32	7,50	149,82	26,34
29	127,54	50,40	3,29	∞	15,89	53,18	104,63	105,85	110,24	109,82	194,69	156,56	199,01	117,97	142,33	142,61	116,98	75,98	50,42	4,26	5,97	6,14	4,42	151,99	25,12
30	116,79	64,72	19,17	15,89	∞	68,11	89,97	91,20	102,21	119,71	204,39	170,44	208,87	127,56	153,71	132,14	128,12	68,81	38,84	18,27	21,50	21,87	11,89	164,06	23,62
31	177,98	6,56	50,31	53,18	68,11	∞	157,79	159,01	157,44	70,54	151,87	104,13	155,63	78,95	96,04	168,99	72,63	123,41	102,84	52,94	47,21	47,08	57,60	103,50	73,54
32	52,89	154,66	107,58	104,63	89,97	157,79	∞	1,24	65,01	205,19	287,93	260,30	292,70	212,35	240,99	140,58	215,38	63,12	57,75	105,22	110,60	110,76	100,21	252,24	88,68
33	52,40	155,89	108,80	105,85	91,20	159,01	1,24	∞	65,06	206,43	289,15	261,54	293,92	213,58	242,23	141,23	216,62	63,80	58,88	106,43	111,97	111,82	101,43	243,48	89,83
34	29,03	156,93	111,83	110,24	102,21	157,44	65,01	65,06	∞	220,05	304,90	260,47	309,18	228,21	251,71	198,08	226,70	34,36	64,87	108,28	115,32	115,01	106,63	260,46	85,61
35	236,47	67,80	108,24	109,82	119,71	70,54	205,19	206,43	220,05	∞	84,88	72,03	89,25	8,47	37,15	162,38	14,74	185,74	158,53	111,82	104,76	105,10	113,55	50,34	134,55
36	321,18	150,45	193,07	194,69	204,39	151,87	287,93	289,15	304,90	84,88	∞	81,00	5,11	76,85	56,98	219,15	79,31	270,57	243,23	196,63	189,58	189,90	198,43	55,27	219,35
37	281,97	106,18	153,93	156,56	170,44	104,13	260,30	261,54	260,47	72,03	81,00	∞	81,73	70,92	43,62	234,33	57,29	226,87	206,67	159,84	150,64	150,63	160,93	32,34	177,65
38	325,66	154,35	197,34	199,01	208,87	155,63	292,70	293,92	309,18	89,25	5,11	81,73	∞	81,31	60,23	224,22	83,19	274,84	247,71	200,89	193,85	194,16	202,77	57,48	223,59
39	244,35	76,26	116,44	117,97	127,56	78,95	212,35	213,58	228,21	8,47	76,85	70,92	81,31	∞	32,34	164,63	15,77	193,93	166,64	120,04	112,97	113,32	121,64	46,16	142,77
40	269,85	95,32	140,34	142,33	153,71	96,04	240,99	242,23	251,71	37,15	56,98	43,62	60,23	32,34	∞	196,40	25,65	217,37	192,20	143,76	136,85	137,07	146,35	14,03	166,23
41	193,15	162,53	145,13	142,61	132,14	168,99	140,58	141,23	198,08	162,38	219,15	234,33	224,22	164,63	196,40	∞	177,08	177,13	145,37	146,71	144,77	145,56	141,01	210,42	153,91
42	244,41	71,16	115,08	116,98	128,12	72,63	215,38	216,62	226,70	14,74	79,31	57,29	83,19	15,77	25,65	177,08	∞	192,33	166,68	118,58	111,58	111,83	120,95	37,43	141,11
43	56,14	122,71	77,51	75,98	68,81	123,41	63,12	63,80	34,36	185,74	270,57	226,87	274,84	193,93	217,37	177,13	192,33	∞	34,11	73,94	80,99	80,67	72,46	226,20	51,25
44	77,95	100,61	52,89	50,42	38,84	102,84	57,75	58,88	64,87	158,53	243,23	206,67	247,71	166,64	192,20	145,37	166,68	34,11	∞	49,93	56,25	56,21	46,16	202,21	31,04
45	126,36	50,71	3,68	4,26	18,27	52,94	105,22	106,43	108,28	111,82	196,63	159,84	200,89	120,04	143,76	146,71	118,58	73,94	49,93	∞	7,08	6,73	6,46	153,14	22,73
46	132,96	44,47	3,50	5,97	21,50	47,21	110,60	111,97	115,32	104,76	189,58	150,64	193,85	112,97	136,85	144,77	111,58	80,99	56,25	7,08	∞	0,82	10,39	146,36	29,01
47	133,13	44,45	3,32	6,14	21,87	47,08	110,76	111,82	115,01	105,10	189,90	150,63	194,16	113,32	137,07	145,56	111,83	80,67	56,21	6,73	0,82	∞	10,55	146,52	29,45
48	123,49	54,78	7,50	4,42	11,89	57,60	100,21	101,43	106,63	113,55	198,43	160,93	202,77	121,64	146,35	141,01	120,95	72,46	46,16	6,46	10,39	10,55	∞	156,13	22,18
49	279,49	103,55	149,82	151,99	164,06	103,50	252,24	243,48	260,46	50,34	55,27	32,34	57,48	46,16	14,03	210,42	37,43	226,20	202,21	153,14	146,36	146,52	156,13	∞	175,32
50	104,52	72,14	26,34	25,12	23,62	73,54	88,68	89,83	85,61	134,55	219,35	177,65	223,59	142,77	166,23	153,91	141,11	51,25	31,04	22,73	29,01	29,45	22,18	175,32	∞

Tabla II.4. Distancia entre Nodos 26-50 a 26-50.

Fuente: Elaboración Propia.

6. III. Proceso Analítico de Jerarquías

A continuación se presenta la Tabla III.1, donde se muestran las diferentes características de los modelos a analizar.

Modelo	Velocidad (m/s)	Peso (gr)	Autonomía (min)	Dimensiones (mm)	Precio total(€)
DJI Inspire 2	26,10	3440	27	428x428x320	8366
DJI Phantom 3 Professional	16,00	1280	23	216x216x40	5750
DJI Phantom 4 Advanced	13,90	1368	30	216x216x40	6146
ParrotBebop 2	11,11	500	25	215x215x20	4850
Hexo +	13,50	1700	15	435x410x103	5633
Ebee SQ	21,39	1100	55	560x560x280	10590
Parrot Disco PRO AG	21,39	940	30	1150x580x120	4555
Asesor / 5	10,69	1200	50	560*780*340	11352

Tabla III.1. Características de los VANTs.
Fuente: Elaboración propia.

La siguiente tabla presenta los datos de entrada para el análisis del PAJ.

	Velocidad (m/s)	Precio (Euros)	Volumen (m3)	Autonomía (min)
DJI Inspire 2	9,06	8366,00	0,06	27,00
DJI Phantom 3 Professional	5,56	5750,00	0,03	23,00
DJI Phantom 4 Advanced	6,95	6146,00	0,03	30,00
ParrotBebop 2	5,56	4850,00	0,01	25,00
Hexo +	6,75	5633,00	0,04	15,00
Ebee SQ	10,69	10590,00	0,09	55,00
Parrot Disco PRO AG	9,95	4555,00	0,08	30,00
Asesor / 5	5,35	11352,00	0,18	50,00

Tabla III.2. Datos a utilizar en análisis de decisión por jerarquías.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla III.3 muestra el promedio ponderado de cada modelo presentado.

	Velocidad (m/s)	Autonomía (min)	Volumen (m3)	Precio (Euros)	TOTAL
DJI Inspire 1	0,198353464	0,066647891	0,060294047	0,0331	0,10
DJI Phantom 3 Professional	0,030008195	0,042641332	0,15701751	0,1243	0,08
DJI Phantom 4 Advanced	0,069222731	0,107178917	0,15701751	0,1026	0,10
ParrotBebop 2	0,030008195	0,050861071	0,380198719	0,2505	0,15
Hexo +	0,060458085	0,023751189	0,129919443	0,1443	0,09
Ebee SQ	0,333819101	0,327655888	0,043979558	0,0238	0,20
Parrot Disco PRO AG	0,25740929	0,107178917	0,043979558	0,3024	0,22
Asesor / 5	0,02072094	0,274084796	0,027593656	0,0189	0,07
PONDERACION	0,35	0,21	0,10	0,35	1,00

Tabla III.3. Jerarquía de las alternativas.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Tabla III.4 se presenta la comparación pareada entre los mismos criterios.

	Velocidad (m/s)	Precio (Euros)	Volumen (m3)	Autonomía (min)
Velocidad (m/s)	1,00	1,00	3,00	2,00
Precio (Euros)	1,00	1,00	3,00	2,00
Volumen (m3)	0,33	0,33	1,00	0,33
Autonomía (min)	0,50	0,50	3,00	1,00
SUMA	2,83	2,83	10,00	5,33

Tabla III.4. Comparación entre criterios.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla III.5 se muestra la matriz normalizada de comparación entre criterios.

	Matriz Normalizada				Valor Promedio
0,35	0,35	0,30	0,38	0,35	
0,35	0,35	0,30	0,38	0,35	
0,12	0,12	0,10	0,06	0,10	
0,18	0,18	0,30	0,19	0,21	

Tabla III.5. Matriz normalizada de comparación entre criterios.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla III.6 presenta la relación de consistencia entre criterios.

Nmax	=	4,07
IC	=	0,02
IA	=	0,99
RC	=	0,02

Tabla III.6. Relación de consistencia entre criterios.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Tabla III.7 se presenta la comparación pareada entre las alternativas para el criterio velocidad.

Criterio: VELOCIDAD	DJI Inspire 2	DJI Phantom 3 Professional	DJI Phantom 4 Advanced	ParrotBeb op 2	Hexo +	Ebee SQ	Parrot Disco PRO AG	Aseso r / 5
DJI Inspire 2	1,0000	7,0000	5,0000	7,0000	5,0000	0,5000	0,5000	8,0000
DJI Phantom 3 Professional	0,1429	1,0000	0,3333	1,0000	0,3333	0,1111	0,1250	2,0000
DJI Phantom 4 Advanced	0,2000	3,0000	1,0000	3,0000	2,0000	0,1429	0,1667	4,0000
ParrotBebop 2	0,1429	1,0000	0,3333	1,0000	0,3333	0,1111	0,1250	2,0000
Hexo +	0,2000	3,0000	0,5000	3,0000	1,0000	0,1429	0,1667	4,0000
Ebee SQ	2,0000	9,0000	7,0000	9,0000	7,0000	1,0000	2,0000	10,000
Parrot Disco PRO AG	2,0000	8,0000	6,0000	8,0000	6,0000	0,5000	1,0000	9,0000
Asesor / 5	0,1250	0,5000	0,2500	0,5000	0,2500	0,1000	0,1111	1,0000
SUMA	5,8107	32,5000	20,4167	32,5000	21,916	2,6079	4,1944	40,000

Tabla III.7. Comparación pareada en función de la Velocidad.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla III.8 se muestra la matriz normalizada de comparación entre alternativas para el criterio velocidad.

Matriz Normalizada								Promedio
0.17209588	0.21538462	0.244897959	0.21538462	0.22813688	0.19172246	0.1192053	0.2	0.19835346
0.02458513	0.03076923	0.016326531	0.03076923	0.01520913	0.04260499	0.02980132	0.05	0.03000819
0.03441918	0.09230769	0.048979592	0.09230769	0.09125475	0.05477785	0.0397351	0.1	0.06922273
0.02458513	0.03076923	0.016326531	0.03076923	0.01520913	0.04260499	0.02980132	0.05	0.03000819
0.03441918	0.09230769	0.024489796	0.09230769	0.04562738	0.05477785	0.0397351	0.1	0.06045808
0.34419176	0.27692308	0.342857143	0.27692308	0.31939163	0.38344492	0.47682119	0.25	0.3338191
0.34419176	0.24615385	0.293877551	0.24615385	0.27376426	0.19172246	0.2384106	0.225	0.25740929
0.02151199	0.01538462	0.012244898	0.01538462	0.01140684	0.03834449	0.02649007	0.025	0.02072094

Tabla III.8. Matriz normalizada del criterio velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla III.9 presenta la relación de consistencia entre las alternativas para el criterio velocidad.

Nmax	=	8.6206
IC	=	0.088650095
IA	=	1.41
RC	=	0.062872407

Tabla III.9. Relación de consistencia del criterio velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Tabla III.10 se presenta la comparación pareada entre las alternativas para el criterio volumen.

Criterio: VOLUMEN	DJI Inspire 2	DJI Phantom 3 Professional	DJI Phantom 4 Advanced	ParrotBeb op 2	Hexo +	Ebee SQ	Parrot Disco PRO AG	Aseso r / 5
DJI Inspire 2	1.0000	0.2500	0.2500	0.1667	0.3333	2.0000	2.0000	3.0000
DJI Phantom 3 Professional	4.0000	1.0000	1.0000	0.2500	2.0000	4.0000	4.0000	5.0000
DJI Phantom 4 Advanced	4.0000	1.0000	1.0000	0.2500	2.0000	4.0000	4.0000	5.0000
ParrotBebop 2	6.0000	4.0000	4.0000	1.0000	5.0000	7.0000	7.0000	6.0000
Hexo +	3.0000	0.5000	0.5000	0.2000	1.0000	5.0000	5.0000	5.0000
Ebee SQ	0.5000	0.2500	0.2500	0.1429	0.2000	1.0000	1.0000	3.0000
Parrot Disco PRO AG	0.5000	0.2500	0.2500	0.1429	0.2000	1.0000	1.0000	3.0000
Asesor / 5	0.3333	0.2000	0.2000	0.1667	0.2000	0.3333	0.3333	1.0000
SUMA	19.3333	7.4500	7.4500	2.3190	10.933	24.333	24.3333	31.000

Tabla III.10. Comparación pareada en función del volumen.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla III.11 se muestra la matriz normalizada de comparación entre alternativas para el criterio volumen.

Matriz Normalizada								Promedio
0.05172414	0.03355705	0.033557047	0.07186858	0.0304878	0.08219178	0.08219178	0.09677419	0.06029405
0.20689655	0.13422819	0.134228188	0.10780287	0.18292683	0.16438356	0.16438356	0.16129032	0.15701751
0.20689655	0.13422819	0.134228188	0.10780287	0.18292683	0.16438356	0.16438356	0.16129032	0.15701751
0.31034483	0.53691275	0.536912752	0.4312115	0.45731707	0.28767123	0.28767123	0.19354839	0.38019872
0.15517241	0.06711409	0.067114094	0.0862423	0.09146341	0.20547945	0.20547945	0.16129032	0.12991944
0.02586207	0.03355705	0.033557047	0.06160164	0.01829268	0.04109589	0.04109589	0.09677419	0.04397956
0.02586207	0.03355705	0.033557047	0.06160164	0.01829268	0.04109589	0.04109589	0.09677419	0.04397956
0.01724138	0.02684564	0.026845638	0.07186858	0.01829268	0.01369863	0.01369863	0.03225806	0.02759366

Tabla III.11. Matriz normalizada del criterio volumen.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla III.12 presenta la relación de consistencia entre las alternativas para el criterio volumen.

Nmax	=	8.8031
IC	=	0.11473416
IA	=	1.41
RC	=	0.081371745

Tabla III.12. Relación de consistencia del criterio volumen.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Tabla III.13 se presenta la comparación pareada entre las alternativas para el criterio autonomía.

Criterio: AUTONOMÍA	DJI Inspire 2	DJI Phantom 3 Professional	DJI Phantom 4 Advanced	ParrotBeb op 2	Hexo +	Ebee SQ	Parrot Disco PRO AG	Aseso r / 5
DJI Inspire 2	1.0000	2.0000	0.5000	2.0000	3.0000	0.2000	0.5000	0.2000
DJI Phantom 3 Professional	0.5000	1.0000	0.3333	0.5000	3.0000	0.1667	0.3333	0.1667
DJI Phantom 4 Advanced	2.0000	3.0000	1.0000	3.0000	5.0000	0.2500	1.0000	0.2500
ParrotBebop 2	0.5000	2.0000	0.3333	1.0000	3.0000	0.1667	0.3333	0.1667
Hexo +	0.3333	0.3333	0.2000	0.3333	1.0000	0.1250	0.2000	0.1250
Ebee SQ	5.0000	6.0000	4.0000	6.0000	8.0000	1.0000	4.0000	2.0000
Parrot Disco PRO AG	2.0000	3.0000	1.0000	3.0000	5.0000	0.2500	1.0000	0.2500
Asesor / 5	5.0000	6.0000	4.0000	6.0000	8.0000	0.5000	4.0000	1.0000
SUMA	16.3333	23.3333	11.3667	21.8333	36.000	2.6583	11.3667	4.1583

Tabla III.13. Comparación pareada en función de la autonomía.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla III.14 se muestra la matriz normalizada de comparación entre alternativas para el criterio autonomía.

Matriz Normalizada								Promedio
0.06122461	0.08571429	0.04398827	0.09160305	0.08333333	0.07523511	0.04398827	0.04809619	0.06664789
0.03061231	0.04285714	0.029325513	0.02290076	0.08333333	0.06269592	0.02932551	0.04008016	0.04264133
0.12244923	0.12857143	0.08797654	0.13740458	0.13888889	0.09404389	0.08797654	0.06012024	0.10717892
0.03061231	0.08571429	0.029325513	0.04580153	0.08333333	0.06269592	0.02932551	0.04008016	0.05086107
0.02040616	0.01428571	0.017595308	0.01526718	0.02777778	0.04702194	0.01759531	0.03006012	0.02375119
0.30612307	0.25714286	0.351906158	0.27480916	0.22222222	0.37617555	0.35190616	0.48096192	0.32765589
0.12244923	0.12857143	0.08797654	0.13740458	0.13888889	0.09404389	0.08797654	0.06012024	0.10717892
0.30612307	0.25714286	0.351906158	0.27480916	0.22222222	0.18808777	0.35190616	0.24048096	0.2740848

Tabla III.14. Matriz normalizada del criterio autonomía.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla III.15 presenta la relación de consistencia entre las alternativas para el criterio autonomía.

Nmax	=	8.4963
IC	=	0.070906069
IA	=	1.41
RC	=	0.050287992

Tabla III.15. Relación de consistencia del criterio autonomía.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación en la Tabla III.16 se presenta la comparación pareada entre las alternativas para el criterio precio.

Criterio: PRECIO	DJI Inspire 2	DJI Phantom 3 Professional	DJI Phantom 4 Advanced	ParrotBeb op 2	Hexo +	Ebee SQ	Parrot Disco PRO AG	Asesor / 5
DJI Inspire 2	1.0000	0.1667	0.1667	0.1250	0.166	2.0000	0.1250	3.0000
DJI Phantom 3 Professional	6.0000	1.0000	2.0000	0.3333	0.500	7.0000	0.3333	7.0000
DJI Phantom 4 Advanced	6.0000	0.5000	1.0000	0.2500	0.500	7.0000	0.2500	7.0000
ParrotBebop 2	8.0000	3.0000	4.0000	1.0000	3.000	9.0000	0.5000	9.0000
Hexo +	6.0000	2.0000	2.0000	0.3333	1.000	7.0000	0.3333	7.0000
Ebee SQ	0.5000	0.1429	0.1429	0.1111	0.142	1.0000	0.1111	2.0000
Parrot Disco PRO AG	8.0000	3.0000	4.0000	2.0000	3.000	9.0000	1.0000	9.0000
Asesor / 5	0.3333	0.1429	0.1429	0.1111	0.142	0.5000	0.1111	1.0000
SUMA	35.8333	9.9524	13.4524	4.2639	8.452	42.500	2.7639	45.000

Tabla III.16. Comparación pareada en función del precio.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla III.17 se muestra la matriz normalizada de comparación entre alternativas para el criterio precio.

Matriz Normalizada								Promedio
0.02790698	0.01674641	0.012389381	0.02931596	0.01971831	0.04705882	0.04522613	0.06666667	0.03312858
0.16744186	0.10047847	0.148672566	0.0781759	0.05915493	0.16470588	0.12060302	0.15555556	0.12434852
0.16744186	0.05023923	0.074336283	0.05863192	0.05915493	0.16470588	0.09045226	0.15555556	0.10256474
0.22325581	0.30143541	0.297345133	0.23452769	0.35492958	0.21176471	0.18090452	0.2	0.25052036
0.16744186	0.20095694	0.148672566	0.0781759	0.11830986	0.16470588	0.12060302	0.15555556	0.1443027
0.01395349	0.01435407	0.010619469	0.02605863	0.01690141	0.02352941	0.04020101	0.04444444	0.02375774
0.22325581	0.30143541	0.297345133	0.46905537	0.35492958	0.21176471	0.36180905	0.2	0.30244938
0.00930233	0.01435407	0.010619469	0.02605863	0.01690141	0.01176471	0.04020101	0.02222222	0.01892798

Tabla III.17. Matriz normalizada del criterio precio.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla III.18 presenta la relación de consistencia entre las alternativas para el criterio precio.

Nmax	=	8.7897
IC	=	0.112814748
IA	=	1.41
RC	=	0.08001046

Tabla III.18. Relación de consistencia del criterio precio.

Fuente: Elaboración propia.

6. IV. Programación Lineal General

La siguiente tabla muestra los parámetros ingresados en el software Microsoft Excel ®, para calcular la solución óptima través de su función “solver”.

Modelo	Precio(€)	Volumen(m ³)	Ha/h
Inspire	8366	0,06	145,57
Disco Pro	4555	0,08	159,9262
Ebeesq	10590	0,087	189,16

Tabla IV.1. Parámetros de entrada Programación lineal.
Fuente: Elaboración propia.

La siguiente tabla muestra solución óptima que se obtiene a través de la función “solver” del software Microsoft Excel ®.

Modelo	Cantidad	Costo Total	VolumenTotal	Ha/h Totales
Inspire	0	0	0	0,00
Disco Pro	3	13665	0,24	479,78
Ebeesq	1	10590	0,087	189,16
Totales	4	24255	0,327	668,93

Tabla IV.2. Solución óptima PLG.
Fuente: Elaboración propia.

