



Contribuciones al perfeccionamiento del sistema de transporte terrestre en Cuba

Esteban López Milán^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-1329-4461>

Lluís Miquel Plà Aragonés² <https://orcid.org/0000-0001-6139-0207>

Buenaventura Rigol Cardona¹ <https://orcid.org/0000-0002-6482-3618>

Erik Reyes Gómez¹ <https://orcid.org/0000-0002-5897-3927>

Silvia Miquel Fernández² <https://orcid.org/0000-0001-5899-371X>

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería. Universidad de Holguín, Cuba

² Departamento de Matemáticas, Facultad de Economía. Universidad de Lleida, España

*Autor para la correspondencia: elopez@uho.edu.cu

Palabras clave

programación lineal entero-mixta; ruteo de vehículos; dinámica de vehículos automotores; mitigación del impacto ambiental

RESUMEN

Introducción. En el sistema de transporte de Cuba se presentan problemas que demandan respuestas adecuadas. Esta investigación en sus inicios estuvo dirigida al transporte de la caña en los centrales azucareros de la provincia Holguín y, en la actualidad, incluye a todo el sistema de transporte terrestre de cargas. Objetivos: incrementar la eficiencia y la eficacia del transporte terrestre, a la elaboración de sistemas automatizados de uso docente e investigativo y a la mitigación del impacto ambiental del transporte. **Métodos.** Se estudiaron diversos medios de transporte automotor y ferroviario de la provincia de Holguín. Entre los métodos y herramientas utilizados se destacan la consulta bibliográfica, las técnicas de recolección de datos, el procesamiento estadístico, el empleo del enfoque de sistema en la planificación de las transportaciones, las entrevistas a expertos, así como el uso de la modelación y simulación matemática. **Resultados.** Los modelos matemáticos para el transporte de caña son el principal aporte científico de la investigación. En todos se tiene la meta de minimizar el costo de las transportaciones a través de un peculiar enfoque de sistema. Las más recientes formulaciones tienen en cuenta la probabilidad de lluvia, el análisis para tres días de cosecha y minimizar la emisión de contaminantes a la atmósfera. Otros resultados obtenidos son las metodologías para la evaluación integral de las transportaciones y para confeccionar el pasaporte dinámico de las máquinas automotrices, la creación de sistemas automatizados de uso docente e investigativo, el diseño una tecnología para recuperar los filtros de combustible diésel de los motores, la aplicación de un sistema de manejo ambiental en una base de ómnibus, y un modelo matemático para la distribución de medicamentos.



Contributions to the improvement of the ground transportation system in Cuba

ABSTRACT

Keywords

mixed-integer linear programming; vehicles routing

Introduction. There are some problems in the Cuban transportation system that require adequate responses. In its initial stage, the research was focused on the sugarcane transportation system in sugar mills of Holguin Province. At present, it includes the whole ground transportation system. **Objectives:** This research has been aimed at increasing the efficiency and effectiveness of ground transportation creating teaching and research software, and mitigating the environmental impact of transportation means. **Methods.** For the research, several automotive and railway transportation means of the province of Holguin were studied. Among the methods and tools used are bibliographic querying, data collection techniques, statistical processing, the use of the system approach in transportation planning, interviews with experts, and the use of mathematical modeling and simulation. **Results.** The mathematical models for sugar cane transportation are the main scientific contribution of the research. In all of them, the goal is to minimize the cost of transportation through a distinctive system approach. The most recent formulations take into account the probability of rain, the analysis for three days of harvest, and the minimization of the emission of pollutants into the atmosphere. Other results are methodologies for a comprehensive assessment of transportation and for the tractive effort-speed characteristics in ground vehicles, making software for teaching and research use. A technology was designed to recover diesel fuel filters of engines, an environmental management system was implemented in a bus repair shop, and a mathematical model for the distribution of medicines was also used. In a general sense, the research has value as a reference point in the fields of teaching and research.

INTRODUCCIÓN

El transporte es un eslabón importante en la economía de cualquier país, no es posible concebir la sociedad moderna sin su participación. En el sector del transporte de Cuba se han logrado avances en medio de las carencias materiales; sin embargo, también se manifiestan dificultades que requieren de su tratamiento, tales como:

Es insuficiente la incorporación de las tecnologías de la informática y las comunicaciones en ayuda a la toma de decisiones.

- Es casi total la ausencia de un enfoque de sistema en el análisis del proceso de transporte, sobre todo, en la industria azucarera.
- No hay un consenso en el planteamiento de una metodología, suficientemente acabada, que permita la selección del medio de transporte adecuado para la transportación.
- En muchas empresas de transporte las valoraciones económicas no son objetivas, pues no relacionan los gastos con lo que realmente se debe considerar como producción del transporte, sino que lo refieren al volumen o el peso de las mercancías transportadas.

- Existen diversos criterios para determinar los costos de las transportaciones y los índices de consumo de combustible.

Esta problemática condujo a realizar investigaciones para elaborar procedimientos y herramientas que permitan mejorar la eficiencia y la eficacia del transporte. Las investigaciones se iniciaron en el sistema de transporte de las empresas azucareras de la provincia Holguín en 1998. Su objetivo original fue el de disminuir los costos de la transportación y garantizar el suministro estable de caña fresca al central. Parte de los resultados obtenidos en este estudio se introdujo en empresas de transporte, y se abrieron otras temáticas. De igual forma, los resultados han sido introducidos en la docencia universitaria en las universidades de Holguín, Granma y Oriente. Fuera de Cuba en una modesta contribución, se han aplicado en Venezuela^(1, 2, 3) y Guinea Ecuatorial^(4, 5).

MÉTODOS

Para la investigación se estudiaron los medios de transporte automotor y ferroviario de las empresas azucareras Fernando de Dios y Urbano Noris, así como los medios de transporte de la Empresa Eléctrica de Holguín, TransCupet,

Almacenes Universales, Servicar, Base ASTRO Holguín, Filial AUSA Holguín, y medios de las FAR y el MININT, entre otros.

Entre los métodos y herramientas utilizados se destacan la consulta bibliográfica, las técnicas de recolección de datos, el procesamiento estadístico, el tratamiento de las transportaciones con un enfoque de sistema, la modelación y simulación matemática y las entrevistas a expertos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La investigación propone soluciones para incrementar la eficiencia y la eficacia del transporte terrestre, en la mitigación del impacto ambiental del transporte y ofrece sistemas automatizados de uso docente e investigativo. Los resultados son:

- Una metodología para la evaluación integral de las transportaciones.
- Propuesta de indicadores de costo y consumo de combustible referidos a la producción.
- Una metodología para la elaboración del pasaporte dinámico en las máquinas automotrices y los sistemas para la elaboración del pasaporte dinámico.
- Una tecnología para la recuperación de los filtros de combustible en los motores.
- La propuesta de un sistema de manejo ambiental.
- Un modelo matemático para la distribución de medicamentos.
- La modelación matemática de las transportaciones de la caña.

Metodología para la evaluación integral de las transportaciones

La metodología para la evaluación integral de las transportaciones propuesta por López⁽⁶⁾ evalúa de manera integral a los medios de transporte, ponderando los aspectos de productividad, el costo del transporte, el consumo de combustible, su comportamiento en condiciones específicas de explotación y sus cualidades dinámicas. La metodología plantea que, para la selección adecuada de los medios de transporte automotor, atendiendo a su gran diversidad y las diferentes condiciones de explotación, resultan útiles realizar:

- Cálculo de la eficiencia energética de las transportaciones.
- Cálculo del costo de las transportaciones.
- Evaluación de la característica tractiva de las máquinas.
- Aplicación de los métodos de isocosto e isorrendimiento.
- Evaluación del sistema de mantenimiento y las entradas eventuales a taller.

La producción de los medios de transporte

El contabilizar la producción como la carga transportada, expresada en unidades de peso o volumen, conduce a errores en los análisis económicos pues para transportar iguales cantidades de cargas a diferentes distancias, se consumen diferentes cantidades de recursos económicos, humanos y financieros.

La producción del transporte se debe expresar, por tanto, en magnitudes que reflejan el volumen (o masa) y la distancia de las transportaciones; la primera componente refleja la magnitud de las transportaciones, y la segunda caracteriza la magnitud de la circulación de las mercancías. En el transporte de cargas, la producción o tráfico de carga, ha de expresarse en tonelada-kilómetro (t·km).

La eficiencia energética y el costo de las transportaciones

Para poder comparar los medios de transporte automotor y ferroviario, se utilizaron novedosos indicadores de eficiencia y costo que vinculan el uso de los recursos financieros y energéticos con la producción; estos se denominan índice de costo y *eficiencia energética de las transportaciones*.

La eficiencia energética de las transportaciones expresa cuántos litros de combustible se consumen para transportar una tonelada a la distancia de un kilómetro (L/t·km), y refleja la eficiencia con que se usa el combustible en una transportación. Por su parte, la producción se debe expresar en magnitudes que reflejen el volumen o masa de la carga y la distancia a la cual se efectúa la transportación (\$/t·km). El costo, expresado de esta manera, se emplea tradicionalmente en las empresas de transporte ferroviario.

Este tratamiento dado a los indicadores de costo y de consumo de combustible permitió por vez primera en la industria azucarera cubana realizar comparaciones objetivas entre el transporte automotor y el ferroviario. En la figura 1 se muestra el comportamiento de estos indicadores en el Complejo Agroindustrial (CAI) Fernando de Dios: nótese que el ferrocarril es aproximadamente 1,5 veces más eficiente energéticamente y que gasta alrededor de 6,4 veces menos que el transporte automotor para realizar igual transportación.

Numerosos autores e investigadores sostienen que el transporte ferroviario es efectivo a partir de los 100 km de distancia. En contraposición a esto López⁽⁶⁾ demostró que, para el transporte de la caña de azúcar en las condiciones de Cuba, aun en distancias de alrededor de 10 km, el empleo del ferrocarril es más económico que el transporte automotor.

Característica tractiva de las máquinas

No basta ponderar el comportamiento de los indicadores económicos y de explotación para seleccionar el mejor medio

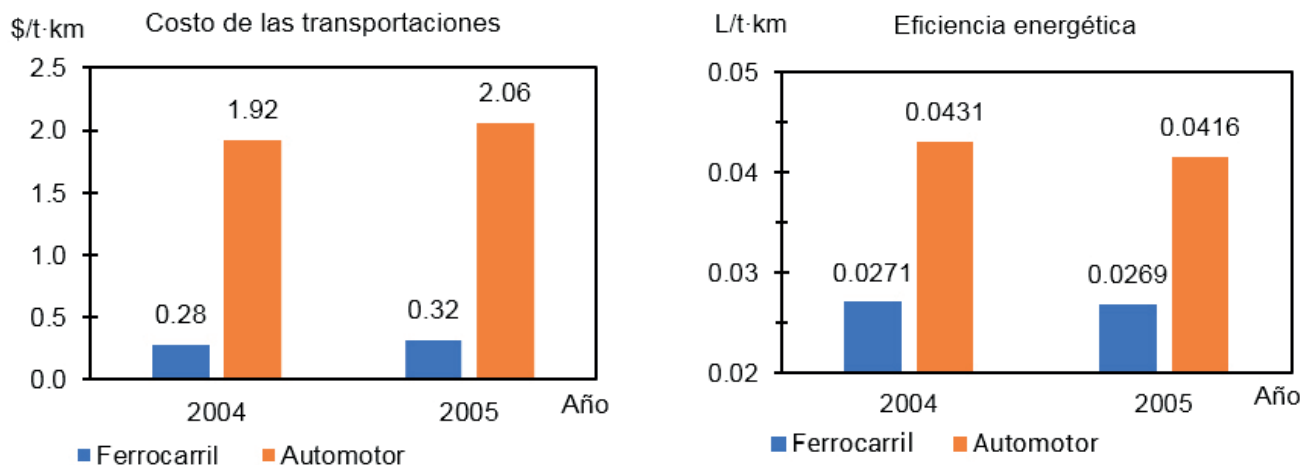


Fig. 1. Comportamiento del costo y la eficiencia energética de las transportaciones en la empresa azucarera Fernando de Dios.

de transporte, sino que es necesario también evaluar las cualidades dinámicas de los equipos, a partir de lo que refleja su pasaporte dinámico o característica tractiva. Para construir esta característica se empleó la metodología establecida por Szczepaniak y Aragón⁽⁷⁾, que ha sido enriquecida por López⁽⁶⁾ con las contribuciones de Alexeev⁽⁸⁾, Cárdenas⁽⁹⁾, Aragón⁽¹⁰⁾ y Cañabate⁽¹¹⁾.

Sistemas automatizados para la elaboración del pasaporte dinámico

En la Universidad de Holguín, para facilitar la elaboración del pasaporte dinámico de las máquinas automotrices, se han desarrollado cinco versiones del sistema Tractiva. Tractiva 1.1, corría sobre MSDos y estaba programado en C++; Tractiva 2.1 estaba programado en Visual Basic 6.1 (López y Senfort⁽¹²⁾) interactuaba con una base de datos en Access; Tractiva 4.1 (López y otros⁽¹³⁾) se programó en Python Qt.

La última versión, Tractiva 5.1 (López⁽¹⁴⁾), programada en un libro de Microsoft Excel'2016, no requiere de instalador y consume mínimos recursos de cómputo. Se ha validado en más de 2000 automóviles en Holguín.

En la primera hoja del libro, "Datos de entrada", se colectan los datos para que en la sexta hoja (figura 2) se muestren la característica tractiva, la característica exterior de velocidad del motor, las distancias de frenado, el balance de potencia y la estabilidad del vehículo contra vuelco y por deslizamiento durante el movimiento en las curvas.

Tecnología para la recuperación de los filtros de combustible

Los filtros de combustible de los motores de combustión interna se desechan una vez cumplido su plazo de servicio

y, por cuanto no existe protocolo alguno para su reciclaje, a partir de entonces se convierten en una carga contaminante para el medio ambiente. Por esta razón en la Universidad de Holguín se desarrolló una tecnología para recuperarlos.

La tecnología que se muestra en la figura 3 (López y Méndez⁽¹⁵⁾) cuenta con una instalación centrífuga para recuperar los filtros, y una instalación hidroneumática para depurar y recuperar el combustible de la limpieza.

Para recuperar los filtros se hace pasar a contraflujo, forzado por efecto de la fuerza centrífuga, un combustible limpio y de baja densidad. El combustible de la limpieza atraviesa la membrana del elemento filtrante de adentro hacia afuera, en el sentido inverso a como fluye el combustible por este aditamento.

La recuperación del combustible contaminado se realiza en tres pasos: se separan las partículas sólidas por decantación, se centrifuga el combustible y, posteriormente, por gravedad, se pasa el combustible a través de un filtro de combustible.

El segundo paso se hace en la instalación hidroneumática. Se llenan las 2/3 partes del depósito con el combustible contaminado y se presuriza con aire a una presión de 5 kg/cm². La presión del aire expulsa el combustible hasta el filtro de depuración centrífugo, donde las partículas en suspensión se pegan a las paredes de la campana; así a la salida del depurador se obtiene un combustible más limpio.

Factibilidad técnica y económica de la recuperación de los filtros

Para probar la factibilidad y la calidad de la recuperación se construyeron probetas con el elemento filtrante, las cuales

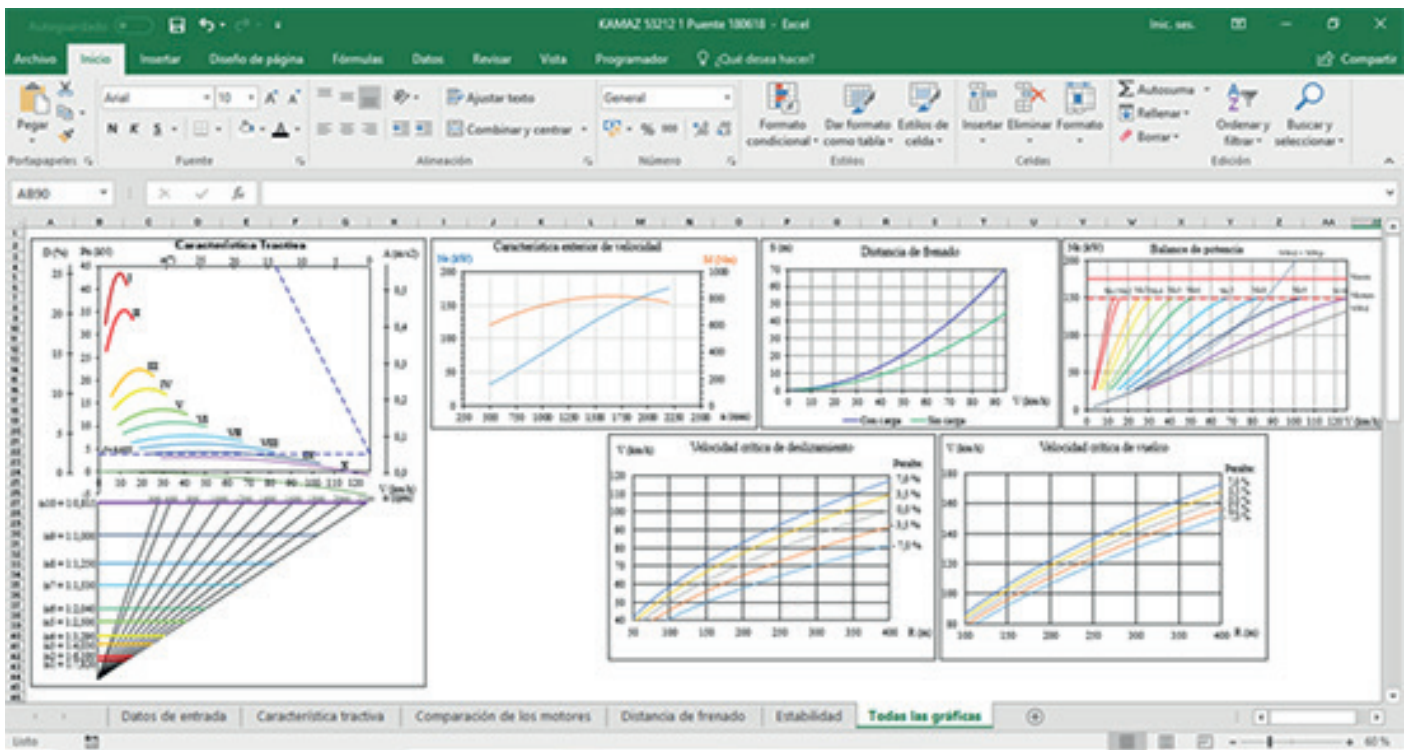


Fig. 2. Sistema Tractiva 5.1.

se analizaron por microscopía óptica y se le hicieron ensayos de tracción y permeabilidad.

A simple vista, se apreció que la calidad de la limpieza mejora con el uso de los combustibles diésel, T1, gasolina y nafta, por ese orden. La inspección bajo el microscopio no arrojó diferencias significativas entre ellas. El ensayo de resistencia a la rotura demostró que este parámetro se mantiene muy cerca respecto al elemento nuevo. Las pruebas de permeabilidad sugirieron la necesidad de usar entre 20 y 30 L de combustible en la limpieza, para una recuperación eficaz en cada filtro.

Ambas premisas, resistencia mecánica y permeabilidad, son las que justifican la viabilidad del proceso de recuperación de filtros de combustible diésel. De ellas partió la concepción de esta técnica de recuperación. Al filtro recuperado se le restablece por encima del 85 % su capacidad de filtrado.

El costo de la recuperación de los filtros es muy bajo, a cuenta de un bajo consumo de energía eléctrica y gasto mínimo de keroseno de limpieza. Basta con recuperar dos filtros de combustible, como los usados en los motores de los grupos electrógenos de la serie MTU, para amortizar la inversión inicial.

Sistema de manejo ambiental para la base de ómnibus escolares del municipio Holguín

El transporte es un sector que causa daños al medio ambiente, durante las transportaciones y en los lugares donde

los equipos reciben el servicio técnico. Para disminuir esta acción negativa, se propuso un sistema de manejo ambiental (SMA) para la base de ómnibus escolares del municipio holguín (López y Rigol⁽¹⁶⁾). Los resultados de su aplicación contribuyeron a un mejor desempeño de la entidad mediante una producción ambientalmente más limpia y a una mejor aceptación de este establecimiento por parte de la comunidad circundante.

Por *sistema de manejo ambiental* se entiende al conjunto planeado y coordinado de acciones administrativas, procedimientos, documentación y registros enfocados hacia el medio ambiente. El sistema se implementó por una estructura organizacional específica con competencias, responsabilidades y recursos definidos, con el fin de prevenir efectos ambientales adversos. Este sistema es encargado de promover acciones y actividades que preserven o mejoren la calidad ambiental.

En la figura 4 se muestran los elementos centrales del sistema de manejo ambiental concebido. Cada bloque representa un paso indisolublemente ligado al resto, puesto que se trabaja con un enfoque de sistema, capaz de retroalimentarse en el proceso.

El esquema del sistema de manejo ambiental permite concebir una guía para elaborar la estrategia de protección medioambiental, la cual consta de los siguientes pasos:

1. Identificar los problemas.
2. Establecer los compromisos (política ambiental).
3. Elaborar del plan de acción (programa ambiental).
4. Crear una estructura que permita establecer las tareas, delegar autoridad y asignar responsabilidad por las acciones que se llevarán a cabo (estructura organizacional).
5. Establecer cómo se van a documentar y controlar los resultados (procedimientos de control, medición y mantenimiento de registros).
6. Elaborar un plan de capacitación dirigido a los empleados (información interna y capacitaciones).
7. Establecer vínculos de la empresa con la comunidad (comunicación externa y relaciones con la comunidad).
8. Concebir un proceso de retroalimentación (revisión del manejo ambiental y auditoría).

Resultados derivados de la aplicación del sistema de manejo ambiental

Con la aplicación de esta útil herramienta, se obtuvieron beneficios derivados de mejorar el esquema medioambiental de la base de ómnibus escolares, ahorros a través de una producción más limpia y eficiente ambientalmente, y se mejoró la competitividad y finanzas de la empresa al reducir riesgos de accidentes y multas.

Al llevarse a cabo un mantenimiento técnico eficiente se aumentó la vida útil de los vehículos, se disminuyó el consumo de combustible, se obtuvieron mejores respuestas de los vehículos y, por lo tanto, estos medios contaminan menos. La contribución del correcto reciclado de las chatarras, neumáticos y aceites quemados, más allá del beneficio económico

que representa, ha constituido una invaluable contribución al mejoramiento del medio ambiente.

Para la comunidad, esto resulta también muy atractivo, ya que tiene la información de cuánto se hace por mitigar el impacto de la base en el medioambiente y se escuchan sus criterios.

Modelación matemática para la optimización de las rutas de abastecimiento de medicamentos en EMCOMED Mayarí

Esta investigación, llevada a cabo por García⁽¹⁷⁾, se propuso como objetivo el modelar el proceso de distribución de medicamentos en EMCOMED Mayarí, para proveer de rutas ágiles y al menor costo posible, a la distribución de medicamentos. Se confeccionó una base de datos que implicó la consulta 1 640 distancias entre cualquiera fueran los pares de origen-destino, y en ambos sentidos de circulación.

Ante el poco probable hecho de que las personas que deciden las rutas de distribución, estén familiarizadas con el uso de *software* profesionales para procesar modelos matemáticos, surgió la necesidad de elaborar una sencilla interfaz de usuario que de forma transparente al usuario procese el modelo y muestre los resultados de forma clara.

En EMCOMED Mayarí las rutas de distribución tienen un máximo de 11 farmacias más el almacén central. Independientemente de ello, el "método de la fuerza bruta" se descartó: las posibles combinaciones origen-destino se elevan a la impresionante cifra de $(12-1)! = 39\ 916\ 800$.

El "método del vecino más cercano" y su variante del "best first", son a esta escala variantes válidas de solución, pero no necesariamente proveen de variantes óptimas de transportación. Esta fue la razón por la que se decidió buscar la solución por el método de programación lineal con enteros binarios.

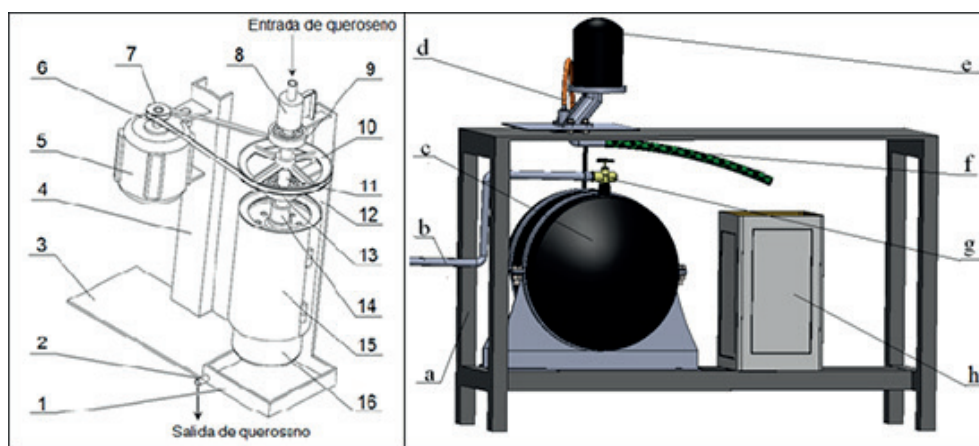


Fig. 3. Estaciones centrífuga e hidroneumática. *Legenda:* 1, colector; 2, conducto de drenaje; 3, base; 4 y 12, columna; 5, motor eléctrico; 6, correa; 7, polea motriz; 8, portasellos; 9 y 13, cojinete; 10, polea conducida; 11, árbol hueco; 14, manguito roscado; 15, cubierta; 16, filtro; a, mesa soporte; b, tubería; c, depósito presurizado; d, manguera; e, depurador centrífugo; f, manguera de descarga; g, válvula; h, recipiente colector.

Modelo para la distribución de los medicamentos

En el modelo, la función objetivo plantea el minimizar la suma de las distancias a recorrer entre nodos, en un ciclo cerrado, que implica salir del almacén y retornar a ese mismo punto, pasando (entrando y saliendo) por cada uno de los nodos una única vez. Para formular el problema se definió la variable X_{ij} , donde los subíndices j e i son los nodos (farmacias a visitar) de la matriz. En 12 nodos, las asignaciones de estos subíndices van desde A hasta L .

Función objetivo: Establece que la sumatoria de las distancias a recorrer sea mínima. Los coeficientes C_{ij} son las distancias entre los nodos i y los nodos j .

$$\text{Min } z \sum_{i=A}^L \sum_{j=A}^L C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Restricciones:

- Primer grupo (12 restricciones). Establece que el valor de la variable en la diagonal principal es cero:

$$X_{ij} = 0, \quad (\forall j = i) \quad (2)$$

- Segundo grupo (66 restricciones). Establece que, cuando se salga de un nodo, no se puede regresar a ese mismo nodo:

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1, \quad (\forall i = A..L, \forall j = 1..n, \forall i \neq j) \quad (3)$$

- Tercer grupo (12 restricciones). Establece que desde un nodo se puede visitar como máximo a un único nodo:

$$\sum_{i=A}^L X_{ij} \leq 1, \quad (\forall j = A..L) \quad (4)$$

- Cuarto grupo (12 restricciones). Establece que un nodo destino puede tener como máximo un nodo origen:

$$\sum_{j=A}^L X_{ij} \leq 1, \quad (\forall i = A..L) \quad (5)$$

- Condición de variable binaria (144 restricciones):

$$X_{ij} = \{0,1\}, \quad (\forall i = A..L, \forall j = A..L, \forall i \neq j) \quad (6)$$

- Condición de heurística (una en cada caso si se requiere):

$$X_{ij} = 0, \quad (\forall j = A, i = \{B, C, \dots, K \text{ o } L\}) \quad (7)$$

$$X_{ij} = 1, \quad (\forall j = A, i = \{B, C, \dots, K \text{ o } L\}) \quad (8)$$

- Condición de no negatividad:

$$X_{ij} \geq 0 \quad (9)$$

El problema para 12 nodos tiene 144 variables binarias, 246 restricciones, una función objetivo, más las restricciones heurísticas y las de no negatividad.

Solución del modelo con el Solver del Excel

El principal inconveniente del empleo del Solver es no poder modelar problemas que incluyan más de 220 celdas

cambiantes. Esta limitante fue la que determinó que no se pudieran modelar más de 12 nodos que generan 144 celdas cambiantes, más otras 66 celdas cambiantes que se deducen del segundo grupo de restricciones, para un total de 210 celdas cambiantes.

El mismo planteamiento del problema del tipo "agente viajero" se resolvió por seis vías. La solución por programación lineal con enteros binarios demostró ser la mejor. En la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos en cada solución:

Tabla 1. Resumen de las soluciones para el problema de la ruta óptima para la distribución de medicamentos

Método de solución	Valor de la F.O.
1. Vecino más cercano	93,22 km
2. Directa	92,35 km
3. Directa inversa	92,09 km
4. EMCOMED Mayarí	88,96 km
5. Mejor primero (<i>Best First</i>)	87,36 km
6. Programación lineal con enteros binarios	86,32 km

Modelación matemática de las transportaciones de la caña

Las investigaciones se hicieron en los Complejos Agroindustriales Fernando de Dios y Urbano Noris, y en las corridas de los modelos matemáticos se emplearon datos de estas instituciones. No obstante, estos modelos pueden ser aplicados en la gestión del transporte de cualquier empresa azucarera de Cuba.

Estos modelos son únicos de su tipo por cuanto, partiendo de un enfoque de sistema, conciben a la transportación como parte del proceso de corte-alza-tiro de la caña. Esta investigación se ha llevado a cabo en el transcurso de 20 años, al cabo de los cuales se han realizado esencialmente tres propuestas de modelos:

- Modelos deterministas para la organización y planificación de las transportaciones de la caña (López⁽⁶⁾, López y otros⁽¹⁸⁾).
- Modelo estocástico para la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre (López y Plà⁽¹⁹⁾).
- Modelo determinista para gestionar el costo de la transportación y las emisiones de gases de la combustión (López y otros⁽²⁰⁾).

Para la gestión de este modelo se confeccionó un software a la medida, así como un novedoso sistema automatizado para la elaboración del gráfico de movimiento de trenes (López⁽⁶⁾).

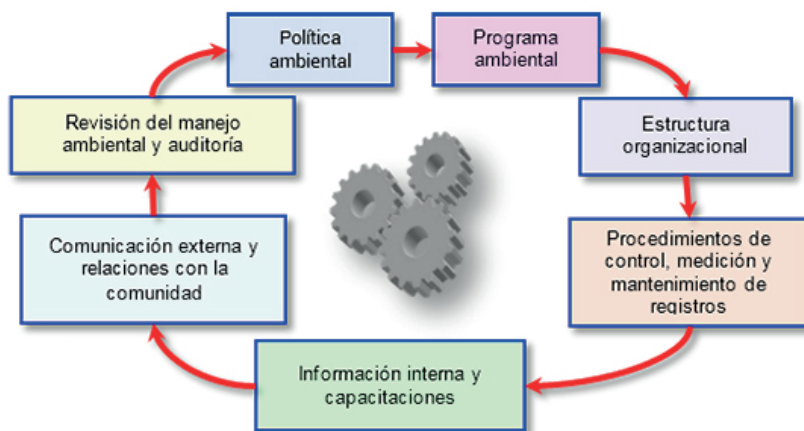


Fig. 4. Elementos del sistema de manejo ambiental.

Modelo determinista para la planificación de las transportaciones de la caña

Los procesos de corte, carga y transporte de la caña inicialmente se concibieron en un modelo de programación lineal entero-mixto que, partiendo de un enfoque de sistema, determina la combinación óptima de los medios de transporte, garantiza costes mínimos de la transportación, y asegura el abastecimiento al central azucarero con aceptables niveles de frescura. Este modelo propone la solución del problema con una única función objetivo y controla los parámetros de abastecimiento, frescura y evitar pérdidas por no cosecha, con las restricciones y del coeficiente de oportunidad.

Variables de decisión: Las variables $X_{ijk,l,m}$ expresan la cantidad de caña que se transporta desde los i -orígenes, hacia los j -destinos, con el k -medio de transporte, el l -pelotón de corte y en la m -hora del día que se realizaría la transportación.

Las restricciones: Las restricciones del modelo se agrupan según:

- Grupo 1: producción de los campos cañeros.
- Grupo 2: suministro de caña a los centros de acopio o limpieza.
- Grupo 3: correspondencia de la caña que llega y sale de los centros de acopio.
- Grupo 4: restricciones de los medios de transporte.
- Grupo 5: suministro de caña al central por horas.
- Grupo 6: suministro diario al central azucarero.
- Grupo 7: restricciones de los medios de corte.

La función objetivo: Consiste en minimizar el costo de la transportación:

$$F.O. : \text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^{A+B} \sum_{j=1}^{A+1} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L+C+1} \sum_{m=1}^H C_{i,j,k,l,m} \cdot Co_i \cdot X_{i,j,k,l,m} \quad (10)$$

Los coeficientes económicos $C_{ijk,l,m}$, establecen el costo de la transportación de la caña de azúcar. El artificio matemático Co_i ($0 < Co_i \leq 1$) es el coeficiente de oportunidad, su función es disminuir el valor real del coeficiente económico asociado para permitir la entrada forzada de las correspondientes variables de decisión en las soluciones. Este coeficiente, sin restar importancia al determinante factor objetivo de la modelación, permite “manipular” el modelo, empleando el conocimiento y las valoraciones subjetivas de personas que se dedican a la actividad del transporte. Este coeficiente varía en relación al *pool* de la caña, la posibilidad de pérdidas por factores que afectan la transportación y las ocasionadas por la no cosecha de algunos campos cañeros.

Modelo estocástico, en función de la probabilidad de ocurrencia de lluvia

El planteamiento del modelo estocástico se hizo teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de lluvia, previendo tres posibles escenarios:

- Escenario 1 (S1): sin lluvia.
- Escenario 2 (S2): poca lluvia.
- Escenario 3 (S3): lluvia moderada.

Las variables ($X_{ijk,l,s}$): Tienen similar nomenclatura y significado que en el planteamiento del modelo estocástico. La diferencia es que se sustituye el índice m por el subíndice s (escenario) y, por tanto, la planificación se hace para un día de trabajo.

Las restricciones: La mayoría de las restricciones del modelo se mantienen similares respecto al planteamiento determinista; tan solo cambian las asociadas a la producción de los campos cañeros y las de suministro diario al central, que están afectadas por la probabilidad de ocurrencia de lluvia.

La función objetivo: Aquí se insertan las probabilidades de ocurrencia de lluvia, según los tres escenarios previstos.

$$\text{Min } C = \sum_{i=1}^{A+B} \sum_{j=1}^{A+1} \sum_{k=1}^K \sum_{l=C+1}^{L-C+1} (S1 \cdot (C_{i,j,k,l,1} \cdot Co_{i,1} \cdot X_{i,j,k,l,1}) + S2 \cdot (C_{i,j,k,l,2} \cdot Co_{i,2} \cdot X_{i,j,k,l,2}) + S3 \cdot (C_{i,j,k,l,3} \cdot Co_{i,3} \cdot X_{i,j,k,l,3})) \quad (11)$$

Modelo del transporte con emisiones

Esta es la variante más compleja del modelo determinista. Su pretensión es programar el transporte del día actual, con la perspectiva de dos días posteriores. En la única función objetivo se plantean la meta de minimizar el costo de las transportaciones y la meta de minimizar las emisiones de gases contaminantes por la quema del combustible. El evitar las pérdidas por no cosecha, y controlar el suministro de caña y su frescura, se controlan mediante las restricciones y el coeficiente de oportunidad.

En el modelo se hace la programación por horas en el primer día de trabajo, y la programación diaria para los siguientes dos días. Así, el modelo ayuda a la toma de decisiones para el día actual, con la perspectiva de los días posteriores.

Las diferencias más notables en este modelo con respecto a los que le han precedido son:

- Considerar tres días en el modelo: el día presente, más los dos días posteriores.
- La meta para minimizar la cantidad de emisiones de CO₂.
- Se modifica la nomenclatura de las variables.
- Se introduce en la función objetivo un coeficiente de ponderación (0 ≤ λ ≤ 1), que minimiza el costo de las transportaciones, minimiza la emisión de gases contaminantes o buscar una solución intermedia entre estos dos objetivos.

Las restricciones: Guardan similitud con las de los modelos anteriores e incluyen restricciones específicas para los dos posteriores días de trabajo, y las relacionadas con el consumo de combustible.

La función objetivo: Aquí se combinan las metas de minimizar el costo diario de las transportaciones y el minimizar las emisiones que es directamente proporcional al consumo de combustible.

$$\text{OF: Min } Z_\lambda = \lambda \cdot \left(\sum_{i=1}^A \sum_{j=A+1}^{A+1} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{M-C} (CD_{i,j,k,l} \cdot Co_{i,1} \cdot XD_{i,j,k,l} + \sum_{d=2}^D CD_{i,j,k,l,d} \cdot Co_{i,d} \cdot XD_{i,j,k,l,d}) \right) + \sum_{i=1}^A \sum_{j=A+1}^{A+1} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{M-C} (CS_{i,j,k,l,1} \cdot Co_{i,1} \cdot XS_{i,j,k,l,1} + \sum_{d=2}^D CS_{i,j,k,l,d} \cdot Co_{i,d} \cdot XS_{i,j,k,l,d}) + \sum_{j=A+1}^{A+1} \sum_{d=1}^D (CW_{j,d} \cdot XW_{j,d}) + [1-\lambda] \cdot Ec \cdot \left(\sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^A \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{M-C} ED_{i,j,k,l,d} \cdot QcD_{i,j,k,l,d} + \sum_{i=1}^A \sum_{j=A+1}^{A+1} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{M-C} ES_{i,j,k,l,d} \cdot QcS_{i,j,k,l,d} + \sum_{j=A+1}^{A+1} \sum_{d=1}^D EW_{j,d} \cdot QcW_{j,d} \right) \quad (12)$$

Variables y coeficientes:

- CD_{ijk1} y CD_{ijkd} : coeficientes económicos en el primer día y los dos d -días posteriores.

- CS_{ijk1} y CS_{ijkd} : coeficientes económicos en el primer día y los dos d -días para la transportación por ferrocarril.
- Ec : precio del CO₂ según Luckow⁽²¹⁾ ($Ec = \$38,00/\text{ton de CO}_2$).
- ED_{ik1} y ED_{ikd} : coeficientes de emisión de CO₂ por tiro directo en el primer día y los dos d -días posteriores.
- ES_{ijk1} y ES_{ijkd} : coeficientes de emisión de CO₂ por tiro a los centros de acopio en el primer día y los dos d -días posteriores.
- EW_{jd} : coeficientes de emisión de CO₂ por ferrocarril en los tres d -días.
- XD_{ijk1} y XD_{ijkd} : variables de decisión para el tiro directo en el primer día y los dos d -días posteriores.
- XS_{ijk1} y XS_{ijkd} : variables de decisión para el tiro a los centros de acopio en el primer día y los dos d -días posteriores.
- XW_{jd} : variables de decisión por ferrocarril en los tres d -días.

Planteamiento y solución de un caso de estudio del modelo de transporte y las emisiones

En un planteamiento donde se consideraron nueve campos cañeros, cinco centros de acopio, seis medios de corte y tres días en la programación, la combinatoria generó más de 100 000 variables y 900 restricciones. La solución, que se encontró con ayuda del *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.7.0.0.*, muestra cómo el valor de lambda ejerce de manera simultánea su influencia en el costo de la transportación y la cantidad de CO₂ emitido, según se aprecia en la figura 5.

El costo más alto y más bajo de la transportación muestra una diferencia del 3,89 %. Por otro lado, la diferencia entre el valor más alto y más bajo de las emisiones fue del 0,42 %.

Conclusiones

Esta investigación surgió de la necesidad de dotar a las empresas de transporte de la provincia de Holguín. Se desarrollaron metodologías y modelos matemáticos para incrementar la eficiencia y la eficacia de las transportaciones, se trabajó en la mitigación del impacto ambiental del transporte a través de la concepción de un sistema de manejo ambiental para una base de ómnibus, en un modelo para gestionar el transporte que tiene la meta de minimizar la emisión de gases contaminantes y el desarrollo de una tecnología para recuperar los filtros de combustible. Por otro lado, se elaboraron *software* de uso docente e investigativo que han sido introducidos en la docencia universitaria. Nuevas perspectivas en la investigación y formación profesional están en proceso a partir de los resultados que se han obtenido.

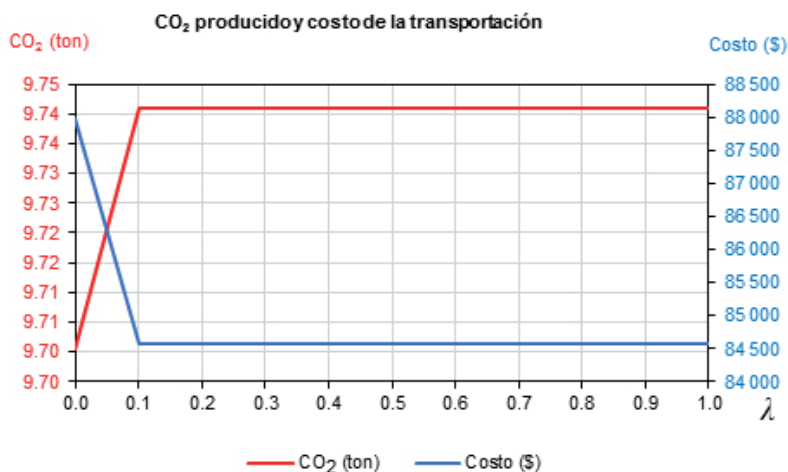


Fig. 5. Influencia de λ en el CO₂ producido y el costo de las transportaciones.

Agradecimientos

A la Universidad de Holguín, por su apoyo incondicional. A la Universidad de Lleida por su valiosa colaboración y contribución. A las empresas azucareras del territorio de la provincia Holguín y al Macroproyecto Reloj (1998-2004), que fueron la génesis de esta investigación. A las numerosas empresas de la provincia de Holguín, que permitieron introducir los resultados. A la Red CYTED BIGDSSAGRO 516RT0513 (2015 - 2019), por el soporte financiero para movilidad y divulgación de los resultados de los modelos matemáticos para el transporte de la caña.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Montoya Mujica A. "Propuesta de organización del transporte de la caña de azúcar en el Central COJEDES". Tesis presentada en opción al título de Máster en Maquinaria Agrícola. Universidad Nacional de los Llanos "Ezequiel Zamora", Venezuela. Julio de 2008. 154 p.
2. Rojas YC. "Evaluación de la confiabilidad operacional del tractor FORD 7610, en la finca Aguas Claras, Municipio Catatumbo, Estado Zulia". Tesis presentada en opción al título de Máster en Maquinaria Agrícola. Venezuela, 2015. 120 p.
3. Villa MN "Sistema de gestión para el mantenimiento de tractores utilizando herramienta computacional en el complejo Agroindustrial Pedro Camejo, del municipio Turen, Estado Portuguesa, Venezuela". Tesis presentada en opción al título de Máster en Maquinaria Agrícola. Venezuela, 2015. 108 p.
4. Edu Okue Nhang S. Propuesta de un sistema de mantenimiento preventivo planificado del parque de vehículos de la Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial Trabajo de Fin de Carrera. Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial, 2015. 76 p.
5. Ndong Owono Obono J. Propuestas para la organización y planificación de un sistema de mantenimiento de los tractores y automóviles de la Empresa ARAB CONTRACTORS. UNGE. Trabajo de Fin de Carrera. Universidad Nacional de Guinea Ecuatorial, 2016. 91 p.
6. López Milán E. "Contribuciones al perfeccionamiento del sistema de transporte cañero". Tesis doctoral. Universidad de Holguín, enero de 2006. Registro de obra protegida: 1591-2008. CENDA, La Habana, 2008. 177 p.
7. Szczepaniak C, Aragón R. Teoría del automóvil. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1992. 276 p.
8. Alexeev I. Elementos de construcción cálculo de los motores de combustión interna. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1978. 175 p.
9. Cárdenas Garnier MÁ. Prácticas de laboratorio de evaluación y prueba de vehículos. La Habana: Editorial ISPJAE, 1986. 33 p.
10. Aragón Marrero R, Ortega Bravo FI. Manual del proyecto de curso de automóviles. Santiago de Cuba: Editorial ENSPES, 1985. 132 p.
11. Cañavate Ortiz J. Tecnología de la mecanización agraria. Tomo 1. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de la Agricultura de España. Madrid: s/e, 1975. 324 p.
12. López Milán E, Senfort Navarro J. "Sistema Tractiva Versión 2.1". CENDA, La Habana 2001. Registro de obra protegida: 07678-7678.
13. López Milán E, Reyes Gómez E, Reyes Gómez E. "Sistema automatizado para el cálculo cinemático y dinámico de las máquinas automotrices, Tractiva 4.1". CENDA, noviembre 2016. Registro de obra protegida: 3247-11-2016.
14. López Milán E. "Sistema automatizado Tractiva 5.1". CENDA, La Habana, septiembre de 2019. Registro de obra protegida: 3048-09-2019.
15. López Milán E, Méndez Calzadilla E. "Aparato centrífugo para recuperar los filtros de combustible Diésel de los motores de combustión interna de automóviles" (patente en trámites), Registro OCPI 0029-2018.
16. López Milán E, Rigol Cardona B. "Sistema de Manejo Ambiental para la Base de Ómnibus Escolares del Municipio Holguín". 7mo Taller Regional de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Universidad de Holguín, junio de 2013.
17. García Reyes JM. "Optimización de las rutas de distribución a las farmacias de EMCOMED Mayarí". Tesis presentada en opción al

- título de Master en Eficiencia Energética. Universidad de Holguín, 2018. 93 p.
18. López Milán E, Miquel Fernández S, Plà Aragonés LI.M. "El problema del transporte de la caña de azúcar en Cuba". Investigación Operacional. Universidad de La Habana. 2004; 25(2):148-157.
 19. López Milán E, Plà Aragonés LIM. "Mathematical modeling under uncertainty for the sugar supply chain management in Cuba". pp 55-57. I International Conference on Agro Big Data and Decision Support Systems in Agriculture. Montevideo, Uruguay. September 27-29, 2017. ISBN: 978-9974-0-1514-2.
 20. López Milán E, Plà Aragonés LIMiquel, Pagés Bernaus A. "Minimizing transportation costs and emissions in sugar cane supply chain in Cuba". Proceedings of the II International Conference on Agro Big Data and Decision Support Systems in Agriculture. Julio 12-14, 2018. Lleida, España.
 21. Luckow P, *et al.* "2015 Carbon Dioxide Price Forecast". Synapse Energy Economic, Inc. March 3, 2015.

Recibido: 5 de mayo de 2020

Aprobado: 25 de junio de 2020

Conflictos de interés. No hay conflicto de intereses en relación con la investigación presentada.

Contribución de autoría:

1. Conceptualización: Esteban López Milán, Lluís Miquel Plà Aragonés y Silvia Miquel Fernández.

2. Curación de datos: Esteban López Milán y Lluís Miquel Plà Aragonés.
3. Análisis formal: Esteban López Milán y Lluís Miquel Plà Aragonés.
4. Adquisición de fondos: Esteban López Milán, Lluís Miquel Plà Aragonés.
5. Investigación: Esteban López Milán, Erik Reyes Gómez y Buenaventura Rigol Cardona.
6. Metodología: Esteban López Milán, Lluís Miquel Plà Aragonés.
7. Administración del proyecto: Esteban López Milán, Lluís Miquel Plà Aragonés.
8. Recursos: Esteban López Milán y Lluís Miquel Plà Aragonés.
9. Software: Esteban López Milán, Lluís Miquel Plà Aragonés y Erik Reyes Gómez.
10. Supervisión: Esteban López Milán, Lluís Miquel Plà Aragonés, Erik Reyes Gómez y Buenaventura Rigol Cardona.
11. Validación: Esteban López Milán, Erik Reyes Gómez y Buenaventura Rigol Cardona.
12. Visualización: Esteban López Milán, Lluís Miquel Plà Aragonés, Erik Reyes Gómez, Buenaventura Rigol Cardona y Silvia Miquel Fernández.
13. Redacción – borrador original: Esteban López Milán.
14. Redacción – revisión y edición: Esteban López Milán.

