

Fernández Latorre, F. y Pérez Mira, D. (2010): Parametrización de ecoeficiencia en análisis SIG de redes para el transporte intermodal. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 439-452. ISBN: 978-84-472-1294-1

PARAMETRIZACIÓN DE ECOEFICIENCIA EN ANÁLISIS SIG DE REDES PARA EL TRANSPORTE INTERMODAL

Francisco Fernández Latorre¹ y Domingo Pérez Mira²

(1) Universidad de Sevilla, Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Facultad de Geografía e Historia. C/ Doña María de Padilla s/n. 41004. Sevilla. flatorre@us.es

(2) Universidad de Málaga. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Calle Doctor Ortiz Ramos (Teatinos) 29071. Málaga. dperezmi@uoc.edu

RESUMEN

En la comunicación se presenta un desarrollo metodológico aplicado en un proyecto I+D en el área de transportes con el título "Bases para la inserción del estrecho de Gibraltar en los corredores de transporte intermodal a través de la modelización con SIG" (TRA 2008). Partiendo de un SIG dinámico para la optimización de rutas intermodales incluyendo parámetros logísticos como tiempo en ruta, tiempo en transferencia de modo o distancias, se propone una actualización con la inclusión de parámetros de ecoeficiencia, tales como la emisión de CO₂, zonas sensibles, y otros parámetros ambientales, de modo que permita evaluar y generar diferentes alternativas de transporte. Estos parámetros derivan de indicadores diferentes de los empleados en la logística tradicional. Aunque la plataforma utilizada es ArcGis, el método es aplicable a otras plataformas empleadas en el análisis de redes. El método expuesto se basa en la experiencia de otros proyectos SIG y en la elaboración de indicadores de sostenibilidad propios, en los que los autores han participado teniendo en cuenta parámetros de ecoeficiencia.

Palabras Clave: Análisis de redes, SIG, ecoeficiencia, transporte intermodal, indicador

ABSTRACT

This paper explains the method applied in a R+D transport project with the title "Basis for the integration of the Strait of Gibraltar in the multimodal transport corridors" (TRA2008). A dynamical GIS tool has been used to assess intermodal choices including eco-efficiency parameters, such as CO₂ emissions, environmentally sensitive areas, and other environmental parameters. In this way the GIS can also assess about mean of transport choice. These parameters are based on indicators that are not used in current logistic patterns. Even though ArcGis has been the main GIS framework, this method is applicable to other frameworks implied in network analysis. It is based on other GIS projects and sustainability indicators that were elaborated by the authors using eco-efficiency parameters.

Key Words: network analysis, GIS, ecoefficiency, intermodal transport, indicator

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo propuesto pretende actualizar y perfeccionar un modelo de Sistema de Información Geográfica (SIG intermodal) aplicado en un proyecto I+D en el área de transportes con el título "Bases para la inserción del estrecho de Gibraltar en los corredores de transporte intermodal a través de la modelización con SIG" (TRA 2008). En la base de datos de este nuevo SIG intermodal se incluyen no sólo parámetros de rutas óptimas relacionando distancia y tiempo, sino también todos aquellos factores que concurren en la naturaleza competitiva de la red intermodal de transportes: economía, coste ecológico, descongestión del tráfico, reglamentación europea del descanso en

carretera y estrategias de planificación. El siguiente bloque de datos es de naturaleza medioambiental y está constituido por parámetros de ecoeficiencia que se añadirán a los ya experimentados de logística, y cuya definición, desarrollo algorítmico y aplicación constituye la esencia del proyecto. El calibrado del sistema es esencial y se fundamenta en la sustentación de un modelo de ecointermodalidad en transportes (INTERMODAL -ECOTRANSP) desarrollado en el proyecto que se presenta. Una vez desarrollado se realizan ensayos iterativos y análisis de sensibilidad de resultados para identificar algoritmos óptimos para el desempeño funcional del sistema.

2. METODOLOGÍA

La decisión de ruta depende de nuevos factores al incluir demandas de eficiencia logística y ecológica. Destaca como antecedente metodológico el diseño y validación del Sistema de Información Geográfica como sistema experto para la generación y evaluación de caminos óptimos para líneas eléctricas en Canarias (INERCO, 1996), que sirvió de base a investigaciones para la determinación de corredores de transporte de energía en los planes especiales de corredores de transporte de energía eléctrica de Tenerife y de Gran Canaria (INERCO, 1999). El método de cálculo de costes ambientales a aplicar en el proyecto de SIG para el diseño y análisis de redes intermodales de transporte consiste en vincular a cada trayecto una función de transformación que agregue las principales variables ambientales que determinan su impacto medioambiental agregado, según el modo de transporte, valor ambiental y receptores afectables, condiciones operacionales y tipo de vehículo en cuestión, con el objetivo de generar una ruta óptima. La hipótesis de partida es que los elementos que definen la competitividad de las distintas combinaciones de transporte intermodal son susceptibles de ser transformados en parámetros y algoritmos que permiten el cálculo de rutas óptimas y áreas de influencia con un SIG intermodal. La implementación completa una herramienta dinámica para la evaluación ex - ante y ex - post, asesoramiento y toma de decisiones de redes actuales o futuras. Esta investigación operativa ayuda a minimizar costes económicos y de tiempo, impactos ambientales, maximizar eco-eficiencia y competitividad de transporte intermodal, para usuarios, compañías de transporte y logística, concesionarios, nodos de transporte y administraciones. Los parámetros logísticos son interpretados por el SIG a través de un módulo de análisis de redes. Los parámetros son traducidos en atributos de la base de datos permiten evaluar la competitividad de unos corredores frente a otros, establecimiento de líneas de isocronas para detectar los puntos estratégicos de descanso y trasbordo de unidades. Los tiempos que definen a éstas son los reglamentados en la normativa vigente e intersectan por ejemplo en el litoral en zonas próximas e incluso coincidente con puertos incluidos (o candidatos a serlo) en autopistas del mar. Sobre la competitividad con las rutas terrestres, hay que señalar que existe un margen muy estrecho entre corredores en tiempo de ruta cuando se trata de destinos entre el sur y en el norte de Europa. Por ejemplo las opciones desde el Estrecho de Gibraltar hacia Hamburgo o Munich varían en apenas una hora entre la opción de la autovía del Mediterráneo o la N-IV (Moreno Navarro, J.G., 2008). El modelo estudia preliminarmente la viabilidad y validación ulterior de aplicación con los siguientes factores:

1. Emisiones a la atmósfera: Gases de efecto invernadero (GEI, expresados en CO₂ equivalentes), gases acidificantes (SO₂, NO_x), partículas, COV_s (compuestos orgánicos volátiles), CO, ruido.
2. Riesgo de vertidos: en función de su probabilidad y consecuencias ambientales
3. Riesgo de accidentes sobre la población
4. Congestión del tráfico
5. Riesgo de colisión con fauna vertebrada de interés: en trayectos marinos y en trayectos terrestres.
6. Valor ambiental de las zonas que atraviesan cada vector del SIG que compone el trayecto (áreas de especial valor ecológico).

La herramienta SIG es la empleada en un proyecto del Plan Nacional I+D cuya funcionalidad viene expresada en la obra de Moreno Navarro (2006). El modelo final tiene más de 100.000 arcos conteniendo todas las posibilidades de ruta entre Marruecos y la Unión Europea, a excepción de las líneas aéreas. La cartografía parte de la Digital Chart of the World a la que se han añadido las líneas de transporte marítimo en un proceso de digitalización y actualización de la base de datos. Posteriormente los arcos se han actualizado con las correspondientes prestaciones, comenzando por distancia y tiempo de trazado. Se actualizó con puntos de transferencia con su correspondiente tiempo de espera, cuyos valores fueron obtenidos en trabajo de campo, siendo estos puntos los más sensibles a la hora de la actualización, ya que los tiempos han mejorado en la mayoría de los casos. Dichos cambios se han debido fundamentalmente a avances en logística y administración. La figura 1 muestra la arquitectura básica con el ejemplo de un punto de transferencia donde se encuentran representados todos los medios de transporte implicados.

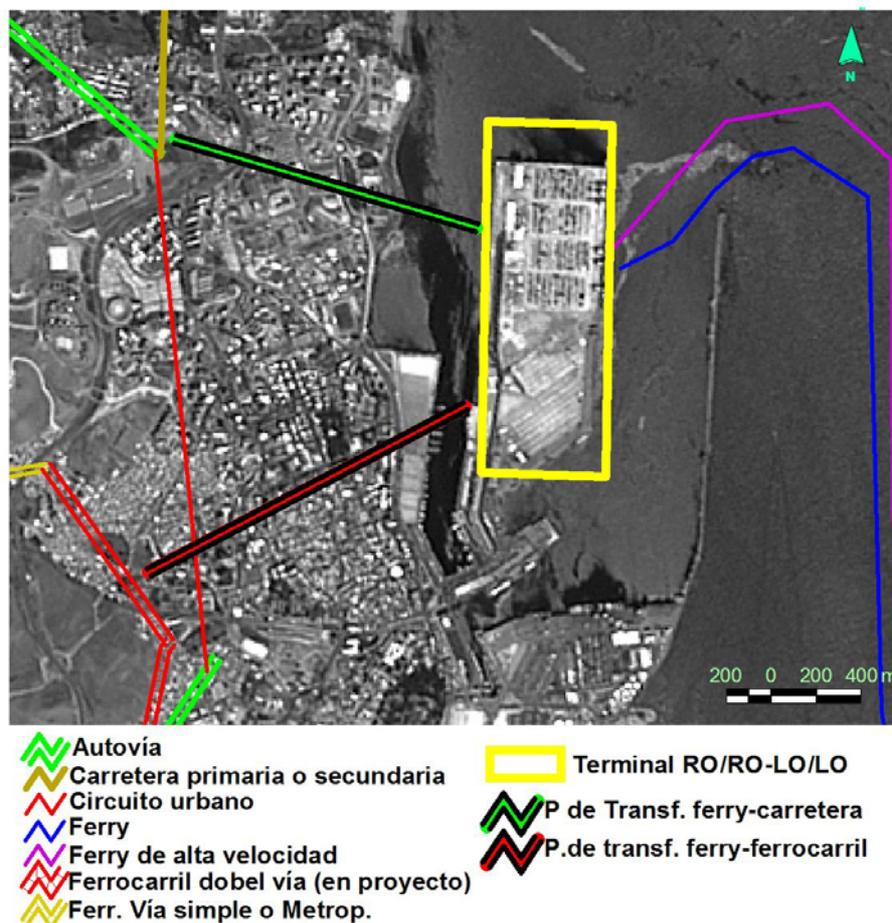


Figura 3. Arquitectura de puntos de transferencia
Fuente: Elaboración propia

3. RESULTADOS

La aplicación del modelo para el trayecto Casablanca-Munich, analizando tiempo y distancias; y utilizando como ejemplo de variable de ecoeficiencia el consumo de CO₂, arroja los resultados que se reflejan a continuación. Para ello, en primer lugar se ha elaborado el mapa y los datos relativos a la ruta intermodal con menor consumo de CO₂ (figura 2 y tabla, 1 respectivamente).

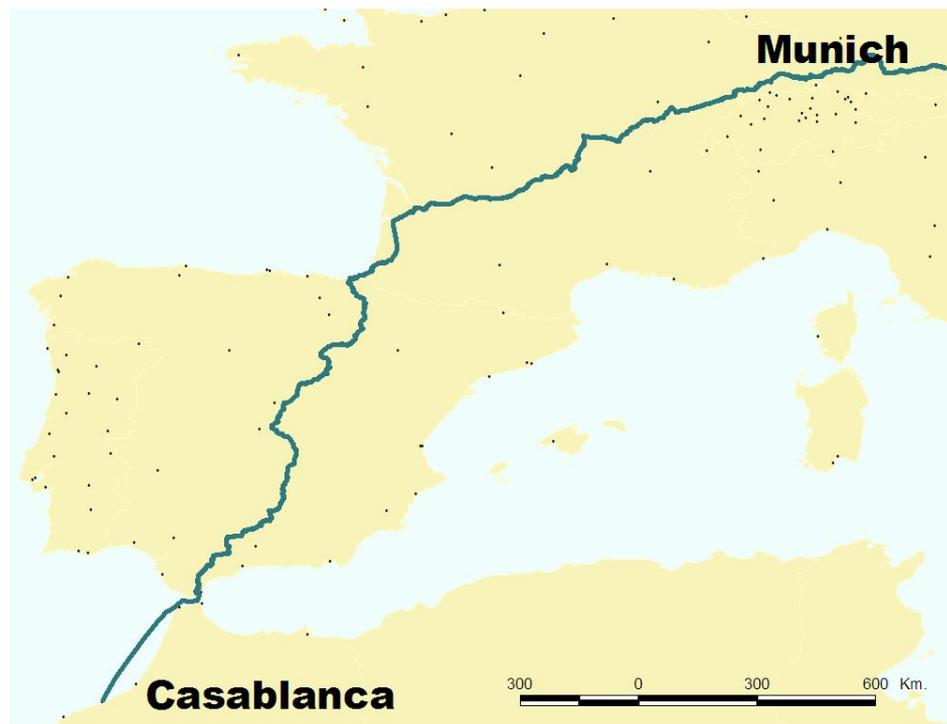


Figura 2. Trayecto con menor consumo de CO₂

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Datos logísticos del trayecto con menor consumo de CO₂.

MEDIO	TRAMOS	HORAS	METROS	CO ₂ (gr)
Transbordos	4,0	4,0	1.119,0	0,0
Ferry	12,0	13,8	366.470,0	339.717,7
Ferrocarril	241,0	36,1	2.749.973,0	1.880.981,5
Carretera	1,0	0,0	811,0	2.238,4
TOTAL	258,0	53,8	3.118.373,0	2.222.937,6

Fuente: Elaboración propia. Factor de emisión ECMT (2007) y TRENDS (2003)

En segundo lugar, se muestra el mapa y los datos asociados a la ruta intermodal que emplea menor tiempo para unir los puntos origen y destinos citados (figura 3 y tabla 2 siguientes).



Figura 3. Trayecto con menor tiempo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Datos logísticos del trayecto con menor tiempo.

MODO DE TRANSPORTE	TRAMOS	HORAS	METROS	CO ₂ (gr)
Transbordos	1,0	1,0	1.389,0	0,0
Autopista	214,0	22,7	2.270.611,0	6.266.886,4
Ferry	7,0	3,3	73.729,0	68.346,8
Ferrocarril	2,0	0,2	7.089,0	4.848,9
Carretera	106,0	7,2	475.017,0	1.311.046,9
Total	330	34,4	2.827.835,0	7.651.128,9

Fuente: Elaboración propia. Factor de emisión ECMT (2007) y TRENDS (2003).

Por último, se ha confeccionado el mapa y los datos asociados a la ruta intermodal más corta espacialmente, que se corresponden con la figura 4 y la tabla 3, respectivamente.

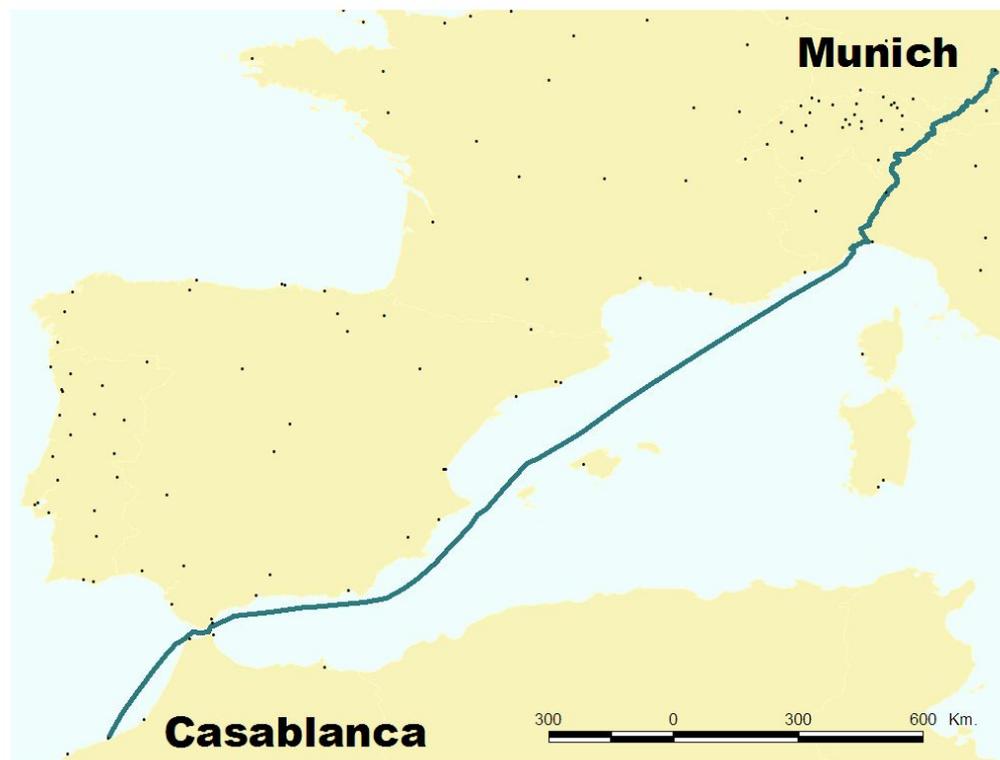


Figura 4. Trayecto más corto en distancia
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Datos logísticos del trayecto más corto en distancia.

MODO	TRAMOS	HORAS	METROS	CO ₂ (gr)
Transbordo	1,0	1,0	1.389,0	0,0
Autopista	22,0	2,3	229.264,0	632.768,6
Ferry	37,0	69,6	1.923.534,0	1.783.116,0
Ferrocarril	2,0	0,2	7.089,0	4.848,9
Carretera	33,0	5,5	376.478,0	1.039.079,3
Total	95,0	78,5	2.537.754,0	3.459.812,8

Fuente: Elaboración propia. Factor de emisión ECMT (2007) y TRENDS (2003).

Otra aproximación más detallada que se propone en el modelo consiste en el empleo del algoritmo del cálculo del consumo de combustible sin tener en cuenta factores de emisión promedio como en el caso anteriormente expuesto. Esto es aplicable cuando se disponen de datos de consumo, a partir de la potencia ideal de un vehículo en movimiento, que se define como el trabajo desarrollado por el mismo en la unidad de tiempo, esto es:

$$Potencia_{ideal} = \frac{Trabajo_{ideal}}{Tiempo} = \frac{W_{ideal}}{t}$$

Donde la potencia ideal se expresa en vatios (W), el trabajo en julios (J) y el tiempo en segundos (s).

El trabajo ideal desarrollado por el vehículo es igual al incremento de energía cinética más el incremento de energía potencial (expresadas en julios), tal como se define en la siguiente ecuación:

$$W_{ideal} = \Delta E_c + \Delta E_p$$

El incremento de energía cinética (ΔE_c) en x e y se define como:

$$\Delta E_c = 1/2 \cdot M_{vehículo} \cdot (\Delta v_x + \Delta v_y)^2$$

de donde Δv es el incremento de velocidad (m/s) en los ejes x e y, y $M_{vehículo}$ es la masa del vehículo (Kg).

El incremento de velocidad en las coordenadas x e y en el tramo definido, puede calcularse como:

$$\Delta v = \Delta v_x + \Delta v_y = \Delta x / \Delta t + \Delta y / \Delta t$$

$$\Delta v = (x_{i+1} - x_{i-1}) / (t_{i+1} - t_{i-1}) + (y_{i+1} - y_{i-1}) / (t_{i+1} - t_{i-1})$$

Los incrementos de x e y se expresan en metros y el tiempo en segundos.

El incremento de energía potencial se define como:

$$\Delta E_p = M_{vehículo} \cdot g \cdot (z_{i+1} - z_{i-1})$$

, donde $M_{vehículo}$ es la masa del vehículo (Kg), g es la gravedad (m/s²) y el incremento de z representa la altura que se expresa en metros. Los incrementos de energía cinética y potencial representan el trabajo ideal, y la potencia ideal se puede calcular como el trabajo ideal por unidad de tiempo.

Hay que considerar que el motor tiene un rendimiento que hace que la potencia real que tiene que generar el motor sea mayor a la ideal. Se define como:

$$\eta = \frac{Potencia_{ideal}}{Potencia_{real}}$$

La potencia real necesaria que tiene que generar el motor para producir el desplazamiento tiene que ser igual a la energía producida por el combustible:

$$Energía_{combustible} = M_{combustible} \cdot PCI_{combustible} = Potencia_{real}$$

La energía producida por el combustible se expresa en J/s (W), la masa del combustible en Kg/s y el poder calorífico inferior del combustible (PCI) en J/Kg. La expresión para calcular entonces la potencia real del motor, es decir su consumo, se obtiene a partir de las siguientes variables:

$$Potencia_{real} = \frac{1/2 \cdot M_{vehículo} \cdot \left[\left(\frac{v_{x(i+1)} - v_{x(i-1)}}{t_{x(i+1)} - t_{x(i-1)}} \right) + \left(\frac{v_{y(i+1)} - v_{y(i-1)}}{t_{y(i+1)} - t_{y(i-1)}} \right) \right]^2 + M \cdot g \cdot (z_{i+1} - z_{i-1})}{\eta}$$

de donde las $v_{x(i+1)}$, $v_{x(i-1)}$, $v_{y(i+1)}$, $v_{y(i-1)}$ se expresan como:

$$v_{x(i+1)} = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i} \quad v_{x(i-1)} = \frac{x_i - x_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad v_{y(i+1)} = \frac{y_{i+1} - y_i}{t_{i+1} - t_i} \quad v_{y(i-1)} = \frac{y_i - y_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

Es decir, el consumo de combustible se expresa como:

$$M_{\text{combustible}} = \frac{1/2 \cdot M_{\text{vehículo}} \cdot \left[\left(\frac{v_{x(i+1)} - v_{x(i-1)}}{t_{x(i+1)} - t_{x(i-1)}} \right) + \left(\frac{v_{y(i+1)} - v_{y(i-1)}}{t_{y(i+1)} - t_{y(i-1)}} \right) \right]^2 + M \cdot g \cdot (z_{i+1} - z_{i-1})}{\eta \cdot PCI_{\text{combustible}}}$$

Conocido el coste del combustible (c) en €/l y la densidad del combustible (ρ) expresada en Kg/l, puede obtenerse finalmente el coste total del consumo del motor (C_t), expresado en €, como:

$$C = \frac{M_{\text{combustible}}}{\rho} \cdot c$$

$$C_t = \frac{1/2 \cdot c \cdot M_{\text{vehículo}} \cdot \left[\left(\frac{v_{x(i+1)} - v_{x(i-1)}}{t_{x(i+1)} - t_{x(i-1)}} \right) + \left(\frac{v_{y(i+1)} - v_{y(i-1)}}{t_{y(i+1)} - t_{y(i-1)}} \right) \right]^2 + M \cdot g \cdot (z_{i+1} - z_{i-1})}{\eta \cdot PCI \cdot \rho}$$

4. DISCUSIÓN

La aplicación de la reglamentación de descanso en carretera se basa en el trazado de isocronas desde los puntos de interés. Los algoritmos para su aplicación en la decisión de ruta entre dos puntos contemplando el beneficio del descanso para el uso de alternativas intermodales están aún en desarrollo. Para el cálculo del valor de cada factor y variable implicada se realiza un estudio para seleccionar los valores mejor fundamentados científicamente y aplicables según la calidad y cobertura de los datos. Para ello se identifican y seleccionan factores de emisión representativos para cada contaminante, modalidad de transporte, tipología de vehículo, combustible, antigüedad, grado de ocupación del vehículo y condiciones meteorológicas velocidad y régimen de funcionamiento de la vía de comunicación y nodos de transporte. El modelo contempla un estudio de las bases de datos disponibles, como estudios de costes de externalidades ambientales, análisis de ciclos de vida de productos y servicios, bases de datos y estadísticas de accidentabilidad y datos ambientales relevantes para distintos modos y condiciones de transporte. Además se disponen de factores de emisión para distintos modos de transporte de la EPA (United States Environmental Agency), y a nivel europeo EMEP/CORINAIR 1996, y estadísticas de Eurostat, entre otras. El sistema de cálculo de costes ambientales (costes externos negativos) del trayecto y combinación de transportes se integra mediante un algoritmo general de determinación de pasillos óptimos intermodales, que considera aspectos de costes internos en materia de tiempo y costes operacionales del trayecto, que refleja los costes totales del itinerario. La implementación completa de la herramienta informática permite la generación y evaluación de alternativas bajo distintos escenarios y objetivos cambiante según los objetivos que se persiga optimizar. Tal como se aprecia en el ejemplo de la conexión Casablanca-Munich para la variable CO₂ los resultados logísticos y de ecoeficiencia son manifiestamente distintos según el criterio que prevalezca. En el caso de primar la función de ecoeficiencia para esta variable, el trayecto que optimiza esa función opta por el transporte mayoritariamente por ferrocarril. El trayecto más breve en tiempo se resuelve básicamente vía autopista, mientras que el más corto en distancia es vía marítima, pero con parámetros de tiempo y distancia diferenciales. Todo ello posibilita grados de integración crecientes de diferentes funciones de transformación correspondientes a las variables con mayor significancia desde una óptica “eco-logística”.

Seguidamente se señala la sistemática a utilizar para el desarrollo de un algoritmo e implementación del software según el modelo establecido.

a) Definición de la estructura del problema a resolver. Análisis de requerimientos.

En primer lugar, descripción de la estructura del problema que se va a resolver con el algoritmo. En esta descripción se deben identificar los distintos elementos involucrados y sus características. Existen diversas técnicas para la consecución de este objetivo: el análisis de dominio, la descripción informal de Abbot o el análisis estructurado. En el análisis de requerimientos se debe hacer un estudio detallado del problema con el fin de obtener una serie de especificaciones en las cuales quede totalmente definido el proceso a seguir en la automatización.

b) Investigación y generación de los parámetros necesarios para dar respuesta a los requerimientos anteriores.

Se deben investigar y generar los datos de entrada, de salida e internos, que se van a utilizar para la creación del algoritmo, así como los errores que puedan ocasionarse. Asimismo hay que especificar las siguientes acciones:

- Acciones de Entrada: Recogen los datos para el trabajo.
- Acciones de Proceso: Ejecutan los cálculos.
- Acciones de Salida: Ofrecen los resultados.

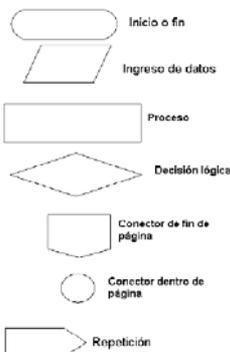
La interfaz del algoritmo está constituida por: Acciones de Entrada + Acciones de Salida + Datos de Entrada + Datos de Salida.

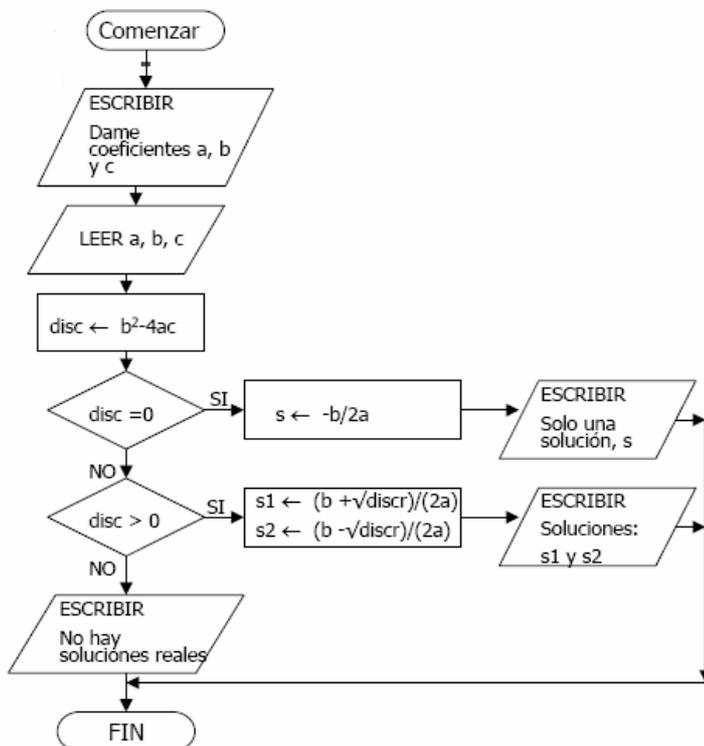
c) Desarrollo del modelo y diseño del algoritmo.

El desarrollo del modelo consiste en la obtención del algoritmo para la resolución del problema, de acuerdo a las especificaciones dadas en la fase anterior. El algoritmo puede ser un modelo abstracto, esquemático, iconográfico o pictográfico. Ejemplos de desarrollo de un modelo-tipo pueden ser:

1. Diagrama de flujo.

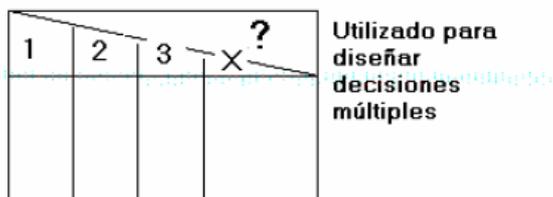
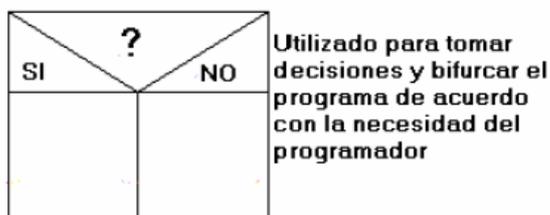
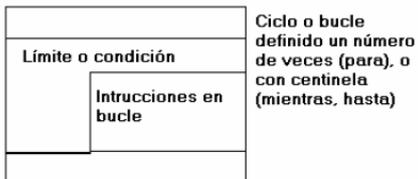
Es quizás la forma de representación más antigua. Algunos autores suelen llamarlos también como flujogramas o diagramas de caja. Un diagrama de flujo utiliza cajas estándar tales como las que se muestran:





2. Diagramas Nassi-Schneiderman o Chapin.

Corresponden a uno de los tipos de diagramación estructurada. Las acciones se escriben en rectángulos o cajas sucesivas. Se pueden escribir diferentes ecuaciones en una caja, con la siguiente simbología:



3. Pseudocódigo.

Es la técnica que permite dar la solución de un problema mediante un algoritmo escrito en palabras normales de un idioma utilizando palabras imperativas. Es común encontrar en pseudocódigo palabras como: inicie, lea, imprima, sume, divida, calcule, financie. No hay un léxico obligado para el pseudocódigo, pero con el uso frecuente se han establecido algunos estándares.

Ejemplo de un programa escrito en pseudocódigo:

INICIO

Tiempo de conducción: Entero

Escriba "cuanto tiempo de conducción"

Lea Tiempo de conducción.

Si tiempo de conducción $\geq 8,5$ entonces

ESCRIBA "transferencia intermodal"

FINSI

ESCRIBA "fin del algoritmo"

FIN

En el diseño del algoritmo se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- a. Resolución:
 - Análisis: Descubrir la estructura del problema.
 - Síntesis: Creación y construcción de una solución.
- b. Implementación:
 - Representación de la solución.
 - Revisión de los resultados.

d) Implementación en software. Lenguaje de programación.

La implementación del algoritmo consiste en la traducción del mismo a un programa escrito en un lenguaje de programación. Un lenguaje de programación es aquel elemento dentro de la informática que permite crear programas mediante un conjunto de instrucciones, operadores y reglas de sintaxis; que se pone a disposición del programador para que éste pueda comunicarse con los dispositivos hardware y software existentes. En este caso el lenguaje de programación del soporte ARCGIS es VISUAL BASIC.

e) Batería de pruebas de funcionamiento. Rendimiento y requerimientos de hardware.

Se obtiene una batería de pruebas de funcionamiento mediante las cuales se comprueba si el programa funciona correctamente y realiza las operaciones que se le han especificado. Estas pruebas no son de muy profundo carácter técnico ni detalladas, no se busca reparar todos los errores ni solucionar problemas de optimización, sino que se enfocan más a cumplir en un 100% los requerimientos definidos por el usuario en etapas anteriores.

f) Redefinición de funcionamiento e implementación software en caso de problemas.

En caso de que existan problemas tras la implementación software, hay que redefinir el funcionamiento e implementación del programa.

g) Implantación software en el resto del sistema.

En esta actividad se realizan todas las tareas necesarias para la incorporación del programa al entorno de operación en el que se van a llevar a cabo las pruebas de implantación y aceptación del sistema. Se realiza la instalación de todos los componentes del nuevo programa, incluidos los procedimientos manuales y automáticos. Se deben tener en cuenta los estándares y normativas por los que se rige la organización en los entornos de operación. Asimismo, se prepara el entorno de datos identificando los sistemas de información que forman parte del programa objeto de la implantación. Para cada uno de ellos:

- a. Se crean las bases de datos a partir del esquema físico elaborado en el proceso de construcción.
- b. Se establecen los procedimientos de explotación y uso de las bases de datos, es decir, la normativa necesaria para la utilización de las bases de datos, actualización, consulta, etc.
- c. Se revisan los procedimientos necesarios para realizar las copias de seguridad de los datos y de restauración de las copias, indicando su frecuencia, así como los procedimientos de consolidación y sincronización de la información, estos últimos cuando proceda.
- d. Se preparan las autorizaciones de acceso a los datos para los distintos perfiles de usuarios.

Una vez comprobada la correcta instalación del nuevo programa, se activan los procedimientos de operación, de administración del sistema, de seguridad y de control de acceso. Se incluyen el arranque y cierre del programa según la frecuencia establecida, la planificación de trabajos, su recuperación y reanudación, las autorizaciones de acceso al sistema según los distintos perfiles de usuario, etc.

h) **Pruebas de funcionamiento dinámico.**

Las pruebas de funcionamiento dinámico sirven para detectar errores de implantación del algoritmo en el resto del sistema y deben ejecutarse en el entorno real de operación. La finalidad de estas pruebas es doble:

- Comprobar el funcionamiento correcto del algoritmo en el entorno de operación.

- Permitir que el usuario determine, desde el punto de vista de operación, la aceptación del algoritmo instalado en su entorno real, según el cumplimiento de los requisitos especificados.

Para ello, el responsable de implantación revisa el plan de pruebas de implantación y los criterios de aceptación del algoritmo, previamente elaborados. Las pruebas las realizan los técnicos de sistemas y de operación, que forman parte del grupo de usuarios técnicos que ha recibido la formación necesaria para llevarlas a cabo. Una vez ejecutadas estas pruebas, el equipo de usuarios técnicos informa de las incidencias detectadas al responsable de implantación, el cual analiza la información y toma las medidas correctoras que considere necesarias para que el sistema dé respuesta a las especificaciones previstas, momento en el que el equipo de operación lo da por probado. El objetivo de estas pruebas es asegurar que el sistema se comporta de la forma prevista en el entorno de operación, y que responde a todas las especificaciones dadas en cuanto a:

- Recuperación, forzando el fallo del sistema y verificando si la recuperación se lleva a cabo de forma apropiada. En caso de que sea de forma automática, se evalúa la inicialización, los mecanismos de recuperación del estado del sistema, datos, etc.

- Seguridad, verificando que los mecanismos de protección incorporados al sistema cumplen su objetivo.

- Rendimiento, probando el sistema en cuanto al tiempo de respuesta de ejecución y al tiempo de utilización de recursos.

- Comunicaciones

Se evalúan los resultados de las pruebas analizando las incidencias recibidas y comprobando que se han llevado a cabo todos los casos de pruebas establecidos en el plan de pruebas. Dicha evaluación consiste en:

- Comparar los resultados obtenidos con los esperados.

- Identificar el origen de cada problema para poder remitirlo a quién proceda, determinar la envergadura de las modificaciones y las acciones que deben llevarse a cabo para resolverlo de forma satisfactoria.

- Indicar si el plan de pruebas debe volver a realizarse total o parcialmente, y si es necesario contemplar nuevos casos de prueba no considerados anteriormente.

Una vez realizadas las medidas correctoras consideradas necesarias y comprobado que el sistema cumple todos los requisitos de implantación, se registra el resultado de la evaluación de las pruebas de implantación que incluye la aprobación o rechazo del sistema.

i) **Validación final**

Esta etapa tiene como fin validar que el sistema cumple los requisitos básicos de funcionamiento esperado y permitir que el usuario determine la aceptación del sistema. Por este motivo, estas pruebas son realizadas por el usuario final que, durante este periodo de tiempo, debe plantear todas las deficiencias o errores que encuentre antes de dar por aprobado el sistema definitivamente.

En este punto el software ya está terminado, por lo que es imposible agregar nuevas funcionalidades y grandes cambios a las interfaces gráficas de usuario, ya que estos cambios podrían afectar a los requerimientos aprobados por el usuario final. Esta etapa sólo se concentra en mejorar el rendimiento a través de optimizaciones a nivel de codificación y ejecución y es necesaria para estar seguro de no omitir nada y así ofrecer un software estable. Con la participación activa de los propios usuarios y beneficiarios del sistema se traza un planteamiento completo y correcto del problema desde las primeras etapas, y por ende, la consecución de soluciones eficaces y eficientes.

La operatividad del sistema finalmente calibrado debe permitir el carácter dinámico del SIG es decir, el análisis actual y el planteamiento de supuestos por lo que los algoritmos deberán permitir la siguiente secuencia de análisis (Calkins, 1991).

1. ¿Cuál era el valor del atributo para uno o más puntos en un momento pasado? Cómo era la red antes. Es decir, el valor de la red en el pasado (velocidad media, etc.)
2. ¿Cuál es el valor actual de ese mismo atributo? Como es la red actualmente, velocidad media, emisión de contaminantes, centros más importantes, líneas habituales de transporte, etc.

3. ¿Cuál es el valor proyectado para ese atributo en el futuro? Los ejes propuestos para el futuro
4. ¿Cuál es el cambio planeado para el atributo (lo que es igual a las acciones a emprender)? El nuevo modelado con los cambios.
5. ¿Cuál es el valor del atributo en el tiempo (t+1) y siguientes? La comparación entre ambos resultados.
6. ¿Cuál es la diferencia entre el cambio proyectado y su valor en inferencia de la conclusión (t+1)
7. ¿Cuál es la diferencia entre las acciones planeadas y las implementadas en (t+1)?
8. ¿Qué cambios pueden atribuirse a las acciones emprendidas?
9. ¿Qué cambios se han producido y que no estén en consonancia con lo proyectado?

5. CONCLUSIONES

Una aportación destacable del modelo propuesto es la medición de la generación de gases de efecto invernadero en escenarios precisos con datos de consumo de combustible, o cuando esto no es posible, mediante algoritmos con factores de emisión, de utilidad tanto para evaluar pasillos y redes existentes como para la planificación continental de nuevas redes con distintos escenarios en cuanto a alternativas intermodales y condiciones operacionales de las mismas. De este modo se contribuye a la consecución de los objetivos de la política de la Unión Europea en la lucha frente al cambio climático, y en particular de la Decisión 406/2009/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 sobre el esfuerzo de los Estados miembros para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, incluidas las emisiones internacionales. El modelo conforma una herramienta aplicable a la planificación estratégica del transporte intermodal a escala internacional, en el ámbito logístico y medioambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Calkins, H. (1990). *GIS and public policy. Geographical Information Systems*, Vol. 2. Applications ed.
- Comisión Europea (2005). *Orientaciones Comunitarias para el desarrollo de la red Transeuropea de Transporte*. <http://europa.eu/scadplus/leg/es/lvb/l24094.htm>.
- Cemat, (2006). *Redes para el desarrollo territorial sostenible del continente europeo: Puentes a través de Europa*. Declaración de Lisboa. Comisión Europea.
- Díaz Alonso, A. (2003). *Tutorial para la asignatura de Análisis diseño e implantación de algoritmos*. Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo Editorial Focoa.
- ECMT (2007). *Cutting transport CO₂ emissions: what progress?*. European Conference of Ministers of Transport. OECD publications, Paris, 264 pp.
- Ministerio de Administraciones públicas. *Métrica. Versión 3. Metodología de Planificación, Desarrollo y Mantenimiento de sistemas de información*. <http://www.csi.map.es/csi/metrica3/index.html>
- INERCO (1996). *Estudio para la minimización de impactos ambientales en la instalación y explotación de líneas eléctricas aéreas*. Sistema de Información Geográfico Huso 28. Trabajo inédito. Sevilla.
- INERCO (1999). *Plan Especial de Corredores de Transporte de energía eléctrica de Tenerife*. Trabajo inédito. Sevilla.
- INERCO (1999). *Plan Especial de Corredores de Transporte de energía eléctrica de Gran Canaria*. Trabajo inédito. Sevilla

Moreno Navarro, J.G. (2006). Análisis con SIG de la Red de Transporte Intermodal Entre Marruecos y la Unión Europea. Evaluación de Rutas y Enclaves Estratégicos. *Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada*, 309-365.

Moreno Navarro, J.G. (2008) *Una Nueva Ordenación de los Transportes: las Autopistas del Mar*. Comercio, Servicios y Transporte. Patrones de una Sociedad Avanzada. Geografía de los Servicios. Madrid, España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). 349-354.

Pérez Martínez, P.J. y Monzón de Cáceres (2008). Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión. *Observatorio Medioambiental*, 127, vol. 11, 127-147.

TRENDS (2003). *Calculation of indicators of environmental pressure caused by transport. Main report*. European Commission, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.