
INNOVACIÓN DIGITAL PARA LA INCENTIVACIÓN DE LA MOVILIDAD SOSTENIBLE EN LOS DESPLAZAMIENTOS LABORALES DE IDA Y VUELTA

JESÚS MUÑUZURI

JOSÉ GUADIX

LUIS ONIEVA

PABLO CORTÉS

Universidad de Sevilla

Según las últimas estadísticas disponibles (Junta de Andalucía, 2016), en 2007 la movilidad total de las personas residentes en Andalucía ascendía aproximadamente a la cifra de 2.300 millones de viajes anuales en modos motorizados, de los cuales las dos terceras partes correspondían a movilidad en día laborable. El uso de transporte privado, principalmente en el ámbito laboral, consume alrededor del 40% de la energía primaria en los países

industrializados, generando una situación medioambiental insostenible. El modelo de gestión debe, por tanto, ser revisado, existiendo una necesidad de promover una movilidad sostenible sobre la base de fomento del uso del transporte no motorizado en el ámbito laboral.

Existen diferentes herramientas aplicables para este fin, como identificó el proyecto europeo e-Cosmos en 2010. Planes de movilidad empresariales, iniciativas para compartir vehículo, flete de autobuses para la recogida y vuelta a casa de los trabajadores, etc. Se trata en su mayor parte de políticas destinadas a facilitar la adopción de prácticas de movilidad sostenible sin que ello represente un inconveniente para el trabajador, en términos de tiempo de desplazamiento o coste.

En este trabajo se presenta el diseño y puesta en funcionamiento de una nueva herramienta pensada con la finalidad de favorecer la movilidad sostenible en una empresa, en este caso permitiendo la puesta en marcha de un sistema de incentivos para aquellos trabajadores que realicen desplazamientos laborales no

motorizados. También existen iniciativas de este tipo en funcionamiento, aunque normalmente están basadas en una declaración por parte del trabajador, que afirma estar acudiendo al trabajo a pie, en bicicleta o en transporte público y recibe a cambio una ayuda de la empresa. Sin embargo, es posible aprovechar los procesos de transformación digital, en este caso a través del uso de las tecnologías de movilidad y comunicaciones actuales, para comprobar automáticamente este tipo de prácticas, identificando los patrones de movilidad de los trabajadores y la frecuencia con que los ponen en práctica (por ejemplo, una persona puede ir a trabajar en bicicleta solamente tres días a la semana), facilitando y fundamentando la gestión de los incentivos por movilidad sostenible.

Un sistema de este tipo debe basarse necesariamente en la aplicación de las nuevas tecnologías, al alcance de los ciudadanos gracias a sus dispositivos móviles, que permiten una gestión basada en datos reales y con alto nivel de detalle, junto con el diseño de algoritmos que trabajen en tiempo real. El problema consiste básicamente en dotar a las empresas de un sistema que permita

detectar los patrones de movilidad de las personas en sus desplazamientos a su lugar de trabajo, identificando si corresponden al uso de medios motorizados o no, permitiendo a la empresa bonificar a los trabajadores de la manera que se decida a través de la identificación de un perfil de movilidad sostenible. En relación con este objetivo, es importante recalcar dos cuestiones:

- En primer lugar, la participación de los trabajadores en el programa de incentivos sería voluntaria, y para ello deberían acceder a que el sistema tuviera acceso a sus datos de movilidad, respetándose así los condicionantes de protección de datos personales.
- En segundo lugar, el desplazamiento en medios de transporte público como el autobús, tren o tranvía se considerará aquí como transporte motorizado, y por tanto no susceptible de incentivación. Esto es así porque, pese al grado de sostenibilidad que implica este tipo de transporte frente al vehículo privado, se trata de unos medios de transporte cuya operativa es notablemente deficitaria, y que precisan por tanto de la inyección de dinero público para su funcionamiento. De esta manera, es lícito considerar que los usuarios de estos medios de transporte ya están recibiendo de manera indirecta una ayuda económica en sus desplazamientos, algo que no ocurre con los que se desplazan a pie o en bicicleta.

En el próximo apartado se describe el estado del arte de las tecnologías a partir de las cuales puede desarrollarse un sistema de este tipo. A continuación, se describe la visión general del sistema y la arquitectura propuesta, con especial atención al algoritmo de clasificación de modos de transporte. Finalmente, se detallan las pruebas de validación realizadas y las conclusiones alcanzadas.

ESTADO DEL ARTE ¶

Tradicionalmente, los datos de movilidad se han recogido a través de encuestas en las que se requiere que el participante registre los detalles de su desplazamiento. Originalmente, la recogida de información estaba basada en encuestas telefónicas o en papel; sin embargo, en la mejora de la telefonía móvil y la accesibilidad que tiene la población a terminales que cuentan con dispositivos de geolocalización, convierten a estos en potentes herramientas para registrar los desplazamientos (Nour *et al.*, 2015; Feng *et al.*, 2012). Con los avances en las comunicaciones y las tecnologías inalámbricas, la mayoría de los teléfonos están equipados con sensores GPS. Estos teléfonos pueden transmitir directamente los datos a un servidor para su análisis y validación. El uso de estas herramientas genera un sistema sencillo de implantar en una sociedad moderna, aportando información con alta precisión y mínima carga sobre los participantes.

En esta línea, los esfuerzos de investigaciones recientes se han centrado en el desarrollo de modelos de in-

ferencia para identificar los modos de transporte sobre la base de los datos GPS medidos. A menudo, estos modelos se basan en parámetros intrínsecos del movimiento, tales como velocidad instantánea o media, aceleración y distancia recorrida. Actualmente son dos las líneas generales que se están desarrollando: (1) el uso de modelos basados en reglas simples que dependen principalmente de los umbrales asociados con los atributos medidos (por ejemplo, velocidad y aceleración) y (2) modelos de aprendizaje artificial. En la mayoría de estudios existentes, los métodos propuestos han tenido un éxito moderado en cuanto a ser capaces de inferir con precisión el modo de transporte usado.

Varias revisiones recientes (Chung *et al.*, 2005; Gong *et al.*, 2012; Bolbol *et al.*, 2014; Bohte *et al.*, 2009; Schüssler *et al.*, 2008) cubren las principales áreas de investigación relacionadas con la detección de los medios de transporte usados en base a los datos obtenidos de sensores GPS, acelerómetro, giroscopio, etc. El análisis de estas revisiones prueba que la complejidad de los sistemas de detección radica en los intervalos de confusión donde la detección de un medio u otro se hace compleja, y en el correcto uso de la información arrojada por más de un sensor en el mismo instante de tiempo, lo que lleva a los investigadores a buscar patrones de comportamiento y la programación de sistemas de clasificación e inteligencia artificial que aúnen las medidas tomadas por los sensores, clasificando las mismas en el medio de transporte utilizado. Así, por ejemplo, Chung y Shalaby (2005) recogieron datos mediante dispositivos GPS portátiles, determinando los puntos en los que se cambia de modo de transporte o se producen paradas. Por lo tanto, es un foco importante del algoritmo que presenta la identificación de las transiciones desde parada a movimiento o viceversa. Los autores definen eventos como el de fin de movimiento (EOW) y e inicio de movimientos (SOW), y dividen el desplazamiento realizado en vectores resultantes de la detección de la parada, donde analizan atributos de velocidad y aceleración. Con los vectores de movimiento localizados emplean algoritmos de lógica difusa para detectar el modo de transporte utilizado. Este trabajo se ha convertido en la base sobre la que muchos otros investigadores han construido sus modelos de clasificación.

Son varios los autores que han implementado datos provenientes de otras fuentes diferentes al GPS, que incorporan los teléfonos, para mejorar la precisión en los cambios de modo de transporte. Tsui y Shalaby (2006) extienden el trabajo de Chung y Shalaby (2005) mediante el uso de un mapa GIS y servicios de información de rutas de tránsito. El enfoque fundamental es hacer coincidir un segmento del desplazamiento (desde el GPS) con la presencia de una ruta de tránsito (de GIS). Han desarrollado un algoritmo de búsqueda de rutas que sólo se activa cuando el conjunto de datos coincide con al menos una ruta asignada a medios de transporte públicos urbanos. La adición de este algoritmo de búsqueda a su modelo de clasificación mejora la precisión del clasificador del 76% al 80% teniendo en cuenta el deseo por parte de los investigadores de detectar cambios en diferentes medios de transporte mo-

torizado, umbrales donde la confusión de clasificación se hace mayor.

Gong *et al* (2011) y Schüssler (2010) siguen con la estrategia de Chung y Shalaby dividiendo la ruta en segmentos a fin de tipificar los modos de transporte usados. Aumenta la precisión de la clasificación añadiendo un sistema de referencia geolocalizada entre los puntos tomados por GPS y las estaciones o rutas conocidas de transporte público, y los datos GIS son aportados al algoritmo por los entidades encargadas de la gestión del transporte público de Nueva York, al igual que los parámetros característicos conocidos de movimiento de las unidades de transporte que la integran. Otros investigadores mejoran el rendimiento de sus modelos de clasificación mediante la adquisición de información adicional a la ya mencionada. Por ejemplo, Stenneth *et al* (2011) no sólo comparan los datos del GPS con las rutas de tránsito del transporte público y las estaciones, sino que también incluyen una componente temporal ligada a los horarios de los mismos.

En el ámbito de este trabajo se ha optado por el desarrollo de un algoritmo de detección del modo de transporte basado en información sobre velocidad recogida por el dispositivo GPS incluido en el teléfono móvil del usuario, además de la creación de un sistema de gestión que permita el correcto uso de la información aportada por parte de la empresa. Con esto se hace necesaria la capacidad de desarrollar un método que implemente un modelo de clasificación con respecto a los siguientes puntos: (1) el número de atributos a considerar en el modelo basado en la capacidad de los mismos para distinguir entre los modos de transporte disponibles; (2) el tipo de procesamiento de datos a emplear; y (3) los parámetros del modelo.

VISIÓN GENERAL DEL SISTEMA ↓

El objetivo último del desarrollo realizado es la puesta en marcha de una herramienta para incentivar en la ciudadanía el uso del transporte no motorizado en el ámbito laboral, lo que redundará en beneficio de la mejora de la sostenibilidad ambiental, la calidad de vida y la salud de las personas. El sistema pretende aprovechar las tecnologías de movilidad actuales, al alcance de la ciudadanía, para hacer que participe de forma activa en el desplazamiento laboral no motorizado gracias a la incentivación que habrá que fomentar desde las empresas y Administraciones Públicas en pos de la mejora de la movilidad de las personas. A tal efecto, es indispensable utilizar infraestructuras y herramientas de movilidad con soporte para geolocalización, aprovechando recursos disponibles como el callejero digital, la red de transportes, la red de carreteras, etc., que sirvan como soporte.

El sistema propuesto se basa en una aplicación que el usuario instala en su teléfono móvil y que recopila información sobre sus desplazamientos gracias a la herramienta de geolocalización disponible en él. Esta recopilación se lleva a cabo únicamente dentro de un tramo horario prefijado, con el objeto de recoger únicamente

datos sobre la trayectoria de ida y vuelta entre el domicilio y el lugar de trabajo. Posteriormente, la información se vuelca al servidor, en el que está activo el algoritmo de clasificación, encargado de determinar si los trayectos realizados corresponden a desplazamientos motorizados o no. El resultado de la aplicación del algoritmo queda disponible tanto para el administrador del sistema, a través de la correspondiente base de datos, como para el propio usuario, a través de una aplicación web en la que puede consultar su información de movilidad. Esta información, además del archivo histórico de los desplazamientos realizados, consiste en la identificación de si el usuario realiza desplazamientos no motorizados para acudir a su puesto de trabajo, y qué porcentaje de su movilidad se realiza a pie o en bicicleta. El sistema de incentivación consistiría entonces en un procedimiento establecido externo al sistema de identificación de movilidad, en el que habría que decidir cuestiones como el tipo de incentivo a conceder (en tiempo de trabajo, económico, etc.), el porcentaje mínimo de movilidad no motorizada requerido para optar al incentivo, y qué hacer con los desplazamientos mixtos (por ejemplo, el caso de usuarios que utilicen la bicicleta para ir desde su domicilio hasta un intercambiador ferroviario, tomen el tren y posteriormente vuelvan a pedalear hasta llegar a su lugar de trabajo).

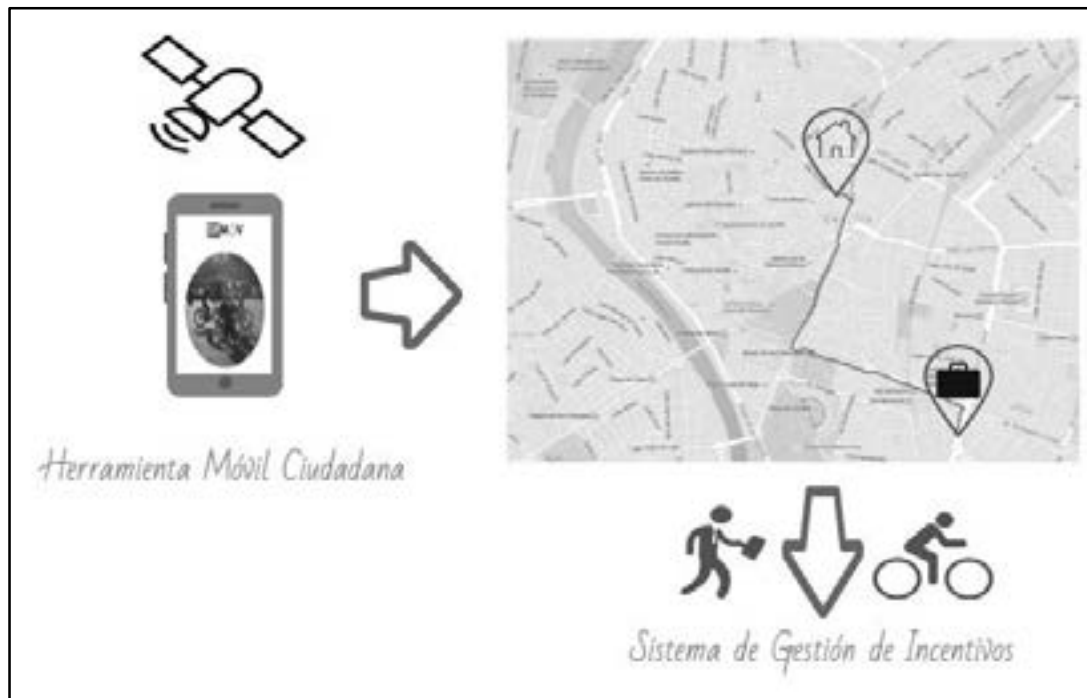
Con ello se posibilita la consecución de beneficios tanto de tipo medioambiental como de gestión del transporte y la movilidad. En cuanto a los beneficios medioambientales, teniendo presente que en torno al 81% de la movilidad se realiza mediante vehículo privado, y estableciéndose una media de unos 160 viajes por persona/año en horario laboral, el sistema pone a disposición de la ciudadanía la capacidad de manejar información veraz de desplazamientos laborales sostenible a fin de ofrecer beneficios fiscales, pudiéndose avanzar de forma macroscópica en los siguientes objetivos:

- Ahorro de combustible y mejora en la dependencia de combustibles fósiles.
- Reducción del consumo de emisiones de CO₂.
- Reducción de impacto ambiental que origina el transporte al optimizarse los recursos.
- Mejora y gestión de cálculo de rutas.

Por otro lado, el sistema aporta indudables mejoras en la gestión del transporte, entre las que cabe citar las siguientes:

- Optimización en la gestión y cálculo de rutas.
- Optimización de los flujos de transportes de pasajeros.
- Aplicación de la red inteligente en múltiples ámbitos de uso adicionales al transporte, repercutiendo en un ahorro de costes del sistema.
- Aumento de la vida útil de los elementos de transporte al optimizar su uso.

FIGURA 1
VISIÓN GENERAL DEL SISTEMA QUE PERMITE IDENTIFICAR PATRONES DE DESPLAZAMIENTO PARA LA PUESTA EN MARCHA DE INCENTIVOS A LA MOVILIDAD SOSTENIBLE



Fuente: Elaboración propia

El esquema de funcionamiento del sistema se muestra en la Figura 1. En cuanto a la arquitectura del mismo, consta de tres componentes independientes pero interconectados:

- La aplicación de teléfono que recoge los datos de detección.
- El servidor que incluye la base de datos, así como el procesamiento de datos y algoritmos de validación.
- La interfaz web a la que pueden acceder los administradores o usuarios para ver y gestionar los datos procesados.

Los tres componentes que conforman la arquitectura del sistema, así como los flujos de datos entre ellos, se muestran en la Figura 2, y se describen con mayor nivel de detalle en las secciones siguientes.

Aplicación móvil

La aplicación para *smartphone*, diseñada tanto para plataformas Android como iOS, recoge los datos del sensor GPS disponible en el teléfono. Uno de los principales objetivos del diseño de esta aplicación es su característica de no-intrusión, dado que la aplicación se ejecuta en segundo plano del teléfono y en silencio recoge los datos sin intervención del usuario. Así, los usuarios no se ven influidos de ninguna manera por la aplicación durante su actividad en el desplazamiento. Además,

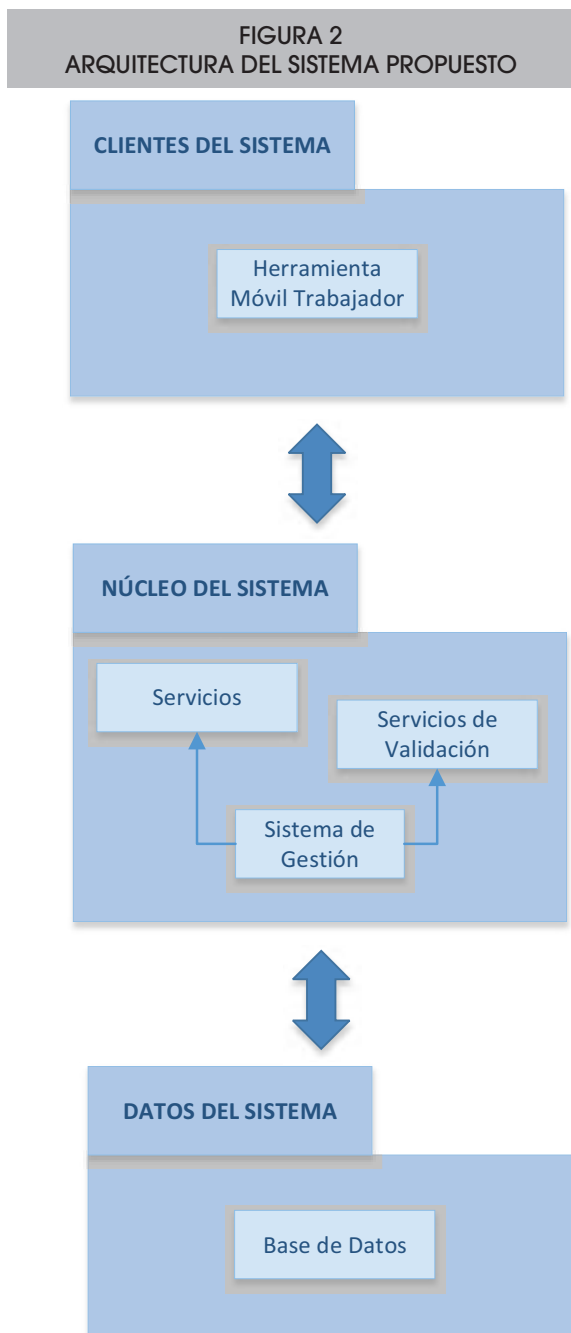
la aplicación está diseñada para ser de peso ligero y fácil de usar. Cada 10 segundos la aplicación registra información sobre la hora UTC, latitud, longitud, altitud, velocidad instantánea, rumbo, número de satélites de la medida y el DHS. Una de las principales preocupaciones para las aplicaciones basadas en la localización es el consumo de la batería, y por ello se han realizado esfuerzos para minimizar el consumo de batería. Los datos recogidos en el teléfono se transfieren al servidor de gestión a través de cualquiera de las redes de telefonía de datos o Wi-Fi, en función de las preferencias del usuario. El envío de datos se realiza en formato *json*.

Base de datos

Los datos primarios recogidos a través de la aplicación se cargan en una base de datos sobre la que se ejecuta un algoritmo, que se describe más adelante, para procesar la información y hacer inferencias sobre las rutas y sobre los medios de transporte utilizados en las mismas. Para minimizar la carga de interacción del usuario, los algoritmos de *back-end* traducen los datos en bruto de los desplazamientos y las actividades, y los modos de desplazamiento se detectan basándose en las funciones del GPS y el acelerómetro del teléfono móvil.

Plataforma web

La interfaz web proporciona una plataforma que permite a los diferentes agentes intervinientes en el uso revisar sus datos procesados en forma de diario temporal de



Fuente: Elaboración propia

actividad. La plataforma web permite la administración de la base de datos a tres tipos de actores intervinientes en el sistema, cuyos roles son los siguientes:

- Superusuario: rol encargado de la gestión completa del servicio, con visualización completa del resto de perfiles existentes. Tiene permiso para dar de alta y baja empresas en el sistema.
- Administrador de empresa: perfil de gestión de la empresa y sus trabajadores. Tiene permiso para realizar las siguientes actividades:
 - Alta de sedes laborales.

- Alta de usuarios.
- Gestión de los patrones de desplazamiento del usuario.
- Gestión de los horarios laborales del usuario.
- Usuario: solo permite la visualización de datos y la generación de informes personales de los desplazamientos realizados.

La plataforma ofrece informes de los desplazamientos de los usuarios, en los que las rutas se muestran sobre una capa de visualización. La Figura 3 contiene un ejemplo de visualización de una de estas rutas. El sistema ofrece la referencia del patrón base (color claro) para el desplazamiento, calculado sobre la base de un algoritmo de ruta mínima entre dos puntos, y el desplazamiento realizado por el usuario (color oscuro).

DETECCIÓN DEL MODO DE DESPLAZAMIENTO ↓

La determinación de los modos de transporte utilizados en diferentes desplazamientos es uno de los principales temas de investigación para estudios en toma de datos por GPS, y es el paso crucial para que estas aplicaciones de fomento de la movilidad sostenible sean útiles a gran escala. Actualmente, existen publicaciones de algunos enfoques para la detección automatizada del modo de desplazamiento, como es el caso de Stopher *et al.* (2005), que trabajan con una eliminación gradual de los modos de transporte basándose en la velocidad media y máxima. En contraste con la mayoría de los autores, asumen que cada desplazamiento se lleva a cabo en un solo tipo de transporte. Jong y Mensonides (2003) dividen los desplazamientos en segmentos mono-modo basándose en la suposición de que es necesario un corto periodo de tiempo a velocidad cero para realizar un cambio de un transporte a otro, y seguidamente, mediante el empleo de características de velocidad y la proximidad a las paradas y rutas de transporte público, determinan el medio usado en cada segmento del desplazamiento. Además, implementan ciertas restricciones de uso, prohibiendo al algoritmo la posibilidad de cambios entre autobús y coche sin que exista una etapa intermedia de desplazamiento a pie.

El enfoque seguido en este trabajo se basa en el método de detección de modo propuesto por Chung y Shalaby (2005) y Tsui y Shalaby (2006). Este método se fundamenta en el paso previo de detectar las paradas en la ruta realizada, mejorando así la fiabilidad de los atributos de la velocidad. En consecuencia, cada desplazamiento se divide en etapas mono-modo separados por los puntos en los que se producen paradas. Posteriormente, el medio de transporte usado en cada uno de los segmentos se determina mediante la aplicación de un enfoque basado en un árbol de clasificación sobre los atributos de velocidad y aceleración. Sobre la base de las circunstancias en el área de estudio, el objetivo es clasificar cada segmento dentro de uno de los tres modos de desplazamiento posibles: caminar, bicicleta y vehículo motorizado.

FIGURA 3
EJEMPLO DE VISUALIZACIÓN DE UNA RUTA



Fuente: Elaboración propia

El programa recorre un vector con los datos GPS recogidos durante el trayecto. Estos datos se recogen cada 20 segundos, y son datos de tipo estructura, de manera que en cada lectura se almacena la siguiente información: latitud, longitud, velocidad, tiempo. A partir de esos datos, el algoritmo en primer lugar identifica los segmentos, y realiza las siguientes tareas:

- Búsqueda de paradas o segmentos sin movimiento.
- Detección del modo de transporte usado en los diferentes segmentos de movilidad.

A continuación se describen en mayor profundidad los cinco pasos secuenciales de ejecución del algoritmo de clasificación. Los elementos cruciales son los atributos de velocidad de los segmentos, las reglas de decisión describen la relación entre los modos y las variables, y las funciones de pertenencia a cada modo de transporte son parametrizables por el administrador del sistema.

PASO 1: los puntos de inicio y fin de ruta no siguen pautas de uso por atributos de velocidad, sino que se identifican mediante aproximación geográfica a los puntos indicados en el sistema como hogar y lugar de trabajo. Así, la primera verificación que el algoritmo toma en consideración es la comprobación de la distancia de la primera toma de GPS realizada con el domicilio asignado para el usuario en su perfil personal, que debe cumplir un umbral de tolerancia prefijado.

PASO 2: la siguiente operativa del algoritmo es la detección de puntos de parada o carencia de movimiento, a fin de eliminar medidas de velocidad que alteren los umbrales asignados a cada medio de transporte. Con ello, el algoritmo busca puntos donde la velocidad es menor a un determinado umbral y observa los siguientes puntos que cumplan esta condición hasta que detecta una velocidad superior al umbral.

Hay cuatro tipos de puntos a través de los cuales el algoritmo crea señales de aviso internas: final de la ruta (*end of movement*, EOM), inicio de la ruta (*start of movement*, SOM), inicio de segmento parada (*start of stop*, SOT) y fin de segmento parada (*end of stop*, EOT). Cada segmento de la ruta estará por tanto acotado entre un punto SOM y otro EOM, y cada parada entre un punto SOT y otro EOT. Así, cada vez que se detecta un punto de la ruta en el que la velocidad es inferior al umbral de parada, se busca si hay otros puntos anteriores o posteriores del desplazamiento que cumplan la misma condición. El primer punto de esta secuencia será identificado como un punto SOT (y el anterior a él como un punto EOM), y el último punto de la secuencia será identificado como un punto EOT (y el siguiente a él como un punto SOM). Estas designaciones siguen las siguientes restricciones:

- Un punto SOT no puede ir seguido de puntos con medidas de velocidad superiores al umbral de parada.

- Un punto EOT no puede ir seguido de puntos con medidas de velocidad inferiores al umbral de parada.

De esta manera, la ruta queda dividida en segmentos o tramos de actividad. Seguidamente, para cada uno de esos tramos se aplicará el proceso de clasificación, a fin de detectar el modo de transporte usado en cada segmento de la ruta.

PASO 3: teniendo ya los segmentos de movimiento aislados, el algoritmo analiza cada uno de los puntos GPS dentro de cada segmento, y clasifica el segmento como a pie, en bicicleta o motorizado según los umbrales de velocidad asignados. Para relajar el criterio de clasificación, la toma de decisiones se realiza según un percentil prefijado. Por ejemplo, si este percentil se hubiera fijado en el 80%, se admitiría que un determinado segmento del desplazamiento se ha realizado en bicicleta cuando al menos el 80% de las lecturas GPS de ese segmento reflejaran un dato de velocidad dentro de los umbrales establecidos para la bicicleta. De esta manera, se consigue un efecto parecido al de aplicación de la lógica borrosa para el proceso de clasificación, atenuando los errores de identificación debidos a situaciones puntuales (como por ejemplo, el caso de un ciclista que acelera anormalmente para adelantar a otro en un carril bici, pudiendo alcanzar durante un instante una velocidad asociada a un medio de transporte motorizado).

PASO 4: con cada segmento clasificado, el algoritmo estudia la media de asignaciones, y toma una valoración de los medios empleados en la ruta total de desplazamiento. De nuevo, a fin de relajar el criterio, se permiten segmentos con una clasificación diferente a la media tomada, siempre y cuando no se encadenen más de dos consecutivos. Es decir, si en un trayecto total hay algún segmento aislado que se ha identificado como motorizado, pero los segmentos anterior y posterior siempre se han considerado como no motorizados, se entenderá que el trayecto en su globalidad ha sido no motorizado. Por el contrario, si a pesar de existir segmentos no motorizados aparecen en el desplazamiento varios segmentos motorizados encadenados, se entiende que se ha producido un cambio de modo de desplazamiento, y se clasifica la ruta completa como motorizada.

PASO 5: como última restricción para considerar válida la ruta, el sistema realiza una comprobación de distancia entre el último punto de toma GPS y la sede laboral indicada, de nuevo con un umbral de tolerancia para la distancia, así como una comprobación de concordancia respecto al horario laboral asignado al usuario.

ALGORITMO DE CLASIFICACIÓN ↓

La Figura 4 muestra el pseudocódigo del algoritmo de identificación del modo de transporte utilizado en un desplazamiento. La notación utilizada es la siguiente:

- N se corresponde con la longitud de vector ruta, es decir, todos los puntos tomados por el GPS.
- D_{min} es la definición de una referencia de distancia entre dos coordenadas GPS.
- P_i y P_j son puntos de toma de datos GPS, dentro del vector ruta.
- $P_{iniciomov}$ y P_{finmov} son puntos de toma de datos GPS que delimitan un segmento de movilidad.

RESULTADOS ↓

Las pruebas de validación del sistema se realizaron en la ciudad de Sevilla, a partir de datos reales de movilidad de diversos usuarios durante un periodo de un mes, y con la siguiente configuración:

- Umbral de tolerancia para los puntos de inicio y final de la ruta: 200 m.
- Umbral de parada: valor de 0,5 m/s, valor recomendado por Gong *et al* (2011).
- Umbral de desplazamiento a pie: 2,78 m/s (10 km/h).
- Umbral de desplazamiento en bicicleta: 8,34 m/s (30 km/h).

Para la realización de las pruebas, cada sujeto utilizaba su propio teléfono móvil, en el que previamente había instalado la aplicación del sistema. Al iniciar un nuevo desplazamiento a su lugar de trabajo, la persona debía iniciar la aplicación de seguimiento en el teléfono y dejar constancia del modo de transporte utilizado. Durante el periodo de validación, se recopilaban un total de 48 desplazamientos. La Tabla 1 muestra el resultado de la comparativa entre la realidad y las clasificaciones realizadas por el algoritmo, obteniéndose unos resultados similares a los de ejemplos similares en la literatura, aunque seguramente susceptibles de mejorar en caso de un mayor refinado de las calibraciones del sistema.

En efecto, los casos de confusión mostrados en la tabla anterior entre los campos de No-Motorizado y Motorizado, con 5 casos en los que el algoritmo comete errores de clasificación, se debieron al periodo de ajuste de los parámetros de velocidad máxima permitida para cada medio de transporte. Concretamente, el área compartida entre velocidades altas para el uso de la bicicleta y velocidades bajas en el uso de transporte motorizado, condiciones comúnmente observadas en núcleos urbanos donde existe congestión del tráfico rodado y carriles bici donde la bicicleta puede alcanzar mayores valores de velocidad. A fin de mejorar los resultados del criterio de clasificación se relajaron los valores de velocidad máxima admisible a la bicicleta, con estudios estadísticos de la velocidad a partir de las lecturas GPS.

En la Figura 5 se puede observar una ruta realizada por un usuario durante el periodo de validación, en la

FIGURA 4
 PSEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO DE CLASIFICACIÓN IMPLEMENTADO PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL MODO DE TRANSPORTE EN LOS DESPLAZAMIENTOS.

```

INICIO
Si primera toma GPS cerca de la localización asignada como domicilio
Comprobación toma de GPS cercano a posición lugar designado como laboral
Si (dist(Pi, Ptrabajo) < D)
    i=N;
Fin si

* Identificación de los segmentos de paradas del vector ruta
Pparada <- Detección parada (N, Dmin, P)
    Leer N, D;
    Leer Pi, Pj;
    Mientras i < N-1 Hacer
        j=i+1;
        Si (Pj.vel > 0,5 || dij > Dmin)
            j=j+1;
        Si no
            Si (Pj.vel <= 0,5 || dj <= Dmin)
                P detecta inicio parada;
                Sk = Pj;
                k=k+1;
                j=j+1;
            Fin Si
        i=j;
    Fin Mientras
Fin proceso

* Detección del modo de transporte (N, Pi, Vi,max)
Vi,max: datos directos desde la toma GPS.
Recorrer ruta hasta primer punto designado parada. Marcar punto parada y buscar siguiente punto de parada y marcar.
Pi = Piniciomov, Pj = Pfinmov;
Leer Piniciomov, Pfinmov;
Smovilidad <- DIVISIÓN del segmento movilidad en porciones más pequeñas
Para j=i hasta j=n Hacer
    Piniciomov = j
    Si (Vi,max < 2,78)
        Mode=Walk;
    Si no
        Si (Vi,max < 7,22)
            Mode=Bike;
        Si no
            Mode=Motor;
        Fin si
    Fin si
    p=n+1;
Fin procesoa
i=n;
n=p;
Fin proceso
Si 80% de segmentos mismo modo de transporte
    Modo Transporte Asignado;
Fin si
FIN
    
```

Fuente: Elaboración propia

que se indican el patrón asignado por el sistema como ruta óptima, y la realizada por el usuario, con los puntos de parada marcados. La ruta ha sido clasificada como válida, es decir, desplazamiento no-motorizado, y cumple con las restricciones de distancia respecto al punto de inicio (domicilio del usuario) y el punto final de la ruta (lugar de trabajo del usuario). Cuando existe una disparidad entre la ruta óptima y la ruta efectiva, como en este caso, el sistema cuantifica como kilómetros no motorizados realizados los correspondientes a la ruta óptima, de manera que si el usuario decide seguir otros

itinerarios por cualquier motivo es libre de hacerlo, pero esa distancia adicional no le es computada a efectos del incentivo posterior.

CONCLUSIONES ↓

En este trabajo se ha presentado la arquitectura y el algoritmo para un sistema de detección del modo de transporte utilizado en los desplazamientos de ida y vuelta al lugar de trabajo, aunando para ello tecnologías de alta disponibilidad como son los teléfonos

TABLA 1
RESULTADO DE LAS VALIDACIONES DEL SISTEMA DURANTE EL PERIODO DE PRUEBAS

		Clasificado como	
		No-Motorizado	Motorizado
Realidad	No-Motorizado	26	5
	Motorizado	2	15
Precisión (%)		92,86	75,00

Fuente: Elaboración propia

FIGURA 5
EJEMPLO DE ITINERARIO DETECTADO PARA UN USUARIO DURANTE EL PERIODO DE VALIDACIÓN (CON LOS PUNTOS DE PARADA DETECTADOS POR EL SISTEMA FRENTE A LA RUTA ÓPTIMA TEÓRICA)



Fuente: Elaboración propia

móviles, y bases de datos para el post-procesado de la información. El objetivo del sistema es el empleo de las tecnologías digitales para, de forma automática, identificar qué personas acuden a su trabajo utilizando medios no motorizados, permitiendo la puesta en marcha de políticas de incentivos que fomenten la movilidad sostenible.

A partir de las pruebas de validación realizadas, cabe concluir que el modelo propuesto de clasificación del modo de transporte, a través del uso del GPS integrado en los teléfonos móviles, identifica de forma correcta los desplazamientos como motorizados o no-motorizados.

Además, la puesta en marcha del sistema alcanza los siguientes objetivos:

- Se ofrece una plataforma de participación de la ciudadanía a través de sus propios dispositivos móviles, siempre siguiendo los criterios de confidencialidad de la información que se provea desde estos dispositivos, permitiendo la participando de forma activa en su propio beneficio, tanto económico como saludable, y redundando de forma directa en la mejora de los servicios públicos así como en la mejora de la sostenibilidad ambiental y reducción del gasto público en materia de transporte y salud.

- Además de proporcionar beneficios individuales y de sostenibilidad global, se posibilita la generación de una importante base de datos en relación a la conducta de movilidad de la ciudadanía. De esta manera, la característica de datos reales que se pueden obtener confiere al sistema una capacidad expansiva que puede ser explotada, en diferentes ámbitos, como base de servicios que pueden añadirse a partir de la información tratada, de forma que puedan ser consumidos por otros clientes. Ejemplos de estos servicios pueden ser los sistemas de información orientados a la gestión de plataformas de bicicletas, la gestión de obras e infraestructuras (mejora de carriles bici, acerados...) en función de los flujos ciudadanos, etc. Todo ello dota a estas tecnologías del potencial para vertebrar, a través de la integración de sistema, la transformación hacia el concepto de ciudad inteligente (*Smart City*) sostenible.
- El sistema propuesto es una muestra de las múltiples aplicaciones de la transformación digital a todos los ámbitos organizativos y sociales. En este sentido, el sistema representa un paso más en la incorporación de la tecnología digital a la vida cotidiana, utilizando los sistemas de información, localización y comunicación para identificar patrones de movilidad. Siguiendo una filosofía de Industria 4.0, se automatiza el proceso de comprobación y gestión de los patrones de movilidad de los ciudadanos, generando una importante cantidad de información útil, además de externalidades positivas.

Para la captura de información no se precisa además disponer de tecnologías que puedan quedar obsoletas en poco tiempo, y se dedica esfuerzo al tratamiento de la información, aprovechándose la infraestructura de movilidad existente a nivel de usuario, en continua evolución. En este sentido, el desarrollo descrito se enmarca en el contexto de aplicaciones de nueva generación, ya que ofrece de forma explícita acceso multi-terminal, entendiéndose éste como acceso universal desde una amplia gama de dispositivos web o móvil; inteligencia artificial, pues se plantea un sistema dotado con memoria e inteligencia en las validaciones para aplicación de incentivos a realizar; o web geoespacial, ya que la componente espacial es un aspecto fundamental y básico en la toma de decisiones en el sistema y que se explota, tanto por la parte cliente como por la parte servidora.

BIBLIOGRAFÍA ↓

Bolbol, A., Cheng, T., & Tsapakis, I. (2014). A spatio-temporal approach for identifying the sample size for transport mode detection from GPS-based travel surveys: A case study of London's road network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 43, 176-187.

Bohte, W., & Maat, K. (2009). Deriving and validating trip purposes and travel modes for multi-day GPS-based travel surveys: a large-scale application in the Netherlands. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(3), 285-297.

Chung, E. H., & Shalaby, A. (2005). A trip reconstruction tool for GPS-based personal travel surveys. *Transportation Planning and Technology*, 28(5), 381-401.

De Jong, R., & Mensonides, W. (2003). Wearable GPS device as a data collection method for travel research. Institute of Transport Studies Working Paper, (ITS-WP-03-02). The University of Sydney and Monash University.

Feng, T., & Timmermans, H. (2012, July). Recognition of transportation mode using GPS and accelerometer data. In: the International Conference on Travel Behavior Research, Toronto, Canada.

Gong, H., Chen, C., Bialostozky, E., & Lawson, C. T. (2012). A GPS/GIS method for travel mode detection in New York City. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(2), 131-139.

Junta de Andalucía (2016). Plan de Infraestructuras para la Sostenibilidad del Transporte en Andalucía (PISTA 2020).

Nour, A. (2015). Automating and Optimizing a Transportation Mode Classification Model for use on Smartphone Data. Doctoral Thesis, University of Waterloo.

Schüssler, N., & Axhausen, K. W. (2008). Identifying trips and activities and their characteristics from GPS raw data without further information. 8th International Conference on Survey Methods in Transport, Annecy, France.

Schüssler, N. (2010). Accounting for similarities between alternatives in discrete choice models based on high-resolution observations of transport behaviour (Doctoral dissertation, Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 19093).

Stenneth, L., Wolfson, O., Yu, P. S., & Xu, B. (2011, November). Transportation mode detection using mobile phones and GIS information. In: Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (pp. 54-63). ACM.

Stopher, P. R., Jiang, Q., & FitzGerald, C. (2005). Processing GPS data from travel surveys. 2nd International Colloquium on the Behavioural Foundations of Integrated Land-use and Transportation Models: Frameworks, Models and Applications. Toronto, Canada.

Tsui, S., & Shalaby, A. (2006). Enhanced system for link and mode identification for personal travel surveys based on global positioning systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1972, 38-45.