

## Uso de algoritmos de enrutamiento para el cálculo de indicadores de sostenibilidad.

*Ander Pijoan<sup>(1)</sup>, Cruz E. Borges<sup>(1)</sup>,  
Yoseba K. Peña<sup>(1)</sup>, Ainhoa Alonso-Vicario<sup>(1)</sup>*

(1) Deusto Institute of Technology - DeustoTech Energy,  
Universidad de Deusto, Avda. Universidades 24,  
48007, Bilbao, Euskadi, España.  
{cruz.borges,ander.pijoan,yoseba.pena,ainhoa.alonso}@deusto.es

### Resumen

Desarrollar políticas que mejoren la sostenibilidad es una preocupación creciente entre los responsables políticos. En Euskadi varios municipios se han adherido a los compromisos de Aalborg+10 definiendo dentro de la Agenda Local 21 una serie de indicadores para diagnosticar el grado de sostenibilidad en el que se encuentran sus territorios. Estos indicadores pretenden evaluar los esfuerzos realizados y abordar tanto cuantitativa como cualitativamente el proceso de urbanización de sus municipios bajo criterios de sostenibilidad.

Gran parte de estos indicadores estiman medidas con una fuerte componente geoespacial como, por ejemplo, el porcentaje de población con acceso a pie a servicios básicos o la relación entre distintos usos y ocupación del suelo. El mayor problema que existe en la actualidad se encuentra en que muchos de los datos necesarios para el cálculo de estos indicadores provienen de estudios realizados por diferentes entidades con distinto nivel de detalle y que se encuentran segregados en diversos informes lo cual dificulta la comparación y el análisis.

En un artículo anterior detectamos las principales carencias del proceso actual para el cálculo de algunos de estos indicadores proponiéndose metodologías alternativas. Éstas tienen en cuenta distintos niveles de completitud de los datos y se basan en el uso de algoritmos de enrutamiento, datos abiertos y fuentes de información geográfica voluntarias. En este artículo presentamos los resultados de aplicar estas nuevas metodologías consiguiendo mejoras significativas en el nivel de detalle de los resultados. Como prueba de concepto se han calculado los indicadores en 5 municipios vascos: las tres capitales de los territorios históricos y dos pueblos.

Los resultados de este trabajo constituyen una herramienta muy potente que permite mejorar la evaluación de los objetivos marcados en el ámbito del desarrollo sostenible así como presentarlos de forma sencilla a la sociedad favoreciendo su implicación en el proceso.

**Palabras Clave:** Indicadores de Sostenibilidad, Open Data, Routing, Software Libre, OpenStreetMap

### **Abstract**

Developing policies to improve sustainability in urban development is a growing concern among politicians. In Euskadi, several municipalities have joined Aalborg+10 commitments defining a series of indicators to diagnose the degree of sustainability of their territories in the Local Agenda 21. These indicators also aim to evaluate the efforts and address both quantitatively and qualitatively urbanization of its municipalities following sustainability criteria.

Many of these indicators have a strong geospatial component as they calculate measures such as walking access to basic services or occupation and land use. However, the biggest problem that exists today is that much of the data necessary to calculate these indicators are derived from studies by different entities with diverse detail level and which are segregated in separate reports hindering comparison and analysis.

Previously, we detected the main shortcomings of the current process for the calculation of some indicators proposing alternative methodologies. These take into account different levels of completeness of the data and are based on the use of routing algorithms, open data and volunteer geographic information. In this article we present the results of applying these new methodologies obtaining significant improvements in the level of detail of the results. As proof of concept these indicators have been calculated on 5 Basque municipalities: the three capitals of the historic territories and two villages.

The results of this work are a powerful tool to improve the assessment of the targets set in the context of sustainable development and presenting them to society in a simple way, encourages the citizens' involvement in the process.

**Key words:** Sustainability indicators, Open Data, Routing, Free Software, OpenStreetMap

## 1. Indicadores de sostenibilidad

El concepto de desarrollo sostenible puede mostrarse como un término ambiguo, discutible y difícil de evaluar. Por ello, los indicadores de sostenibilidad surgen como un gran sistema de señales con el cual estimar avances, analizar tendencias y tomar futuras decisiones en el marco de este nuevo modelo de desarrollo.

En la Comunidad Autónoma Vasca, estos indicadores vienen definidos dentro del programa estratégico Agenda Local 21 el cual se estructura en torno a los 10 compromisos de Aalborg+10 [20]. En él se identifican 34 líneas estratégicas, 93 objetivos concretos y 332 actuaciones que deberán alcanzarse. Siguiendo este plan, tanto pequeños municipio como grandes ciudades elaboran informes con la intención de valorar cuantitativa y cualitativamente su desarrollo y conseguir municipios más sostenibles. Sin embargo, muchos de los indicadores de sostenibilidad que en ellos se calculan, no cuentan con el nivel de detalle apropiado o se presentan por separado sin estudiar las posibles relaciones entre ellos. Concretamente, los indicadores cuyos cálculos se van a analizar y mejorar, se encuentran clasificados dentro del apartado de espacio público y habitabilidad y miden la proximidad de la ciudadanía a servicios básicos, espacios verdes y actividades para la vida cotidiana.

Estos indicadores pretenden ser un sistema que permita evaluar las necesidades de la población, independientemente de sus características sociodemográficas, con el fin de optimizar la disposición de diversos equipamientos. En este sentido se define la distancia accesible como la que puede recorrer un peatón en un tiempo no superior a 5 minutos caminando. Es decir, considerando que la velocidad de desplazamiento de un peatón es de 4 km/h, esta distancia coincide con 300 metros. Cada población estima el número de ciudadanos que pueda cubrir a pié diferentes necesidades culturales, educativas, sanitarias..., sin tener que recurrir a otros medios de transporte.

La presencia de estos servicios básicos indica que el tejido urbano es especialmente apto para ser habitado, que dispone de recursos necesarios para hacer vida en la calle y evitar desplazamientos innecesarios en vehículo motorizado. Por el contrario, las áreas urbanas sin actividades en las proximidades, tienen una mayor probabilidad de tener una vida de calle menos activa y suponen además para sus habitantes un coste elevado de desplazamiento para la realización de las tareas diarias.

## 2. Funcionamiento del enrutamiento

Se conoce como enrutamiento al proceso de encontrar el camino óptimo dentro de una red entendiéndose éste como aquel que minimice el coste de desplazarse desde el punto de inicio hasta el destino. Estas metodologías, pueden ser aplicables a muchas áreas de conocimiento como la transmisión de paquetes en redes de datos electrónicas [9] o la planificación de itinerarios utilizando distintos medios de transporte [11]. Para

diferenciar el término de sus distintos usos, al proceso de determinar el trayecto óptimo entre dos puntos geográficos se conoce como enrutamiento geoespacial.

Para el cálculo de la ruta óptima, el algoritmo de enrutamiento debe tener en cuenta factores como el número de puntos intermedios o el coste de los desplazamiento entre puntos. En la literatura se encuentran muchos tipos de costes a analizar, entre ellos los más comunes para el enrutamiento geoespacial son:

- Tiempo de viaje.
- Distancia recorrida.
- Coste monetario del viaje.
- Riesgos.
- Emisiones generadas en el trayecto.

Para este propósito, es necesario crear una representación de la realidad en forma de un grafo que contenga los caminos transitables así como sus costes.

## 2.1. Representación de la red de caminos en forma de grafo

Los grafos son representaciones lógicas compuestas de nodos y aristas. Su uso primario es describir relaciones binarias entre los elementos que se quieren modelar eliminando el resto de consideraciones. En los siguientes apartados describiremos más en detalle el grafo que surge en nuestro modelo.

### 2.1.1. Nodos

En nuestros modelos consideraremos como nodos a la interconexión entre dos o más caminos en un punto geográfico. Es decir, dónde una ruta puede dividirse en cualquiera de las direcciones conectadas. La figura 1 simboliza un grafo en el cual los nodos vienen representados como los puntos desde *A* hasta *K*. Nótese que las posibles direcciones a tomar pueden tener restricciones tal y como sucede en la vida real. Los nodos deben representar estas restricciones de alguna manera. También existen casos, aunque no son muy comunes, en los que los nodos pueden servir para representar el coste de viajar a través de ellos, como por ejemplo dinero o tiempo para un peaje de una autopista. Por lo tanto, en el enrutamiento geoespacial los nodos representan intersecciones de caminos o puntos en los que se quiera añadir un coste adicional que no esté directamente relacionado con el desplazamiento en sí.

### 2.1.2. Aristas

Representan los caminos para pasar de un nodo a otro y contienen el coste de ese desplazamiento. En la figura 1 vienen representadas con un enlace y el coste de desplazarse entre los nodos que conecta. El algoritmo de enrutamiento determina el nodo

de inicio, el de destino y suma los costes de recorrer las aristas para determinar la ruta óptima. Dos nodos pueden estar conectados por más de una arista y, en función del coste o restricciones de cada una, el algoritmo determinará qué camino es mejor.

En el enrutamiento geoespacial, las restricciones en las aristas generalmente representan tramos de sentido único o restringido a cierto tipo de vehículos (sólo para bicicleta, gálibo máximo, etc.). En el caso de la imagen 1 se puede apreciar cómo los desplazamientos  $JF$  o  $FE$  están restringidos a un único sentido de circulación y la vía  $FH$  está prohibida para cierto tipo de vehículos. El hecho de tener aristas con múltiples restricciones de vehículos, puede provocar que sea mejor generar distintos grafos uno por cada tipo de vehículos, eliminando en ellos las aristas por las que ese vehículo no pueda circular.

#### 2.1.3. Costes

Los costes también tienen que ser conocidos e introducidos en el grafo para cada elemento. Los más usados se derivan de la longitud de cada arista combinada con algún otro elemento pero también existen costes que no dependen de ninguna de estas variables:

**Tiempo de viaje:** Combinación entre longitud de aristas y velocidad máxima permitida en cada una.

**Distancia recorrida:** Suma de la longitud de cada arista.

**Coste monetario del viaje:** Combinación de la longitud de las aristas, el consumo del vehículo y costes adicionales como peajes u otros.

**Riesgos:** Depende de la densidad de tráfico, la orografía o la seguridad de las zonas transitadas.

**Emisiones generadas en el trayecto:** Combinación de la longitud de cada arista, pendientes del trazado, número de paradas y consumo del vehículo entre otros.

#### 2.2. Algoritmos de enrutamiento

A la vista está que el grafo y la pre-computación de los datos juegan un importante papel en las técnicas de enrutamiento. En función del tamaño del área geográfica y del nivel de complejidad del grafo, la búsqueda de la mejor ruta puede requerir un tiempo muy elevado. Por ello, en el enrutamiento estático (donde las propiedades y restricciones del grafo no varían en el tiempo) es posible realizar pre-computaciones más complejas para acelerar el proceso de búsqueda [12]. Lo correcto es encontrar un equilibrio entre el tiempo de cálculo de la ruta, tiempo de preprocesamiento y tamaño final del grafo. En función de cuánto se pre-compute en el grafo, los algoritmos a utilizar serán distintos:

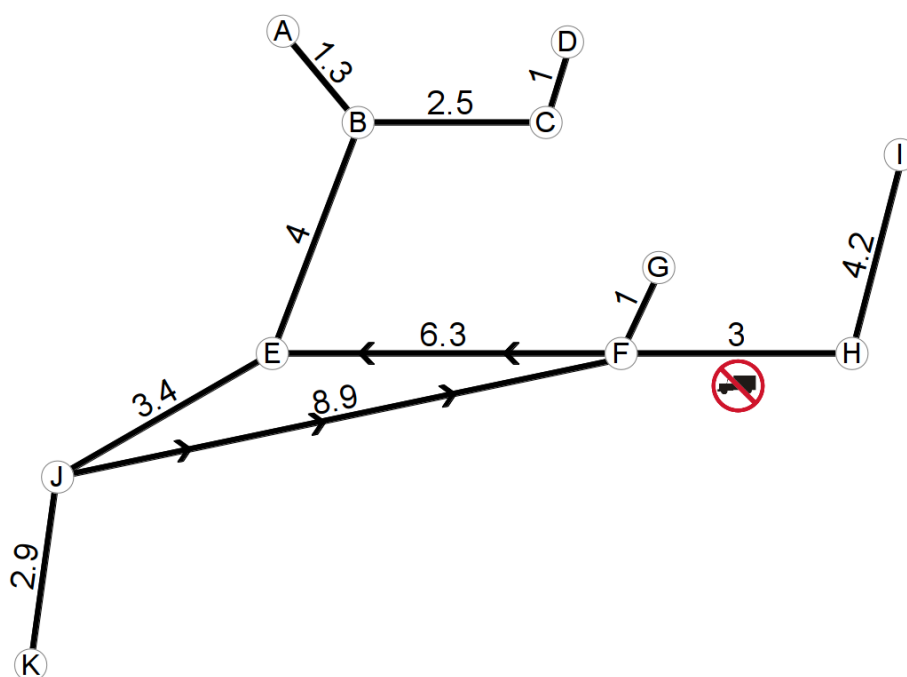


Figura 1: Ejemplo de modelo de carreteras representado mediante un grafo.

### 2.2.1. Algoritmos clásicos

Estos algoritmos se expanden nodo a nodo desde el punto inicial avanzando en todas las posibles direcciones hasta llegar al destino. El ejemplo clásico es el algoritmo de Dijkstra [7]. Tomando como base dicho algoritmo han surgido múltiples heurísticas y aproximaciones con mejores propiedades. Entre estas mejoras se encuentran empezar la búsqueda simultáneamente desde inicio y final [6] o dar una prioridad mayor a las aristas cuanto más apuntan en la dirección del nodo destino [8].

### 2.2.2. Algoritmos jerárquicos

Existen algoritmos que generan jerarquías de manera que queden aristas o grafos con mayor prioridad que otros, por ejemplo en función del tipo de carretera [19, 18]. Usando esta jerarquía, el algoritmo podría sólo utilizar las aristas de nivel bajo en zonas cercanas al punto de inicio y destino hasta conectar con una de las aristas de nivel superior. Una vez de haber conectado con una arista de nivel superior desde ambos puntos, el resto del trayecto solo usaría las aristas de ese nivel o pasaría a buscar superiores.

### 2.2.3. Algoritmos dirigidos al objetivo

Si el tamaño del problema y la potencia de cálculo lo permiten, es posible precomputar e introducir en el grafo prácticamente todas las respuestas al problema [17]. Existen algo-

ritmos que trabajan con grafos en los que se han introducido rutas ya hechas (representadas como una arista directa desde el punto de partida hasta el destino) o indicaciones en los nodos describiendo cuál es la dirección a tomar para llegar a un determinado destino de forma que el algoritmo vaya dirigido.

#### 2.2.4. Algoritmos evolutivos

Finalmente, si las restricciones que se necesitan imponer a las soluciones son muy complejas y no se requiere garantizar el uso de soluciones óptimas, se puede considerar el uso de algoritmos evolutivos [15, 10]. Los algoritmos evolutivos son una familia de métodos heurísticos de propósito general (no sólo indicados para problemas de enrutamiento) especialmente útiles cuando es difícil expresar la factibilidad de una solución pero fácil de evaluar su calidad como es el caso.

### 2.3. pgRouting

PgRouting [5] es un proyecto de software libre el cual provee una extensión para añadir funciones enrutadoras al sistema de bases de datos PostgreSQL/PostGIS [16]. Entre las funcionalidades que implementa, se incluyen algoritmos para el cálculo de la ruta óptima, resolución del problema del vendedor ambulante (TSP), cálculo de la distancia recorrible desde un punto o resolución de problemas de transporte adaptado a restricciones (DARP) [4]. Estos algoritmos, contemplan las posibles restricciones y reglas que pueda haber en un grafo y su principal atractivo es que el coste puede estar ya incorporado en el grafo o ser generado en tiempo de ejecución indicando al algoritmo la sentencia SQL a utilizar. De esta forma es posible actualizar campos concretos en la base de datos a medida que el escenario cambie, sin necesidad de reconstruir todo el grafo así como parametrizar los costes en función del tipo de vehículo o las preferencias de los usuarios.

El conjunto de datos empleado para la creación del grafo se compone principalmente de la información geográfica voluntaria del proyecto OpenStreetMap [13] y los datos del Departamento de Medio Ambiente y Política Territorial del Gobierno Vasco accesibles desde su portal GeoData Euskadi [22]. Este último, a través de su Base Topográfica Armonizada 1:5000 ofrece información geográfica detallada sobre edificaciones e infraestructuras.

La creación del grafo se hace mediante la herramienta `osm2pgrouting` [14] la cual utiliza los datos en formato OSM para esta tarea. Usando un archivo de configuración en el que indicar qué tipo de vías escoger, extrae todos los tramos existentes entre intersecciones y cambios de velocidad y para cada uno de ellos crea una columna en la base de datos almacenando el inicio, final, la velocidad permitida, longitud y la geometría completa entre otros campos. A la hora de calcular las rutas óptimas, el algoritmo tomará los datos de inicio y final de cada tramo y obtendrá el coste en base a las instrucciones





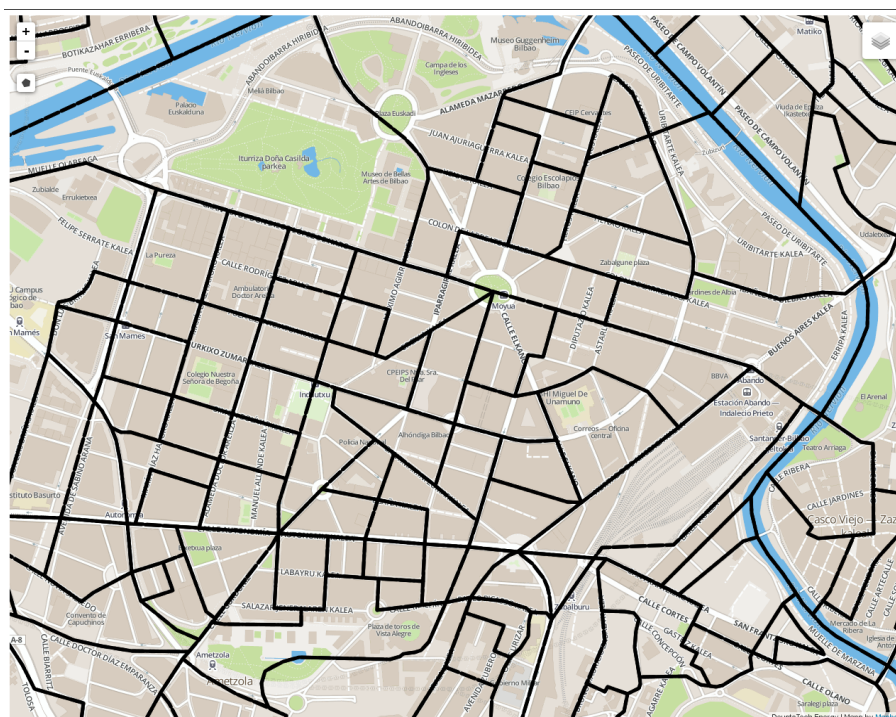


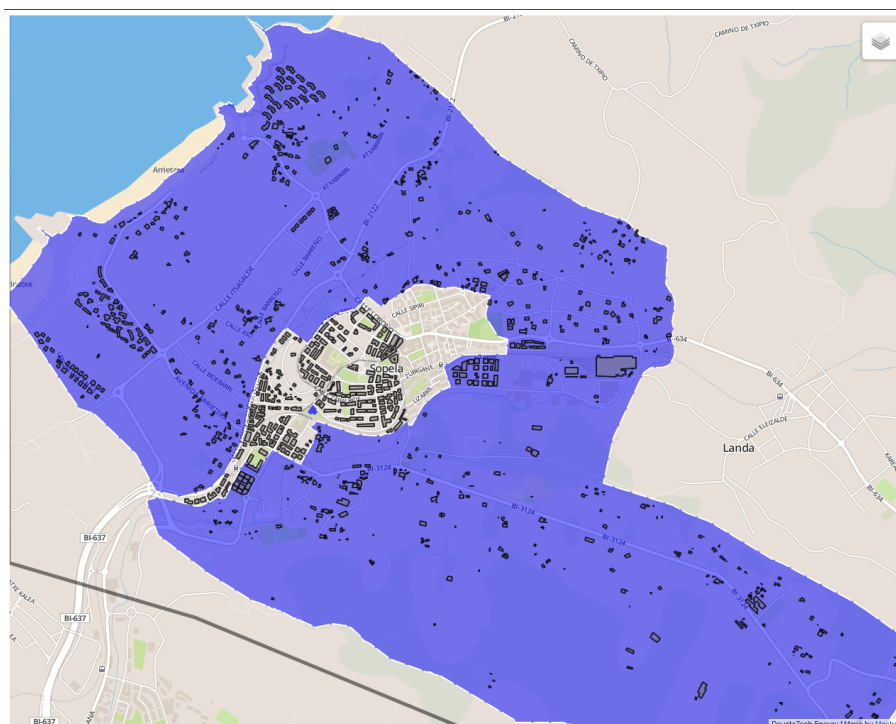
Figura 3: División de los distritos en Bilbao.

Usando esta metodología, la certeza de los resultados varía mucho en función de la división de distritos y secciones. En el caso de las ciudades estudiadas (Bilbao, Vitoria-Gasteiz y Donostia-San Sebastián), tal y como se puede observar en la figura 3, sus estructuras se asemejan bastante a las de una red mallada en las que los distritos y secciones únicamente abarcan un número pequeño de manzanas.

Gracias a esto, la intersección de los distritos con el radio de 300 metros es muy parecida al resultado de tomar únicamente los edificios dentro del radio de 300 metros. Sin embargo, observando poblaciones más pequeñas, existen muchas que únicamente tienen un distrito o han delimitado solo uno para toda la parte rústica que rodea la población. Es en estos casos donde la metodología muestra su rendimiento más limitado determinando que habitantes que viven a kilómetros de los servicios tienen acceso a los mismos por el hecho de estar en el mismo distrito. Véase por ejemplo el caso de Sopela (figura 4).

### 3.2. Metodología empleando radios de influencia de los servicios básicos

Como mejora de los cálculos actuales, se ha implementado una metodología tomando únicamente los edificios residenciales comprendidos dentro del radio de 300 metros de los servicios básicos. Esta metodología ya está presente en distintos proyectos e iniciativas en torno a la movilidad sostenible en los municipios [21]. Con ella, se elimina la componente territorial de distritos y secciones y el cálculo se basa completamente en cuestiones espaciales. La implementación en primer lugar recoge todas las infraestruc-



**Figura 4:** División de todo el área rústica de una población en un único distrito.

turas consideradas servicios básicos y estas se expanden en la distancia seleccionada utilizando las funciones geográficas de PostGIS para obtener su zona de influencia. Una vez hecho esto, es sencillo recolectar todos los edificios residenciales que intersequen espacialmente con cualquiera de estas zonas de influencia.

La dificultad en este cálculo se encuentra en la estimación de habitantes por edificio. Nótese que este punto no sería un problema si se tiene acceso al padrón municipal de habitantes. Debido a que los datos accesibles en GeoData Euskadi únicamente contienen la población localizada por distritos y secciones, es necesario estimar el número de habitantes de cada edificio basándose en el área de los mismos. Además, a diferencia del juego de datos de la Dirección General del Catastro, los datos de libre acceso tanto del catastro de Bizkaia como de Gipuzkoa no contienen datos de altura de edificaciones y aún son pocos los edificios en OpenStreetMap que cuentan con esta información. Por tanto para estimar el número de habitantes de un edificio  $\alpha$  se realiza la suma del área de todos los edificios dentro del distrito  $D$  al que pertenece el edificio  $\alpha$  y posteriormente se reparten los habitantes del distrito  $D$  de forma ponderada por área de edificio. Es decir, la estimación de los habitantes  $h_\alpha$  del edificio  $\alpha$  será:

$$h_\alpha := h_D \frac{s(\alpha)}{\sum_{e \in E_D} s(e)},$$

donde  $s(\cdot)$  denota el operador que devuelve la superficie de un edificio,  $E$  denota el con-

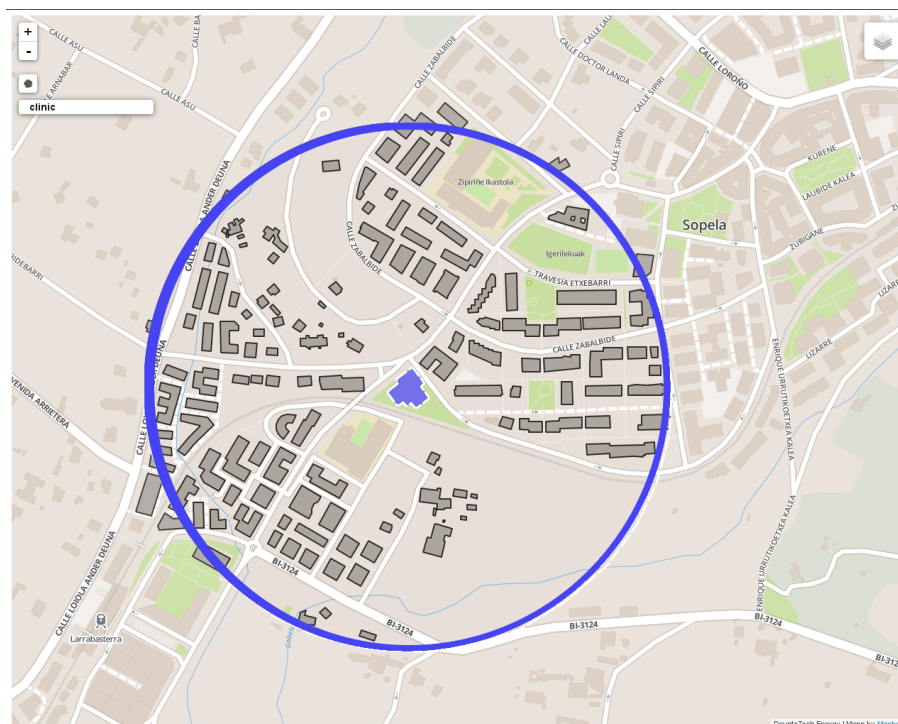


Figura 5: Edificios dentro del radio de influencia del servicio básico.

junto de edificios en el distrito  $D$  y  $h$  el número de habitantes en el distrito  $D$ .

No obstante esta metodología tampoco tiene en cuenta barreras geográficas y arquitectónicas como ríos, autopistas u otras que requieren dar un rodeo para cruzar al otro lado. Un ejemplo de este problema se puede observar en la figura 6. Por ello, se presentan tres nuevas metodologías empleando algoritmos de enrutamiento para el cálculo de estos indicadores de acceso a espacios públicos.

### 3.3. Metodología para juegos de datos sin los puntos de entrada

A pesar de contar con un gran volumen de datos tanto en OpenStreetMap como en GeoData Euskadi, existen muchas zonas en las que no se tienen localizados los puntos de entrada a los servicios básicos ni a los edificios. En este primer caso el procedimiento seguido consiste en utilizar el algoritmo de `pgr_drivingDistance()` (distancia recorrible) de `pgRouting` que dada una distancia y un punto de inicio genera todos los puntos alcanzables para la distancia dada. Además, permite especificar en dos parámetros adicionales si el cálculo debe cumplir las restricciones de dirección (cosa que en este caso no es necesario ya que se trata de desplazamientos a pie) y si el hecho de volver hacia atrás por una vía ya recorrida tiene un coste adicional (también utilizado para cálculos de rutas para vehículos).

El cálculo en esta metodología se hace de forma unidireccional, partiendo desde los servicios básicos hasta los edificios. Una de las limitaciones a tener en cuenta, es que

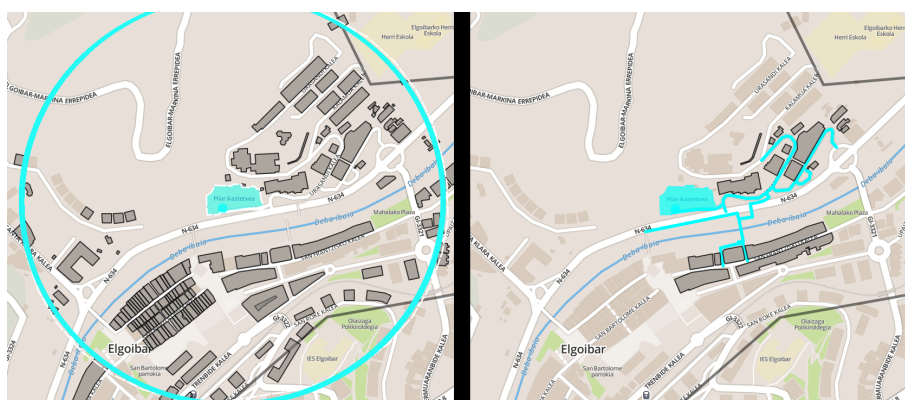


Figura 6: Diferencia entre radios de influencia y enrutamiento ante obstáculos geográficos.

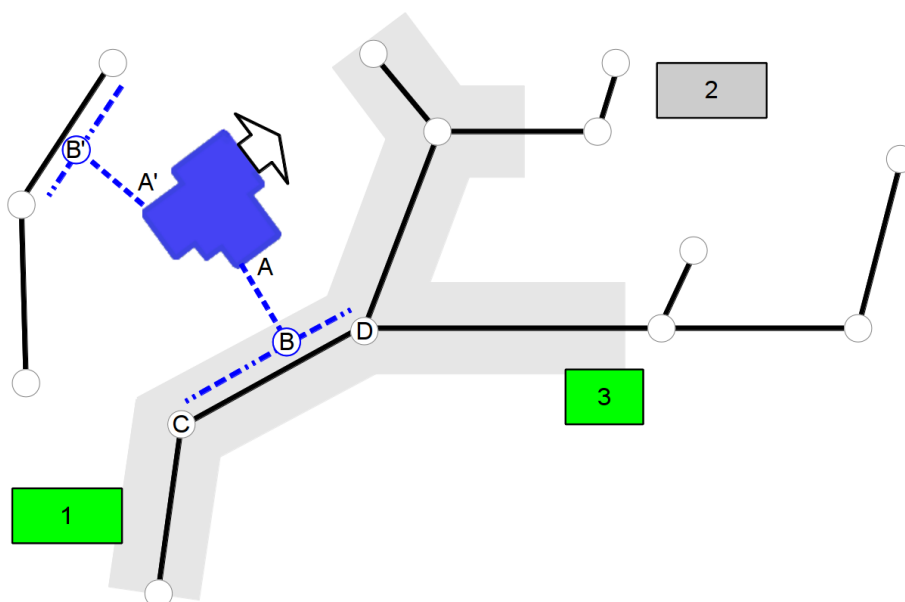


Figura 7: Cálculo desde un servicio básico partiendo de cualquier vía adyacente a este.

pgRouting necesita comenzar y finalizar la ruta en alguno de los puntos (nodos) existentes en el grafo. Por ello siempre será necesario primero calcular de forma manual la distancia desde los servicios hasta el punto de la carretera más cercano y desde éste, hasta el nodo izquierdo y derecho de esa carretera entre los que se encuentre el punto. Una vez encontrados estos dos puntos, se ejecutará el algoritmo de puntos alcanzables en la distancia necesaria, restándole la distancia ya recorrida hasta llegar al nodo.

El proceso sería como sigue:

1. Localizar el servicio básico (bloque azul).
2. Calcular los puntos del servicio básico más cercano a las vías colindantes (puntos  $A$  y  $A'$ ). Nótese que estos puntos no tienen por qué coincidir con la entrada a la infraestructura y pueden haber varios si esta tiene más de una vía a menos de 10 metros de ella (punto  $A'$ , por ejemplo).

3. Calcular el punto (y la vía) en el grafo más cercano a  $A$  (punto  $B$  y vía  $CD$ ).
4. Obtener los nodos adyacentes a  $B$ , es decir  $C$  y  $D$ .
5. Calcular la distancia desde  $B$  hasta  $C$  y  $D$ .
6. Ejecutar el algoritmo de distancia recorrible desde  $C$  y  $D$ :
  - a) `pgr_drivingDistance(C, 300 - d(A,B) - d(B,C))`
  - b) `pgr_drivingDistance(D, 300 - d(A,B) - d(B,D))`
7. Obtener todas las vías alcanzables desde  $C$  y  $D$
8. Eliminar rutas solapadas.
9. Recolectar todos los edificios a menos de 10 metros de esas vías.
10. Estimar el número de habitantes por edificio siguiendo el método explicado en la sección 3.2.

Esta aproximación obtiene resultados más realistas que las anteriores dado que tiene en cuenta los accidentes geográficos. Sin embargo, el hecho de tomar como punto de partida todas las carreteras colindantes a los servicios básicos sigue sin ser del todo correcto sobre todo en infraestructuras grandes en las que la entrada únicamente se encuentra en uno de sus lados.

### 3.4. Metodología para juegos de datos con únicamente el punto de entrada a infraestructuras

Desde la votación de OpenStreetMap en 2012 para determinar una forma de denominar las entradas a edificios, la comunidad de usuarios ha ido incorporando éstas a edificios singulares e infraestructuras. Gracias a ello, cada vez es más común encontrar las entradas a servicios básicos y edificios residenciales pudiendo incluso diferenciar entre entradas primarias, de segundo nivel o de emergencia. En esta metodología hacemos uso de las entradas a servicios básicos consiguiendo ajustar a la realidad los puntos de inicio desde dónde ejecutar los algoritmos de distancia recorrible. En caso de no contar con estos datos, no es complicado ayudado de fotos de satélite y la sabiduría popular completar gran parte de estas entradas.

El proceso se asemeja a la metodología anterior, salvo porque éste limita los puntos de inicio a únicamente las carreteras y caminos adyacentes en 10 metros a la entrada de la infraestructura o punto de intersección entre esta y un camino. Una vez más se emplea el algoritmo de distancia recorrible para obtener todas las rutas alcanzables en 300 metros y se vuelven a coger las viviendas no más alejadas de 10 metros de las rutas para inferir su número de habitantes en base a cuánta área del distrito ocupan.

El proceso sería como sigue:

1. Localizar el servicio básico (bloque azul).
2. Obtener su punto de entrada  $A$ . Para los servicios representados como elementos puntuales se dará por hecho que el punto es su entrada. En caso de no tener punto de entrada se pasará a coger el punto más cercano a la vía más cercana.

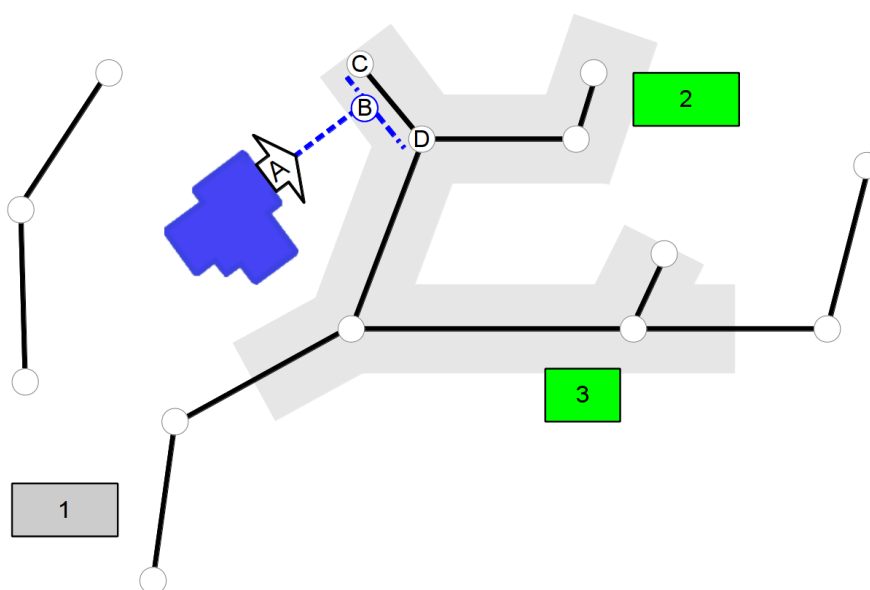


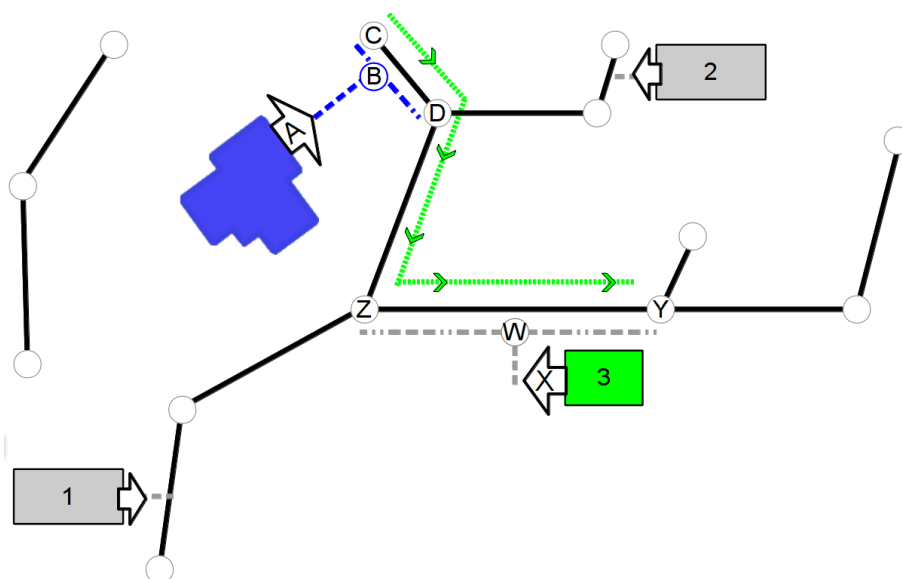
Figura 8: Cálculo desde un servicio básico partiendo de la vía adyacente a la entrada física este.

3. Calcular el punto (y la vía) en el grafo más cercano a A (punto B y vía CD).
4. Obtener los nodos adyacentes a B, es decir C y D.
5. Calcular la distancia desde B hasta C y D.
6. Ejecutar el algoritmo de distancia recorrible desde C y D:
  - a)  $\text{pgr\_drivingDistance}(C, 300 - d(A,B) - d(B,C))$
  - b)  $\text{pgr\_drivingDistance}(D, 300 - d(A,B) - d(B,D))$
7. Obtener todas las vías alcanzables desde C y D.
8. Eliminar rutas solapadas.
9. Recolectar todos los edificios a menos de 10 metros de esas vías.
10. Estimar el número de habitantes por edificio en función de su área.

Para servicios cuyas infraestructuras son elementos puntuales (como es el caso de paradas de autobús o cajeros automáticos), los resultados no varían entre esta metodología y la anterior ya que el propio elemento representa su entrada. En cambio, para infraestructuras poligonales (y sobre todo las muy extensas) el hecho de tener en cuenta los accesos físicos a los servicios consigue ajustar el porcentaje de población con acceso al servicio pero no por ello este debe ser inferior al de la metodología anterior, quedando generalmente bastante igualados.

### 3.5. Metodología para juegos de datos con todos los puntos de entrada

En último lugar, para casos en los que el conjunto de datos esté completo con puntos de entrada tanto a edificios como a servicios básicos, es posible calcular la distancia directa de inicio a fin. A pesar de ser un planteamiento sencillo, su implementación resulta bastante compleja.



**Figura 9:** Cálculo punto a punto desde la entrada del servicio básico hasta la de los edificios.

El proceso comienza recolectando todos los edificios residenciales a 300 metros de los servicios básicos, limitando así el número de edificios hasta los cuales calcular el coste de desplazamiento. A diferencia de las anteriores metodologías, el cálculo requiere partir desde ambas entradas para determinar a qué carretera y nodo están conectadas. Una vez localizadas las carreteras y puntos de conexión, se ejecuta un algoritmo para el cálculo de la ruta óptima para obtener la distancia mínima del desplazamiento de un punto al otro. En particular, nosotros hemos usado el algoritmo de Dijkstra implementado en PostGIS `pgr_dijkstra()`. Al igual que sucedía con el método de distancia recorrible, éste permite especificar si tener en cuenta direcciones de las vías y un coste adicional por volver a circular por un tramo en sentido contrario. Una vez calculadas todas las distancias, es posible determinar si el coste de alguno de los recorridos es inferior o no a 300 metros para después inferir la población de los edificios que no rebasen esa distancia.

El proceso sería como sigue:

1. Localizar el servicio básico (bloque azul).
2. Obtener su punto de entrada *A*. Igual que en el caso anterior, para los servicios representados como elementos puntuales se dará por hecho que el punto es su entrada. Igualmente, en caso de no tener punto de entrada se pasará a coger el punto más cercano a la vía más cercana.
3. Calcular el punto (y la vía) en el grafo más cercano a *A* (punto *B* y vía *CD*).
4. Obtener los nodos adyacentes a *B*, es decir *C* y *D*.
5. Calcular la distancia desde *B* hasta *C* y *D*.
6. Localizar todos los edificios residenciales en un radio de 300 metros del servicio (bloques verde y gris).
7. Para cada edificio:

- a) Obtener su punto de entrada  $X$ . En caso de no tener punto de entrada se pasará a coger el punto más cercano a la vía más cercana.
- b) Calcular el punto (y la vía) en el grafo más cercano a  $X$  (punto  $W$  y vía  $ZY$ ).
- c) Obtener los nodos adyacentes a  $W$ , es decir  $Z$  y  $Y$ .
- d) Calcular la distancia desde  $W$  hasta  $Z$  y  $Y$ .
- e) Ejecutar el algoritmo de Dijkstra en las cuatro combinaciones entre los puntos  $C$  y  $D$  e  $Y$  y  $Z$ :
  - 1)  $\text{pgr\_dijkstra}(C,Z) \leq 300 - (d(A,B) + d(B,C) + d(X,W) + d(W,Z))$
  - 2)  $\text{pgr\_dijkstra}(C,Y) \leq 300 - (d(A,B) + d(B,C) + d(X,W) + d(W,Y))$
  - 3)  $\text{pgr\_dijkstra}(D,Z) \leq 300 - (d(A,B) + d(B,D) + d(X,W) + d(W,Z))$
  - 4)  $\text{pgr\_dijkstra}(D,Y) \leq 300 - (d(A,B) + d(B,D) + d(X,W) + d(W,Y))$
- f) Si alguna de las condiciones anteriores se cumple, almacenar el edificio (edificio verde).

8. Una vez evaluados todos los edificios, estimar el número de habitantes de cada uno en función de su área.

Nótese que en las dos metodologías anteriores, al no tener entradas para calcular la distancia punto a punto, se tomaban todos los edificios adyacentes a 10 metros de a las vías recorribles. Esta operación, en el peor de los casos, añade 10 metros a los 300 deseados. Es por ello que en caso de zonas sin puntos de entrada, los resultados entre las tres metodologías que emplean algoritmos de enrutamiento, pueden tener ligeras variaciones.

Dada la heterogeneidad en el nivel de detalle de los datos de cada población, actualmente es muy difícil conseguir la completitud necesaria para seguir esta metodología. Sin embargo, la comunidad de usuarios de OpenStreetMap a medida que completa los niveles de detalle más básicos, pasa a siguientes niveles mejorando la calidad del conjunto de datos llegando incluso a tener mapeados todos los árboles de un parque o infraestructuras subterráneas con gran precisión. Además, cada vez más administraciones y organismos se suman a la filosofía de datos abiertos facilitando el acceso a grandes volúmenes de información geográfica que puede ser de gran utilidad en este tipo de cálculos.

## 4. Resultados de las metodologías

Los experimentos han sido realizados usando una aplicación desarrollada bajo el framework Django para python y utilizando los mapas interactivos de la librería de mapas ligeros LeafletJS. Esta aplicación permite, paso a paso, que usuarios sin conocimientos expertos puedan calcular de forma sencilla estos indicadores de accesibilidad para un área seleccionada por ellos para cualquier municipio de Euskadi. Se puede acceder a dicha aplicación a partir del siguiente enlace <http://energia.deusto.es>.

Para comprobar los resultados de aplicar esta metodología hemos realizado un estudio comparando los datos publicados y su metodología para las tres capitales de los



**Cuadro 1:** Características principales de las ciudades estudiadas. Entre paréntesis el número entradas a los mismos.

Ciudad	Población	Distritos	Edificios	Infraestructuras
Bilbao	349 356	289	1668 (365)	699 (440)
Vitoria-Gasteiz	241 386	168	4248 (19)	1364 (937)
Donostia-San Sebastián	186 500	142	5680 (56)	956 (562)
Sopela	12 977	7	1199 (284)	71 (41)
Eibar	27 439	24	911 (0)	138 (83)

territorios históricos de Euskadi. Además, hemos utilizado Sopela, un municipio costero de Bizkaia, y Eibar, uno del interior de Gipuzkoa, para comprobar los efectos de las distintas formas de cálculo en poblaciones más pequeñas. En la tabla 1 se puede observar un resumen de sus principales características.

Las infraestructuras que hemos considerado en este estudio las hemos agrupado en distintas categorías siguiendo las metodologías oficiales. La lista de categorías analizadas junto con una descripción de las infraestructuras a las que hace referencia así como los *tags* asociados se pueden consultar en la cuadro 2.

Las cuadros 3 a 7 muestran los resultados numéricos de aplicar las metodologías anteriormente descritas. Nótese que hemos usado la siguiente nomenclatura:

*PUB<sub>x</sub>*: resultados publicados por los respectivos ayuntamientos en el año *x*. Solo hemos encontrado resultados oficiales publicados de Bilbao [1] y Vitoria-Gasteiz [23].

*CAL*: resultados de aplicar la metodología descrita en PUB sobre los datos de OpenStreetMap y Open Data Euskadi.

*RAD*: resultados de aplicar la metodología basada en el radio de influencia.

*I2H*: resultados de aplicar la metodología obteniendo las rutas alcanzables desde cualquier punto de las infraestructuras.

*D2H*: resultados de aplicar la metodología obteniendo las rutas alcanzables desde el acceso físico de las infraestructuras.

*D2D*: resultados de aplicar la metodología desde el acceso físico de las infraestructuras hasta el acceso de los edificios.

A pesar de que este tipo de análisis empieza a ser cada vez más habitual en los estudios de sostenibilidad, los resultados publicados son escasos. Incluso analizando los pocos informes encontrados, si bien la metodología sí está descrita, no se nombran qué tipo de infraestructuras son consideradas en cada indicador. Así como las infraestructuras a tomar en los indicadores de zonas verdes, deportivas, bancos y transporte están meridianamente claras, no sucede lo mismo a la hora de determinar qué infraestructuras son consideradas culturales, de educación o alimentación. Esto se refleja en la discrepancia entre los datos oficiales (*PUB<sub>x</sub>*) y los obtenidos por nosotros siguiendo la misma metodología (*CAL*) siendo el efecto más pronunciado en la categoría cultura y sanidad.

**Cuadro 2:** Relación de infraestructuras estudiadas con sus traducción a tags de OpenStreetMap.

Categoría	Descripción	Query
Zonas verdes	áreas de recreo, zonas de columpios, parques y zonas de juegos infantiles	landuse = recreation_ground leisure = common = playground = park access = NOT private
Educación	escuelas, institutos, guarderías y universidades	amenity = school = college = kindergarten = university
Deportivos	áreas deportivas, piscinas públicas y canchas y campos deportivos públicos	sport = * landuse = sports leisure = sports = swimming_pool = pitch access = NOT private
Alimentación	tiendas de alimentos de primera necesidad, mercados, supermercados y centros comerciales	shop = bakery = beverages = butcher = cheese = confectionery = convenience = deli = farm = greengrocer = organic = seafood = fish = department_store = mall = general = supermarket
Culturales	museos, centros de arte, cines, teatros, centros comunitarios para eventos y festividades, bibliotecas y centros de congresos	amenity = arts_centre = theatre = community_centre = museum = library = cinema = conference_centre tourism = museum
Transporte	estaciones y paradas de transporte público (ferrocarril, metro, tranvía y autobús)	railway = station = tram_stop = subway_entrance public_transport = station = platform amenity = bus_station highway = bus_stop access = NOT private layer = NOT -1
Sanidad	centros sanitarios, hospitales y clínicas	landuse = health amenity = hospital = clinic
Entidades financieras	bancos, oficinas de cambio de divisas y cajeros automáticos	amenity = atm = bank = bureau_de_change

**Cuadro 3:** Resultados numéricos de las distintas metodologías para Bilbao. En porcentaje de la población.

Categoría	<i>PUB</i> <sub>2008</sub>	<i>CAL</i>	<i>RAD</i>	<i>I2H</i>	<i>D2H</i>	<i>D2D</i>
Zonas verdes	89	80,92	73,69	65,66	62,33	46,67
Educación	93	79,09	69,52	62,85	60,55	50,01
Deportivas	74	69,85	53,37	40,28	40,01	29,69
Alimentación	-	63,22	47,55	41,49	41,35	31,71
Culturales	78	36,51	27,97	22,58	22,06	15,27
Transporte	-	79,72	72,87	67,65	67,82	60,34
Sanidad	97	45,44	32,83	24,29	21,78	15,20
Financieras	-	41,01	31,2	24,92	26,6	21,03

**Cuadro 4:** Resultados numéricos de las distintas metodologías para Vitoria-Gasteiz. En porcentaje de la población.

Categoría	<i>PUB</i> <sub>2012</sub>	<i>CAL</i>	<i>RAD</i>	<i>I2H</i>	<i>D2H</i>	<i>D2D</i>
Zonas verdes	100	90,26	84,11	82,57	81,81	67,75
Educación	84,5	89,81	80,28	77,17	74,13	56,57
Deportivas	83,0	90,26	78,06	70,63	67,36	44,43
Alimentación	97,1	86,77	74,45	69,95	69,37	56,00
Culturales	71,1	41,85	24,37	22,12	21,76	11,79
Transporte	97,1	90,26	84,01	80,82	80,75	74,44
Sanidad	48,0	78,53	51,93	39,38	38,6	21,60
Financieras	87,7	85,07	71,88	69,04	69,11	59,36

**Cuadro 5:** Resultados numéricos de las distintas metodologías para Donostia-San Sebastián. En porcentaje de la población.

Categoría	<i>PUB</i>	<i>CAL</i>	<i>RAD</i>	<i>I2H</i>	<i>D2H</i>	<i>D2D</i>
Zonas verdes	-	76,75	67,35	57,76	52,00	35,42
Educación	-	76,58	60,06	48,94	44,60	31,62
Deportivas	-	76,48	65,38	41,56	41,09	29,02
Alimentación	-	72,47	51,84	42,32	43,29	32,31
Culturales	-	57,91	32,95	22,14	21,53	12,85
Transporte	-	77,82	64,24	54,53	54,15	44,23
Sanidad	-	40,11	21,17	12,55	10,88	6,12
Financieras	-	63,72	41,55	36,93	36,36	26,51

**Cuadro 6:** Resultados numéricos de las distintas metodologías para Sopela. En porcentaje de la población.

Categoría	<i>PUB</i>	<i>CAL</i>	<i>RAD</i>	<i>I2H</i>	<i>D2H</i>	<i>D2D</i>
Zonas verdes	-	52,21	44,03	40,67	40,37	40,44
Educación	-	52,21	26,94	24,60	22,91	19,04
Deportivas	-	52,21	45,08	36,82	36,60	34,75
Alimentación	-	52,21	38,72	36,18	36,18	34,34
Culturales	-	52,21	33,32	27,89	27,45	24,07
Transporte	-	52,21	41,24	37,34	37,34	33,66
Sanidad	-	35,07	14,04	11,17	9,60	8,09
Financieras	-	52,21	33,69	31,34	31,00	25,69

**Cuadro 7:** Resultados numéricos de las distintas metodologías para Eibar. En porcentaje de la población.

Categoría	<i>PUB</i>	<i>CAL</i>	<i>RAD</i>	<i>I2H</i>	<i>D2H</i>	<i>D2D</i>
Zonas verdes	-	63,20	52,78	48,59	47,58	40,00
Educación	-	64,88	56,21	47,21	42,00	33,46
Deportivas	-	60,34	43,85	27,50	26,04	18,26
Alimentación	-	64,88	52,06	45,36	45,41	37,93
Culturales	-	39,66	23,37	21,76	21,09	14,48
Transporte	-	63,20	53,09	45,50	45,46	35,75
Sanidad	-	47,97	25,37	12,66	13,17	9,19
Financieras	-	56,33	40,49	37,92	38,19	27,67

Por otro lado, los resultados publicados parece que o bien están sobreestimando la población afectada o bien hay discrepancias importantes en los juegos de datos pues existen diferencias significativas en todas las categorías y ciudades. La única excepción se encuentra en Vitoria-Gasteiz para la categoría salud, que se obtienen resultados muy superiores con el juego de datos de OpenStreetMap que con el oficial. Como hemos indicado anteriormente, esto es debido, probablemente, a considerar distintas infraestructuras dentro de la misma categoría.

Observado los resultados también se puede ver cómo el porcentaje de población disminuye progresivamente a medida que vamos usando un modelo más realista. La diferencia entre la metodología oficial y la metodología *RAD* ya produce una disminución de alrededor de 10 puntos porcentuales de forma sistemática para todas las categorías y ciudades. A continuación, las métricas basadas en enrutamiento *I2H* y *D2D* son prácticamente equivalentes y presentan una disminución menor con respecto a *RAD*; aproximadamente de 5 puntos porcentuales. Además, esta diferencia es prácticamente inexistente en ciudades con topologías en malla.

Finalmente, pasamos a analizar los resultados obtenidos con la metodología *D2D*. En las ciudades más pequeñas cuya población está bastante dispersa se observa cómo esta metodología no conlleva pérdidas drásticas (aunque sí significativas, en torno a 10 puntos porcentuales) en la población estimada. Esto se debe a la dispersión de la población, que hace que prácticamente sea irrelevante la posición de las entradas tanto de las infraestructuras como de las viviendas. Este hecho además se ve reforzado al ser infraestructuras y edificios más pequeños. En municipios grandes (con topologías en malla), sin embargo, esta metodología sí que presenta diferencias muy significativas (en muchos casos superiores a 10 puntos porcentuales y llegando a reducir hasta en una cuarta parte las estimaciones dadas por *CAL*). Esto se debe a que en este tipo de situaciones:

- el tamaño de las infraestructuras como de los edificios es muy grande.
- cada edificio contiene un porcentaje elevado de la población de cada distrito.

De esta forma, muchos edificios que están a 300 metros en línea recta quedan ahora fuera del rango, lo cual provoca una disminución drástica como la observada.

## 5. Conclusiones y futuras mejoras

El uso de estas metodologías y su presentación de forma entendible consigue abarcar los objetivos de los programas estratégicos municipales orientados al espacio público y la habitabilidad. Por un lado se consigue mejorar las formas de cálculo, facilitando la realización de análisis posteriores con información más ajustada a la realidad. Esto permite simular escenarios en los que analizar los efectos de la localización de nuevas infraestructuras en determinadas zonas y ayudar a la toma de decisiones.

Por otro lado, la correcta presentación de los indicadores hace más atractiva su interacción con los ciudadanos. El hecho de enseñar el proceso seguido, posibilita que entusiastas y voluntarios de distintos niveles de aptitud puedan aportar contribuciones importantes a las fuentes de información voluntarias de donde se extrae esta información, consiguiendo así un gran nivel de detalle tanto en completitud como actualización. Además, estas experiencias educativas informales consiguen en muchas ocasiones cambiar las actitudes del público hacia la política territorial puesto que la participación activa en el proceso fomenta una comprensión y apreciación de los factores que en ella intervienen.

A pesar de haber llegado a un nivel de precisión más que aceptable, aún se podría refinar mucho los cálculos. Teniendo datos completos de: elevaciones del terreno, presencia de aceras, pasos de peatones y semáforos así como de barreras, muros y zonas de paso privadas se podría hacer una estimación mucho precisa de la metodología *D2D* basándonos en el tiempo que se tarda en realizar el desplazamiento o si es viable realizarlo a pie.

Finalmente, el hecho de tener esta tecnología y estos datos nos va a permitir en el futuro poder realizar estudios de accesibilidad a las distintas infraestructuras por distintos colectivos de interés (jóvenes, personas mayores, personas con diversidad funcional, etc.), análisis socio-económicos respecto de la distribución de estos indicadores así como el desarrollo de plataformas de análisis del impacto de nuevas políticas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por los proyectos: ITEA2 Nemo&Cod-ed (CDTI-IDI-20110864-65) y BizkaiSense (Programa BizkaiLab-DFB).

## Referencias

- [1] Ayuntamiento de Bilbao. *Indicadores De Sostenibilidad De Bilbao 2008*. Inf. téc. 2008. URL: <http://www.bilbao.net/agenda21/pdf/indicadores2008.pdf>.
- [2] Diputación Foral de Bizkaia. *Subindicador 2.A. Accesibilidad de la población a los diferentes tipos de equipamientos*. Inf. téc. 2008. URL: <http://www.bizkaia21.net/atalak/Indicadores/pdf/ca/02.pdf>.
- [3] C.E. Borges y col. «Uso de fuentes de información geográfica voluntarias en proyectos de ingeniería.» En: *Actas de las vii Jornadas de SIG Libre, Girona 6--8 marzo, España*. Servicio de SIG y Teledetección - SIGTE - de la Universitat de Girona, 2013. isbn: 978-84-694-1624-2.
- [4] pgRouting Community. *pgRouting DARP Branch*. url: <https://github.com/pgRouting/pgrouting/tree/darp>.

- [5] pgRouting Community. *pgRouting project*. url: <http://pgrouting.org>.
- [6] G.B. Dantzig. *Linear Programming and Extensions*. Landmarks in Physics and Mathematics. Princeton University Press, 1998. isbn: 9780691059136. url: <http://books.google.es/books?id=2j46uCX5ZAYC>.
- [7] E.W. Dijkstra. «A note on two problems in connexion with graphs». En: *Numerische Mathematik* 1.1 (1959), págs. 269-271. issn: 0029-599X. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01386390>.
- [8] P.E. Hart, N.J. Nilsson y B. Raphael. «A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths». En: *Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on* 4.2 (1968), págs. 100-107. issn: 0536-1567. doi: 10.1109/TSSC.1968.300136.
- [9] C. L. Hedrick. *Routing Information Protocol*. Inf. téc. United States, 1988.
- [10] Nicolas Jozefowicz, Frédéric Semet y El-Ghazali Talbi. «An evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with route balancing». En: *European Journal of Operational Research* 195.3 (2009), págs. 761-769. issn: 0377-2217. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.065>.
- [11] Lu Liu y Liqiu Meng. «Algorithms of Multi-Modal Route Planning Based on the Concept of Switch Point». En: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation (PFG)* 5/2009 (2009), págs. 431-444.
- [12] Jens Maue, Peter Sanders y Domagoj Matijevic. «Goal Directed Shortest Path Queries Using Precomputed Cluster Distances». En: *Experimental Algorithms*. Ed. por Carme Álvarez y María Serna. Vol. 4007. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2006, págs. 316-327. isbn: 978-3-540-34597-8. doi: [http://dx.doi.org/10.1007/11764298\\_29](http://dx.doi.org/10.1007/11764298_29).
- [13] Comunidad de usuarios de OpenStreetMap. *Web OpenStreetMap*. url: <http://www.openstreetmap.org/>.
- [14] Comunidad de usuarios de pgRouting y OpenStreetMap. *osm2pgrouting*. url: <https://github.com/pgRouting/osm2pgrouting>.
- [15] E. Osaba y col. «An adaptive multi-crossover population algorithm for solving routing problems». En: *Studies in Computational Intelligence* 512 (2014), págs. 113-124. url: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-01692-4\\_9](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-01692-4_9).
- [16] Refrations Research. *PostGIS*. url: <http://postgis.refrations.net>.
- [17] Peter Sanders y Dominik Schultes. «Engineering Fast Route Planning Algorithms». En: *Proceedings of the 6th International Conference on Experimental Algorithms*. WEA'07. Rome, Italy: Springer-Verlag, 2007, págs. 23-36. isbn: 978-3-540-72844-3. url: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1768570.1768573>.
- [18] Peter Sanders y Dominik Schultes. «Engineering Highway Hierarchies». En: *Algorithms – ESA 2006*. Ed. por Yossi Azar y Thomas Erlebach. Vol. 4168. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 2006, págs. 804-816. isbn: 978-3-540-38875-3. doi: [http://dx.doi.org/10.1007/11841036\\_71](http://dx.doi.org/10.1007/11841036_71).

- [19] Frank Schulz, Dorothea Wagner y Karsten Weihe. «Dijkstra's Algorithm On-Line: An Empirical Case Study from Public Railroad Transport». En: *Algorithm Engineering*. Ed. por Jeffrey S. Vitter y Christos D. Zaroliagis. Vol. 1668. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg, 1999, págs. 110-123. isbn: 978-3-540-66427-7. doi: [http://dx.doi.org/10.1007/3-540-48318-7\\_11](http://dx.doi.org/10.1007/3-540-48318-7_11).
- [20] The Aalborg Commitments Secretariat. *Aalborg+10*. url: <http://www.aalborgplus10.dk/>.
- [21] Ayuntamiento de Sevilla. *Plan Especial De Indicadores De Sostenibilidad Ambiental De La Actividad Urbanística De Sevilla*. Inf. téc. 2007. url: <http://www.ecourbano.es/imag/03MOVILIDADYSERVICIOS.PDF>.
- [22] Gobierno Vasco. *Infraestructura de Datos Espaciales - IDE de Euskadi*. url: <http://www.geo.euskadi.net/s69-15375/es/>.
- [23] Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. *Indicadores De Sostenibilidad Local*. Inf. téc. 2012. url: <http://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/http/contenidosEstaticos/adjuntos/es/56/40/45640.pdf>.