



**Universitat de València**

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA

# CARTOGRAFÍA Y ANÁLISIS DE RUTAS INTERRUMPIDAS POR INUNDACIONES EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

*Visualización de Datos, 2º Grado en Ciencia de Datos*

**Autores:**

Natxo de la Rubia Navarro, Pablo Quesada Peyró,  
Sergio Taengua Díaz, Carlos Tato Sapena  
y Eric Villaescusa Töpfer

Curso 2024-2025

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Metodología</b>	<b>2</b>
2.1	Análisis exploratorio de los datos . . . . .	2
2.2	Preprocesado de Datos . . . . .	2
2.3	Preprocesado de la información geográfica . . . . .	3
2.3.1	Obtención y tratamiento de datos de OpenStreetMap . . . . .	3
2.3.2	Análisis y procesamiento en QGIS . . . . .	4
2.3.3	Corrección de geometrías y formatos . . . . .	5
2.3.4	Corrección y asignación de atributos . . . . .	6
2.4	Creación de rutas faltantes . . . . .	6
2.5	Creación de rutas alternativas . . . . .	6
2.5.1	Preprocesado . . . . .	7
2.5.2	Implementación del algoritmo . . . . .	7
2.6	Elección de gráficas . . . . .	8
2.7	Diseño del mapa e interactividad . . . . .	9
2.8	Diseño del cuadro de mandos . . . . .	10
2.9	Implementación . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>11</b>
3.1	Análisis de municipios y paradas en riesgo . . . . .	11
3.2	Generación de rutas alternativas . . . . .	12
3.3	Impacto en edificaciones cercanas a zonas de riesgo . . . . .	12
3.4	Evaluación general de la herramienta . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Discusión</b>	<b>13</b>
4.1	Limitaciones de los datos . . . . .	13
4.2	Impacto del modelo de visualización en la gestión de emergencias . . . . .	13
4.3	Áreas de mejora y desafíos en la implementación . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>14</b>
5.1	Evaluación del impacto en el transporte público . . . . .	14
5.2	Generación de rutas alternativas . . . . .	15
5.3	Implicaciones para la planificación urbana . . . . .	15
5.4	Conclusión general sobre la utilidad de la herramienta . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Agradecimientos</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Referencias</b>	<b>16</b>
7.1	Fuentes de datos utilizadas . . . . .	16
7.2	Herramientas utilizadas para el procesamiento de datos . . . . .	16
7.3	Plataformas utilizadas en el desarrollo de la herramienta . . . . .	16
7.4	Recursos adicionales y referencias metodológicas . . . . .	17

# 1 Introducción

Las inundaciones han representado un desafío recurrente en la Comunidad Valenciana, afectando significativamente la movilidad y la seguridad de la población. La interacción entre factores meteorológicos, geográficos y urbanos ha hecho que la gestión del riesgo de inundación sea clave para las administraciones públicas y la ciudadanía. En este contexto, la visualización de datos se ha convertido en una herramienta fundamental para el análisis, la prevención y la toma de decisiones estratégicas frente a eventos meteorológicos extremos.

Este estudio, dentro del reto propuesto por la Cátedra de Inteligencia Artificial y Visualización de Información para el Gobierno Abierto a la Ciudad de Valencia, se ha desarrollado una cartografía interactiva que permite analizar las rutas interrumpidas por inundaciones en la Comunidad Valenciana. A través de mapas dinámicos y gráficos científicos, se ha facilitado la identificación de zonas de riesgo y la optimización de la planificación de rutas alternativas en situaciones de emergencia.

Para ello, se han empleado datos oficiales de diversas fuentes, tales como el Instituto Cartográfico Valenciano, la Confederación Hidrográfica del Júcar, la Agencia Estatal de Meteorología y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Además, se han integrado datos de **OpenStreetMap** para mejorar la precisión de la cartografía de rutas afectadas. Estos datos han sido procesados mediante herramientas como **QGIS**, **Python** y **R**, utilizando **Shiny** y **Leaflet** para su representación visual e interactiva.

El objetivo principal de este trabajo ha sido proporcionar una solución práctica y accesible que mejore la comprensión del impacto de las inundaciones en la infraestructura de movilidad, facilitando información clave para la planificación urbana y la gestión de riesgos. Además, se han explorado distintos enfoques de representación geoespacial y análisis de datos para garantizar una interpretación efectiva de la información y fomentar la resiliencia ante futuros episodios de inundaciones en la región.

## 2 Metodología

### 2.1 Análisis exploratorio de los datos

El análisis exploratorio de los datos ha permitido la recopilación y revisión de fuentes oficiales relacionadas con las zonas inundables de la Comunidad Valenciana. Se han empleado datos provenientes de organismos como el Instituto Cartográfico Valenciano, la Confederación Hidrográfica del Júcar, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO).

Se han analizado las características espaciales de estos datos, incluyendo la distribución de zonas de riesgo de inundación, la densidad de eventos meteorológicos extremos y la intersección de rutas de transporte con áreas propensas a desbordamientos. Se han utilizado herramientas de visualización preliminar para detectar patrones y posibles inconsistencias en los datos antes de su procesamiento.

### 2.2 Preprocesado de Datos

Antes de su integración en el sistema de visualización, los datos han sido limpiados y transformados para garantizar su calidad y coherencia. El preprocesamiento ha incluido:

- Eliminación de valores erróneos o atípicos en los registros meteorológicos e hidrológicos.
- Conversión de formatos para asegurar la compatibilidad con herramientas de análisis espacial en QGIS, Python y R.

- Normalización de datos espaciales para facilitar su integración en mapas interactivos. Además, se han implementado técnicas de agregación y filtrado para mejorar la eficiencia en la representación de datos dentro del cuadro de mandos.

## 2.3 Preprocesado de la información geográfica

El análisis espacial ha permitido procesar la información geográfica para extraer capas de datos útiles para la visualización. Se han aplicado las siguientes técnicas:

1. **Intersección espacial y vectorial**, para cruzar información sobre rutas de transporte y zonas de riesgo de inundación. Se ha realizado una intersección geográfica entre los mapas de rutas afectadas y los polígonos de peligrosidad de inundación, determinando qué vías han quedado inhabilitadas en distintos escenarios de inundación. Este análisis ha facilitado la identificación de áreas críticas en términos de accesibilidad y ha permitido generar propuestas de rutas alternativas. Estos procesos se han realizado en QGIS, exportando las capas resultantes en formato vectorial y ráster para su posterior integración en R.
2. **Identificación de estaciones sin rutas asignadas**, para detectar qué paradas de autobús no tienen una conexión definida en la red de transporte. Este proceso se ha realizado directamente en QGIS, sin necesidad de aplicar buffers, ya que la ausencia de rutas ha sido evidente al visualizar la distribución de las paradas en el mapa. Al tratarse de un análisis basado en datos de OpenStreetMap (OSM), hemos verificado que algunas estaciones no estaban correctamente asociadas a ninguna ruta, lo que ha requerido una corrección manual y la generación de rutas nuevas.
3. **Superposición espacial**, utilizada para determinar qué rutas de transporte son afectadas por las inundaciones. Se ha realizado una intersección geográfica entre los polígonos de peligrosidad de inundación y la red de transporte existente, permitiendo identificar qué vías quedan inhabilitadas en distintos escenarios de inundación. Este análisis ha sido clave para la identificación de áreas críticas en términos de accesibilidad y para la posterior generación de rutas alternativas. Estos procesos se han llevado a cabo en **QGIS**, exportando las capas resultantes en formato vectorial y ráster para su posterior integración en **R**.

### 2.3.1 Obtención y tratamiento de datos de OpenStreetMap

Para obtener datos precisos sobre estaciones de autobús y sus respectivas rutas, hemos utilizado OpenStreetMap (OSM), una plataforma de cartografía global colaborativa que permite acceder a datos geoespaciales de manera gratuita. A diferencia de los mapas tradicionales, OSM no solo proporciona información de calles y carreteras, sino que también almacena atributos detallados sobre elementos urbanos, como paradas de autobús, redes de transporte público y características viales.

Sin embargo, la extracción de datos desde OSM no es un proceso directo, ya que la plataforma no ofrece archivos de descarga estructurados para cada tipo de información a gran escala. Por ello, hemos recurrido a Overpass QL, un lenguaje de consulta diseñado específicamente para acceder a los datos de OSM de manera personalizada.

Overpass QL funciona como una herramienta para filtrar grandes volúmenes de datos cartográficos mediante consultas SQL-like adaptadas al esquema de OpenStreetMap. Hemos utilizado Overpass Turbo, una interfaz web que permite ejecutar consultas de Overpass de manera visual y comprobar los datos antes de exportarlos.

La consulta que hemos diseñado para obtener exclusivamente paradas de autobús y sus respectivas rutas ha incluido los siguientes filtros clave:

- `route=bus` → Para seleccionar únicamente elementos de la red de autobuses.

- `highway=bus_stop` → Para extraer las estaciones de autobús mapeadas en OSM.
- Condiciones espaciales para limitar la búsqueda a la Comunidad Valenciana.

Tras ejecutar la consulta, Overpass Turbo ha devuelto una gran cantidad de datos, los cuales hemos exportado en formato GeoJSON para su posterior análisis en QGIS.

El uso de Overpass QL ha supuesto varios retos, entre los cuales destacan:

- Volumen de datos elevado: OSM contiene miles de registros para redes de transporte, por lo que la consulta debía ser optimizada para evitar tiempos de espera excesivos o errores en la carga.
- Estructura inconsistente de los datos: Algunas estaciones de autobús en OSM no tenían la información completa o estaban etiquetadas de manera incorrecta, lo que ha requerido una limpieza y validación manual de los datos obtenidos.
- Limitaciones en la cobertura de rutas: Si bien OSM proporciona estaciones de autobús, muchas rutas no estaban correctamente definidas, lo que ha hecho necesario generar conexiones adicionales entre paradas mediante algoritmos específicos de generación de rutas.

Una vez exportados los datos en GeoJSON, hemos cargado la información en QGIS para procesarla y aplicar diversas técnicas de análisis espacial. En esta fase, hemos realizado:

- Corrección de estaciones incorrectas, eliminando aquellas que no tenían atributos válidos.
- Asignación de municipios a cada estación, empleando una capa oficial de delimitación municipal de la Comunidad Valenciana.
- Generación de rutas faltantes, creando conexiones entre estaciones que no contaban con una ruta definida en OSM.

Gracias al uso de Overpass QL y QGIS, hemos logrado una extracción precisa y estructurada de los datos de transporte público, permitiendo la posterior evaluación de accesibilidad en escenarios de inundación.

### 2.3.2 Análisis y procesamiento en QGIS

Una vez cargados los datos en QGIS, hemos aplicado diversas técnicas para evaluar el impacto de las inundaciones sobre las rutas de autobuses. Estas incluyen:

- **Intersección espacial y vectorial:** Se ha cruzado la información de las rutas de transporte con los datos de peligrosidad de inundación para determinar qué buses y qué rutas han quedado inhabilitados bajo distintos escenarios de inundación.
- **Definición de variables de inundabilidad:** A partir del análisis espacial, se han generado indicadores clave que reflejan el grado de afectación de cada ruta en función del nivel de inundación esperado. Estas variables han sido fundamentales para la clasificación del impacto de las inundaciones en la red de transporte, permitiendo la identificación de rutas con alta vulnerabilidad y aquellas que pueden mantenerse operativas bajo distintos escenarios. Se han definido parámetros como:
  - **Nivel de exposición:** Relación entre la ubicación de la ruta y el área de inundación proyectada.
  - **Probabilidad de afectación:** Basada en el cruce con datos históricos de precipitaciones e inundaciones previas.

- **Severidad de interrupción:** Determinación del impacto en la movilidad en función del grado de inundación y su duración.

Estas variables han sido esenciales para la toma de decisiones en la planificación de rutas alternativas, priorizando zonas críticas y garantizando un transporte más eficiente durante eventos de inundación.

- **Operaciones de unión (joins):** Para integrar todos los datos procesados en un único archivo estructurado, se han realizado uniones espaciales entre las rutas de transporte, las zonas de inundación y los atributos asociados a cada estación. Este proceso ha permitido una visualización completa y detallada de la infraestructura afectada, facilitando la comparación de escenarios de inundación de 10, 50, 100 y 500 años de retorno. Además, la integración de capas ha optimizado el análisis de accesibilidad, permitiendo determinar qué municipios presentan mayor riesgo de interrupción y ofreciendo datos clave para la planificación de estrategias de movilidad. Gracias a estas operaciones, el modelo de evaluación de riesgo cuenta con una base de datos consolidada, que permite realizar consultas dinámicas sobre la afectación de rutas en función de distintos parámetros.

### 2.3.3 Corrección de geometrías y formatos

Para realizar cálculos correctos con las capas de laminación de 10, 50, 100 y 500 años de retorno, ha sido necesario corregir las geometrías de los archivos originales, ya que presentaban errores que afectaban la fiabilidad de los cálculos espaciales. Estos errores geométricos podían generar problemas en las operaciones de intersección y análisis de datos, por lo que se ha aplicado un proceso de corrección estructurado.

Cuando ha sido posible, hemos utilizado el algoritmo **"Fix geometries"** (`native:fixgeometries`) de QGIS, el cual permite corregir automáticamente problemas en las geometrías, asegurando su validez para operaciones posteriores. Este proceso ha sido aplicado a las capas afectadas, permitiendo resolver errores comunes como:

- Polígonos con vértices mal definidos.
- Líneas con segmentos duplicados o intersecciones incorrectas.
- Geometrías que no cumplían con los estándares de topología espacial.

En los casos en que el algoritmo de QGIS no ha sido suficiente para corregir los errores, hemos realizado un proceso manual de validación, siguiendo estos pasos:

1. Identificación de objetos con errores → Hemos revisado los *warnings* generados durante las operaciones espaciales, los cuales indicaban qué elementos tenían geometrías inválidas.
2. Eliminación de objetos no necesarios → Si el objeto afectado no era esencial para el análisis, hemos optado por su eliminación para evitar problemas en los cálculos.
3. Corrección manual de elementos clave → En los casos en que el objeto era fundamental para el estudio, hemos modificado manualmente la geometría en **QGIS**, ajustando vértices y corrigiendo topología para garantizar su correcta interpretación en el sistema.

Transformación de coordenadas y ajustes de proyección: Además, durante todo el proceso hemos trabajado con distintas proyecciones, asegurando la correcta transformación de coordenadas en los siguientes casos:

- Se ha utilizado la proyección estándar en grados para consultas y visualización general.

- Para operaciones espaciales con medidas en metros, se ha aplicado la proyección **EPSG:25830** (UTM Zona 30 Norte).

Finalmente, la capa de municipios obtenida a partir de datos abiertos del Gobierno de España también ha requerido un proceso de corrección y verificación, permitiendo una asignación precisa de cada estación de autobús a su municipio correspondiente. En este paso, hemos asegurado la coherencia geográfica de los datos, verificando que cada parada de autobús esté correctamente referenciada dentro de su área administrativa.

### 2.3.4 Corrección y asignación de atributos

Para garantizar la calidad de los datos, hemos llevado a cabo un proceso de limpieza de estaciones incorrectas y asignación de atributos por localización. Con el fin de asociar correctamente cada estación de autobús con su respectivo municipio, hemos utilizado una capa de datos abiertos del Gobierno de España, que proporciona la delimitación administrativa de los municipios de la Comunidad Valenciana.

Dado que OpenStreetMap no proporciona todas las rutas completas, hemos utilizado algoritmos de generación de rutas basados en la red vial de OSM. Para ello:

1. Se ha descargado la red vial desde Geofabrik.
2. Se han identificado estaciones de autobús que no tienen rutas asignadas.
3. Se ha aplicado un algoritmo que crea la ruta más óptima entre las paradas desconectadas, asegurando su coherencia con la infraestructura vial existente.

## 2.4 Creación de rutas faltantes

En el proceso de obtención de datos, hemos recopilado todas las paradas de autobús disponibles en el proyecto. Sin embargo, hemos identificado que no todas las rutas estaban correctamente definidas en los datos originales, lo que generaba zonas con paradas desconectadas entre sí.

Con la red vial depurada, hemos aplicado herramientas avanzadas en QGIS para generar rutas óptimas entre paradas de autobús previamente identificadas. Para ello, hemos utilizado el complemento **"ORS Tools"**, el cual permite calcular trayectos óptimos según el tipo de vehículo y la infraestructura disponible. Dentro de la herramienta, hemos seleccionado la opción **"Batch Jobs"** y, específicamente, la funcionalidad **"Points (1 Layer)"**, que conecta todos los puntos de una misma capa generando la ruta más eficiente.

Dado que el algoritmo requiere una secuencia definida para conectar correctamente las estaciones, hemos añadido un nuevo atributo llamado **"orden"**, donde hemos asignado manualmente un número secuencial a cada parada (del 1 al N), estableciendo así el trayecto correcto. Este paso ha sido necesario para garantizar que la herramienta de generación de rutas siga la lógica del transporte público.

En la tabla de atributos de la capa resultante, hemos obtenido información clave como la distancia total de la ruta, el tiempo estimado de recorrido y el tipo de vehículo utilizado en el cálculo.

Esta metodología nos ha permitido completar la información de movilidad en áreas que inicialmente carecían de rutas definidas, facilitando una mejor integración de datos en nuestro análisis de accesibilidad y planificación de rutas alternativas en situaciones de inundación.

## 2.5 Creación de rutas alternativas

Dado que ciertas rutas de autobuses quedan inhabilitadas debido a las inundaciones, hemos desarrollado una metodología para la creación de rutas alternativas. Este proceso ha implicado la identificación de las calles afectadas y la generación de nuevas rutas óptimas que garanticen la movilidad dentro de un entorno seguro.

### 2.5.1 Preprocesado

El primer paso para la generación de rutas alternativas ha consistido en identificar qué segmentos de la red de transporte público han sido afectados por las inundaciones. Para ello:

1. Selección de rutas afectadas → Hemos partido de la capa original de rutas de autobuses y aplicado la herramienta de QGIS "Seleccionar por localización", estableciendo como capa de referencia la capa de inundabilidad (resultado de la unión de las capas de inundaciones de 10, 50, 100 y 500 años de retorno).
2. Eliminación de rutas no afectadas → Una vez seleccionadas las rutas que intersectaban con las zonas inundadas, hemos invertido la selección y eliminado los objetos que no requerían modificación, quedándonos únicamente con aquellas rutas que necesitan alternativas.

Con esta información lista, nos dimos cuenta de la necesidad de contar con una capa que represente la red vial disponible para generar rutas alternativas. Para ello:

1. Descarga de la red vial completa → Hemos obtenido la capa de la red vial de la Comunidad Valenciana desde Geofabrik.
2. Filtrado de calles afectadas por inundaciones → Aplicamos nuevamente "Seleccionar por localización" para intersectar la red vial con las capas de inundación y posteriormente eliminamos la selección, quedándonos solo con las calles seguras.
3. Ajuste de parámetros avanzados → Debido al tamaño de los datos, modificamos los ajustes avanzados de la herramienta para evitar que el proceso se detuviera por geometrías inválidas, permitiendo un filtrado automático sin pérdida excesiva de información.

### 2.5.2 Implementación del algoritmo

Una vez obtenidas las capas depuradas, hemos procedido a la generación automática de rutas alternativas mediante el uso de algoritmos de caminos óptimos. Para ello:

1. Selección de la capa de rutas afectadas → Hemos filtrado únicamente los tramos de rutas de autobuses que han quedado inhabilitados por las inundaciones, eliminando aquellos que no requieren modificaciones. Esto nos permite focalizar el cálculo en las zonas críticas que necesitan alternativas viables.
2. Extracción de los vértices extremos de las rutas afectadas → Para determinar los puntos de inicio y destino de las rutas alternativas, hemos identificado los vértices extremos de cada segmento interrumpido. Estos vértices representan los límites de las rutas originales en las zonas afectadas.
3. Aplicación del algoritmo de camino más corto → Utilizamos el método "**Shortest Path Next**", tomando como base la red vial post-procesada, la cual solo incluye calles NO afectadas por inundaciones. Durante la ejecución del algoritmo, se ha tenido en cuenta la dirección de circulación, asegurando que las rutas generadas sean coherentes con la infraestructura y las condiciones del transporte público.
4. Exportación de la nueva capa con rutas alternativas → Como resultado del cálculo, hemos generado una nueva capa con los trayectos óptimos, garantizando que los nuevos recorridos conecten las estaciones de autobús sin atravesar zonas inundadas.

Este enfoque ha permitido optimizar la planificación del transporte público en escenarios de inundación, asegurando que se mantenga la movilidad en zonas urbanas afectadas por eventos extremos. Gracias al uso de QGIS y algoritmos de caminos óptimos, hemos podido garantizar soluciones eficientes y seguras para la conectividad de las rutas de autobús.

## 2.6 Elección de gráficas

En la aplicación desarrollada, la selección de gráficas ha sido fundamental para visualizar el impacto de las inundaciones en la movilidad urbana y evaluar la eficacia de las rutas alternativas generadas. En **Shiny**, la representación de datos se gestiona mediante la interacción entre la UI y el servidor, donde los gráficos inicialmente creados en la interfaz son espacios vacíos y luego se completan con datos dinámicos en el servidor.

Para garantizar una interpretación clara de los resultados, hemos diseñado diversas gráficas que facilitan el análisis de los datos. Entre las más relevantes, se encuentran:

- **Gráfico de barras sobre el número de paradas afectadas**, mostrando cuántas estaciones quedan inhabilitadas en cada nivel de riesgo de inundación. Este gráfico ha permitido identificar la distribución de la afectación en distintos municipios y evaluar cuáles presentan mayor vulnerabilidad frente a eventos de inundación.

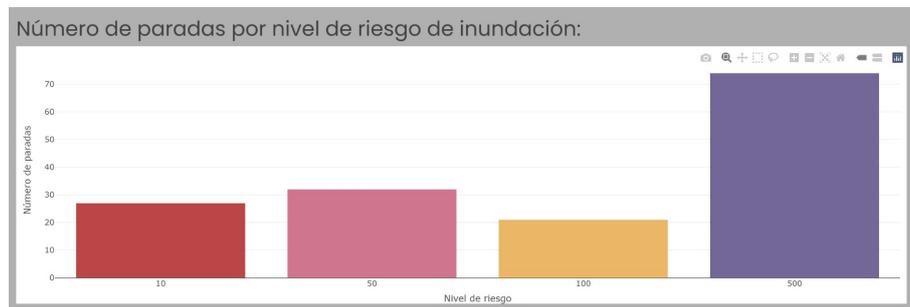


Figure 1: Distribución de paradas afectadas por nivel de riesgo de inundación

- **Mapa de calor de afectación en la red de transporte**, que permite visualizar de manera intuitiva las zonas con mayor concentración de paradas en riesgo. Se ha utilizado un esquema de colores progresivos para resaltar las áreas con mayor cantidad de puntos críticos.



Figure 2: Mapa de calor mostrando la densidad de paradas en riesgo de inundación

- **Gráfico de pastel**, representando el **porcentaje de paradas con riesgo de inundación**. Este gráfico ha sido clave para identificar la proporción de paradas que quedarían afectadas en cada escenario de inundación, proporcionando una visión global de la vulnerabilidad del sistema de transporte público.

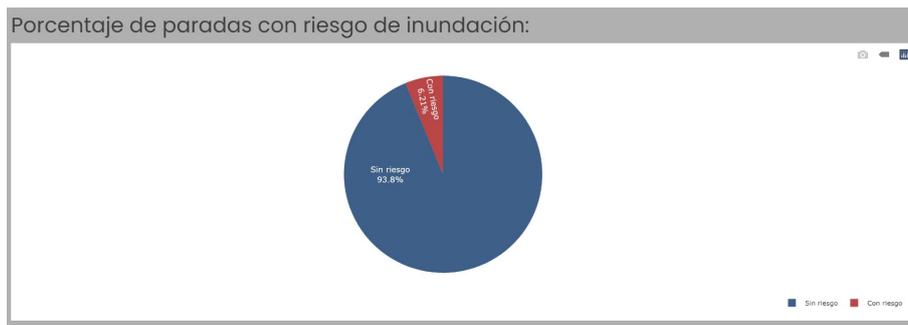


Figure 3: Porcentaje de paradas con riesgo de inundación

Los gráficos implementados han sido diseñados de manera que faciliten la interpretación de los resultados sin perder precisión en el análisis. En la interfaz de Shiny, cada gráfico ha sido definido inicialmente con funciones como `plotOutput()` y `leafletOutput()`, que crean los espacios de visualización. Posteriormente, en el servidor, se han completado con información dinámica mediante `renderPlot()` y `renderLeaflet()`.

En particular, el gráfico de barras ha permitido evaluar la distribución de paradas afectadas por cada nivel de riesgo de inundación, mientras que el mapa de calor ha sido fundamental para identificar las zonas más vulnerables. Por otro lado, el gráfico de pastel proporciona una visión porcentual del total de paradas en riesgo dentro del sistema de transporte, permitiendo evaluar la magnitud del problema de manera clara.

Estas visualizaciones han sido esenciales para comprender el impacto de las inundaciones y facilitar la planificación de estrategias de movilidad alternativas en escenarios de emergencia.

Los gráficos implementados han sido diseñados de manera que faciliten la interpretación de los resultados sin perder precisión en el análisis. En la interfaz de Shiny, cada gráfico ha sido definido inicialmente con funciones como `plotOutput()` y `leafletOutput()`, que crean los espacios de visualización. Posteriormente, en el servidor, se han completado con información dinámica mediante `renderPlot()` y `renderLeaflet()`.

En particular, el gráfico de barras ha permitido evaluar la distribución de paradas afectadas por cada nivel de riesgo de inundación, mientras que el mapa de calor ha sido fundamental para identificar las zonas más vulnerables. Por otro lado, el gráfico de pastel proporciona una visión porcentual del total de paradas en riesgo dentro del sistema de transporte, permitiendo evaluar la magnitud del problema de manera clara.

Estas visualizaciones han sido esenciales para comprender el impacto de las inundaciones y facilitar la planificación de estrategias de movilidad alternativas en escenarios de emergencia.

## 2.7 Diseño del mapa e interactividad

El mapa interactivo es el núcleo visual de la aplicación, permitiendo explorar cómo las inundaciones afectan la movilidad y cómo se han generado rutas alternativas. Este mapa se ha estructurado con Leaflet en Shiny, lo que facilita la interacción en tiempo real basada en la selección del usuario.

Para la disposición general de la interfaz, hemos empleado la estructura `sidebarLayout()`, que divide la pantalla en:

- **sidebarPanel**, donde el usuario selecciona el nivel de riesgo de inundación o el municipio de interés.
- **mainPanel**, que contiene el mapa y otros outputs relevantes.

Dentro del mapa, la interactividad se gestiona mediante:

- **leafletOutput()**, que reserva un espacio en la UI para la representación visual.

- **renderLeaflet()**, que genera el mapa y le añade información dinámica según los inputs del usuario.
- **observeEvent()**, que detecta cambios en los inputs y ajusta dinámicamente la vista del mapa según la elección del usuario.
- **leafletProxy()**, que permite modificar la visualización del mapa sin necesidad de recargar toda la aplicación.

Además, para ofrecer una mayor flexibilidad en la visualización, hemos incorporado la función **addLayersControl()** en el servidor, lo que permite al usuario elegir entre distintos tipos de mapas:

- **Mapa satélite**, proporcionando una vista más detallada del entorno urbano.
- **Mapa minimalista**, con un diseño simplificado para destacar únicamente las rutas y zonas afectadas.

Este control de capas permite al usuario cambiar entre estas opciones sin afectar la visualización de las rutas y paradas. Cuando el usuario selecciona un municipio en la aplicación, el sistema filtra las paradas de autobús y ajusta automáticamente la vista del mapa a una de ellas. En este proceso, el servidor accede al valor de `input$municipio_en_mapa`, filtra los datos y actualiza el mapa en función de la nueva selección.

## 2.8 Diseño del cuadro de mandos

El diseño del cuadro de mandos ha sido concebido para que la interacción con la aplicación sea intuitiva y clara. Para organizar la información en diferentes secciones, hemos utilizado **tabPanel()**, permitiendo que el usuario explore distintos aspectos del estudio sin necesidad de recargar la página.

La interfaz de cada pestaña se ha estructurado siguiendo uno de estos enfoques:

- **sidebarLayout()** → Se emplea cuando es necesario un panel lateral con opciones de selección.
- **fluidPage()** → Se utiliza para adaptar los elementos visuales al tamaño de la pantalla, asegurando una visualización óptima en distintos dispositivos.

Dentro de cada pestaña, los elementos de interacción se dividen en:

- **Inputs** → Campos de selección del usuario, definidos con funciones como `selectInput()` (para desplegables) y `checkboxInput()` (para activar o desactivar filtros).
- **Outputs** → Espacios donde se mostrarán los gráficos y mapas generados, utilizando funciones como `leafletOutput()` y `plotOutput()`.

Es fundamental destacar que cada input y output tiene un **ID único**, lo que permite referenciarlos en el servidor y actualizar la información de manera dinámica. Un aspecto clave es que los outputs en la UI no contienen datos inicialmente, sino que funcionan como contenedores vacíos que posteriormente se llenan con información procesada en el servidor.

## 2.9 Implementación

En la implementación de la aplicación, se ha seguido un enfoque basado en la interactividad y actualización en tiempo real mediante Shiny. Para ello, el servidor ha sido diseñado de manera que pueda responder a cambios en los inputs y modificar los outputs sin necesidad de recargar la página.

Las principales funciones empleadas en el servidor son:

- **renderLeaflet()** → Para la generación de mapas interactivos en tiempo real.
- **reactive()** → Para definir variables dinámicas que cambian según los inputs del usuario.
- **req()** → Para asegurarse de que los inputs tengan valores válidos antes de realizar cálculos.
- **observe()** → Para realizar actualizaciones automáticas cuando el usuario modifica un valor.
- **observeEvent()** → Para ejecutar eventos específicos en respuesta a cambios en los inputs.
- **leafletProxy()** → Para modificar dinámicamente los mapas sin necesidad de recargar la aplicación.

Uno de los aspectos clave en la implementación es el manejo de capas de mapas mediante **addLayersControl()** en el servidor, lo que permite que el usuario seleccione entre distintos estilos de mapa. Este control de capas está vinculado a un **observe** que ajusta la visualización en función de la elección realizada.

Además, hemos incorporado un sistema de cálculo de intersección entre las paradas afectadas y los edificios cercanos. Para esto, se ha generado un **buffer** de 500 metros alrededor de cada parada en riesgo, permitiendo identificar qué edificaciones se encuentran dentro de esa área de influencia. La intersección se ha realizado mediante `st_join()` para mejorar la eficiencia del proceso.

Finalmente, el servidor se ha diseñado para permitir la modificación de los niveles de riesgo en tiempo real, proporcionando una experiencia dinámica y adaptable para el análisis de movilidad en escenarios de emergencia.

### 3 Resultados

Los resultados obtenidos han estado organizados en mapas y gráficas que han permitido analizar distintos aspectos de la afectación de las inundaciones en la movilidad urbana. En este apartado se presentan los hallazgos más relevantes, así como las evaluaciones realizadas sobre la precisión de los modelos y la utilidad de la herramienta en situaciones reales.

#### 3.1 Análisis de municipios y paradas en riesgo

Para determinar qué municipios presentan un mayor impacto en su red de transporte público debido a inundaciones, se ha llevado a cabo un análisis detallado de las paradas de autobús afectadas. Dado que la comparación directa entre municipios con diferente cantidad de paradas podría generar resultados sesgados, hemos dividido los datos en tres grupos:

- **Municipios pequeños** (1 a 5 paradas).
- **Municipios medianos** (6 a 10 paradas).
- **Municipios grandes** (11 o más paradas).

Para cada municipio, se ha calculado el porcentaje de paradas que presentan algún tipo de riesgo de inundación en relación con el total de paradas existentes en dicho municipio. Este enfoque ha permitido realizar una **comparación justa**, asegurando que los municipios con menor cantidad de paradas no queden sobre o infrarepresentados en los resultados.

Los datos obtenidos han permitido identificar:

- Los municipios con mayor porcentaje de paradas en riesgo, lo que indica una vulnerabilidad significativa ante eventos de inundación.

- Los municipios con menor porcentaje de paradas afectadas, destacando aquellos donde el sistema de transporte público presenta una mayor resiliencia ante estos eventos.

Este análisis ha sido fundamental para obtener una visión clara sobre qué municipios presentan mayores problemas de movilidad en situaciones de inundación, facilitando la planificación de respuestas ante emergencias.

### 3.2 Generación de rutas alternativas

El estudio de las rutas afectadas por inundaciones ha evidenciado que, en algunos casos, no ha sido posible generar una ruta alternativa para cada una de ellas. Esto se debe a que las zonas inundadas pueden abarcar una superficie extensa, dificultando la creación de trayectos seguros dentro de la infraestructura vial disponible.

Sin embargo, mediante el algoritmo de camino más corto, se han generado rutas alternativas **en los casos en los que era viable hacerlo**, garantizando que las nuevas conexiones respeten los criterios de accesibilidad y seguridad. Las rutas alternativas obtenidas han sido visualizadas en el mapa, permitiendo identificar:

- Qué rutas han podido ser rediseñadas con éxito.
- Qué zonas presentan problemas para la reestructuración de la movilidad debido a la extensión del área afectada por inundaciones.

Estos resultados destacan la importancia de contar con una planificación urbana que contemple rutas seguras y alternativas en casos de desastres naturales, asegurando la conectividad del sistema de transporte público en situaciones extremas.

### 3.3 Impacto en edificaciones cercanas a zonas de riesgo

Los datos analizados han permitido evaluar el número de **edificios afectados** en caso de inundación, considerando el impacto sobre las personas que frecuentan dichas edificaciones y que dependen del transporte público. Se ha calculado la cantidad de edificios dentro del área de influencia de las paradas afectadas, revelando que:

- **Un número significativo de edificios quedarían sin acceso a transporte público** en caso de inundación.
- **Miles de personas podrían verse afectadas**, al depender de estas paradas para su movilidad diaria.

Este hallazgo resulta relevante para la planificación de respuestas ante emergencias, ya que pone en evidencia la necesidad de estrategias que aseguren la movilidad de la población en caso de eventos extremos. En este sentido, contar con medidas de transporte alternativas o reforzar la infraestructura de movilidad en zonas vulnerables podría minimizar el impacto de las inundaciones en la población.

### 3.4 Evaluación general de la herramienta

Los análisis realizados mediante la herramienta han permitido evaluar su utilidad en situaciones reales. La integración de datos geoespaciales y la posibilidad de visualizar rutas afectadas y alternativas en el mapa han proporcionado información valiosa sobre:

- La precisión de los modelos de predicción en la identificación de rutas afectadas.
- La viabilidad de las alternativas generadas mediante algoritmos de camino más corto.

- La efectividad de la metodología aplicada para definir zonas de riesgo y su impacto en la movilidad.

Estos resultados respaldan la necesidad de contar con herramientas de análisis de movilidad en escenarios de emergencia, contribuyendo a la planificación de respuestas estratégicas en situaciones de desastre natural.

## 4 Discusión

El presente estudio ha permitido analizar el impacto de las inundaciones en la movilidad urbana y la eficacia de las soluciones propuestas para mitigar sus efectos. Para evaluar la fiabilidad de los hallazgos, hemos comparado los resultados obtenidos con investigaciones previas y datos históricos, asegurando una interpretación precisa de los fenómenos observados. A continuación, se detallan los aspectos clave discutidos durante el desarrollo del estudio.

### 4.1 Limitaciones de los datos

Uno de los desafíos encontrados en el análisis ha sido la disponibilidad y precisión de los datos geoespaciales utilizados. Algunas de las principales limitaciones identificadas incluyen:

- **Problemas de resolución geoespacial**, especialmente en zonas donde la cartografía detallada no proporciona información suficiente sobre la infraestructura vial afectada. La precisión de los modelos depende en gran medida de la resolución de las capas de datos, lo que podría influir en la generación de rutas alternativas.
- **Distribución de paradas de autobús**, ya que los municipios presentan densidades de paradas muy variables. Para garantizar una comparación justa entre municipios, se ha recurrido a una segmentación en tres categorías (*pequeños, medianos y grandes*), asegurando que los resultados sean equitativos independientemente del tamaño urbano.

Si bien estos factores pueden introducir ciertas variaciones en los resultados, la metodología aplicada ha permitido minimizar su impacto, asegurando que los análisis reflejen la realidad del sistema de transporte frente a eventos de inundación.

### 4.2 Impacto del modelo de visualización en la gestión de emergencias

El modelo de visualización implementado en la aplicación ha demostrado ser una herramienta eficaz para el análisis geoespacial de movilidad en escenarios de emergencia. Algunos de los aspectos más relevantes observados han sido:

- **Identificación rápida de rutas afectadas**, lo que permite planificar medidas de emergencia de manera eficiente, reduciendo el impacto de interrupciones en el transporte público.
- **Evaluación de rutas alternativas**, donde el algoritmo de camino más corto ha facilitado la generación de trayectos alternativos viables, destacando las limitaciones estructurales en determinadas zonas.
- **Análisis de impacto en edificaciones cercanas**, revelando que una cantidad significativa de edificios quedarían sin acceso a transporte público, afectando la movilidad de miles de personas. Este hallazgo subraya la importancia de estrategias de respuesta ante desastres naturales.

La capacidad de visualizar los resultados de manera interactiva ha permitido un análisis detallado del comportamiento del sistema de transporte bajo condiciones de inundación, proporcionando información clave para la toma de decisiones en planificación urbana y gestión de emergencias.

### 4.3 Áreas de mejora y desafíos en la implementación

A lo largo del desarrollo de la aplicación, se han identificado varias áreas de mejora que podrían optimizar el rendimiento del modelo y mejorar la fiabilidad de los resultados:

- **Integración de datos meteorológicos en tiempo real**, lo que permitiría evaluar la evolución de un evento de inundación y actualizar las rutas afectadas de forma dinámica.
- **Optimización del algoritmo de rutas alternativas**, para incluir criterios adicionales como accesibilidad, capacidad de carga de las vías y tiempos estimados de viaje en escenarios de emergencia.
- **Mayor precisión en el filtrado de datos**, explorando métodos avanzados de eliminación de errores en capas geoespaciales, lo que podría mejorar la identificación de zonas de riesgo.

En cuanto a la implementación de la herramienta, uno de los principales desafíos ha sido la gestión de grandes volúmenes de datos y la necesidad de garantizar tiempos de respuesta óptimos en la aplicación. Para abordar este problema, se ha recurrido a técnicas de optimización de procesamiento y filtrado de capas en QGIS, lo que ha permitido mejorar la velocidad de ejecución y garantizar una experiencia de usuario eficiente.

## 5 Conclusiones

El presente estudio ha permitido evaluar el impacto de las inundaciones en la movilidad urbana y desarrollar una metodología para la generación de rutas alternativas en escenarios de desastre. A partir del análisis geoespacial, se han obtenido conclusiones fundamentales sobre la afectación del transporte público y la viabilidad de las soluciones implementadas.

### 5.1 Evaluación del impacto en el transporte público

El análisis de las inundaciones ha puesto en evidencia la vulnerabilidad del sistema de transporte público en distintos municipios. Los resultados han mostrado que la magnitud del impacto no solo depende del número absoluto de paradas afectadas, sino también de la proporción de infraestructura dañada en cada localidad.

Si bien la segmentación entre municipios pequeños, medianos y grandes ha sido útil para realizar una comparación equitativa, la verdadera relevancia del estudio radica en cómo estos datos pueden informar medidas de gestión de emergencias. En este sentido, las principales conclusiones respecto al transporte público son:

- La necesidad de incorporar criterios de resiliencia en la planificación del transporte urbano, priorizando la protección de zonas con alta concentración de paradas vulnerables.
- La importancia de diseñar estrategias de movilidad alternativas, especialmente en municipios con un alto porcentaje de paradas en riesgo.
- La urgencia de fortalecer la infraestructura vial en zonas críticas, con el objetivo de reducir la exposición del transporte público a eventos de inundación.

Además, los datos han mostrado que un número significativo de edificios quedaría sin acceso a transporte público en caso de inundación, lo que afectaría a miles de personas que dependen de estos medios para su desplazamiento diario. Este hallazgo refuerza la necesidad de diseñar planes de contingencia integrados que aborden la movilidad desde una perspectiva urbana más amplia.

En definitiva, los resultados obtenidos proporcionan información clave para desarrollar políticas de prevención y respuesta en eventos de emergencia, asegurando que el transporte público pueda operar de manera eficiente incluso en condiciones adversas.

## 5.2 Generación de rutas alternativas

El algoritmo de camino más corto aplicado ha permitido generar rutas alternativas viables en los casos donde la infraestructura urbana lo ha permitido. Sin embargo, se ha observado que no ha sido posible obtener rutas alternativas para todas las conexiones afectadas, debido a la extensión de las zonas inundadas en ciertos sectores. Entre las conclusiones derivadas de este análisis, se destacan:

- La necesidad de contar con redes viales más resilientes que permitan mayor flexibilidad en la planificación de alternativas ante eventos extremos.
- La relevancia de utilizar algoritmos que no solo optimicen la distancia, sino que consideren criterios adicionales como accesibilidad y capacidad de las vías.

Las rutas generadas han sido evaluadas en términos de conectividad y seguridad, garantizando que las alternativas propuestas sean funcionales en condiciones adversas.

## 5.3 Implicaciones para la planificación urbana

Los resultados obtenidos ponen en evidencia la importancia de integrar herramientas digitales en la planificación de respuestas ante inundaciones. La metodología aplicada ha demostrado ser eficaz en la identificación de rutas afectadas y en la generación de alternativas dentro de las limitaciones estructurales de cada zona. Basándonos en los hallazgos, se sugiere que futuras investigaciones y aplicaciones puedan incorporar:

- Datos meteorológicos en tiempo real para actualizar dinámicamente el estado de las rutas afectadas.
- Algoritmos más avanzados que contemplen múltiples factores en la generación de trayectos alternativos.
- Mayor precisión en la cartografía urbana utilizada, reduciendo errores de resolución en el análisis de movilidad.

Estos elementos permitirían mejorar la planificación urbana y garantizar respuestas más efectivas ante eventos climáticos extremos.

## 5.4 Conclusión general sobre la utilidad de la herramienta

Los resultados obtenidos han evidenciado la importancia de contar con herramientas digitales para el análisis de movilidad en situaciones de emergencia. La aplicación desarrollada ha proporcionado información valiosa sobre la afectación de las inundaciones en el transporte público y ha permitido identificar soluciones viables para garantizar la conectividad urbana.

Si bien existen áreas de mejora que pueden optimizar aún más el modelo, la implementación actual ha demostrado su eficacia en la evaluación de riesgos y planificación de respuestas estratégicas ante desastres naturales. La integración de datos en tiempo real y la ampliación de criterios en la generación de rutas alternativas podrían consolidar aún más la herramienta como un recurso fundamental en la gestión de emergencias.

## 6 Agradecimientos

El desarrollo de este estudio ha sido posible gracias al apoyo de diversas fuentes de datos, plataformas y personas que han contribuido significativamente al análisis y a la implementación de la herramienta.

Queremos expresar nuestro agradecimiento al **Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico**, cuya información sobre los datos hídricos ha sido esencial para comprender la afectación de las inundaciones en la movilidad urbana. Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a **OpenStreetMap** y **Geofabrik**, cuyos datos geográficos han sido fundamentales para la construcción de los mapas y el análisis de rutas afectadas.

También agradecemos a la comunidad de **QGIS** y a las plataformas **Overpass Turbo** y **GIS Stack Exchange**, que han proporcionado herramientas y documentación clave para el procesamiento de datos espaciales y la optimización del análisis cartográfico.

Nuestro reconocimiento especial va dirigido a las personas que han colaborado en la estructuración de la metodología y en la implementación de la herramienta, ofreciendo valiosos comentarios y sugerencias que han mejorado la calidad del trabajo. Su conocimiento y experiencia han sido determinantes para garantizar que la aplicación cumpla con los objetivos establecidos.

Finalmente, agradecemos a todos aquellos que han brindado apoyo, ya sea en forma de asesoramiento técnico o revisión de resultados. Su participación ha sido clave para la realización de este estudio, y su esfuerzo ha permitido desarrollar una herramienta eficaz para la evaluación de la movilidad urbana en escenarios de emergencia.

Este trabajo es el resultado de un esfuerzo conjunto, y sin la colaboración de todas estas instituciones, plataformas y personas, no habría sido posible alcanzar los logros aquí presentados.

## 7 Referencias

### 7.1 Fuentes de datos utilizadas

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (n.d.). *Acceso rápido a datos de agua*. Recuperado el 2 de mayo de 2025, de <https://www.miteco.gob.es/es/agua/servicios/acceso-rapido-datos-agua.html>

Geofabrik. (n.d.). *Descarga de datos geográficos de la Comunidad Valenciana*. Recuperado el 2 de mayo de 2025, de <https://download.geofabrik.de/europe/spain/valencia.html>

OpenStreetMap. (n.d.). *Plataforma de mapas abiertos*. Recuperado el 3 de mayo de 2025, de <https://www.openstreetmap.org/#map=6/40.01/-2.49>

Overpass Turbo. (n.d.). *Consulta avanzada de datos geográficos*. Recuperado el 3 de mayo de 2025, de <https://overpass-turbo.eu/>

Google Maps. (n.d.). *Plataforma de mapas de Google*. Recuperado el 3 de mayo de 2025, de <https://www.google.com/maps?authuser=0>

### 7.2 Herramientas utilizadas para el procesamiento de datos

QGIS Documentation. (n.d.). *Documentación de usuario de QGIS 3.40*. Recuperado el 4 de mayo de 2025, de [https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/user\\_manual/index.html](https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/user_manual/index.html)

QGIS Tutorials. (n.d.). *Guía y tutoriales de QGIS*. Recuperado el 5 de mayo de 2025, de <https://www.qgistutorials.com/en/>

GISCourse. (n.d.). *QuickMapServices Plugin - Agregar mapas base en QGIS*. Recuperado el 5 de mayo de 2025, de <https://www.giscourse.com/quickmapservices-plugin-an-easy-way-to-add-basem>

MappingGIS. (2024). *Cómo trabajar con el snapping o autoensamblado en QGIS*. Recuperado el 6 de mayo de 2025, de <https://mappinggis.com/2024/05/como-trabajar-con-el-snapping-o-autoensa>

### 7.3 Plataformas utilizadas en el desarrollo de la herramienta

Posit Shiny. (n.d.). *Plataforma de desarrollo para aplicaciones Shiny*. Recuperado el 7 de mayo de 2025, de <https://shiny.posit.co/>

Stack Overflow. (n.d.). *Foro de preguntas y respuestas sobre R*. Recuperado el 7 de mayo de 2025, de <https://es.stackoverflow.com/questions/tagged/r>

#### **7.4 Recursos adicionales y referencias metodológicas**

Stack Exchange. (n.d.). *GIS Stack Exchange - Preguntas básicas sobre sistemas de información geográfica*. Recuperado el 7 de mayo de 2025, de <https://gis.stackexchange.com/>

Bibliotecas UNAM. (2024). *Cómo hacer citas y referencias en formato APA*. Recuperado el 8 de mayo de 2025, de <https://bibliotecas.unam.mx/index.php/desarrollo-de-habilidades-informativas/como-hacer-citas-y-referencias-en-formato-apa>