



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE UN PROCESO DE MONITOREO DE CALIDAD DE SERVICIO EN REDES DE TELECOMUNICACIONES PARA ORGANISMOS REGULADORES

Autor: Ignacio Vilana García-Ovies

Director: Santiago Andrés Azcoitia

Madrid

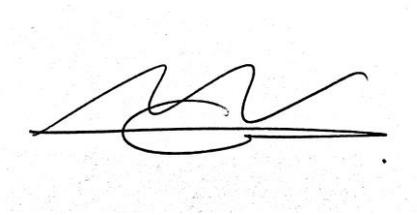
2022

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
*Diseño de un proceso de monitoreo de calidad de servicio en redes de telecomunicaciones
para organismos reguladores*

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Ignacio Vilana García-Ovies

Fecha: 20 de agosto de 2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Santiago Andrés Azcoitia

Fecha: 20 de agosto de 2022



MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DISEÑO DE UN PROCESO DE MONITOREO DE CALIDAD DE SERVICIO EN REDES DE TELECOMUNICACIONES PARA ORGANISMOS REGULADORES

Autor: Ignacio Vilana García-Ovies

Director: Santiago Andrés Azcoitia

Madrid

2022

Agradecimientos

A mi familia, que me ha apoyado incondicionalmente y me ha dado las fuerzas necesarias en todo momento en los momentos más duros académica y personalmente.

A mis amigos y compañeros, gracias por su ayuda tanto fuera como dentro de la escuela, que me ha ayudado para llegar hasta aquí.

A mi director de proyecto, Santiago Andrés, y a la empresa Axon Partners, por haber facilitado el aprendizaje en un entorno desconocido para mí, y darme la oportunidad de desarrollarme como consultor.

Diseño de un proceso de monitoreo de calidad de servicio en redes de telecomunicaciones para organismos reguladores

Autor: Vilana García-Ovies, Ignacio

Director: Andrés Azcoitia, Santiago

Entidad colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas / Axon Partners Group

Resumen del proyecto.

1. INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más globalizado y tecnológico, el sector de las telecomunicaciones ya tenía un importante papel, que se ha visto acentuado debido a la Covid19, incrementando el uso de las redes de telecomunicaciones existentes. Este aumento de la demanda, así como los avances tecnológicos en el sector, provocan una constante necesidad de renovación y expansión de la infraestructura y capacidad existentes.

En este sentido, los reguladores de telecomunicaciones de cada país deben de velar por un correcto desarrollo de la red, cubriendo las necesidades existentes, mientras que se atiende a toda la demanda y se evitan prácticas anticompetitivas por parte de operadores con gran poder de mercado, que poseen gran parte de la infraestructura actual de la red, que supone el mayor coste para un nuevo competidor, creando grandes barreras de entrada. En este contexto, entra en juego la calidad de servicio, en la cual se miden las prestaciones de los servicios que ofrece un operador, midiendo ciertos parámetros (p. ej., cobertura, velocidades, latencia, tiempo de reconexión tras corte, etc.) y comparándolos con la regulación vigente del país en concreto.

En el presente proyecto, se lleva a cabo el dimensionamiento de un proceso de monitorización de los parámetros de calidad de servicio para el organismo regulador de

Jamaica, *The Office of Utilities Office Regulation* (OUR). En el dimensionamiento, se realiza una optimización de la ruta que los equipos de medición deben de seguir con el objetivo de la minimización de los costes del proceso y la maximización del uso de los recursos disponibles.

2. DESARROLLO

Los principales pasos que se han llevado a cabo para la realización del presente proyecto han sido:

- a) Investigación de la situación actual del sector de las telecomunicaciones en términos de regulación de calidad de servicio.
- b) Búsqueda de prácticas internacionales de referencia en procesos de monitorización de parámetros de calidad de servicio, para ver posibles aplicaciones al dimensionamiento para la OUR.
- c) Recolección de datos de entrada relativos a Jamaica para la caracterización del proceso.
- d) Elección de la metodología de la optimización de la ruta, adecuando el algoritmo a las características del problema.
- e) Adaptación de los datos de entrada para ser posteriormente utilizados en el modelo de optimización.
- f) Implementación del algoritmo de optimización *Vehicle Routing Problem* y validación de los resultados obtenidos.
- g) Dimensionamiento de los recursos necesarios y cálculo del coste de estos para la OUR.
- h) Representación gráfica de los resultados obtenidos y elaboración de las conclusiones derivadas de los mismos.

Cada uno de los pasos anteriormente mencionados se describe en mayor profundidad a lo largo del contenido del proyecto.

3. RESULTADOS

Los principales resultados obtenidos tras la ejecución del modelo de optimización son mostrados a continuación. Estos comprenden las ilustraciones más representativas a fin de comprender los resultados obtenidos y el dimensionamiento final del proceso.

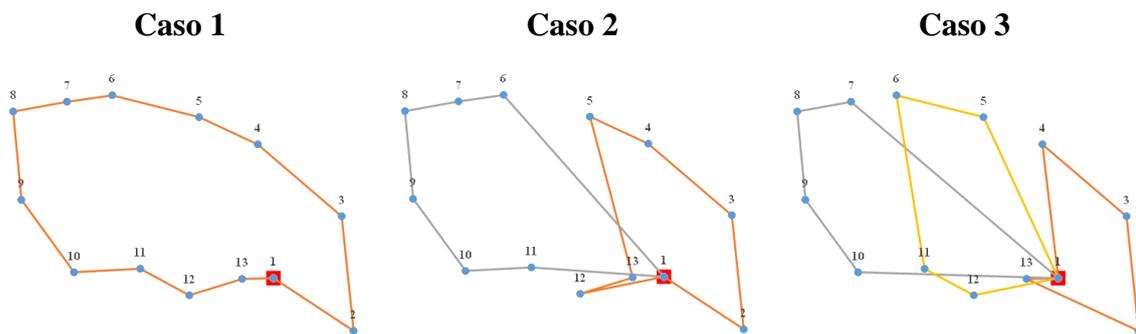


Ilustración 0.1: Resultados de la optimización de la ruta entre capitales de provincia [Fuente: propia]

Cada uno de los puntos de la Ilustración 0.1 representan las capitales de provincia en las que se llevan a cabo las mediciones. La diferencia entre cada uno de los casos reside en el número de vehículos dispuestos por la OUR para recorrer el conjunto de puntos propuesto, obteniendo distintas rutas en función de dicho parámetro.

En el dimensionamiento del proceso, se consideran nueve casos distintos, pudiendo la OUR elegir entre uno a tres vehículos, y uno a tres individuos por vehículo. Los tiempos totales obtenidos para cada uno de los casos son:

Categoría	Caso 1.1	Caso 1.2	Caso 1.3	Caso 2.1	Caso 2.2	Caso 2.3	Caso 3.1	Caso 3.2	Caso 3.3
Tiempo total [h]	944.9	498.1	350.7	566.2	298.6	210.4	514.0	271.1	190.9
Días laborables	118	62	43	70	37	26	64	33	23

Tabla 0.1: Tiempos totales de duración del proceso para cada uno de los casos considerados, para una densidad de población de 2000 habitantes/muestra [Fuente: propia]

La distribución de los costes para los casos de un vehículo-un individuo (caso 1.1), dos vehículos-dos individuos por vehículo (caso 2.), y tres vehículos-tres individuos por vehículo (caso 3.3), se muestran a continuación:

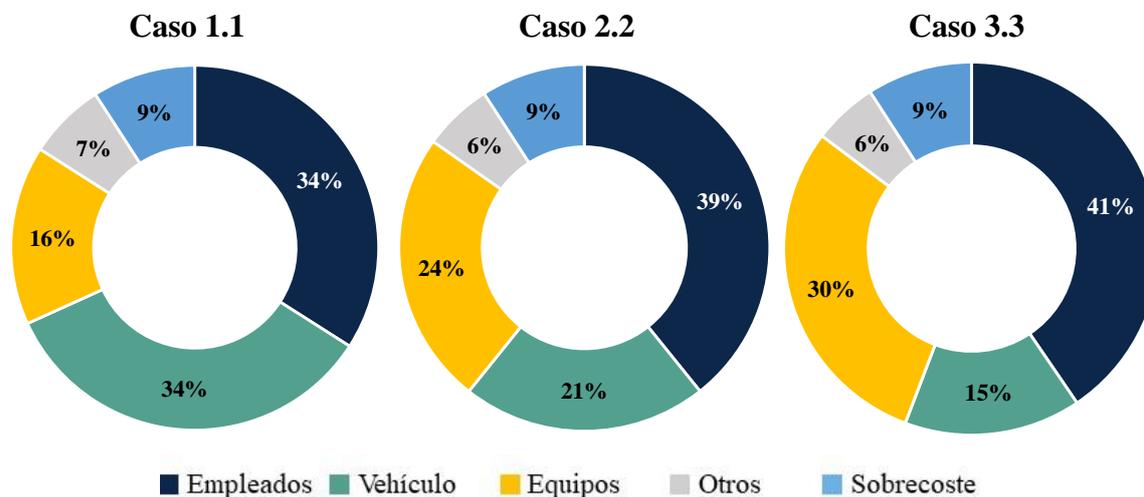


Ilustración 0.2: Distribución de costes del proceso para los distintos casos propuestos, para una densidad de población de 2000 habitantes/muestra [Fuente: propia]

Por último, se incluye un gráfico que determina a la OUR el tiempo de duración del proceso en función del número total de muestras, individuos y vehículos deseado para el proceso.

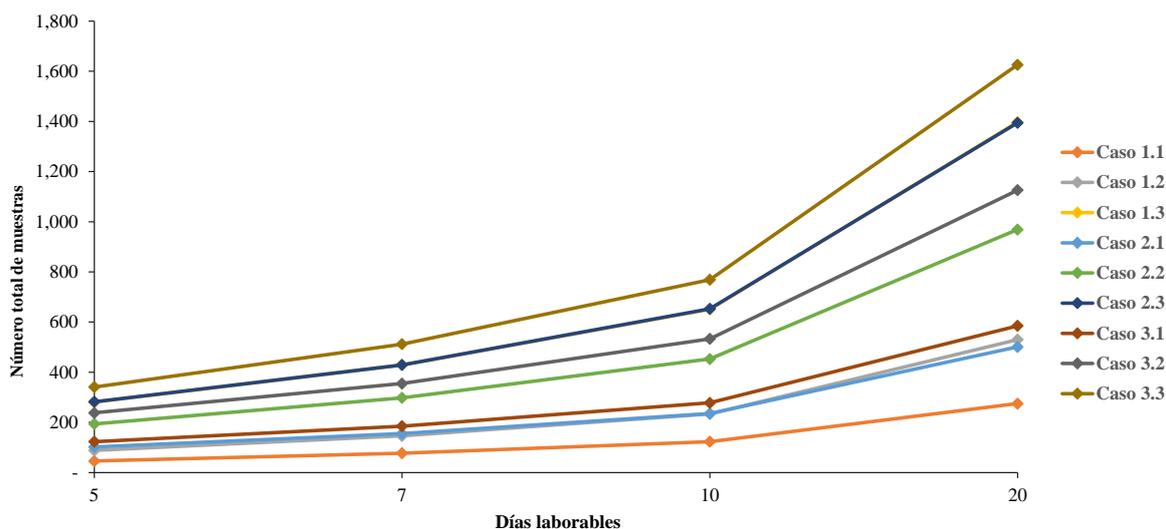


Ilustración 0.3: Número máximo de muestras totales para cubrir el territorio en función de los días laborables objetivo [Fuente: propia]

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas tras la realización del presente proyecto son:

- La determinación de la ruta más óptima supone un punto de partida para la OUR para poder dimensionar su proceso en base a los requisitos de redundancia de la toma de datos, así como el tiempo deseado para llevar a cabo el proceso.
- La solución aplicable a la OUR adopta un enfoque abierto para el regulador, en el que se deja a su elección la elección final de la solución (número de muestras de medición, número de individuos y/o vehículos) para llevar a cabo el proceso en base a sus requisitos.
- A la vista de los resultados, un mayor número de muestras de medición implica el incremento del total de costes y tiempo de duración del proceso.
- Aumentar el número de individuos y el número de vehículos no tiene la misma incidencia en los resultados al existir partidas de costes distribuibles y otras no.
- Tiene una mayor repercusión para la OUR, en términos de reducción de tiempo y coste, incrementar el número de individuos por vehículo que el número de vehículos, al ser la toma de datos en las capitales de provincia la actividad crítica del proceso.

Design of a quality-of-service monitoring process in telecommunications networks for regulatory bodies.

Author: Vilana García-Ovies, Ignacio

Director: Andrés Azcoitia, Santiago

Collaborating institution: ICAI – Universidad Pontificia Comillas / Axon Partners Group

Project summary.

1. INTRODUCTION

In a context where the world is increasingly globalized, telecommunications sector was already important, but it is becoming key for society due to Covid19, increasing the use of existing telecommunications networks. This increase in the traffic, as well as the technological development of the sector, provoke a constant need for renovation and expansion of the existing infrastructure and capacity.

In this sense, telecommunications regulator of each country tries to ensure the proper and sustainable development of the network, covering the current and future necessities of the end-user, while avoiding anti-competitive practices of operators with significant market power, who own most part of the existing network infrastructure which represents the greatest cost for a new entrant, creating huge entry barriers. In this context, quality of service comes into play, in which the performance of the services offered by an operator is evaluated by measuring certain parameters (e.g., coverage, speeds, latency, reconnection time after outage, etc.) and comparing them with the regulation in force in the particular country.

In this project, the dimensioning of a process for monitoring service quality parameters for the Jamaican regulatory body, *The Office of Utilities Office Regulation (OUR)*, is conducted. In the sizing, an optimisation of the route that the measurement team must follow is

conducted with the objective of minimising the costs of the process and maximising the use of the available resources.

2. DEVELOPMENT

The main steps that have been conducted for the realisation of this project have been:

- a) Investigation of the current situation of the telecommunications sector in terms of quality-of-service regulation.
- b) Search for international reference practices in monitoring processes of quality-of-service parameters, to see possible applications to the dimensioning for the OUR.
- c) Collection of input data related to Jamaica for the characterisation of the process.
- d) Choice of route optimisation methodology, tailoring the algorithm to the characteristics of the problem.
- e) Adaptation of the input data to be subsequently used in the optimisation model.
- f) Implementation of the Vehicle Routing Problem optimisation algorithm and validation of the results obtained.
- g) Dimensioning of the necessary resources and calculation of their cost for the OUR.
- h) Graphical representation of the results obtained, and elaboration of the conclusions derived from them.

Each of the above steps is described in more detail throughout the content of the project.

3. RESULTS

The main results obtained after running the optimisation model are shown below. These include the most representative illustrations in order to understand the results obtained and the final dimensioning of the process.

The resulting routes after solving the optimisation are shown as follows:

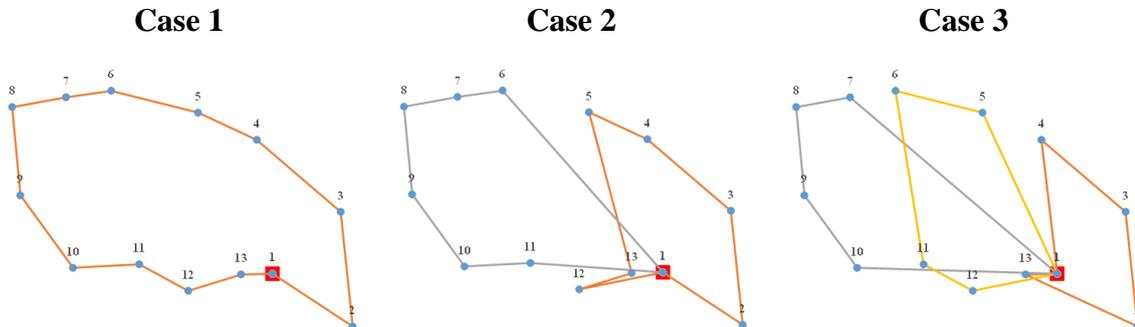


Exhibit 0.1: Results of the optimisation of the route between provincial capitals [Source: own]

Each of the points in Exhibit 0.1 represent the provincial capitals where the measurements are conducted. The difference between each of the cases lies in the number of vehicles arranged by the OUR to travel the proposed set of points, obtaining different routes depending on this parameter.

In the sizing of the process, nine different cases are considered, with the OUR being able to choose between one to three vehicles, and one to three individuals per vehicle. The total times obtained for each one of the cases are:

Category	Case 1.1	Case 1.2	Case 1.3	Case 2.1	Case 2.2	Case 2.3	Case 3.1	Case 3.2	Case 3.3
Total time [h]	944.9	498.1	350.7	566.2	298.6	210.4	514.0	271.1	190.9
Working days	118	62	43	70	37	26	64	33	23

Table 0.1: Total process times for each of the cases considered, for a population density of 2000 inhabitants/sample. [Source: own]

The costs distribution for the cases of one vehicle-one individual (case 1.1), two vehicles-two individuals per vehicle (case 2.2), and three vehicles-three individuals per vehicle (case 3.3), are shown below:

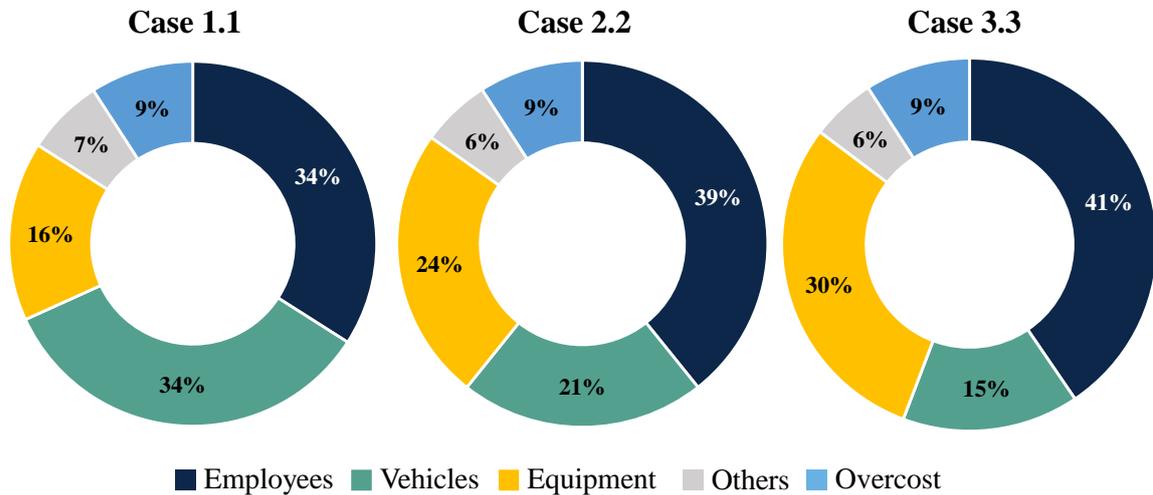


Exhibit 0.2: Distribution of process costs for the different cases proposed, for a population density of 2000 inhabitants/sample. [Source: own]

Finally, an exhibit is included that determines to the OUR the time duration of the process as a function of the total number of samples, individuals and vehicles desired for the process.

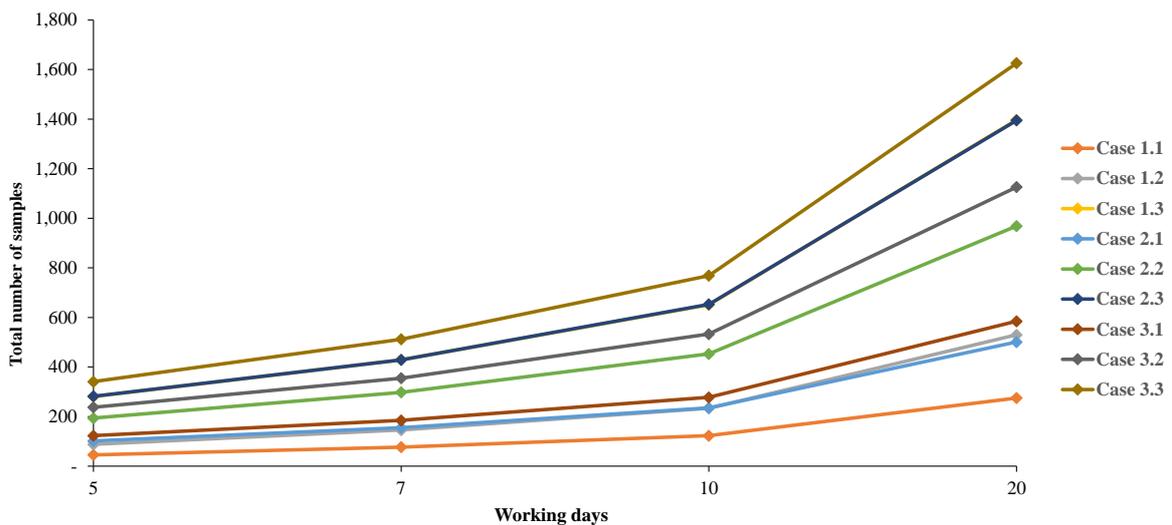


Exhibit 0.3: Maximum number of total samples to cover the territory based on target working days [Source: own]

4. CONCLUSIONS

The conclusions drawn from this project are as follows:

- The determination of the most optimal route provides a starting point for the OUR to size its process based on the redundancy requirements of the data collection as well as the desired time to conduct the process.
- The solution applicable to the OUR adopts an open approach for the regulator, where the final choice of the solution (number of measurement samples, number of individuals and/or vehicles) to conduct the process based on its requirements is left to the regulator.
- In view of the results, a higher number of measurement samples implies an increase of the total costs and time duration of the process.
- Increasing the number of individuals and the number of vehicles does not have the same impact on the results as there are distributable and non-distributable cost items.
- Increasing the number of individuals per vehicle has a greater impact on the OUR in terms of time and cost reduction than increasing the number of vehicles, as data collection in provincial capitals is the critical activity of the process.

Índice

Capítulo 1. Introducción y planteamiento del proyecto	13
1.1 Sector de las telecomunicaciones	13
1.2 Calidad de servicio (QoS)	17
1.3 Situación de la calidad de servicio en Jamaica.....	20
1.4 Investigación de operaciones.....	23
1.5 Planteamiento del proyecto	25
Objetivos.....	25
Metodología.....	26
Capítulo 2. Descripciones.....	29
2.1 Descripción del proceso	29
2.2 Descripción de las tecnologías	35
Comparación de tecnologías.....	41
Capítulo 3. Descripción del modelo desarrollado.....	44
3.1 Objetivos y especificación.....	44
3.2 Datos.....	46
Datos para la optimización de rutas entre capitales de provincia.....	46
Datos para optimizar la ruta entre muestras para la ciudad de Kingston.....	51
Precios para el cálculo de costes de los recursos	53
3.3 Algoritmos.....	55
3.4 Implantación numérica	59
Optimización de la ruta entre capitales de provincia	59
Optimización de la ruta entre muestras de la ciudad de Kingston.....	64
Cálculo de tiempo de muestreo por capitales de provincia	68
Atribución de tiempo total para las distintas soluciones	70
Capítulo 4. Análisis de resultados	74
4.1 Resultados del caso base	74
4.2 Análisis de sensibilidad.....	80
Capítulo 5. Conclusiones.....	84
5.1 Conclusiones sobre la metodología.....	84
5.2 Conclusiones sobre resultados.....	85

5.3	Recomendaciones para futuros estudios.....	86
Capítulo 6.	<i>Bibliografía.....</i>	88
Anexo A.	<i>Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....</i>	92
Anexo B.	<i>Código de la herramienta de Google API Distance Matrix.....</i>	94
Anexo C.	<i>Tabla resultante de distancias y tiempo entre capitales de provincia de Jamaica</i>	95

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

En esta sección se procede a introducir los aspectos clave para la comprensión de la temática del proyecto. Estas introducciones incluyen definiciones generales, así como también una descripción de la situación actual, así como el planteamiento del proyecto. Las subsecciones en las que se dividen las temáticas son las siguientes:

- **Sector de las telecomunicaciones**
- **Calidad de servicio (QoS)**
- **Situación de la calidad de servicio en Jamaica**
- **Investigación de operaciones**
- **Planteamiento del proyecto**

A continuación, se detallan cada una de las subsecciones:

1.1 SECTOR DE LAS TELECOMUNICACIONES

En el mundo se llevan a cabo miles y miles de actividades que se realizan para que cada uno de los implicados en la cadena de funcionamiento del mundo en general cumplan con su función. Toda actividad requiere de un proceso, mediante el cual se definen los pasos a seguir para la consecución del objetivo final. En el caso de los servicios de telecomunicaciones, para comprobar la calidad del servicio que se proporciona, es necesaria la medición de ciertos parámetros para evaluar el funcionamiento del propio servicio y la propia red.

Al observar los distintos sectores en los que se compone la actividad mundial, en muchos de ellos sí es posible identificar de forma clara y evidente el conjunto de conceptos asociados a tales sectores, sin embargo, el sector de las telecomunicaciones se encuentra inmerso en uno de los campos más dinámicos de la sociedad actual, en donde las comunicaciones y el intercambio de información, en todos sus medios digitales posibles, cobra cada vez mayor importancia. Prueba de ello, dando soporte a la creciente presencia e importancia de las actividades del sector en la vida cotidiana, se puede apreciar en su mejor desempeño durante

el periodo de pandemia, en el cual la pérdida de rendimiento de las empresas de telecomunicaciones fue aproximadamente del 20%, por un 31% del índice S&P 500 [1]. Si bien es cierto fue un punto de inflexión en muchos aspectos, la pandemia no es el único motivo del crecimiento e importancia del sector de las telecomunicaciones, siendo otros factores determinantes: la aparición de nuevas tecnologías, las tendencias actuales económicas y sociales, y los cambios regulatorios [2]. Estos factores son los causantes de la expansión del sector, provocando que este constituya uno de los soportes básico de la sociedad, no solo en el futuro sino también en la actualidad.

Respecto al primer factor, en cualquier actividad económica de la actualidad, el papel de la información juega cada vez un rol más importante, teniéndose en cuenta como un factor de producción adicional. Además, la internacionalización de la economía implica un mayor número de agentes económicos involucrados, provocando una gran dependencia de las actividades empresariales a los servicios de telecomunicaciones, debido a la mayor complejidad de los procesos, no solo en términos de ejecución (en busca de eficiencia) sino también a niveles de información y comunicación necesarios, lo que permite potenciar la competitividad de las empresas.

Por otro lado, se presentan las nuevas tecnologías, en las que factores como la microelectrónica, reduciendo costos, tamaño y consumo energético, la digitalización, logrando transmitir y recibir mayores cantidades de información, mejorando a la vez la calidad y reduciendo tiempos de espera, y los nuevos equipos de transmisión, como fibra óptica, satélites y radio, han permitido mejorar de forma considerable las prestaciones de las redes de comunicación. De forma conjunta, los factores mencionados han permitido el aumento de la inteligencia de las redes y sus equipos, mejorando con ello la capacidad de gestión, la optimización de recursos, y la posibilidad de proporcionar nuevos servicios.

Por último, el desbloqueo en la rigidez regulatoria establecida años atrás, en la que la industria se encontraba formada principalmente por monopolios, en los que en muchos casos una misma organización abarcaba el provisionamiento de equipos y servicios, así como la propiedad de la red, provocando un sector con costes marginales decrecientes y la necesidad de economías de escala importantes, por la necesidad de acometer elevadas inversiones

inmobiliarias para proporcionar los servicios. Además, otra restricción con la que cuenta el sector es el cumplimiento estricto del cumplimiento de las leyes del mercado, al ser las telecomunicaciones un sector público básico para el funcionamiento de la sociedad. Sin embargo, esta liberación regulatoria ha provocado un considerable cambio en la tendencia de evolución del sector, pasando de la estabilidad y la introducción de novedades a cuentagotas, a ser un constante cambio en términos de, no solo adaptación de la regulación a tendencias actuales, sino también en innovación del sector, elevando su potencial de crecimiento.

La eliminación de los monopolios, junto con el atractivo de la industria con motivo de los factores descritos, está permitiendo la entrada de nuevos agentes relacionados con la provisión del servicio de telecomunicaciones, ya sea como operadores de red, proveedores de servicios y/o equipamiento técnico.

Analizando la competencia en un sector, a partir de las fuerzas definidas por M. Porter [3], se encuentran normalmente cinco fuerzas, sin embargo, en el sector de las telecomunicaciones, estas se podrían ampliar a siete, siendo:

- Amenaza de nuevos competidores
- Poder de negociación de los clientes
- Poder negociador de la industria de equipos y proveedores de servicios
- Amenaza de productos sustitutivos
- Grado de diversidad y competencia interna
- Presión reguladora
- Características globales

Sin entrar en detalle en la definición de cada una de ellas, formulando la pregunta sobre cuál puede ser el factor diferenciador, implicando al mayor número de fuerzas posible, en el sector de las telecomunicaciones, se podría sacar como respuesta, la calidad del servicio [4]. Sin ser el objetivo principal establecer el nivel de competencia en el sector, se fundamenta la diferenciación de la calidad de servicio analizando la relación (alta, media o baja), desde

un punto de vista estratégico [5] más cercano al operador o proveedor del servicio, con cada una de las fuerzas de Porter mostrada en la siguiente tabla:

Fuerza de Porter	Relación con Calidad de servicio
Amenaza nuevos competidores	Alta: la calidad del servicio ya existente en el mercado marca el grado de complejidad de entrada en el sector. Calidades altas implicarán una mayor inversión y una más estrategia más sofisticada para alcanzar el nivel requerido.
Poder negociación clientes	Alta: el grado de satisfacción con la calidad del servicio proporcionado marca la posibilidad de permanencia de los clientes. Si bien es cierto hay parámetros que pueden ser imperceptibles para los usuarios, en casos de por ejemplo bajas velocidades o poca cobertura, puede implicar la fuga del usuario a otro proveedor de servicio con facilidad.
Poder negociador equipos/servicios	Alta: la evolución de los equipos y la mejora de las prestaciones facilita la posibilidad de cumplir con los estándares de calidad de servicio establecidos, ofreciendo a los proveedores de servicios un potencial mejor posicionamiento en el sector.
Amenaza de productos sustitutivos	Media: si bien un nuevo servicio/producto puede mejorar la calidad, es un aspecto más clave de las tecnologías utilizadas, ya que por mucho que sea un servicio nuevo, la red en la que opera tal es la misma.
Diversidad/competencia interna	Media: la calidad del servicio proporcionada es uno de los elementos más importantes para los usuarios [4], lo que su nivel implica en un mayor o menos posicionamiento en el mercado por parte de los proveedores de servicios.
Presión reguladora	Alta: en los países en los que existe una regulación explícita de la calidad de servicio, los proveedores de servicios se ven sometidos a una presión reguladora en términos de cumplimiento con los parámetros, exigiendo un nivel mínimo de calidad en el servicio proporcionado.

Fuerza de Porter	Relación con Calidad de servicio
Características globales	Baja: la calidad de servicio es un elemento de elevada complejidad en términos de comparación internacional, al haber grandes diferencias en términos de infraestructura de red desarrollada, lo que implica no ser considerado un elemento clave a nivel global.

Tabla 1.1: Relación de las fuerzas de Porter con la calidad del servicio [Fuente: propia]

La comparación de relaciones de la tabla superior permite afirmar que el grado de repercusión de la calidad de servicio, desde un punto de vista más enfocado a los proveedores de servicio y usuarios, es decir, a la provisión del servicio, es elevada. La alta relación con la mayoría de las fuerzas de Porter (4/7) implica que la calidad del servicio se vea involucrada en la competencia en el sector, siendo un claro factor diferenciador.

En la siguiente sección, se incide en mayor profundidad al concepto de la calidad de servicio, y su relación con el sector de las telecomunicaciones:

1.2 CALIDAD DE SERVICIO (QoS)

La calidad del servicio (en adelante “QoS”), como se ha comentado en el apartado anterior, puede ser un diferenciador clave en el mercado de las telecomunicaciones. En esencia, la QoS es la capacidad de una red para ofrecer un servicio específico al usuario con una calidad determinada. Abarca toda la gama de características desde un servicio de telecomunicaciones o las mismas redes empleadas, que influyen en su capacidad para satisfacer las necesidades declaradas e implícitas del usuario del servicio. Se supone que el conjunto de características, supervisadas a través de varios indicadores clave de rendimiento (KPI), son medibles o al menos observables, como los retrasos en la señalización de las llamadas, la pérdida de paquetes cuando las redes están congestionadas o las llamadas interrumpidas antes de la finalización normal por parte del usuario.

La calidad de servicio, tal y como la percibe el usuario final, es un factor crucial tanto para los clientes como para los proveedores de servicios, al emplearse la monitorización para medir la propia calidad, como también ayudar en la planificación de sus redes. Para

profundizar algo más sobre la definición de calidad de servicio, con el soporte del párrafo anterior, se incluye a continuación un esquema ilustrativo sobre la calidad de servicio:

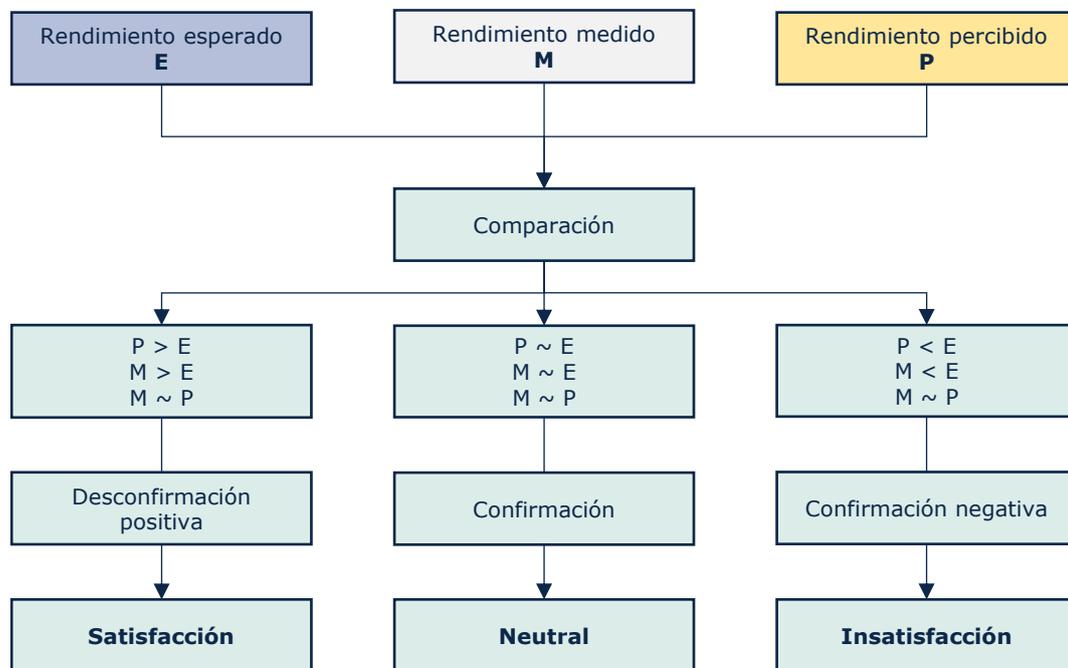


Ilustración 1.1: Esquema ilustrativo de la definición de calidad de servicio [Fuente: propia, a partir de [6]]

Observando la tabla superior, se puede resumir la calidad del servicio en una comparación mediante la diferencia entre las expectativas vs la percepción. Si bien la calidad se puede extender en todos los niveles que engloban una comunicación, en el servicio se focaliza en los dispositivos o usuarios finales (*end-to-end*). Pudiendo tomar el criterio de calidad dos enfoques distintos, en dispositivos finales o en los usuarios, si se pone el foco en el segundo, se debe reconocer que los requisitos son de utilidad, pero a la vez muy subjetivos. Un usuario puede juzgar el servicio en base a la localización, la conectividad o los medios de acceso, como también el poder computacional de su puesto de trabajo. Por ese motivo, es competencia de los operadores o prestadores de servicios conseguir la objetividad de la calidad, adecuando su estrategia para poder proporcionar un servicio igualitario en todo el territorio, siempre teniendo en cuenta las limitaciones que ofrece la red. Sin embargo, enfocando la medición desde un punto de vista más técnico, en el dispositivo final, te permite establecer un criterio subjetivo sobre la calidad, definiendo una serie de parámetros categorizados en categorías en las que los usuarios acaban valorando el servicio:



Ilustración 1.2: Categorías de parámetros de calidad de servicio [Fuente: propia, a partir de [6]]

Estas categorías representan los elementos más clave, a nivel general, a partir de las cuales un usuario final valora un servicio, donde se encuentran por ejemplo la cobertura, la velocidad de conexión, atención al cliente, disponibilidad del servicio o los cortes de red, entre muchos otros ejemplos. Aunque las mediciones se focalizan en el dispositivo final, aquel con el que el usuario va a estar en contacto, la calidad del servicio puede verse afectada por muchos factores a nivel de red y a lo largo de la cadena de valor, incluyendo el dispositivo, el hardware, la infraestructura, los servicios y las aplicaciones.

Debido a la implicación de los distintos niveles de la red, medir correctamente las métricas específicas en cada nivel se convierte en una actividad crucial en el panorama de las telecomunicaciones. Por ello, los organismos reguladores de todo el mundo suelen medir o exigir a los operadores de telecomunicaciones que midan la calidad de servicio [7], ya que son los proveedores finales de los servicios a los usuarios, especialmente en mercados inmaduros y poco competitivos, donde el poder de negociación de los usuarios a cambiar de operador es bajo, por el hecho de las pocas opciones disponibles que ofrecen este tipo de mercados.

Para limitar el poder de los operadores en la prestación de servicios, y evitar que sean ellos mismos quienes impongan el nivel de calidad al mercado, muchos organismos reguladores, por lo general tras una serie de consultas públicas, introducen regímenes de control de la calidad del servicio en su país. Estas arquitecturas suelen introducir conjuntos de indicadores

para diferentes servicios, en función del ámbito de la regulación, las definiciones, las pautas de medición y los niveles de calidad esperados, con dos objetivos principales: en primer lugar, facilitar el progreso hacia la mejora de los servicios para maximizar las buenas experiencias subjetivas de los usuarios; y en segundo lugar, potenciar la competencia entre los operadores para promover una mejora sostenida de la calidad [8].

El uso de la gestión de la calidad del servicio y de las políticas regulatorias para limitar la congestión y mejorar la calidad del servicio es, por tanto, una necesidad en las actuales sociedades altamente conectadas [9]. En los mercados maduros, donde las estrategias basadas en el precio y el valor son menos eficaces, la calidad del servicio puede resultar un elemento diferenciador clave. Por ejemplo, las aplicaciones en tiempo real con gran demanda en el mercado, como las videoconferencias y los juegos en línea, son sensibles a los retrasos y las fluctuaciones, por lo que disponer de mecanismos de supervisión que sienten las bases para garantizar su calidad es esencial para el bienestar de los usuarios.

En la siguiente sección se procede a detallar el sector de las telecomunicaciones en Jamaica, y la situación actual con respecto a la calidad de servicio:

1.3 SITUACIÓN DE LA CALIDAD DE SERVICIO EN JAMAICA

Respecto a la situación actual del mercado de las telecomunicaciones en Jamaica, actualmente existe un organismo, conocido como *The Office of Utilities Office Regulation* (en adelante la “OUR”), el cual regula los sectores de telecomunicaciones, electricidad y agua. En el primer caso, el sector es regulado en base al *Telecommunications Act* [10], el cual sienta las bases de la regulación en las que debe sustentarse la estrategia de la OUR en dicho sector.

Con relación a la calidad del servicio, y su origen en la regulación, la sección 4 (5)(b) del *Office of Utilities Regulation Act* da poder a la OUR a “*prescribe standards for the measurements of quantity, quality or other conditions relating to prescribed utility services*”, en los sectores de agua y electricidad, estableciendo estándares en ambos servicios. En el caso de las telecomunicaciones, la sección 44 (3) del [10] indica que” *the Office may make*

rules subject to affirmative resolution prescribing quality standards for the provision of specified services in relation to all service providers or dominant service providers, as the case may be”. La OUR es consciente de los cambios que ocurren en el sector de las telecomunicaciones, los cuales permiten a los usuarios cambiar de operador si fuera necesario en caso de insatisfacción, a cambio de un coste. Sin embargo, uno de los roles de la OUR es incentivar el interés hacia los consumidores, lo que lleva al gran objetivo con relación al ejercicio de establecer una regulación de calidad de servicio. Este objetivo se basa en asegurar que la información proporcionada a los usuarios finales por parte de los operadores se encuentra actualizada, clara, precisa y consistente con las prácticas locales e internacionales. De esta forma, la OUR proporciona una mayor visibilidad y conocimiento sobre las opciones de operadores en el mercado, además de permite saber las expectativas legítimas de los proveedores de servicios [11].

Actualmente, la regulación vigente en Jamaica corresponde a unos estándares establecidos en 2007, concretamente *Quality of Service Standards for the Telecommunications Sector* [11], donde se definen una serie de parámetros sobre los cuales se exige su cumplimiento para garantizar la calidad del servicio proporcionado. Estos parámetros se encuentran desglosados en categorías por servicio: telefonía fija, telefonía móvil/inalámbrica, y proveedores de servicios de internet.

Para facilitar la comprensión sobre la definición de los estándares, se incluye a continuación una tabla¹ con algunos ejemplos de los parámetros definidos:

Servicio	Parámetro	Estándar propuesto
Telefonía fija	<i>Call completion ratio</i> - This measures the percentage of originating calls successfully completed during peak traffic hour and reflects the degree of congestion in the network. To accurately measure the CCR, a call is deemed successful when a connection is established irrespective of whether the called party answers the phone.	A 95% call completion success rate is proposed for local calls during normal Peak Traffic A 75% call completion success rate is proposed for international calls during normal peak traffic
Telefonía móvil/inalámbrica	<i>Network availability/coverage</i> - This occurs when a subscriber tries to gain access to the network but is denied service due to poor coverage which is expressed by low signal levels.	>90% access within the given access specification.
Internet	<i>Service disruption</i> - The number of incidents in a 30-day period where the service to 50 or more customers located in the same area is disrupted.	< 3 such incidents within a 30-day period

Tabla 1.2: Parámetros y estándares propuestos para los distintos servicios [Fuente: propia, a partir de [11]]

¹ Nota: los parámetros y el estándar propuesto se incluyen en inglés (el idioma del documento) para evitar interpretaciones erróneas.

Por otro lado, reflejando los datos del país relacionados con las telecomunicaciones, Jamaica cuenta con una población de 2.973.462 habitantes², mientras los datos de suscripciones³ se muestran en la siguiente tabla:

Servicio	# de suscripciones 2021 (hab.)	Crecimiento anual (%)	Penetración de mercado (%)
Telefonía fija	473.620	6,8%	15,9%
Telefonía móvil	2.905.410	2,1%	97,7%
Internet	2.151.680	1,3%	72,4%

Tabla 1.3: Número de suscripciones de los servicios de telecomunicaciones [Fuente: propia, a partir de datos de informes de la OUR]

La información recopilada del sector indica la alineación de las telecomunicaciones en las prácticas internacionales, con un mayor uso de la telefonía móvil e internet. Sin embargo, aun siendo la telefonía fija apenas utilizada en la sociedad, su crecimiento en el 2021 supone una mejora considerable respecto a los demás servicios.

1.4 INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

Con motivo de la revolución industrial, el mundo ha sido testigo de un cambio considerable en las organizaciones principalmente en dos factores, el tamaño y su complejidad. Estos dos factores han incidido en una parte esencial del cambio revolucionario la cual resultó en el gran aumento de la división del trabajo y la separación de responsabilidades administrativas de dichas organizaciones. Sin embargo, si bien este cambio ha traído consigo numerosos beneficios, el aumento de la complejidad y la especialización provoca la mayor dificultad a la asignación de recursos a diferentes actividades de una manera eficaz y eficiente a la organización como conjunto. Este tipo de problemas y la necesidad de búsqueda de

² Fuente: The World Bank, enlace: <https://data.worldbank.org/indicador/SP.POP.TOTL?locations=JM>

³ Fuente: OUR, enlace: <https://our.org.jm/wp-content/uploads/2022/06/Telecoms-Market-Information-Report-October-December-2021.pdf>

soluciones crearon el ambiente propicio para el surgimiento de la investigación de operaciones (en adelante “IO”).

Como su nombre indica, el objetivo de la IO es investigar sobre las operaciones desde una problemática relacionada con la ejecución y coordinación de actividades de una organización, aplicable en una extensa variedad de sectores, como por ejemplo telecomunicaciones, transporte, manufactura, cuidado de la salud, fuerzas armadas, etc. El término investigación se incluye al utilizar un enfoque muy similar al método científico, el cual da comienzo con la formulación del problema y la posterior toma de datos pertinentes, para seguidamente construir el modelo científico, llevando a cabo un conjunto de cálculos hasta llegar a la solución óptima, en base a criterios establecidos para el problema. A nivel del conjunto de etapas que se llevan a cabo un problema de IO, se podrían destacar las siguientes:

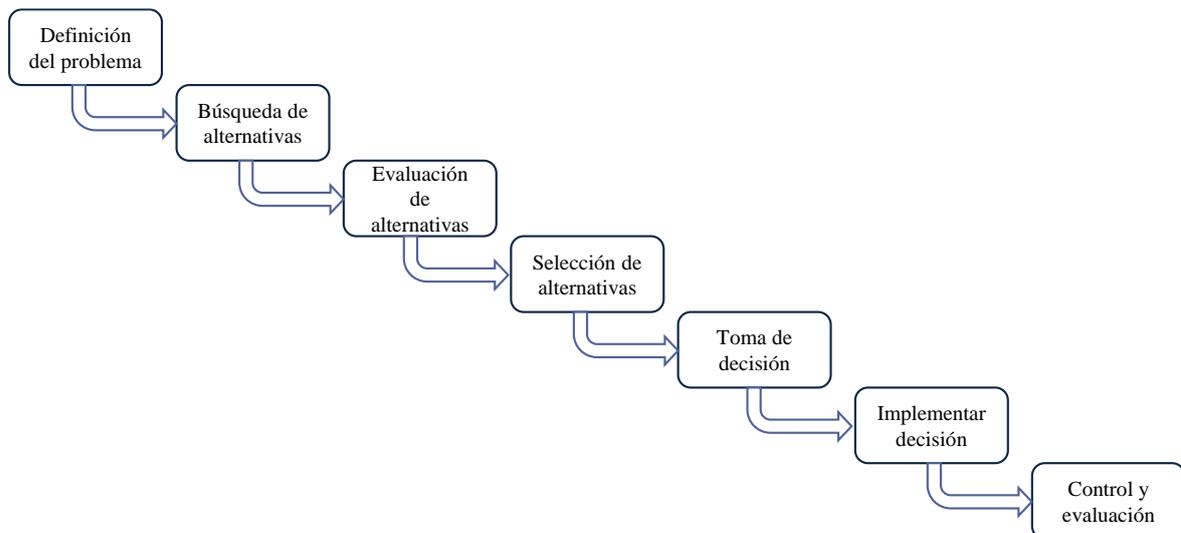


Ilustración 1.3: Diagrama de etapas de un problema de investigación operativa [Fuente: propia, a partir de [12]]

El conjunto de etapas de un problema de IO requiere que sea necesario emplear un enfoque de equipo [13], en el cual se incluyan expertos de varias temáticas con diversos antecedentes y aptitudes para ser capaces de abordar todas las ramificaciones del problema dentro de la organización. La aparición de la IO ha contribuido a que numerosos países incrementen de forma considerable la productividad de sus economías. Hoy en día, más de 30 países son

miembros de la *International Federation of Operational Research Societies* (IFORS), adicionalmente con sociedades de investigación de operaciones individuales cada uno ellos.

Dentro de la posibilidad de soluciones que ofrece la IO, se encuentra un abanico inmenso de soluciones aplicables, en función de las características que presenta el problema planteado. En el presente proyecto, la temática del problema a resolver se basa en un modelo de redes [14]. La red se compone de un conjunto de nudos, los cuales se encuentran unidos por arcos (o ramas).

A continuación, se presenta un ejemplo ilustrativo:

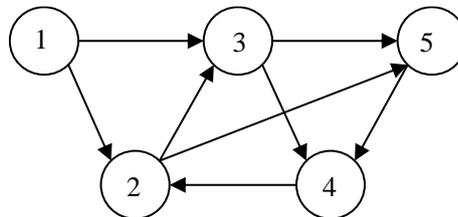


Ilustración 1.4: Ejemplo de red considerado para el modelo de redes [Fuente: propia]

Para cada red considerada en el modelo, existe un flujo que representa el movimiento de un nodo a otro, pudiendo ser este infinito o finito, en caso de contar el sistema con restricciones de capacidad. Por otro lado, la ruta conforma el conjunto de arcos entre dos nodos distintos, es decir, el conjunto de combinaciones.

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

En la presente subsección se detallan los objetivos, así como la metodología de los pasos que se han llevado a cabo en la realización del proyecto.

Objetivos

Los principales objetivos planteados en la realización del proyecto son los siguientes:

- **Adquirir conocimiento funcional sobre el proceso de monitoreo de parámetros QoS:** a nivel general, se pretende adquirir una base sólida sobre el funcionamiento del mundo de las telecomunicaciones y su aplicación al proceso de monitoreo,

identificando los implicados en el proceso (p. ej., organismos reguladores, operadores, gobiernos, suministradores de equipos tecnológicos, etc.) así como el rol de cada uno y el papel de la regulación en el diseño de un proceso de tales características.

- **Ser capaz de seleccionar los parámetros más relevantes para el diseño del proceso, como por ejemplo la localización y el número de muestras y los respectivos recursos necesarios:** para el diseño y dimensionamiento de un proceso de monitoreo, son necesarios varios recursos con tal de su definición. Este objetivo se basa en el conocimiento de los diferentes recursos en los que se fundamenta el proceso, aprendiendo a su selección a partir de un criterio en función de ciertos elementos de entrada (p. ej., parámetros establecidos, valores, tecnologías e infraestructuras disponibles, normativa vigente, etc.) así como calcular el número y la ubicación de los puntos de medición, para obtener una base de datos lo suficientemente robusta y fiable.
- **Detectar los riesgos de un proceso para evaluar su robustez:** adquirir las herramientas necesarias para identificar si un proceso, ya sea existente o el diseñado propiamente, presenta puntos débiles o puntos de mejora en los que centrarse para valorar sus prestaciones a nivel generalizado.
- **Analizar la viabilidad y rentabilidad de un proceso para el organismo regulador:** una vez el proceso se encuentra diseñado, evaluar los costes asociados a este y su viabilidad para el organismo regulador, así como en la región de aplicación del monitoreo de parámetros.

Metodología

Siguiendo con la introducción de la investigación de la sección 1.4, el presente proyecto presenta un problema de IO, en el cual se desea llevar una optimización de la ruta de los equipos de la OUR en la toma de datos para el posterior cálculo de parámetros de calidad de

servicio. En este caso, el modelo de redes considerado está formado por el conjunto de capitales de provincia de Jamaica⁴.

Para la resolución del problema del diseño de un proceso de monitoreo, se han planificado ciertas fases del proyecto con el objetivo de: recopilar información sobre el funcionamiento del proceso y los insumos necesarios para su correcta definición, analizar y diseñar dicho proceso de recopilación de datos, calcular los costes asociados a las distintas etapas del proceso en base a los recursos necesarios, y finalmente realizar un balance general del proceso diseñado, analizando la robustez de la optimización del proceso propuesto.

Los pasos detallados en la elaboración del proyecto serían los siguientes:

- Diseño y organización del proceso de monitorización.
- Identificación de los agentes que intervienen en la toma de medidas.
- Diseño del proceso de muestreo de recopilación de datos, estableciendo el número de localizaciones y rutas respectivas, y las tecnologías disponibles para ello.
- Modelado en *BPMN 2.0* de los procesos de monitorización.
- Análisis posterior del proceso propuesto [15].
- Cálculo y dimensionado de los recursos necesarios.
- Cálculo del coste para el organismo regulador, incluyendo los equipos y la mano de obra de acuerdo con el diseño realizado del proceso.
- Análisis de riesgos del proceso [16].

Siguiendo con la metodología brevemente detallada en el apartado anterior, los recursos que se han empleado en la implantación de la metodología propuesta son:

- Documentación sobre el sector de las telecomunicaciones, el papel de los organismos reguladores, estándares de calidad de servicio, reglamentación de calidad de servicio en diferentes países.

⁴ Nota: la metodología detallada del proceso de cálculo de la optimización se encuentra en el Capítulo 3.

- Documentación sobre soluciones disponibles en el mercado para el monitoreo de la calidad del servicio.
- Modelo de fuerzas de Michael Porter [5] para valorar la relación de la calidad del servicio en el sector de las telecomunicaciones.
- Programa *BPMN 2.0* para el diseño del proceso de monitoreo [17].
- *Google Earth* para la propuesta de localizaciones y rutas en el proceso de recopilación de datos de los parámetros de calidad de servicio.
- Herramienta de Google *API Distance Matrix* [18] para determinar la distancia y tiempo entre ubicaciones.
- *OpenSolver* [19] para la ejecución del algoritmo de optimización en *Excel*.
- *Excel* para determinar el cálculo de costes de los recursos.

Capítulo 2. DESCRIPCIONES

En dicha sección se procede a describir aspectos clave a considerar para una mayor comprensión de la temática del proyecto. Las descripciones se desglosan en las siguientes subsecciones:

- **Descripción del proceso**
- **Descripción de las tecnologías**

Las subsecciones se detallan a continuación:

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Actualmente, los procesos de monitoreo de parámetros de calidad de servicio son más bien una caja negra, en la que muchos parámetros tratan de información confidencial de los operadores, o bien organizaciones, con el fin de evitar su filtración a la competencia, poniéndose en una posición desfavorable. Sí bien es cierto se puede saber qué tecnología se emplea, a partir de las empresas seleccionadas para desarrollar el servicio de monitoreo en la zona correspondiente, así como los parámetros y sus objetivos, a partir de la regulación vigente que exige el cumplimiento de prestaciones de los servicios, muchos otros son desconocidos. Las ubicaciones de los puntos y su respectiva metodología para la recopilación de información son generalmente desconocidas a nivel público, así como las rutas y recursos necesarios para asegurar el monitoreo de una región completa.

En algunos casos, en países con una infraestructura actualizada a las últimas tecnologías en términos de redes de telecomunicaciones, no se monitorean los parámetros de calidad de servicio, al darse estos por supuesto en términos de cumplimiento de la eficiencia de las redes, ya que, de lo contrario, los operadores estarían en una posición de desventaja entre los competidores, perdiendo una cuota de mercado significativa al ofrecer un servicio insatisfactorio para los usuarios finales. En el caso contrario, en países con una infraestructura de telecomunicaciones menos desarrollada, monitorear los parámetros de calidad de servicio permite a los reguladores verificar que los operadores ofrecen un servicio

a los usuarios acorde a las prestaciones prometidas en las ofertas, en términos de velocidades de conexión, latencia, cortes de servicio, cobertura, etc. Adicionalmente, permite también obtener una mayor visibilidad sobre el servicio proporcionado en el país, pudiendo el regulador imponer objetivos más restrictivos para asegurar que el servicio se va actualizando e incrementando sus prestaciones, evitando quedarse estancado en el tiempo y en una situación de inferioridad respecto a países vecinos.

Para comprender el funcionamiento del proceso de monitoreo de parámetros de calidad de servicio, se incluye a continuación un diagrama simplificado del proceso, indicando los implicados, así como las diferentes fases que deben llevarse a cabo en el desarrollo de este, desde la definición de la estrategia hasta la validación de las mediciones llevadas a cabo:

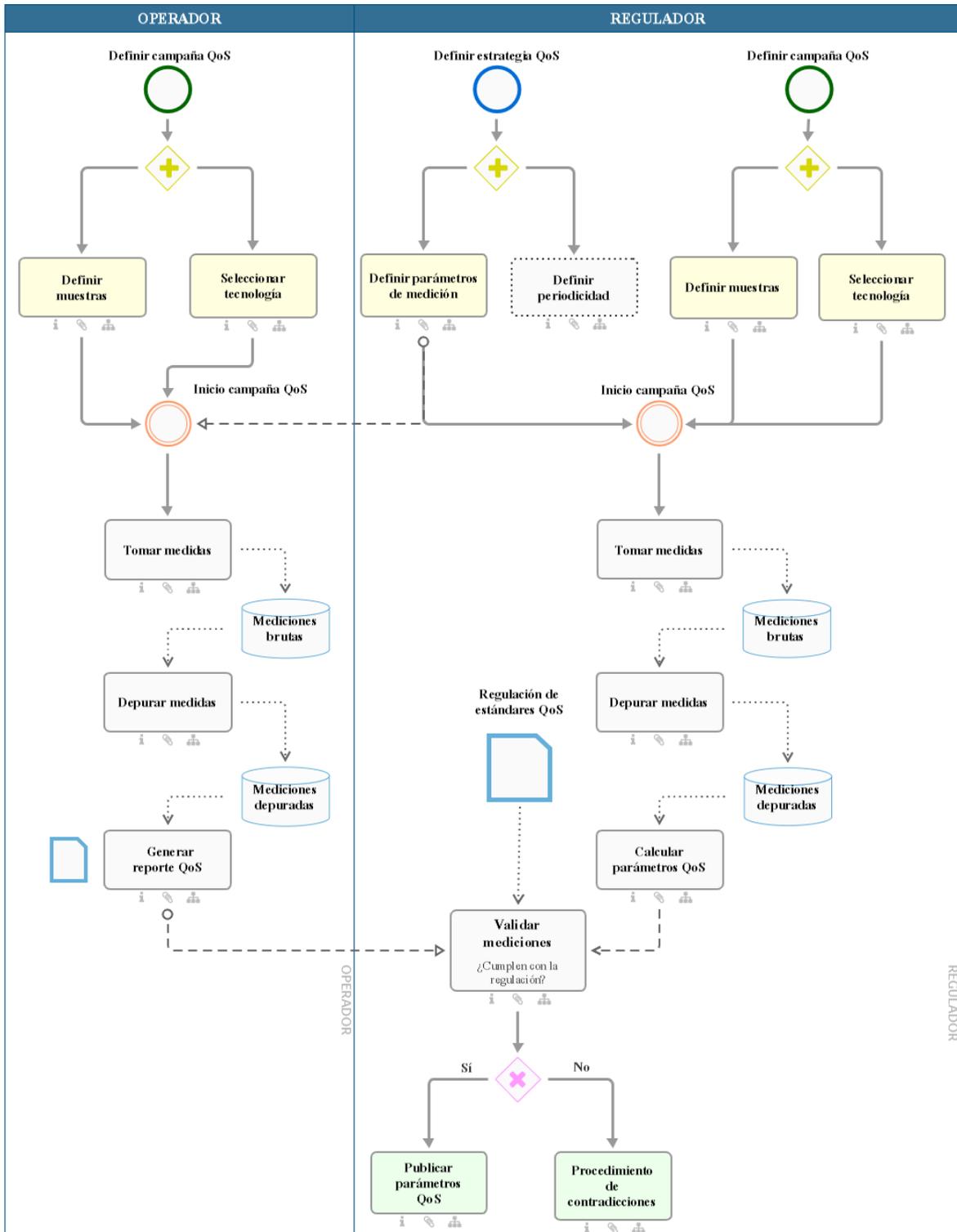


Ilustración 2.1: Diagrama BPMN del proceso de monitoreo de parámetros de calidad de servicio (QoS)

[Fuente: propia, a partir del programa BIC Process Design [20]]

Para la identificación de cada uno de los iconos, se incluye la leyenda a continuación:



Ilustración 2.2: Leyenda de iconos del diagrama BPMN [Fuente: propia]

El diagrama de la Ilustración 2.1 muestra el flujo de las etapas del proceso, en el que se encuentran dos implicados, por un lado, el regulador, cuya función es realizar la medición para comparar los resultados, y por el otro, el operador, el cual proporciona los servicios de telecomunicaciones a los usuarios finales y los parámetros a monitorizar representan el rendimiento actual de este servicio. La diferenciación del conjunto de actividades de cada agente en el proceso corresponde a las dos columnas indicadas en la ilustración: la izquierda corresponde al operador, y la derecha al regulador, en este caso la OUR.

A continuación, se proporciona un mayor detalle de las fases llevadas a cabo en el proceso del regulador. Como primer paso, se incluyen las fases de la etapa de definición de la estrategia de medición de parámetros de calidad de servicio, las cuales los operadores definen las reglas que deben seguir los operadores. Estas son las siguientes:

- **Definir periodicidad:** representa la frecuencia con la que los operadores deben medir los parámetros. Si bien el comportamiento del consumidor es constante durante el año, este factor tiene implicaciones en la estabilidad tanto de los resultados como la calidad del servicio proporcionado. Una frecuencia elevada asegura que el cumplimiento de los parámetros con la regulación no se trata de algo puntual, si no que perdura en el tiempo.
- **Definir parámetros de medición:** representa la selección de los parámetros de los cuales se van a tomar mediciones en la presente campaña de medición. Estos pueden ser los establecidos en la regulación de calidad de servicio, o bien una selección basada en factores, como pueden ser la importancia de estos en los consumidores

finales, la sensibilidad a la demanda o a cambios tecnológicos, o bien aquellos implicados en una estrategia de desarrollo. El operador deberá tomar medidas de los parámetros seleccionados por el regulador, o en caso contrario, de los establecidos en la regulación.

- **Seleccionar tecnología:** representa la tecnología mediante la cual se van a tomar las mediciones de los parámetros. Esta decisión se basa en los parámetros definidos, el área a cubrir o el número de muestras a tomar, la ubicación de las muestras, origen de los datos, tiempo disponible, etc.

Definida la campaña de calidad de servicio, y los factores a tener en cuenta por los operadores (periodicidad y parámetros), se da comienzo, en el momento que el regulador haya definido, de la propia campaña. En esta, llevan a cabo las siguientes fases:

- **Tomar medidas:** etapa en la cual se miden los parámetros, por las rutas determinadas para cubrir las muestras con la/s tecnología/s seleccionadas. Los valores se acumulan en bases de datos para posteriormente ser depurados.
- **Depurar medidas:** como resultado de la etapa anterior, se dispone de un gran número de datos de las mediciones tomadas. Para posteriormente calcular los parámetros de forma precisa, se deben depurar los datos con el fin de eliminar valores atípicos, repeticiones, así como adecuar la información en función de la propia metodología del operador.
- **Calcular parámetros QoS:** con los datos depurados, se calculan los parámetros requeridos con las fórmulas establecidas para cada uno de ellos. Las fórmulas de cálculo se encuentran normalmente definidas en la regulación de calidad de servicio.

Por parte del operador, la definición de la estrategia de medición de los parámetros, partiendo de las reglas establecidas por el regulador, implica las siguientes fases:

- **Definir muestras:** representa cada uno de los puntos en los que se toman mediciones. Se debe asegurar que se cubre toda la región, para corresponder con el rendimiento de toda la red, y no únicamente de un punto concreto. Estas muestras deben basarse en puntos importantes de comunicación (hospitales, zonas

empresariales, servicios públicos, etc.) así como zonas con peor rendimiento, como zonas rurales, de difícil acceso, o de menores prestaciones.

- **Seleccionar tecnología⁵:** en base a los parámetros requeridos, junto al número y características de las muestras a tomar, se seleccionan las tecnologías a emplear para tomar las mediciones. Se deben tener en cuenta varios factores, como por ejemplo el tamaño de las zonas a cubrir, la accesibilidad de estas, distancias entre muestras, tiempo disponible, etc.
- **Definición de ruta:** con las muestras necesarias y las tecnologías disponibles, una práctica eficiente sería optimizar la ruta de mediciones minimizando el tiempo y maximizando el uso de los recursos necesarios.

Definida la estrategia de la campaña de medición, una vez da comienzo por orden del regulador, se llevan a cabo las siguientes fases:

- **Tomar medidas:** ídem a la fase del regulador.
- **Depurar medidas:** ídem a la fase del regulador.
- **Calcular parámetros y generar reporte QoS:** ídem a la fase del regulador. Calculados los parámetros, se genera y se emite al regulador un reporte con los resultados obtenidos.

Calculados los parámetros por ambos implicados en el proceso, tanto el regulador como el operador, se inicia una fase de validación de los parámetros reportados en el reporte de QoS del operador. Por un lado, se comparan los valores de los parámetros obtenidos por el operador y el regulador, para validar que se han obtenido, sin llegar a una exactitud del 100%, valores similares, asegurando unas buenas prácticas por parte del operador en la toma de mediciones, la depuración y el cálculo, evitando distorsiones en los cálculos mediante el uso de técnicas no permitidas. Corroboradas las buenas prácticas del operador para la obtención de los valores de los parámetros, estos se validan con la regulación de calidad de servicio de la entidad reguladora, en la que se establecen los valores objetivo que se deben

⁵ Las tecnologías se detallan en la sección 2.2.

cumplir. Con este procedimiento, se evalúa el servicio proporcionado por el operador acorde a los estándares definidos para la región.

Evalutados los parámetros del operador con los valores objetivo de la regulación, se abren dos caminos distintos en función de dicha evaluación. Por un lado, en caso de cumplir, los valores se pueden emitir de forma pública, de esta forma se da una transparencia y visibilidad sobre el sector de las telecomunicaciones en la región pertinente, así como también un punto de referencia con respecto a la posición en una comparativa internacional. En el caso contrario en el que los parámetros no cumplen con la regulación, se abre un procedimiento de contradicciones, en los que se llevan a cabo investigaciones con mayor detalle en términos de mediciones, depuración, cálculo, tecnologías, etc.

El desglose del procedimiento llevado a cabo en la presente sección se trata de un esquema simplificado y generalizado del proceso de monitoreo. Este enfoque puede haber obviado alguna fase concreta o bien no ser acorde a ciertas referencias, sin embargo, éste permite obtener un conocimiento básico sobre el procedimiento, objetivo principal de la presente sección.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Para la medición de los parámetros de calidad de servicio, existen varias tecnologías disponibles en el mercado. Estas son las siguientes:

- *Drive testing*
- *Walk testing*
- *Unattended probes*
- *Crowdsourcing*
- *Network Management System (NMS)*

A continuación, se procede a detallar cada una de ellas, proporcionando su información, así como empresas relevantes cuyas soluciones ofrecidas a los clientes se basan en las tecnologías correspondientes:

Drive testing [21]

Este método es usado para los servicios móviles, ya que el modo de testeo se basa en recolectar información de radiofrecuencias en tiempo real en un área específica. Constituye una herramienta crucial para la optimización de las redes, al proporcionar información de forma clara en términos de velocidades, cobertura, ancho de banda, así como otros parámetros como puntos ciegos (áreas sin recepción de datos) y áreas con baja calidad de señal. En función de los requerimientos del operador, el test se puede realizar en horas diarias (para planificación), o bien nocturnas (para mantenimiento).

Como su propio nombre indica, se trata de un método que utiliza automóviles equipados con dispositivos de prueba de red. Los dispositivos necesarios para llevar a cabo las pruebas son:

- Teléfonos móviles: son móviles especiales diseñados con características específicas de medición, encargados de recopilar la información y probar el entorno de red.
- Antenas externas: acopladas en el exterior del coche, evitan problemas de baja señal al estar los teléfonos móviles en el interior del coche.
- GPS: usado por cuestiones de posicionamiento, tanto a nivel de visualización del vehículo, como desde un punto de vista analítico para asignar datos a ubicaciones.
- Ordenador con software: sistema de base de datos donde se guarda la información recopilada por los móviles, así como el archivo en el que se encuentra la información disponible y rutas de cada site.
- Otros elementos: como por ejemplo cargadores para los teléfonos móviles, cables de transmisión de datos o adaptadores de USB.

Actualmente, el uso de esta tecnología se puede encontrar en empresas relevantes como: [Umlaut](#), [MedUx](#), [Rohde & Schwarz](#), [Ibys](#), [DingLicom](#), [FocusInfocom](#), etc.

Walk testing [22]

Este método de ensayo utiliza un modo de operación muy similar al anterior, en el cual un dispositivo móvil es el encargado de recopilar la información. Como sistema de almacenamiento de los datos, bien se utiliza un sistema nube, o un ordenador portátil con software metido en una mochila. La principal ventaja respecto al *drive testing* es la

posibilidad de tomar medidas en interiores de grandes espacios, así como ubicaciones en donde no es posible utilizar un automóvil. Como inconveniente, el tiempo requerido para cubrir un área.

La siguiente ilustración muestra de forma ilustrativa el funcionamiento de las tecnologías *drive testing* y *walk testing*:

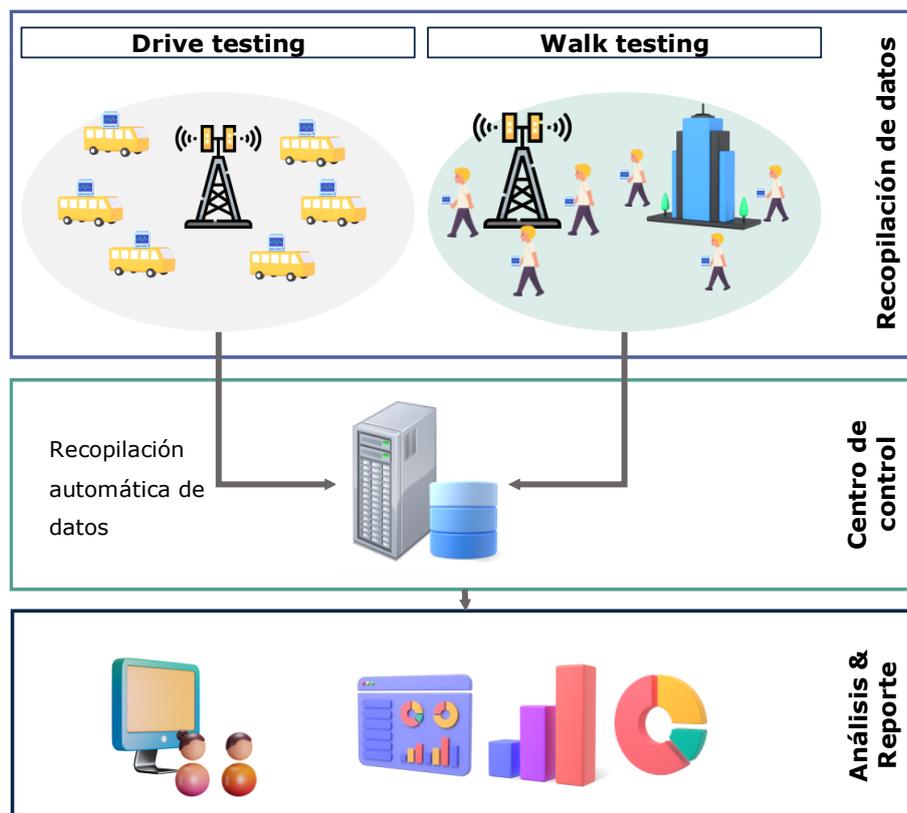


Ilustración 2.3: Esquema de funcionamiento de tecnología drive and walk testing [Fuente: propia]

Actualmente, las empresas que emplean el método *drive testing* incluyen también *walk testing*. El uso de ambas tecnologías de forma simultánea permite abarcar grandes zonas además de complementar con mediciones en interiores o zonas más específicas. En este caso, el listado de empresas se repite.

Unattended probes [23]

Este tipo de medición puede usarse tanto para redes fijas como móviles. Se trate de una sonda que recopila mediciones de forma automática y autónoma, sin necesidad de personal

cualificado. Puede ser instalado o bien en automóviles o en lugares fijos, tanto interiores como exteriores, como por ejemplo centros comerciales, aeropuertos, hospitales, etc. Su principal ventaja radica en que puede ser gestionado de forma remota, gracias a la utilización de un sistema nube para la recopilación de datos, y un sistema de post-procesado de la información.

La siguiente ilustración muestra de forma ilustrativa el funcionamiento:

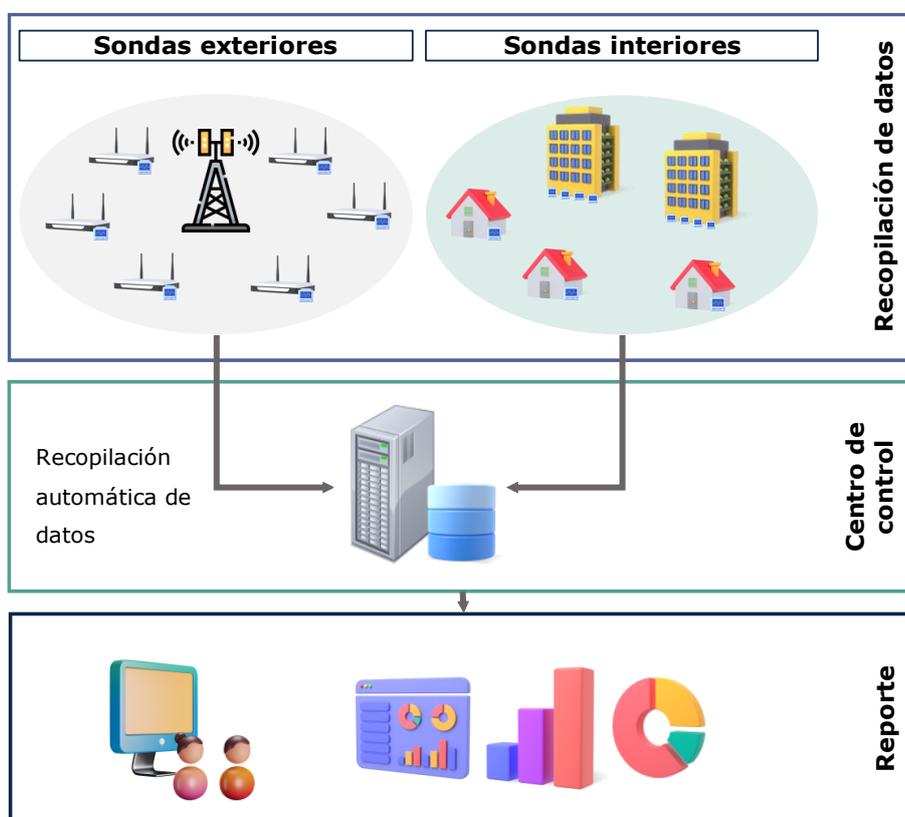


Ilustración 2.4: Esquema de funcionamiento de tecnología unattended probes [Fuente: propia]

Actualmente, el uso de esta tecnología se puede encontrar en empresas relevantes como: [SamKnows](#), [MedUx](#), [Rohde & Schwarz](#), [Ibys](#), [Sandvine](#), [DingLicom](#), [FocusInfocom](#), [GL Communications Inc.](#), etc.

Crowdsourcing [24]

El *crowdsourcing* para la calidad de servicio consiste en mediciones realizadas por “dispositivos de colección de datos” desde las conexiones de los usuarios finales para

procesarlas en resultados por parte de un “recopilador de muestras”, de forma que los resultados puedan proporcionarse a operadores, reguladores o grupos de consumidores.

Las mediciones se pueden realizar de forma manual, es el usuario el que inicia el test, a través de webs o bien aplicaciones, o de forma automática, en la que por normativa se determina la realización de test. Por otro lado, el sistema de recopilación de información puede ser activo, relacionado con el tráfico generado por los test, o bien pasiva, con el tráfico generado por las actividades llevadas a cabo por los usuarios.

La siguiente ilustración muestra de forma ilustrativa el funcionamiento:

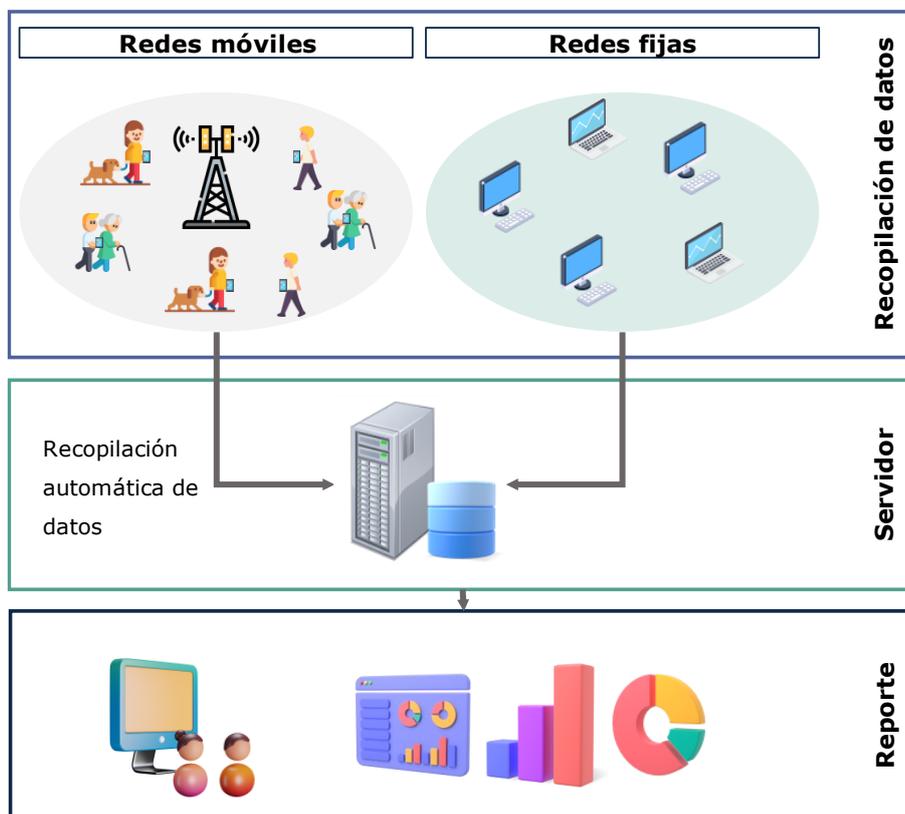


Ilustración 2.5: Esquema de funcionamiento de tecnología crowdsourcing [Fuente: propia]

Actualmente, el uso de esta tecnología se puede encontrar en empresas relevantes como: [Umlaut](#), [MedUx](#), [Rohde & Schwarz](#), [Opensignal](#), [OOKLA](#), [Sandvine](#), [DingLicom](#), [RantCell](#), etc.

Network Management System (NMS) [25]

Esta última opción se basa en un sistema automático de colección de datos, basado en contadores de red, que registran el tráfico real de la red. Se trata de un conjunto de sistemas que recopila información sobre faltas, configuraciones, rendimiento y datos financieros para evaluar en conjunto la calidad en los usuarios finales. En NMS es una de las múltiples capas de las que se compone un sistema de gestión de una red de telecomunicaciones, formada por la siguientes:

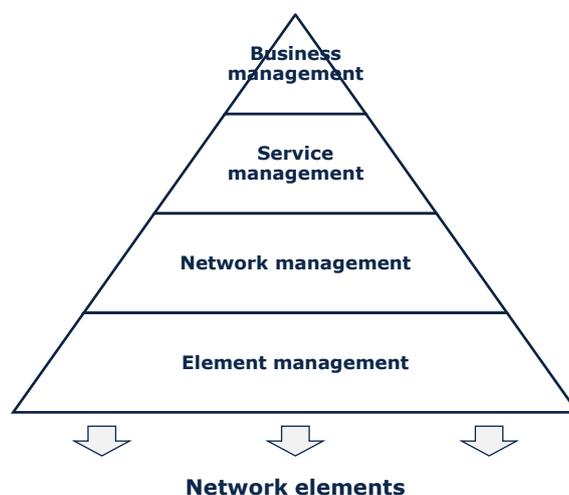


Ilustración 2.6: Capas de un sistema de gestión de telecomunicaciones [Fuente: propia, a partir de [25]]

La *network management layer* tiene la responsabilidad de asegurar la conectividad y fiabilidad de la red, teniendo acceso a la información recopilada por la capa anterior, la *element network layer*. Las tecnologías usadas por la NML para conseguir plena visibilidad sobre la red entera son: *Asynchronous transfer mode (ATM)*, *digital subscriber line (DSL)*, *synchronous optical network (SONET)*, entre otras.

Recopilada la información sobre las tecnologías disponibles en el mercado, dadas las diferentes soluciones en las que se podría basar el diseño del proceso del proyecto, se ha elegido el método *Drive testing* debido a la simplicidad entre las otras en términos de capacidad de diseño del proceso, sin tantas variables desconocidas (p. ej., gestión remota, automatización del sistema, implicación de varios sistemas, etc.).

La siguiente ilustración muestra de forma ilustrativa el funcionamiento:

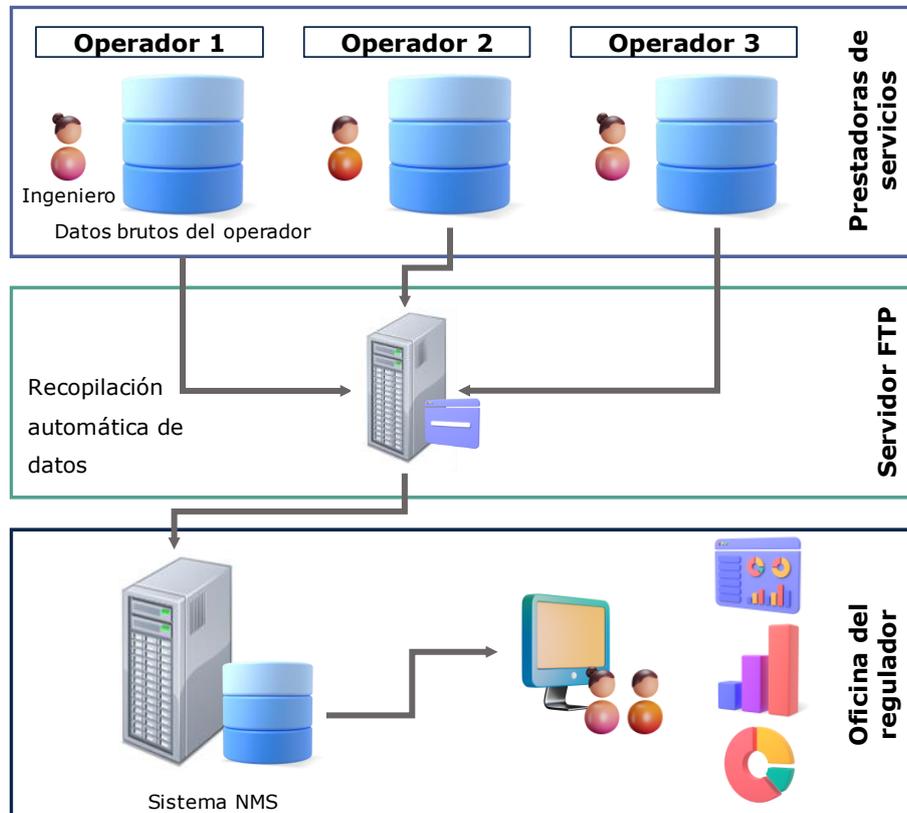


Ilustración 2.7: Esquema de funcionamiento de tecnología Network Management System [Fuente: propia]

Actualmente, el uso de esta tecnología se puede encontrar en empresas relevantes como: [Planet Network International](#), [BI4T](#), [bwtech](#), etc.

Finalmente, con el objetivo de disponer de un entorno controlado y evitar sesgos en el reporte de las mediciones de los parámetros de calidad de servicio, los reguladores recurren a su propia medición, para poder establecer un criterio con el cuál valorar la fiabilidad de los resultados proporcionados por los operadores del país. De esta forma, se aseguran si la información proporcionada es real o bien se han incluido de modificaciones intencionadas para llegar a los valores objetivo.

Comparación de tecnologías

Cada una de las opciones disponibles para los reguladores incluyen puntos a favor y en contra, en función de los requerimientos de estos, así como el entorno de medición. A nivel

comparativo de las tecnologías, en la siguiente tabla se muestran las ventajas e inconvenientes para cada una de ellas:

Tecnología	Ventajas	Inconvenientes
<i>Drive testing</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Enfoque clásico en la monitorización de QoS & QoE 	<ul style="list-style-type: none"> × Solo aportan una instantánea del rendimiento de la red
<i>Walk testing</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Simulación de distintas condiciones de medición ✓ Opción de preferencia por los reguladores para evaluar la cobertura de la red ✓ Ampliamente utilizado 	<ul style="list-style-type: none"> × Vistas parciales y temporales de QoS & QoE × Se centran en mediciones <i>outdoor</i> principalmente (pocas <i>indoor</i>) × Requiere de alto OpEx (mano de obra y tiempo) × Orientado a redes móviles exclusivamente
<i>Unattended probes</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Monitorización casi en tiempo real ✓ Mediciones <i>indoor</i> y <i>outdoor</i> ✓ Refleja información real de QoS & QoE de los usuarios finales 	<ul style="list-style-type: none"> × No soportado por prácticas internacionales × Difícil encontrar ubicaciones seguras × Deben operar bajo un sistema de posición global
<i>Crowdsourcing</i>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gran cantidad de datos ✓ Refleja información real de QoS & QoE de los usuarios finales 	<ul style="list-style-type: none"> × Muestras pueden no ser estadísticamente independientes × Muestras se ven afectadas por el ambiente del usuario final (p. ej., Wifi, interferencias) × Se requiere instalación y uso por parte de los usuarios finales

Tecnología	Ventajas	Inconvenientes
NMS	✓ Colección de datos de la red entera	× Más complejo. Requiere integración con operadores.
	✓ Monitorización continua	× Limitado a datos de rendimiento de la red.
	✓ Proceso automático	
	✓ Prácticamente no requiere OpEx	× Incapaz de medir QoE o KPIs orientados a servicio

Tabla 2.1: Comparativa de tecnologías de monitorización de parámetros [Fuente: propia]

A la vista de la Tabla 2.1, se pueden extraer diversas conclusiones sobre el uso de cada una de las tecnologías:

- Las técnicas de *drive/walk testing* y *NMS* son soluciones imprescindibles por el gran número de ventajas.
- Algunas NRAs, ITU y la ETSI recomiendan el uso de las anteriores tecnologías para una monitorización exhaustiva de QoS & QoE [26] [27].
- Las técnicas de *crowdsourcing* dan poder a los usuarios finales siempre que haya suficiente competencia en el mercado. Se debe evaluar como una solución a medio-largo plazo.
- El *crowdsourcing* y las *unattended probes* presentan las soluciones más fiables para medir la banda ancha fija.

Sin embargo, para la aplicación en Jamaica de las técnicas de medición, aun siendo el NMS una de las opciones más interesantes dadas sus características, la integración de los reguladores de NMS y los operadores puede presentar enormes dificultades de coordinación entre ellos, suponiendo una gran barrera para la aplicación del NMS

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DESARROLLADO

En la presente sección, se detallan los aspectos más relevantes para la comprensión del proceso de ejecución hasta la consecución de los resultados. Los aspectos se desglosan en las siguientes subsecciones:

- **Objetivos y especificación**
- **Datos**
- **Algoritmos**
- **Implantación numérica**

Las subsecciones se detallan a continuación:

3.1 OBJETIVOS Y ESPECIFICACIÓN

El diseño de la campaña de medición de parámetros de calidad de servicio implica tener en cuenta varios factores, como pueden ser el área por cubrir, el número de muestras y la redundancia de las mediciones, el tiempo disponible, etc. El dimensionamiento de la campaña debe conllevar, en este caso para el regulador, pero aplicaría también a un operador, una optimización, bien tratándose de una maximización de los recursos disponibles, o bien una minimización de los costes y/o tiempo requerido para llevar a cabo la campaña.

En el presente diseño del proceso, se ha llevado a cabo una optimización de la ruta por la cual los equipos del regulador de Jamaica, la OUR, deben seguir con el objetivo de minimizar la distancia, y por consiguiente el tiempo y coste de los recursos, entre los distintos puntos del país en donde se realizan las muestras de medición de calidad de servicio. La secuencia de destinos viene dada con un orden que permite que al final del trayecto, visitados todos los puntos requeridos, la distancia recorrida es la menor posible entre todas las combinaciones. Las destinaciones en las cuales se toman las muestras de medición se han

ubicado en las capitales de las provincias⁶, según el término utilizado en la región jamaicana. Si bien es cierto una campaña debe comprender todo el territorio del país, no únicamente las capitales, se ha tomado este enfoque para simplificar el problema de optimización, con el objetivo de entender el funcionamiento y aplicación de este en el resultado de dimensionado. En la sección 3.3 se detallan en mayor profundidad el enfoque y el procedimiento del algoritmo aplicado para determinar la solución.

A parte de una optimización de la ruta entre las distintas capitales de provincia dentro de la región de Jamaica, se ha llevado a cabo una optimización de la ruta entre las distintas muestras dentro de una misma capital de provincia. Para una muestra aleatoria de puntos, repartidos por el área de la capital de provincia, se aplica el algoritmo de optimización para determinar la ruta de menor distancia entre todos los puntos, partiendo y finalizando en un punto de referencia. La optimización de la ruta permite determinar el tiempo necesario para tomar las mediciones de los parámetros en todas las muestras establecidas. Para acortar el proceso de cálculo, el procedimiento se ha llevado a cabo únicamente en la ciudad de Kingston, ciudad más significativa a nivel poblacional del país. En la sección 3.3 se detallan en mayor profundidad el enfoque y el procedimiento del algoritmo aplicado para determinar la solución.

En la determinación de la ruta optimizada, se tiene en cuenta el número de individuo y vehículos que la OUR tiene a disposición para llevar a cabo las mediciones, permitiendo obtener un conjunto de combinaciones de rutas. Por un lado, el número de individuos influye en las rutas obtenidas para la toma de datos en las capitales de provincia, mientras que el número de vehículos influye en la repartición de capitales de provincia que forman el trayecto asignado.

Para todas las combinaciones obtenidas, se calcula el tiempo necesario para llevar a cabo las mediciones en todas las capitales de provincia, estableciendo dos tipos de actividades

⁶ El término utilizado en Jamaica es “parishes” (parroquias traducido al castellano), que equivale a las provincias.

principales, la toma de datos en cada capital de provincia, y el trayecto entre cada una de ellas. El procedimiento de cálculo seguido se encuentra en mayor detalle en la sección 3.4.

La optimización de la ruta de toma de datos se realiza para las tecnologías de *drive testing* y *walk testing*, al ser las más utilizadas actualmente debido a su versatilidad y robustez de las ubicaciones muestras de medición. Adicionalmente, son las únicas tecnologías en las cuales tiene sentido aplicar una ruta, al seguir las otras tecnologías, un enfoque de toma de datos basado en ubicaciones fijas (*unattended probes*) o bien en gestión remota/ajena (*NMS* y *crowdsourcing*).

3.2 DATOS

Datos para la optimización de rutas entre capitales de provincia

El primer paso para dimensionar las rutas de toma de medidas reside en caracterizar la población del país, determinando la distribución de esta en todo el territorio. Como se ha comentado anteriormente, con el objetivo de simplificar el proceso de cálculo, la población se ha distribuido en las capitales de provincia, estableciendo un conjunto de 13 “puntos” en los que se divide la población. El enfoque de asignar la población a las capitales sigue la tendencia mundial de la movilidad a zonas urbanas, reduciendo la distribución de la población en zonas rurales. A nivel global, el porcentaje de población rural⁷ ha disminuido del 57% (1990) al 43% (2021), mientras que en Jamaica la reducción ha sido del 51% (1990) al 43% (2021), algo menor en comparación al resto del mundo, debido principalmente al menor desarrollo e inversión en infraestructuras urbanas.

La información de población de las provincias de Jamaica se obtiene del portal de estadística del país ([Statistical Institute of Jamaica](#)), obteniendo los siguientes datos:

⁷ Fuente: Banco Mundial, enlace: https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.RUR.TOTL.ZS?end=2021&name_desc=false&start=1960&view=chart&year=2021

ID	Parish	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1	Kingston and St Andrew	664,237	666,041	667,609	668,932	669,935	670,338	670,183	669,773
2	St Thomas	94,154	94,410	94,633	94,820	94,962	95,019	94,997	94,939
3	Portland	81,960	82,183	82,377	82,539	82,663	82,713	82,694	82,643
4	St Mary	113,918	114,227	114,496	114,722	114,895	114,964	114,937	114,867
5	St Ann	172,763	173,232	173,640	173,984	174,245	174,351	174,309	174,203
6	Trelawny	75,353	75,558	75,736	75,886	76,000	76,045	76,028	75,981
7	St James	184,162	184,662	185,097	185,464	185,742	185,853	185,810	185,697
8	Hanover	69,684	69,874	70,039	70,177	70,282	70,325	70,309	70,265
9	Westmoreland	144,425	144,817	145,158	145,446	145,664	145,751	145,718	145,628
10	St Elizabeth	150,584	150,993	151,349	151,649	151,876	151,967	151,932	151,839
11	Manchester	190,295	190,812	191,261	191,640	191,928	192,043	191,999	191,881
12	Clarendon	245,655	246,322	246,902	247,391	247,762	247,911	247,854	247,702
13	St Catherine	516,941	518,345	519,565	520,595	521,375	521,689	521,569	521,249
	Total	2,704,131	2,711,476	2,717,862	2,723,245	2,727,329	2,728,969	2,728,339	2,726,667

Tabla 3.1: Población de Jamaica por provincias [Fuente: propia, a partir de Statistical Institute of Jamaica]

Debido a que la última información disponible corresponde al 2018, se actualiza esta mediante el CAGR (Tasa de Crecimiento Anual compuesta), para proyectar la población al 2022 de cada una de las provincias, mediante la siguiente fórmula:

$$CAGR = \left(\frac{V_f}{V_o}\right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Ecuación 1: Fórmula aplicada de Crecimiento Anual Compuesto

Siendo, V_f el valor del 2018, V_o el valor del 2014 y n el número de años entre V_f y V_o . Para obtener un crecimiento más ajustado a la actualidad, se hace uso de los datos del 2014 al 2018 (color azul en la tabla). Determinado el CAGR para cada una de las provincias, siendo éste aproximadamente 0.0315% en cada una de ellas, se obtiene la población actualizada para los años 2019 al 2022:

ID	Parish	2019	2020	2021	2022
1	Kingston and St Andrew	669,983	670,194	670,404	670,615
2	St Thomas	94,969	94,999	95,029	95,058
3	Portland	82,669	82,695	82,721	82,747
4	St Mary	114,903	114,939	114,975	115,011
5	St Ann	174,258	174,312	174,367	174,422

ID	Parish	2019	2020	2021	2022
6	Trelawny	76,005	76,029	76,053	76,077
7	St James	185,755	185,814	185,872	185,930
8	Hanover	70,287	70,309	70,331	70,353
9	Westmoreland	145,674	145,720	145,765	145,811
10	St Elizabeth	151,887	151,934	151,982	152,030
11	Manchester	191,941	192,002	192,062	192,122
12	Clarendon	247,780	247,858	247,936	248,013
13	St Catherine	521,413	521,577	521,740	521,904
	Total	2,727,524	2,728,380	2,729,238	2,730,095

Tabla 3.2: Población ajustada con el CAGR para los años 2019-2022 [Fuente: propia]

Actualizada la información de la población para las distintas provincias, esta se asigna a la capital de cada una de las provincias. El motivo de la agrupación de la población de una provincia en su ciudad radica en el número de muestras de mediciones necesarias, al tratarse en función del número de habitantes, y, por consiguiente, la demanda del mercado de los servicios de telecomunicaciones. De esta forma, se determina el tiempo necesario para llevar a cabo las mediciones en la respectiva capital de provincia. Con la información agregada, para posteriormente poder determinar la distancia entre capitales de provincia, se incluyen las coordenadas (latitud y longitud) de un punto considerado como centro de cada una de estas. La tabla en donde queda resumida la información es la siguiente:

ID	Parish	Ciudad	Latitud	Longitud	Población 2022
1	Kingston and St Andrew	Kingston	18.01784	-76.80990	670,615
2	St Thomas	Morant Bay	17.88094	-76.38939	95,058
3	Portland	Port Antonio	18.17842	-76.45192	82,747
4	St Mary	Port Maria	18.36520	-76.89232	115,011
5	St Ann	Saint Ann's Bay	18.43592	-77.20051	174,422
6	Trelawny	Falmouth	18.49253	-77.65650	76,077
7	St James	Montego Bay	18.47562	-77.89420	185,930
8	Hanover	Lucea	18.45025	-78.17643	70,353
9	Westmoreland	Savanna-la-Mar	18.22124	-78.13305	145,811
10	St Elizabeth	Black River	18.03335	-77.85676	152,030
11	Manchester	Mandeville	18.04223	-77.50973	192,122
12	Clarendon	May Pen	17.97344	-77.25191	248,013
13	St Catherine	Spanish Town	18.01579	-76.97518	521,904

Tabla 3.3: Población y coordenadas de cada una de las capitales de provincia de Jamaica [Fuente: propia]

Como se observa en la tabla anterior, la distribución de la población en Jamaica no presenta una distribución muy uniforme, ya que un 43% de esta se encuentra ubicada las capitales de provincia más representativas (o provincias), siendo estas Kingston y *Spanish Town*. En la ciudad de Kingston se han asociado las capitales de las provincias de Kingston y Saint Andrew, ya que la unión de ellas forma la *Kingston and St. Andrew Corporation*⁸, unidad de gobierno local. El resultado de la asignación de población a las capitales de provincia, con sus respectivas coordenadas, se muestra en la siguiente ilustración:



Ilustración 3.1: Ubicaciones de las capitales de provincia en las que se ha asignado la población de Jamaica [Fuente: propia]

Asignada la población los distintos puntos, en referencia a las capitales de provincia, para determinar la ruta óptima posible, es necesario calcular la distancia de cada punto a cada uno de los restantes, obteniendo una matriz para posteriormente aplicar el algoritmo de cálculo de la optimización, que se explica con más detalle en la sección 3.3. Para determinar la distancia de cada capital de provincia con el resto, se hace uso de una herramienta de Google, *Distance Matrix API* [18], en la cual permite, a partir de las coordenadas de origen y destino de las capitales de provincia, calcular la distancia y el tiempo del trayecto entre estas, no en línea recta sino por carretera. El código de la macro utilizada para el cálculo de las distancias y tiempo entre capitales de provincia se encuentra en el Anexo B. Como datos de entrada

⁸ Más información en el siguiente enlace: <https://www.ksamc.gov.jm/>

para la determinación de las distancias, se crea una red mallada con enlaces entre todas las capitales de provincia, para posteriormente pasar a una tabla de Excel las coordenadas de origen y destino para cada una de las combinaciones posibles (p. ej. Kingston a cada una de las 12 capitales de provincias restantes), mediante el uso de fórmula $INDEX(nombre_ciudad;MATCH(ID_ciudad_destino;ID_ciudad;0);)$, el cual devuelve el nombre de la capital de provincia para las relaciones establecidas. Adicionalmente, se hace el mismo procedimiento para las coordenadas. Para comprender el procedimiento de adaptación de la información para su utilización en la herramienta de Google *API Distance Matrix*, como el resultado obtenido de las distancias y tiempos para las relaciones entre capitales de provincia establecidas, se incluye la tabla resultante en el Anexo C.

Con la finalidad de posteriormente introducir la información en el algoritmo de cálculo, se transforma la información de formato tabla a formato matriz, de tamaño 13x13 (equivalente al número de capitales de provincia), quedando de la siguiente forma:

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	-	62	88	61	83	140	171	208	191	150	92	56	26
2	62	-	70	118	141	198	229	266	251	210	152	116	85
3	88	70	-	69	113	171	202	238	251	237	179	143	112
4	61	117	69	-	45	102	133	170	182	236	178	142	101
5	83	141	113	45	-	59	90	126	139	170	144	108	67
6	140	198	170	102	58	-	34	71	83	114	90	166	124
7	171	229	201	133	89	34	-	41	54	85	114	197	155
8	208	266	238	170	126	71	41	-	35	77	132	170	192
9	191	251	251	182	139	84	54	35	-	47	102	139	177
10	150	210	237	236	170	115	85	77	47	-	61	98	136
11	92	152	179	178	144	90	113	132	102	61	-	40	78
12	56	116	142	142	108	165	196	170	140	99	40	-	42
13	25	85	112	101	67	125	155	192	177	136	78	42	-

Tabla 3.4: Matriz 13x13 resultante con las distancias [km] entre capitales de provincia [Fuente: propia]

Observando la matriz, es necesario mencionar la no simetría de esta, ya que, aunque se podría esperar que las distancias, medida en ambos sentidos (ida y vuelta) debería coincidir, el hecho de medirse por carretera, en la cual la ruta puede no ser idénticamente la misma, explica las ligeras diferencias (p. ej. Ruta 1-13, 3-12, 3-6, etc.). La matriz de la Tabla 3.4 representa los datos de entrada que se introducen en el algoritmo de optimización de ruta.

Datos para optimizar la ruta entre muestras para la ciudad de Kingston

Los datos de entrada con relación a las muestras de la ciudad de Kingston incluyen únicamente la ubicación, en forma de coordenadas, de los puntos aleatorios establecidos en la región. A diferencia del apartado anterior, en el cual las ubicaciones de los nodos de las capitales de provincia se aplicaban al centro de la capital de provincia, sin una precisión muy exacta, los puntos de la ciudad de Kingston no seguían ninguna restricción en cuanto a su ubicación. Con motivo de no establecer un procedimiento de cálculo muy complejo, y con el objetivo de comprender el funcionamiento de la optimización, se establece una muestra de 25 puntos. El número de puntos, además de permitir cumplir los objetivos de simplicidad y comprensión, permite obtener una ruta lo suficientemente robusta y significativa para la posterior aplicación del algoritmo.

En la determinación aleatoria de las muestras de la ciudad de Kingston, únicamente ha tenido en cuenta que estas cubran toda el área de la región, así como evitar que algún punto estuviera ubicado en el mar, punto en el que posteriormente se generaba una nueva ubicación aleatoria. El conjunto de muestras aleatorias se ha generado a partir de las fórmulas:

$$Latitud = latitud\ mínima + rand() * \Delta_{latitud}$$

$$Longitud = longitud\ mínima + rand() * \Delta_{longitud}$$

Ecuación 2: Cálculo de coordenadas aleatorias de latitud y longitud

Siendo $rand()$ la función de número aleatorio de Excel entre 0 y 1, y Δx el delta de latitud y longitud, calculados como la diferencia entre las coordenadas del punto mínimo y máximo. Estos puntos representan los vértices inferior derecha y superior izquierda de un cuadrado imaginario en el cual se encuentran todas las muestras.

El resultado de las muestras es el siguiente:



Ilustración 3.2: Distribución de las muestras de la ciudad de Kingston [Fuente: propia]

La distribución de los puntos, como se observa en la Ilustración 3.2, cubre toda la ciudad de Kingston, tanto ubicaciones más urbanas (puntos centrales), como más residenciales y urbanas, asegurando que las mediciones se toman en un amplio rango de condiciones.

Con la ubicación de los puntos y sus coordenadas, se sigue el mismo procedimiento que el apartado anterior para determinar la distancia entre los puntos, mediante la herramienta de Google, *Distance Matrix API*. De igual forma, se realiza una tabla en la cual se establecen las relaciones de cada punto con los demás restantes, con las coordenadas origen y destino. La tabla sigue el mismo formato de la Tabla 6.1 del Anexo C obtenida en las relaciones entre las capitales de provincias y sus ubicaciones. En este caso, no se incluye la tabla en el anexo ya que se dispone de mucha información. Para posteriormente introducir los datos en el algoritmo de optimización, se adapta la información a formato matriz, en este caso de dimensiones 25x25, siendo el resultado el siguiente:

id	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	-	4.5	4.3	8.6	5.2	8.9	9.7	4.7	5.1	2.7	13.3	6.6	4.7	3.1	5.4	5.8	3.3	3.0	7.5	5.9	2.1	2.3	9.0	5.1	7.7
2	4.8	-	5.1	12.5	10.7	15.1	4.8	6.5	10.3	7.5	6.7	6.0	9.8	7.0	2.8	8.7	3.0	4.1	5.2	9.8	6.3	4.7	8.7	5.3	12.1
3	3.8	5.2	-	10.5	6.6	11.5	7.9	8.5	8.9	3.8	7.4	3.6	7.7	6.9	6.6	4.6	5.7	1.9	5.9	9.7	5.5	6.0	6.0	8.3	7.9
4	7.6	11.3	9.8	-	6.0	6.5	11.8	6.8	7.2	6.6	15.4	12.7	3.4	5.8	13.8	9.7	9.8	9.1	13.7	4.2	5.8	8.2	15.1	10.3	11.1
5	5.0	8.7	5.8	6.0	-	5.1	10.5	9.1	9.6	2.8	12.3	9.3	3.4	6.9	9.7	4.0	7.4	6.4	10.7	8.7	4.4	7.3	11.8	12.6	5.0
6	10.1	13.6	10.7	6.4	5.1	-	16.8	11.8	12.2	7.7	20.4	14.3	5.3	8.8	13.4	8.9	11.6	11.6	16.0	9.2	7.2	10.5	16.7	15.3	9.9
7	8.0	5.3	9.4	11.5	16.2	16.6	-	4.9	5.2	10.0	4.3	10.2	10.5	7.7	2.7	12.5	3.6	7.8	5.8	8.1	9.3	5.8	12.9	3.0	14.9
8	5.2	6.0	7.9	6.7	11.4	11.8	4.3	-	3.2	6.2	8.7	10.6	5.7	2.8	4.8	10.2	3.2	6.6	10.2	4.0	6.1	1.8	12.6	1.9	12.1
9	5.3	9.9	8.9	6.7	9.2	11.9	5.4	3.4	-	7.3	9.0	11.1	5.8	2.9	7.3	10.3	5.5	7.6	10.5	3.4	6.2	4.3	13.5	3.9	12.2
10	2.4	6.2	5.5	6.6	4.8	8.1	8.0	7.1	7.6	-	10.0	7.6	3.8	4.9	7.1	5.7	4.8	4.0	8.4	8.6	2.5	4.7	10.0	7.6	7.2
11	9.1	6.7	8.2	16.5	13.9	21.7	5.7	10.0	10.3	10.3	-	8.4	15.6	12.7	6.1	12.1	6.4	7.1	2.1	13.2	10.8	10.9	11.1	8.1	15.6
12	5.7	6.0	3.3	12.4	10.4	15.3	9.1	10.2	16.8	7.9	8.4	-	9.6	8.8	7.7	8.4	6.7	3.4	6.8	11.6	7.4	8.0	3.3	9.3	12.0
13	4.8	8.5	7.1	3.5	3.7	5.3	10.8	5.7	6.2	3.8	12.3	9.9	-	3.5	9.5	6.8	6.3	6.3	10.7	5.4	3.0	5.2	12.3	9.2	8.3
14	3.5	7.4	7.1	5.7	7.2	8.8	8.1	3.0	3.5	5.1	11.7	9.3	3.5	-	6.9	8.3	4.3	5.8	13.2	3.0	3.4	2.7	11.8	6.5	9.6
15	6.0	2.8	6.7	13.9	12.0	14.1	2.2	4.8	7.7	8.8	4.8	7.7	11.0	10.1	-	10.0	2.9	5.4	3.6	10.6	7.3	4.7	10.4	3.4	13.4
16	5.6	8.7	4.4	10.0	5.3	10.2	11.4	10.7	10.7	4.2	11.5	8.0	7.3	10.0	10.0	-	7.9	5.0	9.9	12.0	5.9	8.3	10.4	10.4	4.8
17	3.2	3.3	5.9	9.9	7.6	15.9	3.3	3.3	6.9	5.2	7.4	6.7	7.0	4.3	2.9	9.0	-	4.4	6.3	7.3	5.0	1.8	9.4	3.0	10.1
18	2.5	4.2	1.8	9.2	7.0	10.6	6.9	7.2	7.6	4.1	6.7	3.8	6.4	5.6	5.0	4.7	-	5.2	8.4	5.0	4.7	6.2	7.3	8.4	8.4
19	7.5	5.2	6.6	16.9	12.0	16.3	6.1	10.4	10.7	8.7	2.0	6.8	11.0	13.1	3.6	9.9	6.3	5.1	-	13.6	9.3	7.6	9.5	8.5	13.5
20	6.7	10.6	10.3	3.6	8.3	8.8	9.6	4.0	4.9	8.1	13.1	12.6	4.9	3.0	11.5	11.1	7.0	9.0	14.7	-	7.3	5.8	15.0	8.0	12.6
21	2.1	5.6	5.4	5.8	4.4	7.2	11.0	5.9	6.4	2.3	9.6	7.5	3.0	3.4	6.8	5.4	4.5	3.9	8.0	7.7	-	3.8	9.9	9.4	7.2
22	8.4	5.1	5.9	8.2	6.6	10.7	4.8	2.0	4.7	4.2	9.6	8.1	5.4	2.7	4.4	9.0	1.8	4.6	8.1	5.5	3.5	-	10.6	2.8	9.1
23	8.4	8.7	6.2	15.1	12.1	17.0	11.8	12.4	19.5	10.0	11.1	3.9	12.3	11.5	10.4	10.1	9.4	6.2	9.5	14.3	10.1	10.7	-	12.0	13.7
24	5.0	5.3	8.7	8.6	14.8	13.8	3.2	1.9	3.9	7.0	6.8	9.2	7.6	6.3	3.1	10.0	3.1	7.4	8.3	6.8	6.3	2.8	11.9	-	11.9
25	7.5	11.2	7.7	11.1	4.8	9.7	13.0	12.2	12.6	5.3	14.9	11.3	8.4	9.4	12.2	4.8	9.9	8.3	13.3	13.1	7.0	9.8	13.8	12.4	-

Tabla 3.5: Matriz 25x25 resultante con las distancias [km] entre muestras de la ciudad de Kingston

[Fuente: propia]

De igual forma que ocurre en la tabla de distancias entre las capitales de provincia, en este caso la matriz de distancias tampoco es simétrica, por el mismo motivo descrito en el apartado anterior, ya que las rutas por carretera pueden no ser las mismas en ambos sentidos (ida y vuelta). La información de la tabla se incluye posteriormente en el algoritmo para optimizar la ruta entre los puntos.

Precios para el cálculo de costes de los recursos

En esta subsección se incluyen los precios considerados para el cálculo de los costes de los recursos necesarios, determinado en el Capítulo 4. Análisis de resultados. Los precios considerados se ajustan a valores acordes a Jamaica, para poder obtener un resultado coherente para el regulador OUR. Estos se han incluido en dólares americanos (USD) al ser una moneda utilizada con frecuencia en la zona, así como también para poder facilitar una referencia de comparación del presente proyecto, sin necesidad de cambios de divisa.

Los diferentes precios considerados tienen como finalidad poder determinar los costes empleados, vehículos y equipos, con las respectivas subcategorías, detalladas en la subsección 4.1 Resultados del caso base. A continuación, se incluyen dichos precios, así como la fuente de referencia de la cual se ha extraído el valor:

Precios para el cálculo de costes	USD
Empleado [USD/h]	3.63
Gasolina [USD/l]	1.71
Consumo medio [l/100 km]	9.15
Alquiler coche [USD/día]	50.00
Aparcamiento [USD/h]	1.50
Noche alojamiento [USD/noche]	48.00
Coste de equipo de medición [USD]	8,000.00
Coste de plataforma de análisis [USD]	30,000.00

Tabla 3.6: Precios considerados para el cálculo de los recursos necesarios [Fuente: propia]

Para cada uno de los precios, se incluyen a continuación detalles sobre su determinación, así como la fuente de ellos incluida como nota de pie de página:

- Empleado⁹: precio por hora de un ingeniero de la red.
- Gasolina¹⁰: precio por litro de gasolina en Jamaica.
- Consumo medio¹¹: litros por cada 100 kilómetros.
- Alquiler coche¹²: precio diario promedio de cada mes del año.
- Aparcamiento¹³: precio considerado por hora de aparcamiento en la ciudad de Kingston. Debido a falta de información. Se considera el mismo precio para el resto del país.
- Noche alojamiento¹⁴: precio considerado para una noche en hotel.

⁹ Fuente: Salary explorer, enlace: https://www.globalpetrolprices.com/Jamaica/gasoline_prices/

¹⁰ Fuente: Global Petrol Prices, enlace: https://www.globalpetrolprices.com/Jamaica/gasoline_prices/

¹¹ Fuente: Energy.gov, enlace: [https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1177-march-15-2021-preliminary-data-show-average-fuel-economy-new-light#:~:text=Preliminary%20data%20for%20EPA's%202020,miles%20per%20gallon%20\(MPG\)](https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1177-march-15-2021-preliminary-data-show-average-fuel-economy-new-light#:~:text=Preliminary%20data%20for%20EPA's%202020,miles%20per%20gallon%20(MPG))

¹² Fuente: Kayak, enlace: [https://www.kayak.com/Jamaica-Car-Rentals.119.crc.html#:~:text=month%20in%20Jamaica%3F-On%20average%20a%20rental%20car%20in%20Jamaica%20costs,month%20\(%2462%20per%20day\)](https://www.kayak.com/Jamaica-Car-Rentals.119.crc.html#:~:text=month%20in%20Jamaica%3F-On%20average%20a%20rental%20car%20in%20Jamaica%20costs,month%20(%2462%20per%20day))

¹³ Fuente: City of Kingston, enlace: <https://www.cityofkingston.ca/residents/parking>

¹⁴ Fuente: Hikersbay, enlace: <http://hikersbay.com/travel-cost/jamaica?lang=en>

- Coste de equipo de medición: corresponde a un precio proporcionado por un cliente¹⁵ de soluciones de monitoreo de parámetros de QoS.
- Coste de plataforma de análisis: corresponde a un precio proporcionado por un cliente¹⁵ de soluciones de monitoreo de parámetros de QoS.

3.3 ALGORITMOS

En este apartado se detalla el algoritmo utilizado para la optimización de las rutas, tanto entre capitales de provincia de Jamaica, como entre los puntos aleatorios determinados para la ciudad de Kingston.

En la actualidad existen múltiples opciones de algoritmos y herramientas para optimizar una ruta minimizando ya sea distancia o tiempo. La tendencia de los consumidores a la compra compulsiva de productos online incrementa de forma significativamente el número de pedidos a realizar y entregar a domicilio. Minimizar la ruta proporciona una mayor capacidad de entrega de los repartidores, necesitando menos recursos la empresa, lo que conlleva a menores costes de distribución. Adicionalmente, el tiempo de entrega es uno de los principales indicadores de buen rendimiento en términos logísticos, además de ser un factor determinante, entre muchos otros, de la capacidad de retención de los clientes como también la posibilidad de conseguir nueva clientela. En la optimización del proceso de medición de parámetros de calidad de servicio, se persigue el mismo objetivo, reducir el tiempo de ruta para maximizar el uso de los recursos.

Entre la variedad de algoritmos disponibles para la resolución de la optimización, se ha elegido la programación de *Vehicle Routing Problem* (en adelante “VRP”). Este algoritmo sigue un enfoque muy similar al *Travelling Salesman Problem* (TSP), en el cual, partiendo de una serie de destinos, se debe encontrar la ruta de menor recorrido total. El VRP ofrece diversas variantes¹⁶, en función de las restricciones de la optimización, como pueden

¹⁵ Nota: Su identidad se mantiene anónima por razones de confidencialidad

¹⁶ Algunos ejemplos de las variantes que ofrece el algoritmo se pueden encontrar en el siguiente enlace: https://es.wikipedia.org/wiki/Problema_de_enrutamiento_de_veh%C3%ADculos#:~:text=El%20problema%20de%20enrutamiento%20de_conjunto%20dado%20de%20clientes%3F%22.

ser la capacidad máxima del transporte, *Vehicle Routing Problem with Capacity (CVRP)*, o con ventanas de tiempo de las entregas, *Vehicle Routing Problem with Time-windows (VRPTW)*. En el presente proyecto, se ha escogido la opción por defecto, el VRP, ya que las mediciones no presentan ninguna restricción de capacidad o tiempo. Sin embargo, podrían ser de utilidad en casos de, por ejemplo, capacidad de almacenaje de datos, en los cuales los sistemas de almacenamiento disponen de un límite, y sobrepasado este se debe volver al punto inicial a traspasar o realizar un cambio de memoria. Aun pudiendo ser de utilidad, no sería una estrategia óptima por parte de, en este caso, el regulador, incurriendo en costes de recursos y tiempo adicionales.

Los datos de entrada del algoritmo son principalmente las distancias entre nodos y la demanda de cada uno de ellos. Para el primer tipo de dato, se utilizan la Tabla 3.4, para el caso de la optimización de la ruta entre capitales de provincia de Jamaica, y la Tabla 3.5, para la ruta de muestras de la ciudad de Kingston. Para el caso de la demanda, en este caso no se ha planteado una demanda específica de cada punto, si bien sí ha sido de utilidad para establecer el número de vehículos o individuos que realizaban las mediciones. El funcionamiento del algoritmo se detalla a continuación:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}$$

Ecuación 3: Función objetivo de la optimización

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \forall j = 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \forall i = 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n f_{ij} - \sum_{j=1}^n f_{ji} = D_i \quad \forall i = 2, \dots, n$$

$$0 \leq f_{ij} \leq C x_{ij} \quad \forall i, j = 1, \dots, n$$

Ecuación 4: Restricciones de la optimización

Siendo los parámetros n , el número de puntos, d_{ij} , la distancia del punto i al punto j , D_i , la demanda en el punto i , y C , la capacidad de cada vehículo. Por otro lado, la variable x_{ij} representa un 1 si el vehículo va del nodo i al j , y 0 en caso contrario, es decir, se trata de una variable binaria. Finalmente, f_{ij} , representa en número de unidades que van del nodo i al j . El funcionamiento genera del algoritmo se muestra a continuación a través de un diagrama de flujo de este:

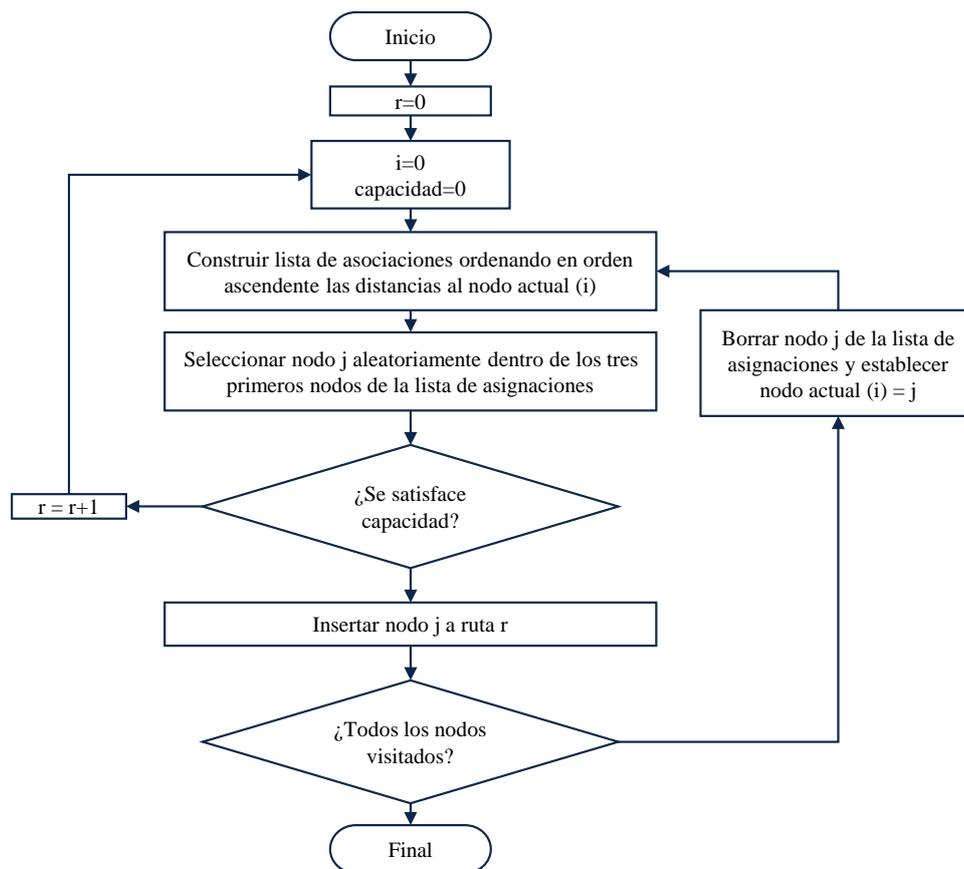


Ilustración 3.3: Diagrama de flujo del algoritmo de Vehicle Routing Problem (VRP) [28] [Fuente: propia]

El algoritmo de *VRP* suele trabajar con capacidad de los vehículos, estableciendo las rutas en función de si sobrepasa o no. En el presente proyecto, si bien se podría haber tratado la capacidad década punto como el tamaño de almacenamiento de los datos, se ha considerado que el sistema de almacenamiento cuenta con suficiente capacidad para albergar toda la toma de datos. En este sentido, se ha utilizado la capacidad del algoritmo para establecer el número de puntos a recorrer por cada vehículo/individuo en caso de reparticiones.

En el presente proyecto, para el proceso de cálculo del algoritmo se ha utilizado Excel. Mediante un archivo disponible en la red, ‘*VRP - Example Hard Integer Linear Optimization Problem*’, se ha ajustado éste para llevar a cabo los cálculos para la obtención de los resultados de los casos propuestos para el proyecto.

La ejecución del programa requiere de la instalación de un solucionador adicional, ya que, debido al número elevado de variables, el solver por defecto el Excel no es capaz de encontrar una solución. En este caso la elección ha sido *OpenSolver*, cuyo funcionamiento se explica mediante la siguiente ilustración:

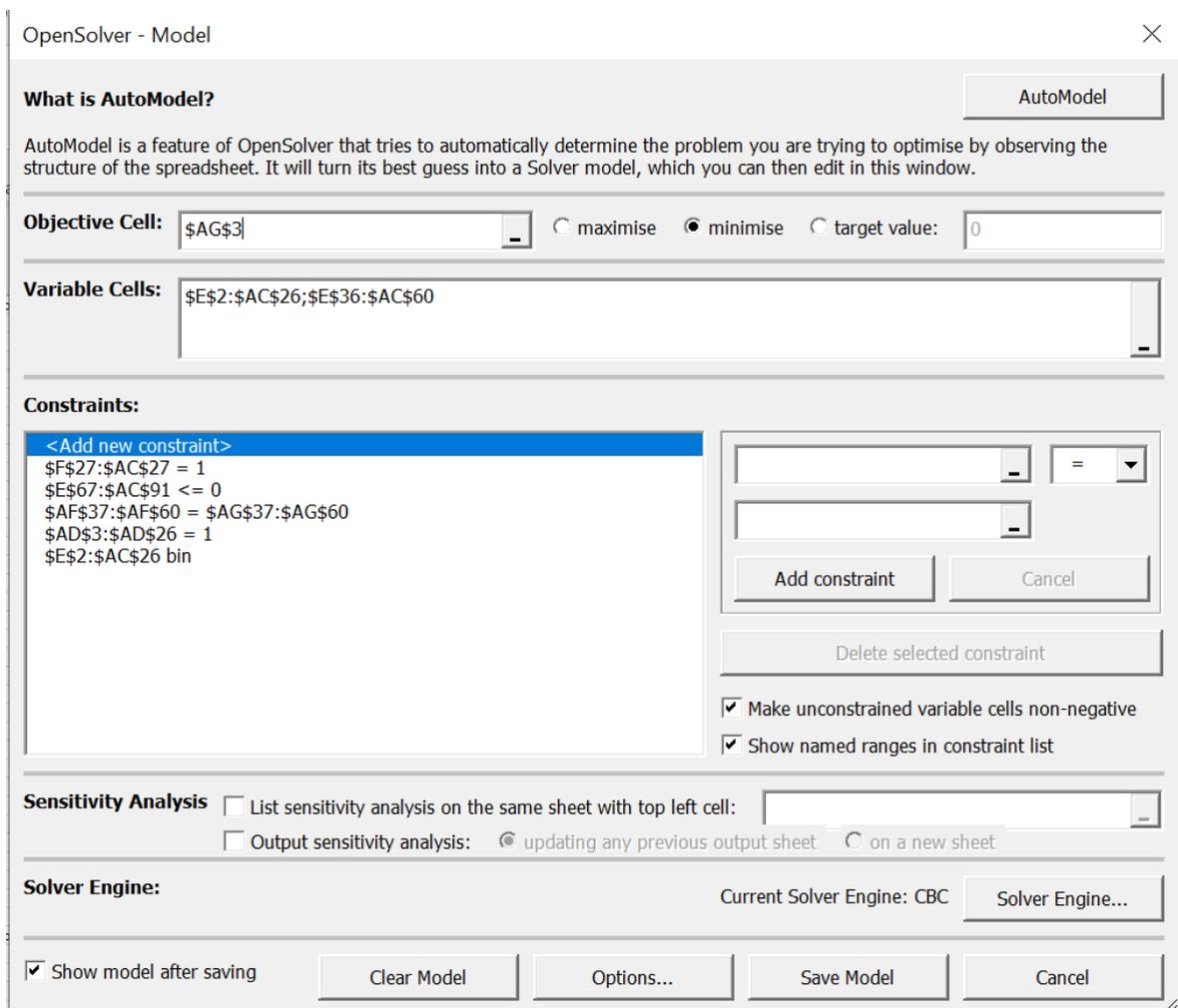


Ilustración 3.4: Cuadro de mando de OpenSolver para la resolución del algoritmo de optimización

[Fuente: propia]

El cuadro de mando mostrado en la Ilustración 3.4 permite introducir las referencias de las celdas de los datos necesarios para el cálculo. En *objective cell*, se selecciona la celda objetivo, en la cual se encuentra el cálculo de la Ecuación 3. Por otro lado, en *variable cells*, se selecciona el rango de celdas en las que se incluyen las variables x_{ij} y f_{ij} . Finalmente, en *constraints*, se incluyen las restricciones del modelo de optimización.

Adicionalmente, el solucionador permite introducir ciertos parámetros de resolución del algoritmo, como pueden ser el tiempo máximo de ejecución, la precisión, o el número de iteraciones.

Una vez ejecutado el algoritmo, el proceso de cálculo da como resultado la ruta óptima, ordenando los identificadores de los puntos en orden cronológico. Para proporcionar un resultado más visual y comprender de una forma más sencilla la secuencia de puntos de la ruta, se incluye un gráfico en el que se visualizan los puntos de la muestra, con sus coordenadas cartesianas, y la unión de cada punto con el siguiente de la ruta optimizada.

3.4 **IMPLANTACIÓN NUMÉRICA**

En esta subsección se procede a detallar la implantación del algoritmo, descrito en la subsección 3.3, en la optimización de las rutas entre capitales de provincia, así como entre muestras de la ciudad de Kingston.

Optimización de la ruta entre capitales de provincia

Con la información de cada una de las capitales de provincia, proporcionada al algoritmo mediante la matriz de distancias de la Tabla 3.4, se determina la ruta más óptima, en términos de menor distancia recorrida como conjunto entre puntos, que el equipo del regulador debe llevar a cabo.

En el caso de disponer de un único vehículo para desplazarse entre capitales de provincia, la secuencia de destinos obtenida como resultado se muestra en la siguiente ilustración:

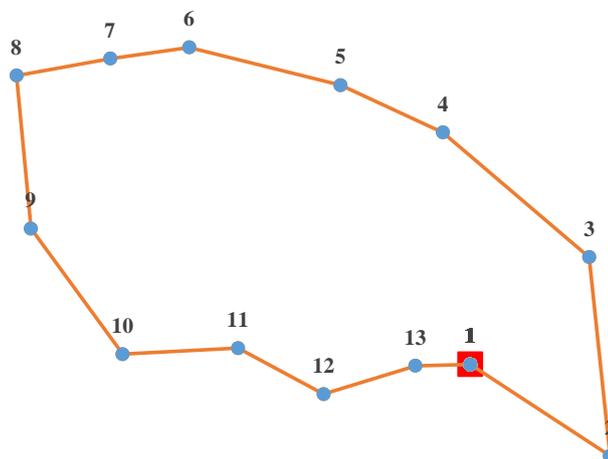


Ilustración 3.5: Ruta optimizada entre capitales de provincia para un vehículo [Fuente: propia]

Observando la ilustración, se puede afirmar que el resultado era esperado, ya que, por la distribución de las ubicaciones de las capitales de provincia, siguiendo una forma muy circular, sin la presencia de ningún punto central, era de esperar que la combinación óptima fuera recorrer los puntos en a lo largo de la costa, sin la necesidad de realizar trayectos del hemisferio norte al sur y viceversa.

Obtenida la secuencia de la ruta, se calcula el tiempo requerido para recorrer tal recorrido, mediante el tiempo determinado a partir de la herramienta de Google *Distance Matrix API*. Para este caso, el tiempo agregado es el siguiente:

Ítem	Tiempo [h]	Tiempo acumulado [h]
1-2	1.80	1.80
2-3	2.48	4.28
3-4	1.39	5.67
4-5	0.94	6.61
5-6	0.95	7.56
6-7	0.67	8.23
7-8	0.92	9.15
8-9	0.96	10.10

Ítem	Tiempo [h]	Tiempo acumulado [h]
9-10	0.88	10.98
10-11	1.21	12.19
11-12	0.80	12.99
12-13	0.55	13.54
13-1	0.45	13.99

Tabla 3.7: *Tiempo entre destinaciones y tiempo agregado del recorrido optimizado [Fuente: propia]*

La ruta optimizada, con un recorrido total de 630 kilómetros, requiere de un tiempo de alrededor de 14 horas, únicamente de trayecto de vehículo, lo que implica un mínimo de dos días laborables.

Obtenido el resultado para la ruta con un solo vehículo, se procede a determinar la optimización de la ruta en escenarios adicionales, para ver la influencia y la variación de la ruta en caso de que el regulador disponga de un mayor equipo, repartido en varios vehículos, para tomar medidas en las capitales de provincia. En la visualización de los resultados, hay que tener en cuenta que el punto de partida y de retorno es Kingston, lugar de ubicación de las oficinas del regulador OUR. Para determinar las rutas, se impone que el número de destinaciones de cada vehículo coincida, repitiendo para el caso de Kingston, asegurando una redundancia de mediciones para la ciudad más significativa en términos de población.

Para el caso de dos vehículos, las rutas de cada vehículo con menor distancia global son:

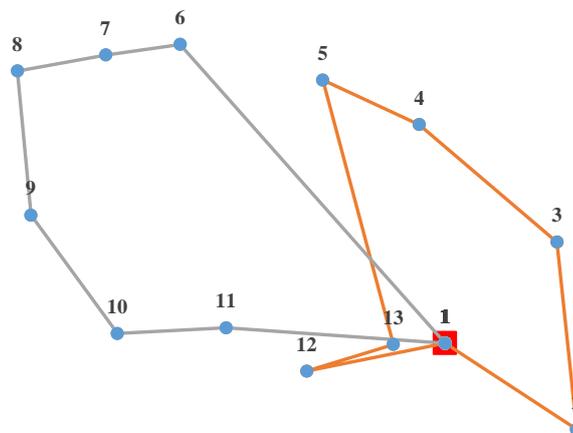


Ilustración 3.6: *Ruta optimizada entre capitales de provincia para dos vehículos [Fuente: propia]*

En la optimización obtenida, las rutas optimizadas del territorio de Jamaica se dividen en hemisferio este y oeste, obteniendo una distancia total recorrida, entre ambos vehículos, de 861 kilómetros. El tiempo agregado de las rutas optimizadas de cada vehículo son:

Vehículo 1			Vehículo 2		
Ítem	Tiempo [h]	Tiempo acumulado [h]	Ítem	Tiempo [h]	Tiempo acumulado [h]
1-2	1.80	1.80	1-6	2.04	2.04
2-3	2.48	4.28	6-7	0.67	2.71
3-4	1.39	5.67	7-8	0.92	3.62
4-5	0.94	6.61	8-9	0.96	4.58
5-13	0.89	7.51	9-10	0.88	5.45
13-12	0.54	8.05	10-11	1.21	6.67
12-1	0.74	8.79	11-1	1.45	8.11

Tabla 3.8: Tiempo entre destinaciones y tiempo agregado del recorrido optimizado para dos vehículos

[Fuente: propia]

Para el caso de dos vehículos, en comparación con la Tabla 3.7, el tiempo necesario para realizar el recorrido es de 8.8 horas, obtenido como el mayor de los tiempos de ambos vehículos, lo que supone una reducción considerable con respecto a un solo vehículo.

Como último caso, se determina la solución para tres vehículos, con las mismas condiciones de inicio y final en Kingston, obteniendo las siguientes rutas:

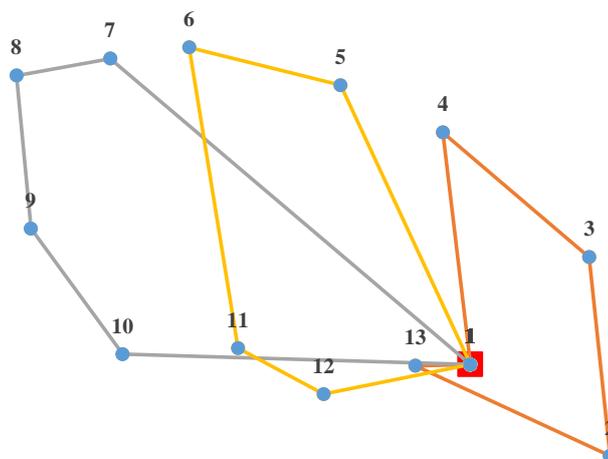


Ilustración 3.7: Ruta optimizada entre capitales de provincia para tres vehículos [Fuente: propia]

En este caso, la distribución de rutas optimizadas del territorio de Jamaica se divide en hemisferio oeste y este, similar al caso de dos vehículos, con la inclusión de una zona central. A diferencia el caso anterior, los vehículos de los hemisferios laterales recorren menos puntos, y por consiguiente menos recorrido. La distancia recorrida entre los tres vehículos es de 1081 kilómetros. Los tiempos de cada vehículo son los siguientes:

Vehículo 1			Vehículo 2			Vehículo 3		
Ítem	Tiempo [h]	Tiempo acumulado [h]	Ítem	Tiempo [h]	Tiempo acumulado [h]	Ítem	Tiempo [h]	Tiempo acumulado [h]
1-13	0.46	0.46	1-5	1.16	1.16	1-7	2.58	2.58
13-2	2.09	2.55	5-6	0.95	2.10	7-8	0.92	3.49
2-3	2.48	5.03	6-11	2.19	4.30	8-9	0.96	4.45
3-4	1.39	6.42	11-12	0.80	5.09	9-10	0.88	5.32
4-1	1.47	7.89	12-1	0.74	5.83	10-1	2.54	7.86

Tabla 3.9: Tiempo entre destinaciones y tiempo agregado del recorrido optimizado para tres vehículos

[Fuente: propia]

Observando los tiempos de los tres vehículos, se aprecia como el tiempo del vehículo correspondiente a la zona central es aproximadamente un 25% menor a los referentes a los hemisferios laterales. Si bien observando la Ilustración 3.7 se podría afirmar la ruta central es más larga, en términos de distancia y por consiguiente el tiempo, que la del hemisferio este, las carreteras más óptimas¹⁷ permiten que el tiempo sea menor. En este caso, el tiempo requerido por parte del regulador es de 7.89 horas, simplemente un 10% menor al caso de dos vehículos.

La ejecución de varios casos permite comprender el funcionamiento del algoritmo, así como visualizar la variación de la distribución de las rutas en función del número de vehículos a disposición del regulador para el dimensionamiento del proceso de medición de parámetros. Los tiempos de los diversos casos para recorrer los distintos puntos de capitales de provincia, se incluyen más adelante para determinar los costes de los recursos necesarios para llevar a

¹⁷ Dispone de autopista T1, y carretera principal A1. Las carreteras de Jamaica siguen un sistema de nombres, siendo las autopistas designadas mediante “T” (de Toll, autopistas de peaje), las principales con la letra “A” y las secundarias con “B”. Enlace: <https://jamaicaroadtrips.com/roads.html>

cabo todo el proceso de medición, trayecto y medición de parámetros en las capitales de provincia. De esta forma se pueden sacar conclusiones más robustas sobre la rentabilidad de los recursos en todos los casos.

Optimización de la ruta entre muestras de la ciudad de Kingston

En la presente subsección se detalla el procedimiento para determinar el tiempo necesario para llevar a cabo las mediciones en la ciudad de Kingston. El procedimiento es muy similar al caso de optimización de la ruta entre capitales de provincia. Partiendo de la matriz de distancias de la Tabla 3.5, el algoritmo determina la secuencia cronológica de puntos que debe seguir el individuo para tomar las mediciones de todas las muestras recorriendo una distancia menor.

Dado que el número de muestras dentro de la ciudad de Kingston (25) es mayor al número de capitales de provincia (13), se debe ajustar el rango de celdas para el correcto funcionamiento de la optimización en el archivo Excel. Una vez realizado dicho paso, se procede a ejecutar el algoritmo. El resultado obtenido para un individuo cubriendo toda la ciudad de Kingston se muestra en la siguiente ilustración:

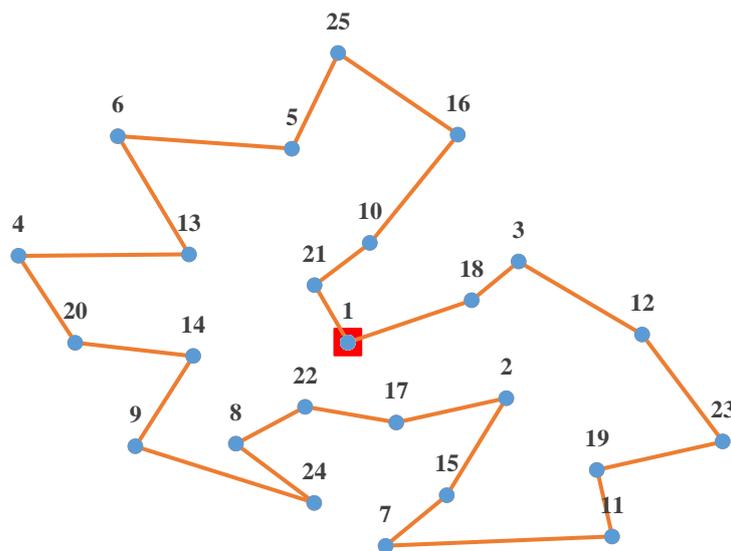


Ilustración 3.8: Ruta optimizada entre muestras de la ciudad de Kingston para un individuo [Fuente: propia]

De igual forma que para la optimización de la ruta entre capitales de provincia, se determina un punto inicial, en el cual se inicia y se acaba la ruta de medición, siendo este el punto 1. En la Ilustración 3.8 se muestra la secuencia obtenida, empezando en el punto 1 y siguiendo por el punto 18, 3, 12,23... hasta completar el recorrido.

Obtenida la secuencia cronológica de puntos a seguir en la toma de mediciones de parámetros, se calcula el tiempo necesario para llevar a cabo el recorrido. Se determina el tiempo total a partir de dos tipos de actividades, por un lado, los trayectos entre ubicaciones de muestras (p.ej., del punto 1 al 18, de 18 a 3, de 3 a 12, etc.) en el cual se determina el tiempo mediante la división de la distancia entre la velocidad media urbana de un vehículo¹⁸ considerada, siendo esta de 25 km/h, considerado el límite de 50 km/h [29] y posibles atascos en la capital de provincia. Por otro lado, se ha considerado que las mediciones se llevan a cabo en un punto concreto, en lugar de ser tomadas a lo largo de todo el recorrido. En este sentido, se ha establecido un tiempo de 20 minutos requeridos para la medición en cada punto.

El tiempo total necesario para llevar a cabo las 25 mediciones es de 11.8 horas, suponiendo un total de 1.48 días laborables. La distancia total recorrida es de 88.6 km.

De igual forma que para el caso de optimización de ruta entre capitales de provincia, se desea observar la sensibilidad de la ruta y el tiempo de medición necesario en caso de disponer de más de un individuo para llevar a cabo las mediciones. El análisis de sensibilidad se lleva a cabo en los casos de dos y tres individuos.

¹⁸ Se considera que el individuo se desplaza entre puntos mediante una motocicleta eléctrica, alquilada en cada ciudad.

Finalmente, se ejecuta el algoritmo para el caso de tres individuos, con las mismas consideraciones de repartición de puntos e inicio y final de la ruta del caso anterior. Para este nuevo caso, las rutas optimizadas obtenidas son las siguientes:

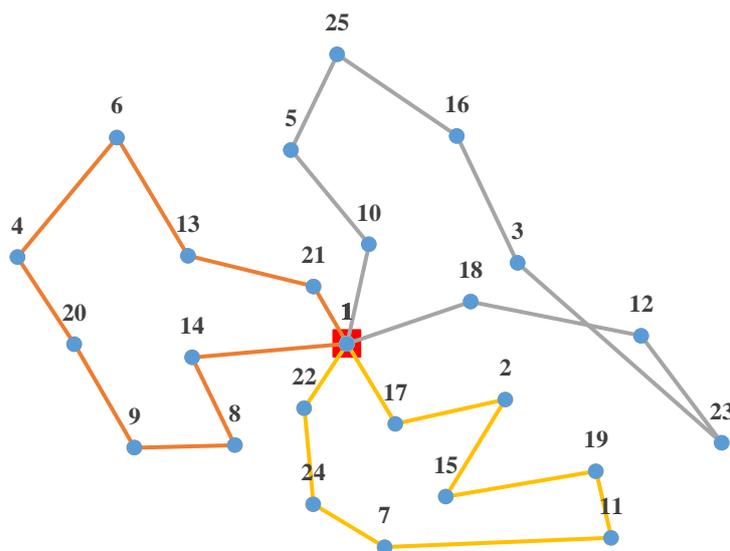


Ilustración 3.10: Ruta optimizada entre muestras de la ciudad de Kingston para tres individuos [Fuente: propia]

Para el último caso, el tiempo de cada individuo necesario para cubrir las rutas obtenidas 4.30, 4.07 y 4.39 h, siendo el tiempo total necesario de 4.39 h. este nuevo tiempo supone una reducción del 30% respecto al caso de dos individuos, y una reducción del 63% respecto al primer caso. En términos de distancia, el conjunto de rutas apenas supone un aumento del 4.8%, respecto al caso anterior, de distancia recorrida, siendo esta de 96.14 km.

Las rutas obtenidas para cada caso permiten, más adelante, poder determinar la sensibilidad de los resultados en términos de costes, aportando más criterios para la selección de la opción más óptima para la campaña de medición de parámetros para la OUR. Los resultados obtenidos se detallan en el Capítulo 4. Análisis de resultados.

Adicionalmente, el tiempo requerido para la ciudad de Kingston se utiliza para determinar el tiempo necesario en cada una de las diversas capitales de provincia, aproximando el

cálculo en base al número de muestras para cada caso, determinado en función de la población total de cada capital de provincia. Dicho procedimiento se incluye con más detalle en la siguiente subsección Cálculo de tiempo de muestreo por capitales de provincia.

Cálculo de tiempo de muestreo por capitales de provincia

El enfoque tomado para establecer el tiempo necesario en cada capital de provincia ha sido aproximar el tiempo obtenido en la ciudad de Kingston al número de muestras determinadas para cada capital de provincia.

En la obtención de los tiempos necesario para la toma de muestras, con el objetivo de comprender el funcionamiento del algoritmo, como también facilitar el proceso de cálculo, se establece una muestra de 25 puntos para la ciudad de Kingston, para posteriormente aproximar el tiempo, obtenido y detallado en la subsección anterior, al número real de muestras. Dicho número real de muestras se establece a partir de la población total asignada a la capital de provincia para el 2022, la más reciente, y el número de habitantes por muestra. La fórmula aplicada es la siguiente:

$$n^{\circ} \text{ de muestras en ciudad } X = \frac{\text{población 2022 ciudad } X}{\text{habitantes } x \text{ muestra}} * \text{factor de seguridad}$$

Ecuación 5: Cálculo del número de muestras para las capitales de provincia

El parámetro de entrada es el número de habitantes que cubre una muestra, pudiendo modificar dicho parámetro en función de la precisión requerida de las mediciones en toda el área de la capital de provincia. La precisión permite obtener una mayor redundancia de datos, así como evitar obviar puntos de menor rendimiento y asegurar que se cubren tanto zonas urbanas densas como más residenciales. Adicionalmente, el número de muestras resultante se multiplica por un factor de seguridad del 30%, el cual sobredimensiona el número de mediciones, teniendo en cuenta posibles errores o problemas en estas, evitando que, tras la depuración de datos, acabar con información insuficiente para el cálculo de los parámetros. Seguidamente, se obtiene el tiempo total a partir de la multiplicación de la proporción de muestras reales y las 25 muestras, por el tiempo de dichas 25 muestras, siguiendo la fórmula siguiente:

$$\text{tiempo necesario [h]} = \frac{n^{\circ} \text{muestras reales}}{25 \text{muestras}} * \text{tiempo necesario 25 muestras [h]}$$

Ecuación 6: Cálculo del tiempo necesario para la toma de datos en las capitales de provincia

El tiempo obtenido para cada capital de provincia se calcula para los tres casos analizados en la subsección Optimización de la ruta entre muestras de la ciudad de Kingston, es decir, considerando los tiempos totales para los casos de uno, dos y tres individuos tomando las mediciones en la capital de provincia. Los resultados obtenidos para todas las capitales de provincia se muestran en la siguiente tabla:

ID	Ciudad	Población 2022	Muestras	Proporción	Tiempo [h] 1p.	Tiempo [h] 2p.	Tiempo [h] 3p.
1	Kingston	670,615	436	16.77	197.95	102.72	71.30
2	Morant Bay	95,058	62	2.38	28.15	14.61	10.14
3	Port Antonio	82,747	54	2.08	24.52	12.72	8.83
4	Port Maria	115,011	75	2.88	34.05	17.67	12.27
5	Saint Ann's Bay	174,422	114	4.38	51.76	26.86	18.64
6	Falmouth	76,077	50	1.92	22.70	11.78	8.18
7	Montego Bay	185,930	121	4.65	54.94	28.51	19.79
8	Lucea	70,353	46	1.77	20.88	10.84	7.52
9	Savanna-la-Mar	145,811	95	3.65	43.13	22.38	15.54
10	Black River	152,030	99	3.81	44.95	23.32	16.19
11	Mandevile	192,122	125	4.81	56.75	29.45	20.44
12	May Pen	248,013	162	6.23	73.55	38.17	26.49
13	Spanish Town	521,904	340	13.08	154.37	80.10	55.60
Total			1779		807.70	419.11	290.93

Tabla 3.10: Muestras y tiempos totales de medición en las capitales de provincia para valor de 2000 muestras/habitante [Fuente: propia]

Los datos de la Tabla 3.10 muestran los resultados del número de muestras y el tiempo total necesario para cubrir la región de Jamaica en el caso de establecer un valor de 2000 habitantes/muestra. Con dicho valor, sería necesaria la toma de aproximadamente 1800 muestras, teniendo en cuenta el sobredimensionamiento aplicado mediante el factor de seguridad. El número de muestras resultantes se distribuye en las capitales de provincia de mayor población, siendo estas principalmente Kingston y Spanish Town, suponiendo el 43% del total de muestras entre ambas, así como el mismo porcentaje de tiempo requerido para llevar a cabo dicho número de muestras. A nivel del tiempo total requerido en función del

número de personas que llevan a cabo las mediciones, un equipo de dos individuos supone una reducción de tiempo del 48% respecto al caso de únicamente un individuo, mientras que tres individuos suponen una reducción del 64%. Con relación a los días laborables necesarios, con una jornada laboral de 8 horas, llevar a cabo las mediciones en los tres casos, implican 100 días, 52 días y 36 días para uno, dos y tres individuos respectivamente. Este tiempo necesario tiene en cuenta únicamente la toma de datos de las muestras en las distintas capitales de provincia, sin aplicar el tiempo de los trayectos entre ellas. Sin embargo, estos resultados hacen referencia al caso de un solo vehículo cubriendo todas las capitales de provincia, es decir, el mismo equipo recorre todas las capitales de provincia.

Los resultados obtenidos pueden variar en función de la precisión requerida en una proporción inversa al número de habitantes por muestra, es decir, aumentando el número de habitantes por muestra, se reduce el número total de muestras y por consiguiente el tiempo total requerido por parte de la OUR.

Atribución de tiempo total para las distintas soluciones

Obtenido el tiempo necesario de toma de datos para las distintas capitales de provincia, en la presente subsección se detalla el procedimiento de cálculo del tiempo total necesario para la campaña de medición, teniendo en cuenta las diferentes rutas obtenidas en función del número de vehículos, detalladas en la subsección *Optimización de la ruta entre capitales de provincia*, así como el tiempo de toma de datos en función del número de individuos tomando mediciones, casos detallados en la subsección *Optimización de la ruta entre muestras de la ciudad de Kingston* y resultados obtenidos en la subsección *Cálculo de tiempo de muestreo por capitales de provincia*. Los casos analizados son teniendo en cuenta el número de vehículos recorriendo las capitales de provincia y el número de individuos por vehículo realizando las mediciones, obteniendo un total de 9 casos, siendo estos los siguientes:

Caso	Vehículos	Individuos
1.1	1	1
1.2	1	2
1.3	1	3
2.1	2	1

establecidas, una en la que se dispone la información de los trayectos entre capitales de provincia, y otra para la información de tiempo requerido para tomar los datos en la cada capital de provincia. De esta forma, la información resultante, para una densidad de población de 2000 habitantes/muestra, los resultados son los siguientes:

Vehículo 1			
Actividad	Ítem	Tiempo [h]	Tiempo acumulado [h]
datos	1	102.72	102.72
viaje	1-2	1.80	104.52
datos	2	14.61	119.13
viaje	2-3	2.48	121.60
datos	3	12.72	134.32
viaje	3-4	1.39	135.72
datos	4	17.67	153.38
viaje	4-5	0.94	154.33
datos	5	26.86	181.19
viaje	5-13	0.89	182.08
datos	12	38.17	220.25
viaje	13-12	0.54	220.79
datos	12	38.17	258.95
viaje	12-1	0.74	259.69

Tabla 3.12: Tiempos de la secuencia de actividades para el vehículo 1 del caso 2.2 [Fuente: propia]

Vehículo 2			
Actividad	Ítem	Tiempo [h]	Tiempo acumulado [h]
datos	1	102.72	102.72
viaje	1-6	2.04	104.75
datos	6	11.78	116.53
viaje	6-7	0.67	117.20
datos	7	28.51	145.71
viaje	7-8	0.92	146.62
datos	8	10.84	157.46
viaje	8-9	0.96	158.42
datos	9	22.38	180.80
viaje	9-10	0.88	181.67
datos	10	23.32	205.00
viaje	10-11	1.21	206.21
datos	11	29.45	235.66
viaje	11-1	1.45	237.11

Tabla 3.13: Tiempos de la secuencia de actividades para el vehículo 2 del caso 2.2 [Fuente: propia]

En las tablas superiores, Tabla 3.12 y Tabla 3.13, la columna “actividad” proporciona detalles sobre si se trata de toma de datos o bien trayecto entre capitales de provincia, para establecer una matriz de búsqueda distinta en función de su valor. Observando la tabla, se aprecia como para el punto 1 (ciudad de Kingston), ambos vehículos toman mediciones, este enfoque, si bien no sería necesario, se lleva a cabo conforme dos motivos, por un lado calibrar las mediciones de ambos vehículos (identificar si las mediciones de ambos vehículos son muy dispares, para posteriormente corregirlas), así como también asegurar redundancia de datos para la ciudad más significativa de Jamaica en términos de población, además del número de muestras requerido.

Para determinar el tiempo requerido total, se toma el valor máximo entre ambos vehículos, siendo este de 259.69 horas. A dicho valor se le aplica un factor de ajuste del 15%, sobredimensionando el tiempo total incluyendo posibles retrasos, atascos o paradas técnicas/descanso. Aplicado el factor, queda como resultado:

Tiempo total [h]	298.65
Días laborables	37
Horas	2
Minutos	38

Tabla 3.14: Tiempo total requerido para realizar la campaña de medición para el caso 2.2 con una densidad de población de 2000 habitantes/muestra [Fuente: propia]

Para el caso de dos vehículos, con dos individuos cada vehículo realizando toma de datos, y para una densidad de población por muestra de 2000 habitantes/muestra, el tiempo total requerido para la OUR sería de aproximadamente 37 días laborables. Para la interpretación de los resultados, hay que tener en cuenta la densidad de población por muestra, ya que una menor densidad (menos habitantes por muestra) implica más muestras y por consiguiente más tiempo requerido, y viceversa.

Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la presente sección, se incluyen los resultados obtenidos para los distintos casos planteados, así como su proceso de cálculo. Adicionalmente, se incluye un análisis de sensibilidad de los resultados en función del número de habitantes por muestra. Dichos aspectos se desglosan en las siguientes subsecciones:

- **Resultados del caso base**
- **Análisis de sensibilidad**

Las subsecciones se detallan a continuación:

4.1 RESULTADOS DEL CASO BASE

En este apartado, se incluyen los resultados obtenidos para los nueve casos planteados en los apartados anteriores. Los resultados hacen referencia a los costes de los recursos necesarios para llevar a cabo las mediciones en el tiempo necesario para cada caso. Estos costes, si bien algunos son fijos, la mayoría son dependientes o bien de la distancia recorrida, como el consumo de combustible, o el tiempo requerido, ya sea por horas o bien por noches. El desglose de costes planteado para el cálculo de los costes totales es el siguiente:

- **Empleados**
 - Salarios: coste de contratación de los individuos para llevar a cabo la toma de datos relativo a la campaña de medición. Se establece a partir del número total de días de cada caso por el coste por hora:

$$\text{coste} = \text{total días} * 8 \frac{\text{horas}}{\text{día laboral}} * \text{coste hora empleado} * n^{\circ} \text{ de empleados}$$

Ecuación 7: Cálculo de los salarios de los individuos empleados

- Alojamiento: coste por noche de los alojamientos asignados a los individuos en caso de pasar la noche en una capital de provincia que no sea Kingston. Se calcula a partir del coste por noche y el número de noches total por individuo:

$$\text{coste} = \text{total noches} * \text{coste por noche} \left[\frac{\text{USD}}{\text{noche}} \right] * n^{\circ} \text{ de empleados}$$

Ecuación 8: Cálculo del coste de alojamiento de los individuos empleados

➤ Vehículos

- Combustible: coste del combustible para llevar a cabo los diversos trayectos. Se establece a partir de la distancia total recorrida, en la capital de provincia y en trayectos, por el consumo medio y el coste (USD/litro) de gasolina:

$$\text{coste} = \text{distancia recorrida} * \text{consumo vehículo} * \text{precio combustible} \\ * n^{\circ} \text{ de vehículos}$$

Ecuación 9: Cálculo del coste de combustible empleado por los vehículos para el recorrido

- Alquiler: se asume que la OUR no dispone de vehículos propios y es necesario el alquiler de estos. Se calcula a partir del número total de días en los cuales se necesita vehículo:

$$\text{coste} = \text{total días} * \text{coste diario alquiler} * n^{\circ} \text{ de vehículos}$$

Ecuación 10: Cálculo del coste de alquiler de los vehículos

- Aparcamiento: coste asignado al aparcamiento de los vehículos por las noches. Se establece a partir del coste por noche y el número total de noches:

$$\text{coste} = \text{total días} * \text{horas aparcamiento} * n^{\circ} \text{ de vehículos}$$

Ecuación 11: Cálculo del coste de aparcamiento de los vehículos

➤ Equipos

- Equipos de medición: coste de amortización basado en actividad de los equipos de medición. La vida útil considerada para los equipos es de 3 años. Se estima el coste de amortización a partir del número de campañas consideradas a lo largo de su vida útil. Se ha considerado que la OUR desea realizar campañas de medición cada 4 meses, habiendo 3 en total por año de vida útil de la plataforma de análisis. :

$$\text{amortización por campaña} = \frac{\text{Coste de equipo de medición}}{\text{vida útil} * n^{\circ} \frac{\text{campañas}}{\text{año}}}$$

Ecuación 12: Cálculo del coste de amortización por campaña de los equipos de medición

$$\text{coste amortización} = \text{amortización por campaña} * n^{\circ} \text{empleados}$$

Ecuación 13: Cálculo del coste de amortización total

Con el precio indicado en la sección 3.2, se obtiene una amortización por equipo de medición de 888.89 USD/campaña.

- Plataforma de análisis: coste de amortización basado en actividad de la plataforma de análisis. La vida útil considerada para la plataforma es de 5 años, cumpliendo con el periodo máximo establecido para sistemas y programas informáticos¹⁹. De igual forma que los equipos de medición, se estima su coste a partir del número campañas consideradas a lo largo de su vida útil:

$$\text{amortización por campaña} = \frac{\text{Coste de la plataforma}}{\text{vida útil} * n^{\circ} \frac{\text{campañas}}{\text{año}}}$$

Ecuación 14: Cálculo del coste de amortización por campaña para la plataforma de análisis

Con el precio indicado en la sección 3.2, se obtiene una amortización para la plataforma de análisis de 3333.33 USD/campaña.

➤ **Otros**

- Otros costes: costes asignados a otras actividades, como pueden ser peajes durante los trayectos, gastos de gestión de las actividades, etc. Se estima un valor del 10% sobre la suma de los costes anteriores.

A la suma de los costes planteados, se aplica un factor de sobre coste, para proteger a la OUR en posibles imprevistos que puedan surgir durante el procedimiento de toma de datos,

¹⁹ Fuente: Sociedad profesional de auditoría y asesoría, enlace: <https://www.spauditoria.com/tabla-de-amortizacion>

como pueden ser retrasos en las mediciones, días adicionales requeridos, averías de los equipos y su reparación, etc. El factor aplicado es de un 10% sobre el total, considerado suficiente para cubrir dichos costes, al no ser estos de carácter muy relevante.

Los tiempos totales resultantes para cada uno de los casos se muestran a continuación:

Categoría	Caso 1.1	Caso 1.2	Caso 1.3	Caso 2.1	Caso 2.2	Caso 2.3	Caso 3.1	Caso 3.2	Caso 3.3
Tiempo total [h]	944.9	498.1	350.7	566.2	298.6	210.4	514.0	271.1	190.9
Días laborables	118	62	43	70	37	26	64	33	23

Tabla 4.1: Resultados de tiempos totales para los distintos casos planteados [Fuente: propia]

La Tabla 4.1 sirve de referencia para el cálculo de costes totales, junto con la distancia recorrida total, entre los vehículos considerados. Dichos costes resultantes para los diversos casos se muestran en la siguiente tabla:

Categoría	Caso 1.1	Caso 1.2	Caso 1.3	Caso 2.1	Caso 2.2	Caso 2.3	Caso 3.1	Caso 3.2	Caso 3.3
Empleados:	9,043	9,457	9,794	10,690	11,210	11,730	14,648	14,966	15,515
- Salarios	3,427	3,601	3,746	4,066	4,298	4,530	5,576	5,750	6,011
- Alojamiento	5,616	5,856	6,048	6,624	6,912	7,200	9,072	9,216	9,504
Vehículo:	9,053	5,276	4,031	10,567	6,110	4,661	14,119	7,826	5,833
- Combustible	1,047	1,078	1,125	1,083	1,114	1,161	1,117	1,148	1,195
- Alquiler	5,900	3,100	2,150	7,000	3,700	2,600	9,600	4,950	3,450
- Aparcamiento	2,106	1,098	756	2,484	1,296	900	3,402	1,728	1,188
Equipos:	4,222	5,111	6,000	5,111	6,889	8,667	6,000	8,667	11,333
- Equipos de medición	889	1,778	2,667	1,778	3,556	5,333	2,667	5,333	8,000
- Plataforma de análisis	3,333	3,333	3,333	3,333	3,333	3,333	3,333	3,333	3,333
Otros:	1,810	1,473	1,382	2,126	1,732	1,639	2,877	2,279	2,135
- Otros costes (10%)	1,810	1,473	1,382	2,126	1,732	1,639	2,877	2,279	2,135
Total pre-sobrecoste	24,127	21,317	21,207	28,493	25,941	26,697	37,644	33,738	34,816
Sobrecoste (10%)	2,413	2,132	2,121	2,849	2,594	2,670	3,764	3,374	3,482
Costes totales de los recursos	26,540	23,449	23,328	31,343	28,535	29,366	41,408	37,112	38,298

Tabla 4.2: Costes totales [USD] de los recursos para los diversos casos planteados para una densidad de población de 2000 habitantes/muestra [Fuente: propia]

Observando los costes totales obtenidos para los diversos casos, se puede comprobar como los resultados tienen sentido al comparar entre ellos. A medida que nos desplazamos hacia la derecha, los casos precisan de más recursos, incrementando vehículos y/o individuos, aumentando el coste asignado a cada uno de ellos, especialmente a nivel de equipos necesarios, cuyo coste representa una media del 25% sobre el total²⁰. La decisión sobre qué caso se ajusta más a los requerimientos de la OUR debe fundamentarse en el período disponible para la medición de los parámetros. Una periodicidad baja, por ejemplo, anual o cada seis meses, puede permitir un menor coste eligiendo el caso de un individuo y un vehículo, a costa de incrementar considerablemente el tiempo necesario para llevar a cabo las mediciones hasta los aproximadamente los 6 meses²⁰. En función del presupuesto disponible, el regulador puede jugar con los parámetros de tiempo deseado, así como precisión de mediciones, es decir, el número de muestras por capital de provincia.

Con el objetivo de facilitar la comparación a primera vista entre casos, se incluye a continuación el coste diario y por hora por individuo para cada uno de ellos, permitiendo comprobar la influencia del incremento de recursos en el coste:

Tipo de coste	Caso 1.1	Caso 1.2	Caso 1.3	Caso 2.1	Caso 2.2	Caso 2.3	Caso 3.1	Caso 3.2	Caso 3.3
Coste x hora x individuo [USD/h]	28	24	22	28	24	23	27	23	22
Coste diario x individuo [USD/día]	225	189	181	224	193	188	216	187	185

Tabla 4.3: Coste por hora y coste diario por individuo para los diversos casos planteados para una densidad de población de 2000 habitantes/muestra [Fuente: propia]

Comparando los resultados mostrados en la Tabla 4.3 se aprecia como a medida que se aumenta el número de individuos, el coste por unidad de tiempo de cada uno de disminuye. Este hecho se explica en la mayor distribución de los costes entre los individuos. Si bien hay costes que son individuales, es decir, no repartibles entre individuos, como por ejemplo el coste de alojamientos y de alquiler de equipos, hay otros costes que sí son comunes, como por ejemplo los de la categoría de vehículos (alquiler, combustible y aparcamiento) además

²⁰ Para el caso de una densidad de población por muestra de 2000 habitantes/muestra.

de la plataforma de análisis, cuyo número no depende del número de integrantes del equipo. Estos costes repartibles entre individuos permiten un mayor aprovechamiento de estos, disminuyendo el coste aportado. Por otro lado, comparando el coste por individuo entre distinto número de vehículos, el coste por individuo disminuye al aumentar el de vehículos, en línea con el primer caso. En este caso el único coste repartible entre vehículos corresponde al coste de la plataforma de análisis, corroborando la explicación sobre la distribución de los costes del primer caso. Para dar soporte a la explicación de la distribución de costos, se incluyen a continuación las siguientes ilustraciones:

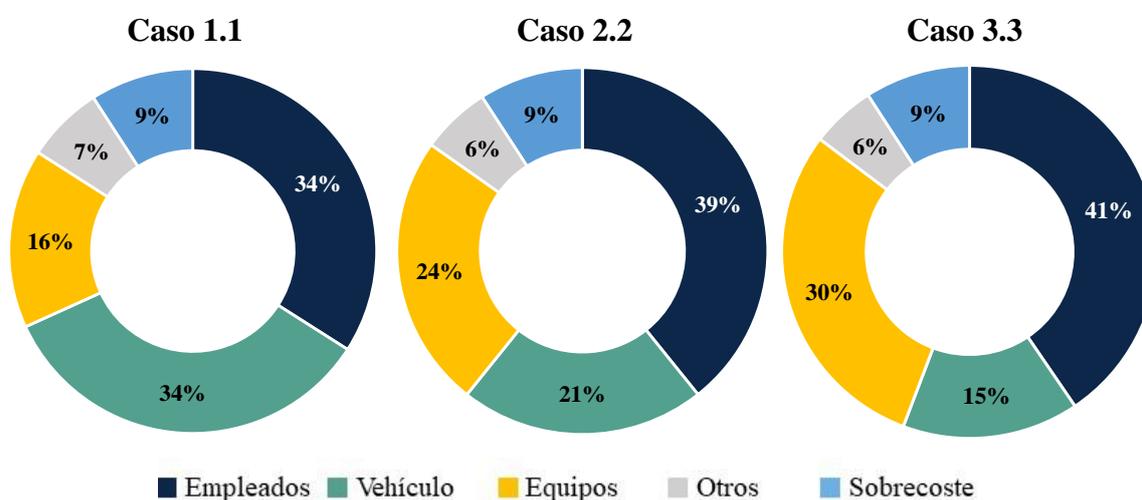


Ilustración 4.1: Distribución de los costes totales por categorías para los casos 1.1, 2.2 y 3.3 para una densidad de población de 2000 habitantes/muestra [Fuente: propia]

En los gráficos mostrados en la Ilustración 4.1 se incluye la distribución de costes para los casos 1.1, 2.2 y 3.3, con 1, 4 y 9 individuos respectivamente. La selección de dichos casos permite comprobar la influencia del número de individuos en la distribución de costes. En línea con lo comentado anteriormente, se observa como a medida que se aumenta el número de individuos por vehículo, el porcentaje asignado a dicha categoría disminuye, al estar el coste más aprovechado, el coste del trayecto entre capitales de provincia es igual para uno, dos o tres individuos en un mismo vehículo, si bien el coste de circulación en la capital de provincia varía. Sin embargo, para la categoría de costes de equipos, el comportamiento de la distribución es opuesto, aumentando considerablemente al ser costes no distribuibles, es decir, salvo el caso de la plataforma de análisis, no se pueden repartir entre individuos. Para

el resto de las categorías de costes, la influencia del número de individuos en el respectivo peso de los costes sobre el total no es significativa.

En este apartado, los resultados mostrados corresponden a una densidad de población de 2000 habitantes/muestra, en la que se ha mantenido constante para ver la variación de los costes para los diversos casos, pudiéndose comparar entre ellos. Con los resultados obtenidos, mostrados en la Tabla 4.2, se comprueba como a medida que se aumenta el número de individuos y/o vehículos, el tiempo total disminuye, a costa de incrementar el coste total, al requerir de más recursos. sin embargo, para un mismo número de vehículos, el incremento de individuos disminuye el coste total, al haber costes repartibles entre individuos, correspondientes a la categoría de vehículo. Por otro lado, el incremento de costes debido a un mayor número de vehículos se debe justamente a lo contrario, a la presencia de costes no distribuibles.

4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En el presente apartado, se realiza un análisis de sensibilidad para comprobar la influencia del número de habitantes por muestra, es decir, el número total de muestras, en los costes totales, así como el tiempo requerido para realizar las mediciones en todo el territorio de Jamaica.

El número de habitantes por muestra, establecido como parámetro de entrada, determina la precisión, así como la redundancia de las mediciones. Un mayor número de habitantes por muestra resulta en un menor número total de muestras, suponiendo que el área que cubre una muestra sea mayor, lo que implica que esta sea menos representativa. El comportamiento de la red en un punto concreto puede verse afectado por diversos factores, como por ejemplo la demanda en este punto (p.ej., número de usuarios, consumo por individuo, tipo de servicios, etc.) o las características geográficas (zonas rurales, edificios altos, estado de instalaciones, etc.) lo que puede no verse reflejado en mediciones de áreas de gran tamaño. Más número de muestras permite realizar mediciones en áreas de menor tamaño, siendo el conjunto de datos más preciso en términos de cubrir el rango de variaciones de comportamiento. Además, aun siendo la probabilidad de tomar mediciones en puntos muy

cercanos, este enfoque permite identificar y descartar mediciones erróneas, al poder compararse con las del punto vecino, suponiendo en este sentido una mayor credibilidad del conjunto de datos.

Como primer análisis de sensibilidad, se compara el coste total de los recursos en función de la densidad de habitantes por muestra:

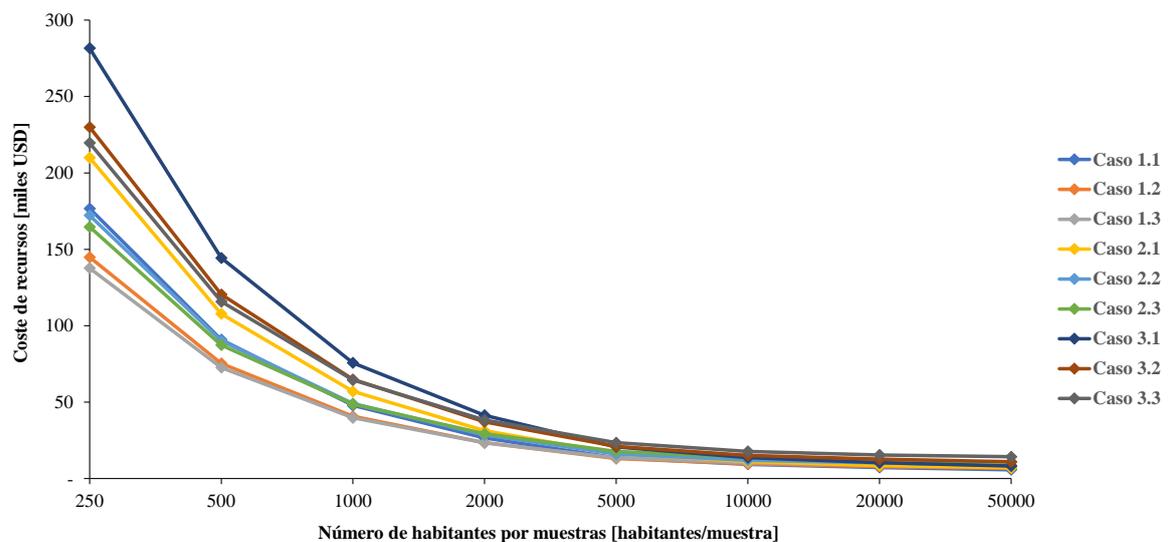


Ilustración 4.2: Coste de los recursos en función del número de habitantes por muestra [Fuente: propia]

Observando los resultados obtenidos en la Ilustración 4.2, se aprecia como a medida que se disminuye el número de habitantes por muestra, incrementando el número total de muestras, los costes de los recursos aumentan en todos los casos. Mayor número de muestras, si bien el coste de los trayectos entre capitales de provincia se mantiene, implica un mayor tiempo para llevar a cabo las mediciones al haber más puntos dentro de la ciudad para tomar datos. En este sentido, el incremento de costes se debe a aquellas categorías dependientes del tiempo, como por ejemplo los salarios, alojamientos, alquileres y uso de equipos. Por otro lado, la amortización de la compra de equipos por datos tomados es mayor, rentabilizando más su coste de adquisición.

Dado que, mientras la duración y coste de los trayectos no se altera, el enfoque del regulador debe ser incrementar el número de individuos por vehículo, ya que el tiempo que se incrementa es el relativo a la toma de datos. En este sentido, observando la Ilustración 4.2,

para un menor número de habitantes por muestra, el caso 3.1, tres vehículos, pero solo un individuo por vehículo incurre en un mayor coste, mientras que el caso 1.3, un vehículo y tres individuos, incurre en el menor coste. Esto permite afirmar que el incremento del número de vehículos acorta el tiempo total gracias a la reducción del número de capitales de provincia por vehículo, mientras que un aumento de individuos por vehículo disminuye el tiempo requerido para la toma de datos de cada capital de provincia, actividad crítica del proceso.

De forma complementaria al gráfico anterior, en el cual se ha analizado la influencia del número de muestras sobre el coste total de los recursos, se procede a un análisis de sensibilidad sobre el tiempo del proceso, para ver el número máximo de pruebas para que, dadas las rutas para cada uno de los casos, se pueda cubrir todo el territorio en un periodo de 5, 7, 10 y 20 días. Los resultados del análisis se muestran a continuación:

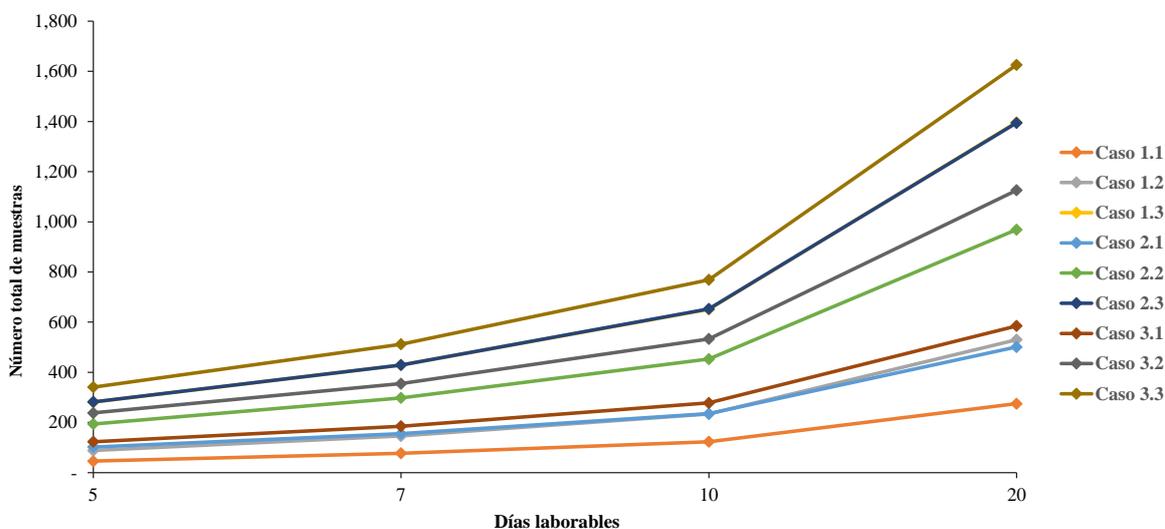


Ilustración 4.3: Número máximo de muestras totales para cubrir el territorio en función de los días laborables objetivo [Fuente: propia]

Los resultados obtenidos en la Ilustración 4.3 muestran la capacidad, en términos de precisión de toma de datos, entendiendo precisión al número de áreas o puntos en las que se divide la toma de datos en la capital de provincia, de los distintos casos considerados para acabar el proceso de medición de parámetros en los días laborables indicados. Como era de esperar, a medida que se aumenta el número de individuos y/o vehículos, para acabar las

mediciones en un tiempo determinado, se permiten tomar un mayor número de muestras, debido a que se dispone de más recursos para llevar a cabo el recorrido entre capitales de provincia, así como también dentro de cada capital de provincia.

De igual forma que en el gráfico de la Ilustración 4.2, no tiene la misma repercusión aumentar el número de vehículos que el número de individuos dentro de un vehículo. Como se ha visto anteriormente en el análisis de sensibilidad previo, el tiempo de toma de datos supone la actividad crítica del proceso, y en ese sentido, aumentar el número de individuos que toman medidas en la capital de provincia da más capacidad a tomar más muestras para un determinado plazo de ejecución. Observando los casos 1.2 y 2.1, y 2.3 y 3.2, y 1.3 y 3.1, se permite la toma de datos en más muestras en los primeros casos (1.2, 2.3, 1.3), en donde hay más individuos repartidos por vehículo.

Finalmente, observando los datos se podría llegar a afirmar que la diferencia entre casos aumenta conforme el periodo es mayor, sin embargo, si bien es cierto la diferencia absoluta de muestras entre casos aumenta con un tiempo de duración del proceso mayor, la variación porcentual se mantiene en el tiempo, al ser los costes proporcionales al tiempo de duración del proceso de toma de medidas.

Capítulo 5. CONCLUSIONES

En la presente sección, se incluyen las conclusiones más destacadas que se han sacado de la elaboración del presente proyecto, junto con recomendaciones que dan soporte a posibles mejoras en la ejecución del proyecto. Dichos aspectos se encuentran desglosados según las siguientes subsecciones:

- **Conclusiones sobre la metodología**
- **Conclusiones sobre resultados**
- **Recomendaciones para futuros estudios**

Las subsecciones se detallan a continuación:

5.1 CONCLUSIONES SOBRE LA METODOLOGÍA

Con relación a las conclusiones extraídas sobre la metodología adoptada en la elaboración del presente proyecto, estas se incluyen a continuación:

- El enfoque tomado en la metodología aplicada tiene como objetivo facilitar la comprensión y la simplificación de los procesos de cálculo, si bien no representa la totalidad del territorio de Jamaica, la aproximación del número de muestras en función de la población permite cubrir toda la población de Jamaica.
- La optimización de las rutas de medición sigue un enfoque dirigido a la utilización de tecnologías de medición basadas en *drive testing* o *walk testing*, en las cuales es necesario establecer unas rutas de toma de datos, en comparación con las demás tecnologías disponibles, cuyas ubicaciones de tomas de datos son fijas (*unattended probes*) o no son elección del regulador. (*crowdsourcing* y *NMS*).
- Asignar la población de las provincias en sus respectivas capitales, y realizar mediciones únicamente en estas permite a la OUR obtener una estimación rápida sobre el tiempo necesario para llevar a cabo proceso de toma de datos.

- Establecer un parámetro de habitantes por muestra permite determinar la influencia de la precisión y redundancia de la toma de datos de la campaña de medición deseada por la OUR.
- Determinar el número de muestras en función de la población (número de usuarios) permite adaptar las muestras a la demanda de servicios de telecomunicaciones de la respectiva capital de provincia.
- El algoritmo utilizado de *Vehicle Routing Problem* permite una solución rápida y eficaz al problema de optimización para el número de muestras establecido, el cual minimizando la distancia en la implementación del algoritmo permite a su vez minimizar el tiempo de las rutas.
- En los casos de más de un vehículo o individuo por ruta, la restricción de mismo número de puntos por ruta permite obtener una primera aproximación de optimización de las rutas, facilitando el proceso de ejecución del algoritmo, minimizando el procesamiento de datos.
- El sobredimensionamiento aplicado al número de muestras, tiempo de soluciones, y coste de los recursos permite obtener unos resultados robustos, en los cuales la aparición de imprevistos no altera los
- La determinación del tiempo necesario para cada capital de provincia a partir de la extrapolación del caso de Kingston y el número de muestras supone una aproximación en la cual se asume una demanda uniforme a lo largo de todo Jamaica, así como un comportamiento de la red equivalente a todo el territorio.

5.2 CONCLUSIONES SOBRE RESULTADOS

Con relación a las conclusiones extraídas sobre los resultados obtenidos en la elaboración del presente proyecto, estas se incluyen a continuación:

- La determinación de la ruta más óptima supone un punto de partida para la OUR para poder dimensionar su proceso en base a los requisitos de redundancia de la toma de datos, así como el tiempo deseado para llevar a cabo el proceso.

- La solución aplicable a la OUR adopta un enfoque abierto para el regulador, en el que se deja a su elección la elección final de la solución (número de individuos y/o vehículos) para llevar a cabo el proceso en base a sus requisitos.
- El sobredimensionamiento aplicado al número de muestras, tiempo de soluciones, y coste de los recursos permite obtener unos resultados robustos, en los cuales la aparición de imprevistos no altera los resultados obtenidos para la OUR.
- El coste por individuo por hora disminuye al aumentar el número de individuos, ya que se reparten los costes distribuibles del trayecto entre un número mayor de involucrados.
- Los costes de los individuos empleados para las mediciones suponen el mayor gasto entre los costes, con un peso medio del 37% sobre el total de costes. Esto se debe a que estos se asignan directamente con el número de individuos, sin la posibilidad de ser repartidos.
- El número de habitantes por muestra presenta una relación inversamente proporcional al coste de los recursos y directamente proporcional sobre el tiempo de ejecución del proceso, al ser el factor definidor del número de muestras a tomar y del recorrido necesario para pasar por cada una de sus ubicaciones.

5.3 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS

Finalmente, con el objetivo de dar soporte a posibles mejoras en la elaboración de estudios relacionados con el presente proyecto, se incluyen a continuación ciertos aspectos a considerar:

- Diseñar el proceso de toma de datos para otro tipo de tecnologías, como pueden ser las sondas, *crowdsourcing* o NMS, tomando otro enfoque distinto a la optimización de la ruta, como puede ser optimizar el despliegue de sondas para cubrir toda el área de Jamaica.
- La optimización de la ruta para un conjunto -n- de muestras repartidas a lo largo de todo el territorio de Jamaica, en lugar de únicamente en las capitales de provincia, incluyendo tanto zonas urbanas como rurales como montañosas.

- En los casos de más de un vehículo o individuo por ruta, un enfoque más óptimo habría sido establecer que las rutas resultantes contuvieran la combinación de muestras cuyos tiempos totales fuera similar entre distintos individuos o vehículos, en lugar de establecer el mismo número de muestras.
- Establecer una metodología estadísticamente robusta para determinar el número necesario de muestras de toma de datos, más allá de una aproximación en función del número de habitantes por muestra.
- Adaptar la variante del algoritmo de optimización de ruta en función de los requerimientos y restricciones del problema, como por ejemplo variantes de ventanas de tiempo, viajes múltiples, vehículo periódico, etc.

Esta serie de recomendaciones aportarían al problema un enfoque mucho más preciso, en términos de recorrido y dimensionamiento del proceso, lo que permitiría obtener unos resultados exactos para el operador, más allá de suponer una aproximación al tiempo y coste de los recursos empleados.

Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. F. C. IFC, «COVID-19's Impact on the Global Telecommunications Industry,» 2020.
- [2] Deloitte, «2022 telecom industry outlook,» 2022.
- [3] F. F. University, «Fern Fort University,» [En línea]. Available: <http://fernfortuniversity.com/term-papers/porter5/analysis/3971-telecom-italia-s-p-a-.php>.
- [4] R. Hordyński, «Kearney,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.es.kearney.com/communications-media-technology/article/-/insights/telecommunication-measuring-quality-of-service>.
- [5] P. Mugo, «Porter's five forces influence on competitive advantage in telecommunications industry in Kenya,» *European Journal of Business and Strategic Management*, 2020.
- [6] E. Babulak, «Quality of service provision assessment in the healthcare information and telecommunication infrastructures,» *International Journal of Medical Informatics*, 2005.
- [7] ITU, 2017. [En línea]. Available: https://www.itu.int/pub/D-PREF-BB.QOS_REG01-2017.
- [8] D. López, «Contribución a la caracterización de los requisitos de calidad de los Servicios de Telecomunicaciones,» 2006.

- [9] ITU, 2014. [En línea]. Available: https://digitalregulation.org/wp-content/uploads/ITU_Infodev_WB_ICT_Regulation_Toolkit.pdf.
- [10] «Office of Utilities Regulation (OUR),» 2000. [En línea]. Available: <https://moj.gov.jm/sites/default/files/laws/The%20Telecommunications%20Act.pdf>.
- [11] OUR, 2007. [En línea]. Available: https://our.org.jm/wp-content/uploads/2021/04/quality_of_service_standards_for_the_telecommunications_sector_-_a_consultative_document_-_october_2007.pdf.
- [12] B. S. López, «Ingeniería Industrial,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/investigacion-de-operaciones/que-es-la-investigacion-de-operaciones/>. [Último acceso: 2022].
- [13] G. J. L. Frederick S. Hiller, Introducción a la investigación de operaciones, Mc Graw Hill, 2010.
- [14] H. A. Taha, Investigación de operaciones, Pearson, 2012.
- [15] M. P. d. León, «Análisis de la implementación de un modelo de gestión de procesos para una compañía del sector telecomunicaciones,» 2014.
- [16] TEDAE, «Gestión de riesgos y oportunidades,» 2021.
- [17] B. Center, «BPMN 2.0 Manual de Referencia y Guía Práctica,» 2014.
- [18] Google, «Google Maps Platform,» [En línea]. Available: <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/overview>. [Último acceso: 2022].
- [19] OpenSolver, «About OpenSolver».
- [20] GBTec, «Modelado de procesos con BIC Process Design».

- [21] «TELECOM,» [En línea]. Available: <http://wirelesscellularnetwork.blogspot.com/p/rf-optimization-drive-testing.html>.
- [22] RantCell. [En línea]. Available: <https://rantcell.com/indoor-testing-feature.html>.
- [23] Keysight. [En línea]. Available: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-05586/brochures/5992-2063.pdf>. [Último acceso: 2022].
- [24] ITU, «Digital Regulation Platform,» [En línea]. Available: <https://digitalregulation.org/crowdsourcing-techniques-in-quality-of-service-assessment/>.
- [25] «Bloglib,» [En línea]. Available: <http://samppathblog.byethost8.com/network-management-system-lets-get-to-the-basics/?i=2>.
- [26] ITU-T, «E.805.1 - Quality of service operational strategy for improved regulatory supervision of providers of mobile telecommunication services».
- [27] ETSI, «ETSI TR 103 437 - Quality of ICT services; New QoS approach in a digital ecosystem,» 2020.
- [28] P. J. A. A. N. P. R. Vincent F. Yu, «Open vehicle routing problem with cross-docking,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835216300110>.
- [29] «AutoEurope,» [En línea]. Available: [https://www.autoeurope.ie/driving-information-jamaica/#:~:text=Speed%20Limits&text=Town%20and%20city%3A%2050%20km%2Fh%20\(50%20mph\)](https://www.autoeurope.ie/driving-information-jamaica/#:~:text=Speed%20Limits&text=Town%20and%20city%3A%2050%20km%2Fh%20(50%20mph)).

Anexo A. Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (en adelante, "ODS") fueron adoptados oficialmente el 25 de septiembre de 2015 por los principales líderes mundiales con el objetivo de erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos, con metas específicas para cada objetivo, que deberían cumplirse para el año 2030. Los ODS están conformados por 17 objetivos, que se representan en la siguiente ilustración:



Ilustración 6.1: Lista de Objetivos de Desarrollo Sostenible [Fuente: Naciones Unidas]

En referencia a los ODS alineados con el presente proyecto, estos son los siguientes:

- **9. Industria, innovación e infraestructura:** el objetivo principal del proyecto se fundamenta en desarrollar un proceso de monitoreo, asegurando el crecimiento y desarrollo de una infraestructura de telecomunicaciones, partiendo del cumplimiento de unos valores objetivos. Dado que los valores son evaluados de forma periódica, es necesaria la innovación en tecnologías, a nivel de prestación de la red de telecomunicaciones, como de medición de parámetros de calidad de servicio.

- **10. Reducción de las desigualdades:** unos de los motivos del establecimiento de estos es asegurar el crecimiento y evolución de las redes de telecomunicaciones, proporcionando una calidad en el servicio igual en toda una misma región, evitando que ninguna región quede retrasada respecto a la vecina o a las prácticas internacionales aplicables en las principales potencias tecnológicas.
- **11. Ciudades y comunidades sostenibles:** la sostenibilidad de las ciudades tiene un gran fundamento en las nuevas tecnologías, capaces de gestionar de forma mucho más eficiente el funcionamiento de estas, como por ejemplo las aplicaciones en tiempo real. Por esta razón, el despliegue e implementación de una red eficiente, en términos de calidad de servicio, garantiza una buena comunicación entre dispositivos, mejorando las prestaciones de estas tecnologías y aprovechando los recursos disponibles.
- **17. Alianzas para lograr los objetivos:** el mundo de las telecomunicaciones, con el objetivo de establecer un funcionamiento unificado, y conseguir una conectividad globalizada sin limitaciones, corresponde a un mundo en el cual la regulación está muy presente y ofrece poco margen de maniobra. Por este motivo, son necesarias alianzas entre grandes organismos reguladores (o países) para ponerse de acuerdo y establecer alianzas que faciliten estos procesos, como también entre reguladores y operadores para evitar discrepancias y garantizar alineamiento en los objetivos.

Anexo C. Tabla resultante de distancias y tiempo entre capitales de provincia de Jamaica

id1	Ciudad origen	id2	Ciudad destino	Latitud origen	Longitud origen	Latitud destino	Longitud destino	Distancia [m]	Tiempo [s]
1	Kingston	1	Kingston	18.017839	-76.8099	18.01784	-76.8099	-	-
1	Kingston	2	Morant Bay	18.017839	-76.8099	17.88094	-76.38939	61,780	6,491
1	Kingston	3	Port Antonio	18.017839	-76.8099	18.17842	-76.45192	87,633	7,457
1	Kingston	4	Port Maria	18.017839	-76.8099	18.3652	-76.89232	60,802	5,345
1	Kingston	5	Saint Ann's Bay	18.017839	-76.8099	18.43592	-77.20051	82,526	4,165
1	Kingston	6	Falmouth	18.017839	-76.8099	18.49253	-77.6565	139,728	7,329
1	Kingston	7	Montego Bay	18.017839	-76.8099	18.47562	-77.8942	170,689	9,270
1	Kingston	8	Lucea	18.017839	-76.8099	18.45025	-78.17643	207,419	11,865
1	Kingston	9	Savanna-la-Mar	18.017839	-76.8099	18.22124	-78.13305	190,683	12,190
1	Kingston	10	Black River	18.017839	-76.8099	18.03335	-77.85676	149,787	9,396
1	Kingston	11	Mandevile	18.017839	-76.8099	18.04223	-77.50973	91,455	5,311
1	Kingston	12	May Pen	18.017839	-76.8099	17.97344	-77.25191	55,479	2,639
1	Kingston	13	Spanish Town	18.017839	-76.8099	18.01579	-76.97518	25,076	1,656
2	Morant Bay	1	Kingston	17.88094	-76.38939	18.01784	-76.8099	61,934	6,514
2	Morant Bay	2	Morant Bay	17.88094	-76.38939	17.88094	-76.38939	-	-
2	Morant Bay	3	Port Antonio	17.88094	-76.38939	18.17842	-76.45192	69,405	8,912
2	Morant Bay	4	Port Maria	17.88094	-76.38939	18.3652	-76.89232	117,016	11,524
2	Morant Bay	5	Saint Ann's Bay	17.88094	-76.38939	18.43592	-77.20051	140,668	10,108
2	Morant Bay	6	Falmouth	17.88094	-76.38939	18.49253	-77.6565	197,870	13,272
2	Morant Bay	7	Montego Bay	17.88094	-76.38939	18.47562	-77.8942	228,831	15,214
2	Morant Bay	8	Lucea	17.88094	-76.38939	18.45025	-78.17643	265,561	17,809
2	Morant Bay	9	Savanna-la-Mar	17.88094	-76.38939	18.22124	-78.13305	250,427	18,139
2	Morant Bay	10	Black River	17.88094	-76.38939	18.03335	-77.85676	209,532	15,346
2	Morant Bay	11	Mandevile	17.88094	-76.38939	18.04223	-77.50973	151,200	11,260
2	Morant Bay	12	May Pen	17.88094	-76.38939	17.97344	-77.25191	115,223	8,588
2	Morant Bay	13	Spanish Town	17.88094	-76.38939	18.01579	-76.97518	84,820	7,605
3	Port Antonio	1	Kingston	18.178415	-76.45192	18.01784	-76.8099	87,625	7,519
3	Port Antonio	2	Morant Bay	18.178415	-76.45192	17.88094	-76.38939	69,656	9,028
3	Port Antonio	3	Port Antonio	18.178415	-76.45192	18.17842	-76.45192	-	-
3	Port Antonio	4	Port Maria	18.178415	-76.45192	18.3652	-76.89232	68,946	5,011
3	Port Antonio	5	Saint Ann's Bay	18.178415	-76.45192	18.43592	-77.20051	112,988	8,191
3	Port Antonio	6	Falmouth	18.178415	-76.45192	18.49253	-77.6565	170,189	11,355
3	Port Antonio	7	Montego Bay	18.178415	-76.45192	18.47562	-77.8942	201,151	13,296
3	Port Antonio	8	Lucea	18.178415	-76.45192	18.45025	-78.17643	237,880	15,891
3	Port Antonio	9	Savanna-la-Mar	18.178415	-76.45192	18.22124	-78.13305	250,185	17,081
3	Port Antonio	10	Black River	18.178415	-76.45192	18.03335	-77.85676	236,425	16,639

id1	Ciudad origen	id2	Ciudad destino	Latitud origen	Longitud origen	Latitud destino	Longitud destino	Distancia [m]	Tiempo [s]
3	Port Antonio	11	Mandevile	18.178415	-76.45192	18.04223	-77.50973	178,093	12,554
3	Port Antonio	12	May Pen	18.178415	-76.45192	17.97344	-77.25191	142,116	9,882
3	Port Antonio	13	Spanish Town	18.178415	-76.45192	18.01579	-76.97518	111,713	8,898
4	Port Maria	1	Kingston	18.365197	-76.89232	18.01784	-76.8099	60,672	5,287
4	Port Maria	2	Morant Bay	18.365197	-76.89232	17.88094	-76.38939	116,933	11,334
4	Port Maria	3	Port Antonio	18.365197	-76.89232	18.17842	-76.45192	68,627	4,873
4	Port Maria	4	Port Maria	18.365197	-76.89232	18.3652	-76.89232	-	-
4	Port Maria	5	Saint Ann's Bay	18.365197	-76.89232	18.43592	-77.20051	44,378	3,398
4	Port Maria	6	Falmouth	18.365197	-76.89232	18.49253	-77.6565	101,579	6,563
4	Port Maria	7	Montego Bay	18.365197	-76.89232	18.47562	-77.8942	132,541	8,504
4	Port Maria	8	Lucea	18.365197	-76.89232	18.45025	-78.17643	169,270	11,099
4	Port Maria	9	Savanna-la-Mar	18.365197	-76.89232	18.22124	-78.13305	181,575	12,289
4	Port Maria	10	Black River	18.365197	-76.89232	18.03335	-77.85676	235,937	14,299
4	Port Maria	11	Mandevile	18.365197	-76.89232	18.04223	-77.50973	177,605	10,213
4	Port Maria	12	May Pen	18.365197	-76.89232	17.97344	-77.25191	141,628	7,542
4	Port Maria	13	Spanish Town	18.365197	-76.89232	18.01579	-76.97518	100,414	5,588
5	Saint Ann's Bay	1	Kingston	18.435922	-77.20051	18.01784	-76.8099	82,297	4,137
5	Saint Ann's Bay	2	Morant Bay	18.435922	-77.20051	17.88094	-76.38939	140,426	10,086
5	Saint Ann's Bay	3	Port Antonio	18.435922	-77.20051	18.17842	-76.45192	112,441	8,014
5	Saint Ann's Bay	4	Port Maria	18.435922	-77.20051	18.3652	-76.89232	44,141	3,268
5	Saint Ann's Bay	5	Saint Ann's Bay	18.435922	-77.20051	18.43592	-77.20051	-	-
5	Saint Ann's Bay	6	Falmouth	18.435922	-77.20051	18.49253	-77.6565	58,063	3,405
5	Saint Ann's Bay	7	Montego Bay	18.435922	-77.20051	18.47562	-77.8942	89,025	5,346
5	Saint Ann's Bay	8	Lucea	18.435922	-77.20051	18.45025	-78.17643	125,754	7,941
5	Saint Ann's Bay	9	Savanna-la-Mar	18.435922	-77.20051	18.22124	-78.13305	138,059	9,131
5	Saint Ann's Bay	10	Black River	18.435922	-77.20051	18.03335	-77.85676	169,265	10,907
5	Saint Ann's Bay	11	Mandevile	18.435922	-77.20051	18.04223	-77.50973	143,898	7,847
5	Saint Ann's Bay	12	May Pen	18.435922	-77.20051	17.97344	-77.25191	107,922	5,175
5	Saint Ann's Bay	13	Spanish Town	18.435922	-77.20051	18.01579	-76.97518	66,708	3,221
6	Falmouth	1	Kingston	18.492527	-77.6565	18.01784	-76.8099	139,408	7,316
6	Falmouth	2	Morant Bay	18.492527	-77.6565	17.88094	-76.38939	197,537	13,265
6	Falmouth	3	Port Antonio	18.492527	-77.6565	18.17842	-76.45192	169,553	11,194
6	Falmouth	4	Port Maria	18.492527	-77.6565	18.3652	-76.89232	101,252	6,447
6	Falmouth	5	Saint Ann's Bay	18.492527	-77.6565	18.43592	-77.20051	57,614	3,430
6	Falmouth	6	Falmouth	18.492527	-77.6565	18.49253	-77.6565	-	-
6	Falmouth	7	Montego Bay	18.492527	-77.6565	18.47562	-77.8942	33,715	2,412
6	Falmouth	8	Lucea	18.492527	-77.6565	18.45025	-78.17643	70,444	5,006
6	Falmouth	9	Savanna-la-Mar	18.492527	-77.6565	18.22124	-78.13305	82,749	6,196
6	Falmouth	10	Black River	18.492527	-77.6565	18.03335	-77.85676	113,955	7,972
6	Falmouth	11	Mandevile	18.492527	-77.6565	18.04223	-77.50973	89,560	7,896

id1	Ciudad origen	id2	Ciudad destino	Latitud origen	Longitud origen	Latitud destino	Longitud destino	Distancia [m]	Tiempo [s]
6	Falmouth	12	May Pen	18.492527	-77.6565	17.97344	-77.25191	165,033	8,354
6	Falmouth	13	Spanish Town	18.492527	-77.6565	18.01579	-76.97518	123,819	6,400
7	Montego Bay	1	Kingston	18.475622	-77.8942	18.01784	-76.8099	170,561	9,218
7	Montego Bay	2	Morant Bay	18.475622	-77.8942	17.88094	-76.38939	228,690	15,167
7	Montego Bay	3	Port Antonio	18.475622	-77.8942	18.17842	-76.45192	200,705	13,096
7	Montego Bay	4	Port Maria	18.475622	-77.8942	18.3652	-76.89232	132,405	8,349
7	Montego Bay	5	Saint Ann's Bay	18.475622	-77.8942	18.43592	-77.20051	88,767	5,332
7	Montego Bay	6	Falmouth	18.475622	-77.8942	18.49253	-77.6565	33,802	2,411
7	Montego Bay	7	Montego Bay	18.475622	-77.8942	18.47562	-77.8942	-	-
7	Montego Bay	8	Lucea	18.475622	-77.8942	18.45025	-78.17643	40,887	3,294
7	Montego Bay	9	Savanna-la-Mar	18.475622	-77.8942	18.22124	-78.13305	53,191	4,484
7	Montego Bay	10	Black River	18.475622	-77.8942	18.03335	-77.85676	84,398	6,259
7	Montego Bay	11	Mandevile	18.475622	-77.8942	18.04223	-77.50973	113,191	9,424
7	Montego Bay	12	May Pen	18.475622	-77.8942	17.97344	-77.25191	196,186	10,256
7	Montego Bay	13	Spanish Town	18.475622	-77.8942	18.01579	-76.97518	154,972	8,302
8	Lucea	1	Kingston	18.45025	-78.17643	18.01784	-76.8099	207,577	11,647
8	Lucea	2	Morant Bay	18.45025	-78.17643	17.88094	-76.38939	265,706	17,596
8	Lucea	3	Port Antonio	18.45025	-78.17643	18.17842	-76.45192	237,722	15,525
8	Lucea	4	Port Maria	18.45025	-78.17643	18.3652	-76.89232	169,421	10,778
8	Lucea	5	Saint Ann's Bay	18.45025	-78.17643	18.43592	-77.20051	125,783	7,761
8	Lucea	6	Falmouth	18.45025	-78.17643	18.49253	-77.6565	70,818	4,840
8	Lucea	7	Montego Bay	18.45025	-78.17643	18.47562	-77.8942	40,746	3,221
8	Lucea	8	Lucea	18.45025	-78.17643	18.45025	-78.17643	-	-
8	Lucea	9	Savanna-la-Mar	18.45025	-78.17643	18.22124	-78.13305	34,545	3,451
8	Lucea	10	Black River	18.45025	-78.17643	18.03335	-77.85676	76,642	6,197
8	Lucea	11	Mandevile	18.45025	-78.17643	18.04223	-77.50973	131,708	10,141
8	Lucea	12	May Pen	18.45025	-78.17643	17.97344	-77.25191	169,039	12,569
8	Lucea	13	Spanish Town	18.45025	-78.17643	18.01579	-76.97518	191,988	10,731
9	Savanna-la-Mar	1	Kingston	18.221238	-78.13305	18.01784	-76.8099	190,846	11,860
9	Savanna-la-Mar	2	Morant Bay	18.221238	-78.13305	17.88094	-76.38939	250,699	17,765
9	Savanna-la-Mar	3	Port Antonio	18.221238	-78.13305	18.17842	-76.45192	250,022	16,732
9	Savanna-la-Mar	4	Port Maria	18.221238	-78.13305	18.3652	-76.89232	181,722	11,985
9	Savanna-la-Mar	5	Saint Ann's Bay	18.221238	-78.13305	18.43592	-77.20051	138,084	8,968
9	Savanna-la-Mar	6	Falmouth	18.221238	-78.13305	18.49253	-77.6565	83,119	6,047
9	Savanna-la-Mar	7	Montego Bay	18.221238	-78.13305	18.47562	-77.8942	53,047	4,429
9	Savanna-la-Mar	8	Lucea	18.221238	-78.13305	18.45025	-78.17643	34,133	3,359
9	Savanna-la-Mar	9	Savanna-la-Mar	18.221238	-78.13305	18.22124	-78.13305	-	-
9	Savanna-la-Mar	10	Black River	18.221238	-78.13305	18.03335	-77.85676	46,514	3,150
9	Savanna-la-Mar	11	Mandevile	18.221238	-78.13305	18.04223	-77.50973	101,580	7,094
9	Savanna-la-Mar	12	May Pen	18.221238	-78.13305	17.97344	-77.25191	138,911	9,522

id1	Ciudad origen	id2	Ciudad destino	Latitud origen	Longitud origen	Latitud destino	Longitud destino	Distancia [m]	Tiempo [s]
9	Savanna-la-Mar	13	Spanish Town	18.221238	-78.13305	18.01579	-76.97518	176,422	11,174
10	Black River	1	Kingston	18.033345	-77.85676	18.01784	-76.8099	149,858	9,134
10	Black River	2	Morant Bay	18.033345	-77.85676	17.88094	-76.38939	209,710	15,039
10	Black River	3	Port Antonio	18.033345	-77.85676	18.17842	-76.45192	236,269	16,294
10	Black River	4	Port Maria	18.033345	-77.85676	18.3652	-76.89232	235,533	13,913
10	Black River	5	Saint Ann's Bay	18.033345	-77.85676	18.43592	-77.20051	169,690	10,857
10	Black River	6	Falmouth	18.033345	-77.85676	18.49253	-77.6565	114,202	7,870
10	Black River	7	Montego Bay	18.033345	-77.85676	18.47562	-77.8942	84,130	6,252
10	Black River	8	Lucea	18.033345	-77.85676	18.45025	-78.17643	76,515	6,215
10	Black River	9	Savanna-la-Mar	18.033345	-77.85676	18.22124	-78.13305	46,391	3,189
10	Black River	10	Black River	18.033345	-77.85676	18.03335	-77.85676	-	-
10	Black River	11	Mandevile	18.033345	-77.85676	18.04223	-77.50973	60,592	4,368
10	Black River	12	May Pen	18.033345	-77.85676	17.97344	-77.25191	97,922	6,795
10	Black River	13	Spanish Town	18.033345	-77.85676	18.01579	-76.97518	135,433	8,448
11	Mandevile	1	Kingston	18.042225	-77.50973	18.01784	-76.8099	91,714	5,207
11	Mandevile	2	Morant Bay	18.042225	-77.50973	17.88094	-76.38939	151,566	11,111
11	Mandevile	3	Port Antonio	18.042225	-77.50973	18.17842	-76.45192	178,125	12,367
11	Mandevile	4	Port Maria	18.042225	-77.50973	18.3652	-76.89232	177,388	9,986
11	Mandevile	5	Saint Ann's Bay	18.042225	-77.50973	18.43592	-77.20051	143,700	7,729
11	Mandevile	6	Falmouth	18.042225	-77.50973	18.49253	-77.6565	89,957	7,822
11	Mandevile	7	Montego Bay	18.042225	-77.50973	18.47562	-77.8942	112,882	9,505
11	Mandevile	8	Lucea	18.042225	-77.50973	18.45025	-78.17643	131,556	10,324
11	Mandevile	9	Savanna-la-Mar	18.042225	-77.50973	18.22124	-78.13305	101,432	7,298
11	Mandevile	10	Black River	18.042225	-77.50973	18.03335	-77.85676	60,537	4,504
11	Mandevile	11	Mandevile	18.042225	-77.50973	18.04223	-77.50973	-	-
11	Mandevile	12	May Pen	18.042225	-77.50973	17.97344	-77.25191	39,778	2,868
11	Mandevile	13	Spanish Town	18.042225	-77.50973	18.01579	-76.97518	77,289	4,521
12	May Pen	1	Kingston	17.973441	-77.25191	18.01784	-76.8099	55,463	2,659
12	May Pen	2	Morant Bay	17.973441	-77.25191	17.88094	-76.38939	115,315	8,564
12	May Pen	3	Port Antonio	17.973441	-77.25191	18.17842	-76.45192	141,874	9,819
12	May Pen	4	Port Maria	17.973441	-77.25191	18.3652	-76.89232	141,137	7,438
12	May Pen	5	Saint Ann's Bay	17.973441	-77.25191	18.43592	-77.20051	107,449	5,181
12	May Pen	6	Falmouth	17.973441	-77.25191	18.49253	-77.6565	164,650	8,345
12	May Pen	7	Montego Bay	17.973441	-77.25191	18.47562	-77.8942	195,612	10,287
12	May Pen	8	Lucea	17.973441	-77.25191	18.45025	-78.17643	169,229	12,938
12	May Pen	9	Savanna-la-Mar	17.973441	-77.25191	18.22124	-78.13305	139,105	9,911
12	May Pen	10	Black River	17.973441	-77.25191	18.03335	-77.85676	98,210	7,118
12	May Pen	11	Mandevile	17.973441	-77.25191	18.04223	-77.50973	39,878	3,033
12	May Pen	12	May Pen	17.973441	-77.25191	17.97344	-77.25191	-	-
12	May Pen	13	Spanish Town	17.973441	-77.25191	18.01579	-76.97518	41,038	1,973

id1	Ciudad origen	id2	Ciudad destino	Latitud origen	Longitud origen	Latitud destino	Longitud destino	Distancia [m]	Tiempo [s]
13	Spanish Town	1	Kingston	18.015793	-76.97518	18.01784	-76.8099	24,891	1,634
13	Spanish Town	2	Morant Bay	18.015793	-76.97518	17.88094	-76.38939	84,744	7,539
13	Spanish Town	3	Port Antonio	18.015793	-76.97518	18.17842	-76.45192	111,302	8,795
13	Spanish Town	4	Port Maria	18.015793	-76.97518	18.3652	-76.89232	100,508	5,549
13	Spanish Town	5	Saint Ann's Bay	18.015793	-76.97518	18.43592	-77.20051	66,820	3,292
13	Spanish Town	6	Falmouth	18.015793	-76.97518	18.49253	-77.6565	124,021	6,457
13	Spanish Town	7	Montego Bay	18.015793	-76.97518	18.47562	-77.8942	154,983	8,398
13	Spanish Town	8	Lucea	18.015793	-76.97518	18.45025	-78.17643	191,712	10,993
13	Spanish Town	9	Savanna-la-Mar	18.015793	-76.97518	18.22124	-78.13305	176,418	11,504
13	Spanish Town	10	Black River	18.015793	-76.97518	18.03335	-77.85676	135,523	8,711
13	Spanish Town	11	Mandevile	18.015793	-76.97518	18.04223	-77.50973	77,190	4,626
13	Spanish Town	12	May Pen	18.015793	-76.97518	17.97344	-77.25191	41,214	1,954
13	Spanish Town	13	Spanish Town	18.015793	-76.97518	18.01579	-76.97518	-	-

Tabla 6.1: Distancias y tiempo de las relaciones establecidas entre capitales de provincia [Fuente: propia]