



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO MEDIOAMBIENTAL DEL NUEVO “CROSSRAIL” DE LONDRES

Trabajo realizado por:
Alicia Serrano Ferrer

Dirigido:
Saúl Torres Ortega
Pedro Díaz Simal

Titulación:
**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, julio de 2017

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

RESUMEN

“Análisis Coste-Beneficio Medioambiental del nuevo “Crossrail” de Londres”

Autor: Alicia Serrano Ferrer

Directores: Saúl Torres Ortega y Pedro Díaz Simal

Convocatoria: Santander, julio 2017

Palabras clave: Análisis Coste-Beneficio Medioambiental, rentabilidad, inversión, indicador de rentabilidad, VAN (Valor Actualizado Neto), variables críticas, análisis de sensibilidad, análisis de escenarios, análisis de riesgo, tráfico ferroviario Londres, congestión ferroviaria, transporte urbano Londres, Crossrail.

RESUMEN

Londres es considerada como una de las capitales más importantes del mundo, siendo la segunda ciudad más grande de Europa, y la mayor del continente en cuanto a su área metropolitana. Dada la alta densidad de población de la ciudad, es de vital importancia establecer unos sistemas de transporte urbanos eficientes, facilitando el transporte de pasajeros en la ciudad y reduciendo el impacto ambiental causado por las emisiones a la atmósfera por parte de vehículos particulares.

Pero el Plan de Transporte de la ciudad del año 2000 estableció que la situación del transporte ferroviario de este a oeste de la ciudad había llegado casi a su tope de capacidad, en el que los pasajeros sufrían numerosos retrasos, difíciles conexiones de intercambio, y una gran congestión en trenes y estaciones. A todo esto, se suma, además, el problema del crecimiento de la población en años futuros.

Dada la importancia económica de la ciudad de Londres tanto para el país como para todo Europa, esta situación no provocaría más que una barrera al crecimiento económico del continente.

Por ello, se plantea en este trabajo el análisis de la inversión realizada para el Crossrail, un nuevo ferrocarril que atravesará la ciudad de este a oeste, ofreciendo a los pasajeros una mayor frecuencia, capacidad y accesibilidad que la actual. Además, estaría conectado a las líneas ferroviarias nacionales, metro, y tren de cercanías de la ciudad existentes.

La construcción comenzó finalmente en el año 2012, y para el año 2019 abrirá completamente sus puertas, aliviando la congestión, mejorando las conexiones y reduciendo el tiempo de viaje. Además, propiciará la regeneración urbana de ciertas áreas de la ciudad, disminuirá el impacto ambiental en la ciudad, y propiciará el crecimiento económico tanto para la ciudad como para todo el país.

El estudio se ha basado en la metodología del Análisis Coste-Beneficio Medioambiental, un método que, tras analizar los ingresos y costes derivados del proyecto, los compara monetariamente y establece si éste es rentable socioeconómicamente y medioambientalmente. El objetivo principal fijado, ha sido, por lo tanto, la determinación de la viabilidad socioeconómica y medioambiental de la inversión, es decir, su rentabilidad para la sociedad. Para ello, se ha estructurado el documento en distintos apartados.

En primer lugar, se ha estudiado la metodología del Análisis Coste-Beneficio Medioambiental, cuyo objetivo es la ayuda a la toma de decisiones, facilitar un uso más eficiente de los recursos públicos de la sociedad. Se ha analizado brevemente su desarrollo histórico, tipología de análisis, principios y procedimiento, estudiando sus distintas fases para posteriormente poder aplicarlas al caso particular del Crossrail.

En segundo lugar, se ha descrito el proyecto del Crossrail en profundidad: los problemas de movilidad urbana ferroviaria existentes actualmente, los antecedentes históricos del Crossrail, sus objetivos, y consecuencias que supondrá para el futuro de la ciudad. Los principales problemas que en un futuro solucionará el Crossrail son la saturación de la red ferroviaria nacional, metro, y cercanías en horas punta; el crecimiento progresivo de la demanda futura; las malas conexiones con la periferia de la ciudad; la dificultad del transporte de mercancías; y la deficitaria conexión con el aeropuerto de Heathrow, entre otros.

Una vez conocida la metodología a utilizar, y descrito el proyecto, se ha aplicado dicha metodología al Crossrail, consistiendo en primer lugar en fijar los parámetros básicos: la tasa de descuento, el horizonte temporal, y el año de referencia. La tasa de descuento se ha establecido en un 4%, siguiendo las recomendaciones europeas. El horizonte temporal ha sido establecido como 50 años, algo mayor de lo habitual para proyectos ferroviarios, ya que, al introducir los impactos medioambientales, se alargan más en el tiempo. Por último, el año de referencia fijado ha sido el 2012, el inicio de la construcción, estudiando el proyecto como si estuviéramos en el año de inicio de la construcción.

Tras esto, se han obtenido tanto los ingresos como los costes asociados al proyecto. Algunos de dichos costes e ingresos, se han obtenido directamente en unidades monetarias. Pero otros, especialmente los medioambientales, no, por lo que ha habido que transformarlos monetariamente. Esta ha sido una tarea especialmente difícil, debido tanto a la dificultad de obtención de datos fiables, como a la transformación en unidades monetarias adecuada. Una vez se han obtenido todos los ingresos y costes en términos monetarios, distribuidos cada uno en sus espacios temporales, se ha procedido a la obtención de resultados.

Los primeros resultados obtenidos han sido los indicadores de rentabilidad: el Valor Actualizado Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), y el ratio Beneficio/Coste. Se exponen los resultados a continuación:

VAN	£2.814.590.506,26
TIR	4,9085%
Ratio Coste/Beneficio	1,13

El VAN (resultado de sustraer los costes a los ingresos, cada uno repartido en sus respectivos espacios temporales, y todos descontados al año de referencia según la tasa de descuento) tiene un valor positivo; el TIR se encuentra por encima de los valores actuales de interés del mercado; y el ratio Coste/Beneficio ha resultado ser mayor que 1, lo que significa que, por cada libra invertida, se recuperan 1,13 libras. Por lo tanto, los tres indicadores muestran que la inversión es rentable socioeconómicamente y medioambientalmente.

Pero los indicadores de rentabilidad han sido estudiados aceptando una gran incertidumbre, por lo que, tras ello, se ha realizado un Análisis de Sensibilidad, para encontrar las variables críticas, aquellas que al variar un 1% varían el indicador de rentabilidad, el VAN en este caso, como mínimo en un 1%. Las variables críticas han resultado ser los costes de construcción, la tasa de descuento, los ingresos por la tarifa de transporte, la disminución del tiempo de viaje, los costes de operación y mantenimiento, y creación de empleo en los servicios del Crossrail. Se ha observado que las variables han de variar en un porcentaje muy alto para modificar el VAN notablemente, y con ello, disminuir hasta ser negativo, por lo que el proyecto es estable económicamente.

El Análisis de Escenarios se ha realizado modificando todas las variables críticas a la vez en unos porcentajes determinados en cada caso, obteniendo dos escenarios pesimistas, dos optimistas, y el escenario base. El escenario más pesimista sigue obteniendo un VAN positivo, por lo tanto, el proyecto seguiría siendo rentable, aunque en menor medida.

Por último, se ha realizado un Análisis de Riesgo, para estudiar la probabilidad que tiene un proyecto de llevarse a cabo de manera satisfactoria pese a su gran incertidumbre. Los indicadores de rentabilidad podrían llegar a ser muy diferentes a los obtenidos si el valor de los costes e ingresos varía, pudiendo obtener un beneficio social y medioambiental menor del esperado. En dicho análisis, todas las variables variarán aleatoriamente según diferentes distribuciones probabilísticas, dentro de un rango prefijado. Dicho proceso se ha realizado 1.000 veces, obteniendo de esta manera la curva de probabilidad del VAN.

Se han estudiado dos Análisis de Riesgo diferentes: uno en el que todas las variables se rigen según una distribución probabilística uniforme; y otro en el que aquellas variables que sea posible, se rigen por una distribución triangular, manteniendo la uniforme en las demás. En el Caso 1, la probabilidad de obtención de un VAN negativo ha resultado ser de un 6%, mientras que en el Caso 2, al acotar la incertidumbre por medio de las distribuciones triangulares, la probabilidad de que la inversión no sea rentable, es decir, de obtener un VAN negativo, es aproximadamente

de un 0%. En este último caso no existiría riesgo para la inversión, pero incluso un 6%, sería asumible.

En vista de todo lo expuesto, se han cumplido los objetivos del trabajo, y se ha llegado a la conclusión de que el proyecto del Crossrail es altamente rentable socioeconómicamente y medioambientalmente, por lo que ha sido una buena elección para la ciudad de Londres, que podrá beneficiarse de sus servicios completamente a partir del año 2019.

Dicho estudio refuerza la idea de que las siguientes actuaciones en la ciudad deberían estar encaminadas a conseguir una mejor conectividad en otras líneas ferroviarias de la ciudad, como puede ser la norte-sur, mediante el proyecto ahora en temprana fase de estudio del Crossrail 2.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Boardman, A.E., Greenberg, D.H., Vining, A.R. & Weimer, D.L. (2010). *Cost-benefit analysis: concepts and practice*. (4ª Edición) New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.

Buchanan, P. (Octubre 2007). *The Economic Benefits of Crossrail. Final Report*. London: Newcombe House.

Crossrail. <http://www.crossrail.co.uk/>

Crossrail 2. <http://crossrail2.co.uk/discover/history/>

European Commission. (Diciembre 2014). *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*. Bruselas: Luxembourg Publications Office of the European Union.

Odeck, J. (2016). Diapositivas docencia asignatura “*Economics of transport infrastructure*”. Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, Trondheim.

Pearce, D., Atkinson, G. & Mourato, S. (2006). *Cost-Benefit Analysis and the Environment. Recent Developments*. París: OECD Publishing.

Torres, S. (2014). *Nuevos problemas en la evaluación de proyectos de ingeniería: Evaluación de la vulnerabilidad de la percepción del riesgo en el análisis coste-beneficio medioambiental* (Tesis Doctoral). Recuperada de <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/5842>

Torres, S. (2017). Diapositivas docencia asignatura “*Evaluación de Proyectos y Servicios Públicos*”. Universidad de Cantabria, Santander.

Transport for London. (2011). *Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS)*. United Kingdom.

Transport for London. <https://tfl.gov.uk/corporate/safety-and-security/road-safety/london-collision>.

ABSTRACT

“Environmental Cost-Benefit Analysis of the new London Crossrail”

Author: Alicia Serrano Ferrer

Directors: Saúl Torres Ortega y Pedro Díaz Simal

Date: Santander, July 2017

Keywords: Environmental Cost-Benefit Analysis, viability, investment, performance indicator, Net Present Value (NPV), critical variables, sensitivity analysis, scenarios assessment, risk assessment, London railway traffic, railway congestion, urban mobility London, Crossrail.

ABSTRACT

London is considered one of the most important capital city in the World, being the second largest city in Europe, and the largest in the continent in terms of its metropolitan area. Given its high population density, it is crucial to establish efficient urban transport systems, improving people transfer in the city and reducing the huge environmental impact caused by private vehicles emissions.

However, the Transportation Plan of 2000, established that the situation of the city's railway public transportation from East to West of the city had almost reached its capacity, where passengers suffered numerous delays, difficult connections and a great congestion in trains and stations. Besides, we must not forget the problem of population growth in the following years.

Given the economic importance of the city of London, both for the country and for Europe, this situation would only create a barrier against the continent's economic growth.

Therefore, the analysis of the investment made for the new Crossrail, a new railway through the city of London, from East to West, is proposed in this project, offering a greater frequency, capacity and accessibility to the passengers of London. In addition, it would be connected to the existing national railway lines, subway, and light railway.

The construction works finally started in 2012, and the project will completely open its doors in 2019, relieving congestion, improving connections and reducing travel time. In addition, it will promote the urban regeneration of certain areas of the city, will reduce the environmental impact, and will increase the economic growth for both the city and the country.

The study has followed the Environmental Cost-Benefit Analysis methodology, which, after analyzing income and costs produced by a project, compares them in monetary terms and asserts if the project is socioeconomically and environmentally profitable. The main objective of the study has been, therefore, to determine the socioeconomic and environmental viability of the investment made for the Crossrail. The document has been structured in different sections.

Firstly, the Environmental Cost-Benefit Analysis methodology has been studied, whose main objective is to aid in the decision-making; to facilitate a more efficient use of the public resources of the society. It has been briefly analyzed its historical development, typology of analysis, principles and procedure, including its nine different phases to allow us to apply it afterwards to the case of the Crossrail.

Secondly, the Crossrail project has been described in detail: current urban railway mobility problems in London, the historical background of the Crossrail, its objectives, and the consequences it will brought to the city. The main mobility problems that Crossrail will solve in the future, are the railway network and subway congestion; the progressive increase of the future demand; the poor connections with the suburbs of the city; the difficulty of the freight transport; and the lack of connection with Heathrow Airport, among others.

Once the methodology has been studied and the Crossrail project described, this methodology has been applied to the Crossrail. First, the basic parameters have been fixed: the discount rate, the time horizon, and the reference year. The discount rate has been set at 4%, following the European recommendations. The time horizon has been established at 50 years, higher than the usual value for railway projects, since, when introducing environmental impact, time horizon is lengthened. Finally, the reference year has been set in 2012, the beginning of the construction works, studying the project as if we were starting the construction of the project.

After the last step, incomes and costs associated with the project have been obtained. Some of these costs and revenues have been obtained directly in monetary terms. Nevertheless, others, especially the environmental ones, have not, so they have had to be monetarily transformed. It has been an especially difficult task, due both to the difficulty of obtaining reliable data, and to the transformation into adequate monetary terms. Once all the impacts have been transformed into monetary terms, and each one of them distributed in their time horizon, results have been obtained.

The firsts results obtained were the performance indicators: The Net Present Value (NPV), the Internal Rate of Return (IRR) and the Benefit/Cost ratio. These results are presented in the table below:

NPV	£2.814.590.506,26
IRR	4,9085%
Benefit/Cost ratio	1,13

The Net Present Value (NPV), (calculated by deducting costs from incomes, each one of them divided into their respective time horizons, all discounted by the discount rate to the reference year) has a positive value; the Internal Rate of Return (IRR) is above the current market interest values; and the Benefit/Cost ratio is greater than 1, which means that for each pound invested, 1.13 pounds are recovered. Therefore, the three indicators show that the investment is socioeconomically and environmentally profitable.

Nevertheless, the profitability indicators have been studied accepting a great uncertainty, so that, after this, a sensitivity analysis has been performed, to find the critical variables, those ones that varying a 1%, will vary the performance indicator, the NPV in this case, by at least 1%. The critical variables have been the construction costs, the discount rate, the transport fee income, travel time reduction incomes, operating and maintenance costs, and employment generation in the Crossrail operation and construction. It has been observed that the critical variables need to vary in a very high percentage to modify the NPV significantly, and therefore, to decrease the NPV until negative values. That is the reason why the project is economically stable.

The scenarios assessment has been developed by modifying all the critical variables simultaneously in a different fixed percentage each one of them, obtaining as result two pessimistic scenarios, two optimistic, and the base scenario. The most pessimistic scenario still has a positive value of the NPV, therefore, the project would still be profitable.

Finally, a risk assessment has been carried out to study the probability that a project has to be developed satisfactorily despite its great uncertainty. The performance indicators, could turn out to be very different from those obtained in the base case if the value of the costs and incomes varies, being able to obtain a smaller social and environmental benefit than expected. In this analysis, all variables will vary randomly, according to different probabilistic distributions, within a prefixed range. This process has been performed 1.000 times, thus obtaining the probability curve for the Net Present Value.

Two different risk assessments have been carried out: the first one, in which all variables are governed by a uniform probabilistic distribution; and the second one, in which those variables in which it is possible, are governed by a triangular distribution, maintaining the uniform distribution in the remaining ones. In Case 1, the probability of obtaining a negative value of the NPV has turned out to be 6%, while in Case 2, when uncertainty is limited by triangular distributions, the probability of the investment not being profitable, that means, of obtaining a negative value of the NPV, is approximately 0%. In the last case, there would be no investment risk, but even a 6% would be a risk acceptable value.

In conclusion, the objectives of the project have been fulfilled, and it has been concluded that the Crossrail project is highly cost-effective both socioeconomically and

environmentally, making it a good choice for the citizens of London, who will be able to completely profit from its services by the year 2019.

This study reinforces the idea that the next developments in the city should be aimed at achieving a better connection in other railway lines in the city, such as the North-South line, by means of the project Crossrail 2, which is nowadays at an early study stage.

MAIN REFERENCES

Boardman, A.E., Greenberg, D.H., Vining, A.R. & Weimer, D.L. (2010). *Cost-benefit analysis: concepts and practice*. (4th Edition) New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.

Buchanan, P. (Octubre 2007). *The Economic Benefits of Crossrail. Final Report*. London: Newcombe House.

Crossrail. <http://www.crossrail.co.uk/>

Crossrail 2. <http://crossrail2.co.uk/discover/history/>

European Commission. (Diciembre 2014). *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*. Brussels: Luxembourg Publications Office of the European Union.

Odeck, J. (2016). Lectures subject “*Economics of transport infrastructure*”. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Pearce, D., Atkinson, G. & Mourato, S. (2006). *Cost-Benefit Analysis and the Environment. Recent Developments*. Paris: OECD Publishing.

Torres, S. (2014). *Nuevos problemas en la evaluación de proyectos de ingeniería: Evaluación de la vulnerabilidad de la percepción del riesgo en el análisis coste-beneficio medioambiental* (PhD Tesis). Retrieved from: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/5842>

Torres, S. (2017). Lecture subject “*Evaluación de Proyectos y Servicios Públicos*”. University of Cantabria, Santander.

Transport for London. (2011). *Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS)*. United Kingdom.

Transport for London. <https://tfl.gov.uk/corporate/safety-and-security/road-safety/london-collision>.

ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO MEDIOAMBIENTAL DEL NUEVO “CROSSRAIL” DE LONDRES

Alumno: Alicia Serrano Ferrer

Tutores: Saúl Torres Ortega y Pedro Díaz Simal

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Santander

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Julio 2017

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción	17
1.1	Objetivos	18
2	Análisis Coste-Beneficio Medioambiental	20
2.1	Definición y Objetivos	20
2.2	Desarrollo histórico	21
2.3	Tipología	23
2.4	Principios del Análisis Coste-Beneficio	24
2.4.1	Criterio de Pareto	25
2.4.2	Criterio de Kaldor-Hicks	25
2.5	Procedimiento	26
2.5.1	Descripción del contexto y objetivos	27
2.5.2	Descripción de las alternativas de proyectos	28
2.5.3	Definición de los parámetros básicos	29
2.5.4	Identificación de los impactos	30
2.5.5	Valoración de los impactos	31
2.5.6	Obtención de los indicadores de rentabilidad	33
2.5.7	Análisis de sensibilidad	35
2.5.8	Análisis de riesgo	36
2.5.9	Recomendación en la toma de decisiones	36
3	Caso de estudio: El Crossrail de Londres	37
3.1	Situación Actual: Problemas	37
3.1.1	Saturación de la red en horas punta	37
3.1.2	Saturación fuera de las horas punta	40
3.1.3	Crecimiento de la demanda futura	40
3.1.4	Regeneración urbana	41
3.1.5	Periferia de la ciudad	42
3.1.6	Transporte de mercancías	42
3.1.7	Aeropuerto de Heathrow	42
3.2	Antecedentes Históricos	43
3.3	Proyecto Crossrail de Londres	46
3.3.1	Descripción	46
3.3.2	Objetivos	46
3.3.3	Construcción	47
3.4	Consecuencias del Crossrail	55
3.4.1	Alivio de la congestión	55
3.4.2	Mejora de las conexiones y reducción del tiempo de viaje	57
3.4.3	Regeneración urbana y crecimiento económico	59
3.4.4	Otras mejoras	59
		10

4	Aplicación y Análisis	60
4.1	Parámetros básicos	60
4.2	Obtención de los Costes e Ingresos	60
4.2.1	Costes de Construcción	60
4.2.2	Costes de Operación, Mantenimiento y Renovación	63
4.2.3	Impactos medioambientales durante la construcción	65
4.2.4	Impactos sociales debido a la afección de las obras	69
4.2.5	Ingresos debidos a la tarifa del transporte	69
4.2.6	Beneficios Sociales	71
4.2.7	Beneficios medioambientales en fase de operación	82
4.3	Resumen de Costes e Ingresos	84
5	Resultados	86
5.1	Indicadores de Rentabilidad	86
5.1.1	Valor Actualizado Neto	86
5.1.2	Tasa Interna de Retorno	88
5.1.3	Ratio Beneficio/Coste	88
5.2	Análisis de Sensibilidad	89
5.3	Análisis de Escenarios	92
5.3.1	Escenario Base	92
5.3.2	Escenario Pesimista	92
5.3.3	Escenario Pesimista-Base	93
5.3.4	Escenario Base-Optimista	93
5.3.5	Escenario Optimista	94
5.3.6	Comparación de Escenarios	94
5.4	Análisis de Riesgo	95
5.4.1	Distribuciones probabilísticas	95
5.4.2	Caso 1	97
5.4.3	Caso 2	97
5.4.4	Simulación de Montecarlo	98
6	Conclusiones	104
7	El siguiente paso: Crossrail 2	105
7.1	Descripción	105
7.2	Antecedentes Históricos	106
7.3	Consecuencias Crossrail 2	107
7.3.1	Mejoras de transporte	107
7.3.2	Oportunidades de empleo	109
7.3.3	Regeneración urbana	110
8	Bibliografía	111

9	Anexos	113
9.1	Anexo 1: Código RStudio para el Análisis de Riesgo	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Objetivos de cada tipología de Análisis Coste-Beneficio. Fuente: Boardman et al. Cost-benefit analysis: concepts and practice (2010).	24
Tabla 2. Fases del Análisis Coste-Beneficio. Fuente: Elaboración propia.	27
Tabla 3. Horizontes temporales propuestos por la Comisión Europea. Fuente: European Commission. Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects (2014).	29
Tabla 4. Interpretación del VAN. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 5. Ejemplos reducción tiempos de viaje por rutas. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).	57
Tabla 6. Distribución inicial de los costes de construcción del Crossrail. Fuente: Crossrail London. The Montague Review (2004).	60
Tabla 7. Distribución final de los costes de construcción del Crossrail. Fuente: Crossrail London. The Montague Review (2004).	62
Tabla 8. Distribución de los costes de operación, mantenimiento y renovación del Crossrail. Fuente: Crossrail London. The Montague Review (2004).	64
Tabla 9. Conversión coste toneladas de contaminante emitido. Fuente: Bickel, P. et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (2006).	66
Tabla 10. Monetización de costes por emisiones de CO ₂ . Fuente: Bickel, P. et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (2006).	68
Tabla 11. Criterios mínimos para beneficiarse de las medidas de mitigación del ruido. Fuente: Crossrail London. Noise and vibration mitigation scheme.	69
Tabla 12. Ejemplos de reducción de tiempo de viaje con el Crossrail. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).	75
Tabla 13. Coste del tiempo en Reino Unido. Fuente: Bickel, P. et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (2006).	75
Tabla 14. Porcentajes del motivo de los viajes en la ciudad de Londres. Fuente: Transport for London. Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS) (2011).	76
Tabla 15. Costes por accidente en función de la gravedad de los mismos. Fuente: Bickel, P. et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (2006).	78
Tabla 16. Porcentaje de cada tipo de accidente en la ciudad de Londres. Fuente: Transport for London. Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS) (2011).	79
Tabla 17. Porcentajes de los viajes en función del modo de transporte en la ciudad de Londres. Fuente: Transport for London. Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS) (2011).	79
Tabla 18. Accidentes evitados anualmente en presencia del Crossrail. Fuente: Elaboración propia.	80
Tabla 19. Monetización de costes por emisiones de CO ₂ . Fuente: Bickel, P. et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (2006).	83
Tabla 20. Cómputo anual de todos los impactos. Fuente: Elaboración propia.	86
Tabla 21. Variación del VAN al modificar en un 1% el valor de cada impacto. Fuente: Elaboración Propia.	89
Tabla 22. Resumen indicadores de rentabilidad para cada escenario. Fuente: Elaboración propia.	94
Tabla 23. Rango de valores de cada variable para el análisis de riesgo para el Caso 1. Fuente: Elaboración propia.	97
Tabla 24. Rango de valores de cada variable para el análisis de riesgo para el Caso 2. Fuente: Elaboración propia.	98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Descripción del Criterio de Pareto. Fuente: Odeck. Diapositivas docencia asignatura “Economics of transport infrastucture” (2016).</i>	25
<i>Ilustración 2. Criterios Kaldor-Hicks y Pareto. Fuente: Torres. Diapositivas docencia asignatura “Evaluación de Proyectos y Servicios Públicos” (2016).</i>	26
<i>Ilustración 3. Willignes to pay. Fuente: Odeck. Diapositivas docencia asignatura “Economics of transport infrastucture” (2016).</i>	32
<i>Ilustración 4. Coste generalizado y excedente del consumidor. Fuente: Odeck. Diapositivas docencia asignatura “Economics of transport infrastucture” (2016).</i>	32
<i>Ilustración 5. Eficiencia óptima de los recursos. Fuente: Boardman et al. Cost-benefit analysis: concepts and practice (2010).</i>	34
<i>Ilustración 6. Descripción de la Tasa Interna de Retorno. Fuente: Economipedia. http://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html</i>	35
<i>Ilustración 7. Congestión del ferrocarril en horas punta del año 2006 sin Crossrail. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).</i>	38
<i>Ilustración 8. Congestión del metro y tren de cercanías (DLR) en horas punta del año 2006 sin Crossrail. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).</i>	38
<i>Ilustración 9. Esquema del Crossrail propuesto en 1974. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	44
<i>Ilustración 10. Mapa Crossrail propuesto en mayo de 2002. Fuente: Crossrail. Crossrail line 1: Stakeholder Consultation (2002).</i>	45
<i>Ilustración 11. Proyecto Crossrail. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).</i>	46
<i>Ilustración 12. Proceso de construcción del Crossrail. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	47
<i>Ilustración 13. Sección transversal de los túneles. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	48
<i>Ilustración 14. Tramos de túneles del Crossrail. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	48
<i>Ilustración 15. Dovelas utilizadas en los túneles del Crossrail. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	49
<i>Ilustración 16. Construcción estaciones subterráneas. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	50
<i>Ilustración 17. Imagen ejemplo de las nuevas estaciones, estación de Woolwich. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	52
<i>Ilustración 18. Tren de hormigonado. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	53
<i>Ilustración 19. Pórticos para la construcción. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	53
<i>Ilustración 20. Plataforma de perforación para líneas eléctricas. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	54
<i>Ilustración 21. Longitud de los nuevos trenes del Crossrail Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	55
<i>Ilustración 22. Alivios en la congestión con el Crossrail por orígenes. Fuente: Crossrail. Distribution of Crossrail Benefits (2009).</i>	56
<i>Ilustración 23. Alivios en la congestión con el Crossrail por destinos. Fuente: Crossrail. Distribution of Crossrail Benefits (2009).</i>	56
<i>Ilustración 24. Disminución en tiempos de viaje con el Crossrail por orígenes. Fuente: Crossrail. Distribution of Crossrail Benefits (2009).</i>	58

<i>Ilustración 25. Disminución en tiempos de viaje con el Crossrail por destinos. Fuente: Crossrail.</i>	
<i>Distribution of Crossrail Benefits (2009).</i>	58
<i>Ilustración 26. Impacto puestos de trabajo. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report. (2011)</i>	59
<i>Ilustración 27. Localización por regiones de los principales contratos del Crossrail en Reino Unido. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	72
<i>Ilustración 28. Fuente: Crossrail. http://www.crossrail.co.uk/</i>	73
<i>Ilustración 29. Disminución de la congestión en el metro de Londres en presencia del Crossrail estimado para el año 2026. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).</i>	74
<i>Ilustración 30. Disminución de la congestión en el ferrocarril existente de Londres en presencia del Crossrail estimado para el año 2026. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).</i>	74
<i>Ilustración 31. Mapa de colisiones en la ciudad de Londres en el año 2015 (fatales, graves y leves). Fuente: Transport for London. https://tfl.gov.uk/corporate/safety-and-security/road-safety/london-collision.</i>	78
<i>Ilustración 32. Áreas regeneradas con el proyecto del Crossrail. Fuente: Crossrail London Rail Links Ltd, Strategic Rail Authority and Transport for London. The Crossrail Business Case (2003).</i>	81
<i>Ilustración 33. Mapa Crossrail 2015. Fuente: Crossrail 2. http://crossrail2.co.uk/discover/history/</i>	105
<i>Ilustración 34. Dos posibles rutas del Crossrail 2 del año 2013. Fuente: Crossrail 2. http://crossrail2.co.uk/discover/history/</i>	106
<i>Ilustración 35. Unión ferroviaria en Reino Unido. Fuente: Crossrail 2. http://crossrail2.co.uk/discover/history/</i>	107
<i>Ilustración 36. Reducción de la congestión con el Crossrail 2. Fuente: Crossrail 2. http://crossrail2.co.uk/discover/history/</i>	108
<i>Ilustración 37. Cadena de suministro estimada para el Crossrail 2. Fuente: Crossrail 2. http://crossrail2.co.uk/discover/history/</i>	109

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Estimación del crecimiento de la demanda futura. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).	41
Gráfico 2. Inflación Reino Unido 2002-2012. Fuente: Banco Mundial.	63
Gráfico 3. Porcentaje de los viajes en Londres en función del motivo de viaje, años 2005-2010. Fuente: Transport for London. Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS) (2011).	76
Gráfico 4. Aumento de la demanda del transporte público con la disminución de la congestión. Fuente: Buchanan, P. The Economic Benefits of Crossrail. Final Report (2007).	77
Gráfico 5. Porcentaje de los viajes en Londres en función del modo de transporte, años 2005-2010. Fuente: Transport for London. Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS) (2011).	80
Gráfico 6. Precio medio de la vivienda en Inglaterra. Fuente: HM Land Registry and Office for National Statistics.	82
Gráfico 7. Distribución de los costes. Fuente: Elaboración propia.	85
Gráfico 8. Distribución de los ingresos. Fuente: Elaboración propia	85
Gráfico 9. Beneficios anuales descontados al año 2012. Fuente: Elaboración propia.	87
Gráfico 10. Beneficios acumulados descontados al año 2012. Fuente: Elaboración propia.	88
Gráfico 11. Influencia de los impactos en el VAN al variar estos un 1%. Fuente: Elaboración propia.	90
Gráfico 12. Variación del VAN en función de la variación porcentual de las variables críticas. Fuente: Elaboración propia.	91
Gráfico 13. VAN en función de los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.	94
Gráfico 14. Función de densidad de la distribución uniforme.	95
Gráfico 15. Función de densidad de la distribución triangular	96
Gráfico 16. Función de Densidad del VAN del Caso 1. Fuente: Elaboración propia.	99
Gráfico 17. Función de Distribución del VAN del Caso 1. Fuente: Elaboración propia.	99
Gráfico 18. Función de Densidad del VAN del Caso 2. Fuente: Elaboración propia.	100
Gráfico 19. Función de Distribución del VAN del Caso 2. Fuente: Elaboración propia.	101
Gráfico 20. Funciones de densidad del VAN para ambos casos. Fuente: Elaboración propia.	102
Gráfico 21. Funciones de distribución del VAN para ambos casos. Fuente: Elaboración	102

1 INTRODUCCIÓN

Londres es considerada como una de las capitales más importantes del mundo, tanto por su historia como posición política y económica, teniendo una autonomía política mayor que cualquiera de las otras ciudades del Reino Unido.

Se sitúa como la segunda ciudad más grande de Europa, con un área urbana de más de 8 millones de habitantes. Pero su área metropolitana resulta ser la mayor del continente, repartida en diferentes distritos urbanos, de los cuales, el centro es donde se distribuye la organización de la ciudad.

Debido a la alta densidad de población existente en la ciudad, resulta de vital importancia establecer unos sistemas de transporte urbanos más eficientes, para así lograr una mejor organización de los viajeros, donde todo ciudadano sea capaz de acceder a cualquier punto de la ciudad mediante el transporte público, sea cual sea el modo de transporte. Una red de transporte urbano eficiente supondría un beneficio social pero también medioambiental, ya que se disminuirían las emisiones de CO₂ de los vehículos particulares.

Pero ya en el año 2000, la situación del transporte ferroviario de este a oeste de la ciudad de Londres fue descrita como haber llegado casi a su tope de capacidad, tanto el ferrocarril nacional, como el metro y tren de cercanías de la ciudad. Esto provoca un sistema frágil donde, hasta el menor problema, podría ocasionar un golpe dramático en la red de transporte de la ciudad. Los pasajeros sufrían numerosos retrasos, difíciles conexiones de intercambio, y una gran congestión en trenes y estaciones.

Dichos problemas acontecían principalmente en el centro de la ciudad, centro de economía del país y se podría decir que de gran importancia para todo Europa. Por ello, la escasa capacidad del transporte ferroviario de la ciudad de Londres afectaría tanto al bienestar social como económico de los ciudadanos. A todo esto se suma además, el problema del crecimiento de la población en años futuros.

Por dichas razones, se plantea en este trabajo el análisis de la inversión realizada para el proyecto del Crossrail, un nuevo ferrocarril que atravesará la ciudad de Londres de este a oeste, ofreciendo una mayor frecuencia, capacidad y accesibilidad que la existente actualmente. Además, estará conectado con las líneas ferroviarias nacionales, metro, y tren de cercanías de la ciudad existentes.

Se comenzó su construcción en el año 2012, y para el año 2019 abrirá sus puertas completamente, produciendo un alivio en la congestión, mejora de las conexiones y reducción del tiempo de viaje; pero también propiciará una gran regeneración urbana, disminución de impacto medioambiental y crecimiento económico tanto para la ciudad como toda la región.

Para ello, se ha basado el estudio en la metodología del Análisis Coste-Beneficio Medioambiental, un método que analiza los ingresos y costes derivados de un determinado proyecto, es decir, las ventajas y desventajas que éste produce socioeconómicamente y medioambientalmente, en términos monetarios. Comparando

dichos costes e ingresos, se podría determinar si un proyecto es beneficioso para la sociedad y medioambientalmente, cumpliendo el principal objetivo del Análisis Coste-Beneficio: la ayuda a la toma de decisiones; facilitar un uso más eficiente de los recursos públicos de la sociedad.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal del análisis es la determinación de la viabilidad socioeconómica y medioambiental de la inversión del Crossrail en la ciudad de Londres, es decir, determinar su rentabilidad para la sociedad.

Para la consecución de dicho objetivo principal, se han prefijado los siguientes objetivos secundarios:

- Estudio de la metodología del Análisis Coste-Beneficio Medioambiental.
- Descripción del proyecto del Crossrail en la ciudad de Londres.
- Aplicación del Análisis Coste-Beneficio al proyecto del Crossrail: obtención de costes de ingresos.
- Obtención de resultados: indicadores de rentabilidad, análisis de sensibilidad, análisis de escenarios y análisis de riesgo.
- Estudio de posibles actuaciones de futuro.

Para la consecución de todos los objetivos descritos, se ha estructurado el documento como se describe a continuación.

En primer lugar, se estudiará la metodología del Análisis Coste-Beneficio Medioambiental, sus objetivos, desarrollo histórico, tipología de análisis, principios y procedimiento, compuesto por nueve fases sucesivas.

En segundo lugar, el trabajo se centrará en el caso de estudio, el Crossrail de Londres, describiendo los problemas actuales existentes en la red de transporte ferroviario de la ciudad y los antecedentes históricos del proyecto; y finalmente centrándose en la descripción y objetivos del proyecto del Crossrail, para terminar con las consecuencias que éste supondrá para el futuro de la ciudad.

El tercer punto consistirá en la aplicación de la metodología del Análisis Coste-Beneficio estudiada para el proyecto del Crossrail descrito; estableciendo los parámetros básicos del estudio y obteniendo y monetizando, cuando sea posible, tanto los costes como ingresos del proyecto.

Posteriormente, se procederá a la obtención de los distintos resultados: indicadores de rentabilidad, análisis de sensibilidad, análisis de escenarios y análisis de riesgo. Los indicadores de rentabilidad estudiados serán el Valor Actualizado Neto, Tasa Interna de Retorno, y Ratio Beneficio/Coste, que serán explicados en los respectivos apartados. En el análisis de sensibilidad se tratará de destacar las variables críticas, aquellos ingresos y costes que más influyan en los indicadores de rentabilidad; para así posteriormente modificarlas en el análisis de escenarios y crear cinco escenarios diferentes: dos pesimistas, el escenario base, y dos optimistas. Finalmente, en el análisis de riesgo, los ingresos y costes variarán aleatoriamente

entre unos rangos prefijados para cada uno, obteniendo así una función de distribución para el indicador de rentabilidad, sobre el que habrá que obtener los consiguientes resultados. Para el análisis de riesgo será utilizado el programa informático RStudio, cuyo código se expone en el Anexo 1.

En último lugar, se expondrá brevemente una posible actuación de futuro, el Crossrail 2, una línea ferroviaria que atravesaría Londres de norte a sur, y que actualmente se encuentra en etapas tempranas de estudio. El actual estudio de rentabilidad del Crossrail, se espera que sirva como base para un futuro estudio del Crossrail 2, en caso de resultar el primero de manera satisfactoria.

2 ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO MEDIOAMBIENTAL

La creciente importancia otorgada hoy en día al medioambiente y medio social ha llevado a replantear la manera de evaluar los proyectos de ingeniería civil. No sólo se tienen en cuenta los costes e ingresos monetarios directos de un determinado proyecto, sino que también se otorga un valor monetario a las cuestiones sociales y medioambientales, que a priori no se tenían en consideración.

Una metodología para llevar a cabo esta tarea es el Análisis Coste-Beneficio (ACB) medioambiental, que se explica a continuación.

2.1 DEFINICIÓN Y OBJETIVOS

El Análisis Coste-Beneficio (ACB, o CBA en inglés) es un método económico que analiza los ingresos y costes de un determinado proyecto, es decir, las ventajas y desventajas que éste produce socioeconómicamente y medioambientalmente. Todos los costes e ingresos deberán ser expresados en unidades monetarias, aunque a priori no estuviesen monetizadas (impactos medioambientales, mejoras sociales, etc.), para posteriormente poder comparar esas ventajas e inconvenientes tras haber actualizado los valores monetarios, y así conocer si un determinado proyecto es beneficioso para la sociedad.

De acuerdo con Boardman et al. (2010), el principal objetivo del Análisis Coste-Beneficio es la ayuda a la toma de decisiones, más específicamente, facilitar un uso más eficiente de los recursos de la sociedad. Este método permite demostrar qué alternativa es la más eficiente. Por otro lado, según Pearce et al. (2006), el Análisis Coste-Beneficio es “un procedimiento para evaluar el valor social de programas, políticas y proyectos de inversión”.

Según Pearce et al. (2006), existen varias razones que desembocan en la elección del Análisis Coste-Beneficio para la evaluación de proyectos, y las principales son las que se indican a continuación.

La primera de todas, es que se trata de un análisis racional. Las decisiones políticas no siempre se han llevado a cabo de una manera racional, y dicho análisis hace que independientemente de las ganancias o pérdidas monetarias que deriven de un proyecto, los que toman las decisiones estudien quiénes son los beneficiarios o perjudicados, temporal y espacialmente. Dicho análisis no se centra en un solo grupo de gente, sino en toda la sociedad.

En segundo lugar, mediante el ACB, todo proyecto es visto como una serie de opciones o alternativas para conseguir un objetivo necesario para la sociedad, lo que facilita encontrar la mejor solución. Además, tanto costes como ingresos están expresados en las mismas unidades, por lo que es sencillo elegir la alternativa más ventajosa para cada situación.

En tercer lugar, se permiten contabilizar las preocupaciones sociales, es decir, lo que los ciudadanos estarían dispuestos a pagar; así como los beneficios sociales y medioambientales de una determinada política o proyecto.

En cuarto lugar, el tiempo es tenido en cuenta de una manera rigurosa a través del proceso de descuento. Es decir, el valor del dinero no es el mismo ahora que dentro de unos años.

2.2 DESARROLLO HISTÓRICO

Los primeros desarrollos sobre el Análisis Coste-Beneficio aparecen en Francia en el año 1708, mediante una defensa de la construcción de carreteras de Normandía escrito por el Abad Saint-Pierre, donde se identificaban las consecuencias positivas para la sociedad tras el desarrollo de un proyecto, y se calculaban los costes del mismo; para así poder tomar la decisión de si llevarlo o no a cabo.

La idea de la externalidad del ACB (hay unas terceras partes que resultan beneficiadas o perjudicadas por un determinado proyecto) ya era familiar en la obra de Sidgwich (1883) y Marshall (1890), pero fue realmente Pigou (1920) quien desarrolló la noción de la divergencia entre el coste privado y social, siendo esta divergencia el valor de la externalidad, las terceras partes. Dicha evaluación de coste social, es el mismo que para los beneficios. En ambos casos, el valor monetario de los ingresos y costes reflejan las preferencias humanas por medio de la disposición a pagar. El principio básico es que las preferencias de las personas deben contar, y son estudiadas a partir de las opciones elegidas por éstos en el mercado real.

Dicha idea de que las preferencias humanas y la disposición a pagar fuera la base para contabilizar monetariamente costes e ingresos, fue establecida por Dupuit (1844, 1853), bastante antes, en el siglo XIX. Dupuit quiso justificar económicamente la construcción de carreteras y puentes, y justificó que los beneficios netos de dichas construcciones tenían que ser medidos como la suma del superávit de los consumidores. Afirmó que, para tomar la decisión de construir una carretera o un puente, los ingresos debían ser mayores que los costes.

La anterior idea ya había sido propuesta en el año 1808 por el secretario del tesoro de Estados Unidos, Albert Gallatin, para la toma de decisiones sobre proyectos hidráulicos en el país. Pero no fue hasta el año 1936 cuando el grupo de ingenieros del ejército de Estados Unidos publicó el Flood Control Act, donde se exponen los criterios de aceptabilidad para los proyectos hidráulicos. La idea de desarrollar aquellos proyectos cuyos ingresos superasen a los costes continuó después de la Segunda Guerra Mundial, y estimularon la idea de incluir la economía a la hora de tomar decisiones presupuestarias.

La idea del bienestar moderno en la economía del ACB fue establecida por Hicks (1939,1942), Kaldor (1939), y otros, en la década de 1930-1940. Pareto (1848-1923) argumentó en su curso de economía política en 1896, que la única prueba objetiva de si una política o proyecto es “buena”, conocido como el “Criterio de Pareto”, es si “al menos hay alguien que gana y nadie que realmente pierda”. Pero esto no sucede en la vida real, ya que siempre hay ganadores y perdedores (beneficiados y perjudicados), por lo que Kaldor y Hicks establecieron el “Principio de Compensación”, con la idea de una hipotética compensación de los ganadores a los perdedores, para decidir sobre los proyectos aplicados a la vida real.

Pero en paralelo al desarrollo del ACB, surgieron las primeras críticas a todas estas teorías. Samuelson (1942) argumentó que el superávit del consumidor no tenía prácticamente validez, ya que no se podía asumir que la utilidad marginal del ingreso fuera constante. Scitovsky (1941), mostró que había una contradicción potencial en el “Principio de Compensación”. La Teoría del Bienestar de la Economía fue criticado por Little (1950,2002), y por Jan de Graaff (1957). Lipsey y Lancaster (1956, 1957), también desarrollaron la teoría general del “segundo mejor”, que aseguraba que, si se producía una distorsión en un mercado, no produciría ningún beneficio social si también la había en cualquier otro mercado. Finalmente, Arrow (1951) estableció que no existe manera de decidir si algo producía un beneficio social o no.

La idea de que las comparaciones interpersonales eran imposibles fue aceptada con la publicación de Lionel Robbins (1938), por lo que tumbaba la teoría del “Principio de Compensación”. Si la compensación era realmente pagada, no habría problema. Pero esto no ocurre así en realidad: había una asimetría entre el reparto de beneficios y costes en la sociedad. También surgió el problema de los intangibles, las mejoras en la salud de las personas o disminución de número de accidentes, por ejemplo, ya que quedaban fuera de juego debido a su dificultad de monetización.

Todas estas críticas muestran la importancia que tomó el Análisis Coste-Beneficio, pero es todavía más interesante saber que se siguió utilizando y desarrollando a pesar de todos los problemas presentados.

A principios de los años sesenta ya se habían establecido los principios básicos del ACB, con definiciones rigurosas para sancionar inversiones y políticas. El principal objetivo de las instituciones era mantener la eficiencia en el suministro de los recursos hídricos y gestión de los financieros, y las investigaciones se centraban en el modelado económico de esa calidad, aunque otros investigadores empezaron también a buscar beneficios de cantidad (eficiencia).

Hay cierta literatura que ha tratado de abordar las preocupaciones de distribución, es decir, quién gana y quién pierde, lo que llevó a la ponderación distributiva de los manuales de los años setenta.

Los costes y beneficios futuros habían sido discutidos durante mucho tiempo, pero sin consenso. Lind, en 1982, tuvo la iniciativa de definir una tasa para uso en proyectos de recursos hídricos, cuyo resultado final fue un rango inútil de números del 2% al 20%. Finalmente, la tasa de descuento sigue siendo hoy en día tan controvertida como lo era hace 40 años.

En los años 80 fue cuando comenzó la preocupación medioambiental, aunque ya en 1966, Clawson y Knetsch se basaron en el ocio para evaluar dichos efectos, donde relacionaban el tiempo de viaje que la sociedad estaba dispuesta a asumir para poder disfrutar cierto recurso ambiental. Posteriormente, se intentó trasladar todos los conocimientos referentes al ACB aplicado a los recursos hídricos en el gobierno de Estados Unidos a otros elementos como el aire, bienestar humano o fauna, lo que culminó en la aparición de nuevas técnicas para el análisis de beneficios medioambientales.

En el ámbito europeo, la Comisión Europea publica en 1990 la primera versión de “Guide To Cost-Benefit Analysis of Investment Projects”, para ayudar a la valoración de proyectos en los estados miembros; hasta llegar a su última versión de diciembre de 2014.

2.3 TIPOLOGÍA

El Análisis Coste-Beneficio se puede clasificar en cuatro tipos dependiendo de su enfoque:

- Análisis Coste-Beneficio económico: sólo estudia los impactos que se puedan cuantificar directamente en unidades monetarias.
- Análisis Coste-Beneficio financiero: analiza los movimientos financieros.
- Análisis Coste-Beneficio socioeconómico: está enfocado al cálculo de costes y beneficios sociales, que hay que transformar en unidades monetarias.
- Análisis Coste-Beneficio medioambiental: enfocado al cálculo de costes y beneficios sociales y medioambientales, que habrá que monetizar posteriormente.

Nuestro análisis se centra en el ACB medioambiental, y dentro de este tipo, existen cuatro tipos diferentes en función de cuándo se realice el estudio: *Ex ante*, *Ex post*, *In Media Res*, y un último que compara el *Ex ante* con el *Ex Post* o *In Media Res*.

- El primero, *Ex ante*, es realizado mientras el proyecto está bajo consideración, antes de ser implementado, ayudando en la toma de decisiones sobre si llevarlo o no a cabo.
- Sin embargo, el *Ex post* se realiza una vez se ha finalizado de implementar el proyecto, conociendo ya todos los costes, pero siendo menos inmediato. El principal objetivo es determinar si una determinada inversión, una vez ejecutada, ha cumplido con los objetivos esperados de acuerdo a la evaluación *Ex Ante*.
- Por otro lado, el análisis *In Media Res* es realizado durante el ciclo de vida de un proyecto, con una especial influencia en la toma de decisiones, sobre si continuar o no un determinado proyecto ya comenzado.
- Por último, el análisis comparativo entre el *Ex ante* y el *Ex post* (o *In Media Res*), es el más útil para conocer cómo de eficaz ha resultado el Análisis Coste-Beneficio estudiado. Pero no es de extrañar que sea el menos utilizado, dada la dificultad de tener ambos estudios realizados, *Ex ante* y *Ex post*.

En la siguiente tabla se resume el valor y objetivos de cada tipo de análisis:

Tabla 1. Objetivos de cada tipología de Análisis Coste-Beneficio. Fuente: Boardman et al. Cost-benefit analysis: concepts and practice (2010).

Objetivo	<i>Ex Ante</i>	<i>In Media Res</i>	<i>Ex Post</i>	Comparativo Ex Ante-Ex Pos/In Media Res
Ayuda a la decisión de asignación de recursos para dicho proyecto	Ayuda en la selección del mejor proyecto y en la toma de decisiones sobre si llevar a cabo o no un determinado proyecto	Todavía se está a tiempo para invertir más recursos en una determinada parte del proyecto	Demasiado tarde	Lo mismo que en <i>In Media Res</i> o <i>Ex Post</i>
Estudio del valor real de dicho proyecto	Poco preciso, todavía hay mucha incertidumbre sobre los futuros costes e ingresos	Se reduce un poco de incertidumbre, pero todavía no se conocen todos los valores futuros	Muy preciso, ya no hay incertidumbre sobre los costes e ingresos	Lo mismo que en <i>In Media Res</i> o <i>Ex Post</i>
Estudio del valor real de proyectos similares	No útil	Útil, si se ajusta a la singularidad de los proyectos	Muy útil, ya que se basa en datos comprobados y no hay incertidumbres	Lo mismo que en <i>In Media Res</i> o <i>Ex Post</i>
Estudio de la eficacia y errores del ACB	No útil	No útil	No útil	Muy útil. Da información sobre los errores del ACB comparando el <i>Ex Ante</i> con el <i>Ex Post</i> o <i>In Media Res</i> de un determinado proyecto

2.4 PRINCIPIOS DEL ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO

Como se ha explicado en el capítulo de Desarrollo histórico, el ACB se basa en la Teoría del Bienestar, que se preocupa por la eficiencia económica y bienestar social. Los costes se calcularían como la cantidad máxima que los consumidores están dispuestos a pagar. Dicha teoría pretende definir la equidad y eficiencia de un proyecto o política para poder llevar a cabo la decisión de viabilidad por medio de dos criterios ya mencionados con anterioridad: el Criterio de Pareto y el Criterio de Kaldor-Hicks, que se describen a continuación.

2.4.1 Criterio de Pareto

“Una situación es eficiente cuando no es posible encontrar ninguna otra situación que mejore el bienestar sin que nadie empeore el suyo”. Es decir, el uso eficiente de los recursos ocurre cuando al implementar un proyecto, al menos un individuo sale beneficiado sin empeorar la situación de ningún otro.

Se ilustra dicho criterio en la siguiente imagen:

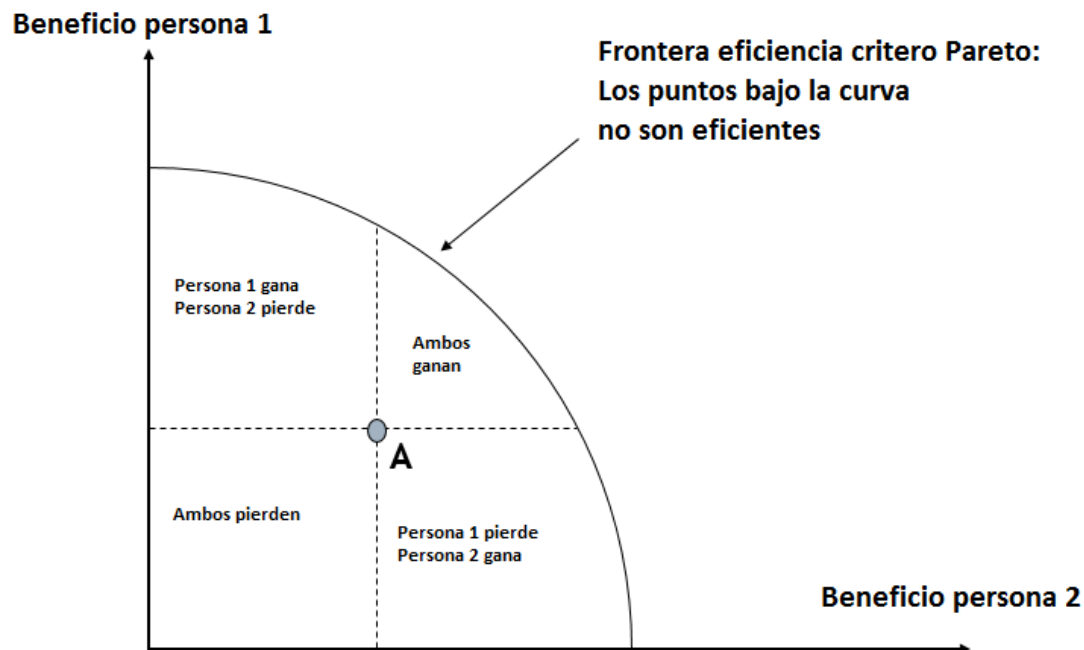


Ilustración 1. Descripción del Criterio de Pareto. Fuente: Odeck. Diapositivas docencia asignatura “*Economics of transport infrastructure*” (2016).

Se le llama “Pareto óptimo” a la situación en la que ya no se puede llevar a cabo ninguna mejora en la sociedad, y son siempre las recomendables.

Pero es difícil encontrar dichas situaciones en las que todos ganan y nadie pierde en la vida real (situaciones win-win), por lo que puede favorecer a ciertos grupos. Por lo tanto, a menudo los proyectos que se evalúan, suponen beneficios para unos provocando así perjuicios para otros. Además, este criterio no establece nada sobre la redistribución de costes y beneficios, por lo que surge el criterio de Kaldor-Hicks.

2.4.2 Criterio de Kaldor-Hicks

“Una situación es socialmente más aceptable que otra según el criterio de Kaldor-Hicks cuando los beneficios de la nueva situación compensan las pérdidas, independientemente de quién obtenga los beneficios o sobre quién repercuten los costes”.

Puede haber gente que experimente un cambio negativo, mientras otros positivo. El proyecto sería aceptable si las ganancias compensan las pérdidas, aunque dicha compensación no tenga lugar en realidad.

Se deduce que cada mejora del Criterio Pareto es una mejora Kaldor-Hicks, pero no todas las mejoras Kaldor-Hicks son mejoras del Criterio Pareto.

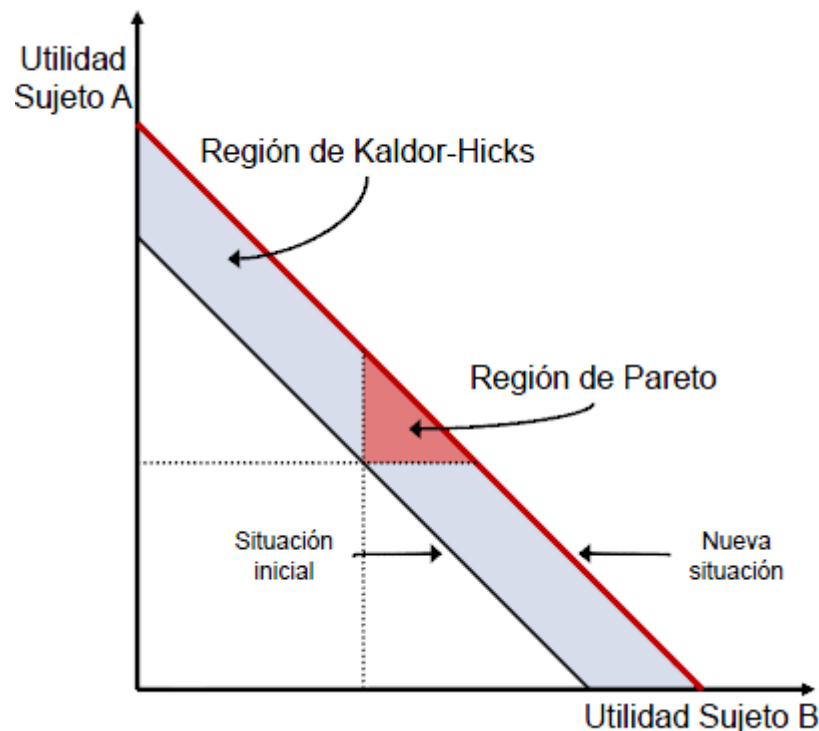


Ilustración 2. Criterios Kaldor-Hicks y Pareto. Fuente: Torres. Diapositivas docencia asignatura “Evaluación de Proyectos y Servicios Públicos” (2016).

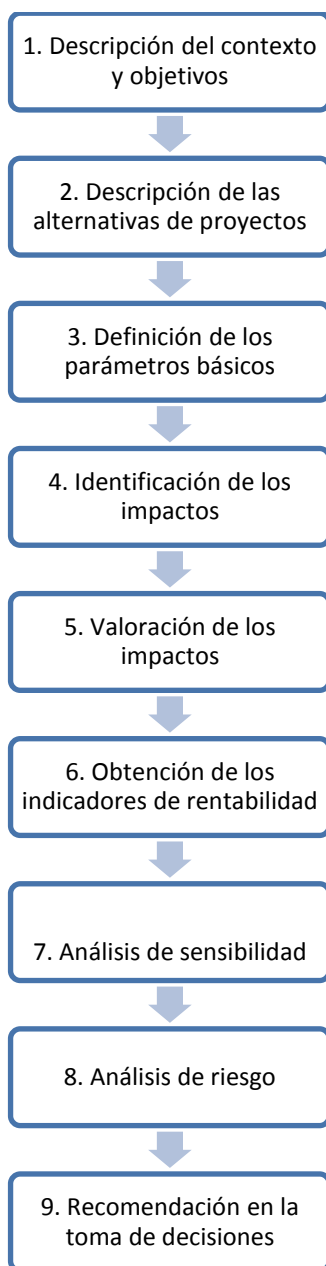
Surge ahora el concepto de equidad social, entendido como el igual reparto de los costes y beneficios de un determinado proyecto. La equidad horizontal busca el igual trato entre personas en la misma situación; mientras que la equidad vertical iguala el tratamiento de personas en distintas situaciones (distinguiendo según la renta), de tal forma que los costes y beneficios sean repartidos de forma proporcional a dichas situaciones.

2.5 PROCEDIMIENTO

El Análisis Coste-Beneficio sigue una metodología perfectamente ordenada constituida por diferentes fases. No existe consenso en la definición de dichas fases, por lo que para este estudio se ha utilizado diferente literatura para posteriormente definir las fases en base a una valoración personal. La literatura estudiada ha sido “Nuevos problemas en la evaluación de proyectos de ingeniería: Evaluación de la vulnerabilidad de la percepción del riesgo en el análisis coste-beneficio medioambiental” (Torres, 2014); “Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects”, (European Commission, 2014); y “Cost-benefit analysis: concepts and practice” (Boardman et al., 2010).

Se presenta a continuación la propuesta personal para el análisis de las mencionadas fases.

Tabla 2. Fases del Análisis Coste-Beneficio. Fuente: Elaboración propia.



2.5.1 Descripción del contexto y objetivos

El primer paso consiste en describir el contexto social, económico, político e institucional en el cual el proyecto deberá ser implementado. Se trata de un aspecto básico para poder predecir tendencias futuras, especialmente para los análisis de demanda. De hecho, la obtención de buenas estimaciones depende de las condiciones sociales y económicas de la región.

También es necesario verificar si el proyecto es apropiado para el contexto en el que tendrá lugar, si se trata de un proyecto integrado en las políticas sociales pre-existentes y si la inversión necesaria es acorde a la situación económica.

A su vez, será necesario definir los objetivos del proyecto, ligado a la definición del contexto en cuanto a identificar los problemas a resolver. Será necesaria la identificación de los efectos que el proyecto provocará necesarios de someter a evaluación; así como la verificación de la relevancia del proyecto. Del análisis de la situación actual se debe deducir la prioridad de llevar a cabo dicho proyecto para así alcanzar los objetivos de la región.

2.5.2 Descripción de las alternativas de proyectos

Puede que en el estudio haya diferentes alternativas y haya que decidir cuál es la más eficiente, o puede que sólo haya que estudiar la eficiencia de un determinado proyecto, por lo que este paso puede verse omitido. En caso de existir diferentes alternativas, es un proceso complicado, ya que el número de éstas puede ser ampliamente grande.

Para cada alternativa será necesaria su descripción completa, desde la memoria hasta la planificación de ejecución, así como los recursos necesarios para la misma. Dicha descripción analizará los elementos físicos y actividades que habrá que llevar a cabo para alcanzar los objetivos establecidos. Habrá que definir el tipo de infraestructura, intervención, servicio dado y localización. Cada alternativa será una propia unidad de análisis.

No habrá que olvidar al agente responsable de la implementación del proyecto, que deberá ser descrito en términos de su capacidad técnica, financiera e institucional. La capacidad técnica se refiere al personal y recursos que puedan ser útiles para el proyecto para llevar a cabo su implementación. La capacidad financiera debe garantizar los fondos necesarios para desarrollar el proyecto; y la institucional, se refiere a los acuerdos y permisos necesarios.

Tras la definición de todos los términos anteriores, será necesaria la definición del área específica del impacto de la política o proyecto, estableciendo los límites del análisis, pudiendo ser de interés local, regional o nacional. Este es un tema que genera controversia, ya que los impactos medioambientales, sobretudo, no se pueden fijar en una zona concreta, ya que a largo plazo acabarán afectando a todo el planeta. La definición del área de impacto establece a su vez quiénes son los beneficiarios o perjudicados directos.

También será necesaria la descripción de la alternativa cero, aquella dada en situación de no intervención, así como la descripción del área y población afectada, para poder analizar la viabilidad del proyecto. Dicha alternativa cero también se verá afectada por los cambios y variaciones con los años, aunque no sea ejecutada ninguna acción, y deberá ser esta variación la comparada con las alternativas de proyectos. El hecho de no intervenir, también tiene por lo tanto unas consecuencias a medio y largo plazo.

2.5.3 Definición de los parámetros básicos

Existen una serie de incertidumbres en el análisis de los proyectos que influyen directamente en las consecuencias futuras. Dichos parámetros deben ser establecidos para cada proyecto al inicio del ACB. Los más importantes son:

- Horizonte temporal (o tiempo de referencia)
- Tasa de descuento
- Año de referencia

2.5.3.1 Horizonte temporal

El horizonte temporal del análisis señala el punto a partir del cual los efectos del proyecto dejan de ser analizados (Pearce, D., et al., 2006). Los costes y beneficios del análisis deben cubrir un período de tiempo adecuado para cubrir toda la vida útil del determinado proyecto. Dicho período de tiempo es el horizonte temporal, y varía en función del tipo de obra. La Comisión Europea propone los siguientes horizontes temporales en función del sector que se esté estudiando:

Tabla 3. Horizontes temporales propuestos por la Comisión Europea. Fuente: European Commission. Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects (2014).

Sector	Horizonte temporal (años)
Ferrocarril	30
Carreteras	25-30
Puertos y Aeropuertos	25
Transporte urbano	25-30
Abastecimiento y saneamiento de agua	30
Gestión de residuos	25-30

Pero dichos valores se refieren para un análisis socioeconómico. En cuanto se introduce el concepto medioambiental, los impactos se alargan más en el tiempo, es necesario más tiempo para asimilar los impactos, por lo que el horizonte temporal tomado para cada sector puede ser mayor, a juicio de los analistas. Como propuesta personal, se recomienda tomar un horizonte temporal de 50 años en el ACB Medioambiental.

2.5.3.2 Tasa de descuento

Los valores monetarios ocurren en momentos temporales distintos, ya que los beneficios son obtenidos años después de la inversión inicial. Por ello es necesario unirlos bajo un momento temporal determinado, el año de referencia, mediante la tasa de descuento. Dicha tasa de descuento refleja el coste de oportunidad del capital (coste de no poder utilizar ese mismo recurso en otra actividad), y no es tan sencillo de adoptar, ya que hay que diferenciar entre el concepto de tasa de descuento e inflación,

que no son lo mismo; y porque es un concepto que requiere cierta subjetividad personal.

La Comisión Europea establece un punto de referencia de tasa de descuento del 4% como recomendación para el período 2014-2020, pero anima a los estados miembro que marquen su propia referencia en la tasa de descuento.

2.5.3.3 Año de referencia

El año de referencia, como se ha indicado anteriormente, es el año base al que se llevan todos los valores monetarios distribuidos en el tiempo tras aplicarles la tasa de descuento. Es necesario que todos los impactos estén convertidos a un valor monetario medido en el mismo año de referencia para su posible comparación.

2.5.4 Identificación de los impactos

Dicha fase incluye la identificación de los impactos de cada alternativa, su catalogación como ingresos o costes, y la especificación de la medida de su indicador. Al mismo tiempo, se deben especificar los indicadores de medida de cada impacto, que depende directamente de la disponibilidad de datos, estén ya monetizados o haya que monetizarlos posteriormente.

Otra dificultad que se encuentra, es la de predecir los posibles impactos que podrían ocurrir durante la vida útil del proyecto. Dichos impactos se deben predecir en cada período de tiempo, para después monetizarlos según el año de referencia mediante la tasa de descuento explicada con anterioridad.

Dicha fase se puede dividir en dos pasos igual de importantes (Torres, 2014): la identificación de todos los impactos que se pueden producir, y posteriormente la determinación de los que son realmente relevantes para el estudio.

2.5.4.1 Identificar los impactos

Una primera aproximación determinará todos los efectos, tanto positivos como negativos (ingresos y costes), que se desarrollarán en el área de estudio. La lista deberá ser particularmente amplia, ya que posteriormente se procederá a la eliminación de los impactos no relevantes para dicho estudio. Se incluirán los impactos tanto durante la construcción como la explotación del proyecto a largo plazo.

Dichos impactos deberán ser estudiados desde dos vertientes diferentes: adicionalidad y desplazamiento. La adicionalidad tiene que ver con el efecto multiplicador que causaría nuestro proyecto; mientras que el desplazamiento se refiere a los movimientos poblacionales o de capital que éste produciría.

En función de la magnitud del proyecto, podrán derivarse impactos que se salgan del área de estudio, específicamente los impactos medioambientales.

La situación actual de las preferencias de los individuos condiciona notablemente la manera en el que los impactos son estudiados, ya que cada generación tiene su propio punto de vista. Es por eso que los impactos realmente

influyentes en el estudio deberán ser actualizados constantemente y tratados con mayor precaución.

2.5.4.2 Determinar los impactos relevantes

Debido a la limitación de recursos existentes, tanto económicos, de tiempo o material, normalmente es imposible abordar el análisis de todos los impactos existentes. Es por ello que esta etapa consiste en seleccionar aquellos impactos de la lista anterior que son realmente relevantes para nuestro estudio. Boardman et al. (2010), afirma que, “para que un efecto sea tratado como impacto, se debe conocer a ciencia cierta que hay una relación de causa y efecto entre el proyecto y alguna utilidad del ser humano”. Además, según Pearce, (2006), “cualquier ingreso o coste que se produzca por un proyecto, independientemente de a quién afecte o en qué momento ocurra, debe ser considerado en el ACB”. Por Lo tanto, podemos considerar que un impacto es relevante si afecta al menos a una persona en el estudio.

La dificultad aquí es conocer cuáles realmente van a ser relevantes, ya que para la mayoría de ellos no existe un precio de referencia que permita conocer su valor. Por otro lado, los impactos que no deben ser tenidos en cuenta, son los conocidos como transferencias, ya que el beneficio que se obtiene es convertido es gasto por otro (reducción de un impuesto y pérdida de recaudación, por ejemplo).

2.5.5 Valoración de los impactos

Algunos de los impactos ya han sido seleccionados en términos monetarios (los costes de construcción y mantenimiento, por ejemplo). Pero en cambio otros, son beneficios sociales o impactos medioambientales, por lo que, tras ser cuantificados en sus propias medidas, es necesario transformarlos a términos monetarios para posibilitar la comparación conjunta. Una vez más, encontramos en esta fase dos pasos (Torres, 2014): cuantificación y monetización de los impactos.

2.5.5.1 Cuantificación de los impactos

Cuantificar significa buscar la diferencia que se produciría entre la situación cero y la que resulte tras la realización del proyecto, en cuanto a los impactos definidos como relevantes para el proyecto, cada uno en su propia medida base. Nos encontramos aquí una vez más con el problema de la incertidumbre y de las predicciones para el futuro, por lo que no se asegura su exactitud.

Los principios básicos para la cuantificación de ingresos y costes son los siguientes:

- Disponibilidad de pagar por parte de los usuarios (willingness to pay): se define como la cantidad que los ciudadanos están dispuestos a pagar para beneficiarse por un bien o servicio. Se representa a través de las curvas de demanda de la siguiente manera:

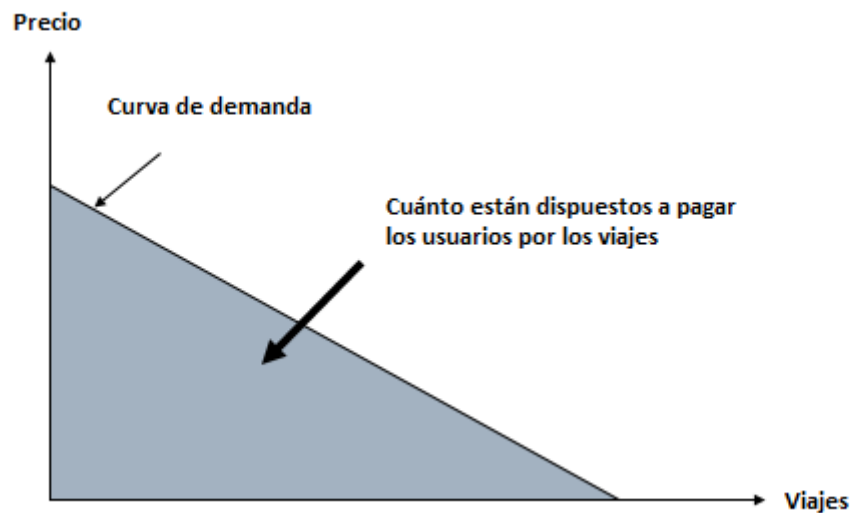


Ilustración 3. Willingness to pay. Fuente: Odeck. Diapositivas docencia asignatura “Economics of transport infrastructure” (2016).

- Coste generalizado: es la suma de los distintos costes relevantes de los viajes, que interfieren en la decisión sobre si realizar o no un viaje (peajes, coste del tiempo, coste de operación del vehículo, etc.)
- Excedente del consumidor (consumer surplus): es la diferencia entre el precio que el consumidor está dispuesto a pagar por un bien o servicio y su precio actual.

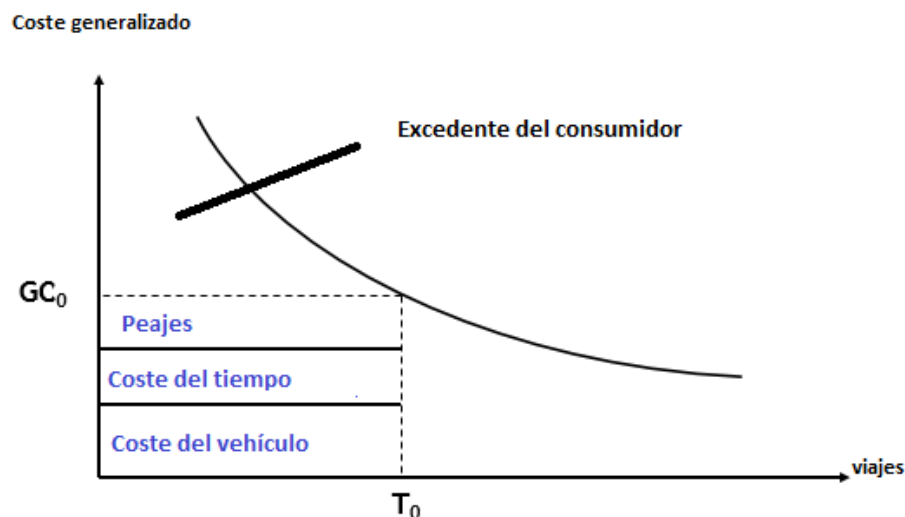


Ilustración 4. Coste generalizado y excedente del consumidor. Fuente: Odeck. Diapositivas docencia asignatura “Economics of transport infrastructure” (2016).

2.5.5.2 Monetización de los impactos

Monetizar significa valorar los impactos según unidades monetarias, en este caso en Euros, tanto costes como ingresos. A veces los impactos más relevantes son

los más difíciles de monetizar, por ejemplo, los impactos ambientales. Los principales problemas planteados en esta etapa son los siguientes:

- Las unidades monetarias deberán ser constantes y homogéneas, independientemente del periodo de tiempo en el que se produzcan. Por ello habrá que aplicarles la tasa de descuento hasta el año de referencia.
- Se plantea una vez más el problema de la incertidumbre, de la estimación de predicciones futuras, por lo que habrá que tener especial cuidado.
- En cuanto a la valoración económica de los impactos, se podrá recurrir a la información que proporcionan los mercados en cuanto al precio de ciertos bienes, pero siempre con especial cuidado ya que dichos precios pueden haber sido fijados bajo ciertas irregularidades.
- Cuando el mercado no establezca el valor de un determinado bien, habrá que desarrollar un mecanismo que calcule su valor, ya sea directamente, preguntando a los individuos afectados (preferencias declaradas); o indirectamente, analizando sus preferencias, (preferencias reveladas).

2.5.6 Obtención de los indicadores de rentabilidad

Los principales indicadores de rentabilidad utilizados son los siguientes:

- Valor Actualizado Neto (VAN)
- Tasa Interna de Retorno (TIR)
- Ratio Beneficio/Coste

2.5.6.1 Valor Actualizado Neto (VAN)

El Valor Actualizado Neto (VAN, NPV, Net Present Value, en inglés) calcula el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros a raíz de una inversión. Consiste en descontar al año de referencia mediante la tasa de descuento todos los cash-flows futuros del proyecto, y tras esto restarle la inversión inicial, obteniendo así el valor actual neto del proyecto. Por cash-flow se entiende la resta de ingresos menos costes.

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{(1+r)^i} = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{(b_i - c_i)}{(1+r)^i}$$

I_0 es el valor de la inversión inicial; q_i son los cash-flow del periodo i (ingresos del año i (b_i) menos costes del año i (c_i)); r es la tasa de descuento; e i el año en cuestión en que se produce el cash-flow.

La interpretación del VAN es la siguiente:

Tabla 4. Interpretación del VAN. Fuente: Elaboración propia.

Valor	Significado	Decisión
$VAN > 0$	El proyecto produce ganancias: los ingresos son mayores que los costes	El proyecto puede aceptarse
$VAN = 0$	El proyecto no produce ni ganancias ni pérdidas: los ingresos igualan a los costes	El proyecto debe rechazarse
$VAN < 0$	El proyecto produce pérdidas: los costes son mayores que los ingresos	La decisión debería basarse en otros criterios

Como afirma Boardman et al. (2010), una advertencia sobre dicho método es que sólo tiene en cuenta las alternativas estudiadas, no todas las existentes. Otras no estudiadas podrían resultar en un mayor VAN. El VAN representa una asignación de recursos más eficiente, no necesariamente recomienda la asignación más eficiente de recursos, ya que puede ser que dicha situación no haya sido estudiada. Se representa esta idea en la siguiente figura.

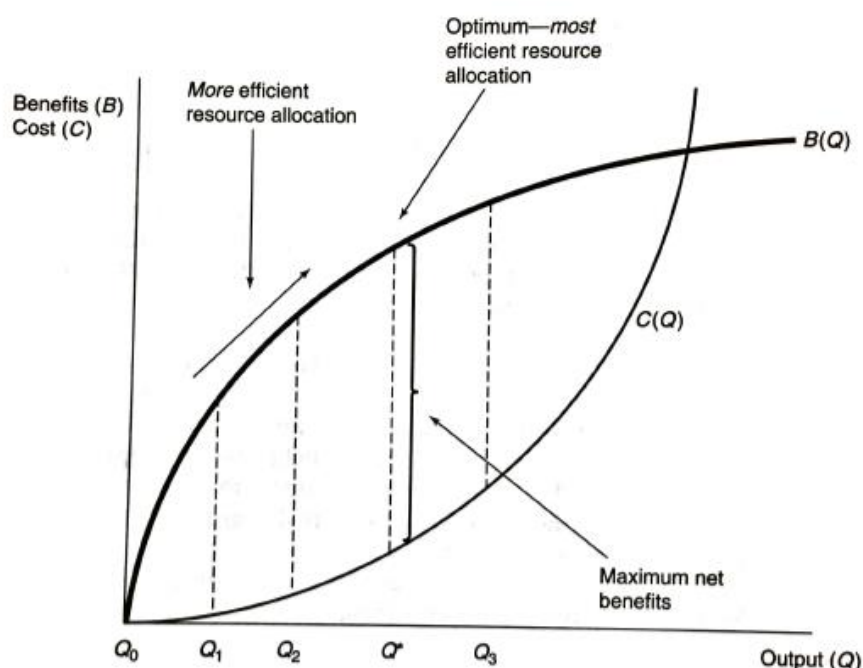


Ilustración 5. Eficiencia óptima de los recursos. Fuente: Boardman et al. Cost-benefit analysis: concepts and practice (2010).

2.5.6.2 Tasa Interna de Retorno (TIR)

Cuando el VAN toma un valor igual a cero, la tasa de descuento pasa a llamarse TIR (Tasa Interna de Retorno), que es un indicador acerca de la rentabilidad que nos está proporcionando el proyecto. El TIR está por lo tanto relacionado con el

coste de oportunidad de nuestros recursos, es decir, se podría comparar con “a lo que renunciamos al hacer esta inversión”, los intereses que obtendríamos si hubiéramos depositado el dinero invertido en un banco, por ejemplo.

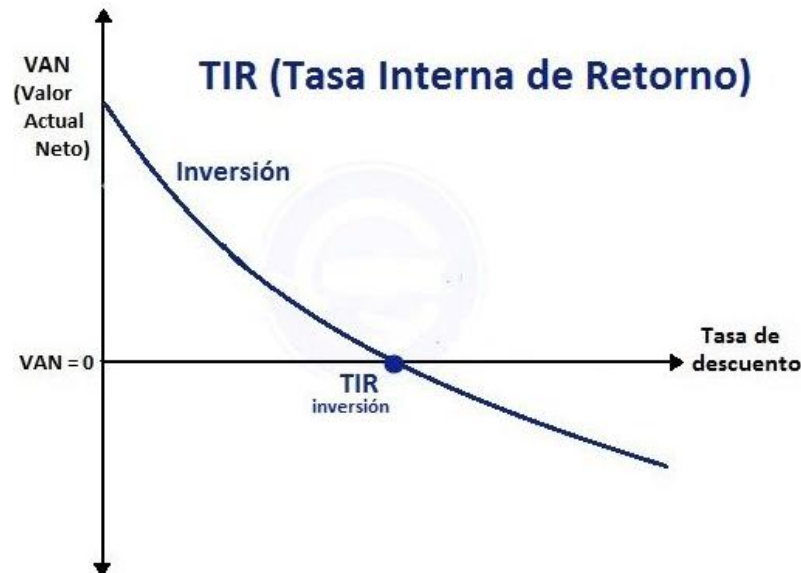


Ilustración 6. Descripción de la Tasa Interna de Retorno. Fuente: Economipedia.
<http://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>

2.5.6.3 Ratio Beneficio/Coste

El VAN es un indicador con unidades monetarias, mientras que éste último, el ratio beneficio/coste, es un indicador adimensional que proporciona una medida relativa de la eficiencia socioeconómica, es decir, indica la cantidad de dinero que se gana por cada unidad monetaria invertida.

2.5.7 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se lleva a cabo para solucionar el problema de la incertidumbre en cuanto a los impactos predichos durante la vida útil del proyecto. También se produce incertidumbre al incorporar los conceptos de tasa de descuento y horizonte temporal. Dicho análisis de sensibilidad analiza cómo la variabilidad de todos estos parámetros (impactos, tasa de descuento, horizonte temporal, etc.) afecta al resultado final del análisis Coste-Beneficio, los indicadores de rentabilidad.

Las principales fuentes de incertidumbre son los datos recopilados para el estudio, las hipótesis del proceso metodológico, los parámetros básicos elegidos, los indicadores empleados, y el conjunto de modelo diseñado para el análisis.

Los parámetros más susceptibles a modificar el valor del VAN son la tasa de descuento y el horizonte temporal. El primero, porque influye directamente a la actualización monetaria, y el segundo, porque el ACB se realiza a largo plazo. Además, habrá que analizar la sensibilidad de cada uno de los impactos estimados, algunos de ellos más relevantes que otros en cuanto a la modificación del resultado del VAN al variar sus valores estimados.

2.5.8 Análisis de riesgo

El Análisis de riesgo comparativo analiza el riesgo existente en cada alternativa propuesta, para así ayudar a la toma de decisiones.

El riesgo se puede definir como “un evento aleatorio que posiblemente ocurra, y que, si eso sucede, implica una serie de impactos tanto positivos como negativos” (Torres, 2014). En dicho análisis, habrá que identificar en primer lugar los riesgos existentes que puedan atentar sobre los objetivos del proyecto.

Posteriormente se diseñará el marco conceptual del modelo a través del cual se analizará el comportamiento de los diferentes riesgos, comprobando finalmente la fidelidad del modelo mediante pruebas de funcionamiento. Mediante una serie de simulaciones, se obtienen los resultados de los riesgos evaluados, que proporcionarán la información necesaria para tomar una decisión.

Tras los resultados del análisis de riesgo, se podrá tomar una serie de decisiones, como la no necesidad de hacer nada para controlarlos, reducir la protección ante estos, eliminar el riesgo o disminuirlo, aumentar la información, recurrir a planes de contingencia o disponer de fondos de riesgo o de un seguro.

2.5.9 Recomendación en la toma de decisiones

Generalmente, dicho análisis lleva a la recomendación de llevar a cabo la alternativa con mayor VAN, o si sólo se estaba estudiando una alternativa, la decisión de llevarla a cabo sólo si el VAN es positivo.

Pero como se ha explicado, el VAN está basado en valores estimados, por lo que el análisis de sensibilidad puede llevar a la conclusión de que la alternativa con el mayor VAN no es siempre el más apropiado para todos los escenarios, ni el que utiliza los recursos de una forma más eficiente.

Finalmente, hay que hacer énfasis en que este estudio se realiza con el fin de hacer recomendaciones, no tomar decisiones. El ACB es sólo un input para llevar a cabo la toma de decisiones políticas.

3 CASO DE ESTUDIO: EL CROSSRAIL DE LONDRES

En este capítulo se estudiará la necesidad de construcción de nuestro caso de estudio, el Crossrail de Londres, un nuevo ferrocarril que atraviesa la ciudad de Londres de este a oeste, ofreciendo una alta frecuencia, capacidad y accesibilidad, para así lograr resolver los problemas de movilidad existentes en la ciudad de Londres actualmente.

Se analizarán dichos problemas de movilidad en la ciudad, así como el proyecto del Crossrail en profundidad, sus antecedentes históricos, y posibles consecuencias.

3.1 SITUACIÓN ACTUAL: PROBLEMAS

En diciembre de 1999, el Primer Ministro encargó al Shadow Strategic Rail Authority (Ssra) llevar a cabo una revisión del plan de transporte ferroviario este-oeste de la ciudad de Londres. Dicho programa trató los problemas existentes tales como la congestión, escasa capacidad del transporte urbano, regeneración y crecimiento urbano.

La situación del año 2000 fue descrita como haber llegado casi a su tope de capacidad, tanto el ferrocarril como el metro en el centro de la ciudad (Shadow Strategic Rail Authority (SRA), 2000)

Esto provoca un sistema frágil donde hasta el menor problema puede desembocar en un golpe dramático en la red. Los pasajeros sufrían frecuentes retrasos, difíciles conexiones de intercambio, y una gran congestión en trenes, plataformas y estaciones.

3.1.1 Saturación de la red en horas punta

Tal como se ha mencionado anteriormente, el estudio declaró que la red actual operaba cerca de su capacidad máxima; con trenes, estaciones y plataformas saturados. Esto conlleva serios efectos secundarios, un claro ejemplo, el estudio llevado a cabo por la International Stress Management Association, que afirmó que la actividad diaria más estresante para los londinenses era el viaje al trabajo, incluso más que el propio trabajo.

En las siguientes imágenes se muestra la densidad de pasajeros en horas punta en el año 2006 tanto para el metro, tren de cercanías (DLR), como para las redes ferroviarias nacionales.

Rail crowding, 2006

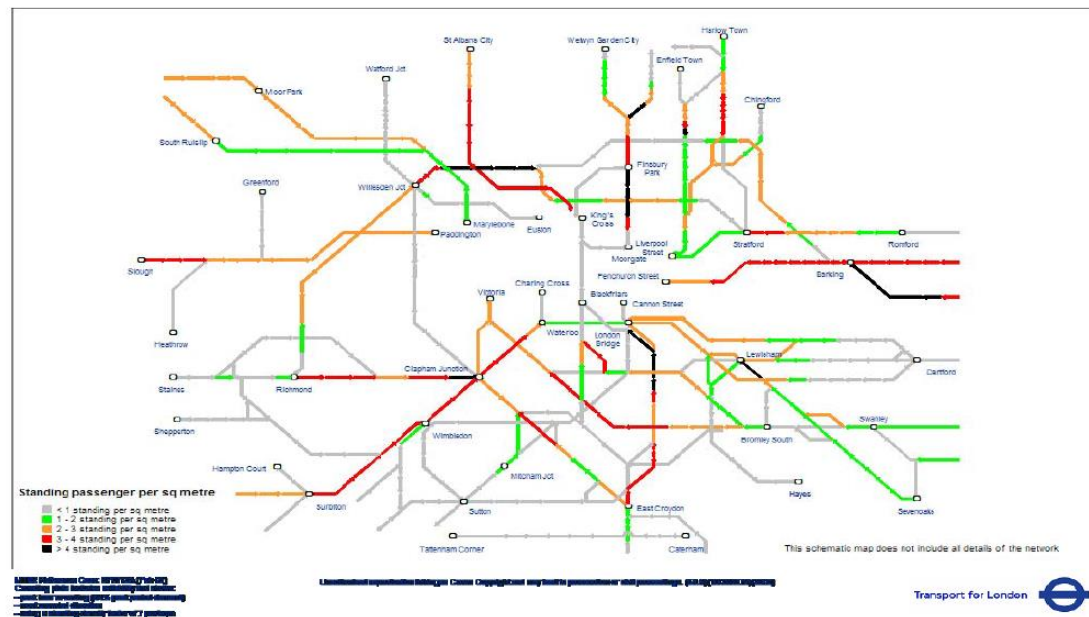


Ilustración 7. Congestión del ferrocarril en horas punta del año 2006 sin Crossrail. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).

Tube and DLR crowding, 2006

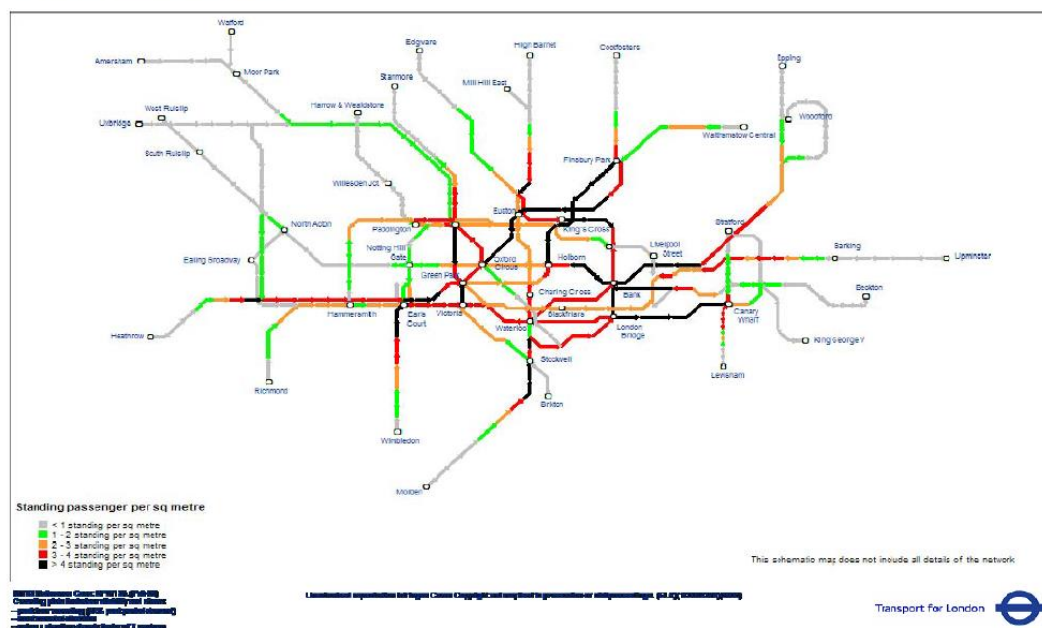


Ilustración 8. Congestión del metro y tren de cercanías (DLR) en horas punta del año 2006 sin Crossrail. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).

Ambas redes, tanto el metro de Londres como el National Rail System y tren de cercanías, se encontraban saturados, y la predicción del crecimiento de número de pasajeros no haría más que empeorar la situación y aumentar el nivel de riesgo operacional.

Esta saturación no provoca más que una disminución del número de viajes utilizando la red ferroviaria, lo que ha llevado a la supresión de la demanda en algunos corredores. Dicha supresión y disminución de la demanda actuará como un freno del crecimiento económico de la ciudad de Londres, si no llega a solucionarse.

La congestión en hora punta ha aumentado en los últimos cinco años, principalmente debido al crecimiento económico en ese período. Este crecimiento, fue agravado además por la restricción de la subida de las tarifas del ferrocarril. Incluso si se eliminase esta restricción, el incremento de las tarifas necesario para frenar la demanda sería inaceptable tanto para el público como para los políticos.

Dicha congestión se produce tanto en las líneas como en las terminales. Algunos ejemplos de limitación por saturación en las líneas son Waterloo y Cannon Street. Por el contrario, ejemplos de limitación por saturación en las terminales son Paddington o Frenchchurch Street.

La localización de las estaciones en la periferia de la ciudad está bastante lejos de la que debiera ser la ideal, ya que requiere un intercambio en el metro de Londres para llegar a su destino final. Por ejemplo, en la estación de Paddington, un 75% de los pasajeros deben intercambiar al metro para llegar a sus destinos. Dichos intercambios son un gran inconveniente, ya que alargan notoriamente el tiempo de viaje.

El hecho de que la circulación a través del centro de Londres tanto en ferrocarril como en metro sea tan deficitaria, disminuye oportunidades de empleo a crear en el centro de la ciudad.

Cifras proporcionadas por Transport for London (TfL) muestran que hay secciones significativas en cada una de las líneas del metro de Londres donde el número de pasajeros excede enormemente su capacidad. El impacto sobre los pasajeros de estos altos niveles de saturación es:

- Viajes incómodos.
- Escasa fiabilidad de los servicios ferroviarios.
- Estaciones cerradas rutinariamente por razones de seguridad.

Pero el problema no acaba aquí, ya que también parte del sistema de carreteras de la ciudad se encuentra incluso más congestionado que el ferrocarril. Esto provoca problemas de movilidad en el transporte público urbano, servicios de emergencia, y reparto de mercancías.

Tanto el Gobierno como el Ayuntamiento están llevando a cabo políticas para desalentar el uso del transporte privado en el centro de la ciudad, con medidas como aparcamientos de pago. Pero dichas medidas no serán efectivas hasta que no se proponga un medio de transporte alternativo al coche privado, ya que tanto el ferrocarril y metro como el transporte público en autobús no cumplen los niveles de demanda exigidos actualmente.

La solución adoptada a corto plazo ha sido aumentar la longitud de los trenes, lo que requiere un alargamiento en la plataforma de las estaciones. Pero esta solución es limitada, por lo que a largo plazo es necesario buscar otra solución.

3.1.2 Saturación fuera de las horas punta

Fuera de las horas punta, el reto es alentar un mayor uso del transporte ferroviario para así liberar la congestión de otros modos de transporte, como el viario. De hecho, la mayoría de los viajes fuera de horas punta se realiza mediante transporte ferroviario, debido al problema de aparcamiento en el centro de la ciudad.

Aunque el transporte ferroviario fuera de horas punta ha aumentado en los últimos años, hay importantes obstáculos que impiden su completo desarrollo, tales como los servicios ferroviarios irregulares y poco frecuentes; y los problemas de seguridad que pueden aparecer especialmente en las estaciones más lejanas y en horario nocturno.

El servicio de metro ha intentado solucionar estos problemas, proporcionando información fiable y fácil de entender a los pasajeros, con intercambios sencillos y líneas frecuentes.

Sin embargo, en el National Rail Network los patrones son más difíciles, y los trenes son relativamente infrecuentes con un tiempo de espera medio de 15 minutos. A pesar de esto, los viajes fuera de hora punta han seguido creciendo gracias a actividades de ocio, iniciativas políticas, y congestión de la red viaria; y se prevé que lo siga haciendo incluso con una tasa mayor.

Aunque el mayor problema se produce durante las horas punta, no hay que olvidarse que se podrían producir también grandes beneficios si fuera de las horas punta se incrementa la capacidad y frecuencia del servicio.

3.1.3 Crecimiento de la demanda futura

En los últimos años la tendencia ha sido la demanda ferroviaria. Hay una gran incertidumbre en cuanto a sus razones, pero indudablemente, el crecimiento económico, lo que conlleva un aumento del empleo y disponibilidad de dinero para ocio, han contribuido enormemente.

El hecho es que el crecimiento de la demanda del transporte ferroviario se ha dado lugar a pesar de la decadencia de éste en cuanto a fiabilidad y saturación, lo que refleja la falta de atracción del transporte en vehículo privado en unas carreteras todavía más congestionadas.

Se prevé que Londres siga creciendo, tanto en términos de población como de empleo. Del borrador del Plan de Londres publicado en marzo de 2010 se prevé que para el año 2031 haya en la capital cerca de 1,3 millones más de personas, y 750.000 nuevos puestos de trabajo. El crecimiento previsto del 35% en los viajes de transporte público, por tanto, traerá presiones adicionales inevitables. Se muestra en el siguiente gráfico las tendencias de la población, el empleo y demanda de transporte frente a un nivel de referencia del año 1993:

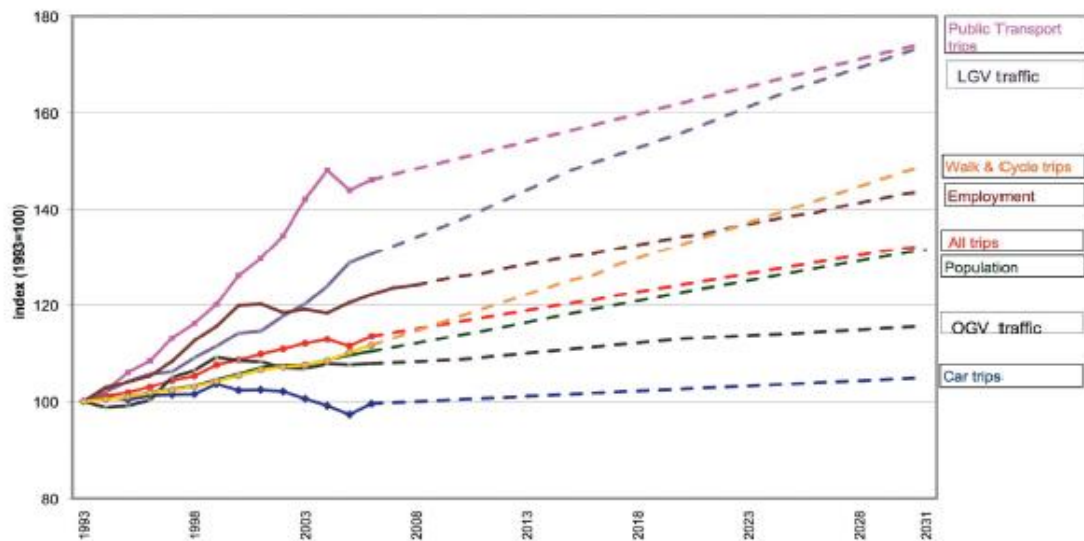


Gráfico 1. Estimación del crecimiento de la demanda futura. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).

Se predice que los viajes en transporte ferroviario continuarán aumentando, y el crecimiento durante el período de pico entre los años 2000 y 2020 será de un 15%. En horario fuera del período de pico, dicho crecimiento será incluso superior al 100%. El crecimiento global, se prevé por lo tanto en un 50%, previendo el centro de Londres como destino para dos tercios de los viajes.

Los estudios demuestran que el número de viajes desde la zona este será significativamente mayor que aquellos producidos desde la zona oeste de la ciudad.

Además, con la introducción de la tasa por congestión en el centro de Londres, se predice que para 2020 aumentará un 5% adicional la demanda en horas punta, así como un 10% fuera de las horas punta.

Cuando la demanda prevista se compara con la capacidad, es evidente que el mayor desajuste se produce en el centro de la ciudad. Por lo tanto, las principales soluciones deberán centrarse en una capacidad adicional en dicha área.

Por otro lado, los viajes al centro debido a motivos de trabajo podrán verse disminuidos en un futuro, debido al crecimiento de la población en la zona central y el nacimiento del “teletrabajo”, pero estos efectos son bastante limitados. Los viajes por “teletrabajo” se realizan fuera de las horas punta, por lo que sólo afectarían en este período.

3.1.4 Regeneración urbana

La economía londinense es de vital importancia para toda la nación, pero su crecimiento es de particular importancia para los habitantes de la ciudad y alrededores. Un tema de gran importancia para el alcalde de Londres es la regeneración urbana de ciertas áreas en decadencia, por lo que unas conexiones

efectivas son un tema prioritario. Pero el estado actual del transporte ferroviario hace esta tarea difícil en vista a la infraestructura existente actualmente.

Las principales áreas donde existen oportunidades de regeneración urbana se encuentran en el oeste de Londres (como por ejemplo Park Royal), Lea Valley, Hackney, Stratford y el Thames Gateway.

3.1.5 Periferia de la ciudad

Aunque la consideración de los viajes dentro de Londres tiende a estudiarse en la zona central, la estructura de la ciudad es mucho más compleja. Londres es un conjunto de ciudades agrupadas, por ejemplo, Croydon, Ealing, Kingston, Staines, Lewisham y Stratford, dominado por la ciudad de Westminster.

Muchas de estas ciudades son de vital importancia no sólo por población, sino también por empleabilidad y oportunidades de ocio. Aunque la mayoría de ellas tienen buenas conexiones con el centro, otras sufren una gran decadencia. Principalmente, la conexión directa con el centro es relativamente ineficaz o inexistente.

El desarrollo de estas ciudades es relevante en términos de mejorar la calidad de vida de sus residentes y reducir el tiempo de viaje al centro de la ciudad. La mejora de los enlaces del transporte público juega aquí un papel muy importante, siendo algunos de estos centros hubs del transporte ferroviario.

3.1.6 Transporte de mercancías

Se prevé que el transporte de mercancías ferroviario aumente en los próximos años en un 80%. La provisión de rutas y condiciones de funcionamiento ideales es fundamental para garantizar su atracción frente al transporte por carretera. Aunque muchas veces el destino o salida es Londres, otras la ciudad es utilizada como medio de paso.

Los flujos principales que llegan a Londres vienen desde los puertos de Haven, Felixstowe y Harwich. Todos estos servicios utilizan actualmente las líneas del norte al sur de Londres y la línea oeste.

Normalmente, los trenes de mercancías no tienen permiso para circular durante las horas punta debido a la congestión existente en las líneas de la ciudad. Esto significa que, durante dos o tres períodos al día, no hay transporte de mercancías a través de la ciudad. La única excepción es el Channel Tunnel (Eurotúnel), al que se le permite la circulación debido a la legislación existente. Esto supone que los trenes deban esperar en Wembley durante períodos bastante largos.

Como la demanda de mercancías continúe creciendo, será difícil lidiar con el tráfico de la oferta y mantener la prohibición durante los períodos pico.

3.1.7 Aeropuerto de Heathrow

Londres debe seguir mejorando su atractivo como destino internacional y su capacidad de proporcionar una red de transporte rápida y eficaz a destinos de ultramar, por lo que sus aeropuertos juegan un papel primordial. Por ello, los

aeropuertos de Gatwick, Heathrow, City, Luton y Stansted continúan expandiéndose y desarrollándose, por lo que es importante que exista una extensa red de transporte eficaz que sea capaz de trasladar a todos los pasajeros que estos albergan.

El número total de pasajeros en el aeropuerto de Heathrow es de 65 millones al año. Expresado de otra manera, unos 58.000 pasajeros necesitan transporte hacia o desde el aeropuerto cada día. La congestión del tráfico rodado en los alrededores del aeropuerto es pesada, por lo que hay una buena oportunidad tanto del ferrocarril, metro y Heathrow Express Services para crear un transporte intermodal que conecte el aeropuerto con el centro de la ciudad.

Por otro lado, unas 80.000 personas trabajan en el aeropuerto o en negocios cercanos a él, tales como hoteles. El área alrededor de Heathrow se está convirtiendo en un importante centro de negocios, ya que muchas empresas tienen la necesidad de realizar numerosos viajes al extranjero, lo que ha llevado a su reubicación; y los hoteles son utilizados para reuniones entre ejecutivos ingleses y extranjeros que llegan a la ciudad. Esta es otra de las razones por las que potenciar el transporte en ferrocarril desde el aeropuerto hasta la ciudad.

3.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El Crossrail de Londres no es una nueva idea, ya que surgió en el siglo XIX. Ya en el año 1880, el Parlamento concedió el permiso para desarrollar el proyecto, pero los planes no llegaron a nada.

La idea resurgió más de cincuenta años después, hacia el 1943, hacia el fin de la Segunda Guerra Mundial. Los resultados de estos años fueron ideas como el “Green Belt” y la construcción de “New Towns”; lo que es menos conocido es que también se pensó en que se necesitaban a la vez mejores conexiones viarias entre el este y oeste de la capital. Pero en los años de posguerra, Gran Bretaña tenía cuestiones sociales y económicas más importantes a tratar.

Sin embargo, la idea no fue olvidada del todo, y el 1974 apareció el London Rail Study, con estudios de transporte de la capital, que finalmente adquirió el nombre de “Crossrail”.

Esta propuesta fue una solución imaginativa que solventaría los problemas de gestión del transporte público en Londres, similar a las soluciones adoptadas cada vez en más lugares de Europa, como la RER en París y el S-Bahn en Hamburgo y Múnich.

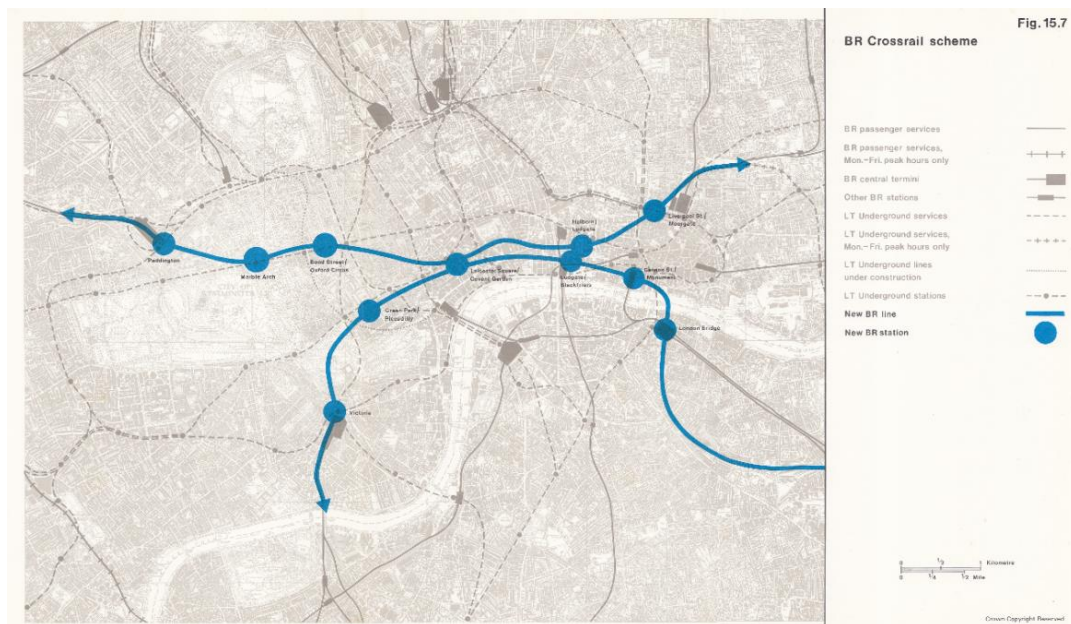


Ilustración 9. Esquema del Crossrail propuesto en 1974. Fuente: Crossrail.
<http://www.crossrail.co.uk/>

Desafortunadamente, el proyecto alcanzaba la suma de £300M, por lo que no se tomó como prioridad. En 1980 se presentó un nuevo proyecto que proponía un Crossrail bastante diferente al que se está construyendo hoy en día: la unión del Inter City con nueva infraestructura desde el norte al sur de la ciudad. Aunque dicho documento no llegó a nada, junto con el plan de transporte de 1974, ya a finales de los años ochenta se había puesto de manifiesto que la capacidad existente del ferrocarril y el metro de la ciudad estaban llegando a su capacidad límite.

En 1989, el Gobierno encargó y publicó el Central London Rail Study, un informe que tomó muchos de los esquemas del plan de 1974, centrándose en el Crossrail Este-Oeste, y una línea de Wimbledon a Hackney via Chelsea, hoy en día conocido como Crossrail 2.

En 1990, el Gobierno dio finalmente el visto bueno al British Rail y al London Transport para desarrollar el Crossrail Este-Oeste. El coste dado fue de algo más de £2bn medido en precios del año 1993. El proyecto parecía que tenía futuro, pero desafortunadamente, el inicio de la recesión a principios de los noventa golpeó duramente la economía y junto con las restricciones de los fondos públicos, llevaron al Parlamento a rechazar el proyecto de ley en mayo de 1994.

En julio de 1994 se anunció que el proyecto del Crossrail sería impulsado por el Transport and Works Act (TWA). Sin embargo, el Gobierno encargó un nuevo estudio para determinar si otras alternativas de menor escala podrían obtener los mismos beneficios que el Crossrail. Las conclusiones fueron claras: no había alternativas más baratas, ya que los costes siempre excedían a los ingresos.

Además, se reforzó la idea de que no era práctico que el proyecto fuera financiado íntegramente por el sector privado. Pero el Gobierno no formuló observaciones formales sobre las conclusiones, y, de hecho, en abril de 1996, el

Secretario de Estado de Transporte pidió al London Transport y British Rail (promotores conjuntos del proyecto) que suspendieran temporalmente su aplicación.

Ya en el año 2000, tras 10 años de trabajo para elaborar el Plan de Transporte, este afirmaba que debía seguir adelante un enlace ferroviario este-oeste. La Estrategia de Transporte del actual alcalde también daba prioridad al alivio de la congestión en el metro de Londres. El Gobierno pidió al Strategic Rail Authority (SRA) el estudio de los requisitos para la capacidad extra de pasajeros, y éste recomendó el Crossrail.

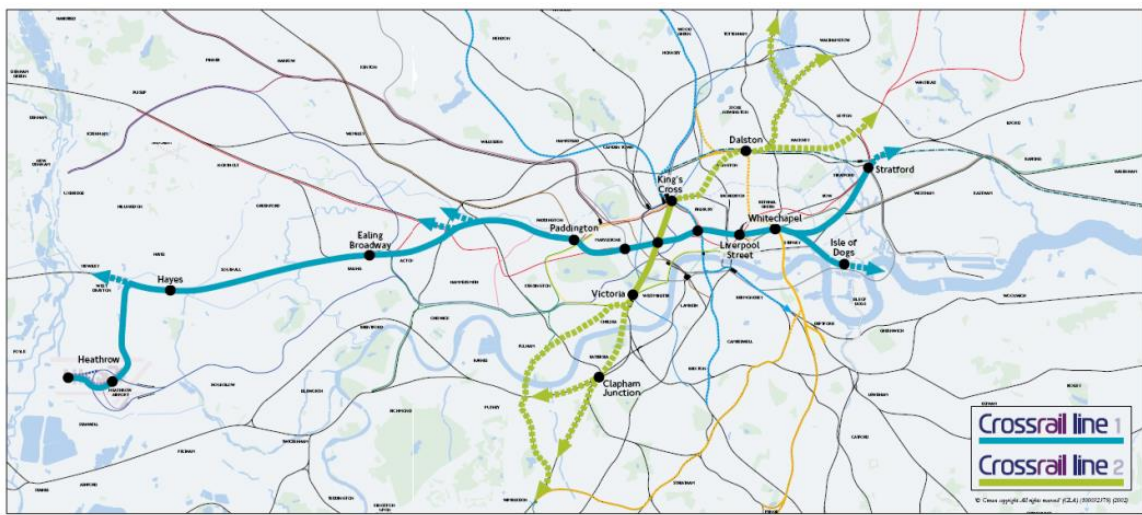


Ilustración 10. Mapa Crossrail propuesto en mayo de 2002. Fuente: Crossrail. Crossrail line 1: Stakeholder Consultation (2002).

El London East-West Study fue bien recibido por el Gobierno, y como resultado, se creó el Cross London Rail Link Ltd (CLRL), propiedad conjunta del SRA y el Transport for London (TfL), que definirían conjuntamente el proyecto. El proyecto inicial del CLRL se fijó en £154m, y la empresa fue creada en enero de 2002.

En el año 2003, el Gobierno anunció que apoyaba este nuevo enlace, y llevó a cabo una ronda de consultas tanto en septiembre y diciembre de 2003, como en octubre de 2004. En este año, el Gobierno se comprometió a introducir una legislación que permitiera al Crossrail proceder.

No fue hasta el año 2008, mediante el Crossrail Act 2008, cuando finalmente se le dio al Crossrail una ruta confirmada: Maidenhead y Heathrow en el oeste hasta Shenfield y Abbey Wood en el este, con nuevos túneles y estaciones bajo el centro de la ciudad. El acuerdo de financiación era complejo, pero el principio básico era simple: el coste sería compartido entre el gobierno, el TfL (Transport for London) y la comunidad empresarial.

Tras 35 años de planificación, el estudio del proyecto fue iniciado formalmente el 15 de mayo de 2009, sufriendo algunos cambios más desde entonces. En 2010, la revisión general del gasto del Gobierno confirmó un ahorro de más de 1.000 millones de libras, lo que significaba que los servicios del Crossrail no serían utilizables hasta el año 2018 en lugar del año 2017; pero también permitió que la dotación financiera necesaria se revisara de £14.8bn a £15.9bn.

Casi cuarenta años después de que se propusiera el proyecto, se inició la construcción del primer túnel cuando la primera de las ocho tuneladoras, Phyllis, inició su trabajo desde Royal Oak Portal hasta Farringdon en mayo de 2012.

3.3 PROYECTO CROSSRAIL DE LONDRES

Se profundiza a continuación en la descripción del proyecto, así como sus objetivos y su proceso de construcción.

3.3.1 Descripción

El Crossrail es un nuevo ferrocarril que atraviesa la ciudad de Londres ofreciendo una alta frecuencia, capacidad y accesibilidad desde el aeropuerto de Heathrow, el West End, el centro de Londres y Canary Wharf. Los servicios de dicho ferrocarril operarán a través de un nuevo túnel doble de 21 km bajo el centro y sureste de Londres, así como otros 14 kilómetros de estaciones y 10 nuevas estaciones. La siguiente figura muestra la ruta del Crossrail, mostrando las conexiones con la red de transporte público existente e incluyendo la ubicación de las estaciones accesibles:

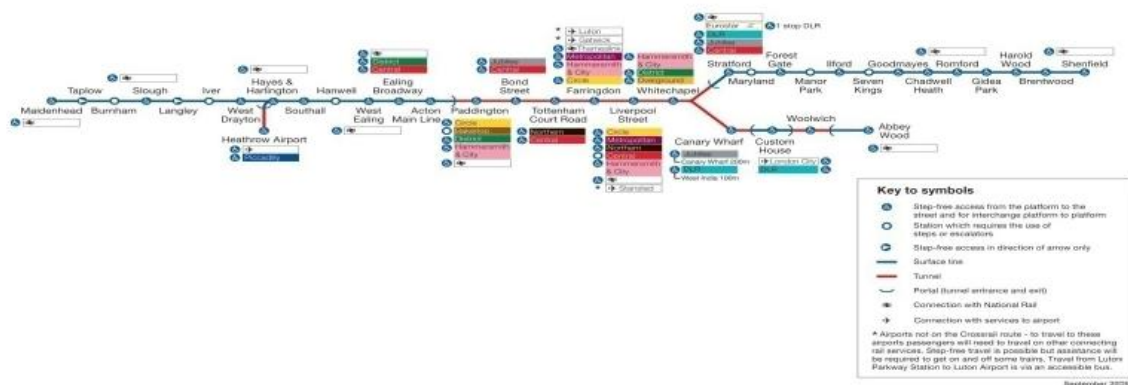


Ilustración 11. Proyecto Crossrail. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).

El coste ha sido financiado, en general, de tres maneras:

- A través de los ingresos futuros debido a las tarifas de los servicios del propio ferrocarril.
- Por las empresas de Londres, a través de contribuciones directas, contribuciones y un suplemento de tasa de negocios (Business Rate Supplement).
- Por los contribuyentes nacionales, a través de una subvención proporcionada por el DfT (Department for Transport).

3.3.2 Objetivos

El crossrail jugará un papel de vital importancia para satisfacer las necesidades de transporte actuales y futuras de Londres, favoreciendo así el crecimiento económico y el desarrollo sostenible de la ciudad. Los principales objetivos de dicho proyecto, establecidos por el alcalde de la ciudad en 2010, han de ser los siguientes:

- Apoyar el desarrollo económico sostenible y el crecimiento de la población, aumentando la capacidad de transporte y reduciendo su congestión.
- Mejorar la conectividad del transporte a través del ahorro del tiempo de viaje.
- Mejorar la accesibilidad para personas con movilidad reducida.
- Incrementar el número de puestos de trabajo.
- Mejorar la seguridad del transporte reduciendo los accidentes de tráfico.

Por otro lado, el DfT (Department for Transport), también estableció la consecución de los siguientes objetivos:

- Apoyar un sistema de transporte que sea un motor para el crecimiento económico, pero a la vez respetuoso con el medio ambiente.
- Mejorar los vínculos que ayudan al transporte de bienes y personas.
- Asegurar la sostenibilidad del ferrocarril mediante la mejora de sus servicios, abordando el alto coste del ferrocarril en el Reino Unido comparado con otros países.

3.3.3 Construcción

El proceso de construcción hasta el momento ha sido el siguiente, habiendo sido completado hasta la fecha un 80% del proyecto:

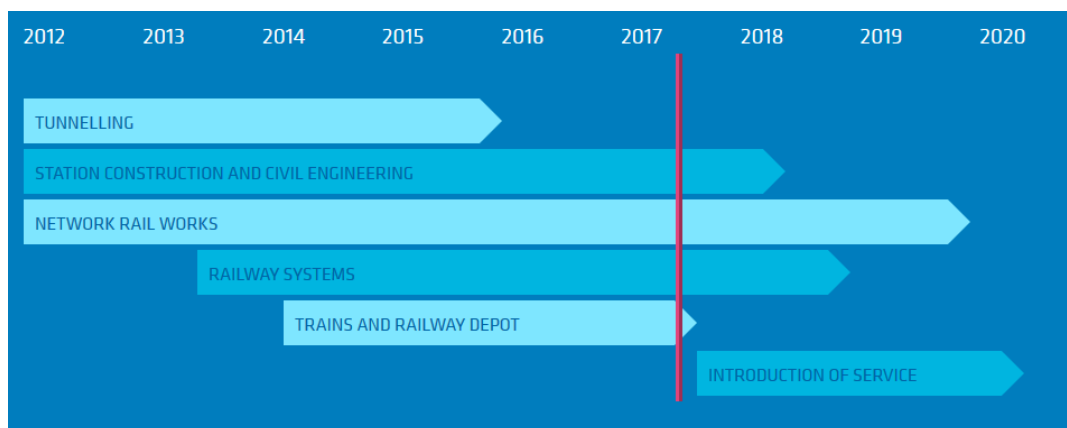


Ilustración 12. Proceso de construcción del Crossrail. Fuente: Crossrail.
<http://www.crossrail.co.uk/>

3.3.3.1 Túneles

Han sido necesarias 8 tuneladoras para construir los 42 nuevos kilómetros de túneles bajo la ciudad de Londres (túnel doble de 21 km), de hasta 40 metros de profundidad y 6,2 metros de diámetro. Trabajadores de la construcción han pasado tres años bajo la ciudad para completar dicha compleja red, lo que representó un gran desafío para la ingeniería a una escala sin precedentes.

Las máquinas fueron operadas por equipos de trabajo de 20 personas, trabajando por turnos y excavando alrededor de 3,4 millones de toneladas de tierra. Gran parte del material excavado se está utilizando para crear un hábitat de humedales para aves en Essex.

Los trabajos subterráneos, ahora completaos en su totalidad, comenzaron en mayo de 2012 y terminaron en Farringdon con la llegada de la tuneladora Victoria el 26 de mayo de 2015.

La ruta de los túneles fue trazada después de haber realizado extensos ensayos para considerar el impacto potencial en muchos de los edificios por encima de la ruta, incluyendo ciertos edificios catalogados. La ruta tenía que ser excavada sorteando numerosos cimientos, tuberías, alcantarillas, servicios públicos, así como otras infraestructuras subterráneas. Por ejemplo, en Tottenham Court Road, una de las zonas más congestionadas de Londres, la ruta tuvo que ser construida a menos de un metro de una plataforma operacional del metro.



Ilustración 13. Sección transversal de los túneles. Fuente: Crossrail. <http://www.crossrail.co.uk/>

El hecho de haber construido un doble túnel presentó una serie de ventajas, tales como:

- Reducción del tiempo necesario para la construcción de los túneles.
- Reducción del número de ejes necesarios para bajar la maquinaria y acceder a los túneles, minimizando las interrupciones a nivel del suelo.
- Reducción de los problemas de mantenimiento creados por las unidades de túnel más largas, mientras se utilizan las máquinas lo más cerca posible de su vida útil.

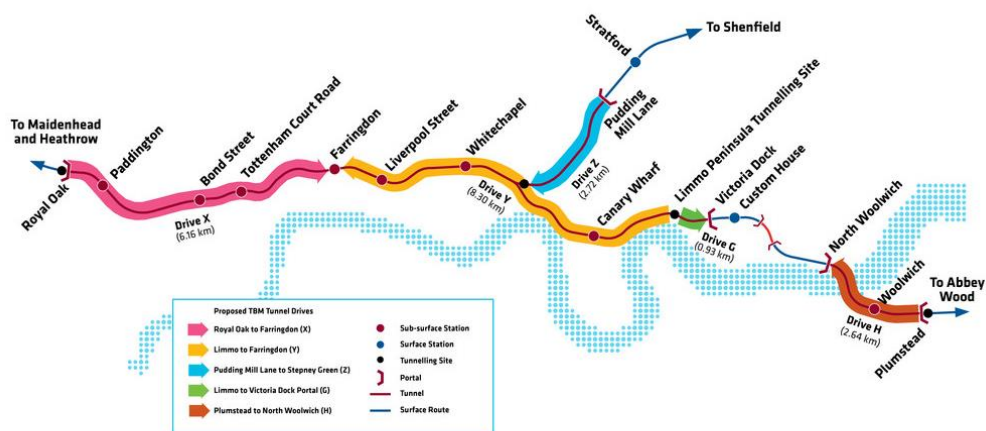


Ilustración 14. Tramos de túneles del Crossrail. Fuente: Crossrail.
<http://www.crossrail.co.uk/>

La construcción se dividió en cinco tramos de túneles diferentes:

- De Royal Oak a Farringdon oeste (Tramo X): dos túneles de 6.8 km contruidos por las tuneladoras Phyllis y Ada, completados en octubre de 2013 y enero de 2014, respectivamente.
- De Limmo a Farringdon este (Tramo Y): dos túneles de 8.3 km, contruidos por las tuneladoras Elizabeth y Victorias, completados en mayo de 2015.
- De Pudding Mill Lane a Stepney Green (Tramo Z): dos túneles de 2.7 km, contruidos por las tuneladoras Jessica y Elli, fueron completados en febrero y junio de 2014, respectivamente.
- De Limmo a Victoria Dock Portal (Tramo G): las dos tuneladoras Jessica y Elli también completaron estos dos túneles de 900 metros.
- De Plumstead a North Woolwich (Tramo H): las tuneladoras Sophia y Mary completaron dos túneles de 2.9 km.

Se requirieron más de 200.000 dovelas de hormigón para el revestimiento de los 42 kilómetros de túneles. Siete dovelas fueron necesarias para formar cada anillo del túnel, unidos entre sí para construir un revestimiento de hormigón reforzado con fibras de acero. Las dovelas fueron fabricadas en tres fábricas de prefabricados diferentes:

- Para los túneles del oeste, la empresa situada en Old Oak Common produjo 75.000 dovelas, lo que llegó a dar empleo hasta a 60 personas en sus puntos más álgidos.
- Para los túneles del este, una empresa en Chatham, Kent, fabricó 110.000 dovelas, empleando hasta a 120 personas.
- Para el túnel del río Támesis, una fábrica de Mulligar, en Irlanda, fabricó 25.000 dovelas.



Ilustración 15. Dovelas utilizadas en los túneles del Crossrail. Fuente: Crossrail.
<http://www.crossrail.co.uk/>

Además de los túneles principales, también han sido excavados 14 kilómetros de túneles para estaciones y plataformas de ferrocarril mediante un revestimiento de hormigón proyectado. Estos túneles han sido excavados en secciones cortas utilizando una amplia variedad de máquinas operadas por ingenieros altamente cualificados. Cinco estaciones se han creado bajo tierra usando esta técnica: Bond Street, Tottenham Court Road, Farringdon, Liverpool Street y Whitechapel, con una longitud tipo de 250 a 300 metros y con profundidades de hasta 30 metros por debajo del nivel del suelo. Dichas estaciones se encuentran en el área central de la ciudad, siendo zonas con una densa urbanización y población.



Ilustración 16. Construcción estaciones subterráneas. Fuente: Crossrail.
<http://www.crossrail.co.uk/>

Uno de los mayores retos de dicho proyecto es que también es necesaria la reutilización de la infraestructura de ferrocarril existente en desuso, incluyendo el túnel de Connaught en la antigua línea de North London Line a North Woolsich, así como las vías de ferrocarril nacional abandonadas a Custom House en diciembre de 2006.

Por ello también se trabajó para dar nueva vida al túnel de Connaught, de 550 metros de largo, construido en 1878 y en desuso de pasajeros desde diciembre d 2006. Los trabajos requerían reforzar y ensanchar la estructura y eliminar 135 años de carbón y hollín de los trenes de vapor que originalmente usaban las vías. Fue necesario el drenaje de 13 millones de litros de agua por encima del túnel para permitir a los trabajadores acceder a la estructura desde la superficie.

3.3.3.2 Nuevas estaciones

El proyecto también conlleva la construcción de 10 nuevas estaciones. Las 30 estaciones ya existentes, gozarán tras este proyecto de una mejor conexión. Los túneles están equipados con más de 15.000 km de cable que suministrará energía, iluminación y sistemas de comunicaciones a las estaciones. Se instalarán más de 4 km de puertas de andén en las plataformas, lo que ayudará a la circulación de aire y a

mantener los niveles de temperatura adecuados, junto con los ventiladores colocados en 18 localizaciones diferentes a lo largo de la ruta.

Las nuevas estaciones construidas serán Paddington, Bond Street, Tottenham Court Road, Farringdon, Liverpool Street, Whitechapel, Canary Wharf, Custom House, Woolwich y Abbey Wood. Cada una de ellas tendrá un carácter distinto concebido por diferentes arquitectos, que reflejan el medio ambiente y el patrimonio de la zona. Sin embargo, a nivel de plataforma, los componentes de diseño son comunes, tales como los asientos, señalización, puertas de andén, etc.; creando así una sensación consistente y familiar.

Todas las estaciones subterráneas contarán con puertas de andén de altura completa, aproximadamente unos 4 km de longitud en total. Dicho diseño será elegante y estará integrado con el diseño general de la estación, hechas de vidrio laminado con un marco mínimo. Por encima de cada puerta, habrá una pantalla de información de pasajeros, que también avisará a estos la necesidad de usar una puerta diferente si ésta fallara. Dichas pantallas estarán operadas por el sistema de señalización del tren, asegurando así el correcto funcionamiento de la puerta sincronizado con los movimientos del tren. Entre las puertas, habrá pantallas de televisión montadas verticalmente para mostrar publicidad.

Además de las características de seguridad, dichas puertas también ayudan de varias maneras:

- A separar los volúmenes de aire de la estación de los de los túneles, haciendo así el aire acondicionado más rentable y reduciendo el consumo de electricidad. Además de evitar que el aire frío desaparezca de los túneles, también mejorará la comodidad de los pasajeros evitando que se produzcan corrientes de aire en la estación.
- Reducirán los costes de limpieza de los espacios de la estación, ayudando a asegurar que el polvo y otras partículas de los túneles no lleguen a las plataformas mientras los trenes llegan a las estaciones.

El diseño de las nuevas estaciones se ha guiado por siete principios básicos:

- Identidad: creación de una marca consistente a través de un transporte moderno y contemporáneo que responde a los contextos locales.
- Claridad: creación un ambiente comprensible para los pasajeros desde el inicio hasta el final de sus viajes.
- Consistencia: Implementar un lenguaje coherente en toda la línea a través de materiales y componentes comunes.
- Inclusividad: asegurarse de que la nueva línea es accesible para todos.
- Sostenibilidad: un diseño que minimiza la generación de residuos, maximiza las cualidades de material y reduce el consumo de energía.
- Seguridad: las soluciones de diseño son seguras para los pasajeros.
- Centrado en las personas: diseñado para equilibrar las necesidades funcionales d las personas.

WOOLWICH STATION - VIEW FROM PLATFORM LEVEL

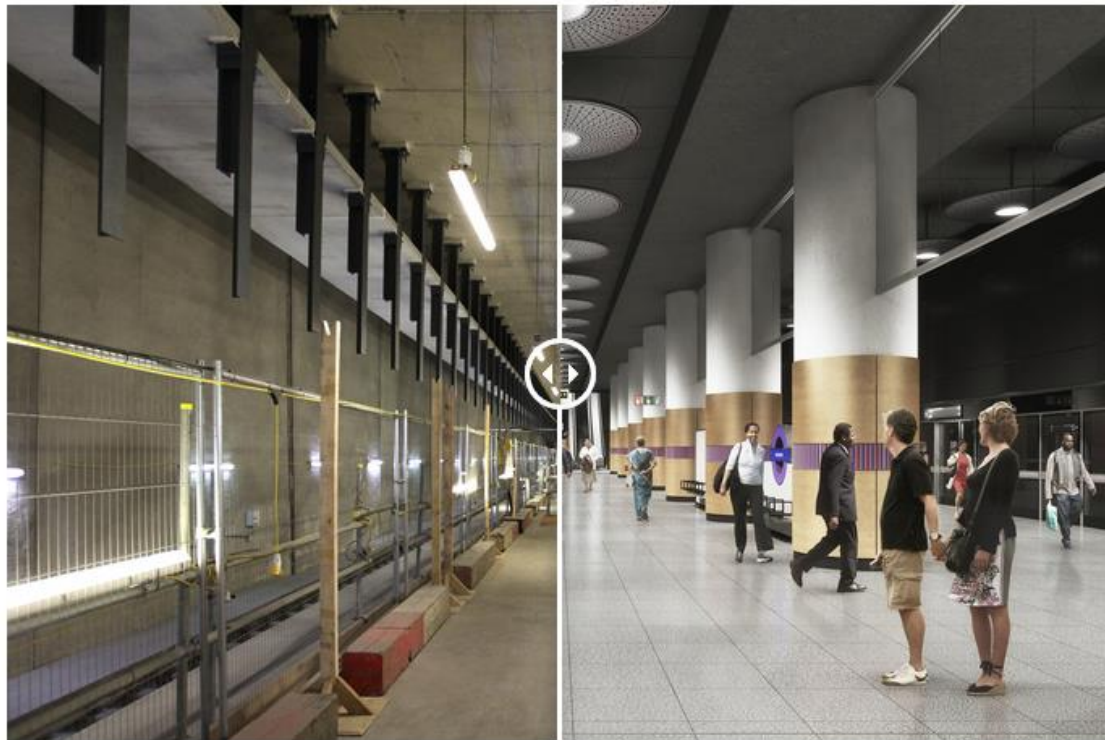


Ilustración 17. Imagen ejemplo de las nuevas estaciones, estación de Woolwich. Fuente: Crossrail. <http://www.crossrail.co.uk/>

3.3.3.3 Red ferroviaria

Tres cuartas partes de la ruta del Crossrail circulan por la superficie a través de Londres. Este trabajo aportará grandes beneficios a los pasajeros y ayudará a transformar muchas de las áreas a través de las cuales se ejecutará la ruta.

Se ha construido un viaducto ferroviario en la zona oeste para conectar Londres con Heathrow, en la línea principal oeste. Dicho viaducto es de 120 metros de largo y pesa 1.000 toneladas, y entró en servicio en el pasado enero de 2017. También ha sido necesario un paso subterráneo para permitir a los trenes pasar bajo otra vía de ferrocarril de mercancías.

Para la construcción de la red ferroviaria, se ha utilizado un tren de hormigonado de 465 metros de longitud, reformado y traído al Reino Unido desde Francia a través del túnel de la Mancha en agosto de 2015. Su velocidad máxima de producción es de 250 metros de losa de longitud por día. Su funcionamiento y mantenimiento es una operación de 24 horas, teniendo lugar el vertido de hormigón durante la noche, y mantenimiento y acondicionamiento durante el día.



Ilustración 18. Tren de hormigonado. Fuente: Crossrail. <http://www.crossrail.co.uk/>

Una flota a medida de cuatro pórticos se ha utilizado para transportar más de 70.000 traviesas y 57 km de carril dentro de los túneles, como parte de la secuencia inicial de las obras de construcción de las nuevas vías. Cada pórtico, operado por una sola persona, colocará 108 metros de longitud de las secciones de carril a lo largo de un tramo del túnel, y posteriormente transportará y depositará las traviesas.



Ilustración 19. Pórticos para la construcción. Fuente: Crossrail. <http://www.crossrail.co.uk/>

Se ha utilizado una plataforma de perforación de vanguardia, compuesta por dos componentes de la máquina: la primera que perfora todos los agujeros necesarios para el cableado y pasarelas, mientras que la segunda se centra en los agujeros para la línea eléctrica que accionará los nuevos trenes.



Ilustración 20. Plataforma de perforación para líneas eléctricas. Fuente: Crossrail.
<http://www.crossrail.co.uk/>

3.3.3.4 *Sistemas ferroviarios*

Los nuevos túneles y estaciones serán dotados de nuevos y modernos equipos en la vía, ventilación de túneles, energía de alto voltaje, energía de tracción, señalización, comunicaciones, etc. La tarea actual que se está llevando a cabo es la de equipar los nuevos túneles y estaciones con la infraestructura y sistemas necesarios que permitan la introducción del servicio del crossrail.

Los dos centros de logística temporales principales de los sistemas ferroviarios se encuentran en Plumstead, en el sureste de Londres, y en Westbourne Park, al oeste.

La electrificación ha sido realizada mediante la instalación de 1.400 pilotes junto a las vías para proporcionar los cimientos necesarios para el equipo de la línea aérea y la construcción de estructuras de acero a intervalos aproximadamente de 50 metros en las líneas principales. La instalación está ahora completa, y está siendo probada, esperando que sea operacional durante el año 2017.

3.3.3.5 *Trenes*

La nueva flota está constituida por 66 trenes de 200 metros de largo. Cada tren tendrá capacidad para unos 1500 pasajeros, y estará dotado de Wi-Fi y 4G. Los nuevos trenes tendrán un diseño interior moderno y espacioso, con 9 vagones

completamente interconectados, cuyo diseño ligero y eficiente resultará en un ahorro del 30% de electricidad, así como reducción del tiempo de viaje y acceso completo para personas con movilidad reducida.

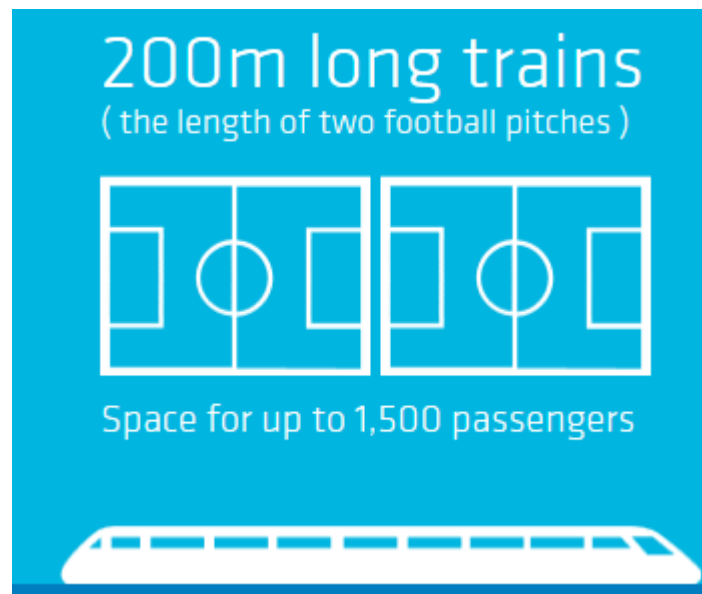


Ilustración 21. Longitud de los nuevos trenes del Crossrail Fuente: Crossrail.
<http://www.crossrail.co.uk/>

Construidos con materiales resistentes, pero a la vez ligeros, los trenes estarán bien equipados para dar el rendimiento requerido y comodidad a los viajeros, con características tales como sistemas inteligentes de iluminación y control de temperatura. Los trenes utilizarán la energía de frenado, por lo que se conseguirá una reducción del uso de electricidad de hasta el 30%.

Las zonas de las puertas serán áreas grandes, lo que permitirán un embarque y descenso más rápido y fácil de viajeros. El diseño interior y la paleta de colores han sido cuidadosamente seleccionados para proporcionar un ambiente acogedor, con materiales de acabado natural poco expuestos al desgaste. Se dispondrán cuatro espacios para sillas de ruedas en cada tren.

3.4 CONSECUENCIAS DEL CROSSRAIL

Las consecuencias que traerá el proyecto del Crossrail se estudian a continuación de manera general, ya que en el capítulo de impactos serán estudiados con mayor detalle.

3.4.1 Alivio de la congestión

Como se ha explicado con anterioridad, el principal problema del transporte en Londres son los altos niveles de congestión, tanto en el metro, National Rail y Dockland Light Railway (DLR, tren de cercanías).

El Crossrail tendrá un impacto significativo en el alivio de la congestión, aumentando la capacidad del sistema de transporte ferroviario en más del 10%. Los pronósticos de demanda indican que para el año 2026, el Crossrail transportará a más

de 200.000 pasajeros cada día en el período de hora punta de la mañana (de 7 a 10). Esta capacidad reducirá la congestión entre un 20% y un 60% en las diferentes líneas.

En las siguientes imágenes se muestra una estimación de los alivios de congestión, por estaciones de origen y de destino:

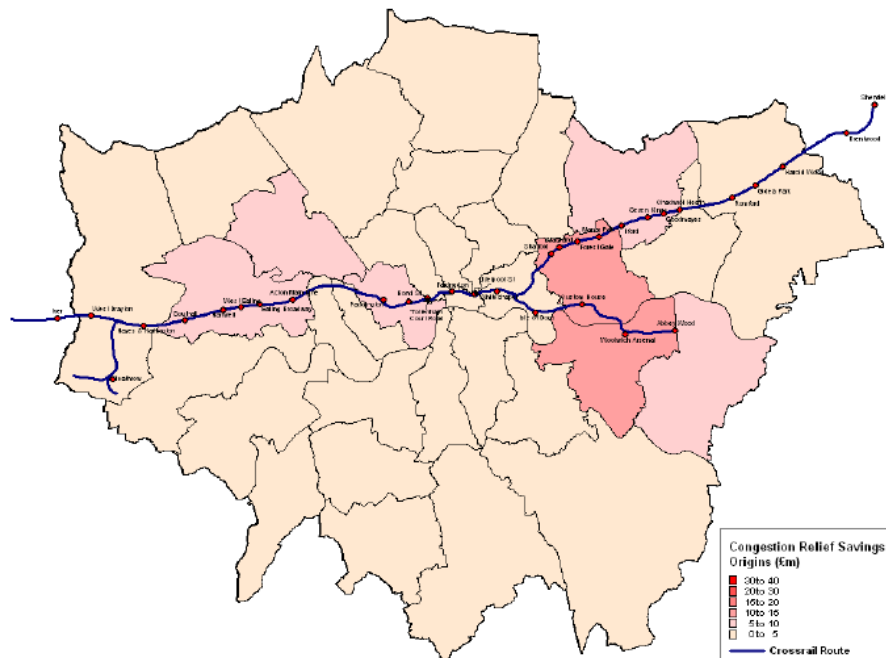


Ilustración 22. Alivios en la congestión con el Crossrail por orígenes. Fuente: Crossrail. Distribution of Crossrail Benefits (2009).

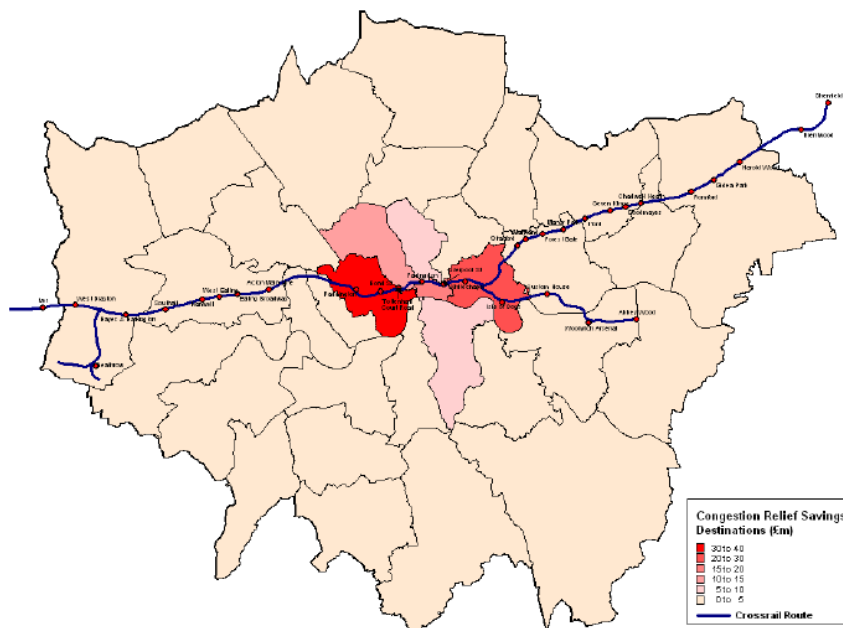


Ilustración 23. Alivios en la congestión con el Crossrail por destinos. Fuente: Crossrail. Distribution of Crossrail Benefits (2009).

3.4.2 Mejora de las conexiones y reducción del tiempo de viaje

Además de proporcionar capacidad adicional para apoyar el crecimiento de la ciudad, el proyecto también mejorará significativamente las conexiones de la ciudad, por lo que se reducirán los tiempos de viaje.

El elemento más significativo es la nueva conexión directa entre las redes ferroviarias nacionales entre Paddington y la calle de Liverpool, por lo que los pasajeros ya no tendrán que cambiar de trenes en las rutas existentes del ferrocarril nacional.

En la siguiente tabla se muestran a modo de ejemplo algunas reducciones que se producirán en los tiempos de viaje de ciertas rutas:

Tabla 5. Ejemplos reducción tiempos de viaje por rutas. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).

Ejemplo de viaje	Sin Crossrail	Con Crossrail
Slough – Tottenham Court	55 minutos	32 minutos
Ilford – Bond Street	35 minutos	25 minutos
Heathrow – Liverpool Street	55 minutos	32 minutos
Liverpool St. – Abbey Wood	40 minutos	18 minutos
Paddington – Canary Wharf	30 minutos	16 minutos

Las imágenes siguientes muestran los ahorros de tiempo por zonas, según orígenes y destinos:

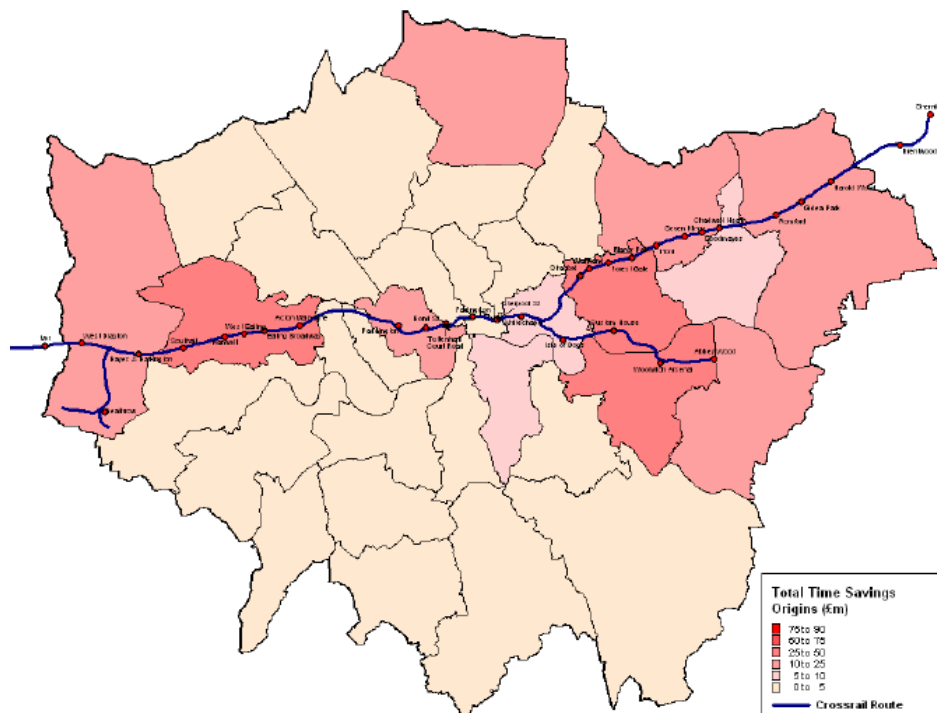


Ilustración 24. Disminución en tiempos de viaje con el Crossrail por orígenes. Fuente: Crossrail. Distribution of Crossrail Benefits (2009).

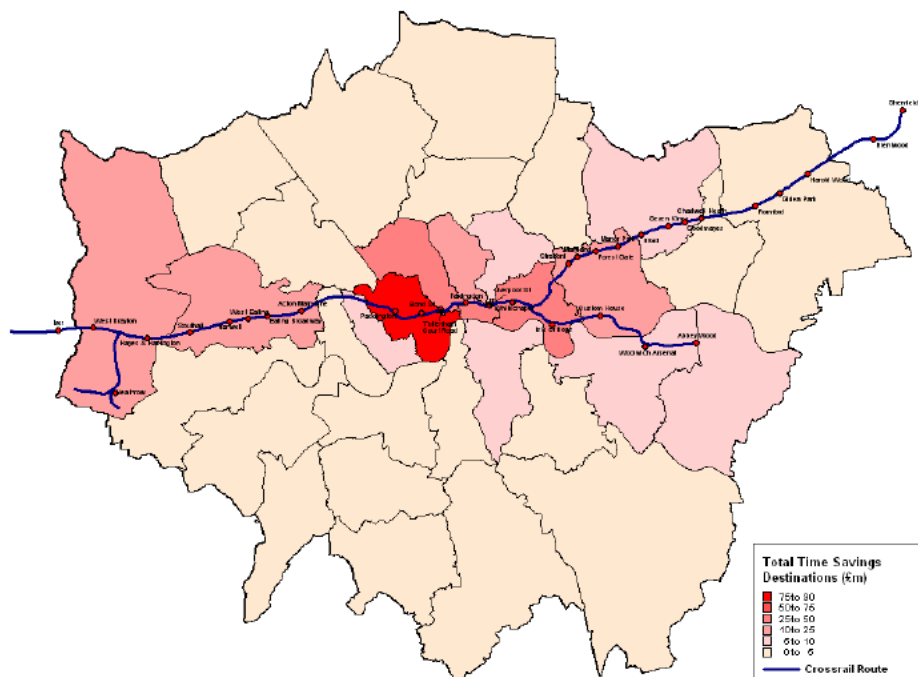


Ilustración 25. Disminución en tiempos de viaje con el Crossrail por destinos. Fuente: Crossrail. Distribution of Crossrail Benefits (2009).

3.4.3 Regeneración urbana y crecimiento económico

El Crossrail también permitirá la regeneración de las áreas alrededor de las estaciones a lo largo de su ruta, mejorando la accesibilidad. Esto puede atraer al sector privado y resulte en una mayor densidad de empleo cerca de las estaciones.

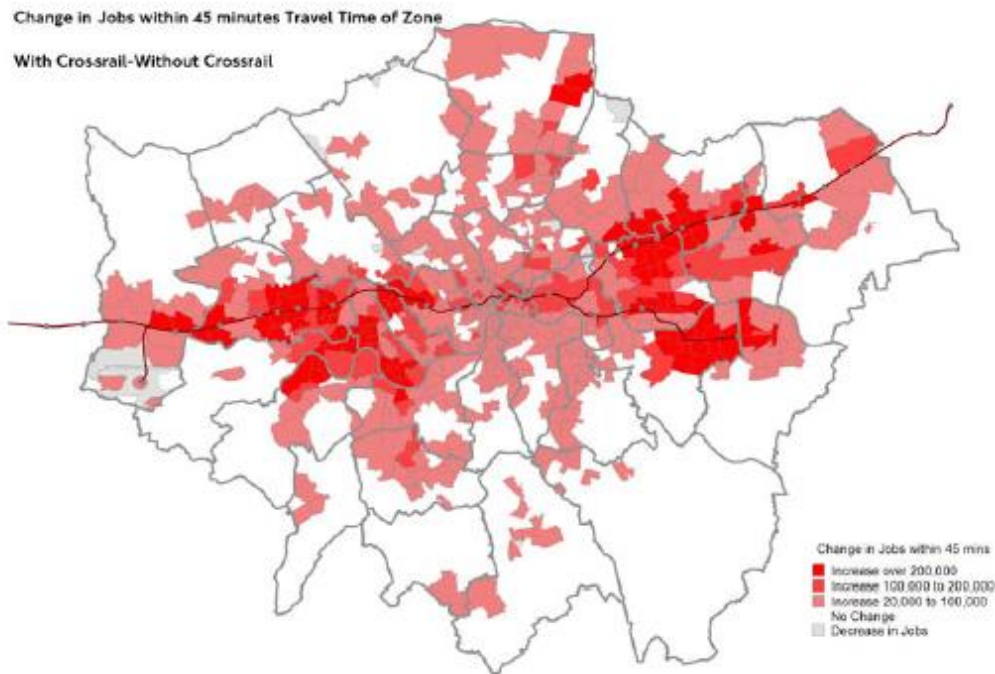


Ilustración 26. Impacto puestos de trabajo. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report. (2011)

3.4.4 Otras mejoras

Además de las mejoras expuestas, el Crossrail también proporcionará mejoras significativas como la calidad de servicio, seguridad y cuidado del medio ambiente.

Los nuevos trenes han sido diseñados para satisfacer las necesidades de los pasajeros del centro de la ciudad, pero también las de aquellos que viajan más lejos. Así mismo, las personas con movilidad reducida verán mejorada la accesibilidad, estando el Crossrail completamente adecuado a las últimas directivas europeas para las instalaciones de pasajeros con movilidad reducida.

Todas las estaciones incluirán señalización y seguridad mejorada, acceso independiente y libre de escalones desde el nivel de la calle hasta las plataformas, así como paso libre de acceso en los intercambios entre el Crossrail y muchas de las rutas ya existentes.

Se prevé que la congestión de tráfico en las carreteras de Londres se reduzca por efecto del Crossrail. Por tanto, también tendrá un impacto pequeño pero beneficioso en la reducción de los accidentes de tráfico.

En cuanto al medio ambiente, también ayudará a reducir tanto la contaminación ambiental como el ruido, reduciendo las emisiones de carbono emitidas anualmente.

4 APLICACIÓN Y ANÁLISIS

La aplicación del Análisis Coste-Beneficio consistirá en primer lugar en la definición de los parámetros básicos del estudio (tasa de descuento, año de referencia y horizonte temporal); seguido de la obtención y monetización de todos los ingresos y costes generados por el proyecto.

4.1 PARÁMETROS BÁSICOS

Como se ha indicado en el capítulo de Análisis Coste-Beneficio Medioambiental, los tres parámetros a definir en el ACB son: la tasa de descuento, el horizonte temporal, y el año de referencia.

En este estudio, la tasa de descuento utilizada será del 4%, siguiendo con las indicaciones europeas; el horizonte temporal será de 50 años a contar desde el fin de la construcción y por lo tanto inicio de la explotación; y el año de referencia será el 2012, año inicio de la construcción del Crossrail. El horizonte temporal será de 50 años y no de 30 como recomiendan las indicaciones de la Comisión Europea, ya que, como se ha explicado con anterioridad, al incluir impactos ambientales, el horizonte temporal se ve aumentado. Como año de referencia es tomado el 2012, ya que se realiza el análisis como si estuviéramos en el momento de la toma de decisiones. Nuestro estudio es un ACB *Ex Ante*, ya que todavía no se ha finalizado su construcción y no se puede comprobar si la rentabilidad esperada es la real.

4.2 OBTENCIÓN DE LOS COSTES E INGRESOS

En este apartado se analizarán todos los posibles costes e ingresos asociados al proyecto, sean relevantes o no para el estudio en fases posteriores. Así mismo, se explicará y procederá a la monetización de aquellos impactos en los que sea posible.

4.2.1 Costes de Construcción

La estimación de los costes de construcción en unidades monetarias del año 2002 fueron los siguientes:

Tabla 6. Distribución inicial de los costes de construcción del Crossrail. Fuente: Crossrail London. The Montague Review (2004).

Costes de construcción	Importe
Tierra y propiedad	£695.000.000,00
Túneles	£1.680.000.000,00
Infraestructura viaria	£314.000.000,00
Vías auxiliares para construcción	£298.000.000,00
Estaciones	£2.201.000.000,00
Sistemas ferroviarios	£919.000.000,00
Depósitos y mantenimiento	£283.000.000,00
Equipo de gestión de proyecto	£496.000.000,00
Total:	£6.886.000.000,00

Dicha estimación suponía que las obras de construcción comenzaban en julio de 2005 y finalizaban en abril de 2012, dando comienzo sus servicios en 2013. Pero como esto no ha sido así, ya que finalmente empezaron en el año 2012 y aún no han finalizado, por lo que habrá que actualizar dichos valores.

Además, se han añadido unos costes de contingencias e incertidumbres, con valor de 2.845 millones de libras, lo que da un total de costes de construcción de 9.740 millones de libras.

Debido a la interrupción de la revisión del proyecto en noviembre de 2003, el coste total (incluyendo contingencias) ascendió a la cantidad de 10.347 millones de libras, siendo el coste de 7.315 millones y las contingencias de un valor de 3.032 millones de libras. Este aumento se debió la necesidad de adquisición de un mayor número de propiedades y el aumento de la contingencia (del 15%) debido al cambio de ley.

Sin embargo, a dicha estimación base se le han detectado varios costes no cubiertos, tales como:

- Costes de construcción mal estimados. En cuanto a la sección central que incluye los túneles y estaciones de Royal Oak a Bow Triangle, se considera que tiene un sobre coste debido a esto de 1.264 millones de libras. Por otro lado, en las zonas no centrales, se han subestimado 1.310 millones de libras. Esto hace un total de 2.574 millones de libras.
- Ahorro de costes mal estimados. Se encontraron costes para la mano de obra de construcción del túnel demasiado altos, así como el tiempo de construcción de los túneles. Todo ello conlleva a una corrección que da lugar a un ahorro en los costes de 620 millones de libras en la zona central.
- Sistemas ferroviarios y señalización extra. El coste para la señalización ferroviaria fue estimado en 506 millones de libras, pero no es suficiente. Un enfoque más realista basado en los esquemas piloto y estimaciones de coste de modernización de otras rutas que incluyen el sistema ERTMS, sugirió un sobre coste de 150 millones de libras.
- Ahorro coste maquinaria. El coste total de adquisición de la maquinaria se estimó en 650 millones de libras para la flota total. Pero de esta revisión se obtuvo que para la estrategia general de adquisiciones y riesgos de los vehículos era necesaria la adición de un 20% como contingencia, lo que da lugar a 130 millones de libras más de costes.
- El coste de equipo de gestión de proyecto se subestimó en unos 1.000 millones de libras.

- Las negociaciones con respecto a los servicios del aeropuerto de Heathrow, tampoco fueron tenidos en cuenta, lo que daría lugar a un aumento en las contingencias.
- Costes de adquisición de la propiedad, actualmente en posesión de la Network Rail y metro de Londres. El estudio identifica unas 3.500 propiedades para adquisición temporal o permanente. La mayoría son subterráneas, por lo que el pago por compensación a los dueños es mínimo. Pero hay unas 300 propiedades en superficie, algunas de las cuales abarcan ciertos intereses legales. El total de las adquisiciones permanentes asciende al 75%. Los costes de compensación se han calculado sin ningún subsidio, ingresos temporales o recibos de capital de cualquier desarrollo posterior, por lo que estos gastos se incurrirán antes o durante la construcción. La revisión considera que éste es un enfoque sólido tras la revisión de noviembre de 2003, por lo que no se calculan gastos adicionales.
- Por último, se estima un incremento extra en las contingencias de 171 millones de libras.

Por lo tanto, el coste total de construcción del proyecto con todas las modificaciones resulta ser el siguiente:

Tabla 7. Distribución final de los costes de construcción del Crossrail. Fuente: Crossrail London. The Montague Review (2004).

Costes de construcción	Importe
Total, revisado sin contingencias	£7.315.000.000,00
Costes mal calculados de construcción	£2.574.000.000,00
Ahorro costes mal calculados	-£620.000.000,00
Sistemas ferroviarios y señalización extra	£150.000.000,00
Coste extra maquinaria	£130.000.000,00
Extra equipo gestión de proyecto	£1.000.000.000,00
Incremento extra contingencias	£171.000.000,00
Total:	£10.720.000.000,00

Como se ha comentado con anterioridad, todos estos valores de costes de construcción están calculados para el inicio de la construcción en el año 2005. Pero en realidad se inició en el año 2012, por lo que hay que actualizar este valor en función de la inflación.

La inflación media en Reino Unido del año 2005 al 2012, tanto a partir de los datos del Banco Mundial, como de Eurostat, resultó ser aproximadamente del 3%.

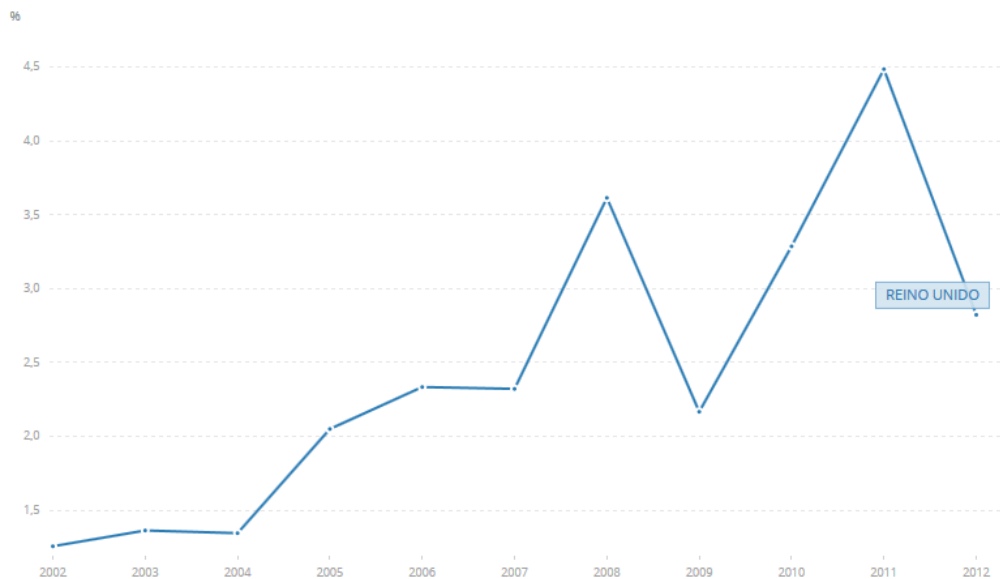


Gráfico 2. Inflación Reino Unido 2002-2012. Fuente: Banco Mundial.

El coste de £10.720.000.000,00 está medido en unidades monetarias del año 2002 comenzando la construcción en el año 2005, por lo tanto, medido en unidades monetarias del año 2005, aplicando la tasa de descuento del 4%, será de:

$$\text{Coste}_{PV2005} = £10.720.000.000,00 \cdot 1,04^{(2005-2002)} = £12.058.542.080$$

Para transformar este valor en unidades monetarias del año 2012 (el comienzo de la construcción), teniendo en cuenta la inflación y la tasa de descuento, resulta de:

$$\text{Coste}_{PV2012+\text{inflación}} = £12.058.542.080 \cdot 1,07^{(2012-2005)} = £19.363.383.505,40$$

Este último valor es el que será utilizado para el análisis, pero se ha decidido distribuirlo de forma uniforme entre los años de construcción (2012-2018), lo que hace un coste de construcción anual de **£2.766.197.644**.

4.2.2 Costes de Operación, Mantenimiento y Renovación

Dichos costes incluyen el coste de operación de los trenes, por lo tanto, el derecho al uso del Rail Network de la red ferroviaria principal, así como a sus estaciones.

Crossrail sólo sería responsable del mantenimiento y renovaciones en la sección central, aquellos en la red principal que se paguen a través de las tarifas de acceso a la vía. Dichos valores han sido obtenidos para un período de vida de 60 años, por lo que habrá que ajustarlos a nuestro período de estudio de 50 años.

Se muestran a continuación los costes de mantenimiento para un período de vida útil de 60 años totales, medidos en unidades monetarias del año 2002, para los costes de reposición de material rodante ferroviario, operación y mantenimiento, y renovación de la vía. A estos costes, hay que restarle ciertos costes que ya no se llevarán a cabo en la red nacional y metro, debido a la disminución de estos servicios y paso al Crossrail. Tras esto, se aplica un 20% de contingencias, a lo que

posteriormente se le descuentan ciertos costes de mantenimiento que ya no se realizarán debido a la disminución de los servicios de autobús urbano con la existencia del Crossrail.

Todos estos valores suponen el comienzo de explotación en el año 2013, cuando se suponía que terminarían los trabajos. Pero finalmente acabarán el año 2018 y entrará en operación en el 2019, por lo que también será necesaria la actualización. Dichos valores están calculados para un período de vida de 60 años.

Tabla 8. Distribución de los costes de operación, mantenimiento y renovación del Crossrail. Fuente: Crossrail London. The Montague Review (2004).

Operación, mantenimiento y renovación	Importe
Reposición material rodante ferroviario	£1.099.000.000,00
Operación y Mantenimiento	£1.351.000.000,00
Renovación de la vía	£2.374.000.000,00
Disminución servicios ferrocarril nacional y metro	-£656.000.000,00
20% contingencias	£832.000.000,00
Disminución servicios autobús	-£915.000.000,00
Total:	£4.085.000.000,00

La suma de los gastos de operación, mantenimiento y renovación con los años, se expresa de la siguiente forma, actualizada para el año 2002:

$$£4.085.000.000,00 = \left(\sum_{k=0}^{59} \frac{q}{(1+r)^k} \right) \cdot \frac{1}{1,04^{11}}$$

El último término $\left(\frac{1}{1,04^{11}}\right)$ es debido a que la operación está pasada del año 2013, cuando en teoría comenzaba, a unidades monetarias del año 2002 (11 años).

Siendo “q” la cantidad a gastar cada año para la operación, mantenimiento y renovación. Desarrollando la progresión:

$$\sum_{k=0}^{n-1} q \cdot r^k = q \cdot \frac{1-r^n}{1-r}$$

$$\sum_{k=0}^{60-1} q \cdot \left(\frac{1}{1,04}\right)^k = q \cdot \frac{1-\left(\frac{1}{1,04}\right)^{60}}{1-\frac{1}{1,04}}$$

Igualando la expresión anterior a nuestra cantidad dato, y añadiendo el término de actualización monetaria del año 2013 al 2002 explicado antes, queda:

$$£4.085.000.000,00 = \left(q \cdot \frac{1-\frac{1}{1,04^{60}}}{1-\frac{1}{1,04}} \right) \cdot \frac{1}{1,04^{11}}$$

Resolviendo, se obtiene que el gasto de operación anual calculado como si la operación comenzase en el año 2013, y es de:

$$q = £267.279.624,40$$

Pero como finalmente la operación comienza en el año 2019, se le deberá añadir la inflación. Se usará la inflación media en Reino Unido del año 2013 al 2019. Como no hay datos más que hasta el año 2016, se usará la media de la inflación de los años 2013-2016 en Reino Unido (fuente Eurostat) que fue de un 1,2%.

Obteniendo finalmente el valor del gasto anual en mantenimiento y operación, teniendo en cuenta que el comienzo de la explotación comienza en el año 2019, desde el año 2019 al 2068:

$$q' = q \cdot (1 + \text{inflación})^{(2019-2013)} = £267.279.624,40 \cdot (1 + 0,012)^6$$

$$q' = £287.110.402,10$$

4.2.3 Impactos medioambientales durante la construcción

Las cuestiones ambientales durante la construcción han sido fundamentales para el desarrollo del Crossrail desde sus etapas más tempranas, incorporando medidas para evitar, reducir o mitigar los impactos ambientales que se podrían producir durante la construcción.

Todos los túneles y vías están siendo evaluados usando la metodología de Calidad Ambiental de Ingeniería Civil (CEEQUAL), y han obtenido calificaciones “Excelentes” hasta la fecha.

Además, la evaluación ambiental de las estaciones se ha llevado a cabo mediante BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology), obteniendo una vez más calificaciones aptas.

Se estudian por separado los distintos impactos ambientales ocasionados por el proyecto.

4.2.3.1 Contaminación del aire

Las distintas actividades de la maquinaria de construcción ocasionan contaminación del aire por medio de la emisión de nitrógeno, azufre, etc. El proyecto se comprometió a reducir las emisiones de partículas de la maquinaria de construcción, como parte de los estándares de requisitos mínimos ambientales que se requieren cumplir. El uso de filtros de partículas diésel o motores Euro Stage IIIB más limpios en las instalaciones y equipos está ayudando a minimizar el impacto negativo en la calidad del aire de las emisiones diésel.

Debido a la dificultad de medición de la cantidad de sustancias nocivas que han contribuido a la contaminación de la atmósfera en la fase de construcción del Crossrail, y que el 84% de la maquinaria utilizada en la construcción ha sido equipada con controles de emisiones, por lo que se considera insignificante la contaminación; no se contabilizará dicho impacto en el estudio.

En caso de tener que calcular dicho impacto en Reino Unido, bastaría con multiplicar cada tonelada de contaminante por los valores de la siguiente tabla, en

función del tipo de contaminante. Dichos números representan los €/2002/tonelada de contaminante causados:

Tabla 9. Conversión coste toneladas de contaminante emitido. Fuente: Bickel, P. et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (2006).

Contaminante	NO _x	NM VOC	SO ₂	PM _{2.5} zona urbana	PM _{2.5} zona rural
Valoración en Reino Unido	1.600 €/2002/t	700 €/2002/t	2.900 €/2002/t	410.000 €/2002/t	64.000 €/2002/t

4.2.3.2 Contaminación del agua

El proyecto ha trabajado conjuntamente con la Agencia de Medio Ambiente para asegurar la protección y gestión eficaz de los recursos hídricos durante la construcción. Los lugares de trabajo están cerca del río Támesis, Lea, North Dock en Canary Wharf y el Royal Docks cerca de Excel. Cuando es posible, se almacena el agua de lluvia para usarla posteriormente en la construcción (sobre todo para la perforación de los túneles). Pero no sólo se ha estudiado el ahorro de agua, sino también la disminución de su contaminación para posterior vertido a los cauces naturales.

Las medidas de ahorro de agua también se han tenido en cuenta en el futuro ferrocarril operacional, con sistemas de detección de fugas, así como la recolección del agua de lluvia para el lavado los nuevos trenes.

Debido a todas las medidas tomadas tanto en la construcción como operación del Crossrail para la reducción de la contaminación del agua, no se considera éste un impacto relevante a ser tomado en cuenta en este estudio.

4.2.3.3 Pérdida de biodiversidad

A pesar de situarse en una zona densamente poblada, todavía existe un impacto en la biodiversidad existente en la zona. Las tierras que rodean las vías férreas y estaciones generarán una variedad de vida silvestre (árboles, orquídeas, pequeños reptiles, insectos...). Se ha estudiado por tanto el valor de los hábitats perdidos y creados, identificando aquellos que se puedan incluir en la restauración de la zona.

Un ejemplo es la creación de una nueva reserva natural, Wallasea Island, a partir del material excavado de los túneles y estaciones, con 3 millones de toneladas de material. Se ha utilizado casi el 80% de cada tonelada por kilómetro de material, transportándolo mediante ferrocarril y barcos, eliminando aproximadamente unos 150.000 camiones del centro de Londres. Se ha asegurado que se establezca un hábitat adecuado para muchos miles de aves migratorias en el área, que antes era inerte. A principios de noviembre de 2015, al menos 39 especies diferentes de aves fueron contadas en el sitio.

Las medidas tomadas a este respecto han logrado por lo tanto disminuir el impacto a la biodiversidad del entorno tras el proyecto, o incluso eliminarlo, por lo que no será contabilizado para el análisis.

4.2.3.4 Residuos de la excavación

Se ha intentado reutilizar un alto porcentaje de la tierra resultante de la excavación de los túneles. De los materiales producidos por embalaje, por el contrario, han sido más propensos para su reciclaje que para su reutilización. Además, al menos el 15% de los materiales utilizados en la construcción del Crossrail, han sido reutilizados o reciclados. A finales del año 2015 (últimos datos disponibles) el rendimiento de los residuos del Crossrail ha sido:

- El 97% de los residuos de demolición han sido reutilizados o reciclados.
- El 97% de los residuos de construcción se han reutilizado o reciclado.
- El 99% del material excavado ha sido reutilizado, lo que supone más de 7 millones de toneladas de material excavado, utilizado para crear nuevas reservas naturales, instalaciones recreativas, agricultura o incluso tierra industrial.
- El 34% del valor total del material utilizado en la construcción proviene de la reutilización o reciclaje de otros anteriores.

Las medidas tomadas para reducir los residuos de las obras han sido muy efectivas, reduciendo significativamente los mismos. Por ello, dichos impactos tampoco serán tenidos en cuenta para el estudio.

4.2.3.5 Eficiencia energética

La cantidad de energía utilizada en la construcción causa un gran impacto ambiental. Pero el proyecto ha trabajado para minimizar el uso de energía durante la construcción. Se ha observado una mayor conciencia de las actividades de ahorro de energía en la construcción y oficinas, por lo que muchos de los cambios requieren pocos o ningún coste a establecer.

4.2.3.6 Emisiones de CO₂

En cuanto a la huella de carbono, se estima que las emisiones totales de dióxido de carbono en la fase de construcción sean del orden de 1,7 millones de toneladas, ahorrándose hasta el año 2015 unas 52.000 toneladas de emisiones. Una vez el ferrocarril esté en funcionamiento, se estima un ahorro anual del orden de 70.000 a 225.000 toneladas de CO₂, debido en gran parte al desplazamiento de los viajes en automóvil y a la sustitución de los trenes diésel de la red existente, por lo que se contabilizará como un beneficio.

Además, se trabajó para reducir el carbono incorporado en los materiales de construcción. Cualquier reducción de cemento consiguió una reducción en el carbono inherente en el hormigón.

Se contabilizará como coste medioambiental las emisiones de CO₂ durante la construcción, contabilizadas en 1,7 millones de toneladas. Aunque en un futuro, en la fase de operación, las emisiones de CO₂ se reduzcan en comparación con la situación actual (lo que supondrá un beneficio y no un coste), en la fase de construcción todavía no se ven estos beneficios, teniendo que contabilizar las emisiones producidas como un coste.

Según el proyecto HEATCO (Bickel et al., 2006), las emisiones de CO₂ se miden en función de su afección al calentamiento global. El método de cálculo de los costes ambientales debido a la emisión de gases de efecto invernadero (normalmente CO₂) consiste en multiplicar la cantidad equivalente por un factor de coste. Debido a la escala global del daño causado, no hay diferencia por el lugar de Europa en que se produzcan, por lo que se aplica el mismo valor en todos los países. Sin embargo, el factor propuesto es diferente dependiendo del año en el que se produce la emisión.

La siguiente tabla muestra los precios por tonelada de CO₂, convertidos a € del año 2002. Se recomienda ningún aumento adicional de los valores de la siguiente tabla con el crecimiento del PIB, ya que no influenciará notablemente el efecto invernadero. Por lo tanto, dichos costes no variarán en función de la inflación.

Tabla 10. Monetización de costes por emisiones de CO₂. Fuente: Bickel, P. et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (2006).

Año de emisión	€ ₂₀₀₂ / tonelada CO ₂
2000-2009	22
2010-2019	26
2020-2029	32
2030-2039	40
2040-2049	55
2050	83

La conversión de euros a libras del año 2002 era de 0,629 £/€. El coste será, por lo tanto:

$$\text{Coste ambiental}_{2002} = 1.700.000 \, t \cdot 26 \frac{\text{€}}{t} \cdot 0,629 \frac{\text{£}}{\text{€}} = \text{£}27.801.800,00$$

Actualizado al año 2012 por medio de la tasa de descuento, se obtiene un valor de:

$$\text{Coste ambiental}_{2012} = \text{£}27.801.800,00 \cdot 1,04^{(2012-2002)} = \text{£}41.153.455,56$$

Por lo tanto, el coste ambiental por emisiones de CO₂, en unidades monetarias del año 2012, será de **£41.153.455,56**.

4.2.3.7 Ruido en la fase de construcción

La construcción causará ruido y vibración en ciertos lugares del emplazamiento. Esto se ha controlado en la medida de lo posible, sin embargo, hay situaciones en las que el impacto debe ser aliviado todavía más.

Una de las medidas adoptadas es el compromiso de proporcionar un paquete de aislamiento de ruido a las propiedades que lo pidan cerca de las obras.

Los criterios fijados para poder beneficiarse de esta medida consisten en superar los valores de la siguiente tabla:

Tabla 11. Criterios mínimos para beneficiarse de las medidas de mitigación del ruido.
Fuente: Crossrail London. Noise and vibration mitigation scheme.

Time	Relevant Time Period	Averaging Time T	Noise Insulation Trigger Level dB L _{Aeq, T}
Monday to Friday	07:00 – 08:00	1 hr	70
	08:00 – 18:00	10 hr	75
	18:00 – 19:00	1 hr	70
	19:00 – 22:00	3 hr	65
	22:00 – 07:00	1 hr	55
Saturday	07:00 – 08:00	1 hr	70
	08:00 – 13:00	5 hr	75
	13:00 – 14:00	1 hr	70
	14:00 – 22:00	3 hr	65
	22:00 – 07:00	1 hr	55
Sunday and Public Holidays	07:00 – 21:00	1 hr	65
	21:00 – 07:00	1 hr	55

Debido a la eficacia de dichas medidas de mitigación del ruido, cuyos costes se consideran incluidos en los costes de construcción, no se contabilizará el impacto del ruido durante la construcción como coste, ya que serán mínimos.

4.2.4 Impactos sociales debido a la afección de las obras

La construcción del Crossrail dará lugar en determinados momentos al corte de carreteras y suspensión o modificación de ciertas rutas de transporte público. El proyecto se comprometió a proporcionar información actualizada a tiempo real sobre las obras en toda la ruta, para garantizar que la población local se mantenga al día sobre el progreso actual. Dicha información sobre las obras a tiempo real se ha realizado mediante un mapa interactivo en la página web del proyecto. Debido a la dificultad de medición de las personas afectadas por los cortes en carreteras y servicios públicos, dicho impacto no contabilizará en el estudio.

4.2.5 Ingresos debidos a la tarifa del transporte

Se calcula que los ingresos totales debidos a la tarifa del transporte, así como a las oportunidades comerciales del Crossrail, serán de £13.575.000.000. Dichos valores están calculados sobre unidades monetarias del año 2002, para un período de 60 años, abriendo los servicios al público en el año 2013, por lo que será necesaria la actualización.

Sin embargo, el 55% de estos ingresos, son transferencias de los otros tipos de transporte previamente existentes. Se estima que el 30% de los pasajeros anteriormente usaban el ferrocarril nacional, el 3% el autobús, el 2% el DLR y el 21% el metro. Por lo tanto, habría que restarle la cantidad de £7.426.000.000, ingresos que ya existían previamente a la construcción del Crossrail, lo que hacen un total de ingresos de £6.149.000.000.

La actualización de dicho coste es el siguiente:

$$£6.149.000.000 = \left(\sum_{k=0}^{59} \frac{q}{(1+r)^k} \right) \cdot \frac{1}{1,04^{11}}$$

El último término $\left(\frac{1}{1,04^{11}}\right)$ es debido a que el beneficio de ingresos está pasado del año 2013, cuando en teoría comenzaba la explotación, a unidades monetarias del año 2002 (11 años).

Siendo “q” el ingreso anual debido a la tarifa de transporte del Crossrail. Desarrollando la progresión:

$$\sum_{k=0}^{n-1} q \cdot r^k = q \cdot \frac{1-r^n}{1-r}$$

$$\sum_{k=0}^{60-1} q \cdot \left(\frac{1}{1,04}\right)^k = q \cdot \frac{1-\left(\frac{1}{1,04}\right)^{60}}{1-\frac{1}{1,04}}$$

Igualando la expresión anterior a nuestra cantidad dato, y añadiendo el término de actualización monetaria del año 2013 al 2002 explicado anteriormente, queda:

$$£6.149.000.000 = \left(q \cdot \frac{1-\frac{1}{1,04^{60}}}{1-\frac{1}{1,04}} \right) \cdot \frac{1}{1,04^{11}}$$

Resolviendo, se obtiene que la inversión anual debido a la tarifa de transporte, como si la operación comenzase en el año 2013, es de:

$$q = £402.326.171,50$$

Pero como finalmente la explotación comienza en el año 2019, se le deberá añadir la inflación. Se usará la inflación media en Reino Unido del año 2013 al 2019. Como no hay datos más que hasta el año 2016, se usará la media de la inflación de los años 2013-2016 en Reino Unido (fuente Eurostat) que fue de un 1,2%.

Obteniendo finalmente el valor anual de los ingresos debidos a la tarifa de transporte, teniendo en cuenta que el comienzo de la explotación comienza en el año 2019, desde el año 2019 al 2068:

$$q' = q \cdot (1 + \text{inflación})^{(2019-2013)} = £402.326.171,50 \cdot (1 + 0,012)^6$$

$$q' = £432.176.710,50$$

4.2.6 Beneficios Sociales

4.2.6.1 Patrimonio cultural

La construcción del Crossrail ha dado a los arqueólogos la oportunidad única de explorar algunos de los sitios históricos más importantes y antiguamente inaccesibles de la capital. Se han descubierto más de 10.000 objetos que abarcan 55 millones de años de la historia de la ciudad.

Muchos de estos objetos se reúnen por primera vez en una importante exposición en el Museo Docklands de Londres, titulada “Tunnel: The Archaeology of Crossrail”.

Además, se ha creado una nueva versión virtual de la exposición, y un gran número de fotografías y vídeos relacionados con los objetos encontrados se pueden encontrar también en la web del proyecto.

Esto es sin duda un beneficio social, pero de difícil cuantificación, por lo que no será monetizado para incluir en el estudio.

4.2.6.2 Crecimiento del empleo y mayor productividad

El proyecto del Crossrail no sólo ha provocado un aumento en puestos de trabajo durante su construcción, sino que también tenderá a favorecer el crecimiento de los puestos de empleo en las oportunidades creadas a su alrededor.

La principal valoración son los beneficios que resultan de los empleos, cambiando su ubicación al centro de Londres con una mayor productividad, debido a la mejor accesibilidad al centro de Londres. El análisis muestra que, al mejorar el acceso al centro, significa que hay más trabajadores dispuestos a trabajar ahí.

Las primeras estimaciones sugieren un aumento del empleo en el centro de la ciudad de 33.000 nuevos puestos de trabajo en su vida útil. Este hecho hace que el PIB para los 50 años de vida útil aumente en £3.232 millones (en unidades monetarias para el año 2002). Este valor está calculado como si la construcción hubiera finalizado en el año 2012 y los servicios del crossrail comenzasen en 2013. Por lo tanto, la actualización de dicho beneficio social será:

$$\text{Coste}_{PV2013} = £3.232.000.000 \cdot 1,04^{(2013-2002)} = £4.975.515.510$$

Para transformar este valor en unidades monetarias del año 2019 (el comienzo de la explotación), teniendo en cuenta la inflación del 1,2% del año 2013 hasta la actualidad, como se ha explicado en apartados anteriores, resulta:

$$\text{Coste}_{PV2019+\text{inflación}} = £4.975.515.510 \cdot 1,052^{(2019-2013)} = £6.744.232.338$$

Este último importe es el que será utilizado para el análisis, dividido uniformemente en los 50 años de vida útil, hacen un valor de **£134.884.646,80**.

En cuanto a la creación de nuevos puestos de trabajo para la construcción, operación y explotación del servicio del Crossrail, se estima la creación de unos 55.000 puestos de trabajo en total. Ha sido importante para el proyecto mostrar a las

empresas del país, independientemente de su tamaño y ubicación, de las oportunidades disponibles. Una muestra de la cantidad de contratos con diferentes empresas por región se muestra en la imagen siguiente:

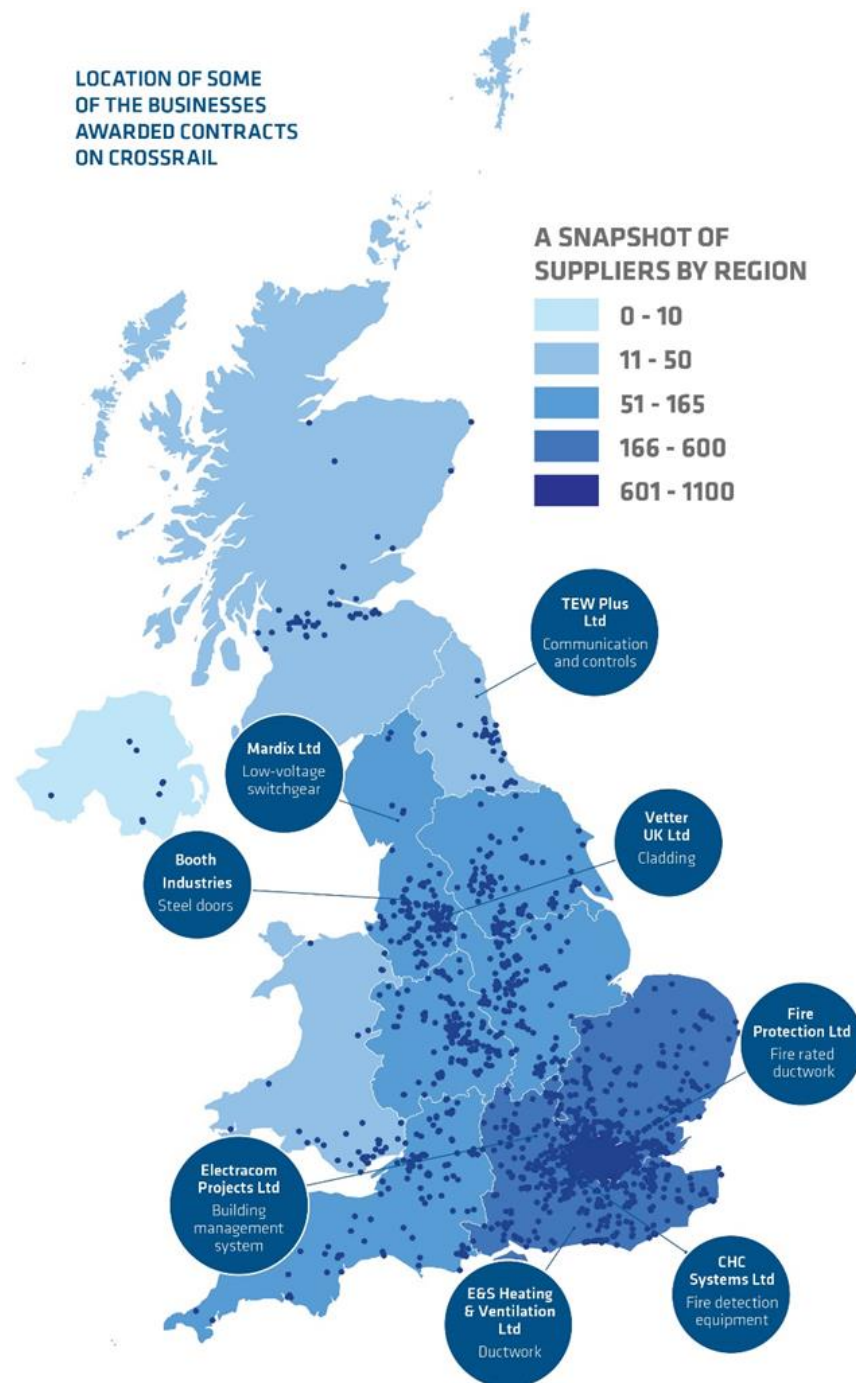


Ilustración 27. Localización por regiones de los principales contratos del Crossrail en Reino Unido. Fuente: Crossrail. <http://www.crossrail.co.uk/>

Además, el proyecto está comprometido con la promoción de la diversidad e inclusión en el trabajo, mostrando en la siguiente tabla la diversidad del equipo integrado del Crossrail y la mano de obra de sus contratistas:

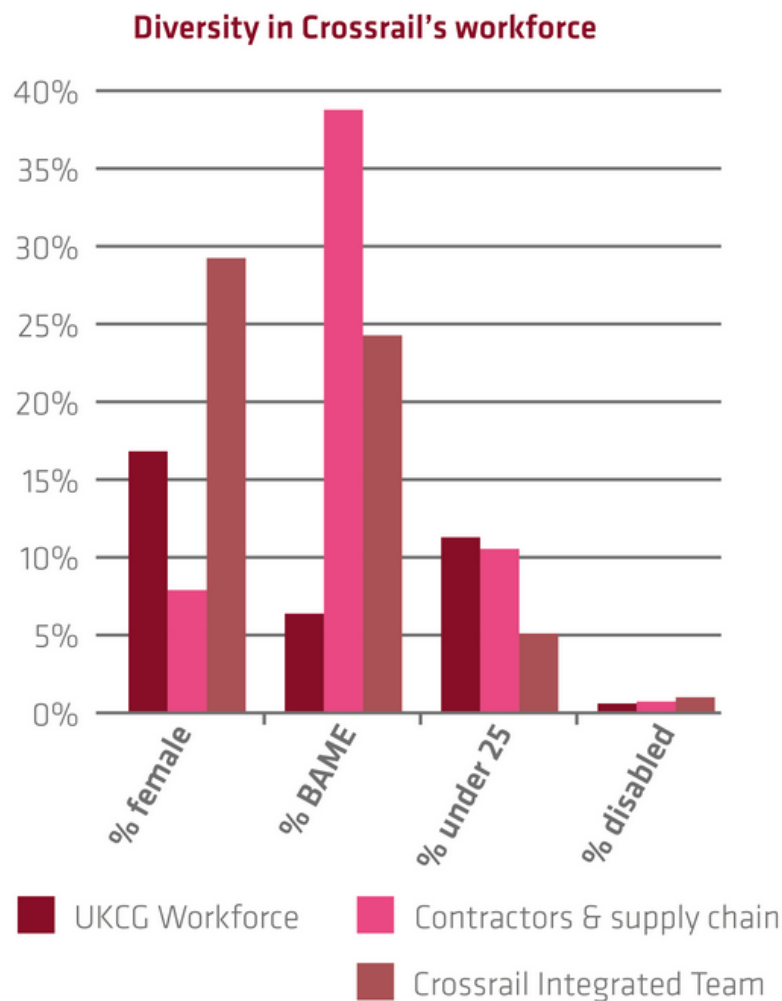


Ilustración 28. Fuente: Crossrail. <http://www.crossrail.co.uk/>

Para el cálculo del incremento del PIB con estos 55.000 nuevos puestos de trabajo, se calcula en relación con el aumento del PIB con los 33.000 nuevos puestos de trabajo en el centro de Londres, resultando un total de incremento del PIB de £5.386.666.666,67. Se realiza la actualización de la misma manera que la cantidad anterior:

$$\text{Coste}_{PV2013} = £5.386.666.666,67 \cdot 1,04^{(2013-2002)} = £8.292.525.850$$

Para transformar este valor en unidades monetarias del año 2019 (el comienzo de la explotación), teniendo en cuenta la inflación del 1,2% del año 2013 hasta la actualidad, como se ha explicado en apartados anteriores, resulta:

$$\text{Coste}_{PV2019+\text{inflación}} = £8.292.525.850 \cdot 1,052^{(2019-2013)} = £11.240.387.230$$

Este valor será dividido uniformemente en los 57 años (50 de explotación y 7 de construcción), ya que estos puestos de trabajo han sido creados tanto para la construcción como para la explotación del Crossrail.

El valor anual será entonces de **£197.199.776**.

4.2.6.3 Disminución del tiempo de viaje

El aumento de la capacidad de transporte en un 10% genera una disminución en la congestión en el transporte ferroviario, lo que a la vez creará una disminución del tiempo de viaje. En las siguientes imágenes se muestra la disminución de los niveles de congestión tanto en el tren como en el metro, en presencia del Crossrail, estimado para el año 2026.



Ilustración 29. Disminución de la congestión en el metro de Londres en presencia del Crossrail estimado para el año 2026. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).

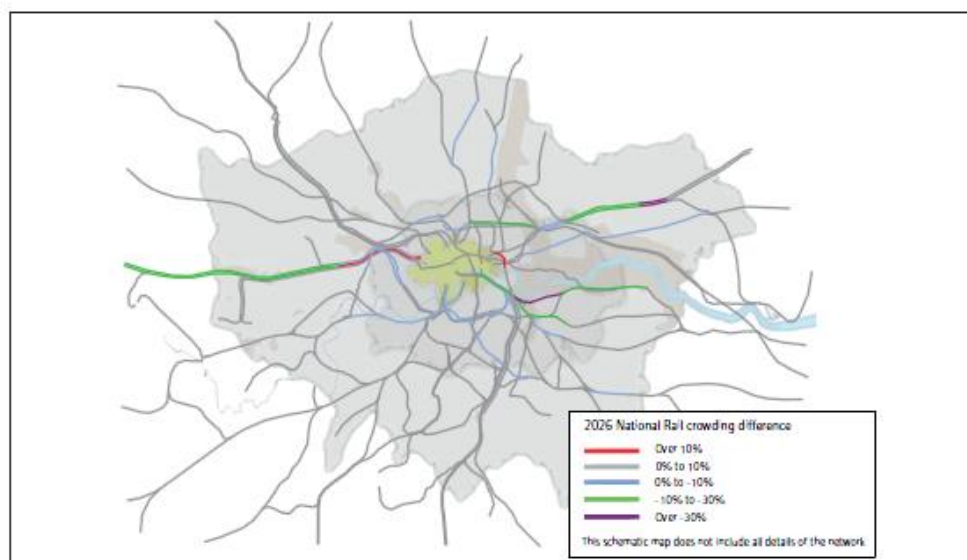


Ilustración 30. Disminución de la congestión en el ferrocarril existente de Londres en presencia del Crossrail estimado para el año 2026. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).

Además de estas disminuciones de tiempo en las redes de metro y ferrocarril ya existentes, el crossrail también producirá viajes en menor tiempo. Se pueden comprobar varios ejemplos en la siguiente tabla:

Tabla 12. Ejemplos de reducción de tiempo de viaje con el Crossrail. Fuente: Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. Crossrail business case. Summary report (2011).

Ejemplo de viaje	Sin Crossrail	Con Crossrail
Slough – Tottenham Court	55 minutos	32 minutos
Ilford – Bond Street	35 minutos	25 minutos
Heathrow – Liverpool Street	55 minutos	32 minutos
Liverpool St. – Abbey Wood	40 minutos	18 minutos
Paddington – Canary Wharf	30 minutos	16 minutos

De la tabla se deduce un ahorro medio de tiempo de viaje de 20 minutos. Pero para las estaciones más centrales, el ahorro de viaje no será tanto, por lo que estimamos un promedio de ahorro de tiempo de 10 minutos por viaje. Se estima además que el número de pasajeros (viajes) al año del Crossrail sea de 200 millones (Crossrail, <http://www.crossrail.co.uk/>) , por lo que el ahorro de tiempo se traducirá en:

$$10 \frac{\text{minutos}}{\text{viaje}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 200.000.000 \text{ viajes} = 33.333.333,3 \text{ horas}$$

Para simplificar, asumimos que el ahorro de tiempo al año será de 30 millones de horas al año. Este beneficio se monetiza de diferente forma en función del tipo de viaje: de trabajo o de ocio.

El valor del tiempo en Reino Unido, dependiendo del tipo de viaje, y en unidades monetarias del año 2002, son las siguientes (no se recomienda la actualización por variación del PIB):

Tabla 13. Coste del tiempo en Reino Unido. Fuente: Bickel, P. et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (2006).

	Viajes de ocio	Viajes de trabajo
€ ₂₀₀₂ /h	8,34	29,02

Ahora es necesario conocer el porcentaje de viajes de ocio y viajes de trabajo. Del trabajo “*Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS)*” (Transport for London, 2011), se estimó el porcentaje de viajes dependiendo de los propósitos para el año 2010. Como dichos datos no han cambiado mucho con el tiempo pasado (como se puede comprobar en la siguiente ilustración), aceptamos los valores del 2010 como actuales y para un futuro. Así mismo, se consideran las unidades monetarias del año 2002 como válidas actualmente por los mismos motivos.

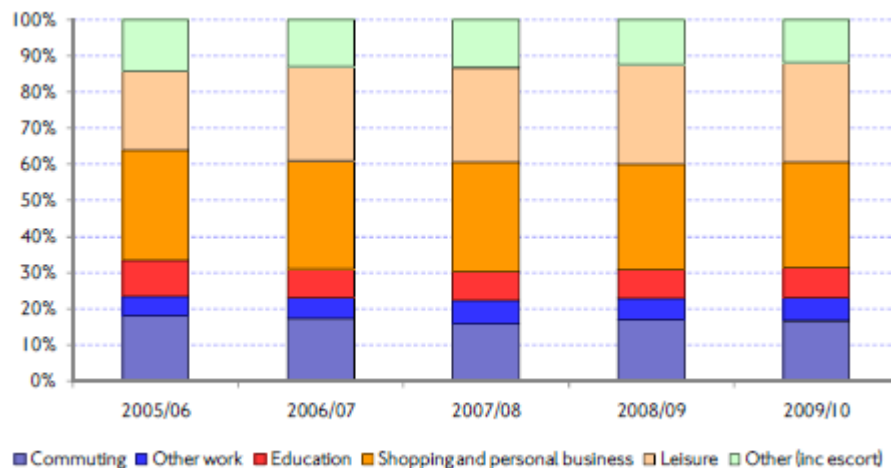


Gráfico 3. Porcentaje de los viajes en Londres en función del motivo de viaje, años 2005-2010. Fuente: Transport for London. Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS) (2011).

Los porcentajes de viajes en función del objetivo del viaje son los siguientes, teniendo en cuenta tanto a los residentes de Londres como a los turistas:

Tabla 14. Porcentajes del motivo de los viajes en la ciudad de Londres. Fuente: Transport for London. Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS) (2011).

	Inner London residents	Outer London residents	All London residents
Commuting	17.1	16.5	16.7
Other work	6.2	6.4	6.3
Education	8.8	8.0	8.3
Shopping and personal business	28.0	29.9	29.1
Leisure	29.2	26.5	27.6
Other (inc escort)	10.7	12.6	11.9
All purposes	100	100	100

Aceptamos que tanto commuting, otros motivos de trabajo, educación y compras son con fines de trabajo, ya que el tiempo tienes más valor que en el caso de viajes de ocio. Ocio y otros, serán tomados con valor de viajes de ocio. Por lo tanto, el porcentaje de viajes de trabajo será del 60,40%, mientras que los viajes de ocio representarán el 39,60% (60% y 40% para simplificar).

Así que el ingreso anual en período de explotación, obtenido por la disminución de los tiempos de viaje en el Crossrail es el siguiente:

$$30.000.000 \text{ h} \cdot 0,60 \cdot 29,02 \frac{\text{€}}{\text{h}} + 30.000.000 \text{ h} \cdot 0,40 \cdot 8,34 \frac{\text{€}}{\text{h}} = 622.200.000 \text{ €/año}$$

Convertido a libras (conversión monetaria del año 2002):

$$622.200.000 \frac{\text{€}}{\text{año}} \cdot 0,629 \frac{\text{£}}{\text{€}} = \text{£}391.363.800$$

4.2.6.4 Reducción de accidentes de tráfico

La disminución de la congestión hace que aumente la demanda del transporte público:

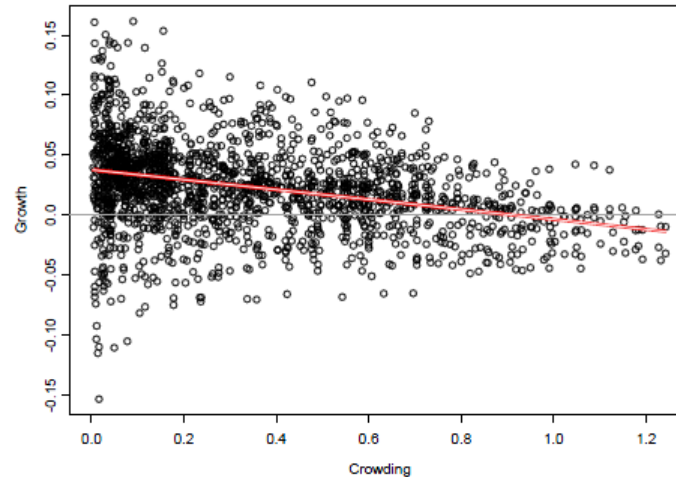


Gráfico 4. Aumento de la demanda del transporte público con la disminución de la congestión. Fuente: Buchanan, P. The Economic Benefits of Crossrail. Final Report (2007).

El aumento de la demanda del transporte público, se traduce en una disminución del uso del vehículo propio. Esto conlleva una disminución de emisiones de CO₂ (este impacto será estudiado posteriormente como beneficio medioambiental); y también hará que disminuyan los accidentes de tráfico.

Los accidentes de tráfico pueden clasificarse como fatales, graves, o leves. Los accidentes fatales son aquellos en los que se da la muerte en menos de 30 días por resultado de la colisión. Los graves, son aquellos en las que la persona queda hospitalizada con fracturas, contusiones, lesiones internas, quemaduras, etc., que pueden causar la muerte más de 30 días después de la colisión. Por último, los accidentes leves son aquellos en los que los pasajeros no requieren ser hospitalizados para la cura de las heridas provocadas por el accidente.

La valoración monetaria de los accidentes puede dividirse en costes económicos directos, indirectos, y un valor de la seguridad. Los costes económicos son principalmente gastos médicos y de rehabilitación, del sistema legal y pérdidas de producción. También hay que añadir daños materiales por accidentes.

La cuantía de los beneficios de la reducción de dichos accidentes varía en función de la gravedad de los damnificados, y son las que siguen, en el caso de Reino Unido (no se recomienda actualización por inflación):

Tabla 15. Costes por accidente en función de la gravedad de los mismos. Fuente: Bickel, P. et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (2006).

Tipo de accidente	€ ₂₀₀₂ por accidente
Fatal	1.815.000
Grave	235.100
Leve	18.600

La siguiente imagen muestra la cantidad de damnificados y accidentes de tráfico rodado en Londres en el año 2015 (último año disponible), accidentes fatales, serios y menos graves.

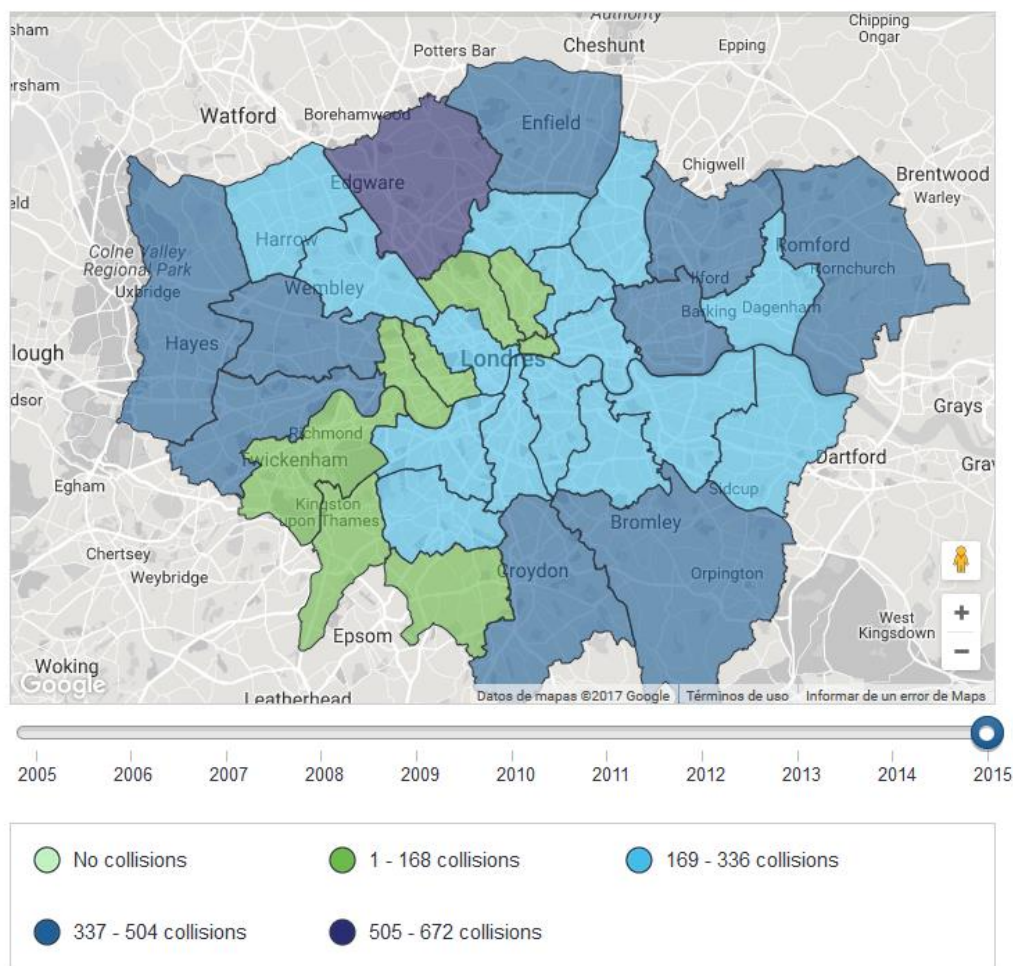


Ilustración 31. Mapa de colisiones en la ciudad de Londres en el año 2015 (fatales, graves y leves). Fuente: Transport for London. <https://tfl.gov.uk/corporate/safety-and-security/road-safety/london-collision>.

En “*Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS)*” (Transport for London, 2011), se estima que el número de damnificados por accidentes fatales de coche en el año 2015 en la ciudad de Londres fue de 20;

accidentes graves 314; y accidentes leves 11.491, lo que hacen un total de 11.825 damnificados al año. Esto refleja unos porcentajes de cada tipo de accidente, que se pueden tomar como base para el presente y un futuro, aceptando que la modificación de dichos porcentajes del año 2015 con el tiempo no es sustancial.

Tabla 16. Porcentaje de cada tipo de accidente en la ciudad de Londres. Fuente: Transport for London. Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS) (2011).

Tipo de accidente	Porcentaje del total
Fatal	0,17%
Grave	2,65%
Leve	97,18%

Del trabajo “*Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS)*” (Transport for London, 2011), se obtiene que el porcentaje de viajes para el año 2010 en función modo de transporte para la ciudad de Londres fue de:

Tabla 17. Porcentajes de los viajes en función del modo de transporte en la ciudad de Londres. Fuente: Transport for London. Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS) (2011).

	Inner London residents	Outer London residents	All London residents
National Rail	4.8	4.8	4.8
Underground/DLR	9.9	5.4	7.2
Bus/tram	18.7	12.3	14.9
Taxi/other	2.0	0.7	1.3
Car driver	16.2	32.4	25.9
Car passenger	7.5	16.6	12.9
Motorcycle	0.5	0.5	0.5
Cycle	2.9	1.5	2.1
Walk	37.2	25.8	30.4
All modes	100	100	100

Como dichos datos no han cambiado mucho con el tiempo pasado (como puede comprobarse en la siguiente ilustración), aceptamos los valores del 2010 como actuales y para un futuro.

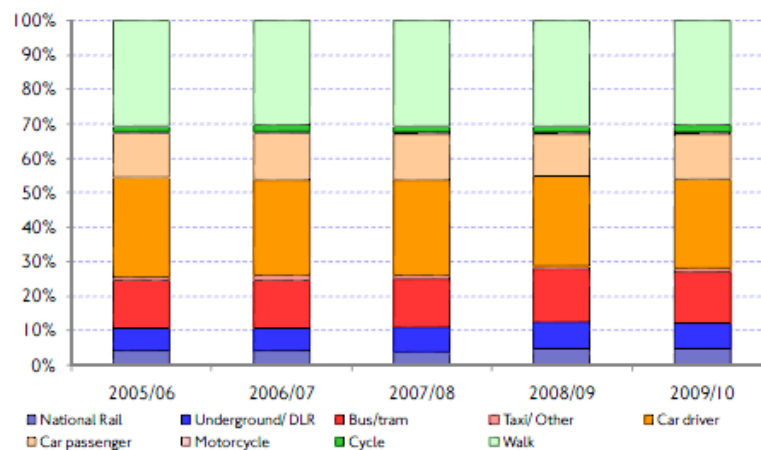


Gráfico 5. Porcentaje de los viajes en Londres en función del modo de transporte, años 2005-2010. Fuente: Transport for London. *Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS) (2011)*.

Se ha estimado que la disminución de los accidentes de tráfico sea de un 2% gracias al proyecto del Crossrail, a lo largo de su vida útil (Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London, 2011).

Esta reducción del 2% hará disminuir al año el siguiente número de accidentes (tomando como base los accidentes ocurridos en el año 2015, mencionados con anterioridad), en:

Tabla 18. Accidentes evitados anualmente en presencia del Crossrail. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de accidente	Accidentes evitados/año
Fatal	0,4
Grave	6,27
Leve	229,83

Lo que se traduce en un beneficio al año de:

$$0,4 \cdot 1.815.000 \text{ €} + 6,27 \cdot 235.100 \text{ €} + 229,83 \cdot 18.600 \text{ €} = 6.474.915 \text{ €/año}$$

Convirtiéndolo a libras, conversión media del año 2002:

$$6.474.915 \text{ €} \cdot 0,629 \frac{\text{£}}{\text{€}} = \text{£}4.072.721,535$$

Actualizándolo al año 2019 de inicio de explotación (se considera un valor uniforme a lo largo de la explotación:

$$\text{£}4.072.721,535 \cdot (1,04)^{(2019-2002)} = \text{£}7.933.256,30$$

Dicho valor será el beneficio anual por reducción de accidentes de tráfico.

4.2.6.5 Mejora de la comodidad del transporte público

Otro beneficio será la mejora en la comodidad del transporte, debido a la eliminación de transbordos intermedios, mejora de la seguridad del transporte por

ferrocarril, disminución de intercambios multimodales de transporte, disminución de los retrasos en el transporte público, y disminución de la congestión. Esto conlleva a un ahorro de tiempo, ya contabilizado, y a un aumento de los usuarios del transporte por ferrocarril, que se ha contabilizado ya también por medio de la disminución de la congestión, ingresos debidos a tarifas, disminución del tráfico rodado, etc. Por lo tanto, este impacto el impacto de la mejora de la calidad y comodidad en los viajes es cualitativo de difícil medición, más allá de lo ya estudiado.

4.2.6.6 Regeneración urbana

El proyecto también ayudará a impulsar la regeneración a lo largo de la ruta. Se ha calculado que se llegarán a construir unas 57.000 nuevas viviendas y favorecerá la creación de 3,25 millones de m² de suelo comercial. Esto traerá consigo un aumento de la población.

Las principales áreas beneficiadas por el crossrail para su futura regeneración son las que se indican en la siguiente imagen:

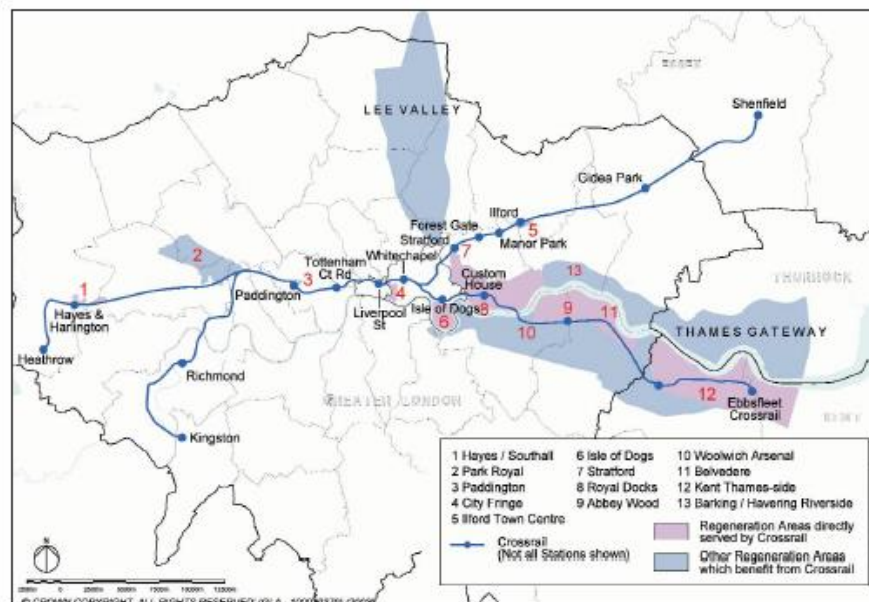


Ilustración 32. Áreas regeneradas con el proyecto del Crossrail. Fuente: Crossrail London Rail Links Ltd, Strategic Rail Authority and Transport for London. The Crossrail Business Case (2003).

El crossrail no sólo tiene en mente la infraestructura ferroviaria, sino también los espacios públicos que le rodean. Cada elemento complementa al otro para crear espacios integrados. Se han estudiado más de 40 espacios mejorados fuera de las estaciones, lo que equivale a 190.000 m², pretendiendo ser atractivos, adaptables y sostenibles con el tiempo. Es importante destacar que también se ha pretendido mantener la identidad, diversidad y características propias de la zona, dando así confianza a las comunidades locales e inversores potenciales.

Se contabilizarán como beneficios monetarios los correspondientes a la creación de nuevas viviendas, estableciendo una ganancia para las constructoras de un 15%, lo que contabilizará como beneficio social, con lo que ello conlleva.

En cuanto al coste residencial, consideramos el precio medio de una vivienda en la ciudad de Londres (UK Statistics). Los últimos datos estiman que el precio medio es de £472.000.

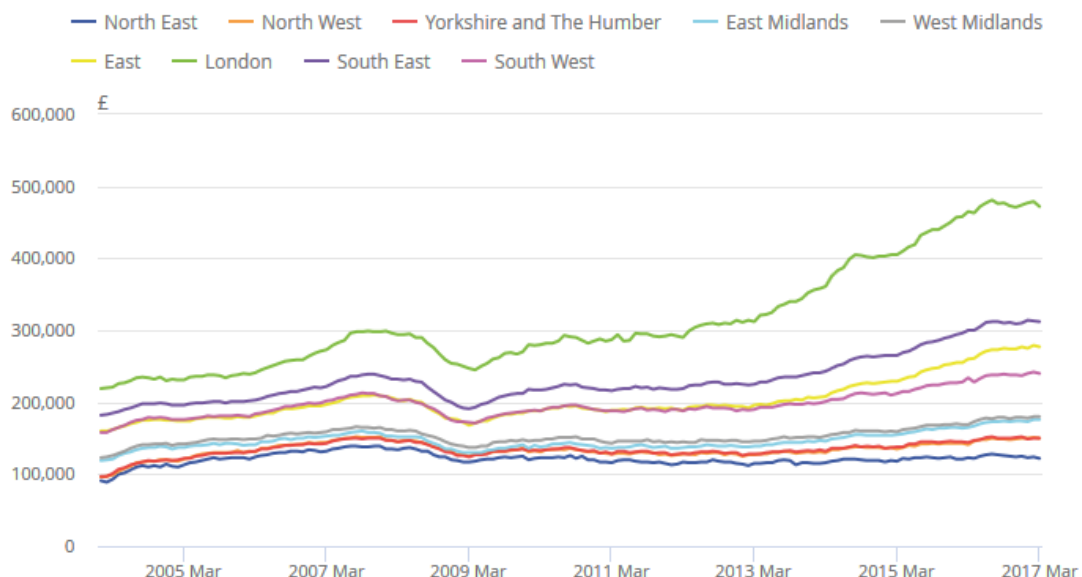


Gráfico 6. Precio medio de la vivienda en Inglaterra. Fuente: HM Land Registry and Office for National Statistics.

Se calculará dicho valor por tanto de la siguiente manera:

$$57.000 \text{ viviendas} \cdot £472.000 \cdot 0,15 = £4.035.600.000$$

Pero la creación de estas viviendas se supone que ocurra en los primeros 10 años, repartido uniformemente el valor anterior, por lo que el beneficio anual durante los años 2019-2028 será de **£403.560.000** anuales.

4.2.7 Beneficios medioambientales en fase de operación

4.2.7.1 Reducción emisiones de CO₂

Es importante administrar la energía operacional durante la vida del proyecto, ya que equivale al 78% de la huella de carbono total del ferrocarril. El enfoque a mantener es el peso del tren al mínimo y asegurar un servicio ininterrumpido sin fallos de señalización.

Se prevé un ahorro de 1 millón de toneladas de CO₂ en fase de operación anuales, con respecto a la situación actual, debido principalmente a la disminución de uso de otros medios de transporte más contaminantes como el tráfico rodado.

Se calculará este beneficio monetariamente de la misma manera que se ha hecho en el apartado de costes, con las emisiones de CO₂ durante la construcción.

Tabla 19. Monetización de costes por emisiones de CO₂. Fuente: Bickel, P. et al. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (2006).

Año de emisión	€ ₂₀₀₂ / tonelada CO ₂
2000-2009	22
2010-2019	26
2020-2029	32
2030-2039	40
2040-2049	55
2050	83

Como la vida del proyecto está estudiada a partir del 2019, 50 años, se utilizará la media de estos valores (52,5) para convertir las toneladas de CO₂ en unidades monetarias del año 2002. El beneficio anual será de:

$$\text{Beneficio ambiental}_{2002} = 1.000.000 \, t \cdot 52,5 \frac{\text{€}}{t} \cdot 0,629 \frac{\text{£}}{\text{€}} = \text{£}33.022.500$$

Actualizado al año 2019, comienzo de operación (se considera que se mantiene estable a lo largo del horizonte temporal):

$$\text{Beneficio ambiental}_{2019} = \text{£}33.022.500 \cdot 1,04^{(2019-2002)} = \text{£}64.324.544,11$$

4.2.7.2 Disminución del consumo de energía

Dada la naturaleza de las estaciones subterráneas y las limitaciones físicas, no ha sido posible aprovechar la energía renovable. Sin embargo, se ha aprovechado la oportunidad única de la tecnología diseñada para extraer el calor del suelo alrededor de la estructura de la estación. La estación de Whitechapel ha tenido la oportunidad única de instalar una matriz solar fotovoltaica que proporcione una proporción viable de los requerimientos energéticos de la estación.

Los ascensores y escaleras mecánicas que se utilizarán en las nuevas estaciones serán más eficientes energéticamente que las actuales. Todas las estaciones contarán además con sofisticados controles de iluminación y eléctricos, que optimice el rendimiento energético de las estaciones.

Además, la investigación en la tecnología de iluminación LED ayudará a disminuir el mantenimiento y consumo de energía. Los nuevos túneles y las estaciones utilizarán iluminación LED. Esto tiene un impacto ambiental y financiero positivo a través del aumento de la eficiencia energética, una mayor longevidad de los aparatos lumínicos y requisitos de mantenimiento reducidos. Estas innovaciones también se llevarán a cabo en las antiguas estaciones, por lo que se prevé que se ahorren unos 2,4 millones de libras respecto a la iluminación normal. Además, se prevé que se ahorren unos 17.2 millones de libras debido a la mano de obra para el mantenimiento de dicha iluminación, lo que suma un total de **19.6 millones de libras** de beneficios anuales.

4.3 RESUMEN DE COSTES E INGRESOS

Se presenta a modo resumen una tabla con los importes de Costes e Ingresos que finalmente se han tenido en cuenta en el estudio y su distribución en el tiempo.

Definición	Importe anual	Período temporal
Costes de Construcción	£2.766.197.644	2012-2018
Costes de Operación, Mantenimiento y Renovación	£287.110.402,10	2019-2068
Emisiones CO ₂ durante la construcción	£41.153.455,56	2012
Ingresos tarifa transporte	£432.176.710,50	2019-2068
Crecimiento de empleo en el centro de Londres	£134.884.646,80	2019-2068
Creación de empleo para los servicios y construcción del Crossrail	£197.199.776	2012-2068
Ingresos disminución tiempo de viaje	£391.363.800	2019-2068
Ingresos reducción accidentes de tráfico	£7.933.256,30	2019-2068
Ingresos regeneración urbana	£403.560.000	2019-2028
Ingresos reducción emisiones CO ₂	£64.324.544,11	2019-2068
Ingresos disminución consumo energía	£19.600.000.000	2019-2068

Se muestran a continuación dos gráficos con la distribución de los costes y de los ingresos, aplicados en sus respectivos horizontes temporales y descontados al año de referencia 2012.

En lo referente a los costes, los de construcción son con diferencia los de mayor cuantía, siendo los costes de impacto ambiental por emisiones de CO₂ prácticamente despreciables.

Sin embargo, en cuanto a los ingresos, los ingresos netos por las tarifas del transporte representan poco más de un cuarto del total, siendo los ingresos sociales y medioambientales de gran importancia en este estudio.

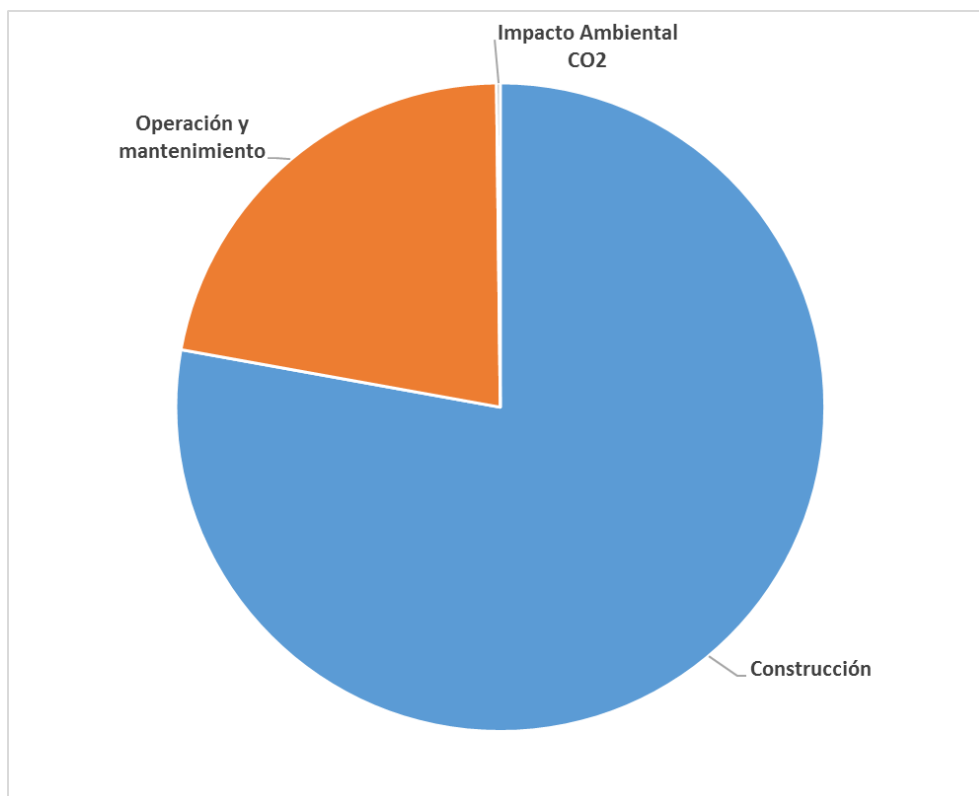


Gráfico 7. Distribución de los costes. Fuente: Elaboración propia.

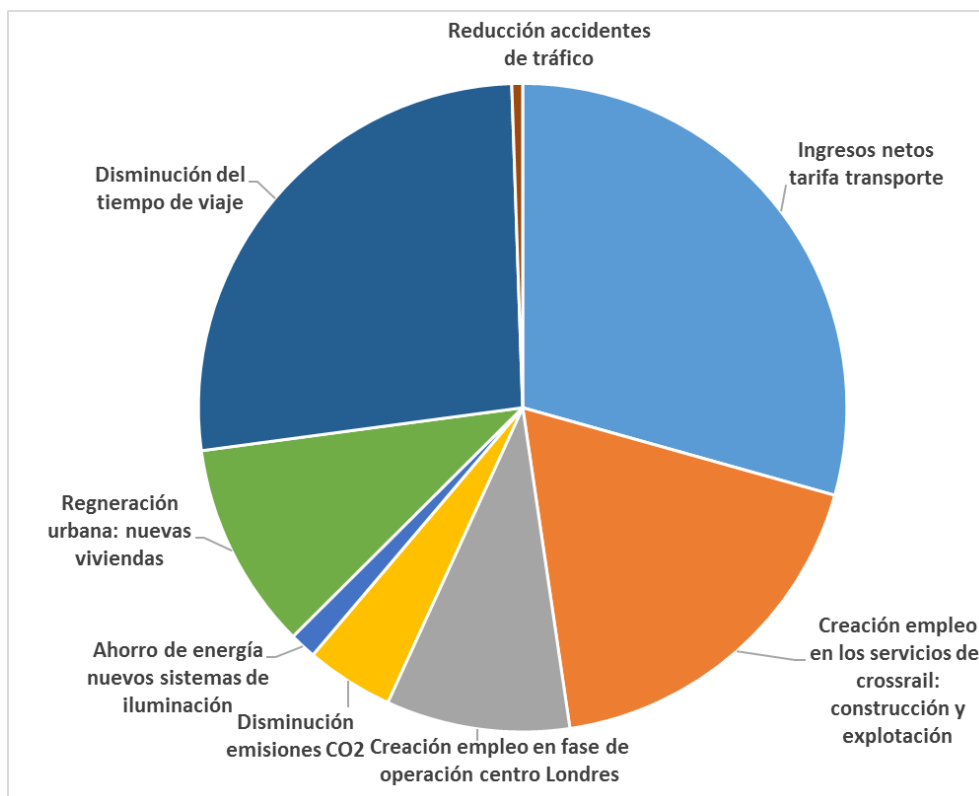


Gráfico 8. Distribución de los ingresos. Fuente: Elaboración propia

5 RESULTADOS

Una vez se tienen todos los costes e ingresos relevantes del proyecto para el estudio, monetizados y actualizados al año de referencia, se pueden obtener los primeros resultados. Dichos resultados serán:

- Indicadores de Rentabilidad
- Análisis de Sensibilidad
- Análisis de Escenarios
- Análisis de Riesgo

5.1 INDICADORES DE RENTABILIDAD

Los tres indicadores utilizados para comprobar la rentabilidad del proyecto serán el VAN, el TIR y el ratio Beneficio/Coste.

5.1.1 Valor Actualizado Neto

Como se ha explicado en el capítulo de Análisis Coste Beneficio, el VAN será calculado como:

$$VAN(i) = \sum Beneficios(i) - \sum Costes(i)$$

Siendo i el año elegido como año de referencia. Es decir, es calculado como la diferencia entre beneficios y costes netos actualizados al año 2012, en nuestro caso.

El VAN Resultante es de:

VAN	£2.814.590.506,26
------------	--------------------------

Al ser un valor positivo, se considera la inversión como rentable.

Se muestra en la siguiente tabla el cómputo anual de todos los impactos descritos:

Tabla 20. Cómputo anual de todos los impactos. Fuente: Elaboración propia.

Año	Beneficio neto	Beneficio descontado (año 2012)	Año	Beneficio neto	Beneficio descontado (año 2012)
2012	-2.610.151.323,56 £	-2.610.151.323,56 £	2041	960.372.331,61 £	307.944.746,76 £
2013	-2.568.997.868,00 £	-2.470.190.257,69 £	2042	960.372.331,61 £	296.100.718,04 £
2014	-2.568.997.868,00 £	-2.375.182.940,09 £	2043	960.372.331,61 £	284.712.228,89 £
2015	-2.568.997.868,00 £	-2.283.829.750,09 £	2044	960.372.331,61 £	273.761.758,54 £
2016	-2.568.997.868,00 £	-2.195.990.144,31 £	2045	960.372.331,61 £	263.232.460,14 £
2017	-2.568.997.868,00 £	-2.111.528.984,92 £	2046	960.372.331,61 £	253.108.134,75 £
2018	-2.568.997.868,00 £	-2.030.316.331,65 £	2047	960.372.331,61 £	243.373.206,49 £
2019	1.363.932.331,61 £	1.036.476.474,79 £	2048	960.372.331,61 £	234.012.698,55 £
2020	1.363.932.331,61 £	996.611.994,99 £	2049	960.372.331,61 £	225.012.210,14 £
2021	1.363.932.331,61 £	958.280.764,42 £	2050	960.372.331,61 £	216.357.894,37 £
2022	1.363.932.331,61 £	921.423.811,94 £	2051	960.372.331,61 £	208.036.436,89 £
2023	1.363.932.331,61 £	885.984.434,56 £	2052	960.372.331,61 £	200.035.035,47 £
2024	1.363.932.331,61 £	851.908.110,15 £	2053	960.372.331,61 £	192.341.380,26 £
2025	1.363.932.331,61 £	819.142.413,61 £	2054	960.372.331,61 £	184.943.634,87 £
2026	1.363.932.331,61 £	787.636.936,16 £	2055	960.372.331,61 £	177.830.418,14 £
2027	1.363.932.331,61 £	757.343.207,85 £	2056	960.372.331,61 £	170.990.786,67 £

2028	1.363.932.331,61 £	728.214.622,93 £		2057	960.372.331,61 £	164.414.217,96 £
2029	960.372.331,61 £	493.029.461,10 £		2058	960.372.331,61 £	158.090.594,19 £
2030	960.372.331,61 £	474.066.789,52 £		2059	960.372.331,61 £	152.010.186,72 £
2031	960.372.331,61 £	455.833.451,47 £		2060	960.372.331,61 £	146.163.641,08 £
2032	960.372.331,61 £	438.301.395,64 £		2061	960.372.331,61 £	140.541.962,57 £
2033	960.372.331,61 £	421.443.649,65 £		2062	960.372.331,61 £	135.136.502,47 £
2034	960.372.331,61 £	405.234.278,51 £		2063	960.372.331,61 £	129.938.944,69 £
2035	960.372.331,61 £	389.648.344,72 £		2064	960.372.331,61 £	124.941.292,97 £
2036	960.372.331,61 £	374.661.869,93 £		2065	960.372.331,61 £	120.135.858,62 £
2037	960.372.331,61 £	360.251.798,01 £		2066	960.372.331,61 £	115.515.248,68 £
2038	960.372.331,61 £	346.395.959,62 £		2067	960.372.331,61 £	111.072.354,50 £
2039	960.372.331,61 £	333.073.038,10 £		2068	960.372.331,61 £	106.800.340,86 £
2040	960.372.331,61 £	320.262.536,63 £				

El siguiente gráfico muestra los valores de los beneficios anuales de la tabla anterior, descontados al año 2012:

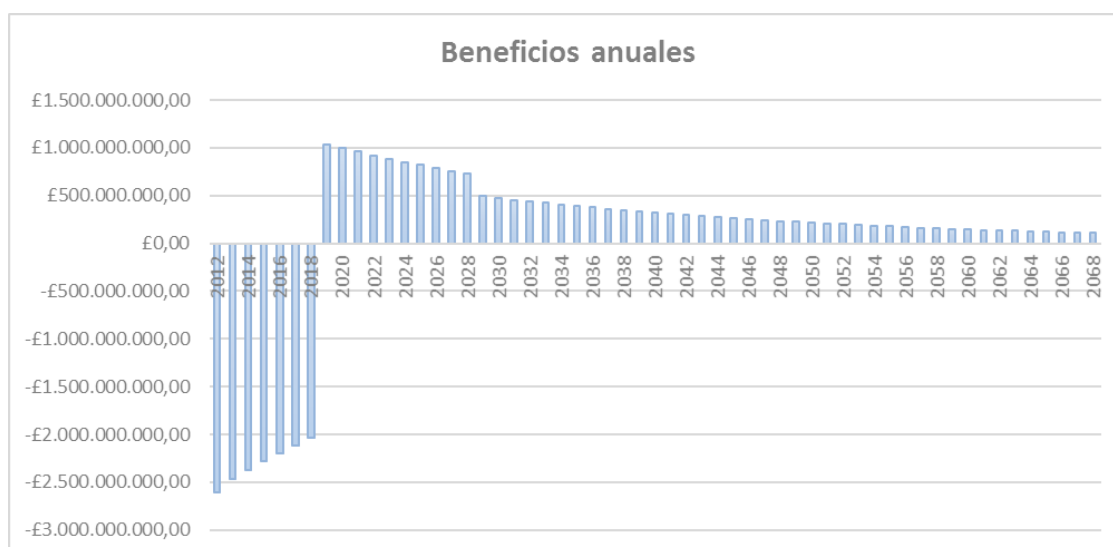


Gráfico 9. Beneficios anuales descontados al año 2012. Fuente: Elaboración propia.

Los beneficios acumulados (como año de referencia el 2012) se muestran en la imagen siguiente, de la que se deduce que la inversión es rentabilizada a partir del año 2050, donde los beneficios acumulados pasan a ser positivos.

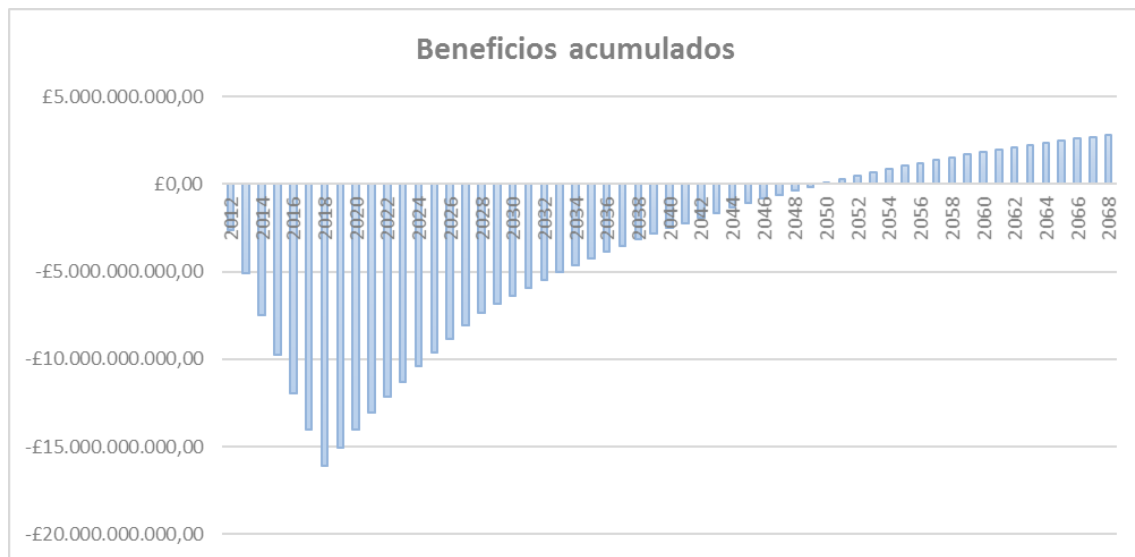


Gráfico 10. Beneficios acumulados descontados al año 2012. Fuente: Elaboración propia.

5.1.2 Tasa Interna de Retorno

El TIR resultante es de:

TIR	4,9085%
------------	----------------

El valor del TIR está dentro del rango asumible actualmente, ya que se encuentra por encima de los valores actuales de interés del mercado.

5.1.3 Ratio Beneficio/Coste

El ratio coste/beneficio resultante es:

Ratio Coste/Beneficio	1,13
------------------------------	-------------

Indica que por cada libra invertida se recupera 1,13 libras; lo que hace que la inversión sea rentable.

5.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El Análisis de Sensibilidad permite determinar aquellos impactos críticos en el estudio. Las variables críticas son las que, con su variación, tienen un impacto alto en el resultado final del estudio, el VAN. Por lo tanto, se variará cada coste/ingreso en un 1% respecto a su valor más probable, y se comprueba la variación que esta modificación implica en el VAN. Las variables que modifiquen en más de un 1% el valor del VAN, serán las críticas.

El porcentaje de variación del indicador de rentabilidad al modificar en un 1% el valor de cada impacto, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 21. Variación del VAN al modificar en un 1% el valor de cada impacto. Fuente: Elaboración Propia.

IMPACTOS	% Variación VAN
Costes	
Construcción	-6,13%
Operación y mantenimiento	-1,73%
Impacto Ambiental CO2	-0,01%
Beneficios	
Ingresos netos tarifa transporte	2,61%
Creación empleo en los servicios del crossrail: const. y explt.	1,63%
Creación empleo en fase de operación centro Londres	0,81%
Disminución emisiones CO2	0,39%
Ahorro de energía nuevos sistemas de iluminación	0,12%
Regeneración urbana: nuevas viviendas	0,92%
Disminución del tiempo de viaje	2,36%
Reducción accidentes de tráfico	0,05%
Tasa de descuento	-5,04%

Por lo tanto, las variables críticas serán, de mayor a menor importancia:

- Coste de construcción
- Tasa de descuento
- Ingresos netos tarifa transporte
- Disminución del tiempo de viaje
- Costes de operación y mantenimiento
- Creación de empleo en los servicios del Crossrail (fases de construcción y explotación)

En la siguiente figura se muestran las variaciones causadas por las variables críticas en el VAN al variar cada uno individualmente en un 1%:

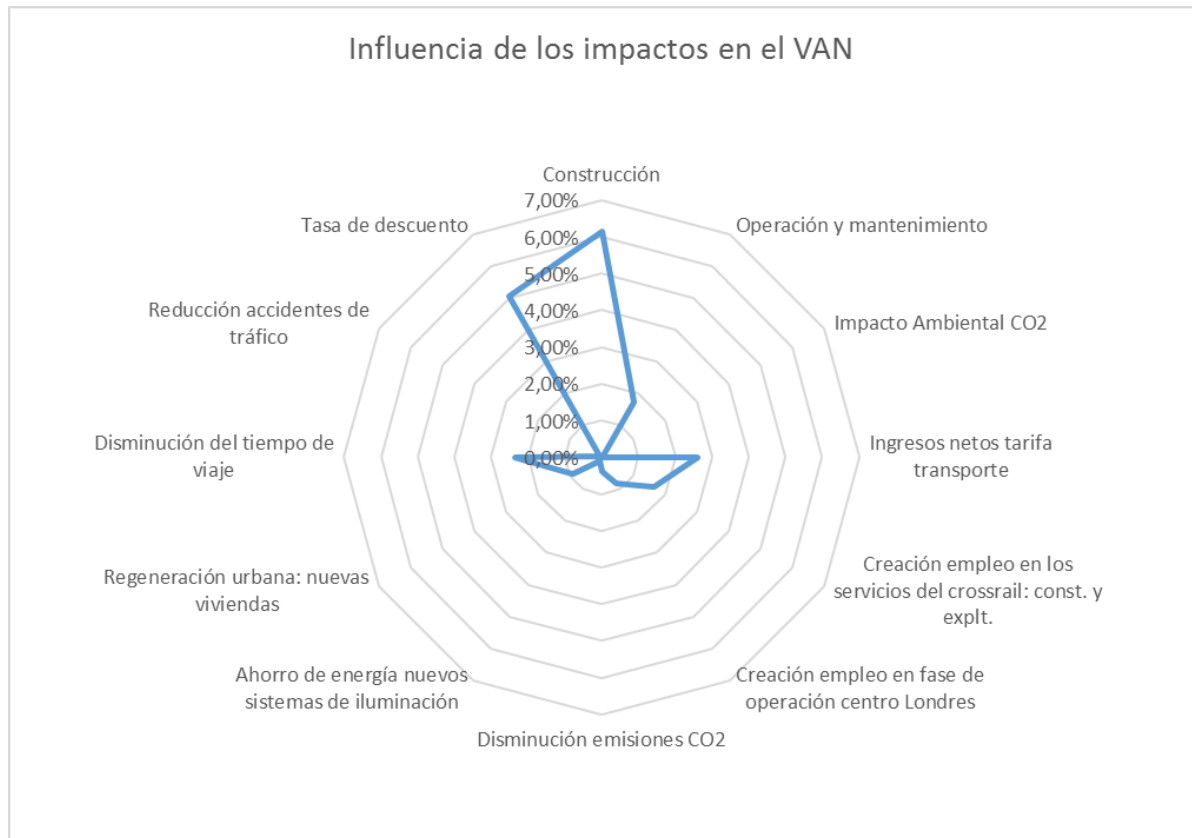


Gráfico 11. Influencia de los impactos en el VAN al variar estos un 1%. Fuente: Elaboración propia.

Se comprueba que con gran diferencia, los costes de construcción y la tasa de descuento son los que mayor influencia tienen sobre el indicador de rentabilidad.

En La siguiente imagen se muestra la variación del VAN dependiendo de la variación de los impactos críticos (-3% a +3%). Se observa que cuanto más crítica sea una variable (mayor influencia tenga sobre el VAN), mayor pendiente tendrá su representación del VAN.

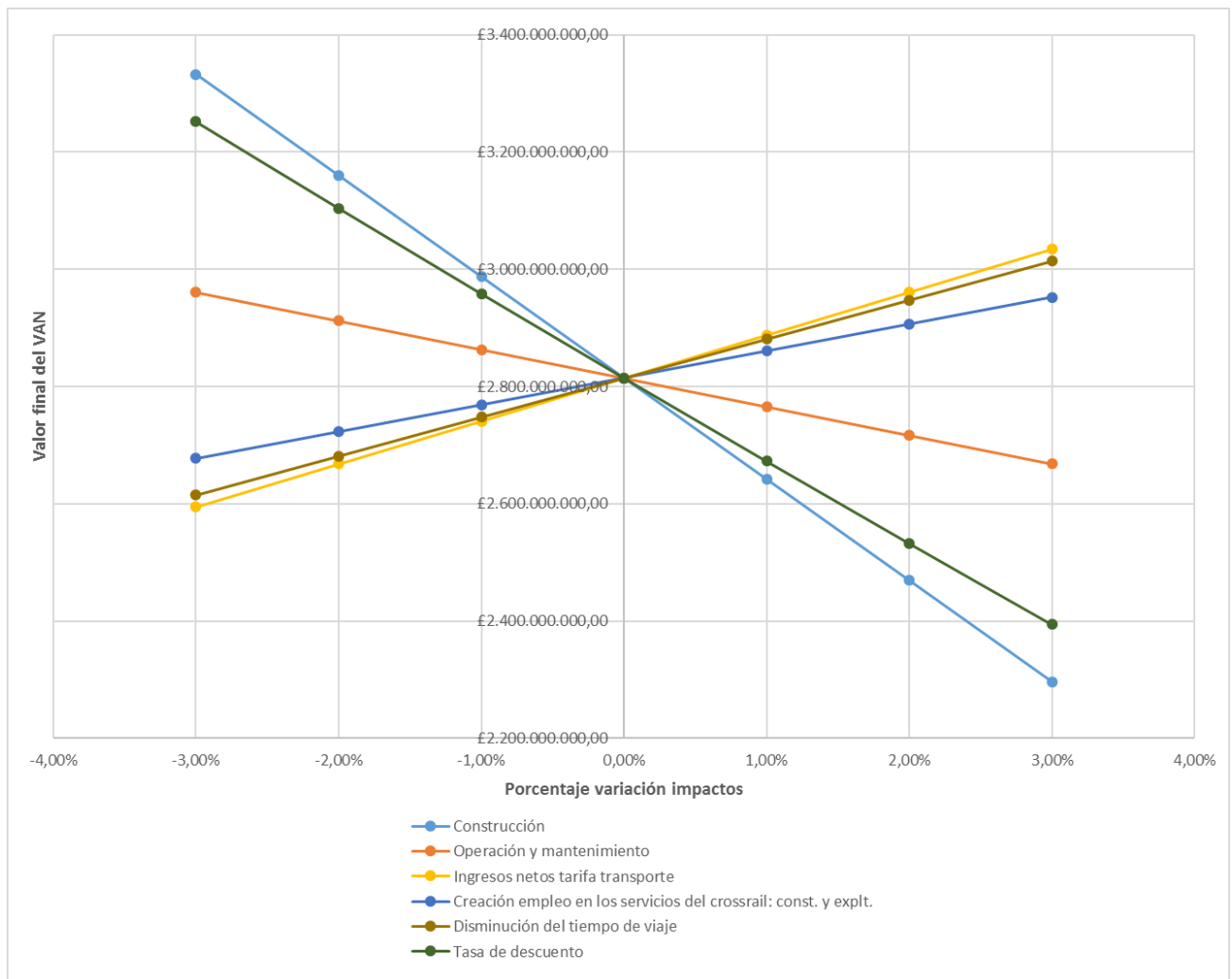


Gráfico 12. Variación del VAN en función de la variación porcentual de las variables críticas. Fuente: Elaboración propia.

De la figura anterior se deduce que los parámetros han de variar en un porcentaje muy alto para modificar el VAN notablemente. Por lo tanto, el proyecto es estable económicamente. Además, deberán variar mucho para que el indicador tenga un valor negativo no deseable.

5.3 ANÁLISIS DE ESCENARIOS

El Análisis de Escenarios es una continuación del Análisis de Sensibilidad. En el de Sensibilidad, se analiza el impacto que la variación de cada variable por separado provoca en el Indicador de Rentabilidad, de manera individual. Pero en cambio, el Análisis de Escenarios consiste en analizar el impacto combinado resultante de la variación del conjunto de variables críticas. Se analizarán cuatro casos: dos pesimistas (uno más que otro) y otro dos optimistas (en distinto grado).

Como ya se ha estudiado con anterioridad, las variables críticas en este caso son las siguientes:

- Coste de construcción
- Tasa de descuento
- Ingresos netos tarifa transporte
- Disminución del tiempo de viaje
- Costes de operación y mantenimiento
- Creación de empleo en los servicios del Crossrail (fases de construcción y explotación)

Se presentan a continuación los escenarios estudiados.

5.3.1 Escenario Base

El VAN del escenario base, ya estudiado anteriormente, es el siguiente:

VAN	£2.814.590.506,26
------------	--------------------------

5.3.2 Escenario Pesimista

Se modifican las variables de la siguiente manera:

- Coste de construcción: Se estima que aumenten un 2%.
- Tasa de descuento: Se estima que aumente hasta un 4,25%.
- Ingresos netos tarifa transporte: Se estima que sean un 3% menor a los calculados.
- Disminución del tiempo de viaje: Como el cálculo de la disminución del tiempo de viaje se ha calculado como un promedio, cabe la posibilidad de que esa disminución de tiempo se vea reducida en un 8%.
- Costes de operación y mantenimiento: Se estima que aumenten un 5%.
- Creación de empleo en los servicios del Crossrail (fases de construcción y explotación): Se estima que sean un 2% menor que lo calculado.

Con dichas modificaciones, el VAN resultante es el siguiente:

VAN	£472.215.919,89
------------	------------------------

5.3.3 Escenario Pesimista-Base

Se modifican las variables de la siguiente manera:

- Costes de construcción: Se estima que aumenten un 1%.
- Tasa de descuento: Se estima que aumente hasta un 4,15%.
- Ingresos netos tarifa transporte: Se estima que sean un 2% menor a los calculados.
- Disminución del tiempo de viaje: Como el cálculo de la disminución del tiempo de viaje se ha calculado como un promedio, cabe la posibilidad de que esa disminución de tiempo se vea reducida en un 5%.
- Costes de operación y mantenimiento: Se estima que aumenten un 2,5%.
- Creación de empleo en los servicios del Crossrail (fases de construcción y explotación): Se estima que sean un 2% menor que lo calculado.

Con dichas modificaciones, el VAN resultante es el siguiente:

VAN	£1.449.667.724,01
------------	--------------------------

5.3.4 Escenario Base-Optimista

Se modifican las variables de la siguiente manera:

- Coste de construcción: Se opta por no disminuirlo, ya que es poco probable que esto ocurra.
- Tasa de descuento: Se disminuye la tasa de descuento hasta un 3,75%.
- Ingresos netos tarifa transporte: Se estima que la demanda no sea la estudiada, sino un 5% más, debido a los grandes beneficios que este servicio aporta a los usuarios.
- Disminución del tiempo de viaje: La disminución del tiempo de viaje ha sido calculado como un promedio, por lo que todavía se puede prever que las ganancias sean un 4% mayor a lo estudiado.
- Costes de operación y mantenimiento: Se disminuyen en un 2,5%.
- Creación de empleo en los servicios del Crossrail (fases de construcción y explotación): Los empleos estimados ya son notables, por lo que sólo se estima que la cifra sea un 1% mayor que lo estudiado.

Con dichas modificaciones, el VAN resultante es el siguiente:

VAN	£4.592.640.685,31
------------	--------------------------

5.3.5 Escenario Optimista

Se modifican las variables de la siguiente manera:

- Coste de construcción: Se opta por no disminuirlo, ya que es poco probable que esto ocurra.
- Tasa de descuento: Se disminuye la tasa de descuento hasta un 3.5%.
- Ingresos netos tarifa transporte: Se estima que la demanda no sea la estudiada, sino un 10% más, debido a los grandes beneficios que este servicio aporta a los usuarios.
- Disminución del tiempo de viaje: La disminución del tiempo de viaje ha sido calculado como un promedio, por lo que todavía se puede prever que las ganancias sean un 8% mayores a lo estudiado.
- Costes de operación y mantenimiento: Se disminuyen en un 5%.
- Creación de empleo en los servicios del Crossrail (fases de construcción y explotación): Los empleos estimados ya son notables, por lo que sólo se estima que la cifra sea un 2% mayor que lo estudiado.

Con dichas modificaciones, el VAN resultante es el siguiente:

VAN	£6.552.329.723,60
------------	--------------------------

5.3.6 Comparación de Escenarios

Tabla 22. Resumen indicadores de rentabilidad para cada escenario. Fuente: Elaboración propia.

	Pesimista	Pesimista-Base	Base	Base-Optimista	Optimista
VAN	£472.215.919,89	£1.449.667.724,01	£2.814.590.506,26	£4.592.640.685,31	£6.552.329.723,60
TIR	4,4095700%	4,6313671%	4,9084582%	5,1509988%	5,3876283%

En el escenario más pesimista, el VAN sigue resultando positivo, por lo que la inversión seguiría siendo rentable.

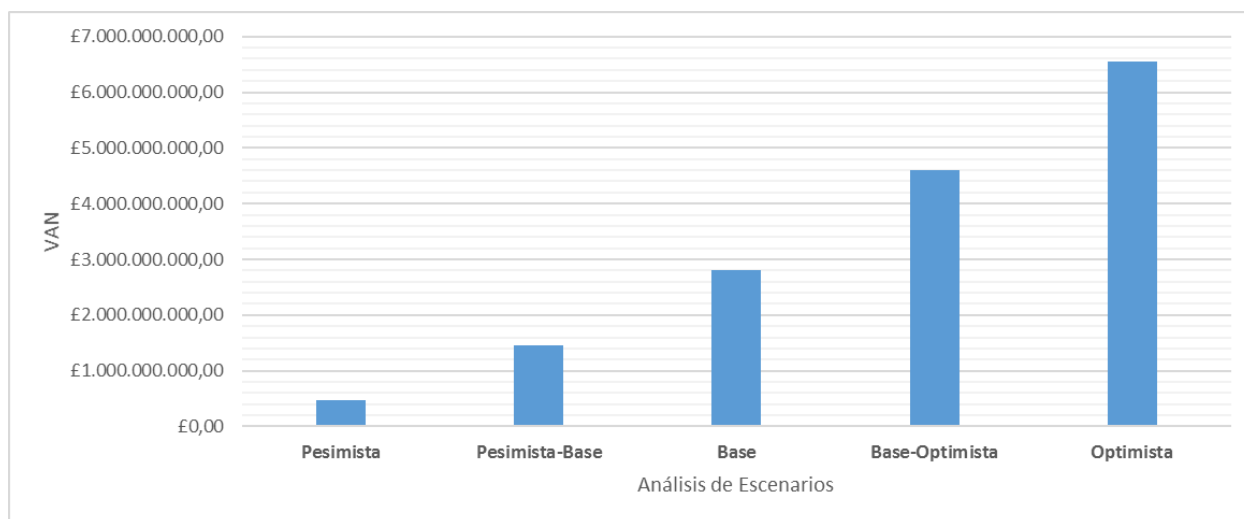


Gráfico 13. VAN en función de los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.

5.4 ANÁLISIS DE RIESGO

El análisis de riesgo estudia la probabilidad que tiene un proyecto de llevarse a cabo de manera satisfactoria en lo que refiere a su rentabilidad. La incertidumbre a la hora de obtener el valor de los costes e ingresos de un proyecto, trae como consecuencia la incertidumbre en los resultados del Análisis Coste-Beneficio. Dichos indicadores de rentabilidad podrían llegar a ser muy diferentes a los obtenidos si el valor de costes e ingresos varía, obteniendo un beneficio social menor al que se esperaba.

En el Análisis de Riesgo, las variables utilizadas para el estudio, los impactos, variarán sus valores en un rango de porcentajes determinado cada una, y como consecuencia, variará el valor del VAN. En el análisis de sensibilidad, se modificó en primer lugar cada variable individualmente; y posteriormente todas las variables críticas simultáneamente, pero siempre las variables tenían un valor fijo. Pero en el análisis de riesgo, lo que se hace es variar todas las variables aleatoriamente, entre un rango de probabilidad prefijado, para estudiar la modificación del VAN. Dicho proceso se realizará 1.000 veces, obteniendo de esta manera la curva de probabilidad del VAN.

5.4.1 Distribuciones probabilísticas

Para llevar a cabo dicho análisis, es necesario en primer lugar asignar una distribución probabilística a cada una de las variables del modelo.

La distribución de probabilidad más simple utilizada es la Uniforme, donde una variable aleatoria sólo puede tomar valores comprendidos entre dos extremos prefijados, teniendo todos los intervalos la misma probabilidad. Se puede expresar como “tomar un número al azar dentro de un intervalo”. Por ello, la función de densidad tomará el mismo valor para cualquier punto del intervalo (a,b), y cero fuera de dicho intervalo:

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{si } x \in (a, b) \\ 0 & \text{si } x \notin (a, b) \end{cases}$$

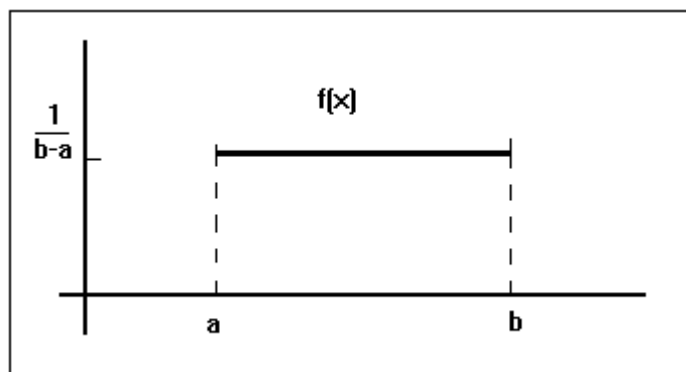


Gráfico 14. Función de densidad de la distribución uniforme.

Para definir esta distribución serán necesarios solamente dos valores: a y b, el valor mínimo y el máximo que puede tomar dicha variable.

Otra distribución comúnmente utilizada es la triangular, definida por un valor mínimo a, un valor máximo b, y una moda c. La función de densidad es cero para los extremos (a y b), y afín entre la moda y cada extremo, resultando ser el gráfico un triángulo. La moda es el valor más probable, siendo los valores cada vez menos probables conforme nos alejamos de ella hacia el valor máximo o mínimo.

La función de densidad se expresa de la siguiente forma:

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{si } a \leq x < c \\ \frac{2}{b-a} & \text{si } x = c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{si } c < x \leq b \\ 0 & \text{en otros casos} \end{cases}$$

La ventaja de dicha distribución es que no tiene por qué ser siempre simétrica, pudiendo ser mayor la diferencia entre el valor máximo y la moda o entre el mínimo y la moda. Así, se puede asignar una mayor probabilidad de ocurrencia a un valor mayor a la moda que menor a ella, o viceversa. Este es el principal motivo para utilizar dicha distribución y no la uniforme. En la imagen inferior, por ejemplo, se le atribuye una mayor probabilidad de ocurrencia a un valor menor que la moda que mayor a ella.

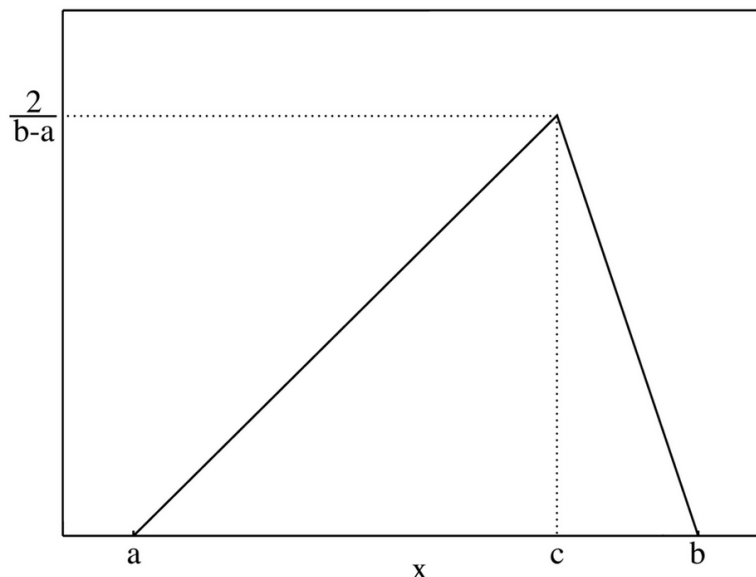


Gráfico 15. Función de densidad de la distribución triangular

Se han estudiado dos casos posibles para el Análisis de Riesgo: uno en el que todas las variables están modeladas bajo una distribución uniforme; y un segundo en

el que aquellas variables que se puedan definir mediante una distribución triangular así lo harán, definiéndose las restantes mediante una uniforme.

5.4.2 Caso 1

En este caso todas las variables seguirán una distribución probabilística uniforme. Los valores máximos y mínimos estimados para cada variable se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 23. Rango de valores de cada variable para el análisis de riesgo para el Caso 1.
Fuente: Elaboración propia.

Variable	Valor Base	Valor Mínimo	Valor Máximo
Costes construcción	£2.766.197.644,00	El valor base	+10%
Costes mantenimiento	£287.110.402,10	-10%	+15%
Costes emisiones CO ₂ en construcción	£41.153.455,56	-5%	+5%
Ingresos tarifas transporte	£432.176.710,50	-10%	+25%
Ingresos empleos en Crossrail (construcción y explotación)	£197.199.776,00	-15%	+10%
Ingresos empleos en el centro de Londres	£134.884.646,80	-5%	+15%
Beneficios disminución emisiones CO ₂	£64.324.544,11	-10%	+10%
Ahorro energía iluminación	£19.600.000,00	-10%	+10%
Beneficios regeneración urbana	£403.560.000,00	-15%	+15%
Beneficios reducción tiempo de viaje	£391.363.800,00	-10%	+20%
Beneficios disminución de accidentes	£7.933.256,30	-10%	+5%
Tasa de descuento	0,04	-5%	+5%

5.4.3 Caso 2

Las variables en las que se estime una mayor probabilidad de ocurrencia bien para un valor mayor o menor que la moda, seguirán una distribución triangular. Las demás, se seguirán rigiendo por una distribución uniforme. Las variables que se estima pueden estudiarse mediante una distribución triangular son:

- Costes de construcción: se estima que haya una mayor probabilidad de que aumente su valor a que disminuya.

- Costes de mantenimiento: igualmente, es más probable que los costes de mantenimiento y explotación aumenten.
- Ingresos de las tarifas de transporte: es más probable que el número de pasajeros sea mayor a lo estimado a que disminuya.
- Beneficios reducción tiempo de viaje: es igualmente más probable que la disminución del tiempo de viaje se reduzca más que lo estimado en un futuro.
- Beneficios disminución emisiones CO₂: se considera que dichas emisiones no se reduzcan tanto como lo estudiado, por lo que es más probable que dicha disminución sea menor que lo prefijado que mayor.

Se detallan en la siguiente tabla los valores de las nuevas distribuciones triangulares, quedando las demás variables definidas mediante distribuciones uniformes con los mismos valores que en el Caso 1.

Tabla 24. Rango de valores de cada variable para el análisis de riesgo para el Caso 2.
Fuente: Elaboración propia.

Variable	Valor Base	Valor Mínimo	Valor Máximo	Moda
Costes construcción	£2.766.197.644,00	El valor base	+10%	$\frac{2Min + Max}{3}$
Costes mantenimiento	£287.110.402,10	-10%	+15%	$\frac{1.5Min + Max}{2.5}$
Ingresos tarifas transporte	£432.176.710,50	-10%	+25%	$\frac{2Min + Max}{3}$
Beneficios reducción tiempo de viaje	£391.363.800,00	-10%	+20%	$\frac{2Min + Max}{3}$
Beneficios disminución emisiones CO ₂	£64.324.544,11	-10%	+10%	$\frac{Min + 1.25Max}{2.25}$

5.4.4 Simulación de Montecarlo

Tras definir las funciones probabilísticas de las variables, se puede llevar a cabo la simulación de Montecarlo, basada en calcular un determinado número de veces, 1.000 en este caso, el Valor Actualizado Neto, mediante la generación totalmente aleatoria en base a las funciones probabilísticas previamente definidas, de las distintas variables del modelo.

Para ello, se ha utilizado la herramienta informática RStudio, obteniendo así las funciones de densidad y distribución del VAN para los dos casos previamente planteados. Se puede disponer del código utilizado en el Anexo 1.

Los resultados del Caso 1 han sido los siguientes:

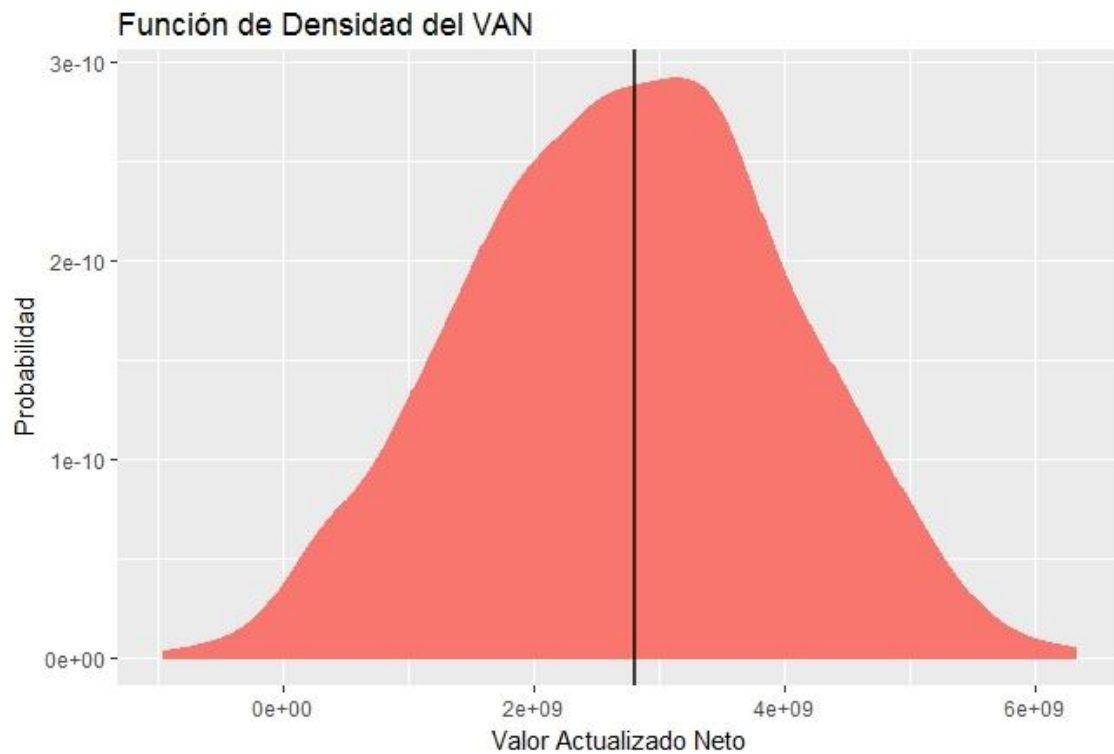


Gráfico 16. Función de Densidad del VAN del Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el valor del VAN obtenido en el caso base de nuestro análisis (£2.814.590.506,26), se sitúa en el pico de nuestra función de densidad.

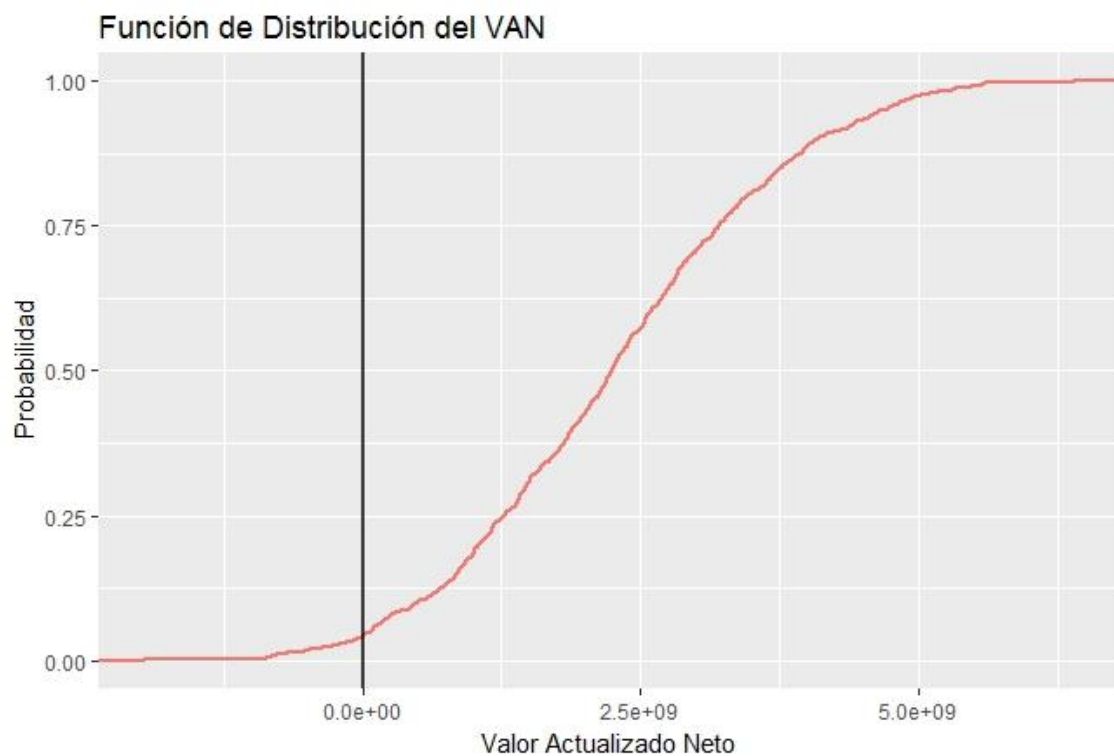


Gráfico 17. Función de Distribución del VAN del Caso 1. Fuente: Elaboración propia.

La probabilidad de obtener un valor igual o mayor al VAN obtenido en nuestro estudio base (£2.814.590.506,26), es de un 60%, un valor no muy alto. Pero lo importante, es que existe una probabilidad de que el VAN sea negativo de un 6% aproximadamente, un riesgo bajo y asumible.

Los resultados del Caso 2 han sido los siguientes:

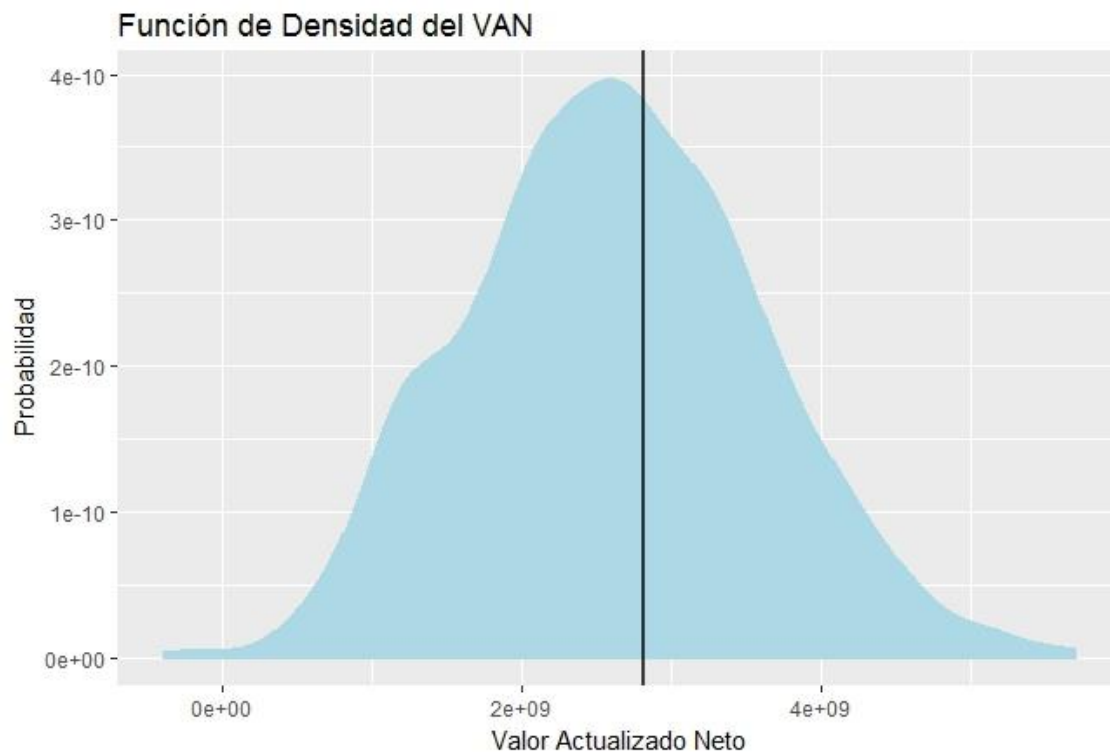


Gráfico 18. Función de Densidad del VAN del Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el valor del VAN obtenido en el caso base de nuestro análisis (£2.814.590.506,26), se sitúa en el pico de nuestra función de densidad.

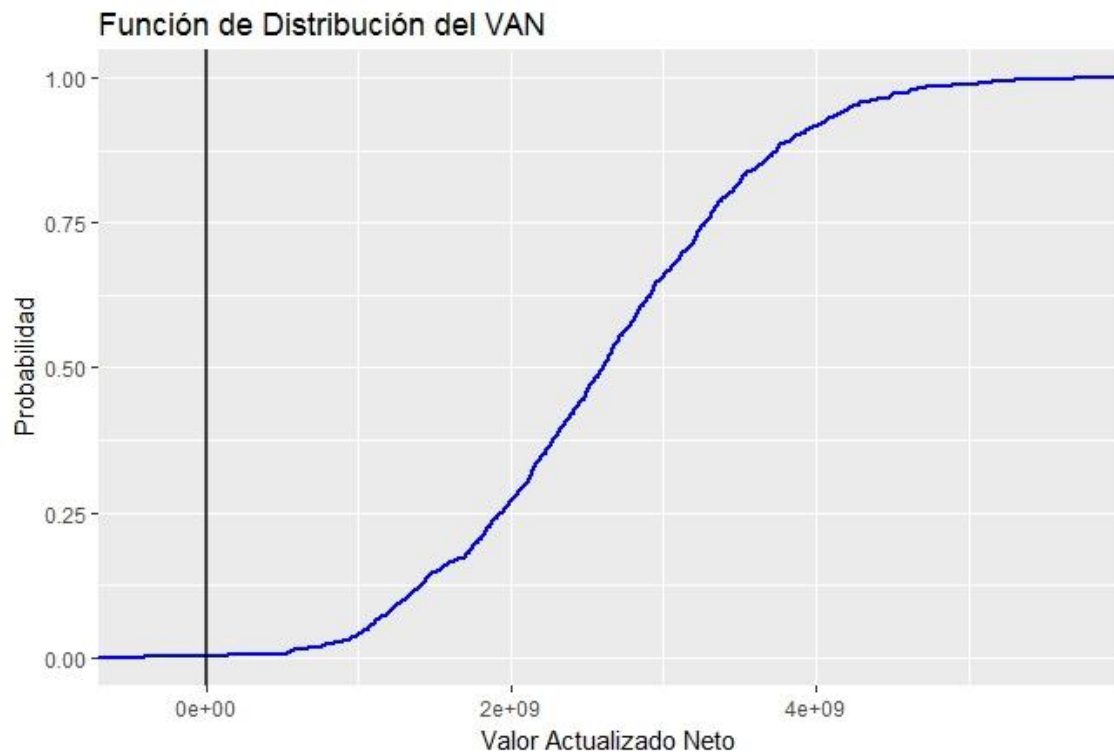


Gráfico 19. Función de Distribución del VAN del Caso 2. Fuente: Elaboración propia.

La probabilidad de obtener un valor igual o mayor al VAN obtenido en nuestro estudio base (£2.814.590.506,26), es de un 65% aproximadamente, algo mayor que en el Caso 1 y un valor no muy alto. Pero en este caso, existe una probabilidad casi nula de que la rentabilidad del proyecto sea negativa, cosa que hace que no se asuma riesgo con esta inversión.

Si analizamos las funciones de densidad de ambos casos conjuntamente, obtenemos:

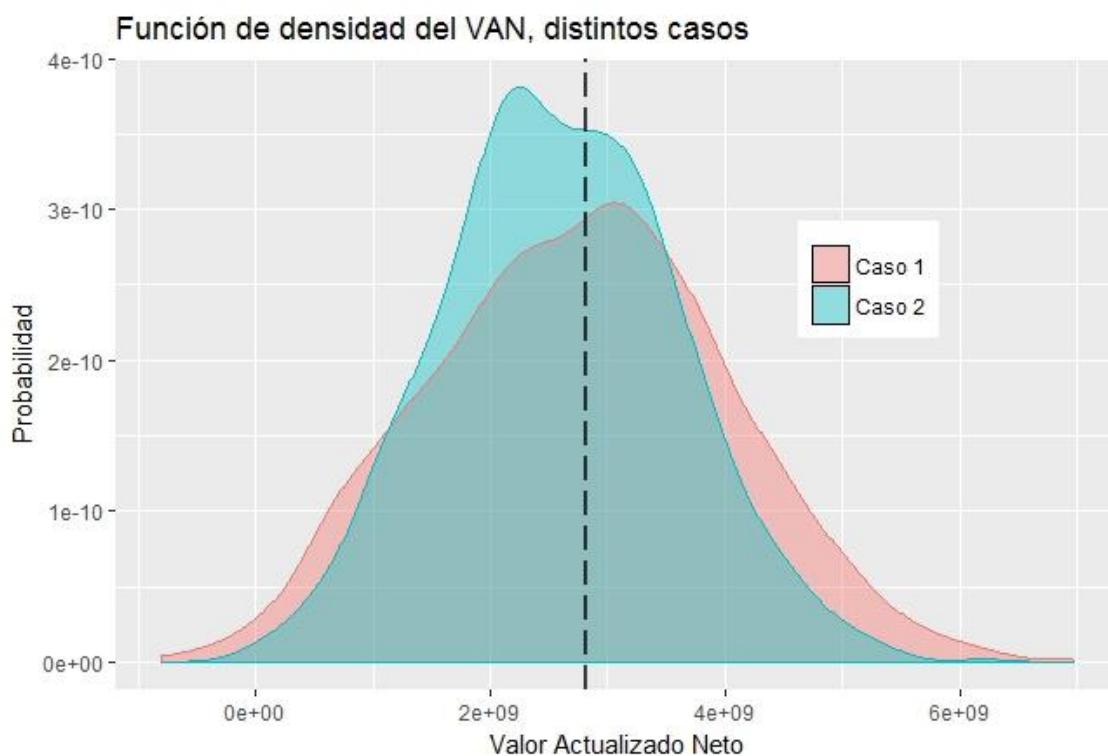


Gráfico 20. Funciones de densidad del VAN para ambos casos. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que, en el segundo caso, con las distribuciones triangulares, acotamos el valor de VAN entre un rango menor (hay menos incertidumbre); y el valor base del estudio tiene una mayor probabilidad de ocurrencia.

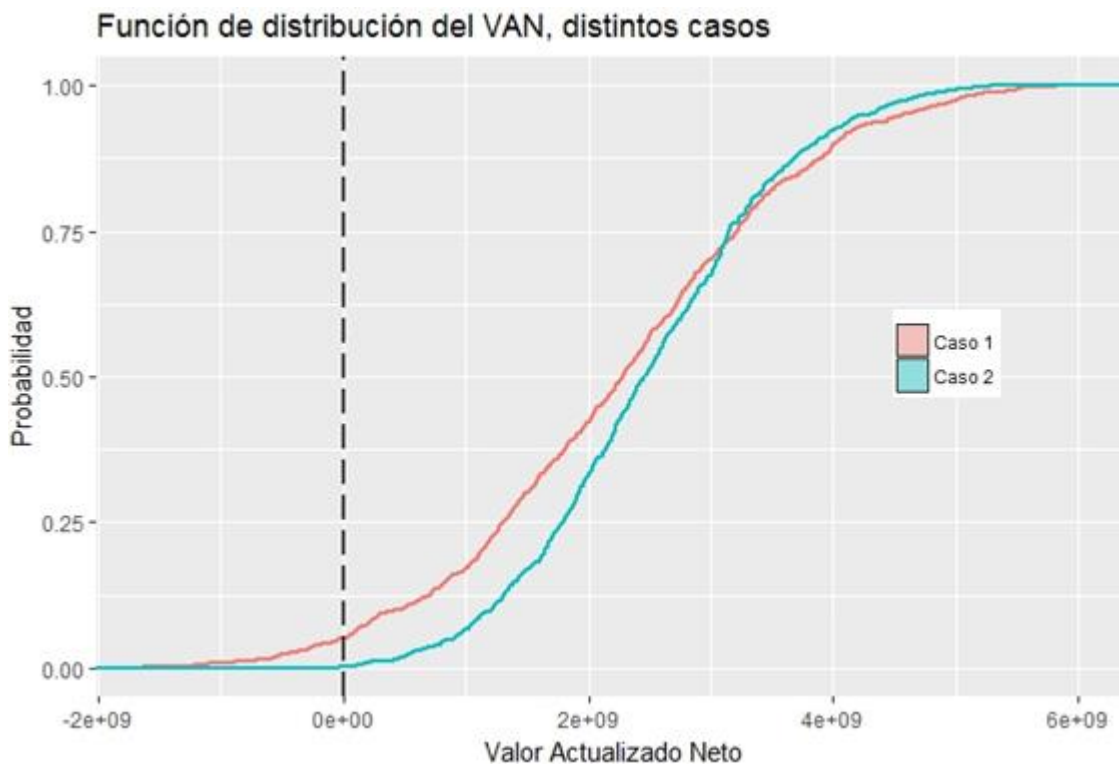


Gráfico 21. Funciones de distribución del VAN para ambos casos. Fuente: Elaboración propia.

La principal diferencia entre ambas funciones de distribución es que en el Caso 2 la probabilidad de obtener un VAN negativo es prácticamente nula, mientras que en el Caso 1 hay una probabilidad de que el proyecto no sea rentable de aproximadamente el 6%. Por lo tanto, simplemente utilizando funciones de probabilidad más ajustadas, conseguimos reducir el riesgo de obtener un VAN negativo de un 6% a un 0%, teniendo así el proyecto el 100% de probabilidad de ser rentable, y no asumiendo ningún riesgo.

En todo caso, tomando como base la situación más pesimista (Caso 1), la probabilidad de obtener una rentabilidad negativa del proyecto es de un 6%, muy baja, por lo que el riesgo de dicho proyecto es asumible.

6 CONCLUSIONES

El objetivo principal del estudio fue expuesto como la determinación de la viabilidad socioeconómica y medioambiental de la inversión del Crossrail en la ciudad de Londres. Para ello, el trabajo se ha basado en la consecución de los siguientes objetivos secundarios: estudio de la metodología del ACB, descripción del proyecto del Crossrail, aplicación del ACB al Crossrail y finalmente, obtención de los resultados.

El Valor Actualizado Neto del proyecto ha resultado ser de £2.814.590.506,26, valor positivo y por lo tanto rentable. Además, la TIR ha resultado ser del 4,91%, valor por encima de los valores actuales de interés del mercado, y por lo tanto hace que la inversión sea rentable. El Ratio Coste/Beneficio ha resultado ser 1,13, lo que significa que por cada libra invertida, se recuperan 1,13 libras, haciendo que sea rentable.

Del Análisis de Sensibilidad se extrae la conclusión de que las distintas variables (costes e ingresos), han de variar en un porcentaje muy alto para modificar el VAN notablemente. Por lo tanto, pese a la gran incertidumbre existente en el estudio, el proyecto es estable económicamente, ya que la variación exigida en cualquiera de los costes e ingresos críticos para reducir el VAN a un valor negativo, es enorme.

El Análisis de Escenarios no hace más que reforzar la idea extraída del Análisis de Sensibilidad, ya que, tras haber modificado las variables críticas, esta vez todas a la vez, el escenario más pesimista no llega a disminuir su valor del VAN por debajo del cero, es decir, incluso el escenario más pesimista es rentable, aunque eso sí, mucho menos que el escenario base. A su vez, se puede concluir que este riesgo es asumible, ya que el escenario más optimista, en cambio, llegaría a doblar la rentabilidad del escenario base estudiado.

En el Análisis de Riesgo se han estudiado dos casos diferentes: uno en el que las variables se ven modificadas siguiendo una distribución de probabilidad uniforme, y otro en el que aquellas en las que ha sido posible, se ha seguido una probabilidad triangular, más ajustada. En este segundo caso, el rango de variación de los ingresos y costes ha sido más ajustado, es decir, se ha disminuido la incertidumbre, por lo que se ha conseguido una función de densidad con un VAN mayor, y una probabilidad de obtención del VAN negativo de prácticamente un 0%. Esto indica que la inversión no asume prácticamente riesgo. Aun así, guiándonos por el Caso 1, el más pesimista, el riesgo de obtener una inversión no rentable es de un 6%, un riesgo que también se considera bajo y asumible.

En vista a lo expuesto anteriormente, se considera que el proyecto del Crossrail es altamente rentable socioeconómicamente y medioambientalmente, y, por lo tanto, una buena elección para la ciudad de Londres, que podrá comenzar a beneficiarse de ella completamente a partir del año 2019.

El estudio del Crossrail no hace más que reforzar la idea de que las siguientes actuaciones deberían estar encaminadas a la consecución de una mejora en la conectividad de otras líneas de la ciudad, como puede ser la norte-sur mediante el proyecto en temprana fase de estudio del Crossrail 2, expuesto a continuación.

7 EL SIGUIENTE PASO: CROSSRAIL 2

7.1 DESCRIPCIÓN

Crossrail 2 es una nueva línea de ferrocarril en fase de estudio actualmente, que une las líneas ferroviarias nacionales en las estaciones de Surrey y Hertfordshire, cruzando la ciudad de Londres a través de un túnel subterráneo. El nuevo ferrocarril pararía en estaciones clave en el centro de la ciudad, lo que mejoraría el acceso a Londres a la zona sureste, y reduciría la congestión en los servicios existentes de metro y ferrocarril nacionales. Mientras el Crossrail cruzaba la ciudad de Londres de este a oeste, el Crossrail 2 lo haría de norte a sur. Con esto se conseguiría mejorar la conectividad de todo el Reino Unido.

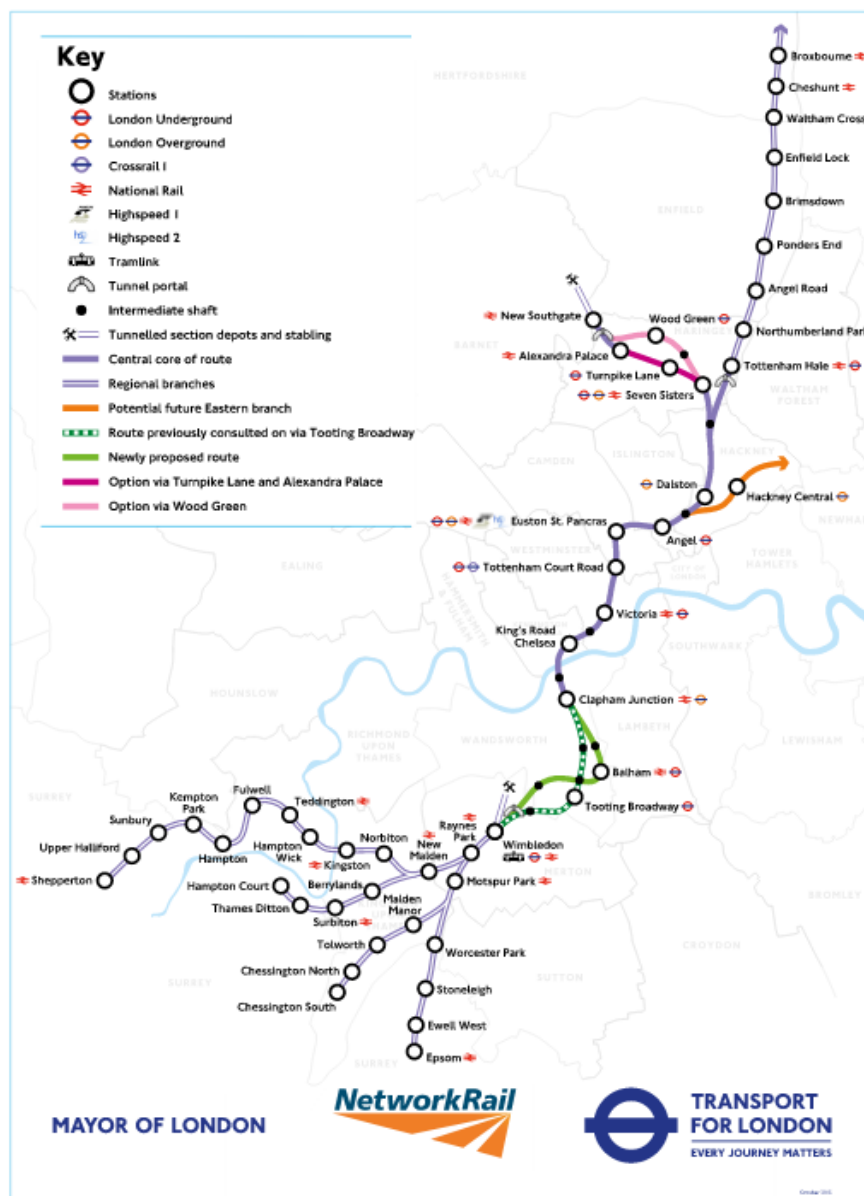


Ilustración 33. Mapa Crossrail 2015. Fuente: Crossrail 2.
<http://crossrail2.co.uk/discover/history/>

7.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La línea de ferrocarril del oeste al noreste de la ciudad se propuso por primera vez en el año 1944. Fue en 1974 cuando se identificó dicha línea como posible esquema para atender la demanda futura, pero no llegó a desarrollarse. En 1995, se propuso un plan alternativo de metro que utilizaría más vías existentes y tendría menos estaciones, lo que paralizó el Crossrail 2. En 2013 se retomó el proyecto, se examinaron hasta 100 opciones de rutas posibles, reduciendo las alternativas a dos:



Ilustración 34. Dos posibles rutas del Crossrail 2 del año 2013. Fuente: Crossrail 2.
<http://crossrail2.co.uk/discover/history/>

Se procedió a la consulta de estas dos rutas potenciales, Mientras la propuesta del metro aliviaba los problemas sólo en el centro de Londres, la opción del Crossrail 2 solucionaba la congestión a nivel regional, por lo que fue fuertemente apoyada por el público en la consulta de 2013.

Desde entonces, y siguiendo nuevas consultas en el año 2014, la planificación para dicho esquema ha continuado. El Gobierno aprobó las Directrices de salvaguarda revisadas en marzo de 2015. La retroalimentación de estas consultas, junto con el diseño de nuevos planes, ayudaron a elaborar las propuestas que se sometieron a consulta a finales de 2015, donde se presentó información más detallada sobre las propuestas: ubicaciones de las estaciones, de las secciones del túnel, emplazamientos necesarios para la construcción, y patrones de servicio.

En marzo de 2016, la National Infrastructure Comisión aprobó que el Crossrail 2 se llevaría adelante “como una prioridad”, y recomendó que se presentara al Parlamento un proyecto de ley para el año 2019, y así poder abrir la línea para el 2033.

El Gobierno acogió con satisfacción estas recomendaciones, y proporcionó financiación en el Presupuesto de 2016 para apoyar el proyecto.

Actualmente, el Crossrail 2 se encuentra en las primeras etapas de la planificación, y todavía no se ha tomado ninguna decisión sobre si implementar o no el proyecto. En los próximos años será necesario desarrollar un plan con mayor detalle y llevar a cabo una serie de consultas públicas sobre el diseño, antes de solicitar el permiso pertinente para su construcción.

Se espera solicitar el permiso al Gobierno para la construcción de la línea en el año 2020, un proceso que duraría 2 años aproximadamente. Si se consigue el permiso, la construcción comenzaría en el 2023, abriendo la línea a principios del año 2030.

7.3 CONSECUENCIAS CROSSRAIL 2

Las principales consecuencias serán las siguientes, no sólo para la ciudad de Londres, sino para el futuro de todo el país:

7.3.1 Mejoras de transporte

El Crossrail 2 tendría un impacto importante en la conectividad de toda la red ferroviaria de la nación, ya que alrededor del 35% de la red ferroviaria de Reino Unido (más de 800 estaciones en todo el país), tendrían un servicio directo a una estación de la línea del Crossrail 2.



Ilustración 35. Unión ferroviaria en Reino Unido. Fuente: Crossrail 2.
<http://crossrail2.co.uk/discover/history/>

Además, el Crossrail 2 liberaría espacio en las líneas del ferrocarril existentes, para que las personas que viajan desde ciudades lejanas como Cambridge, Portsmouth, Southampton, Basingstoke, Winchester, Andover y Working, puedan beneficiarse considerablemente.

Otra consecuencia notable sería la reducción de la congestión, tanto en el transporte ferroviario como en el tráfico rodado, debido a un aumento en la capacidad de un 10%, generando una capacidad adicional de 270.000 personas más en el transporte ferroviario durante las horas punta.

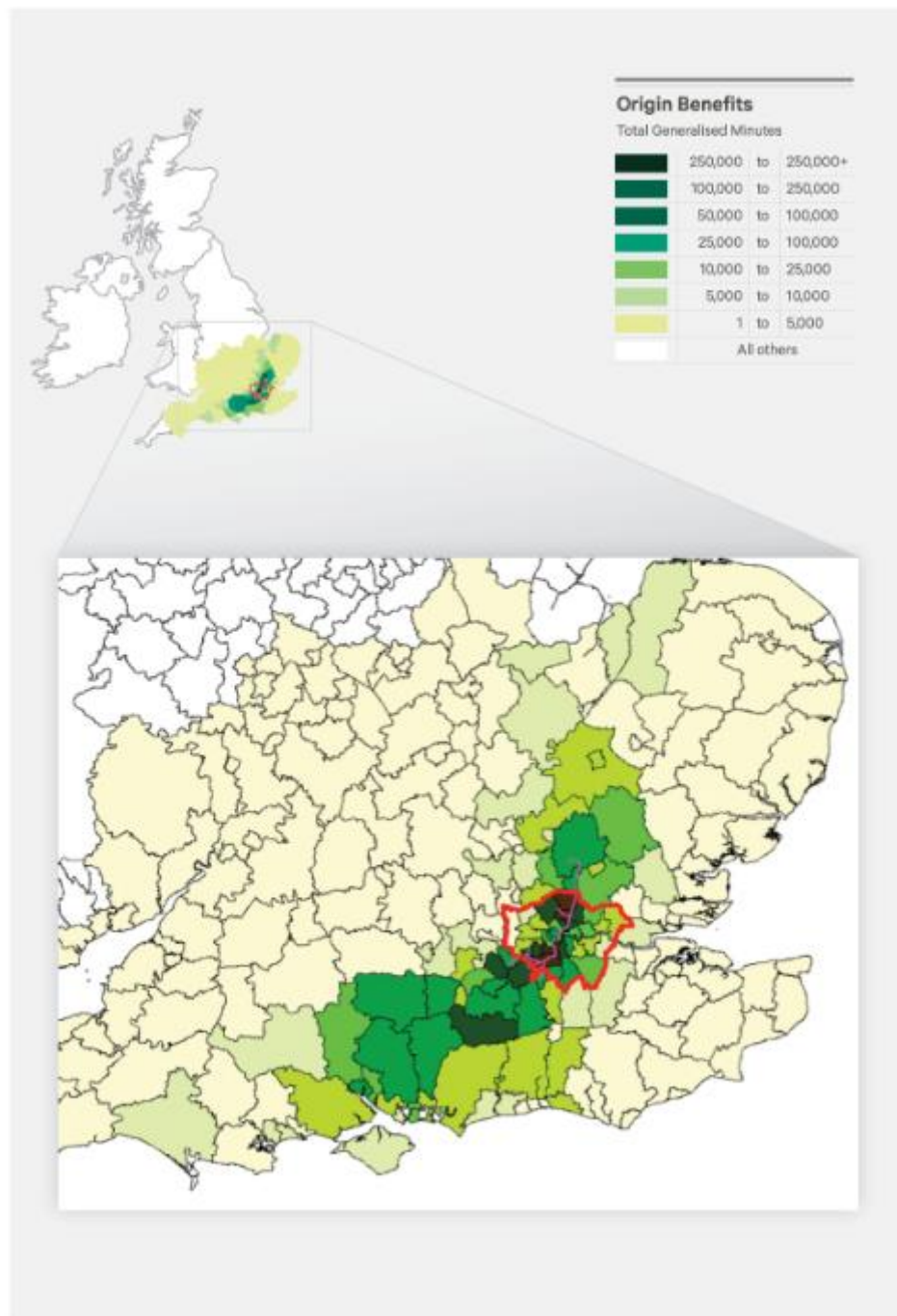


Ilustración 36. Reducción de la congestión con el Crossrail 2. Fuente: Crossrail 2. <http://crossrail2.co.uk/discover/history/>

Además, habría acceso para personas con movilidad reducida en toda la línea.

7.3.2 Oportunidades de empleo

Se crearían unos 60.000 puestos de empleo para su construcción, estimando su valor en unos 5.000 millones de libras. Siendo uno de los mayores proyectos de ingeniería en Europa, crearía un gran número de oportunidades de empleo variadas, para que las empresas de todo el país se involucren y ayuden a hacer que el ferrocarril sea una realidad.

Todas las empresas del país podrían beneficiarse del proyecto, desde la producción de acero en el norte, a los ingenieros especialistas del noroeste. Crossrail 2 ayudaría a apoyar a las economías regionales de la misma forma que lo hizo el Crossrail 1.

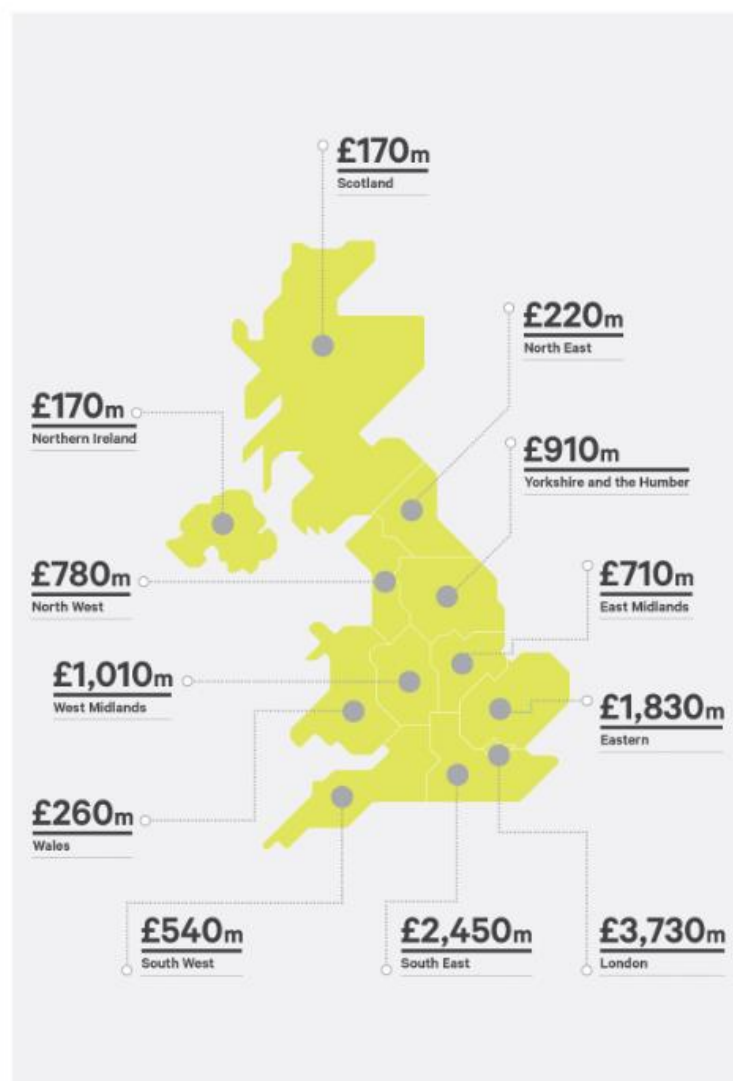


Ilustración 37. Cadena de suministro estimada para el Crossrail 2. Fuente: Crossrail 2. <http://crossrail2.co.uk/discover/history/>

Además, la inversión del Crossrail 2 podría ayudar a aumentar las oportunidades de empleo en la capital; debido al aumento de la capacidad de la red ferroviaria en el centro de Londres, reducción de los tiempos de viaje, y solución del

problema de la vivienda en el centro de la ciudad. Se calcula que se crearían unos 200.000 puestos de empleo para su explotación directa, y aumentarían los empleos en el centro de la ciudad, debido a la mejor accesibilidad.

7.3.3 Regeneración urbana

La población de Londres está creciendo rápidamente. Actualmente, viven en la ciudad Londres 8,6 millones de personas, y se pronostica que aumentará a 10 millones para el año 2030. Estas personas adicionales requerirán la construcción de nuevos hogares, por lo que se llevaría a cabo el desarrollo de unos 200.000 nuevos hogares en la región, en parte propiciados por la construcción del Crossrail 2.

El alto coste de vida y la escasez de viviendas de buena calidad a precios y rentas que la población pueda pagar en la ciudad de Londres, es una barrera para la prosperidad, el crecimiento y la equidad en la ciudad. Cada vez más, la escasez de viviendas significa que los londinenses se enfrentan a viajes mucho más largos para llegar a sus puestos de trabajo, y las empresas están luchando por contratar y retener a las personas en la ciudad. Esta es una de las mayores amenazas para el éxito futuro de Londres.

En particular, el Crossrail 2 estimularía la regeneración de áreas tales como las zonas de Enfield y Haringey, donde existe un potencial significativo para nuevas viviendas, a falta de mejoras en las conexiones de transporte hacia el centro de la ciudad; cosa que se lograría mediante la construcción del Crossrail 2.

8 BIBLIOGRAFÍA

Bickel, P. et al. (Febrero 2006). *Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO)*. (2ª Revisión). Germany.

Boardman, A.E., Greenberg, D.H., Vining, A.R. & Weimer, D.L. (2010). *Cost-benefit analysis: concepts and practice*. (4ª Edición) New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall.

Buchanan, P. (Febrero 2007). *Crossrail: Costs of Delay*. London: Newcombe House.

Buchanan, P. (Octubre 2007). *The Economic Benefits of Crossrail. Final Report*. London: Newcombe House.

Crossrail. <http://www.crossrail.co.uk/>

Crossrail. (Mayo 2002). *Crossrail line 1: Stakeholder Consultation*. United Kingdom.

Crossrail. (Febrero 2009). *Distribution of Crossrail Benefits*. United Kingdom.

Crossrail, Department for Transport, Mayor of London, Transport for London. (Julio 2011). *Crossrail business case. Summary report*. United Kingdom.

Crossrail London. (2005). *Economic Appraisal of Crossrail*. United Kingdom.

Crossrail London. *Noise and vibration mitigation scheme*. United Kingdom.

Crossrail London. (2004). *The Montague Review*. United Kingdom.

Crossrail London Rail Links Ltd, Strategic Rail Authority and Transport for London. (Septiembre 2003). *The Crossrail Business Case*. United Kingdom.

Crossrail 2. <http://crossrail2.co.uk/discover/history/>

Crossrail 2. (Noviembre 2014). *Crossrail 2: Funding and financing study*. United Kingdom.

Crossrail 2 Growth Commission. (Abril 2016). *Delivering Growth in London and the South East*. United Kingdom.

Economipedia. <http://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>

European Commission. (Diciembre 2014). *Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects*. Bruselas: Luxembourg Publications Office of the European Union.

National Infrastructure Commission. (2015). *Transport for a World city*. United Kingdom.

Odeck, J. (2016). Diapositivas docencia asignatura “*Economics of transport infrastructure*”. Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, Trondheim.

Pearce, D., Atkinson, G. & Mourato, S. (2006). *Cost-Benefit Analysis and the Environment. Recent Developments*. París: OECD Publishing.

Parras, A.E. (2017). *Evaluación socio-económica ex-post del proyecto de ampliación del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas* (Trabajo Fin de Máster). Recuperado de <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/10466>

Shadow Strategic Rail Authority (SRA). (2000). *London East-West study*. United Kingdom.

Torres, S. (2014). *Nuevos problemas en la evaluación de proyectos de ingeniería: Evaluación de la vulnerabilidad de la percepción del riesgo en el análisis coste-beneficio medioambiental* (Tesis Doctoral). Recuperada de <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/5842>

Torres, S. (2017). Diapositivas docencia asignatura “Evaluación de Proyectos y Servicios Públicos”. Universidad de Cantabria, Santander.

Transport for London. (2015). *Collisions and casualties on London’s roads: Annual Report 2015*. United Kingdom.

Transport for London. (Septiembre 2014). *Crossrail 2. Analysis Report*. United Kingdom.

Transport for London. (Septiembre 2015). *Crossrail 2: regional and national benefits*. United Kingdom.

Transport for London. (2011). *Travel in London, Supplementary Report: London Travel Demand Survey (LTDS)*. United Kingdom.

Transport for London. <https://tfl.gov.uk/corporate/safety-and-security/road-safety/london-collision>.

9 ANEXOS

9.1 ANEXO 1: CÓDIGO RSTUDIO PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO

```
#####
# CÓDIGO PARA REALIZACIÓN DE ANÁLISIS COSTE-BENEFICIO EN R #
#####
# CROSSRAIL #
#####

# ----- #
# 1.- FUNCIÓN VALOR ACTUALIZADO NETO #
# ----- #
cc.npv.fun <- function (vector.data) {

#COSTES#
#-----#
#Costes construccion
cons.cost <-vector.data[1]
#Costes mantenimiento
mant.cost <-vector.data[2]
#Costes CO2
CO2.cost <- vector.data[3]

#BENEFICIOS#
#-----#
#Ingresos tarifas
ben.tarifas <-vector.data[4]
#Empleo crossrail
ben.empl.cross <-vector.data[5]
#Empleo Londres
ben.empl.Londr <-vector.data[6]
#Beneficio CO2
ben.CO2 <-vector.data[7]
#Beneficio energia
ben.energia <-vector.data[8]
#Beneficio regeneracion
ben.reg <-vector.data[9]
#Disminucion tiempo
ben.tiempo <-vector.data[10]
#Reduccion accidentes
ben.accidentes <-vector.data[11]

#PARAMETROS BASICOS#
#-----#
#Tasa de descuento
disc.rate <-vector.data[12]
#Horizonte temporal
hozt.temp <-vector.data[13]

#SERIES TEMPORALES#
#-----#
#Años
year.vector <-c(1: hozt.temp)
#Construccion
```

```

cons.cost.vector <- rep(0, hozt.temp)
for (i in 1:7){
cons.cost.vector[i] <-cons.cost
}

#Mantenimiento
mant.cost.vector <- rep(0, hozt.temp)
for (i in 8:hozt.temp){
mant.cost.vector[i] <- mant.cost
}

#Costes CO2
CO2.cost.vector <- rep(0, hozt.temp)
for (i in 1:1){
CO2.cost.vector[i] <- CO2.cost
}

#Ingresos tarifas
ben.tarifas.vector <- rep(0, hozt.temp)
for (i in 8:hozt.temp){
ben.tarifas.vector[i] <- ben.tarifas
}

#Empleos Crossrail
ben.empl.cross.vector <- rep (0, hozt.temp)
for (i in 1:hozt.temp){
ben.empl.cross.vector[i] <-ben.empl.cross
}

#Empleos centro Londres
ben.empl.Londr.vector <- rep(0, hozt.temp)
for (i in 8:hozt.temp){
ben.empl.Londr.vector[i] <- ben.empl.Londr
}

#Beneficio CO2
ben.CO2.vector <- rep(0, hozt.temp)
for (i in 8:hozt.temp){
ben.CO2.vector[i] <- ben.CO2
}

#Beneficio energia
ben.energia.vector <- rep(0, hozt.temp)
for (i in 8:hozt.temp){
ben.energia.vector[i] <- ben.energia
}

#Beneficio regeneracion
ben.reg.vector <- rep(0, hozt.temp)
for (i in 8:17){
ben.reg.vector[i] <- ben.reg
}

#Disminucion tiempo
ben.tiempo.vector <- rep(0, hozt.temp)
for (i in 8:hozt.temp){
ben.tiempo.vector[i] <- ben.tiempo
}

#Reduccion accidentes

```

```

ben.accidentes.vector <- rep(0, hozt.temp)
for (i in 8:hozt.temp){
ben.accidentes.vector[i] <-ben.accidentes
}

#Suma y descuento#
#-----#
ben.vector <-rep(0, hozt.temp)
netben.vector <-rep(0, hozt.temp)
for (i in (1):(hozt.temp)){
ben.vector[i] <-
ben.tarifas.vector[i]+ben.empl.cross.vector[i]+ben.empl.Londr.vector[i]
]+ben.CO2.vector[i]+ben.energia.vector[i]+ben.reg.vector[i]+ben.tiempo
.vector[i]+ben.accidentes.vector[i]-

      cons.cost.vector[i]-mant.cost.vector[i]-CO2.cost.vector[i]

netben.vector[i] <-ben.vector[i]/((1+disc.rate)^(i-1))
}

#VAN#
#---#
npv <- sum(netben.vector)
npv.result <- npv
npv.result
}

# ----- #
# 2.- ANÁLISIS MONTECARLO #
# ----- #

#Caso 1
model_1.mc.df <- data.frame(npv=numeric(0), irr=numeric(0))
for (i in 1:1000) {
# Distribuciones de probabilidad de cada parámetro
a <- runif(1, min = 2766197644, max = 1.10*2766197644) #cons.cost
b <- runif(1, min = 0.90*287110402.10, max = 1.15*287110402.10)
#mant.cost
c <- runif(1, min = 0.95*41153455.56, max = 1.05*41153455.56)
#CO2.cost
d <- runif(1, min = 0.90*432176710.50, max = 1.25*432176710.50)
#ben.tarifas
e <- runif(1, min = 0.85*197199776 , max = 1.10*197199776)
#ben.empl.cross
f <- runif(1, min =0.95*134884646.80, max = 1.15*134884646.80 )
#ben.empl.Londr
g <- runif(1, min = 0.90*64324544.11 , max = 1.10*64324544.11)
#ben.CO2
h <- runif(1, min = 0.90*19600000, max = 1.10*19600000) #ben.energia
i <- runif(1, min = 0.85*403560000, max = 1.15*403560000) #ben.reg
j <- runif(1, min = 0.90*391363800, max = 1.20*391363800) #ben.tiempo
k <- runif(1, min = 0.90*7933256.30, max = 1.05*7933256.30)
#ben.regeneracion
l <- runif(1, min = 0.95*0.04, max = 1.05*0.04) #disc.rate
m <- runif(1, min = 57, max = 57) #hozt.temporal

```

```

model_1.param <- c(a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m)
# Llamada a la función y almacenar datos
model_1.mc.df <- rbind(model_1.mc.df, cc.npv.fun(model_1.param))
}

# DATA PREPARATION Caso 1
colnames(model_1.mc.df) <- c("npv")
model_1.mc.sort <- (model_1.mc.df)
model_1.mc.sort$npv <- model_1.mc.sort[order(model_1.mc.sort$npv),]
# Sequence by 1/num.cases, 1/1000 = 0.001
model_1.mc.sort <- data.frame(model_1.mc.sort, seq(from = 0.002, to =
1, by = 0.002))
model_1.mc.sort$proj <- rep('Caso 1', 1000)
colnames(model_1.mc.sort) <- c("npv", "prob", "model")

#Caso 2
library(RTriangle)
library(triangle)
#Caso 2
model_2.mc.df <- data.frame(npv=numeric(0), irr=numeric(0))
for (i in 1:1000) {
# Distribuciones de probabilidad de cada parámetro
a <- rtriangle(1, 2766197644, 1.10*2766197644, (2*2766197644 +
1.10*2766197644)/3 ) #cons.cost
b <- rtriangle(1, a=0.90*287110402.10, b=1.15*287110402.10,
c=(1.5*0.90*287110402.10+1.15*287110402.10)/2.5) #mant.cost
c <- runif(1, min = 0.95*41153455.56, max = 1.05*41153455.56)
#CO2.cost
d <- rtriangle(1, a=0.90*432176710.50, b=1.25*432176710.50,
c=(2*0.90*432176710.50+1.25*432176710.50)/3) #ben.tarifas
e <- runif(1, min = 0.85*197199776 , max = 1.10*197199776)
#ben.empl.cross
f <- runif(1, min =0.95*134884646.80, max = 1.15*134884646.80 )
#ben.empl.Londr
g <- rtriangle(1, a=0.90*64324544.11 , b=1.10*64324544.11,
c=(0.90*64324544.11+1.25*1.10*64324544.11)/2.25 ) #ben.CO2
h <- runif(1, min = 0.90*19600000, max = 1.10*19600000) #ben.energia
i <- runif(1, min = 0.85*403560000, max = 1.15*403560000) #ben.reg
j <- rtriangle(1, a=0.90*391363800, b=1.20*391363800,
c=(2*0.90*391363800+1.20*391363800)/3) #ben.tiempo
k <- runif(1, min = 0.90*7933256.30, max = 1.05*7933256.30)
#ben.regeneracion
l <- runif(1, min = 0.95*0.04, max = 1.05*0.04) #disc.rate
m <- runif(1, min = 57, max = 57) #hozt.temporal
model_2.param <- c(a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m)
# Llamada a la función y almacenar datos
model_2.mc.df <- rbind(model_2.mc.df, cc.npv.fun(model_2.param))
}

# DATA PREPARATION Caso 2
colnames(model_2.mc.df) <- c("npv")
model_2.mc.sort <- (model_2.mc.df)
model_2.mc.sort$npv <- model_2.mc.sort[order(model_2.mc.sort$npv),]
# Sequence by 1/num.cases, 1/1000 = 0.001 Caso 2
model_2.mc.sort <- data.frame(model_2.mc.sort, seq(from = 0.002, to =
1, by = 0.002))
model_2.mc.sort$proj <- rep('Caso 2', 1000)

```

```
colnames(model_2.mc.sort) <- c("npv", "prob", "model")

# Mezclar las distintas alternativas
npv.df.mix <- rbind(model_1.mc.sort, model_2.mc.sort)

# Plot de funciones de distribución
library(ggplot2)
ggplot(npv.df.mix, aes(npv, colour = model)) +
  stat_ecdf(size=1) +
  ggtitle("Función de distribución del VAN, distintos casos") +
  xlab("Valor Actualizado Neto") + ylab("Probabilidad") +
  geom_vline(xintercept=0, alpha=.75, size=1, linetype= "longdash") +
  theme(legend.position=c(0.75,0.65)) +
  scale_colour_discrete(guide=FALSE) +
  scale_fill_discrete(labels=c("Caso 1", "Caso 2")) +
  guides(fill=guide_legend(title=NULL))

# Plot de funciones de densidad conjuntas
ggplot (npv.df.mix) +
  geom_density(aes(x = npv, colour = model, fill = model), alpha=.40) +
  geom_line(aes(x = npv, colour = model), stat="density", size=0.65) +
  geom_vline(xintercept=2.81e+09, alpha=.75, size=1, linetype=
"longdash") +
  ggtitle("Función de densidad del VAN, distintos casos") +
  xlab("Valor Actualizado Neto") + ylab("Probabilidad") +
  theme(legend.position=c(0.75,0.65)) +
  scale_colour_discrete(guide=FALSE) +
  scale_fill_discrete(labels=c("Caso 1", "Caso 2")) +
  guides(fill=guide_legend(title=NULL))
```