

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería Civil

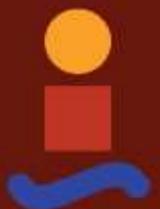
Ajuste de un modelo para el uso del vehículo a nivel de hogar y/o persona

Autor: Jesús Oteros Sánchez

Tutor: José M^a. Del Castillo Granados

**Dpto. Departamento de Ingeniería e
Infraestructuras del Transporte
Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Grado
Grado en Ingeniería Civil

Ajuste de un modelo para el uso del vehículo a nivel de hogar y/o persona

Autor:

Jesús Oteros Sánchez

Tutor:

José M^a. Del Catillo Granados

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería e Infraestructuras del Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo de Fin de Grado: Ajuste de un modelo para el uso del vehículo a nivel de hogar y/o persona

Autor: Jesús Oteros Sánchez

Tutor: José M^a. Del Castillo Granados

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo de Fin de Grado arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia que tanto me han ayudado para conseguir mis objetivos.

A mis amigos que siempre han sido un apoyo para los momentos difíciles.

Agradecimientos

En primer lugar, debo agradecer a mi familia por todo lo que me ha apoyado y ayudado, no sólo estos años, sino todos los que llevo de vida, a mis padres, a mis hermanos... Gracias a ellos he recibido unos valores extraordinarios y he podido convertirme en la persona que soy.

En segundo lugar, agradecer a mis amigos por creer en mí y siempre darme ánimos, en las buenas, pero sobre todo en las malas.

Por último, y no menos importante, a los profesores que han dado su máximo esfuerzo para transmitirnos sus conocimientos, y en concreto a mi tutor, José M^a del Castillo, por ayudarme en su labor docente en esta situación que tan complicada ha sido para todos.

Jesús Oteros Sánchez

Sevilla, 2020

Resumen

El estudio del problema del transporte ha sido y es uno de los principales problemas de los últimos tiempos. Un problema que tiene ligadas muchísimas variables socio-económicas, culturales, endógenas del propio transporte, etc. Uno de las soluciones a este problema se realizan a través de los Planes de Movilidad.

En el presente trabajo se busca realizar un modelo que ajuste el número de viajes que realiza un hogar a la semana en coche. Este ajuste podría servir para analizar la situación de una determinada zona, y así poder realizar un diagnóstico que servirá para establecer las medidas a implementar en un hipotético Plan de Movilidad.

Abstract

The study of the transport problem has been and is one of the main problems of recent times. A problem that has many socio-economic, cultural, endogenous variables of the transport itself, etc. One of the solutions to this problem is carried out through the Mobility Plans.

In the present work we seek to make a model that adjusts the number of trips a household makes per week by car. This adjustment could be used to analyze the situation in a certain area, and thus be able to carry out a diagnosis that will serve to establish the measures to be implemented in a hypothetical Mobility Plan.

... -translation by google-

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Índice de Ecuaciones	xx
Notación	xxii
1 El uso del vehículo privado en el entorno urbano	23
1.1 <i>Introducción</i>	23
1.2 <i>Estudios y trabajos previos relacionados</i>	25
1.3 <i>Situación actual del uso del coche en las ciudades de España</i>	29
2 Ajuste del modelo	31
2.1 <i>Metodología</i>	31
2.2 <i>Recopilación de datos y diseño de la encuesta</i>	33
2.3 <i>Análisis de los resultados</i>	34
2.3.1 <i>Coefficiente de correlación de Pearson ρ</i>	35
2.3.2 <i>Coefficiente de determinación R^2</i>	35
2.3.3 <i>Estimación de los coeficientes</i>	36
2.3.4 <i>P-value de los coeficientes y valor del estadístico t</i>	36
2.3.5 <i>Análisis del modelo con una variable</i>	37
2.3.6 <i>Conclusiones</i>	38
2.4 <i>Ajuste de un modelo lineal generalizado (GLM)</i>	39
2.4.1 <i>Introducción a los modelos generalizados. Elección del modelo.</i>	39
2.4.2 <i>Regresión de Poisson (GLM)</i>	40
2.4.3 <i>Comparación de los modelos</i>	43
2.5 <i>Conclusiones</i>	45
3 El impacto del covid-19	46
3.1 <i>Contexto y situación del transporte durante la pandemia</i>	46
3.2 <i>Estudios y encuestas realizadas</i>	46
3.3 <i>Ajuste del modelo multinomial y probabilidades</i>	52
3.4 <i>Valores predichos y valores reales</i>	55
3.5 <i>Conclusiones y posibles escenarios</i>	56
Bibliografía y Referencias	57

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Variable X_4: 'Dummy 1'.</i>	32
<i>Tabla 2. Variable X_6: 'Dummy 2'.</i>	32
<i>Tabla 3. Variable X_7: 'Dummy 3'.</i>	32
<i>Tabla 4. Variable X_8: 'Dummy 4'.</i>	32
<i>Tabla 5. Variable X_9: 'Dummy 5'.</i>	33
<i>Tabla 6. Resultados del ajuste con 8 variables.</i>	36
<i>Tabla 7. Resultados para modelos de una variable.</i>	38
<i>Tabla 8. Comparación de los coeficientes para los distintos modelos.</i>	38
<i>Tabla 9. Principales Modelos lineales.</i>	39
<i>Tabla 10. Comparativa entre Modelo Lineal y Modelo Lineal Generalizado.</i>	40
<i>Tabla 11. Coeficientes estimados y p-values para el GLM.</i>	42
<i>Tabla 12. Comparación de los modelos utilizados.</i>	43
<i>Tabla 13. Valores asignados a las alternativas.</i>	53
<i>Tabla 14. Coeficientes estimados del modelo logit multinomial con el coche como alternativa de referencia.</i>	53
<i>Tabla 15. Probabilidad (media) de cada alternativa para las muestras.</i>	54
<i>Tabla 16. Probabilidades de las alternativas según el hogar.</i>	54
<i>Tabla 17. Valores reales y predichos por el modelo.</i>	55
<i>Tabla 18. Valores reales y predichos por el modelo según el tipo de hogar.</i>	55

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1-1. Evolución de los Planes de Movilidad Europeos.</i>	24
<i>Figura 1-2. Evolución de los PMUS en España 2005-2014.</i>	25
<i>Figura 1-3. Desplazamientos en fines de semana. IECA 2011.</i>	26
<i>Figura 1-4. Desplazamientos en día laborable. IECA 2011.</i>	26
<i>Figura 1-5. Número de viajes por persona/día en función del rango de edad. EDM 2018.</i>	27
<i>Figura 1-6. Evolución de la población que no viajó el día de la encuesta. EDM 2018.</i>	27
<i>Figura 1-7. Número de viajes por hogar. EDM 2018.</i>	27
<i>Figura 1-8. Motivo del viaje. EDM 2018.</i>	28
<i>Figura 1-9. Motivo del viaje por modo de transporte. EDM 2018.</i>	28
<i>Figura 1-10. Reparto modal por actividad. EDM 2018.</i>	29
<i>Figura 1-11. Evolución de los desplazamientos en coche. ATM.</i>	30
<i>Figura 2-1. Valores de las variables sin transformar.</i>	34
<i>Figura 2-2. Valores de las variables transformadas.</i>	34
<i>Figura 2-3. Matriz de correlación de las variables transformadas.</i>	35
<i>Figura 2-4. Descripción gráfica del p-value.</i>	37
<i>Figura 2-5. Valores predichos frente a valores reales por el Modelo de Elasticidades Constantes.</i>	44
<i>Figura 2-6. Valores predichos frente a valores reales por el GLM de Poisson.</i>	44
<i>Figura 3-1. Resultados de la encuesta de RACE.</i>	47
<i>Figura 3-2. Resultados de la encuesta de RACE.</i>	47
<i>Figura 3-3. Uso del coche frente al Transporte Público en las ciudades españolas.</i>	48
<i>Figura 3-4. Recuperación de los desplazamientos en coches urbanos.</i>	49
<i>Figura 3-5. Tipo de residencia. Encuesta propia</i>	49
<i>Figura 3-6. Disponibilidad de aparcamiento. Encuesta propia.</i>	50
<i>Figura 3-7. Tipo de hogares según las personas que conviven. Encuesta propia.</i>	50
<i>Figura 3-8. Reparto modal antes de la pandemia. Encuesta propia.</i>	51
<i>Figura 3-9. Miedo al contagio. Encuesta propia.</i>	51
<i>Figura 3-10. Reparto modal tras la pandemia. Encuesta propia.</i>	52
<i>Figura 3-11. Influencia del modelo telemático. Encuesta propia.</i>	52

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>(Ec. 1). Modelo de Elasticidades Constantes de las variables originales.</i>	31
<i>(Ec. 2). Modelo de Elasticidades Constantes de las variables transformadas.</i>	31
<i>(Ec. 3). Elasticidad.</i>	31
<i>(Ec. 4). Coeficiente de Correlación de Pearson ρ.</i>	35
<i>(Ec. 5). Coeficiente de Determinación R^2.</i>	35
<i>(Ec. 6). Grados de libertad del estadístico t.</i>	36
<i>(Ec. 7). Estructura del modelo lineal (LM)</i>	39
<i>(Ec. 8). Función de probabilidad de Poisson.</i>	40
<i>(Ec. 9). Principal propiedad de la distribución de Poisson.</i>	41
<i>(Ec. 10). Definición del modelo para la regresión de Poisson.</i>	41
<i>(Ec. 11). Estructura del modelo.</i>	41
<i>(Ec. 12). Función de enlace para el modelo.</i>	41
<i>(Ec. 13). Modelo log-lineal.</i>	41
<i>(Ec. 14). Verosimilitud para GLM.</i>	41
<i>(Ec. 15). Logaritmo de la verosimilitud.</i>	42
<i>(Ec. 16). Expresión para el cálculo de la máxima verosimilitud.</i>	42
<i>(Ec. 17). Deviance de un GLM</i>	42
<i>(Ec. 18). Coeficiente de Determinación R^2 para el GLM</i>	42
<i>(Ec. 19). Regresión Logit Multinomial</i>	53
<i>(Ec. 20). Porcentaje de aciertos del modelo</i>	55

Notación

$\frac{\partial y}{\partial x}$	Derivada parcial de y respecto
x°	Notación de grado, x grados.
:	Tal que
\leq	Menor o igual
\geq	Mayor o igual

1 EL USO DEL VEHÍCULO PRIVADO EN EL ENTORNO URBANO

1.1 Introducción

El uso del vehículo privado ha sido, y es aún, el medio de transporte más utilizado. Dentro del entorno metropolitano se considera el modo más normal de transporte. El coche está etiquetado como el medio de transporte más confortable y rápido, sin embargo, no suele ser el más eficiente en otros términos como uso del espacio vial o consumo energético. La gran mayoría de los desplazamientos que se produce en el ámbito urbano mediante este medio se asocian a motivos laborales. Los problemas asociados a estos desplazamientos domicilio-trabajo se deben al modelo de organización territorial.

La relación entre la vivienda y el lugar de trabajo ha evolucionado de manera significativa en el último siglo. En el periodo previo a la Segunda Revolución Industrial las actividades productivas y domésticas se establecían en lugares próximos, a veces incluso se realizaban en el mismo lugar, esto provocaba que la mayoría de viajes realizados por estos motivos se realizaran a pie.

A partir de la revolución industrial, con las primeras fábricas textiles y siderúrgicas a lo largo del siglo XIX y con los avances del transporte (ferrocarril y coche) comienzan a crearse núcleos urbanos de mayor tamaño. En este momento, empiezan a disgregarse de manera gradual el domicilio y el lugar de trabajo, siendo aún los desplazamientos al trabajo inferiores a 5 km.

Durante el comienzo del siglo XX, la situación de la organización territorial no cambia demasiado. Se otorga un aspecto relevante al coche, debido a las mejoras de producción y la disminución de precio de los mismos. En ese instante, el modelo territorial se modifica para favorecer el empleo del vehículo a través de nuevas infraestructuras.

En los años treinta comienzan a crearse lo que posteriormente se conocerán como polígonos industriales con accesos exclusivos para los vehículos, esta organización territorial queda establecida de manera legal a partir de la Ley del Suelo de 1956. Debido a ello, y al deficiente transporte público de la época, los vehículos privados se expanden a casi todas las clases sociales provocando así las primeras congestiones urbanas, que afectarán además al transporte público urbano, generando una especie de ‘círculo vicioso’ al que no se le encontraría solución hasta finales del siglo XX, con los Planes de Movilidad.

Los Planes de Movilidad tienen como objetivo mejorar la accesibilidad a las áreas y promover el transporte sostenible (peatón, bici, transporte público). El objetivo ‘oculto’ de esas acciones consiste en reducir el número de viajes que se realizan en los coches, ya que es este medio el más ineficiente, como se ha comentado al comienzo de este documento, en cuanto a consumo de energía y espacio vial y es el principal responsable de los problemas de seguridad vial y de emisiones contaminantes, tanto de gases como acústicas.

Para la realización de estos planes, se establecen una serie de fases:

1. Preparación y establecimiento de objetivos prioritarios.
2. Diagnóstico de la situación actual.
3. Definición de objetivos específicos e indicadores.
4. Diseño del plan.
5. Implantación del plan de movilidad.
6. Evaluación, ajuste y seguimiento del plan.

En Europa, la implementación de este tipo de estrategias que se comienzan a llevar a cabo en el año 1983, con el *PDU: Plans de Desplacement Urbains* (Francia). Estos planes colocaban la base de lo que más adelante se

convertirían en los PMUS: Planes de Movilidad Urbana Sostenible. En la Figura 1-1, se recoge la evolución de estos planes en el tramo final del siglo XX.

PDU: Plans de Desplacment Urbains (Francia)	
1983-86	Primeros planes piloto, muchos de los cuales no se llevaron a cabo. Las políticas de movilidad no cambiaron, terminaron por desaparecer. Balance: sirvieron para insertar al peatón y a las personas con discapacidad en el espacio urbano y para fomentar la integración del transporte público en la ciudad.
1996	La Ley del aire y utilización racional de la energía, hizo obligatorios los PDU para los municipios y aglomeraciones de más de 100.000 hab. Se editó una guía orientativa para la elaboración de los planes
2001	Existen 58 PDU redactados pero en 20 de ellos hay problemas de ejecución por falta de adaptación de los ayuntamientos.
2006	Los PDU aprobados deben llevar una Evaluación de Impacto Ambiental
2016	Han contribuido a permitir el cambio modal hacia pautas de mayor sostenibilidad y mejora de la accesibilidad para personas con discapacidad. Pero existen barreras en relación a la participación de las personas implicadas, la integración de las políticas urbanísticas y la coordinación con los operadores de transporte
TP: Local Transport Plan (Reino Unido)	
1997	Con la llegada del partido laborista, se produce un cambio en la política de transportes
1998	A New Deal Transport: Better for everyone: plantea la planificación integral y ambiental del transporte, y recoge la necesidad de realizar los LTP
2001	Publicación de la Transport Act. Creación de un Ministerio específico de Transporte que asume las competencias de los LTP Ámbito: no existen límites de población, el ámbito de intervención es el condado Horizonte temporal: 5 años para su revisión. Planificación de escenarios: 10 años. Financiación: condicionada por la revisión anual, y el cumplimiento de los objetivos.
2011-26	Nueva Estrategia para los LTP
PUMS: Piano Urbano di Mobilità Sostenibile	
1996	Antecedentes: el Ministerio de Obras Publicas aprobó una normativa para implantar los PUT (Planes Urbanos de Tráfico) en ciudades de más 30.000 hab. con carácter obligatorio. Normativa ambiental: identifica áreas contaminantes dónde actuar con un PUMS Competencias: Regiones y ayuntamientos conjuntamente para áreas y ciudades de más de 100.000 hab. Deben recoger el seguimiento de los indicadores que midan la eficacia de los programas Deben incluir estudios sectoriales: Planes de Tráfico, Planes de Urbanismo. . . Plazo: 10 años
2000	Financiación: Art. 22 de la Ley Ambiental 340/2000 por la que el estado otorga el 50% de la inversión.

Figura 1-1. Evolución de los Planes de Movilidad Europeos.

En España, el primer plan urbano de movilidad sostenible aparece en 2004, con el Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética. La cantidad y la eficacia de los mismos se ha ido incrementando en los últimos años, ya que los problemas derivados del uso del vehículo se han convertido en problemas colectivos de primer orden, como son la contaminación, la congestión de la red y los problemas de seguridad vial.

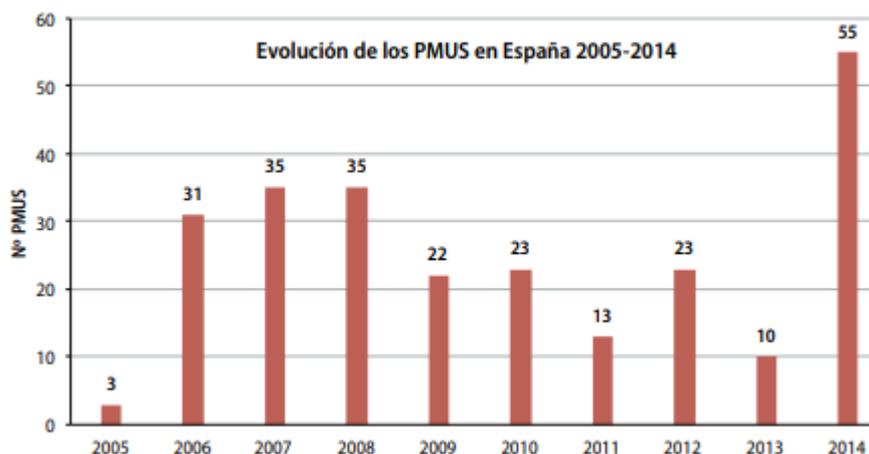


Figura 1-2. Evolución de los PMUS en España 2005-2014.

El objetivo de este trabajo consiste en elaborar el ajuste de un modelo que represente los desplazamientos urbanos que se realizan en coche al año. Este modelo podría servir para contribuir al diagnóstico de una ciudad que se vea sometida a un Plan Urbano de Movilidad Sostenible.

1.2 Estudios y trabajos previos relacionados

No son pocos los estudios o modelos que se han realizado sobre el transporte desde finales del siglo XX hasta la actualidad, sin embargo, muchos de ellos no son públicos y el acceso a ellos suele ser muy restringido.

En España, históricamente se han realizado estudios sobre este tema por parte del Instituto Nacional de Estadística (INE), aunque debido a las últimas crisis económicas el número de estudios que se han realizado ha mermado significativamente.

En Andalucía, se realizó el estudio más actual sobre los desplazamientos de la población andaluza (año 2011) por parte de la Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo a través del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. El estudio en concreto, “Encuestas social 2011: Movilidad urbana en las regiones de Andalucía” tenía como objetivo principal conocer las características de los desplazamientos y de los flujos de movilidad de la población que reside en las regiones urbanas de Andalucía.

En esta encuesta se recogen multitud de ámbitos de los cuales se seleccionan algunos que pueden ser útiles para el seguimiento de este trabajo. Entre ellos los que reflejan el motivo del transporte y el modo de transporte utilizado para días laborables y fines de semana.



4.2.a. Personas de 16 y más años que se desplazan en fin de semana según actividad realizada y modo principal de transporte por características de la vivienda y del hogar. Año 2011
(porcentajes horizontales) (máximo dos respuestas)

	Total personas	Personas que se desplazan			Ir de compras (alimentación, ropa...)			Visitar familiares o amigos			Ocio (incluye salidas de fin de semana)			Trabajo		
		el fin de semana	Total personas	A pie	Coche	Total personas	A pie	Coche	Total personas	A pie	Coche	Total personas	A pie	Coche		
Tipo de poblamiento																
Disperso	602.195	352.954	71.918	17,3*	76,3	130.479	21,3	71,4	182.708	19,4	72,7	50.969	13,1*	77,7		
Intermedio	473.395	286.708	67.836	27,7*	68,5	95.159	20,8	71,6	162.308	28,4	63,3	46.892	22,5*	70,6		
Compacto	3.924.736	2.458.083	587.800	41,5	54,2	936.990	28,4	66,4	1.416.392	37,3	53,7	262.657	18,0	69,2		
Total	5.000.325	3.097.744	647.548	37,3	58,1	1.162.629	25,4	67,4	1.761.408	34,6	56,5	360.518	17,9	70,6		
Tamaño de la vivienda																
Un miembro	323.364	174.847	37.266	57,5	37,2	80.368	34,5	53,5	92.770	49,7	38,8	10.000	5,8*	71,5*		
Dos miembros	1.183.261	667.777	158.497	49,4	43,7	225.201	24,1	68,4	373.835	38,3	51,9	67.894	18,3*	64,7		
Tres miembros	1.285.676	815.537	170.673	36,7	58,9	307.828	21,8	72,4	463.911	27,1	65,0	99.574	14,2*	73,5		
Cuatro miembros	1.491.064	981.316	193.965	27,4	69,1	361.955	24,1	69,6	586.217	31,7	59,3	113.162	19,6	72,6		
Cinco o más miembros	717.060	458.267	87.158	30,3	71,3	187.277	31,3	59,7	244.876	44,5	47,7	89.889	21,9*	68,8		

Figura 1-3. Desplazamientos en fines de semana. IECA 2011.



3.1.2.a. Desplazamientos^a en día laborable según modo principal de transporte por características de la vivienda y del hogar. Año 2011
(porcentajes horizontales)

	Total desplazamientos	A pie	Coche conductor	Coche acompañante	Motocicleta/Ciclomotor	Bicicleta	Transporte público ^b	Otro transporte
Tipo de poblamiento								
Disperso	1.777.566	15,0	64,3	12,0	4,2	0,8	3,4	0,2*
Intermedio	1.354.065	19,3	55,6	12,3	6,5	0,8*	5,1	0,3*
Compacto	10.447.850	32,6	40,7	12,3	4,9	1,6	7,6	0,3
Total	13.579.480	29,0	45,3	12,3	5,0	1,4	6,8	0,3
Tamaño de la vivienda								
Un miembro	663.307	44,9	31,8	8,0	3,0	1,4	10,5	0,4*
Dos miembros	2.649.362	35,4	38,5	11,7	4,5	1,9	7,7	0,2*
Tres miembros	3.609.815	26,6	47,4	11,5	5,7	1,4	6,8	0,5
Cuatro miembros	4.606.852	24,9	51,6	11,8	5,0	1,2	5,2	0,3*
Cinco o más miembros	2.050.144	28,9	40,5	16,6	4,9	1,1*	7,9	0,1*
Total	13.579.480	29,0	45,3	12,3	5,0	1,4	6,8	0,3

Figura 1-4. Desplazamientos en día laborable. IECA 2011.

Como se refleja en los resultados de la Figura 1-4, al menos un 50% de los desplazamientos se producen en coche en días laborables, aumentando su uso en usuarios que habitan en zonas de baja densidad y en unidades familiares de más individuos.

De igual manera, observando la Figura 1-3, se producen dos de cada tres desplazamientos en coche los fines de semana, para distintos motivos de viaje y sufriendo los mismos aumentos para las características del hogar definidas anteriormente.

Por parte de la Comunidad de Madrid, en concreto el Consorcio de Transportes de Madrid, el último estudio sobre la movilidad de los usuarios data de 2018, la Encuesta de Domiciliaria de Movilidad. En dicha encuesta se realizó diversos estudios, analizando el tipo de hogar como la localización de la vivienda, el número de miembros del hogar y las características de los mismos, el número de coches por hogar y el motivo del viaje entre muchas otras variables.

Una de los primeros resultados del estudio es el número de viajes diarios que realizan de media los individuos, en función de la edad de los encuestados y el porcentaje de ellos que no realizó ningún viaje.

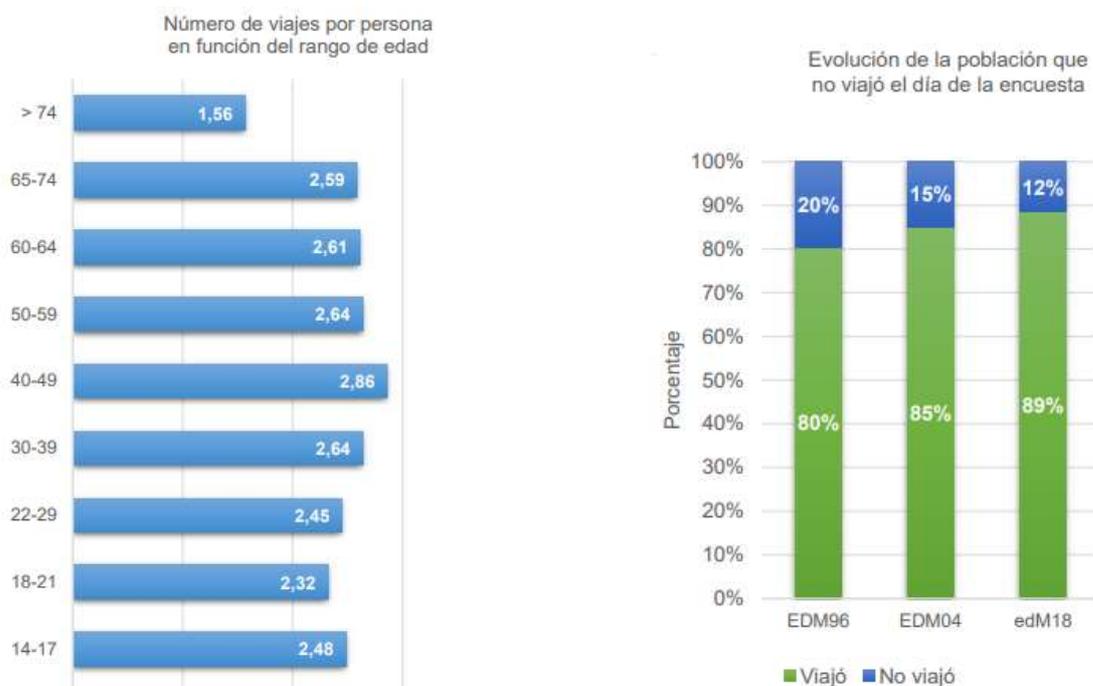


Figura 1-6. Evolución de la población que no viajó el día de la encuesta. EDM 2018.

Figura 1-5. Número de viajes por persona/día en función del rango de edad. EDM 2018.

Obteniéndose un total de 6,16 viajes diario por hogar al día de media en los hogares de la Comunidad de Madrid, y con valores diferentes según la zona de residencia en la que se encontraran.

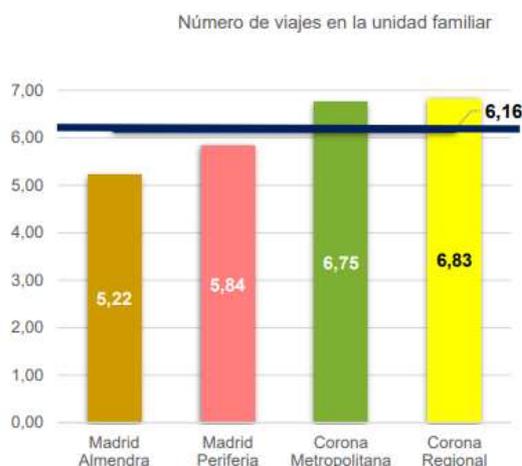


Figura 1-7. Número de viajes por hogar. EDM 2018.

Otra de las variables a tener en cuenta, es el motivo del viaje, el coche está ligado sobre todo a los desplazamientos ocupacionales, es decir aquellos que se deben al motivo trabajo/estudio.



Figura 1-8. Motivo del viaje. EDM 2018.

La propia encuesta refleja la evidencia de que el coche es el principal medio de transporte elegido para estos desplazamientos como puede observarse en la Figura 1-9.

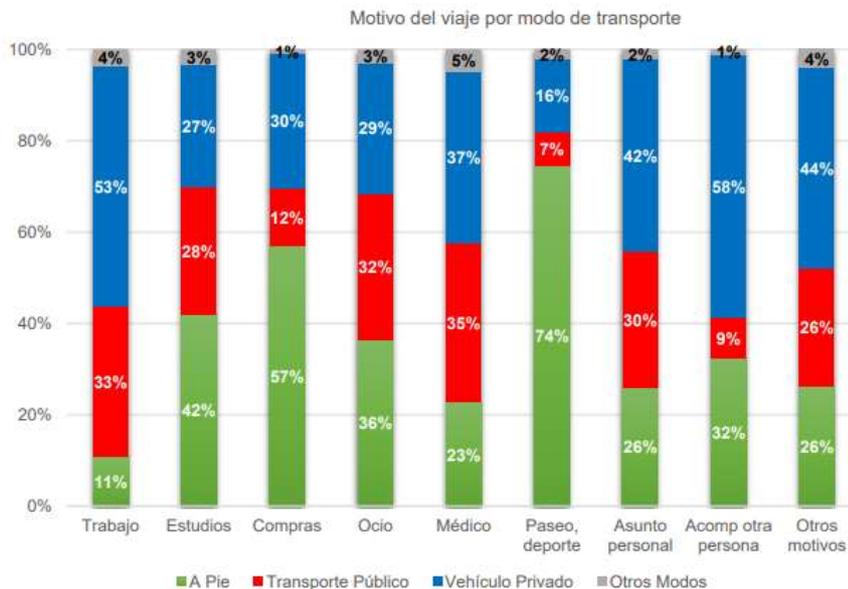


Figura 1-9. Motivo del viaje por modo de transporte. EDM 2018.

Por último, una variable que ha de tenerse en cuenta es el reparto modal por actividad del individuo, como podemos observar en la siguiente figura, se tiene que casi 3 de cada 4 jubilados utilizan otros medios de transporte distinto al coche, mientras que el individuo laboralmente activo, lo usa preferiblemente respecto al resto de opciones.

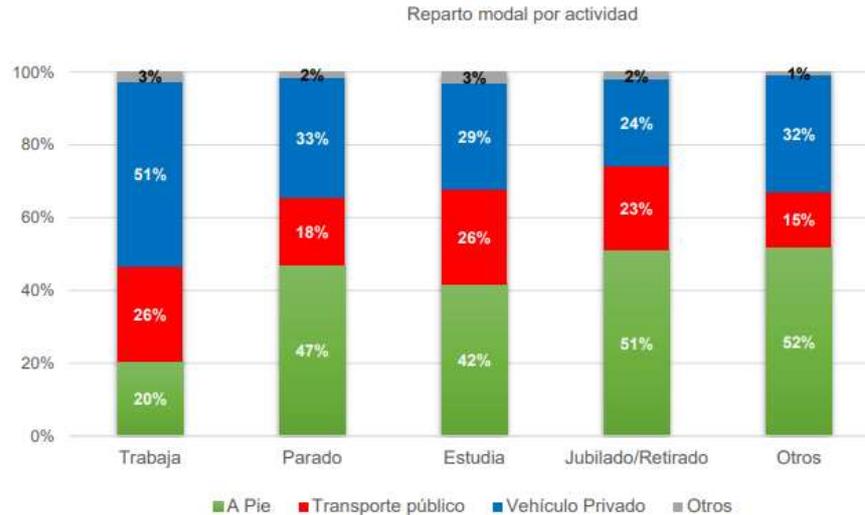


Figura 1-10. Reparto modal por actividad. EDM 2018.

De todos estos estudios, se pueden sacar conclusiones que ayudarán al análisis y a la elaboración de hipótesis de acuerdo a este proyecto.

1.3 Situación actual del uso del coche en las ciudades de España

Como se ha explicado en la introducción de este documento, el uso del vehículo privado como medio de transporte se impuso durante todo el siglo XX, sin embargo, con la masificación y el aumento de tráfico en los grandes núcleos urbanos comenzaron a producirse grandes problemas de accesos y movilidad en las ciudades. Las soluciones a estas situaciones se han buscado a través de los Planes de Movilidad que intentan mitigar el uso del coche en favor de otros medios de transporte más eficientes como la bicicleta o transporte público (bus, metro, tranvía...). A estos problemas de congestión, hay que añadirle los problemas de contaminación con los cuáles la sociedad está mucho más concienciada.

Las primeras medidas se toman desde la Unión Europea, concretamente en 1987 se establecieron las acciones que se iban a tomar para reducir las emisiones contaminantes en el sector de la automoción, con un programa de medidas restrictivas aplicadas de manera progresiva, conocidas como normativas “EURO” seguidas de una numeración sucesiva según su momento de aplicación.

En total se han aprobado hasta 7 normativas, desde la ‘EURO 0’ a la ‘EURO 6’, donde se han realizado restricciones sobre todo en las características del vehículo, prohibiendo, por ejemplo, los vehículos con motor de combustión que utilizaban plomo en las gasolineras, ya que los catalizadores de uso obligatorio entraban en conflicto con este tipo de combustible.

En España, desde 2015, con la entrada de las etiquetas de la DGT introducidas dentro del Plan Nacional de Calidad del Aire, se han realizado muchas restricciones en algunas ciudades con respecto al uso del vehículo. El distintivo ambiental es una forma de clasificar los vehículos en función de su eficiencia energética, teniendo en cuenta el impacto medioambiental de los mismos.

Esta clasificación tiene como objetivo discriminar positivamente a los vehículos más respetuosos con el medio ambiente y ser un instrumento eficaz al servicio de las políticas municipales, tanto restrictivas de tráfico en episodios de alta contaminación, como de promoción de nuevas tecnologías a través de beneficios fiscales o relativos a la movilidad y el medio ambiente.

Es en 2016, cuando estas restricciones comienzan a ser efectivas en algunas zonas urbanas dentro de las grandes ciudades, como Madrid y Barcelona. Estas medidas se han visto reflejadas en los estudios realizados por la ‘Autoritat del Transport Metropolità’ de Barcelona. En ellos se observa un cambio de tendencia del uso del automóvil desde el año 2016, cuando empiezan a producirse pequeñas reducciones de desplazamientos en este medio de transporte.

Mitjà de transport	Desplaçaments (milers)											Dif. Relatives 2019/2018
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
Caminant	6.634	7.593	7.890	7.945	7.570	7.309	8.028	5.790	5.192	7.184	7.920	10,2%
Bicicleta	151	175	199	207	229	212	219	220	260	243	281	15,5%
Cadira de rodes i VMP	-	-	-	-	-	-	-	-	26	70	80	14,6%
Total Mobilitat activa	6.786	7.768	8.089	8.152	7.799	7.521	8.247	6.010	5.478	7.496	8.280	10,5%
Autobús	1.038	1.105	1.115	1.060	1.060	1.042	1.087	1.123	1.150	1.157	1.150	-0,6%
Metro	1.015	1.051	1.077	1.036	1.042	1.050	1.067	1.001	1.060	1.094	1.100	0,6%
Altres ferroviaris (FGC, Rodalies Renfe, Tramvia)	750	736	765	752	772	809	798	820	853	859	840	-2,1%
Resta transport públic	135	152	127	146	129	117	131	133	116	176	149	-15,2%
Total Transport públic	2.939	3.044	3.084	2.993	3.002	3.017	3.084	3.078	3.179	3.285	3.240	-1,4%
Cotxe	4.611	4.696	4.518	4.305	4.433	4.573	4.748	4.480	4.236	5.025	5.016	-0,2%
Moto	553	595	568	563	615	618	614	613	613	695	692	-0,4%
Resta vehicle privat	78	166	120	113	46	82	82	99	113	210	203	-3,4%
Total Vehicle privat	5.242	5.457	5.205	4.980	5.094	5.273	5.444	5.192	4.962	5.931	5.911	-0,3%
Total RMB	14.967	16.269	16.378	16.125	15.895	15.811	16.775	14.280	13.619	16.712	17.431	4,3%



Figura 1-11. Evolución de los desplazamientos en coche. ATM.

Como puede observarse en la Figura 1-11, el uso del coche venía creciendo hasta el año 2015, que alcanza la cifra de 4.748.000 desplazamientos, el año de comienzo de las restricciones se produce un descenso hasta los 4.236.000 desplazamientos en el año 2017, el año con menor número de viajes en todo el estudio.

En mayo de 2020, se envía a las cortes el primer proyecto de Ley del Cambio Climático y Transición Ecológica. Algunas de las consecuencias más inmediatas será la obligación de zonas de bajas emisiones en ciudades mayores de 50,000 habitantes a partir de 2023, y a partir de 2026 con la entrada en vigor de la 'EURO 7' se empiece a restringir el uso de vehículos diésel y gasolina en el centro de las principales ciudades del país.

Todas estas medidas buscan disminuir el uso del vehículo privado, a pesar de esto, el coche sigue siendo el principal medio de transporte debido a las innovaciones tecnológicas y el auge del vehículo híbrido/eléctrico, aunque aún deban desarrollarse puntos de servicio para estos nuevos vehículos.

2 AJUSTE DEL MODELO

2.1 Metodología

Existe una gran diversidad de modelos de demanda atendiendo a diversos criterios no excluyentes entre sí (unimodales, multimodales, estáticos, analíticos, empíricos...). Para el desarrollo de este trabajo se ha elegido el modelo matemático más utilizado en ingeniería del transporte, el modelo de elasticidades constantes.

Este modelo se expresa como:

$$Y = e^{\beta_0} \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot X_3^{\beta_3} \dots X_n^{\beta_n} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde

β_i : elasticidades de la demanda

X_i : variables explicativas

Y : variable dependiente

Tomando logaritmo, el modelo resultante es lineal en las elasticidades y su ajuste es trivial:

$$\log Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log X_1 + \beta_2 \cdot \log X_2 + \beta_3 \cdot \log X_3 + \dots + \beta_n \cdot \log X_n \quad (\text{Ec. 2})$$

Los coeficientes a estimar son las elasticidades. Las elasticidades respecto a una variable explicativa representan el cambio relativo de la variable dependiente en función del cambio producido en dicha variable explicativa.

$$\beta_i = \frac{\partial \log Y}{\partial \log X_j} = \frac{X_i}{Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial X_i} \quad (\text{Ec. 3})$$

Para la elaboración de este modelo se han creado nueve variables, la variable dependiente y ocho variables explicativas. Siendo:

- Variable 1: X_1 = número de viajes totales (variable dependiente)
- Variable 2: X_2 = número de miembros del hogar
- Variable 3: X_3 = número de miembros del hogar con carnet de conducir
- Variable 4: X_4 = motos por hogar (DUMMY 1)
- Variable 5: X_5 = número de coches por hogar
- Variable 6: X_6 = Si al menos convive un niño en el hogar (DUMMY 2)
- Variable 7: X_7 = Si al menos convive un jubilado en el hogar (DUMMY 3)
- Variable 8: X_8 = Si se dispone de aparcamiento privado (DUMMY 4)
- Variable 9: X_9 = Ubicación del hogar (DUMMY 5)

Todas las variables explicativas (de X_2 a X_9) son variables endógenas. Estas variables se caracterizan por ser propias del individuo.

Las variables ‘dummy’ se han utilizado para categorizar los hogares. Las variables ‘dummys’ son variables ficticias, generalmente binarias (valores 0 ó 1) que buscan clasificar la muestra en categorías. Generalmente se le da el valor 0 al valor de referencia o el más representativo.

La variable ‘Dummy 1’ clasifica los hogares en dos categorías, dependiendo de si el hogar dispone de motos. Siendo el hogar de referencia sin motos.

Tabla 1. Variable X_4 : 'Dummy 1'.

Número de motos por hogar	Dummy 1
0	0
≥ 1	1

La variable 'Dummy 2' categorizan los hogares en función del número de miembros menores de 16 años. Siendo el hogar de referencia sin estos miembros.

Tabla 2. Variable X_6 : 'Dummy 2'.

Número de miembros del hogar ≤ 16 años	Dummy 2
0	0
≥ 1	1

La variable 'Dummy 3' establece si en el hogar convive al menos un jubilado. Siendo el hogar de referencia sin jubilados.

Tabla 3. Variable X_7 : 'Dummy 3'.

Número de miembros del hogar jubilados	Dummy 3
0	0
≥ 1	1

La variable 'Dummy 4' clasifica los hogares según la disponibilidad de aparcamiento. Siendo el hogar de referencia con aparcamiento privado.

Tabla 4. Variable X_8 : 'Dummy 4'.

Disponibilidad de aparcamiento	Dummy 4
Aparcamiento priv.	0
Sin aparcamiento.	1

Por último, la variable ‘Dummy 5’ categoriza los hogares en función de la zona urbana en donde se encuentre la vivienda, estableciendo dos categorías; compacta o zona de baja densidad (ZBD). Siendo la categoría de referencia la zona compacta.

Tabla 5. Variable X_9 : ‘Dummy 5’.

Localización de la vivienda	Dummy 5
Compacta	0
ZBD	1

2.2 Recopilación de datos y diseño de la encuesta

Para obtener la muestra de estudio se ha realizado una encuesta on-line cuantitativa de preferencias relevadas (RP: *Revealed Preferences*) a través del servicio de formularios de Google (*Google Forms*). De carácter anónima y tratada según la Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal (LOPD) y garantía de derechos digitales.

La encuesta se realizó entre el 7 y el 21 de enero de 2020. Se realizó a hogares de al menos un miembro mayor de 18 años con carnet de conducir y vehículo propio. Se obtuvo una muestra de 223 hogares que respondieron a las 11 preguntas que se formulaban dentro del documento. Para obtener una muestra sin sesgos se realizó una difusión mediante varios canales, tanto on-line como presencial, intentando llegar al hogar medio característico evitando los hogares de convivencia de miembros independientes como residencias, cuarteles, pisos de estudiante u otros.

Las preguntas que se realizaron fueron las siguientes:

- Número de miembros del hogar:
- Número de miembros del hogar con carnet de conducir:
- Número de coches por hogar:
- Número de motos por hogar:
- Número de miembros del hogar que trabajan o estudian (mayores de 16 años):
- Número de miembros del hogar menores de 16 años:
- Zona de residencia, a elegir entre dos tipos:
 - Compacta (Mayoritariamente bloques de edificios, pueden incluir casas unifamiliares, generalmente situadas dentro del núcleo urbano).
 - Zonas de baja densidad (Mayoritariamente casas unifamiliares, generalmente situadas fuera del casco urbano)
- Disponibilidad de aparcamiento, a seleccionar entre:
 - Sin aparcamiento.
 - Suele haber aparcamiento.
 - Aparcamiento privado.
- Descripción breve de los viajes realizados en la última semana:
- Nombre de la localidad de residencia:
- Estimación de los km anuales realizados:

Todas ellas de obligada respuesta, excepto la estimación, ya que es un valor que no todos los hogares conocen.

2.3 Análisis de los resultados

Para implementar el modelo se ha utilizado la herramienta MATLAB. Debido a que el modelo utilizado no trata bien los hogares con valores 0 en la variable dependiente, se ha tenido que eliminar los hogares con 0 viajes a la semana, en el total de la muestra se encontró solo un caso. Una vez establecido el modelo con las variables, se realiza la transformación de las mismas mediante el empleo del logaritmo, obteniendo los siguientes resultados:

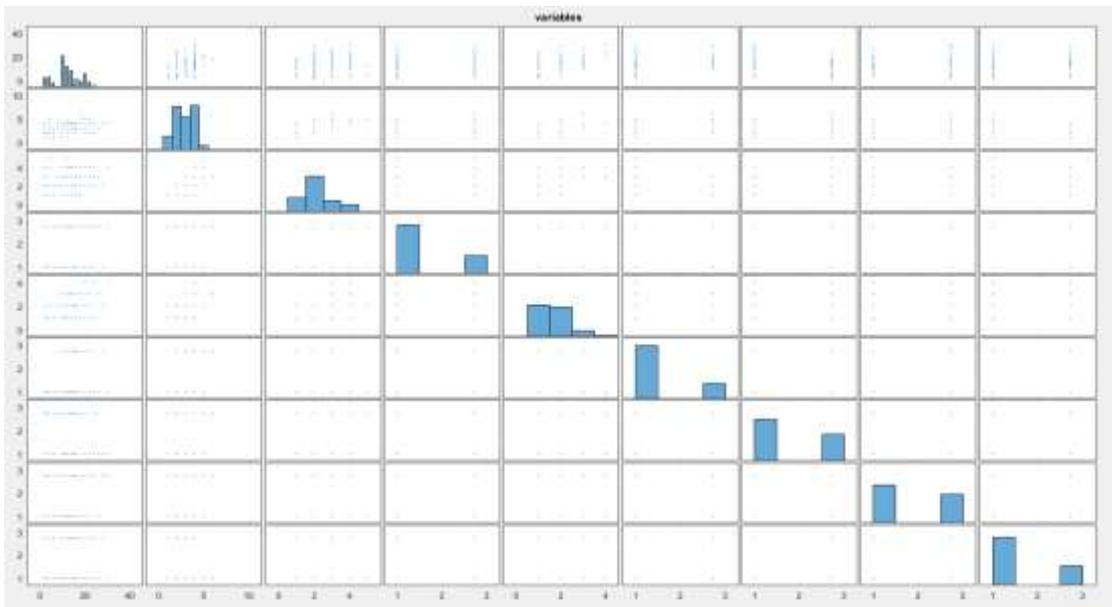


Figura 2-1. Valores de las variables sin transformar.

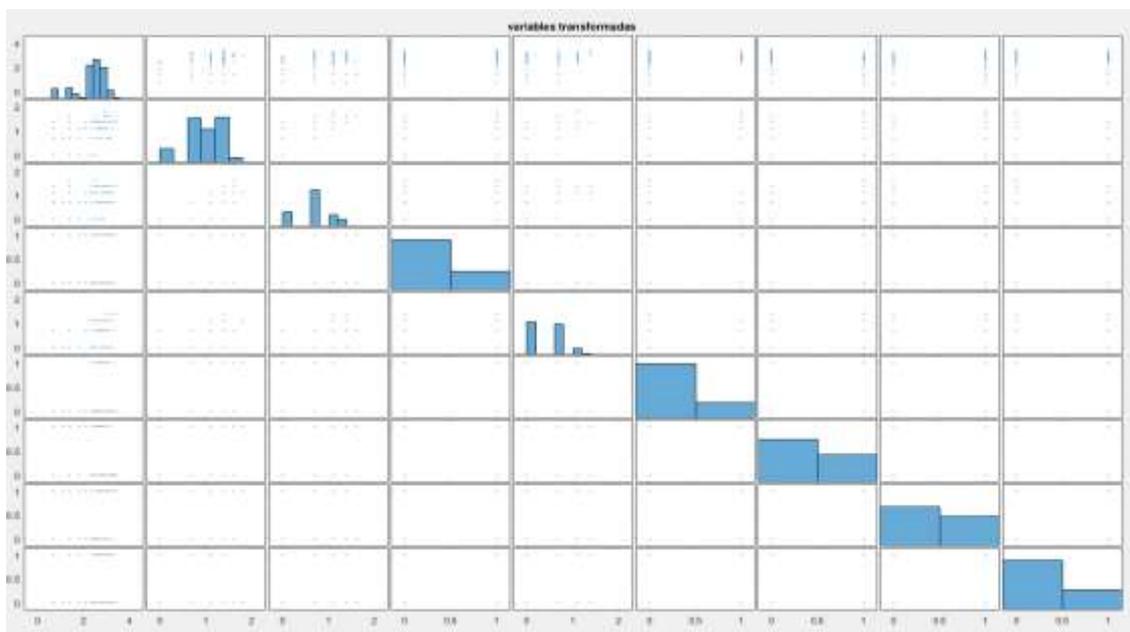


Figura 2-2. Valores de las variables transformadas.

Como se muestra en las Figura 2-1 y 2-2, no se evidencia una clara mejoría en la transformación de los datos, esto se debe a que todos los valores son números enteros positivos.

Para realizar un análisis en profundidad del modelo, se van a estudiar los parámetros los coeficientes estimados y los estadísticos más relevantes.

2.3.1 Coeficiente de correlación de Pearson ρ

En primer lugar, se han calculado los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables. El coeficiente de correlación de Pearson es un indicador de la relación lineal entre variables.

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde

$$\sigma_{XY} = \text{covarianza de } (X, Y)$$

$$\sigma_X = \text{desviación estandar de la variable } X$$

$$\sigma_Y = \text{desviación estandar de la variable } Y$$

Los valores del coeficiente de correlación lineal varían entre $[-1 \leq \rho \leq 1]$ siendo para $\rho = 1$ una relación lineal directa y para $\rho = -1$ una relación lineal inversa. Se obtienen los siguientes valores para las variables transformadas.

Matriz de correlación de las variables transformadas:
los elementos son los coeficientes de correlación entre ellas

1.0000	0.4172	0.2641	0.0651	0.4593	0.3539	-0.4902	0.1144	0.1936
0.4172	1.0000	0.6361	0.1530	0.5014	0.4213	-0.0748	0.0932	0.1292
0.2641	0.6361	1.0000	0.2970	0.6250	-0.0930	-0.0181	-0.0613	0.0296
0.0651	0.1530	0.2970	1.0000	0.2302	-0.1086	-0.0601	-0.1245	-0.0130
0.4593	0.5014	0.6250	0.2302	1.0000	0.1091	-0.0937	0.0592	0.1868
0.3539	0.4213	-0.0930	-0.1086	0.1091	1.0000	-0.2492	0.1544	0.0929
-0.4902	-0.0748	-0.0181	-0.0601	-0.0937	-0.2492	1.0000	-0.0602	-0.1239
0.1144	0.0932	-0.0613	-0.1245	0.0592	0.1544	-0.0602	1.0000	0.0927
0.1936	0.1292	0.0296	-0.0130	0.1868	0.0929	-0.1239	0.0927	1.0000

Figura 2-3. Matriz de correlación de las variables transformadas.

Siendo el orden de las filas y las columnas coincidente con el orden de las variables anteriormente mencionadas.

De estas correlaciones, la que tiene una correlación lineal directa más significativa es la que relaciona las variables X_2 y X_3 , ($\rho = 0,6361$), valor esperable ya que un hogar con más miembros suele conllevar más miembros con carnet de conducir. Del mismo modo, la variable X_3 y X_5 están correlacionadas de manera similar ($\rho = 0,6250$), como era de esperar, ya que un gran número de miembros del hogar con carnet de conducir generalmente va ligado a un mayor número de vehículos en esos hogares.

La correlación lineal directa con la variable dependiente X_1 de mayor importancia se da con las variables X_2 , ($\rho = 0,4172$) X_5 ($\rho = 0,4593$) y X_6 ($\rho = 0,3539$) que corresponden respectivamente al número de miembros del hogar, al número de coches y a la variable 'Dummy' que representa los hogares con niños.

Tiene lógica, puesto que, aunque no podamos afirmar directamente que se produzca una relación estrechamente lineal, ya que los tres casos no son suficientemente cercanos a 1, (todos ellos son menores a 0,5) un hogar que tenga esas características suele generar mayor número de viajes.

La correlación lineal inversa más cercana a -1, se da para las variables X_1 y X_7 ($\rho = -0,4902$), este valor podría ser significativo, indica que a mayor número de jubilados en los hogares se realizan menos viajes en coche.

2.3.2 Coeficiente de determinación R^2

El coeficiente de determinación es un estadístico que determina la calidad del modelo para predecir los resultados y las variaciones que puede explicarse del mismo. El coeficiente de determinación para el caso general se establece como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_r^2}{\sigma^2} \quad (\text{Ec. 5})$$

Siendo:

$$\sigma_r^2 = \text{varianza residual}$$

$$\sigma^2 = \text{varianza de la variable dependiente}$$

Realizando la regresión con todas las variables se obtiene un valor del coeficiente de determinación de $R^2=0,47671$. El valor de este modelo, bastante alejado de 1, indica que el ajuste de este modelo no es el esperado.

2.3.3 Estimación de los coeficientes

Los coeficientes se calculan como las elasticidades utilizando la Ec.3. Obteniendo los siguientes resultados recogidos en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del ajuste con 8 variables.

	columna 1: coeficientes de la regresion	columna 2: desviación de los coeficientes	columna 3: valores del estadístico t (=coeficiente/desviacion = columna 1/columna2)	columna 4: valores p para medir si el coeficiente es significativo
Variable 1: X1 = nº de viajes totales (DEPENDIENTE)	2.0586	0.0910	22.6334	0.0000
Variable 2: X2 = nº de miembros del hogar	0.3211	0.1247	2.5759	0.0107
Variable 3: X3 = nº de personas con carnet de conducir	-0.1202	0.1319	-0.9110	0.3633
Variable 4: X4 = Si al menos hay una moto (DUMMY 1)	-0.0512	0.0760	-0.6738	0.5012
Variable 5: X5 = nº de coches por hogar	0.5454	0.1042	5.2319	0.0000
Variable 6: X6 = Si al menos hay un niño en el hogar (DUMMY 2)	0.1611	0.1038	1.5522	0.1221
Variable 7: X7 = Si al menos hay un jubilado (DUMMY 3)	-0.5437	0.0686	-7.9285	0.0000
Variable 8: X8 = Disponibilidad de aparcamiento (DUMMY 4)	0.0256	0.0664	0.3860	0.6999
Variable 9: X9 = Tipo de Residencia (DUMMY 5)	0.0562	0.0731	0.7695	0.4425

En este caso, tenemos algunos coeficientes significativos. En primer lugar, el coeficiente de mayor valor, sin contar con el coeficiente independiente, es para el número de coches por hogar, siendo $\beta_5=0,5454$, este valor indica que, para hogares con el resto de características iguales, se tendrá un mayor número de viajes realizados en coche para aquellos que tengan mayor número de vehículos.

Al igual que con el número de coches, para la variable X2: número de miembros del hogar, el coeficiente toma un valor de $\beta_2=0,3211$, que acorde con lo anterior presenta un valor esperado.

Otro valor significativo que podemos considerar es el coeficiente $\beta_7=-0,5437$ relativo a la variable ‘Dummy’ que categoriza los hogares en si en él hay al menos un jubilado. Este coeficiente refleja que, para hogares con jubilados, igualando el resto de variables, tenemos aproximadamente $e^{-0,5437} \approx 0,58$ que equivaldría a una diferencia de un 58% de viajes menos realizados por este tipo de hogares.

Junto a este coeficiente, tenemos otro coeficiente negativo esperable como es el caso para la variable ‘Dummy’ X4, ya que, para hogares con motos, es probable que el número de viajes en coche sea menor. ($\beta_4=-0,0512$).

Hay que destacar algunos valores sorprendentes o inesperados, como podría ser el coeficiente $\beta_3=-0,1202$, este valor negativo no representaría adecuadamente la realidad, ya que un incremento de miembros con carnet de conducir debería provocar un mayor número de desplazamientos en coche, por este sentido hay que ser cautos y estudiar los modelos con una variable.

Los últimos coeficientes a analizar son los coeficientes para las variables ‘Dummy’ X6, X8 y X9, estas variables toman valores positivos cercanos a 0, luego a priori, nuestro modelo estima un mayor número de viajes para hogares con al menos un niño, en zonas de baja densidad y con aparcamiento privado.

2.3.4 P-value de los coeficientes y valor del estadístico t

El estadístico t es una cantidad que se obtiene con, y exclusivamente, los datos de las muestras. Representa el grado de relación de la variable explicativa. Cuando es próximo a 0, se puede prescindir de esa variable. Los grados de libertad de este estadístico se definen como:

$$g.d.l.t = n^{\circ} \text{ de muestras} - n^{\circ} \text{ de variables utilizadas}$$

(Ec. 6)

En nuestro caso, teníamos 223 muestras, de las cuales tuvimos que eliminar una de ellas por tener el número total de viajes = 0, por lo tanto, aplicando la Ec. 6, el grado de libertad del estadístico t es

$$g. d. l. t = (223 - 1) - 9 = 213$$

El estadístico conocido como p-value está relacionado con el estadístico t, en concreto es el valor del área de las colas de la distribución de Student. En estadística se define como la probabilidad de que un valor estadístico calculado sea posible dada una hipótesis nula cierta, es decir, permite diferenciar resultados que son productos de la aleatoriedad de la muestra y resultados estadísticamente significativos.

En general, a menor valor de p, más significativo son los coeficientes del modelo y, por tanto, la variable explicativa asociada. Un valor límite usual se establece para $p < 0,05$.

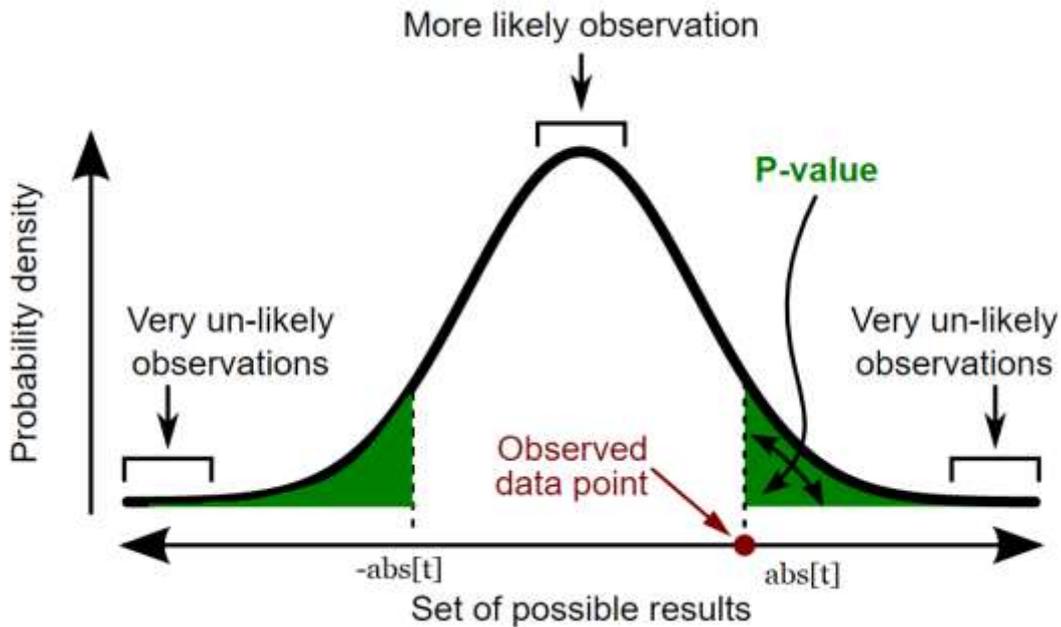


Figura 2-4. Descripción gráfica del p-value.

Como se observa en la Tabla 6, los valores de p significativos ($p < 0,05$) se dan para los coeficientes de las variables X_2 (número de miembros por hogar), X_5 (número de coches por hogar) y X_7 ('dummy' para hogares con al menos un jubilado)

Sin embargo, el resto de variables tienen valores p por encima del umbral establecido, además el estadístico t, tiene valores lo suficientemente cercanos a 0 en las variables X_3 , X_4 , X_8 y X_9 para que podamos descartarlas en este modelo.

2.3.5 Análisis del modelo con una variable

Para el análisis de los modelos de una variable hemos utilizado la misma herramienta y el mismo código de MATLAB.

Los resultados de cada uno de los modelos independientes se han recogido en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados para modelos de una variable.

Variable 2: X2 = n° de miembros del hogar	1.7465	0.0973	17.9478	0.0000	0.6209	0.0912	6.8086	0.0000	0.1740	0.0000	
Variable 3: X3 = n° de personas con carnet de conducir	2.0734	0.0804	25.7924	0.0000	0.4011	0.0987	4.0622	0.0001	0.0698	0.0001	
Variable 4: X4 = Si al menos hay una moto (DUMMY 1)	2.3266	0.0508	45.8088	0.0000	0.0937	0.0969	0.9673	0.3345	0.0042	0.3345	
Variable 5: X5 = n° de coches por hogar	2.0527	0.0548	37.4261	0.0000	0.7154	0.0533	7.6690	0.0000	0.2109	0.0000	
Variable 6: X6 = Si al menos hay un niño en el hogar (DUMMY 2)	2.2312	0.0459	48.5972	0.0000	0.5486	0.0977	5.6122	0.0000	0.1262	0.0000	
Variable 7: X7 = Si al menos hay un jubilado (DUMMY 3)	2.6053	0.0484	53.7789	0.0000	-0.6456	0.0774	-8.3429	0.0000	0.2403	0.0000	
Variable 8: X8 = Disponibilidad de aparcamiento (DUMMY 4)	2.2887	0.0569	40.2022	0.0000	0.1487	0.0870	1.7085	0.0890	0.0131	0.0890	
Variable 9: X9 = Tipo de Residencia (DUMMY 5)	2.2731	0.0504	45.0964	0.0000	0.2748	0.0939	2.9277	0.0038	0.0375	0.0038	
columna 1: término independiente de la regresión (beta_0)						columna 6: desviación de los coeficientes					
columna 2: desviación de los términos independientes						columna 7: valores del estadístico t (=coeficiente/desviación = columna 5/columna 6)					
columna 3: valores del estadístico t (=beta_0/desviación = columna 1/columna 2)						columna 8: valores p para medir si el coeficiente es significativo					
columna 4: valores p para medir si el término independiente es significativo						columna 9: valores de R2					
columna 5: coeficientes de la regresión (beta_i)						columna 10: valores p de R2					

Como se observa, en el caso de los coeficientes estimados, se reflejan mejor la realidad de estas variables explicativas. Como es el caso del coeficiente relativo a la variable explicativa X_3 : número de miembros del hogar con carnet de conducir. Esta variable en el modelo individual pasa a ser de $0,4011$, valor esperado, mientras que en el modelo junto al resto de variables salía negativo y de valor $-0,1202$

El coeficiente para variable ‘Dummy’ relativa a los hogares con niños aumenta notablemente, tiene sentido ya que hogares con niños suelen realizar más viajes en coche a igualdad del resto de variables que un hogar sin ellos.

El resto de coeficientes varían, pero manteniendo valores esperados de lo calculado en el modelo con todas las variables, exceptuando el coeficiente $\beta_4 = 0,0937$, que también pasa a ser positivo, sin embargo, la desviación es del orden del valor del coeficiente, luego este valor no debe asumirse como la elasticidad de la variable. Los coeficientes comparados en ambos modelos se recogen en la Tabla 8.

Tabla 8. Comparación de los coeficientes para los distintos modelos.

	β Modelo 8 variables	β Modelo 1 variable
Variable 2: X2 = n° de miembros por hogar	0.3211	0.6209
Variable 3: X3 = n° de personas con carnet de conducir	-0.1202	0.4011
Variable 4: X4 = Si al menos hay una moto (DUMMY 1)	-0.0512	0.0937
Variable 5: X5 = n° de coches por hogar	0.5454	0.7154
Variable 6: X6 = Si al menos hay un niño en el hogar (DUMMY 2)	0.1611	0.5486
Variable 7: X7 = Si al menos hay un jubilado (DUMMY 3)	-0.5437	-0.6456
Variable 8: X8 = Disponibilidad de aparcamiento (DUMMY 4)	0.0256	0.1487
Variable 9: X9 = Tipo de Residencia (DUMMY 5)	0.0562	0.2748

Los p-value de los coeficientes, observados en la columna 8 de la Tabla 7 reflejan que todos ellos son significativos excepto para el caso de la variable X_4 (‘Dummy’ de motos en los hogares) y la variable X_8 (‘Dummy’ para hogares con aparcamiento privado), como pasaba en el modelo de 8 variables. Por lo tanto, se puede prescindir de manera definitiva de estas variables para el ajuste del modelo.

Utilizar estos modelos de una variable provocan que el ajuste pierda calidad, ninguno de los modelos de una variable supera un valor de $R^2=0,25$, mientras que para el caso del modelo con las 8 variables se obtenía un $R^2=0,47671$.

2.3.6 Conclusiones

La primera conclusión que se deduce es que el ajuste del modelo elegido no se adapta bien a la naturaleza de los datos. Esto se debe principalmente a que la variable dependiente contiene números enteros positivos de pequeños valores, al igual que las variables explicativas más significativas como el número de miembros del hogar o el número de coches por hogar.

Las variables más representativas se encuentran en las variables, X_2 : número de miembros del hogar, X_5 : número

de coches por hogar y X_7 : 'Dummy' de jubilados en el hogar. Las dos primeras con coeficientes positivos ya que hogares con más miembros, al igual que hogares con un mayor número de coches, realizan un mayor número de viajes, a igualdad del resto de variables.

Sin embargo, la variable X_7 tiene una elasticidad negativa acorde a la realidad, ya que los jubilados suelen tener un menor número de viajes, como hemos observado en los estudios previos, debido a que no realizan una actividad ocupacional y/o realizan viajes en otros medios de transporte por los que se ven beneficiados como es el caso de los bonos de transporte en el transporte público.

Hay que valorar la presencia de hogares con al menos un niño en el hogar, ya que estos realizan más desplazamientos según nuestro modelo y las muestras recogidas.

Debido a la conclusión inicial presentada, lo ideal es realizar un modelo lineal generalizado (GLM) que mejore el ajuste realizado.

2.4 Ajuste de un modelo lineal generalizado (GLM)

2.4.1 Introducción a los modelos generalizados. Elección del modelo.

Los modelos lineales generalizados (GLM) se consideran una extensión de los modelos lineales (LM) clásicos. Estos modelos son herramientas que permiten compilar todas las situaciones de análisis dentro de una misma formulación. Estos modelos tienen la siguiente estructura:

$$Y = f(x) + g(\varepsilon)$$

(Ec. 7)

Donde:

$f(x)$ = función del conjunto de variables explicativas

$g(\varepsilon)$ = función que representa el efecto de la aleatoriedad

Bajo la Ec.7 aparecen una gran cantidad de modelos, entre ellos se recogen resumidos en la Tabla 9:

Tabla 9. Principales Modelos lineales.

Naturaleza de la Variable de Respuesta	Componente		Función de enlace	Modelo Lineal	
	Sistemático	Aleatorio			
▪ Numérica cuantitativa	· Numérico	· Normal	· Identidad	- Regresión lineal	ML
	· Categórico	· Normal	· Identidad	- ANOVA o de diseño experimental	
	· Mixto	· Normal	· Identidad	- ANCOVA o de diseño experimental con variables concomitantes	
▪ Categórica binaria	· Mixto	· Binomial (1)	· Logit	- Regresión logística	MLG
		- Bernoulli-			
- Agrupada (frecuencias)	· Categórico	· Binomial (n)	· Logit · Probit	- Análisis logit - Regresión probit	
▪ Categórica politémica	· Mixto	· Multinomial	· Logit generalizado	- Regresión logística multinomial	MLG
		· Multinomial			
▪ Recuento	· Mixto	· Poisson	· Logarítmica	- Regresión de Poisson	
▪ Frecuencia	· Categórico	· Poisson	· Logarítmica	- Análisis loglineal	

Los modelos lineales generalizados (GLM), por tanto, son casos particulares de estos modelos lineales. La comparación entre ambos modelos se puede observar en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparativa entre Modelo Lineal y Modelo Lineal Generalizado.

Modelo Lineal (ML)	Modelo Lineal Generalizado (MLG)
$y_i = \sum_j \beta_j X_{ij} + \varepsilon_i$	$y_i = \sum_j \beta_j X_{ij} + \varepsilon_i$
$\mu_i = E(Y_i)$	$\mu_i = E(Y_i)$
$\eta_i = \sum_j \beta_j X_{ij}$	$\eta_i = \sum_j \beta_j X_{ij}$
$\eta_i = \mu_i$	$\eta_i = g(\mu_i)$
y_i : vector de la variable respuesta,	
X_{ij} : matriz de variables predictoras y covariables	
β_j : vector de parámetros	
η_i : vector del predictor lineal	

Como puede verse, la fórmula del modelo en ambos casos es la misma, siendo los valores ajustados $\mu_i = E(Y_i)$. El vector de predicción lineal también coincide, sin embargo, se encuentran diferencias a través de una función, conocida como función de enlace ('link') y en la distribución que esta debe seguir.

Mientras que en el modelo lineal se establece una relación de igualdad entre los valores ajustados y el vector de predicción lineal, en los modelos lineales generalizados esta relación se establece mediante el empleo de una función de enlace.

Además, sabemos que en los modelos lineales el componente aleatorio debe distribuirse de manera normal, según sea la distribución de los errores así serán las distribuciones condicionadas de los valores pronosticados, en consecuencia, también serán normales. Esta relación, se refleja mediante la matriz de 'hat'.

Sin embargo, en los modelos lineales generalizados puede ocurrir que el componente aleatorio no siga necesariamente una distribución normal, sino que emplea cualquier distribución de la familia exponencial, y, por tanto, las distribuciones de los valores pronosticados no serán necesariamente normales.

Hay que destacar que las distribuciones condicionadas de los valores pronosticados en el modelo lineal clásico deben ser homoscedásticas, es decir que la varianza del error condicional de las variables explicativas es constante a lo largo de las observaciones. Como en los modelos lineales generalizados se puede elegir cualquier distribución, siempre que sea de la familia exponencial, esta cualidad no es de necesario cumplimiento.

Para el caso a analizar, y apoyándose en la Tabla 9, se decide escoger una función de enlace logarítmica y una distribución de Poisson, ya que la variable dependiente toma valores de "recuento", es decir valores enteros positivos (0,1, 2, ...).

2.4.2 Regresión de Poisson (GLM)

Sea Y una variable aleatoria discreta, se dice que Y sigue una distribución de Poisson con parámetro λ (media) si su función de probabilidad viene dada por:

$$f(y) = P(Y = y) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^y}{y!} \tag{Ec. 8}$$

Donde:

y =número de veces que se produce el evento, siendo un número entero positivo: 0,1,2,3...

λ =parámetro positivo que representa el número de veces que se espera que se produzca dicho evento en un intervalo de tiempo determinado, en este caso, coincide con la media explicada en términos de las variables explicativas mediante el empleo de la función de enlace o función de 'link'.

Por tanto, una de las principales propiedades de esta distribución es que la media y la varianza son iguales, es decir:

$$E(Y) = \lambda = Var(Y) \quad (Ec. 9)$$

Sin embargo, cuando trabajamos con recuentos reales, esta hipótesis no suele ser cierta, de hecho, la varianza suele ser mayor que la media, los valores calculados para la muestra confirman esta realidad ya que:

$$E(Y) \cong 12,2780 \quad Var(Y) \cong 34,5620$$

A este fenómeno se le conoce como sobredispersión. En nuestro caso esta sobredispersión se debe al carácter heterogéneo de las muestras, ya que cada hogar tiene características distintas.

Como se ha definido anteriormente, Y toma valores $(0, +\infty)$ realizamos la regresión mediante un modelo para:

$$\lambda(x) = E(Y|X = x) \quad (Ec. 10)$$

Es decir, para la media de Y condicionada a cada valor de las variables explicativas. Como Y nunca toma valores negativos, no conviene utilizar un modelo lineal directo y, por tanto, se requerirá una función de enlace, esta función como se ha indicado anteriormente permite relacionar la variable dependiente con sus variables explicativas transformando el rango de probabilidades a una escala continua, la función idónea para este caso, y como observamos además en la Tabla 9, es la función logarítmica. El modelo se define bajo la siguiente estructura:

$$g(\lambda(x, \beta)) = x^T \beta \quad (Ec. 11)$$

Tomando logaritmo

$$g(r) = \log(r), \quad r \in (0, +\infty) \quad (Ec. 12)$$

Se tiene:

$$\log(\lambda) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i \quad (Ec. 13)$$

Donde X_i representa las diferentes variables explicativas y β_i representa los coeficientes asociados a dichas variables.

La estimación de los coeficientes se realiza mediante el método de máxima verosimilitud, en lugar del modelo clásico de mínimos cuadrados empleados en los modelos lineales. La verosimilitud para este modelo se define como:

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^n [e^{-\lambda(x_i, \beta)} \frac{\lambda(x_i, \beta)^{y_i}}{y_i!}] \quad (Ec. 14)$$

Siendo su logaritmo en términos dependientes de β , como:

$$l(\beta) = \sum_{i=1}^n (y_i X_i \beta_i - e^{X_i \beta_i}) \quad (\text{Ec. 15})$$

Derivando dicha ecuación e igualando a cero, se obtienen las ecuaciones de verosimilitud:

$$\frac{\partial \log L(\beta)}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^n X_i [y_i - \lambda(x_i, \beta)] = 0 \quad (\text{Ec. 16})$$

Para poder analizar el modelo de regresión, hay que definir el parámetro deviance. La deviance es un indicador que mide la bondad del ajuste, parte de la base de realizar la suma de cuadrados de los residuos en mínimos cuadrados para casos en los que se ajusta mediante el método de máxima verosimilitud. En este modelo se define como:

$$D(y, \hat{u}) = 2 \cdot [\log(p(y|\hat{\theta}_s)) - \log(p(y|\hat{\theta}_0))] \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

El primer logaritmo corresponde a la desviación unitaria del modelo saturado y el segundo al del modelo nulo. El modelo saturado es aquel que los valores predichos coinciden con los valores observados, mientras que el modelo nulo es el que no utiliza ninguna variable explicativa.

Este valor de la deviance permite calcular el coeficiente de determinación R^2 para conocer la calidad del ajuste del modelo, a través de:

$$R^2 = 1 - \frac{\text{deviance}}{\text{deviance}_0} \quad (\text{Ec. 18})$$

Siendo la deviance_0 para el modelo nulo. Aplicando esta ecuación, se obtiene un valor de $R^2 = 0,53846$, que mejora el valor obtenido en el ajuste de elasticidades constantes.

Aplicando este modelo a los datos se obtiene el siguiente ajuste de los coeficientes recogido en la Tabla 11.

Tabla 11. Coeficientes estimados y p-values para el GLM.

	β	P-value
Coeficiente independiente	1.9180	0.0000
Variable 2: X2 = nº de miembros del hogar	0.0917	0.0039
Variable 3: X3 = nº de personas con carnet de conducir	-0.0424	0.2731
Variable 4: X4 = Si al menos hay una moto (DUMMY 1)	-0.0204	0.6479
Variable 5: X5 = nº de coches por hogar	0.2857	0.0000
Variable 6: X6 = Si al menos hay un niño en el hogar (DUMMY 2)	0.1663	0.0091
Variable 7: X7 = Si al menos hay un jubilado (DUMMY 3)	-0.4259	0.0000
Variable 8: X8 = Disponibilidad de aparcamiento (DUMMY 4)	0.0266	0.5038
Variable 9: X9 = Tipo de Residencia (DUMMY 5)	0.0137	0.7456

De los resultados se puede observar que las variables con los coeficientes de mayor valor absoluto son X_5 (número de coches por hogar), X_6 ('dummy' hogares con al menos un niño) y X_7 ('dummy' hogares con al menos un jubilado). Los dos primeros coeficientes son positivos, ($\beta_5 = 0,2857$ y $\beta_6 = 0,1663$) y se ajusta adecuadamente a la realidad, ya que las muestras que presentan más vehículos y que al menos tienen un niño

por hogar realizaban un mayor número de viajes.

El valor de la variable X_7 es negativo, ($\beta_7 = -0,4259$) que coincide con lo esperado y lo analizado en el modelo anterior, ya que el individuo jubilado suele realizar menos viajes, y muchos de ellos en otros medios de transporte.

Por último, destacar algunos coeficientes que en el anterior modelo no reflejaban la naturaleza de las muestras, como es el caso del coeficiente de la variable explicativa X_4 ('Dummy' que categoriza los hogares con motos). Vemos que para hogares que tienen al menos uno de estos vehículos privados (generalmente relacionadas con desplazamientos ocupacionales: motivo trabajo) el número de viajes en coche disminuye, teniendo un coeficiente negativo, aunque de valor pequeño ($\beta_9 = -0,0204$).

Otro coeficiente a destacar, es el valor estimado para la variable X_3 , que es negativo, ($\beta_3 = -0,0424$) cuando a priori un mayor número de miembros con carnet de conducir, debería provocar un mayor número de viajes en coche.

En cuanto al p-value de los coeficientes, para ver si podemos tener en cuenta dichas variables, las variables que han resultado ser significativas para este modelo ($p < 0,05$) son:

X_2 : número de miembros del hogar

X_5 : número de coches por hogar

X_6 : 'dummy' para hogares con al menos 1 niño

X_7 : 'dummy' para hogares con al menos 1 jubilado

2.4.3 Comparación de los modelos

En este apartado se recogen los resultados de ambos modelos a modo de comparación de los mismos.

Tabla 12. Comparación de los modelos utilizados.

	Modelo de Elasticidades Constantes		Modelo Lineal Generalizado de Poisson	
	Coefficientes (β)	P-value ($p < 0,05$)	Coefficientes (β)	P-value ($p < 0,05$)
Variable dependiente X_1 : nº de viajes por hogar	2,0586	0,0000	1,918	0,0000
Variable explicativa X_2 : nº de miembros por hogar	0,3211	0,0107	0,0917	0,0039
Variable explicativa X_3 : nº de miembros con carnet	-0,1202	0,3633	-0,0424	0,2731
Variable explicativa X_4 : DUMMY 'Motos'	-0,0512	0,5012	-0,0204	0,6479
Variable explicativa X_5 : nº de coches por hogar	0,5454	0,0000	0,2857	0,0000
Variable explicativa X_6 : DUMMY 'Niños'	0,1611	0,1221	0,1663	0,0091
Variable explicativa X_7 : DUMMY 'Jubilados'	-0,5437	0,0000	-0,4259	0,0000
Variable explicativa X_8 : DUMMY 'Aparcamiento'	0,0256	0,6999	0,0266	0,5038
Variable explicativa X_9 : DUMMY 'Zona residencial'	0,0562	0,4425	0,0137	0,7456
	Coeficiente de Determinación R^2		Coeficiente de Determinación R^2	
	0,47671		0,53846	

Como se recoge en la Tabla 12, en el modelo de Poisson utilizado se obtiene una variable explicativa significativa más que en el modelo de elasticidades constantes. En concreto, la variable X_6 referente a los hogares con al menos un niño en el hogar.

Los coeficientes de las variables significativas tienen el mismo signo para ambos modelos, y valores relativamente próximos, siendo el que tiene mayor diferencia el coeficiente de la variable X_2 : número de miembros del hogar. En cualquier caso, todos los coeficientes obtienen menores valores en el modelo lineal generalizado de Poisson.

Es interesante ver que el coeficiente para la variable X_6 : 'Dummy' referente a los hogares con al menos un niño, a pesar de no ser significativa para el modelo de elasticidades constantes ($p\text{-value} = 0,1221$) tiene un coeficiente similar para el modelo lineal generalizado de Poisson.

Como dijimos anteriormente y acorde a lo que se refleja en la Tabla 12, se obtiene un mejor ajuste, mayor valor del coeficiente de determinación R^2 para el caso del GLM de Poisson, con $R^2 = 0,53846$.

Los valores predichos frente a los valores reales para el modelo de elasticidades constantes se pueden visualizar en la Figura 2-5, y los valores predichos frente a los viajes reales de las muestras por el modelo lineal

generalizado de Poisson se recogen en la Figura 2-6.

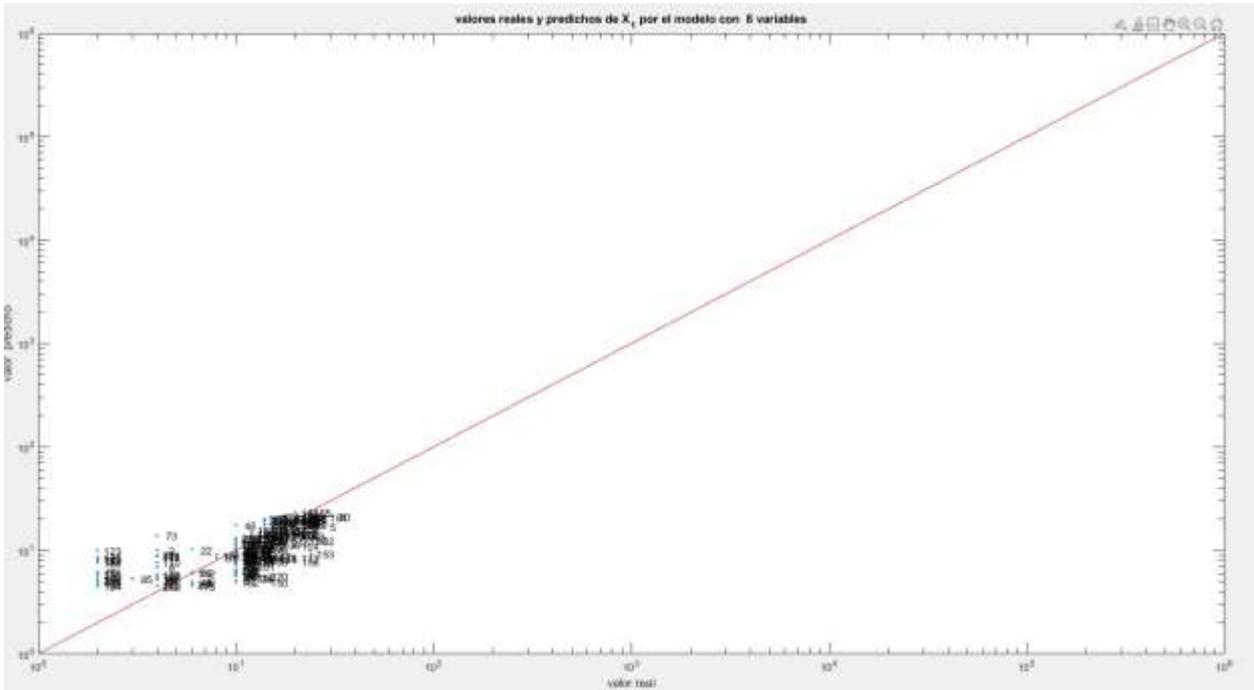


Figura 2-5. Valores predichos frente a valores reales por el Modelo de Elasticidades Constantes.

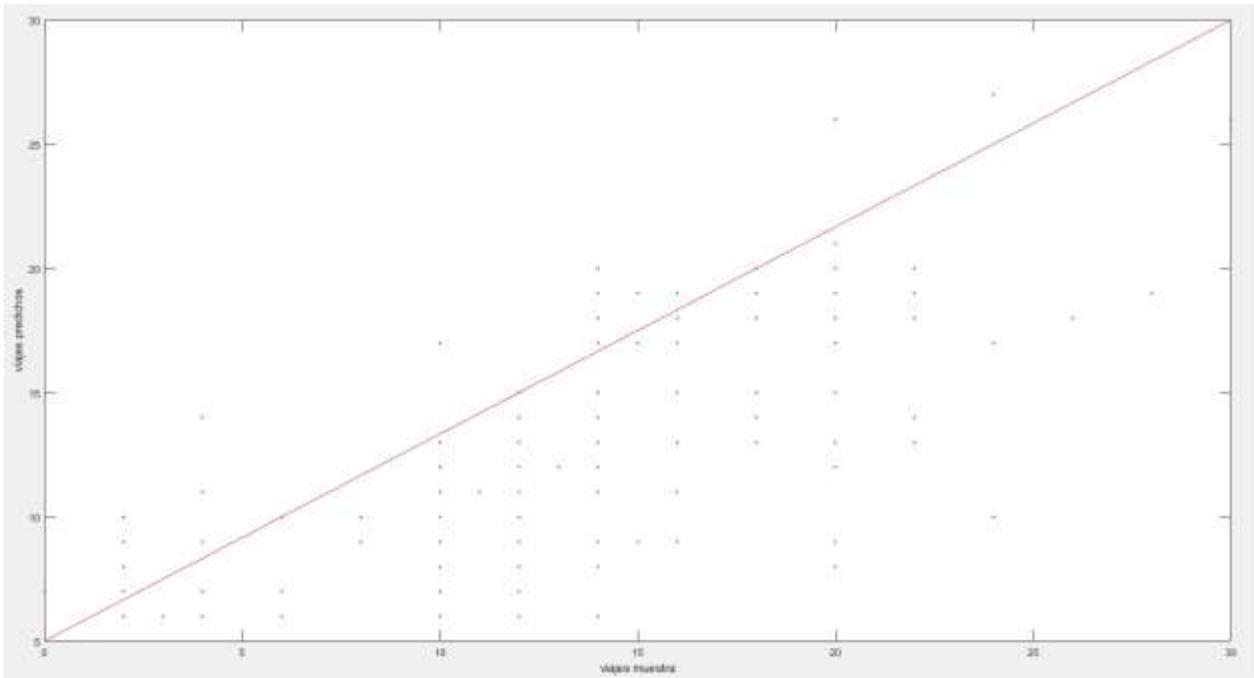


Figura 2-6. Valores predichos frente a valores reales por el GLM de Poisson.

Analizando ambas ilustraciones, podemos observar un comportamiento similar en ambos modelos. Más de la mitad de los valores predichos se encuentran subestimados para ambos modelos.

Hay que destacar que para el modelo de Poisson, generalmente se utiliza el valor de la media para calcular los valores predichos, sin embargo, debido a la naturaleza de los datos, valores enteros positivos $\{0,1,2,\dots\}$, el valor de la media puede no ser representativo ya que podría tomar valores decimales, por ello se ha utilizado la moda de la muestra como parámetro para reflejar dichos datos.

2.5 Conclusiones

Las conclusiones que se obtienen de este análisis es que los resultados no son los esperados. Existen algunas variables que, a priori, podrían ser significativas, sin embargo, los estudios realizados niegan esta hipótesis. Es el caso de las variables:

X_3 : número de miembros con carnet de conducir en el hogar

X_4 : 'dummy' para hogares con al menos 1 moto

X_8 : 'dummy' para hogares con aparcamiento privado

X_9 : 'dummy' para la zona de residencia

Para las variables X_8 y X_9 , puede que la razón se debe a la naturaleza de los desplazamientos, ya que la mayoría de los viajes que se realizan en coche son motivo ocupacional, de acuerdo a lo visto con otros estudios y estos viajes suelen ser muy rígidos.

En consecuencia, las variables más significativas se dan para:

X_2 : número de miembros del hogar

X_5 : número de coches por hogar

X_6 : 'dummy' para hogares con al menos 1 niño

X_7 : 'dummy' para hogares con al menos 1 jubilado

Siendo la variable X_7 la única variable significativa que tiene coeficiente negativo, es decir, a mayor número de jubilados menor número de desplazamientos en coche a igualdad del resto de variables.

Los coeficientes β tiene valores comprendidos entre $[-0.75, 0.75]$, valores típicos en estudios sobre el transporte y confirma que estos desplazamientos no son muy elásticos a las variables de estudio que se han realizado en este trabajo.

Por lo tanto, a pesar de que el modelo no tiene un valor del coeficiente de determinación muy elevado, podemos considerar aceptables el valor de los coeficientes de las variables explicativas significativas.

3 EL IMPACTO DEL COVID-19

3.1 Contexto y situación del transporte durante la pandemia

A pesar de las conclusiones a las que se han llegado tras el ajuste del modelo, debemos tener en cuenta el impacto que ha provocado la pandemia del Covid-19 en el transporte urbano. Los datos con los que se elaboraron el modelo se produjeron antes de que se conociera la llegada del virus a España.

Desde la declaración del Estado de Alarma el 15 de marzo de 2020, el transporte público y privado se ha visto afectado por diferentes medidas restrictivas.

En cuanto al transporte público, la primera semana de Estado de Alarma, fue competencia de las comunidades autónomas decidir el porcentaje de reducción de los servicios de transporte, así como el aforo máximo permitido de los mismos, siendo al menos la reducción del 50%.

Es mediante la Orden TMA/273/2020, de 23 de marzo, por la que se dictan instrucciones a nivel nacional sobre reducción de los servicios de transporte de viajeros:

- Reducción del porcentaje de servicios de transporte de viajeros no sometidos a contrato público u obligaciones de servicio público. Los operadores de transporte reducirán la oferta total de operaciones en, al menos, un 70%.

Los servicios de transporte público de viajeros por carretera, ferroviarios, aéreo y marítimo de competencia estatal que están sometidos a contrato público u OSP reducirán su oferta total de operaciones en, al menos, los siguientes porcentajes:

- Servicios ferroviarios de media distancia: 70%.
- Servicios ferroviarios de media distancia-AVANT: 70%.
- Servicios regulares de transporte de viajeros por carretera: 70%.
- Servicios de transporte aéreo sometidos a OSP: 70%.
- Servicios de transporte marítimo sometidos a contrato de navegación: 70%.
- Servicios ferroviarios de cercanías: 20%, en horas punta, y 50%, en horas valle.

Estas restricciones que han perdurado durante todo el estado de alarma han supuesto grandes cambios en el modo de viajar de los usuarios. Durante la fase de desescalada se fueron levantando las medidas de restricción hasta la llegada de la ‘Nueva Normalidad’ donde los medios de transporte público recuperaron la totalidad de sus servicios y aforo. Sin embargo, siguen vigentes las medidas de distanciamiento social y el uso de la mascarilla.

En cuanto al vehículo privado, durante el estado de alarma se permitió viajar con un máximo de un acompañante, separados, cumpliendo la distancia de 1,5 metros y siempre haciendo uso de la mascarilla. Estas restricciones se fueron adaptando hasta que con la ‘Nueva Normalidad’ se permitió la ocupación total de las plazas mediante el Real Decreto 21/2020 del 9 de junio, haciendo uso de la mascarilla siempre que los ocupantes no fueran convivientes.

Otro punto a destacar es que esta situación de pandemia ha provocado que la mayoría de las empresas se hayan transformado para seguir funcionando mediante el teletrabajo. Aunque con la ‘Nueva Normalidad’ muchas empresas han vuelto a realizar su actividad de manera presencial, el teletrabajo se ha instaurado de forma permanente en otras muchas, produciendo una reducción de los desplazamientos por motivo trabajo.

3.2 Estudios y encuestas realizadas

Aunque han pasado pocos meses desde el inicio de la pandemia y muchos de los resultados aún tienen que publicarse, ya existen algunos estudios y encuestas realizados sobre el impacto del Covid-19 en la movilidad.

Una de ellas es la encuesta “Hábitos y uso del transporte durante el confinamiento” publicada por El Observatorio RACE de Conductores.

Se trata de una encuesta cuantitativa sobre el efecto del Covid-19, la muestra consta de 1.187 entrevistas realizadas entre el 16 y el 19 de abril. Una de las claves de este estudio podemos encontrarla en el uso del coche para desplazamientos que normalmente se realizarían en otro medio de transporte. Así, encontramos, según la Figura 3-1, que el 9,2% de los encuestados han cambiado su modo de transporte habitual por el coche por miedo al Covid-19. Del mismo modo, sólo el 3% de los encuestados han utilizado el transporte público durante la pandemia.

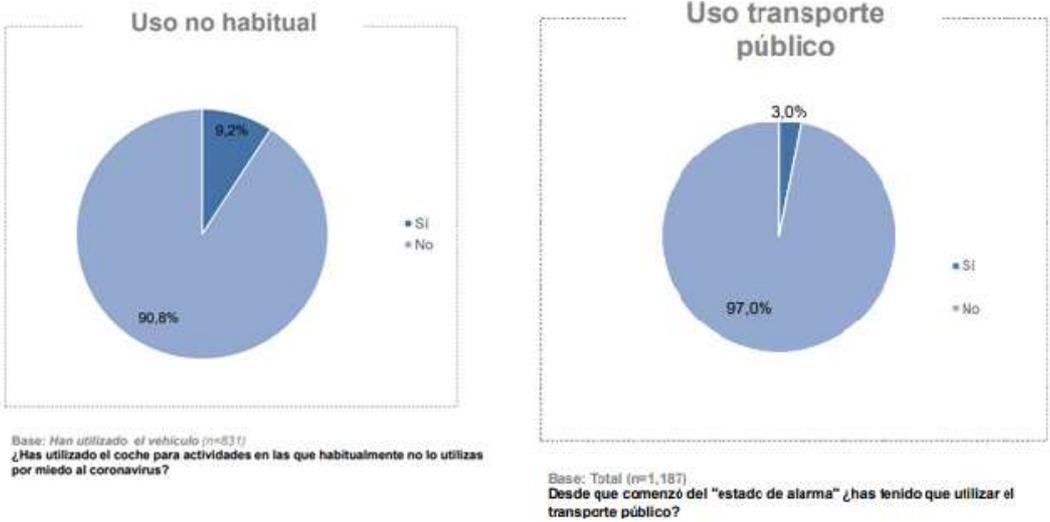


Figura 3-1. Resultados de la encuesta de RACE.

Además, como se observa en la Figura 3-2, los desplazamientos por motivo trabajo también se ven afectados, un 19,8 % de los encuestados que utilizaban el transporte público para desplazarse hasta el lugar de trabajo cambiarán su modo de transporte por uno privado, así como el 25,6 % de los individuos que realizaban este mismo desplazamiento a pie. Obteniéndose así un aumento del vehículo privado del 83,2% al 86,8% debido a la influencia del virus.



Figura 3-2. Resultados de la encuesta de RACE.

Otro de los estudios ya publicados es el “Estudio sobre la evolución de la movilidad española” de Invertia. Este estudio consta de siete entregas distintas que analizan el uso del coche y el transporte público entre el 27 de abril y el 22 de junio en todas las provincias y en 10 ciudades españolas (Madrid, Barcelona, Valencia, Zaragoza, Málaga, Sevilla, Palma de Mallorca, Bilbao, Las Palmas de Gran Canaria y Vigo) tras el confinamiento. En su

realización se han combinado datos de las plataformas de movilidad de Apple, Google, Moovit, junto con la información del Ministerio Transportes, Movilidad y Agenda Urbana y la de la DGT.

En este estudio se concluye que el uso del coche supera el 86% de media entre las ciudades analizadas mientras que metro, autobuses urbanos o cercanías llegan al 52%. La imposición del vehículo particular aún queda más clara si se analiza la movilidad provincial donde la recuperación de su uso llega al 92%. Se puede observar dicha comparación entre medios de transporte en la Figura 3-3.

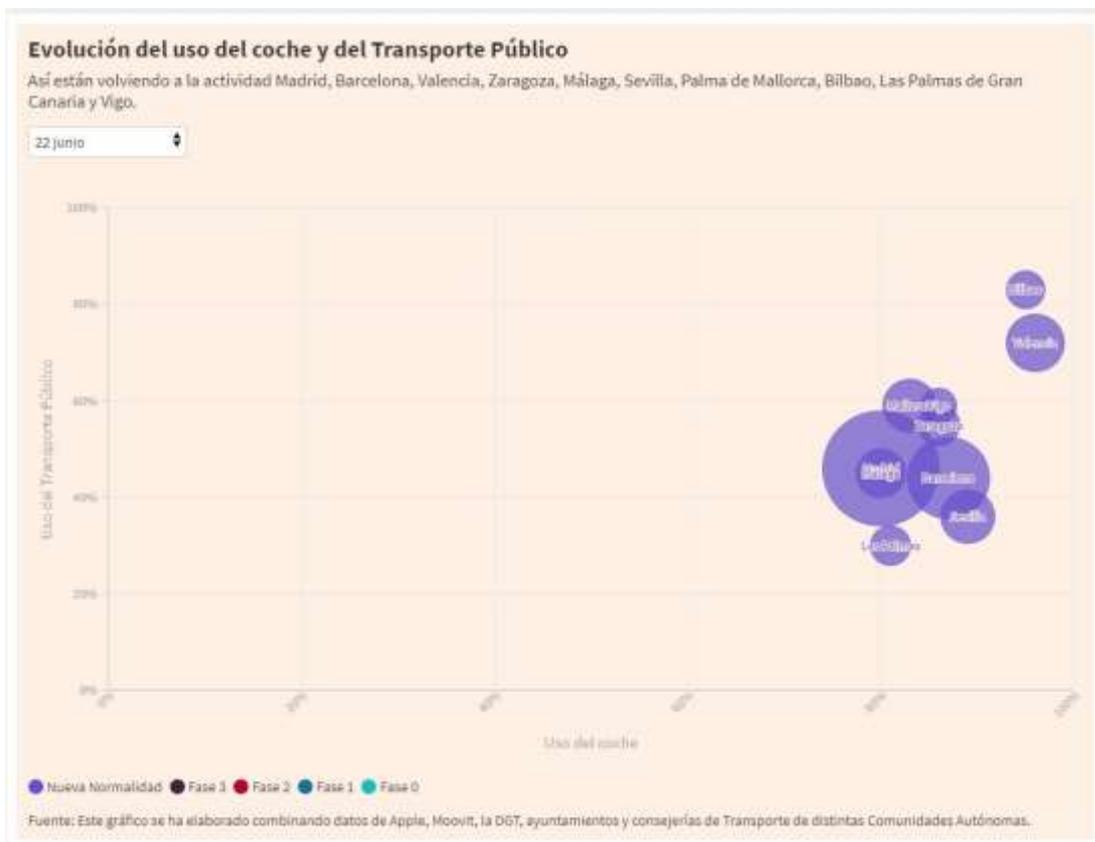


Figura 3-3. Uso del coche frente al Transporte Público en las ciudades españolas.

También se puede tener en cuenta esta evolución de recuperación del vehículo privado por parte de los datos de la DGT, ver Figura 3-4. Donde se observa un claro crecimiento una vez comenzó la desescalada.

Movimientos Urbanos

% Movimientos Urbanos Ciudades
-10%



* Datos facilitados por los Ayuntamientos de Barcelona, Bilbao, Málaga, Sevilla y Valladolid

Figura 3-4. Recuperación de los desplazamientos en coches urbanos.

Existen otros estudios de empresas privadas de movilidad privada como Cabify. Este estudio, realizado a 2.800 encuestados refleja que el 76% de los encuestados pretenden reducir o incluso no utilizar el transporte público y cuatro de cada diez pretenden aumentar el uso del vehículo privado.

Además, de la preocupación individual de los usuarios se añade las recomendaciones por parte de la UE y de los gobiernos como ocurre en el documento: “Buenas prácticas en los centros de trabajo: Medidas para la prevención de contagios del COVID-19” realizado por el Ministerio de Sanidad del Gobierno de España, en el que se recomienda utilizar el transporte privado individual en lugar del colectivo.

Para apoyar y corroborar todos estos estudios, se ha realizado una pequeña encuesta online cualitativa de preferencias relevadas (RP: Revealed Preferences) a través del servicio de formularios de Google (Google Forms) realizada durante el mes de octubre de 2020. De carácter anónima y tratada según la Ley Orgánica 3/2018, de 5 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal (LOPD) y garantía de derechos digitales como se realizó para recopilar los datos de este trabajo.

La encuesta tomó un total de 222 muestras. En ella se realizaron un total de siete preguntas, en las que se debía escoger una respuesta de entre todas las posibles.

Las primeras tres preguntabas trataban de clasificar el tipo de hogar, acorde a las características que se utilizaron en la encuesta inicial base de este trabajo.

Tipo de residencia

222 respuestas

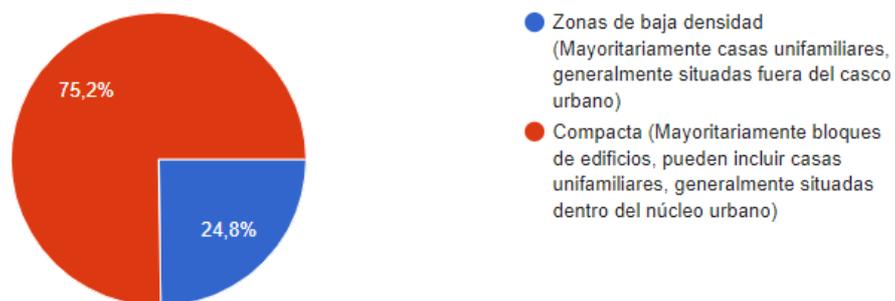


Figura 3-5. Tipo de residencia. Encuesta propia

La primera de ellas, como se observa en la Figura 3-5, trataba de categorizar los hogares en los mismos grupos que se han segregado según el tipo de residencia: ya fueran Zonas de Baja Densidad o Compactas.

Disponibilidad de aparcamiento

222 respuestas

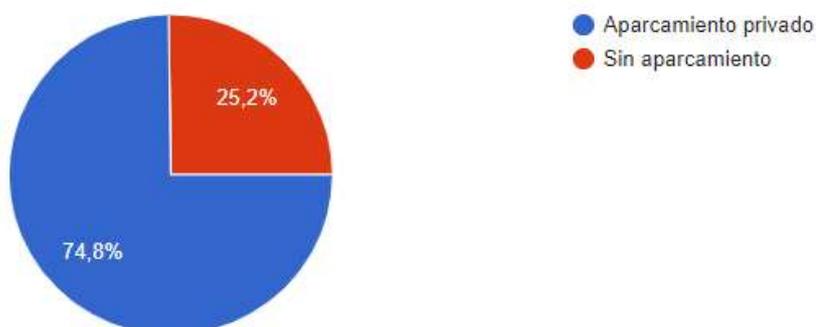


Figura 3-6. Disponibilidad de aparcamiento. Encuesta propia.

Otro aspecto importante a la hora de decidir el medio de transporte a utilizar, sobre todo en cuanto al vehículo privado, es la disponibilidad de aparcamiento, como puede observarse en la Figura 3-6.

La última pregunta respecto a los hogares, se centra en la composición de los mismos acordes a la categorización realizada en la primera encuesta, pudiendo clasificar los hogares en cuatro: hogares sin niños, con al menos un niño, con al menos un jubilado y con al menos un jubilado y un niño, como puede verse en la Figura 3-7.

En los miembros del hogar conviven

222 respuestas

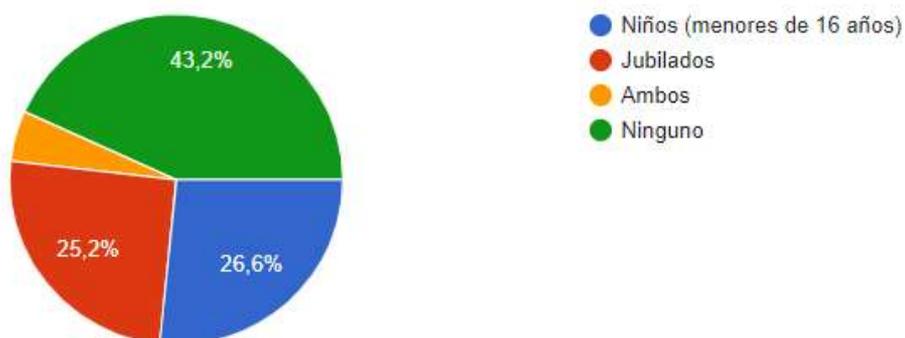


Figura 3-7. Tipo de hogares según las personas que conviven. Encuesta propia.

El resto de preguntas, se centraban en conocer la influencia del COVID-19. La primera pregunta buscaba conocer el medio de transporte utilizado por el individuo antes de producirse la pandemia. Los datos revelaron que aproximadamente un 59,5 % de ellos utilizaban el coche, mientras que un 22,5 % utilizaban el transporte público, el resto se dividía entre medios individuales como bici/patinete, moto y a pie, siendo éste último el que tomaba mayor relevancia entre el resto con un 9,9% como podemos observar en la Figura 3-8.

¿Cuál era el medio de transporte utilizado para realizar sus viajes habituales dentro de la ciudad antes de la pandemia?

222 respuestas

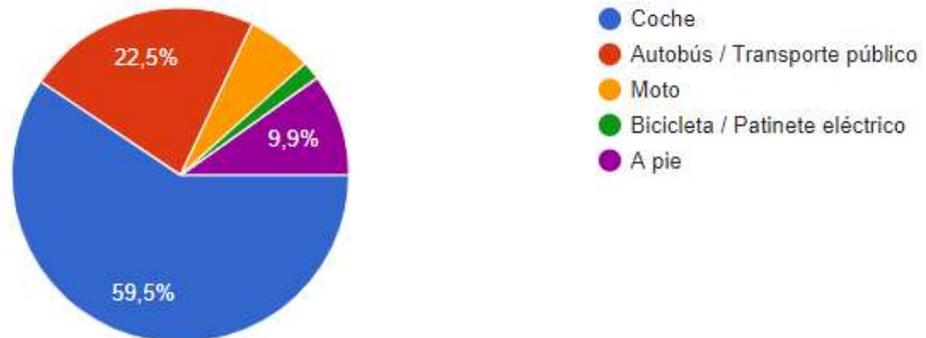


Figura 3-8. Reparto modal antes de la pandemia. Encuesta propia.

La segunda pregunta, recogida en la Figura 3-9, se enfocaba en la toma de decisión del modo de transporte elegido una vez conocida la influencia del virus, siendo la posibilidad de contagio un factor determinante para el 22,5 % de los encuestados.

¿Ha pensado cambiar de medio de transporte debido a la posibilidad de contagio?

222 respuestas

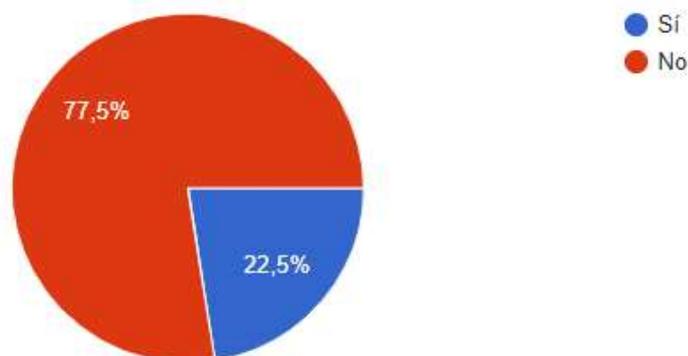


Figura 3-9. Miedo al contagio. Encuesta propia.

En la tercera pregunta se le volvía a preguntar al individuo por su medio de transporte, en esta ocasión, durante la pandemia. Los resultados arrojaron un incremento del uso del vehículo incrementando hasta un 73,4%. El medio de transporte más afectado era, coincidiendo con el resto de estudios publicados, el transporte público que se veía reducido al 6,3 % como se visualiza en la Figura 3-10.

¿Qué modo de transporte utiliza para realizar sus viajes tras la aparición del COVID-19?

222 respuestas

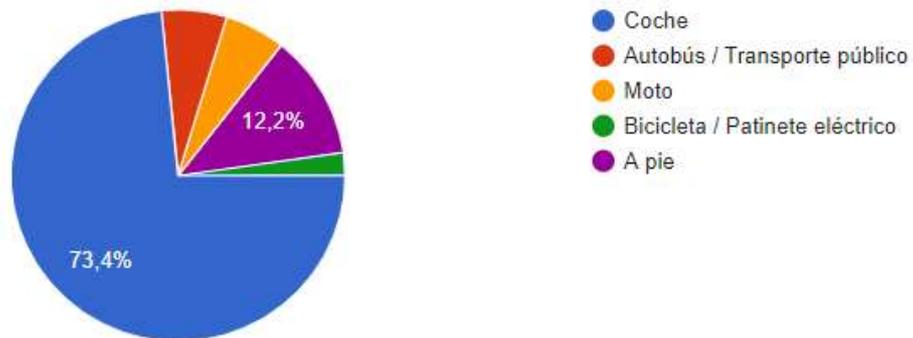


Figura 3-10. Reparto modal tras la pandemia. Encuesta propia.

Para terminar, en la Figura 3-11, se recoge la última pregunta, sobre si el número de desplazamientos por motivo laboral / académico había disminuido durante la pandemia. En esta ocasión, un 54,5 % vieron reducidos sus desplazamientos debido a las nuevas formas telemáticas o semipresenciales que se estaban adoptando en estos aspectos.

¿La cantidad de viajes realizados (sobre todo en el ámbito laboral/académico) se ha visto reducido debido a la implantación del modelo telemático?

222 respuestas

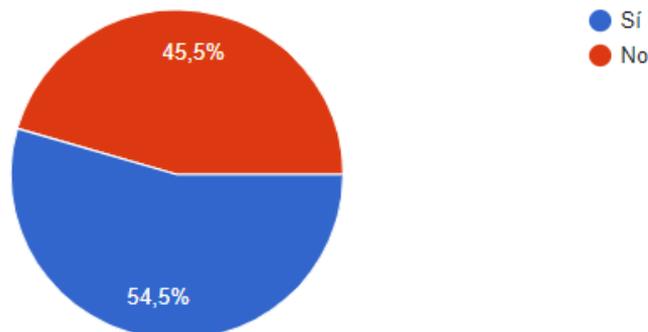


Figura 3-11. Influencia del modelo telemático. Encuesta propia.

Estos resultados están en la línea de los otros estudios, lo que nos permite analizar los datos con determinación, además de realizar un ajuste sobre la elección que pueden tomar los hogares bajo la influencia del COVID-19.

3.3 Ajuste del modelo multinomial y probabilidades

Con los datos de esta encuesta es posible realizar un modelo logit multinomial que permita obtener las probabilidades de elección de una muestra según las variables con las que se han desarrollado el modelo logit multinomial.

El modelo logit es un modelo que se utiliza para predecir probabilidades de los resultados de una distribución categórica o multinomial, dado un conjunto de variables explicativas (categóricas, numéricas...)

Las variables utilizadas son las recogidas por la encuesta, todas ellas son variables categóricas o 'dummies', en concreto:

X₁: 'dummy' para la zona de residencia

X₂: 'dummy' para hogares con aparcamiento privado

X₃: 'dummy' para hogares con al menos un niño

X₄: 'dummy' para hogares con al menos un jubilado

En los modelos de regresión multinomial se considera que los recuentos de las categorías de Y tienen una distribución multinomial. El número de categorías de Y se define como J donde $\{\pi_1, \dots, \pi_J\}$ son las probabilidades de las distintas categorías, tal que:

$$\sum_j \pi_j = 1$$

En este caso, tenemos un total de 5 categorías: Coche, Autobús / Transporte público, Moto, Bicicleta / Patinete eléctrico y A pie. A estas categorías se le han asignado un valor del 1 al 5 según la Tabla 13.

Tabla 13. Valores asignados a las alternativas.

Medio de transporte	Valor asignado
Coche	1
Autobús / Transporte público	2
Moto	3
Bicicleta / Patinete eléctrico	4
A pie	5

A través de las observaciones independientes n realizadas durante la encuesta asignadas a las alternativas J. Para la realización de este modelo, se toma una categoría como respuesta de referencia, en este caso el coche que es la alternativa más elegida y se define un modelo logit con respecto a ella:

$$\log\left(\frac{\pi_j}{\pi_{ref}}\right) = \alpha_j + \beta_j X_i$$

(Ec. 19.)

Donde $j=1,2,3 \dots J-1$

Los valores de los coeficientes, se obtienen realizando el ajuste del modelo multinomial. Estos valores se recogen en la Tabla 14.

Tabla 14. Coeficientes estimados del modelo logit multinomial con el coche como alternativa de referencia.

	π_1 : Autobús / Transporte Público	π_2 : Moto	π_3 : Bicicleta / Patinete Eléctr.	π_4 : A pie
α	1,7374	-0,9449	0,0551	-0,6072
β_1	2,5063	-27,5909	0,7896	-37,4035
β_2	-0,34	-0,3436	-0,1974	-27,424
β_3	-0,1347	-0,3628	-0,9364	-1,1736
β_4	-0,4483	1,0495	-37,8161	-1,0337

Los valores de la primera fila representan los coeficientes independientes del ajuste mientras que el resto de filas representan los coeficientes de las variables explicativas adoptadas en el modelo logit que sigue la estructura de la Ecuación 19.

El modelo, por tanto, tiene J-1 ecuaciones independientes, con parámetros propios y diferentes según la categoría de referencia. Los coeficientes y resultados del ajuste del modelo se utilizan para predecir la probabilidad de elección de una muestra cuyos ‘input’ sea los valores de las variables utilizadas en el modelo.

Así, aplicando para los valores recogidos en las muestras de la primera encuesta se obtienen diferentes probabilidades para cada alternativa. Siendo el valor medio, las obtenidas en la Tabla 15.

Tabla 15. Probabilidad (media) de cada alternativa para las muestras.

Medio de transporte	Probabilidad (media)
Coche	0,7329
Autobús / Transporte público	0,0734
Moto	0,0508
Bicicleta / Patinete eléctrico	0,019
A pie	0,124

Analizando individualmente para cada valor de las variables tenemos los siguientes resultados, recogidos en la Tabla 16.

Tabla 16. Probabilidades de las alternativas según el hogar.

Tipo de hogar			Coche	Autobús / Transporte público	Moto	Bicicleta / Patinete eléctrico	A pie
Zonas de Baja Densidad	Aparcamiento privado	Con niños	96,95%	0,00%	1,46%	0,00%	1,60%
		Con jubilados	97,80%	0,00%	0,00%	0,00%	2,20%
		Sin ninguno	95,43%	0,00%	3,20%	0,00%	1,37%
		Con ambos	97,49%	0,00%	0,00%	0,00%	2,51%
	Sin aparcamiento	Con niños	96,11%	0,00%	1,67%	0,00%	2,22%
		Con jubilados	96,93%	0,00%	0,00%	0,00%	3,07%
		Sin ninguno	94,44%	0,00%	3,65%	0,00%	1,91%
		Con ambos	96,50%	0,00%	0,00%	0,00%	3,50%
Compacta	Aparcamiento privado	Con niños	72,77%	3,79%	6,09%	2,48%	14,69%
		Con jubilados	61,11%	18,74%	0,00%	3,27%	16,88%
		Sin ninguno	65,46%	4,49%	12,21%	6,29%	11,55%
		Con ambos	63,32%	15,46%	0,00%	1,20%	20,02%
	Sin aparcamiento	Con niños	69,71%	3,79%	6,72%	0,00%	19,72%
		Con jubilados	59,04%	18,04%	0,00%	0,00%	22,91%
		Sin ninguno	65,31%	4,46%	14,04%	0,00%	16,19%
		Con ambos	59,27%	14,42%	0,00%	0,00%	26,32%

Según estos resultados, podemos considerar que el coche es la opción preferida para hogares que habitan en zonas de baja densidad, ya que la probabilidad aumenta para la alternativa del coche a más del 95 % en estos casos.

No hay gran diferencia dentro de estos hogares si comparamos con la disponibilidad de aparcamiento, ya que apenas se aprecia una diferencia de aproximadamente un 1%.

La alternativa que se ve más favorecida en los hogares que habitan en zonas compactas es, como era de esperar, los viajes realizados a pie, ya que esta era la utilidad que partía desde mayor ventaja sobre el resto.

Cabe destacar algunos resultados interesantes. Uno de ellos es que los hogares con jubilados en zonas compactas, aún mantienen el transporte público como una de las opciones preferentes, con un porcentaje a tener en cuenta, en torno al 18%. Del mismo modo, aquellos hogares con niños en zonas compactas, tienen mayor probabilidad sobre la alternativa del coche que el resto de hogares, aunque la diferencia no supera el 10% en el peor de los casos.

3.4 Valores predichos y valores reales

Otra forma de analizar los resultados del modelo multinomial realizado es aplicar el valor de las probabilidades de las alternativas para una muestra y obtener los valores predichos por el modelo, con el fin de poder compararlos con los valores reales de la muestra.

Aplicando nuestro modelo a la muestra de 222 individuos realizada para la obtención de los datos y utilizando las probabilidades predichas que se recogen en la Tabla 17, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 17. Valores reales y predichos por el modelo.

Alternativa	Valores reales	Valores predichos
Coche	163	165
Transporte Público	14	14
Moto	13	13
Bicicleta / Patinete eléctrico	5	4
A pie	27	26

Lo ideal en estos casos, es comparar los valores según el tipo de hogar. Obteniéndose los resultados recogidos en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores reales y predichos por el modelo según el tipo de hogar.

Tipo de hogar			DATOS REALES					VALORES PREDICHOS				
			Coche	Autobús / Transporte	Moto	Bicicleta / Patinete	A pie	Coche	Autobús / Transporte	Moto	Bicicleta / Patinete	A pie
Zonas de Baja Densidad	Aparcamiento privado	Con niños	11	0	0	0	0	11	0	0	0	0
		Con jubilados	11	0	0	0	1	12	0	0	0	0
		Sin ninguno	18	0	1	0	0	18	0	1	0	0
		Con ambos	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0
	Sin aparcamiento	Con niños	3	0	0	0	0	3	0	0	0	0
		Con jubilados	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0
		Sin ninguno	5	0	0	0	0	5	0	0	0	0
		Con ambos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		TOTAL	25	2	3	1	6	27	2	2	1	5
Compacta	Aparcamiento privado	Con niños	17	5	0	1	5	17	5	0	0	6
		Con jubilados	34	2	5	3	5	32	2	6	3	6
		Sin ninguno	5	1	0	0	1	4	1	0	0	2
		Con ambos	7	0	0	0	1	8	0	1	0	1
	Sin aparcamiento	Con niños	9	3	0	0	2	9	3	0	0	2
		Con jubilados	13	1	4	0	5	15	1	3	0	4
		Sin ninguno	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
		Con ambos	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
		TOTAL	163	14	13	5	27	165	14	13	4	26

■ Acierto
■ Fallo
■ No hay datos

Según la Tabla 18, tenemos un total de 211 casos en los que el modelo y el valor real coinciden. Por tanto, podemos asumir que el modelo tiene un porcentaje de acierto de:

$$Fiabilidad\ del\ modelo\ (\%) = \frac{n^{\circ}\ de\ aciertos\ del\ modelo}{n^{\circ}\ de\ casos\ totales} = \frac{211\ aciertos}{222\ casos\ totales} \cong 95,06\ \%$$

(Ec. 20.)

A pesar de tener un porcentaje de acierto tan alto, hay que ser precavido con el resultado de estos datos, ya que el tamaño de la muestra no es suficientemente elevado para extrapolar estos datos.

Cabe destacar que para los casos de los hogares que habitan en zonas de baja densidad, el modelo se ajusta mucho mejor a la realidad que para el caso de hogares que habitane en zonas compactas. Esto puede deberse a que en hogares de zonas compactas el usuario se ve atraído por otras alternativas cuyas variables no se han recogido en este trabajo, como pudieran ser el tiempo, el coste de la alternativa u otras variables socio-económicas fuertemente ligadas a la elección de los usuarios.

3.5 Conclusiones y posibles escenarios

De todo lo acontecido, podemos sacar conclusiones y prever algunos escenarios.

La principal conclusión, y de la que deriva todo, es que los usuarios están introduciendo la seguridad durante el transporte, con el fin de evitar contagios, en su toma de decisiones a la hora de elegir el medio de transporte. Esta actitud genera grandes reducciones en el uso del transporte colectivo, como lo es el transporte público, en favor del vehículo privado, principalmente el coche.

Esta situación ha obligado a flexibilizar las medidas restrictivas medioambientales del uso del coche, lo que promueve del mismo modo la utilización de este medio. Sin embargo, son muchos los países que han buscado incentivar el uso de medios de transporte individual más sostenibles como es el caso de motos, patinetes o bicicletas eléctricas.

De acuerdo a los resultados probabilísticos obtenidos en el modelo logit multinomial, una de las opciones preferentes son los viajes realizados a pie, sin embargo, la mayoría de estos viajes suelen realizarse en desplazamientos no ocupacionales, como se ha visto al principio de este documento, de ahí a que el coche sea la opción preferente en la mayoría de los hogares estudiados, ya que se realizan muchos más viajes a la semana de esta índole.

Podemos concluir, por tanto, que se espera un aumento del uso del coche a corto plazo incentivado por estos acontecimientos, por lo que los resultados podrían ser mayores de los esperados si se repitiera la encuesta.

Sin embargo, no podemos extrapolar estos resultados a medio-largo plazo, ya que los planes de movilidad se enfocan en la reducción del uso de este medio de transporte, de manera que es posible que se promuevan otros medios de transporte más eficientes, tanto con el medioambiente como en la lucha contra el virus.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Afshin Shariat-Mohaymany, Matin Shahri “Crash Prediction Modeling Using a Spatial Semi-Local Model: A Case Study of Mashhad, Irán” *School of Civil Engineering, Irán University of Science & Technology*, 2016.
- [2] Andrea Alonso, Andrés Monzón y Yang Wang, “Modelling Land Use and Transport Policies to Measure Their Contribution to Urban Challenges: The Case of Madrid” *Tan Yigitcanlar*, 2017.
- [3] Ángeles Táuler Alcaraz, “Transporte Urbano y Movilidad de la población en grandes ciudades” *Política y Sociedad*, 1992.
- [4] Autoritat del Transport Metropolità, “Enquesta de Mobilitat en Dia Feiner (EMDF 2019)” *Ayuntamiento de Barcelona*, 2019.
- [5] Consejería de Economía, Innovación, Ciencia y Empleo, “Encuestas social 2011: Movilidad urbana en las regiones de Andalucía” *Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía*, 2011.
- [6] Consorcio de Transportes de la Comunidad de Madrid, “Encuesta Domiciliaria de Movilidad” *Comunidad de Madrid*, 2018..
- [7] Datos estadística: “Evolución del tráfico por los efectos del COVID-19” *Dirección General de Tráfico (DGT)*, 2020.
- [8] Encuesta: “Buenas prácticas en los centros de trabajo: Medidas para la prevención de contagios del COVID-19” *Ministerio de Sanidad, Gobierno de España*, 2020.
- [9] Encuesta: “Estudio sobre la evolución de la movilidad española” *Invertia*, 2020.
- [10] Encuesta: “Hábitos y uso del transporte durante el confinamiento” *Observatorio RACE de Conductores*, 2020.
- [11] H.R.Moheghi “GLM profile monitoring using robus estimators” *Quality and reliability engineering international*, 2020.
- [12] John Fox “Generalized Linear Models: An Introduction” *Sociology* 740, 2014.
- [13] José M^a Del Castillo Granados, “Apuntes de Ingeniería del Transporte” *Universidad de Sevilla Curso 2019-2020*.
- [14] J.M.Marín “Regresión Logística Multinomial”
<http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/Categor/Tema5Cate.pdf>
- [15] Marcos Ruiz Soler y Emelina López González, “Análisis de datos con el Modelo Lineal Generalizado. Una aplicación con R” *Universidad de Málaga*, 2011.
- [16] Pilar Vega Pindado, “Los Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS)” *Ecologistas en Acción*, 2017.
- [17] Richard Berk, John MacDonald “Overdispersion and Poisson Regression” *Department of Statistics and Criminology, University of Pennsylvania* 2007.

