

**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN
FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



**MODELO DE CARGAS VIVAS VEHICULARES PARA EL
DISEÑO ESTRUCTURAL DE PUENTES EN BOLIVIA**

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGISTER EN INGENIERÍA
ESTRUCTURA**

ING. FERNANDO MANUEL MITA CALDERÓN

SUCRE, MAYO DE 2022

SUCRE, 09 DE OCTUBRE DE 2024

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis padres, quienes han sido la luz que ilumina mi camino y el motor que impulsa mis sueños.

A ustedes, queridos padres, les agradezco por haberme brindado su amor incondicional, por haberme guiado con paciencia y sabiduría en cada paso de mi vida y por haber sido mi apoyo constante en la consecución de mis objetivos.

Gracias por haberme enseñado el valor del esfuerzo y la perseverancia, por haber sido mis modelos a seguir y por haber sido mi inspiración en cada uno de mis logros.

Este trabajo no habría sido posible sin su amor, su paciencia y su confianza en mí. Espero que esta pequeña dedicación les sirva como muestra de mi gratitud y de mi amor hacia ustedes.

INDICE GENERAL

	Pag.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Presentación y formulación de problema.....	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Hipótesis	4
2. MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE)	5
2.1. Marco teórico contextual	5
2.2. Marco teórico conceptual.....	9
3. METODOLOGÍA	14
3.1. Diseño: Análisis cuantitativo y cualitativo	14
3.2. Población, muestra y estadística	14
4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
4.1. Recopilación y análisis de datos de pesaje vehicular en Bolivia	15
4.2. Simulación de variables aleatorias de las distancias entre ejes d1 y d2.....	39
4.3. Cálculo y análisis de elementos mecánicos a distintas luces.	44
4.4. Comparación de elementos mecánicos máximos de las configuraciones vehiculares principales con las especificaciones de la AASHTO LRFD	78
4.5. Diseño conceptual del modelo de cargas vivas vehiculares en Bolivia.....	81
4.6. Análisis estadístico correlacional y regresión de los datos para validación del modelo conceptual.	82
4.7. Análisis inferencial de las cargas vivas vehiculares para la asignación de cargas del modelo conceptual	96
4.8. Cálculo de las separaciones de cargas del Modelo Virtual.....	109
4.9. Determinación de factor de carga y definición del Modelo Virtual de Cargas Vivas Vehiculares	110

4.10.	Determinación de la carga uniformemente distribuida mediante métodos estocásticos.	112
4.11.	Validación del modelo de carga viva, Camión de Diseño BL-23.....	120
4.12.	Factores de Carga Viva, Presencia Múltiple de Cargas Vivas, Efecto dinámico de la Carga Viva Vehicular.....	130
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
5.1.	Conclusiones.....	133
5.2.	Recomendaciones.....	135
	BIBLIOGRAFÍA.....	136

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1: Configuraciones vehiculares predominantes	15
Tabla 2: Configuraciones vehiculares incluidas en el análisis	17
Tabla 3: Valores promedio de peso bruto total y porcentaje de vehículos que exceden el límite permitido por la Ley N°441	18
Tabla 4: Valores promedio de peso en P1 y porcentaje de vehículos que exceden el límite permitido por la Ley N°441	21
Tabla 5: Valores promedio de peso en P2 y porcentaje de vehículos que exceden el límite permitido por la Ley N°441	21
Tabla 6: Valores promedio de peso en P3 y porcentaje de vehículos que exceden el límite permitido por la Ley N°441	21
Tabla 7: Coeficientes de correlación múltiple, Elementos Mecánicos vs P1	93
Tabla 8: Coeficientes de correlación múltiple, Elementos Mecánicos vs P2.....	94
Tabla 9: Coeficientes de correlación múltiple, Elementos Mecánicos vs P3.....	94
Tabla 10: Coeficientes de correlación múltiple, Elementos Mecánicos vs d2	94
Tabla 11: Resultado de Ecuaciones de Regresión Múltiple aplicando cargas unitarias.....	95
Tabla 12: Probabilidades de no excedencia, q.....	108
Tabla 13: Cargas Virtuales calculadas para un Periodo de diseño de 50 años.....	108
Tabla 14: Cargas virtuales adoptadas para P1, P2 y P3.....	109
Tabla 15: Distancias entre ejes de las diferentes configuraciones	109
Tabla 16: Distancias adoptadas para el Modelo Virtual.....	110
Tabla 17: Probabilidad de excedencia de los Vehículos Reales.....	112
Tabla 18: Vehículos Reales para una probabilidad de no excedencia de 50 años.....	112
Tabla 19: Momentos y Cortantes Máximos debidos al Camión de diseño BL-23.....	113
Tabla 20: Ecuaciones para cálculo de la carga distribuida	113
Tabla 21: Cargas uniformemente distribuidas.....	119
Tabla 22: Elementos Mecánicos Máximos para Validar el Modelo de Cargas Concentradas	121
Tabla 23: Relación de Elementos Mecánicos entre el Modelo de Cargas Concentradas..	123
Tabla 24: Elementos Mecánicos Máximos debidos a las cargas distribuidas	125

Tabla 25: Elementos Mecánicos Máximos para Validar el Sistema de Cargas Vivas 126

Tabla 26: Relaci3n de Elementos Mecánicos respecto al Modelo Cargas Vivas..... 128

Tabla 27: Factores de Carga (Tabla 3.4.1-1, AASHTO LRFD 2017) 130

Tabla 28: Factor de presencia múltiple (Tabla 3.6.1.1.2-1, AASHTO LRFD 2017) 131

Tabla 29:Factor de incremento por carga dinámica IM (Tabla 3.6.2.1.-1, AASHTO LRFD 2017)
..... 132

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1: Camión de diseño HL-93	9
Figura 2: Camión de diseño HL-13_AR	9
Figura 3: Camión de diseño IMT 66.5	10
Figura 4: Camión de diseño CC-14	10
Figura 5: Teorema de Barré.....	12
Figura 6: Histograma de la cantidad de vehículos registrados por Vías Bolivia.....	15
Figura 7: Histograma de cantidad de vehículos depurados	16
Figura 8: Peso bruto total vehicular, C5	18
Figura 9: Peso bruto total vehicular, C23	19
Figura 10: Peso bruto total vehicular, C44	19
Figura 11: Peso bruto total vehicular, C46	20
Figura 12: Peso bruto total vehicular, C57	20
Figura 13: Peso en Eje-1, vehículo C5	22
Figura 14: Peso en Eje-2, vehículo C5	22
Figura 15: Peso en Eje-1, vehículo C23	23
Figura 16: Peso en Eje-2, vehículo C23	24
Figura 17: Peso en Eje-3, vehículo C23	24
Figura 18: Peso en Eje-4, vehículo C23	25
Figura 19: Peso en Eje-3', vehículo C23	25
Figura 20: Peso en Eje-1, vehículo C44	26
Figura 21: Peso en Eje-2, vehículo C44	26
Figura 22: Peso en Eje-3, vehículo C44	27
Figura 23: Peso en Eje-1, vehículo C46	28
Figura 24: Peso en Eje-2, vehículo C46	28
Figura 25: Peso en Eje-3, vehículo C46	29
Figura 26: Peso en Eje-4, vehículo C46	29
Figura 27: Peso en Eje-3', vehículo C23	30
Figura 28: Peso en Eje-1, vehículo C57	30
Figura 29: Peso en Eje-2, vehículo C57	31

Figura 30:	Peso en Eje-3, vehículo C57	31
Figura 31:	Frecuencia relativa acumulada P1(Eje-1), vehículo C5	32
Figura 32:	Frecuencia relativa acumulada P2(Eje-2), vehículo C5	32
Figura 33:	Frecuencia relativa acumulada P1(Eje-1), vehículo C23	33
Figura 34:	Frecuencia relativa acumulada P2(Eje-2), vehículo C23	33
Figura 35:	Frecuencia relativa acumulada P3(Eje-3+Eje-4 o Eje-3'), vehículo C23	34
Figura 36:	Frecuencia relativa acumulada P2(Eje-2), vehículo C44	35
Figura 37:	Frecuencia relativa acumulada P3(Eje-3), vehículo C44	35
Figura 38:	Frecuencia relativa acumulada P1(Eje-1), vehículo C46	36
Figura 39:	Frecuencia relativa acumulada P2(Eje-2), vehículo C46	36
Figura 40:	Frecuencia relativa acumulada P3(Eje-3+Eje-4 o Eje-3'), vehículo C46	37
Figura 41:	Frecuencia relativa acumulada P1(Eje-1), vehículo C57	37
Figura 42:	Frecuencia relativa acumulada P2(Eje-2), vehículo C57	38
Figura 43:	Frecuencia relativa acumulada P3(Eje-3), vehículo C57	38
Figura 44:	“d1” Separación entre Ejes 1 y 2, vehículo C5	40
Figura 45:	“d1” Separación entre Ejes 1 y 2, vehículo C23	40
Figura 46:	“d2” Separación entre Ejes 2 y 3, vehículo C23	41
Figura 47:	“d1” Separación entre Ejes 1 y 2, vehículo C44	41
Figura 48:	“d2” Separación entre Ejes 2 y 3, vehículo C44	42
Figura 49:	“d1” Separación entre Ejes 1 y 2, vehículo C46	42
Figura 50:	“d2” Separación entre Ejes 2 y 3, vehículo C46	43
Figura 51:	“d1” Separación entre Ejes 1 y 2, vehículo C57	43
Figura 52:	“d2” Separación entre Ejes 2 y 3, vehículo C57	44
Figura 53:	M10 (momento máximo en claro 10 m), Vehículo C5	45
Figura 54:	M20 (momento máximo en claro 20m), Vehículo C5	46
Figura 55:	M30 (momento máximo en claro 30m), Vehículo C5	46
Figura 56:	M40 (momento máximo en claro 40m), Vehículo C5	47
Figura 57:	M50 (momento máximo en claro 50m), Vehículo C5	47
Figura 58:	M60 (momento máximo en claro 60m), Vehículo C5	48
Figura 59:	M10 (momento máximo en claro 10m), Vehículo C23	48
Figura 60:	M20 (momento máximo en claro 20m), Vehículo C23	49
Figura 61:	M30 (momento máximo en claro 30m), Vehículo C23	49

Figura 62:	M40 (momento máximo en claro 40m), Vehículo C23	50
Figura 63:	M50 (momento máximo en claro 50m), Vehículo C23	50
Figura 64:	M60 (momento máximo en claro 60m), Vehículo C23	51
Figura 65:	M10 (momento máximo en claro 10m), Vehículo C44	51
Figura 66:	M20 (momento máximo en claro 20m), Vehículo C44	52
Figura 67:	M30 (momento máximo en claro 30m), Vehículo C44	52
Figura 68:	M40 (momento máximo en claro 40m), Vehículo C44	53
Figura 69:	M50 (momento máximo en claro 50m), Vehículo C44	53
Figura 70:	M60 (momento máximo en claro 60m), Vehículo C44	54
Figura 71:	M10 (momento máximo en claro 10m), Vehículo C46	54
Figura 72:	M20 (momento máximo en claro 20m), Vehículo C46	55
Figura 73:	M30 (momento máximo en claro 30m), Vehículo C46	55
Figura 74:	M40 (momento máximo en claro 40m), Vehículo C46	56
Figura 75:	M50 (momento máximo en claro 50m), Vehículo C46	56
Figura 76:	M60 (momento máximo en claro 60m), Vehículo C46	57
Figura 77:	M10 (momento máximo en claro 10m), Vehículo C57	57
Figura 78:	M20 (momento máximo en claro 20m), Vehículo C57	58
Figura 79:	M30 (momento máximo en claro 30m), Vehículo C57	58
Figura 80:	M40 (momento máximo en claro 40m), Vehículo C57	59
Figura 81:	M50 (momento máximo en claro 50m), Vehículo C57	59
Figura 82:	M60 (momento máximo en claro 60m), Vehículo C57	60
Figura 83:	Momentos Máximos Generados por las distintas Configuraciones Vehiculares vs La Longitud de Puente.	61
Figura 84:	V10 (cortante máxima en claro 10m), Vehículo C5	62
Figura 85:	V20 (cortante máxima en claro 20m), Vehículo C5	62
Figura 86:	V30 (cortante máxima en claro 30m), Vehículo C5	63
Figura 87:	V40 (cortante máxima en claro 40m), Vehículo C5	63
Figura 88:	V50 (cortante máxima en claro 50m), Vehículo C5	64
Figura 89:	V60 (cortante máxima en claro 60m), Vehículo C5	64
Figura 90:	V10 (cortante máxima en claro 10m), Vehículo C23	65
Figura 91:	V20 (cortante máxima en claro 20m), Vehículo C23	65
Figura 92:	V30 (cortante máxima en claro 30m), Vehículo C23	66

Figura 93:	V40 (cortante máxima en claro 40m), Vehículo C23	66
Figura 94:	V50 (cortante máxima en claro 50m), Vehículo C23	67
Figura 95:	V60 (cortante máxima en claro 60m), Vehículo C23	67
Figura 96:	V10 (cortante máxima en claro 10m), Vehículo C44	68
Figura 97:	V20 (cortante máxima en claro 20m), Vehículo C44	68
Figura 98:	V30 (cortante máxima en claro 30m), Vehículo C44	69
Figura 99:	V40 (cortante máxima en claro 40m), Vehículo C44	69
Figura 100:	V50 (cortante máxima en claro 50m), Vehículo C44.....	70
Figura 101:	V60 (cortante máxima en claro 60m), Vehículo C44.....	70
Figura 102:	V10 (cortante máxima en claro 10m), Vehículo C46.....	71
Figura 103:	V20 (cortante máxima en claro 20m), Vehículo C46.....	71
Figura 104:	V30 (cortante máxima en claro 30m), Vehículo C46.....	72
Figura 105:	V40 (cortante máxima en claro 40m), Vehículo C46.....	72
Figura 106:	V50 (cortante máxima en claro 50m), Vehículo C46.....	73
Figura 107:	V60 (cortante máxima en claro 60m), Vehículo C46.....	73
Figura 108:	V10 (cortante máxima en claro 10m), Vehículo C57.....	74
Figura 109:	V20 (cortante máxima en claro 20m), Vehículo C57	74
Figura 110:	V30 (cortante máxima en claro 30m), Vehículo C57.....	75
Figura 111:	V40 (cortante máxima en claro 40m), Vehículo C57.....	75
Figura 112:	V50 (cortante máxima en claro 50m), Vehículo C57.....	76
Figura 113:	V60 (cortante máxima en claro 60m), Vehículo C57.....	76
Figura 114:	Cortantes Máximos Generados por las distintas Configuraciones Vehiculares vs La Longitud de Puente.	77
Figura 115:	Comparación de Momentos Máximos de las Configuraciones C5, C23, C44, C46 y C57 respecto al Camión HL-93.....	79
Figura 116:	Comparación de Cortantes Máximos de las Configuraciones C5, C23, C44, C46 y C57 respecto al Camión HL-93.....	80
Figura 117:	Modelo conceptual del Camión y Tándem de Diseño.....	81
Figura 118:	Correlograma de *M20, V20, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C23	83
Figura 119:	Correlograma de M30, V30, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C23	84
Figura 120:	Correlograma de M40, V40, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C23.....	84
Figura 121:	Correlograma de M50, V50, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C23.....	85

Figura 122:	Correlograma de M60, V60, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C23	85
Figura 123:	Correlograma de M20, V20, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C44	86
Figura 124:	Correlograma de M30, V30, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C44	86
Figura 125:	Correlograma de M40, V40, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C44	87
Figura 126:	Correlograma de M50, V50, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C44	87
Figura 127:	Correlograma de M60, V60, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C44	88
Figura 128:	Correlograma de*M20, V20, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C46	88
Figura 129:	Correlograma de M30, V30, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C46	89
Figura 130:	Correlograma de M40, V40, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C46	89
Figura 131:	Correlograma de M50, V50, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C46	90
Figura 132:	Correlograma de M60, V60, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C46	90
Figura 133:	Correlograma de*M20, V20, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C57	91
Figura 134:	Correlograma de M30, V30, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C57	91
Figura 135:	Correlograma de M40, V40, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C57	92
Figura 136:	Correlograma de M50, V50, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C57	92
Figura 137:	Correlograma de M60, V60, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C57	93
Figura 138:	Distribución de Weibull para las cargas P1 y P2 reales, Vehículo C5	97
Figura 139:	Distribución de Weibull para las cargas P1, P2, P3 reales, Vehículo C23	97
Figura 140:	Distribución de Weibull para las cargas P1, P2, P3 reales, Vehículo C44	98
Figura 141:	Distribución de Weibull para las cargas P1, P2, P3 reales, Vehículo C46	98
Figura 142:	Distribución de Weibull para las cargas P1, P2, P3 reales, Vehículo C57	99
Figura 143:	Distribución de Weibull para las cargas P1, P2, P3 reales, vehículos C23-C44-C46-C57	99
Figura 144:	Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV, Vehículo C5	100
Figura 145:	Distribución de Weibull para la carga P1 Virtual = CV1, Vehículo C23	100
Figura 146:	Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV2, Vehículo C23	101
Figura 147:	Distribución de Weibull para la carga P3 Virtual = CV3, Vehículo C23	101
Figura 148:	Distribución de Weibull para la carga P1 Virtual = CV1, Vehículo C44	102
Figura 149:	Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV2, Vehículo C44	102
Figura 150:	Distribución de Weibull para la carga P3 Virtual = CV3, Vehículo C44	103
Figura 151:	Distribución de Weibull para la carga P1 Virtual = CV1, Vehículo C46	103
Figura 152:	Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV2, Vehículo C46	104

Figura 153:	Distribución de Weibull para la carga P3 Virtual = CV3, Vehículo C46	104
Figura 154:	Distribución de Weibull para la carga P1 Virtual = CV1, Vehículo C57	105
Figura 155:	Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV2, Vehículo C57	105
Figura 156:	Distribución de Weibull para la carga P3 Virtual = CV3, Vehículo C57	106
Figura 157:	Distribución de Weibull para la carga P1 Virtual = CV1, Vehículos C23-C44-C46-C57	106
Figura 158:	Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV2, Vehículos C23-C44-C46-C57	107
Figura 159:	Distribución de Weibull para la carga P3 Virtual = CV3, Vehículos C23-C44-C46-C57	107
Figura 160:	Modelo de Carga Viva, Camión y Tándem BL-93.....	111
Figura 161:	Regresión Lineal M20, Combinaciones Aleatorias	114
Figura 162:	Regresión Lineal M30, Combinaciones Aleatorias	114
Figura 163:	Regresión Lineal M40, Combinaciones Aleatorias	115
Figura 164:	Regresión Lineal M50, Combinaciones Aleatorias	115
Figura 165:	Regresión Lineal M60, Combinaciones Aleatorias	116
Figura 166:	Regresión Lineal V20, Combinaciones Aleatorias.....	116
Figura 167:	Regresión Lineal V30, Combinaciones Aleatorias.....	117
Figura 168:	Regresión Lineal V40, Combinaciones Aleatorias.....	117
Figura 169:	Regresión Lineal V50, Combinaciones Aleatorias.....	118
Figura 170:	Regresión Lineal V60, Combinaciones Aleatorias.....	118
Figura 171:	Carga de Carril BL-23	120
Figura 172:	Validación del modelo con valores esperados, Momentos Flectores	122
Figura 173:	Validación del modelo con valores esperados, Fuerzas Cortantes	122
Figura 174:	Relación de Momentos respecto al Modelo Cargas Vivas	124
Figura 175:	Relación de Cortantes respecto al Modelo Cargas Vivas.....	124
Figura 176:	Validación final del modelo, Momentos Flectores.....	127
Figura 177:	Validación final del modelo, Fuerzas Cortantes.....	127
Figura 178:	Validación final del modelo, Valores relativos de Momentos Flectores.....	129
Figura 179:	Validación final del modelo, Valores relativos de Cortantes	129

ABSTRACT

In this thesis, a vehicle live load model specifically adapted for the structural design of bridges in Bolivia is developed and presented, aiming to improve the safety and efficiency of road infrastructure in the country. The research focuses on analyzing and considering the particular characteristics of vehicle loads in Bolivia, including the weights and dimensions of common cargo vehicles in the region, and how these differ from the specifications proposed in the AASHTO LRFD standard, widely used internationally. To carry out the study, a comprehensive literature review was conducted, and traffic data and cargo vehicle information in Bolivia were analyzed. Subsequently, the bending moments and shear forces generated by both models, the proposed one and the AASHTO LRFD, were examined and compared in different cases of bridges with various structural configurations. The findings of this investigation demonstrate that the proposed adapted model leads to higher bending moments and shear forces than those obtained through the AASHTO LRFD model. These results highlight the importance of using a vehicle live load model adapted to local conditions to achieve safer and more efficient bridge designs in the Bolivian context. Furthermore, the need to update national standards and regulations to include this adapted model is discussed, in order to improve the quality and longevity of road infrastructure in the country.

RESUMEN

En esta tesis se desarrolla y presenta un modelo de cargas vivas vehiculares adaptado específicamente para el diseño estructural de puentes en Bolivia, con el objetivo de mejorar la seguridad y eficiencia de las infraestructuras viales en el país. La investigación se enfoca en analizar y considerar las características particulares de las cargas vehiculares en Bolivia, incluyendo los pesos y dimensiones de los vehículos de carga comunes en la región, y cómo estos difieren de las especificaciones propuestas en la normativa AASHTO LRFD, ampliamente utilizada a nivel internacional.

Para llevar a cabo el estudio, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura y se analizaron datos de tráfico y vehículos de carga en Bolivia. Posteriormente, se examinaron y compararon los momentos flectores y las fuerzas cortantes generadas por ambos modelos, el propuesto y el de AASHTO LRFD, en diferentes casos de puentes con variadas configuraciones estructurales.

Los hallazgos de esta investigación demuestran que el modelo adaptado propuesto conduce a momentos flectores y fuerzas cortantes superiores a los obtenidos mediante el modelo AASHTO LRFD. Estos resultados resaltan la importancia de utilizar un modelo de cargas vivas vehiculares adaptado a las condiciones locales para lograr diseños de puentes más seguros y eficientes en el contexto boliviano. Además, se plantea la necesidad de actualizar las normativas y regulaciones nacionales para incluir este modelo adaptado, con el fin de mejorar la calidad y longevidad de las infraestructuras viales en el país.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico y la expansión urbana en Bolivia han generado una mayor demanda en el desarrollo de infraestructura vial, siendo los puentes elementos clave para la conectividad y el transporte en el país. El diseño adecuado de estos puentes garantiza no solo su durabilidad y resistencia, sino también la seguridad de quienes los utilizan. La presente tesis se enfoca en el análisis y propuesta de un modelo de cargas vivas vehiculares específico para Bolivia, con el fin de optimizar el diseño estructural de puentes en el contexto nacional.

A nivel mundial, la normativa AASHTO LRFD es ampliamente utilizada como referencia para el diseño de puentes, estableciendo parámetros y criterios en relación a las cargas vivas vehiculares. No obstante, se ha detectado que la aplicación directa de dicha normativa en Bolivia puede no ser totalmente adecuada, ya que las características propias de los vehículos de carga y las condiciones del tráfico boliviano difieren de las consideraciones asumidas en la AASHTO LRFD.

Para abordar esta problemática, se empleó una metodología de investigación que integra enfoques teóricos y prácticos, aplicando técnicas de estadística inferencial y probabilidades, así como métodos estocásticos en el análisis de datos sobre tráfico y vehículos de carga en Bolivia. Se realizó una revisión detallada de la literatura y se estudiaron datos empíricos con el fin de proponer un modelo adaptado de cargas vivas vehiculares específico para el país. A continuación, se compararon los momentos flectores y las fuerzas cortantes resultantes de la aplicación de ambos modelos, el propuesto y el de AASHTO LRFD, en distintos casos de estudio de puentes con diversas configuraciones estructurales.

Esta investigación presenta los resultados derivados del desarrollo del modelo adaptado de cargas vivas vehiculares y evidencia cómo la implementación de este modelo conduce a momentos flectores y fuerzas cortantes más elevados en comparación con los obtenidos a través del modelo AASHTO LRFD. A partir de estos hallazgos, se abordan las implicaciones en el diseño estructural de puentes en Bolivia y se plantean recomendaciones para actualizar las normativas y regulaciones nacionales relacionadas con el diseño de puentes en el país.

El desarrollo de esta tesis se inspiró en las investigaciones realizadas por el PhD. Octavio Rascón Chávez, específicamente en sus estudios sobre el análisis y modelado de cargas vivas vehiculares. Estos trabajos sirvieron como referencia fundamental para adaptar un modelo de cargas vivas adecuado al contexto boliviano, aplicando conceptos y metodologías que se ajustan a las condiciones específicas del tráfico y las cargas en Bolivia, con el objetivo de optimizar el diseño estructural de puentes en el país.

1.1. Presentación y formulación de problema

1.1.1. Descripción del problema

El diseño de puentes en Bolivia actualmente no cuenta con un reglamento o guía oficial elaborada por algún comité propio del país, por lo que el diseño de puentes se basa fundamentalmente en la norma AASHTO LRFD “Bridge Design Specifications”. Si bien la mayoría de las normas o manuales de Latinoamérica se fundamentaron en la norma AASHTO, supieron adaptar al contexto del propio país en el que viven.

Referente al objeto de estudio que en este caso son las cargas vivas vehiculares, la norma mexicana, argentina y colombiana tienen su propio camión de diseño para el análisis estructural en sus países, Perú también tiene un manual para el diseño de puentes sin embargo utiliza el mismo camión de diseño que la AASHTO LRFD.

La importancia de adaptar el camión de diseño al medio en el que se vive es que se toma en cuenta las cargas reales que transitan por las carreteras y los límites permitidos por cada país. En el caso de Bolivia según la Ley N°441 el peso bruto total máximo permitido y peso bruto total permitido por configuración vehicular es de 45 Ton mientras que en USA según The Secretary Of Transportation el límite federal de peso bruto vehicular máximo es de 80.000 libras equivalente a 36.3 Ton, lo que significa que en Bolivia es permitido el tránsito de vehículos de mayor carga que en Estados Unidos.

La ausencia de un modelo de cargas vivas vehiculares afecta a un diseño estructural óptimo, lo que conlleva a la construcción de estructuras menos seguras y de mayor solicitud de mantenimiento para puentes carreteros en Bolivia.

1.1.2. Formulación del problema

El diseño estructural de puentes aplicando las cargas vivas de la AASHTO LRFD basado en vehículos de carga que cumplen las normas americanas, producen momentos flectores y fuerzas cortantes inferiores a los que ocasionan los vehículos de carga pesados que transitan en las carreteras de Bolivia.

1.2. Justificación

La investigación presente tuvo como objetivo generar un modelo de cargas vivas para el diseño estructural de puentes en Bolivia. La necesidad de llevar a cabo este estudio se originó debido a que los modelos de cargas vivas en las normas internacionales no consideran los grandes pesos transportados por los vehículos de carga en el país. Por lo tanto, la importancia de esta investigación radicó en la propuesta de un modelo específico para realizar el análisis estructural de puentes carreteros en Bolivia.

Otra razón que justificó la realización de este estudio fue el análisis de los registros vehiculares recopilados, que mostró un incremento considerable en la cantidad de vehículos pesados año tras año. Las distribuciones presentadas en el ANEXO II evidenciaron cómo las configuraciones de vehículos más livianos perdieron popularidad con el paso del tiempo, mientras que los vehículos más pesados tendieron a abarcar un mayor porcentaje en las distribuciones. Asimismo, en el histograma anual se pudo observar un aumento escalonado de vehículos pesados de un año a otro.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Definir un modelo de cargas vivas vehiculares para el diseño estructural de puentes en Bolivia.

1.3.2. Objetivos específicos

- Recopilar y analizar los datos del pesaje vehicular en Bolivia
- Simular variables aleatorias de las distancias entre ejes d_1 y d_2

- Calcular y analizar los elementos mecánicos a distintas luces.
- Comparar de elementos mecánicos máximos de las configuraciones vehiculares reales con las especificaciones de la AASHTO LRFD
- Realizar el diseño conceptual del modelo de cargas vivas vehiculares
- Realizar el análisis estadístico correlacional de los datos para validación del modelo conceptual
- Desarrollar el análisis inferencial de las cargas vivas vehiculares para la asignación de cargas del modelo conceptual
- Calcular de las separaciones de las cargas del Modelo Virtual
- Determinar el factor de carga y definir el Modelo Virtual de Cargas Vivas Vehiculares
- Determinar la carga uniformemente distribuida mediante métodos estocásticos.
- Validar el modelo de cargas vivas vehiculares, garantizando un nivel de confiabilidad adecuado y pueda proponerse como modelo oficial para el análisis estructural de puentes en Bolivia, que sea congruente con los métodos y criterios de diseño por estados límite.
- Adoptar Factores de Carga Viva, Presencia Múltiple de Cargas Vivas, Efecto dinámico de la Carga Viva Vehicular

1.4. Hipótesis

Un modelo de cargas vivas vehiculares tomando en cuenta los pesos que regularmente transportan los grandes vehículos de carga en Bolivia, permite obtener momentos flectores y fuerzas cortantes superiores a los que se producen aplicando el modelo de la AASHTO LRFD.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE)

2. MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE)

2.1. Marco teórico contextual

2.1.1. Contexto del transporte en Bolivia

Bolivia, un país ubicado en el corazón de Sudamérica, posee una extensión territorial de aproximadamente 1.098.581 km² y una población de más de 11 millones de habitantes. La red vial en Bolivia es fundamental para el desarrollo socioeconómico del país, ya que facilita el comercio, el transporte de bienes y personas, y permite la conexión entre las diferentes regiones.

La Red Vial Fundamental en Bolivia está compuesta a la fecha de la elaboración del documento por una longitud de 16.272,30 km de carreteras, de las cuales alrededor del 50.6% son pavimentadas.

La Red Vial Fundamental (RVF) es la principal infraestructura vial del país, conformada a la fecha de la elaboración del documento por una longitud de 16.272,30 km de carreteras, de las cuales alrededor del 50.6% son pavimentadas (8.237,8 km), estas carreteras conectan los nueve departamentos y las principales ciudades. La RVF es de vital importancia para el transporte nacional e internacional de mercancías y personas, así como para el turismo y la integración regional.

En Bolivia, los puentes son elementos clave en la infraestructura de transporte, ya que el país cuenta con una geografía diversa y accidentada, que incluye montañas, ríos y valles. Los tipos de puentes más comunes en Bolivia son los puentes de vigas presforzadas, puentes losa y los puentes cajón. Estos puentes enfrentan diversos desafíos en términos de diseño y mantenimiento, como las condiciones climáticas extremas, la variabilidad en los caudales de los ríos, y la exposición a riesgos geológicos, como deslizamientos de tierra y sismos.

Los principales corredores de transporte en Bolivia incluyen las carreteras que conectan a las ciudades de La Paz, Cochabamba, Santa Cruz, Oruro y Potosí, entre otras. Estos corredores facilitan el transporte de mercancías desde y hacia los centros de producción y consumo, así como hacia los países vecinos de Argentina, Brasil, Chile, Paraguay y Perú.

En cuanto a los vehículos que circulan por las carreteras de Bolivia, se encuentran una amplia variedad de tipos, incluyendo automóviles, camiones, autobuses, motocicletas y vehículos de carga pesada. Los vehículos de carga son especialmente relevantes en el contexto del diseño de puentes, ya que su peso y dimensiones influyen directamente en las cargas vivas y, por ende, en el comportamiento y seguridad estructural de los puentes.

En resumen, el contexto del transporte en Bolivia presenta desafíos y características particulares que deben ser tomados en cuenta en el diseño y mantenimiento de puentes. El desarrollo de un modelo de cargas vivas vehiculares específico para el país es esencial para garantizar una infraestructura vial segura y adecuada a las condiciones locales.

2.1.2. Normativas y reglamentaciones en Bolivia

Dentro de las normativas técnicas aplicables en Bolivia se consideran normas internacionales, como las especificaciones del American Institute of Steel Construction (AISC), American Concrete Institute (ACI) y American Association of State Highway and Transportation Officials - Load and Resistance Factor Design (AASHTO LRFD), que son referenciadas en casos donde las normativas nacionales no aborden ciertos aspectos específicos, sobre todo en puentes porque no existe una norma de diseño y construcción de puentes actualmente.

En Bolivia, las normativas y reglamentaciones relacionadas con el diseño y construcción de puentes y carreteras son fundamentales para garantizar la seguridad y calidad de la infraestructura vial. La Ley N°441 "Ley de Control de Pesos y Dimensiones Vehiculares en la Red Vial Fundamental" es una de las leyes más importantes en este ámbito, estableciendo límites de peso y dimensiones para los vehículos que circulan por las carreteras del país, con el fin de preservar la integridad y vida útil de las vías.

Entre las instituciones encargadas de la regulación y supervisión de la infraestructura vial en Bolivia se encuentran:

1. Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda: Este ente rector es el principal responsable de la formulación, implementación y seguimiento de políticas públicas relacionadas con la infraestructura vial en Bolivia. Coordinan y supervisan las acciones

de las diferentes instituciones involucradas en el desarrollo y mantenimiento de la infraestructura vial en el país.

2. Administradora Boliviana de Carreteras (ABC): La ABC se encarga de la administración, construcción, conservación y mantenimiento de la Red Vial Fundamental en Bolivia. Esta institución garantiza que los puentes y demás infraestructuras viales cumplan con las normativas y reglamentaciones vigentes, incluyendo la Ley N°441. Además, la ABC es responsable de supervisar y fiscalizar las obras de construcción y mantenimiento de puentes y carreteras a nivel nacional.
3. Vías Bolivia: Vías Bolivia es la institución encargada de la administración y control de las estaciones de peaje y pesaje en las carreteras de la Red Vial Fundamental. En el marco de la Ley N°441, esta entidad tiene un rol crucial en el control de pesos y dimensiones vehiculares para evitar la sobrecarga y daños a la infraestructura vial. Vías Bolivia trabaja en estrecha colaboración con el Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda y la ABC.

Además de estas instituciones, las autoridades regionales y municipales también desempeñan un papel importante en la supervisión y mantenimiento de las redes viales de su jurisdicción, en coordinación con la ABC y el Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda.

2.1.3. Configuraciones vehiculares disponibles en Bolivia

En Bolivia, existen 69 diferentes configuraciones vehiculares establecidas por la Ley N°441 "Ley de Control de Pesos y Dimensiones Vehiculares en la Red Vial Fundamental". Estas configuraciones están diseñadas para regular los distintos tipos de vehículos que transitan por las carreteras del país y garantizar la seguridad y el buen estado de las infraestructuras viales. Dichas configuraciones se encuentran detalladas en el Anexo 3 de la ley mencionada y, para fines de la presente tesis, se detallan en el Anexo 1.

Adicionalmente, en la toma de registros por parte de Vías Bolivia, se incluye una configuración número 70, la cual se emplea para clasificar aquellos camiones que no corresponden a ninguna de las 69 configuraciones establecidas en la Ley N°441. De esta forma, se asegura un registro más completo y preciso de los vehículos que circulan en la red vial fundamental del país. La

existencia de esta gran variedad de configuraciones vehiculares refleja la diversidad y complejidad del transporte de carga en Bolivia, lo cual debe ser tomado en cuenta en los estudios y análisis relacionados con el diseño y la seguridad de puentes y otras infraestructuras viales.

2.1.4. Estudios previos y trabajos relacionados

En el ámbito de la ingeniería de puentes y la modelación de cargas vivas vehiculares, se han llevado a cabo diversas investigaciones y trabajos previos que han influido en las prácticas actuales. Estos estudios han sido fundamentales para el desarrollo de normativas y el diseño de infraestructura vial en América Latina y el mundo.

Uno de los estudios más relevantes en este campo es el diseño del camión HL-93, utilizado en la norma AASHTO LRFD (American Association of State Highway and Transportation Officials - Load and Resistance Factor Design). El camión HL-93 fue desarrollado para representar el tráfico vehicular típico en carreteras de América del Norte y es utilizado ampliamente en el diseño de puentes. Este modelo de carga viva incluye un camión de carga (representando vehículos de múltiples ejes) y una carga uniforme distribuida en paralelo para considerar la presencia de otros vehículos en el puente.

En cuanto a estudios relacionados con la región, el Dr. Octavio A. Rascón Chávez ha realizado investigaciones significativas en el campo de la ingeniería de puentes y cargas vivas en México. Entre sus trabajos más destacados se encuentran "Análisis normativo y estadístico de cargas vivas en puentes en México" y "Modelo de cargas vivas vehiculares para diseño estructural de puentes en México". Estas investigaciones han sido de gran relevancia en el desarrollo de normativas y la adopción de modelos de cargas vivas adecuados para la realidad mexicana, considerando las diferencias en el tráfico vehicular y las características geográficas respecto a otras regiones.

En América Latina y el mundo, las tendencias y desarrollos actuales en el campo de la ingeniería estructural aplicados a puentes se enfocan en la optimización del diseño, el uso de materiales más avanzados y sustentables, y la incorporación de tecnologías de monitoreo y mantenimiento. También se están realizando investigaciones sobre la adaptación de los modelos de carga viva, como el HL-93, a las condiciones específicas de cada país, considerando factores como el peso

y dimensiones de los vehículos locales, la frecuencia de tráfico y la variabilidad en la configuración de los puentes.

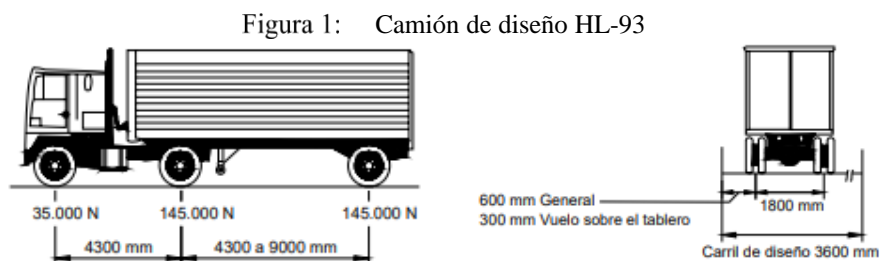
Resumiendo, este punto se puede decir que el diseño de puentes y la modelación de cargas vivas vehiculares en Bolivia y regiones similares se han visto influenciados por investigaciones y trabajos previos, tanto a nivel internacional como regional. Estos estudios han sido cruciales para el desarrollo de normativas, la adopción de modelos de cargas vivas adecuados y la incorporación de innovaciones y avances en el campo de la ingeniería estructural.

2.2. Marco teórico conceptual

2.2.1. Cargas vivas en diferentes normas

Es muy común que en Latinoamérica se base las normas o guías de diseño respecto a las normas americanas de instituciones como la ACI o AASHTO, esto no quiere decir que las adaptaciones sean una copia traducida al pie de la letra de la misma. Es importante tomar en cuenta las situaciones y condiciones que vive el país para tener una correcta interpretación y adaptar la norma a un entorno propio.

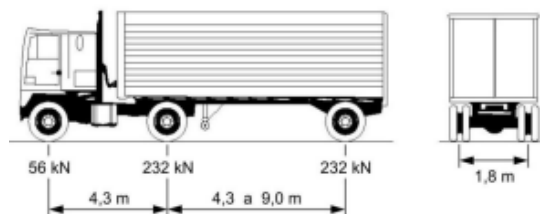
- AASHTO LRFD (Estados Unidos)



Fuente: Art. 3.6.1.2.2 AASHTO LRFD 2017

- CIRSOC 801 (Argentina)

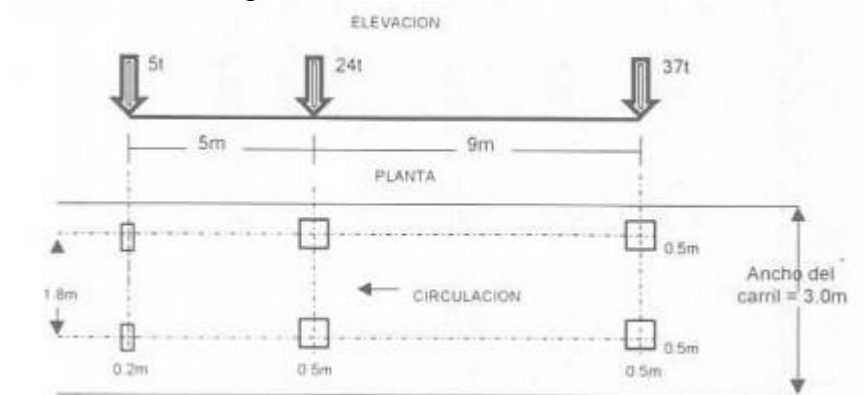
Figura 2: Camión de diseño HL-13_AR



Fuente: Art. 3.6.1.2.2 CIRSOC-801 2019

- Norma SCT de cargas vehiculares (México)

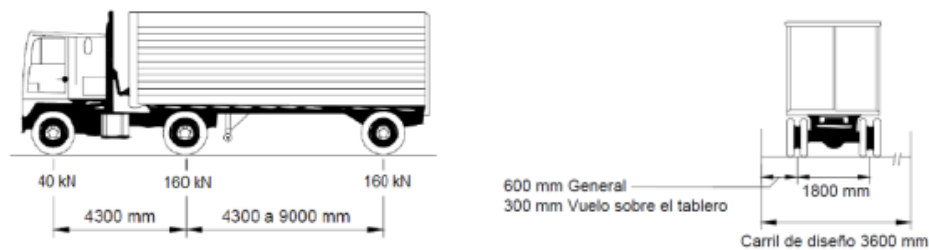
Figura 3: Camión de diseño IMT 66.5



Fuente: Art. 4.1.2.1.2.1 Norma SCT de Cargas Vehiculares para Diseño de Puentes Carreteros

- CCP 14 LRFD (Colombia)

Figura 4: Camión de diseño CC-14



Fuente: Art. 3.6.1.2.2 Norma Colombiana de diseño de Puentes CCP-14

En países como Perú, Chile y Bolivia, se aplica las cargas indicadas en la AASHTO LRFD, sin embargo, es importante tomar en cuenta que la AASHTO no impone su modelo de cargas vivas vehicular más por el contrario sugiere cambiar en sitios específicos en el comentario C3.6.1.2.1 “Consideration should be given to site-specific modifications to the design truck, design tandem, and/or the design lane load under the following conditions: The legal load of a given jurisdiction is significantly greater than typical” (AASHTO LRFD, 2017, p. 3-21)

2.2.2. Límites de peso

Para el validar el proyecto es importante tener en cuenta los límites de carga que existen en cada país.

En el reporte al congreso “Compilation of Existing State Truck Size and Weight Limit Laws” de los estados unidos se puede encontrar que el límite de carga bruto es el equivalente a 36.3 Ton aproximadamente convertido a S.I., citando la norma federal: “In 1982, Congress passed the Surface Transportation Assistance Act (STAA), which imposed the Federal 80,000 lb. limit as a mandate across the entire Interstate Highway System.” (The U.S. Department of transportation, 2015, p. 4)

La última ley actualizada respecto al límite de cargas en Bolivia es la Ley N°441 “LEY DE CONTROL DE PESOS Y DIMENSIONES VEHICULARES EN LA RED VIAL FUNDAMENTAL” se puede encontrar que el ARTÍCULO 10 (peso bruto total máximo permitido y peso bruto total permitido por configuración vehicular) indica: “Para la circulación de vehículos en la Red Vial Fundamental, se deberá cumplir con las siguientes condiciones: El peso bruto total máximo permitido conforme a configuración es de 45,00 toneladas.” (Ley N°441, 2013, p. 5)

2.2.3. Cálculo líneas de influencia

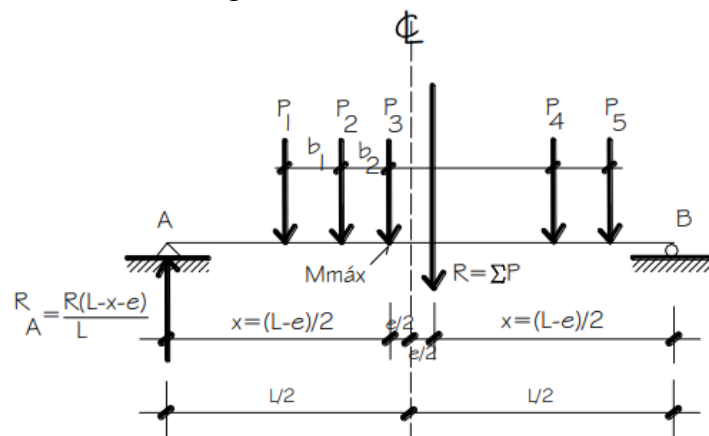
Para la elaboración y generación de gran cantidad de datos de los elementos mecánicos, resulta poco factible realizar modelaciones virtuales para cada longitud de puente por lo que las líneas de influencia son una gran herramienta a la hora de generar cálculos de los momentos flectores y fuerzas cortantes.

Para tener en claro que es una línea de influencia se tiene la siguiente definición: “Una línea de influencia puede definirse como un diagrama cuyas ordenadas muestran la magnitud y el carácter de algunas funciones de una estructura cuando una carga unitaria se mueve a lo largo de esta. Cada ordenada del diagrama da el valor de la función cuando la carga está situada en la posición asociada a esa ordenada” (McCormac, 2010, p. 186).

2.2.4. Teorema de Barré

Dividiendo a la mitad la distancia entre la resultante de un conjunto de cargas y la carga más cercana a ella, por un eje que pasa por el centro del vano, el momento máximo de flexión en una viga simplemente apoyada se ubica casi siempre bajo la carga más cercana a la resultante. En casos en los que las distancias son iguales, se encuentra bajo la carga de mayor peso (Rodríguez Serquén, 2017, p. 34). Tomando momentos en el punto donde incide la carga P3 en el conjunto de cargas ilustrado, se tiene que:

Figura 5: Teorema de Barré



Fuente: PUENTES de Rodríguez Serquén

2.2.5. Análisis estadístico

El análisis estadístico es una herramienta esencial en el diseño y evaluación de puentes, ya que permite modelar la variabilidad y la incertidumbre asociadas con las cargas, las propiedades de los materiales y otros factores que influyen en el comportamiento estructural de los puentes. El uso adecuado del análisis estadístico en el diseño de puentes puede mejorar la seguridad, la durabilidad y la eficiencia en la construcción (Moses, 2001).

Para el análisis estadístico y probabilístico de los datos recopilados es primordial tener conceptos claros acerca de las variables aleatorias y distribuciones de las probabilidades. Por lo que definiendo el primer concepto se tiene que “Una variable aleatoria es una función que asocia un número real con cada elemento del espacio muestral.” (Walpole et al., 2012, p. 81).

En 1939 el físico sueco Waloddi Weibull introdujo la distribución de Weibull, la cual se ha utilizado ampliamente en años recientes para tratar gran variedad de problemas de confiabilidad y de prueba de vida, estimando la probabilidad basada en datos medidos o asumidos (Walpole et al., 2012, p. 203).

2.2.6. Diseño por estados límite

El diseño por estados límite es un enfoque moderno en la ingeniería estructural que se basa en la evaluación del comportamiento de una estructura en diferentes situaciones límite, en lugar de depender únicamente de los factores de seguridad globales. Este enfoque permite a los ingenieros evaluar y optimizar la seguridad, durabilidad y funcionalidad de las estructuras en función de las condiciones de carga y las características del material (AASHTO LRFD, 2017).

Los estados límite en el diseño de puentes se clasifican en dos categorías principales: estados límite de servicio (SLS) y estados límite últimos (ULS) (AASHTO LRFD, 2017).

1. Estados límite de servicio (SLS): Estos estados límite están relacionados con el funcionamiento y la durabilidad de la estructura durante su vida útil, y se refieren a condiciones normales de uso y mantenimiento. Entre los criterios considerados en los estados límite de servicio se encuentran la deflexión, las vibraciones, la fatiga y la corrosión, entre otros (AASHTO LRFD, 2017).
2. Estados límite últimos (ULS): Estos estados límite están asociados con la seguridad estructural y la resistencia de la estructura ante condiciones extremas, como cargas excepcionales, terremotos o eventos extremadamente raros. En el diseño de puentes, los estados límite últimos incluyen la resistencia al colapso, la estabilidad global, el pandeo y la resistencia al deslizamiento, por ejemplo (AASHTO LRFD, 2017).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

3.1. Diseño: Análisis cuantitativo y cualitativo

El diseño de la metodología empleada en esta tesis combina el análisis cuantitativo y cualitativo de los datos recopilados. En primer lugar, se lleva a cabo un análisis cuantitativo de los registros de pesaje de Vías Bolivia, que abarca un total de 3,614,189 vehículos de diversas configuraciones vehiculares. Estos datos provienen de 18 puntos de pesaje distribuidos en todo el país, de un total de 30 puntos de pesaje, ya que 12 de ellos no están en funcionamiento.

Mediante el uso de histogramas, se identifican las configuraciones vehiculares predominantes en las carreteras bolivianas. Posteriormente, se examinan las cargas asociadas a estas configuraciones predominantes y, utilizando métodos estadísticos, se determinan cuáles son las más propensas a exceder el límite de pesaje. Además, se realiza un análisis estadístico de los elementos mecánicos generados por los camiones predominantes en puentes de distintas longitudes, evaluando en qué porcentaje estas configuraciones exceden el límite establecido por la LEY N°441.

3.2. Población, muestra y estadística

La población en estudio consiste en los vehículos registrados en los 18 puntos de pesaje operativos de Vías Bolivia. La muestra de datos incluye 3,614,189 vehículos de diversas configuraciones vehiculares, y se emplean análisis estadísticos para identificar las configuraciones predominantes y su impacto en los límites de pesaje y la estructura de los puentes.

Una vez obtenida la información estadística sobre las configuraciones vehiculares predominantes en Bolivia, se compara el camión HL-93 con el camión de diseño sugerido en la investigación y los camiones predominantes en Bolivia y ver la incidencia que tienen tomando en cuenta los elementos mecánicos como parámetro medible de los mismo. Posteriormente, se realiza el cálculo estructural de un puente utilizando el camión de diseño sugerido y se compara su incidencia con la del camión HL-93.

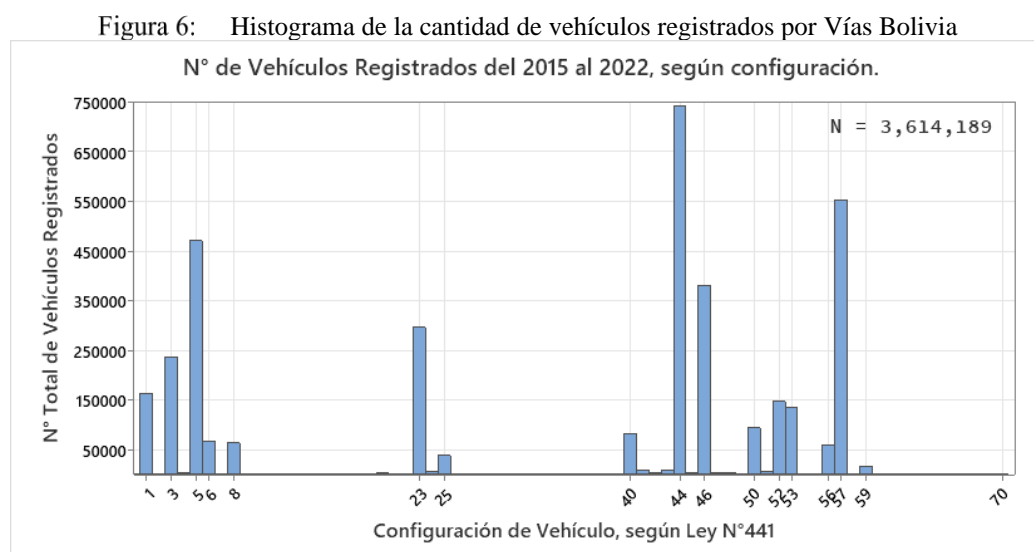
CAPÍTULO IV: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Recopilación y análisis de datos de pesaje vehicular en Bolivia

4.1.1. Análisis de las configuraciones vehiculares predominantes registrados

En este apartado, se llevó a cabo la recopilación y análisis de los datos proporcionados por Vías Bolivia, que consistían en un informe de control de pesajes desde 2015 hasta finales de 2022. Este informe contenía un total de 3,614,189 registros a lo largo de los últimos 8 años, e incluía vehículos con 69 configuraciones vehiculares distintas, según lo definido por la Ley N°441 “LEY DE CONTROL DE PESOS Y DIMENSIONES VEHICULARES EN LA RED VIAL FUNDAMENTAL”.



Fuente: Elaboración propia.

Al analizar estos registros y generar el histograma representado en la "Figura 6", se identificaron las cinco configuraciones vehiculares predominantes, que representaban las siguientes proporciones y descripciones según la LEY N°441:

Tabla 1: Configuraciones vehiculares predominantes

Configuración	Porcentaje	Descripción según LEY N°441
5	13%	1RS-2RD
23	8.18%	1RS-2RD 1RD-1RD
44	20.51%	1RS-1RD 3RD
46	10.53%	1RS-1RD 1RD-2RD
57	15.3%	1RS-2RD 3RD

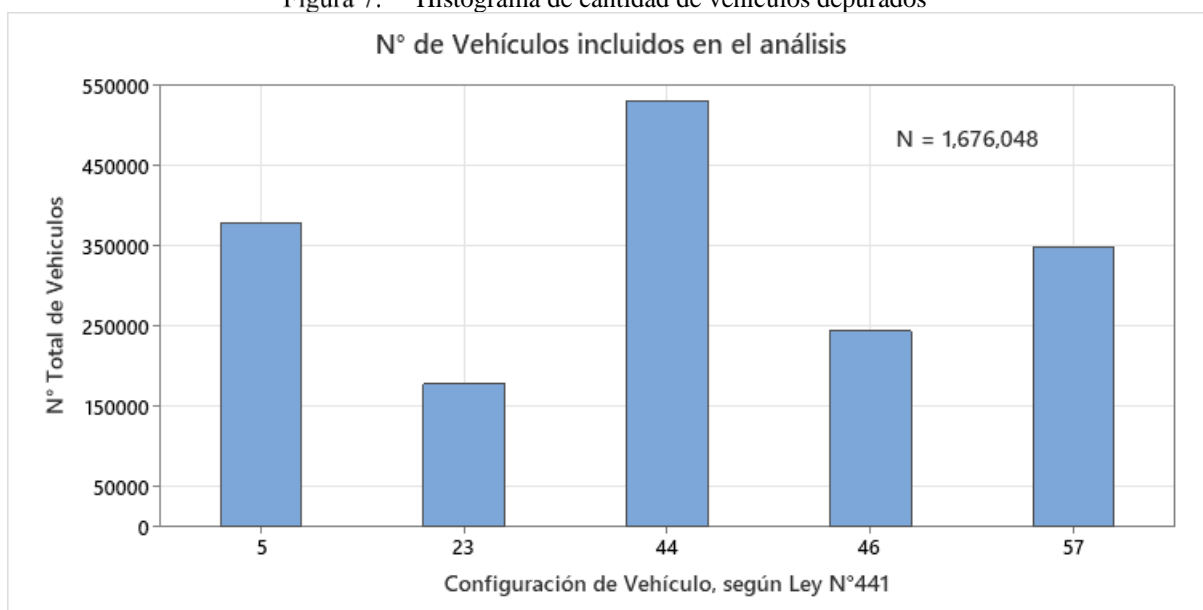
Fuente: Elaboración propia.

El proyecto se centró principalmente en el análisis de estas cinco configuraciones, ya que, además de ser las más comunes, también eran las que llevan mayor carga, a excepción de la configuración 5, que resultó relevante para el diseño del tándem.

4.1.2. Depuración y ajuste de datos de las configuraciones relevantes

Para realizar un análisis más preciso, se depuraron los datos, eliminando aquellos con errores humanos, como valores negativos o pesos excesivos en un solo eje, así como registros de estaciones no punitivas que solo proporcionaban el peso total del camión. Este proceso de depuración fue necesario, ya que era fundamental contar con el peso por ejes de los camiones para el proyecto. Después de la depuración, se obtuvo un total de 1,676,048 registros para analizar y realizar la estadística correspondiente. Inicialmente, las configuraciones más comunes abarcaban el 67.52% de los datos, pero tras las depuraciones respectivas, se contó con el 46.4% de los registros iniciales para trabajar. Esta depuración permitió mejorar la estadística, generando resultados más confiables y minimizando la varianza debido a errores no previstos.


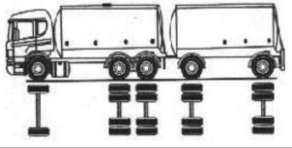
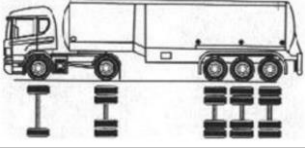
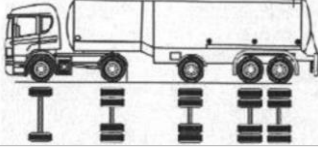
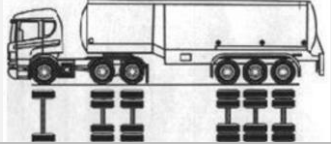
Figura 7: Histograma de cantidad de vehículos depurados



Fuente: Elaboración propia.

Luego de llevar a cabo la depuración de los datos, se obtuvo la siguiente distribución porcentual en la muestra para las configuraciones vehiculares analizadas, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2: Configuraciones vehiculares incluidas en el análisis

Configuración	Porcentaje	Descripción según LEY N° 441	Esquema
5	22.49%	1RS-2RD	
23	10.61%	1RS-2RD 1RD-1RD	
44	31.62%	1RS-1RD 3RD	
46	14.53%	1RS-1RD 1RD-2RD	
57	20.75%	1RS-2RD 3RD	

Fuente: Elaboración propia.

Al observar la distribución porcentual, se constató que la relación entre las cinco configuraciones predominantes se mantenía en comparación con la Figura 6, lo que permitió conservar la integridad de los registros para las configuraciones vehiculares más relevantes. De esta manera, se pudo centrar el análisis en las configuraciones más importantes en términos de carga transportada, asegurando un análisis estadístico sólido y confiable.

4.1.3. Análisis de los pesos brutos en configuraciones vehiculares principales

En la presente investigación, se utilizó la nomenclatura C5, C23, C44, C46 y C57 para identificar las configuraciones 5, 23, 44, 46 y 57 de la Ley N°441 respectivamente. Se analizaron los histogramas de pesos brutos vehiculares para cada configuración, incluyendo datos estadísticos como la media, mediana, tamaño de muestra, máximos, mínimos, desviación estándar y coeficiente de variación. Además, se examinó el porcentaje de vehículos que excedieron el límite permitido por la Ley N°441, como se muestra en la Tabla 3. Al analizar los datos de cada configuración vehicular, se encontraron los siguientes resultados:

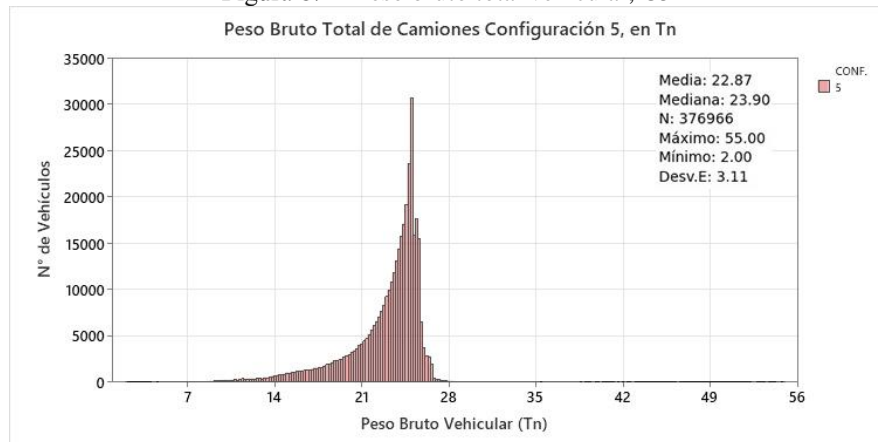
Tabla 3: Valores promedio de peso bruto total y porcentaje de vehículos que exceden el límite permitido por la Ley N°441

Configuración	Peso Bruto Total Promedio (Ton)	Peso Bruto Total Permitido	% de vehículos excedidos
5	22.872	25	19.88%
23	42.064	45	28.45%
44	40.265	43	28.49%
46	42.488	45	14.71%
57	42.197	45	23.65%

Fuente: Elaboración propia.

Para el vehículo C5 (Figura 8), se obtuvo una media de 22.87 Ton, mediana de 23.90 Ton, tamaño de muestra de 376,966, un máximo de 55 Ton, un mínimo de 2 Ton, desviación estándar de 3.11 y un coeficiente de variación del 13.58%. Estos resultados sugieren que los vehículos C5 presentan una distribución de pesos bastante homogénea. Además, el 19.88% de los vehículos de esta configuración excedieron el peso bruto total permitido de 25 Ton.

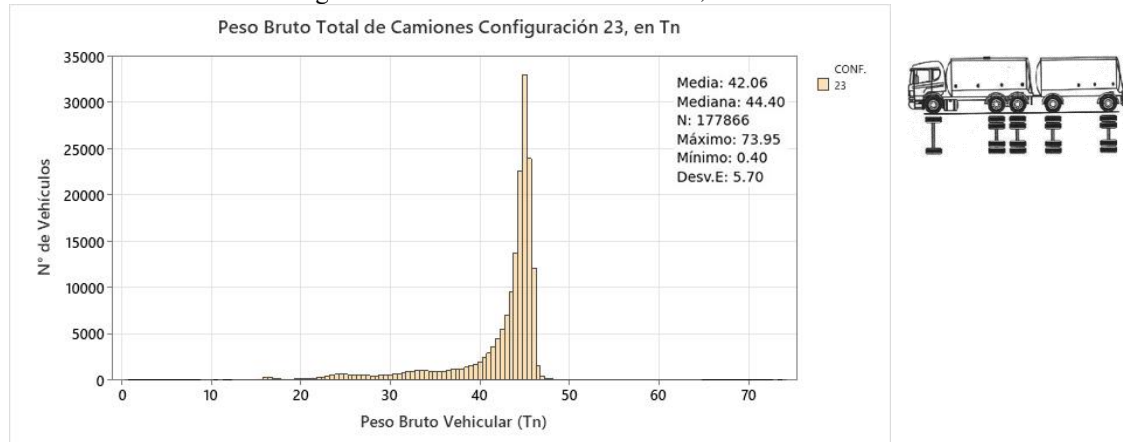
Figura 8: Peso bruto total vehicular, C5



Fuente: Elaboración propia.

En el caso del vehículo C23 (Figura 9), los resultados fueron una media de 42.06 Ton, mediana de 44.4 Ton, tamaño de muestra de 177,866, un máximo de 73.95 Ton, un mínimo de 0.4 Ton, desviación estándar de 5.7 y un coeficiente de variación del 13.56%. Esto indica que los vehículos C23 tienen una distribución de pesos ligeramente más dispersa que los C5. El análisis también reveló que el 28.45% de los vehículos C23 sobrepasaron el peso bruto total permitido de 45 Ton.

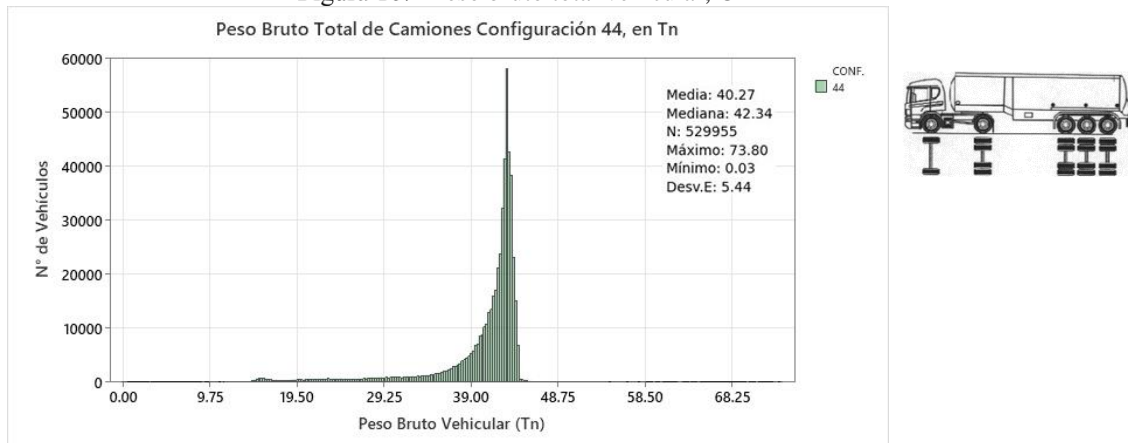
Figura 9: Peso bruto total vehicular, C23



Fuente: Elaboración propia.

Para el vehículo C44 (Figura 10), se registraron una media de 40.27 Ton, mediana de 42.34 Ton, tamaño de muestra de 52,995, un máximo de 73.8 Ton, un mínimo de 0.03 Ton, desviación estándar de 5.44 y un coeficiente de variación del 13.50%. Esto muestra que los vehículos C44 tienen una distribución de pesos similar a los C23. En esta configuración, el 23.65% de los vehículos excedieron el límite del peso bruto total permitido de 43 Ton.

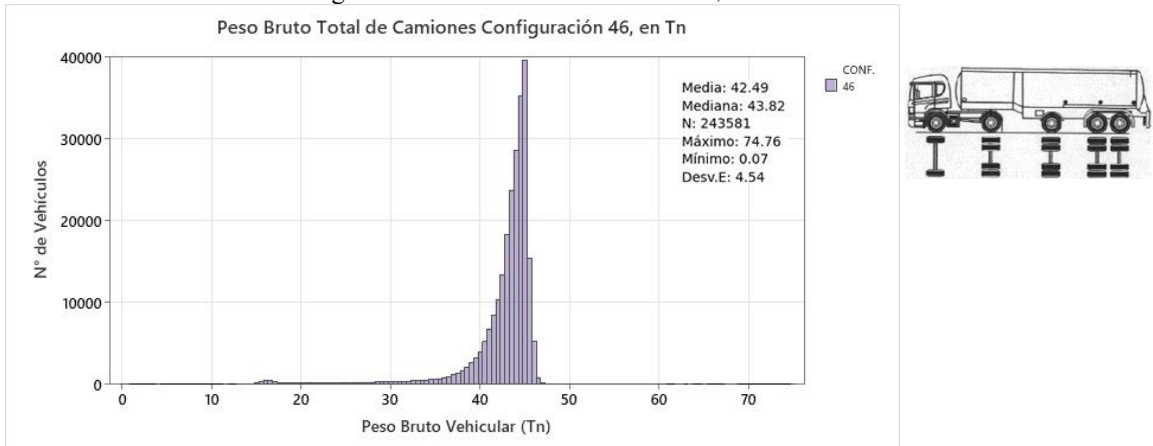
Figura 10: Peso bruto total vehicular, C44



Fuente: Elaboración propia.

En relación al vehículo C46 (Figura 11), se encontró una media de 42.49 Ton, mediana de 43.82 Ton, tamaño de muestra de 243,581, un máximo de 74.76 Ton, un mínimo de 0.07 Ton, desviación estándar de 4.54 y un coeficiente de variación del 10.63%. Estos datos sugieren que los vehículos C46 tienen una distribución de pesos más concentrada en comparación con las otras configuraciones analizadas. Solo el 14.71% de los vehículos C46 superaron el peso bruto total permitido de 45 Ton.

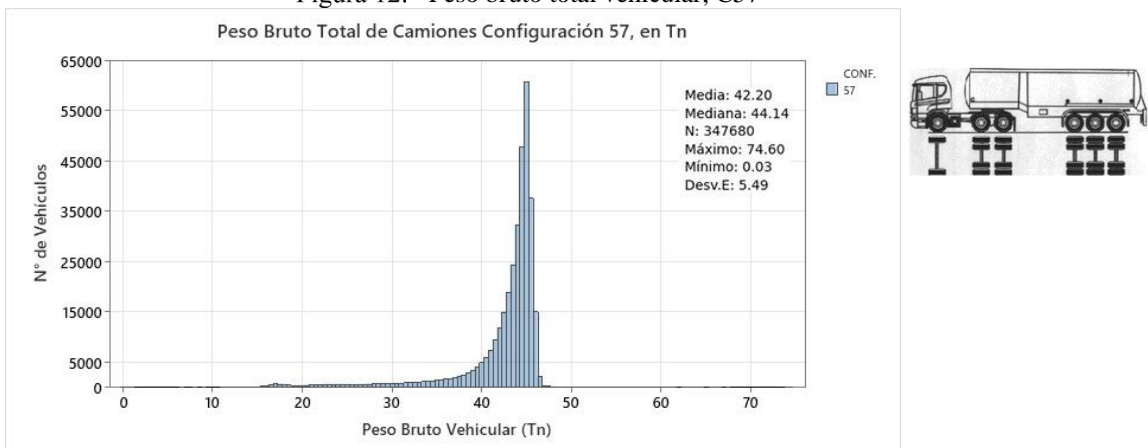
Figura 11: Peso bruto total vehicular, C46



Fuente: Elaboración propia.

Por último, para el vehículo C57 (Figura 12), se observaron una media de 42.2 Ton, mediana de 44.14 Ton, tamaño de muestra de 347,680, un máximo de 74.6 Ton, un mínimo de 0.03, desviación estándar de 5.49 y un coeficiente de variación del 13.02%. Los vehículos C57 presentan una distribución de pesos similar a los C23 y C44. Los resultados reflejados en Tabla 3 indicaron que el 23.65% de los vehículos C57 excedieron el peso bruto total permitido de 45 Ton.

Figura 12: Peso bruto total vehicular, C57



Fuente: Elaboración propia.

El análisis realizado de las cinco configuraciones vehiculares principales demostró que las configuraciones C23, C44 y C57 eran las que transportaban mayor carga en términos de peso bruto total promedio. Además, se observó que los vehículos C23 y C44 presentaban los mayores porcentajes de sobrepeso en comparación con el límite permitido establecido por la Ley N°441, fluctuando entre 28.45% y 28.49%.

4.1.4. Análisis de los pesos por eje en configuraciones vehiculares principales

Para el análisis de este punto se examinaron las figuras 13 a 30, que incluyeron medidas de media, mediana, tamaño de muestra, máximos, mínimos y desviación estándar para cada configuración por eje. Además, desde la figura 31 hasta la 43, se analizaron las frecuencias relativas acumuladas para determinar el porcentaje de vehículos que excedían el límite permitido por la Ley N° 441.

Los datos resumidos del análisis por ejes se pueden encontrar en las tablas 4, 5 y 6, en las que se sustituyó la nomenclatura de los ejes por la letra P y el número correspondiente al eje, siendo P1 el eje 1, P2 el eje 2 y P3 el eje 3 o eje 3'(Suma de Eje 3 más Eje 4, solo en C23 y C46 si correspondía).

Tabla 4: Valores promedio de peso en P1 y porcentaje de vehículos que exceden el límite permitido por la Ley N°441

Configuración	Peso por Eje Promedio (Ton)	Peso por Eje Permitido	% de vehículos excedidos
5	6.46	7	31.6%
23	7.08	7	52.6%
44	6.48	7	23.7%
46	6.80	7	37.6%
57	5.85	7	9.2%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Valores promedio de peso en P2 y porcentaje de vehículos que exceden el límite permitido por la Ley N°441

Configuración	Peso por Eje Promedio (Ton)	Peso por Eje Permitido	% de vehículos excedidos
5	16.41	18	28.1%
23	18.35	18	53.7%
44	11.58	11	59%
46	12.08	11	68.8%
57	14.99	18	10.7%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6: Valores promedio de peso en P3 y porcentaje de vehículos que exceden el límite permitido por la Ley N°441

Configuración	Peso por Eje Promedio (Ton)	Peso por Eje Permitido	% de vehículos excedidos
5	-	-	-
23	16.63	22	7%
44	22.21	25	23.3%
46	23.61	29	6.2%
57	21.38	25	16.8%

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 13, se observaron los pesos en el eje uno del vehículo C5, donde se ajustó perfectamente a una distribución normal sin una gran variación en los datos. En la figura 31 correspondiente a esta configuración, solo el 31.6% de los vehículos excedía el límite permitido por la ley N° 441. La figura 14 correspondía al eje 2, donde se observó una media de 16.41 Ton y una desviación estándar de 2.84 Ton. Aunque no se ajustó perfectamente como en el eje 1 del mismo vehículo, se observó que la tendencia era central, con un pico por encima de una distribución perfecta debido a la gran cantidad de datos manejados. En este eje, el 28.1% de los vehículos excedía el límite permitido. Lo cual muestra que están bastante equilibrados los ejes.

Figura 13: Peso en Eje-1, vehículo C5



Fuente: Elaboración propia.

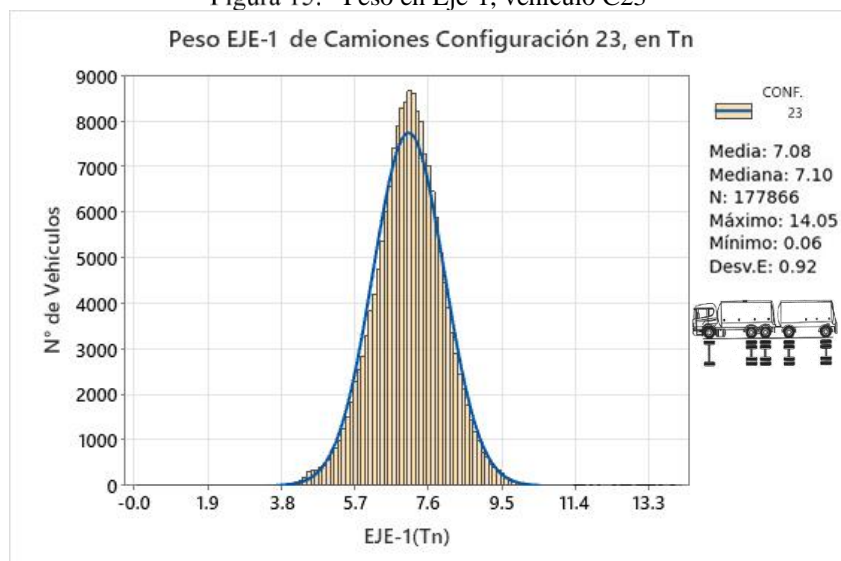
Figura 14: Peso en Eje-2, vehículo C5



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al vehículo de configuración C23, se examinaron las figuras 15 a 19, correspondientes a los ejes 1, 2, 3, 4 y 3', respectivamente. En la figura 15, al igual que en el camión C5, se observó una distribución casi perfecta. En la figura 16, aunque hubo ciertas variaciones en comparación con una distribución normal, se determinó que el comportamiento seguía siendo normal debido a la gran cantidad de datos. Las figuras 17 y 18 mostraron el peso de los ejes 3 y 4 del vehículo C23, donde se apreciaron dos tendencias centrales. Esto se atribuyó a un registro incorrecto de los ejes respectivos, lo cual fue considerado al descartar estos datos en un análisis estadístico. Sin embargo, al analizar detenidamente estos dos ejes, se observó que muchos datos del eje 3 excedían su límite establecido y la misma cantidad de datos que excedían el límite establecido en el eje 4 no tenían cargas asignadas, es decir, la carga del eje 4 era 0. Esto se evidenció en la figura 18, donde se mostró una tendencia de datos en más de 207 mil en 0. Por lo tanto, para continuar con el cálculo estadístico, se creó un quinto eje llamado eje 3', que fue la suma de los ejes 3 y 4. En la figura 19, se observó cómo la distribución tenía un comportamiento normal similar al del eje 2. En esta configuración, el eje 1 tenía un 52.6% de vehículos excedidos, mientras que en el eje 2 era del 53.7%. Estos porcentajes fueron bastante similares y lógicos, ya que estaban directamente relacionados. Sin embargo, en el eje 3 de esta configuración, solo el 7% de los vehículos excedía el límite. Aunque existía una gran diferencia, era comprensible, ya que al asumir un nuevo eje 3, la única forma de conocer el límite era sumando los límites permitidos en los ejes 3 y 4 de la Ley N° 441.

Figura 15: Peso en Eje-1, vehículo C23



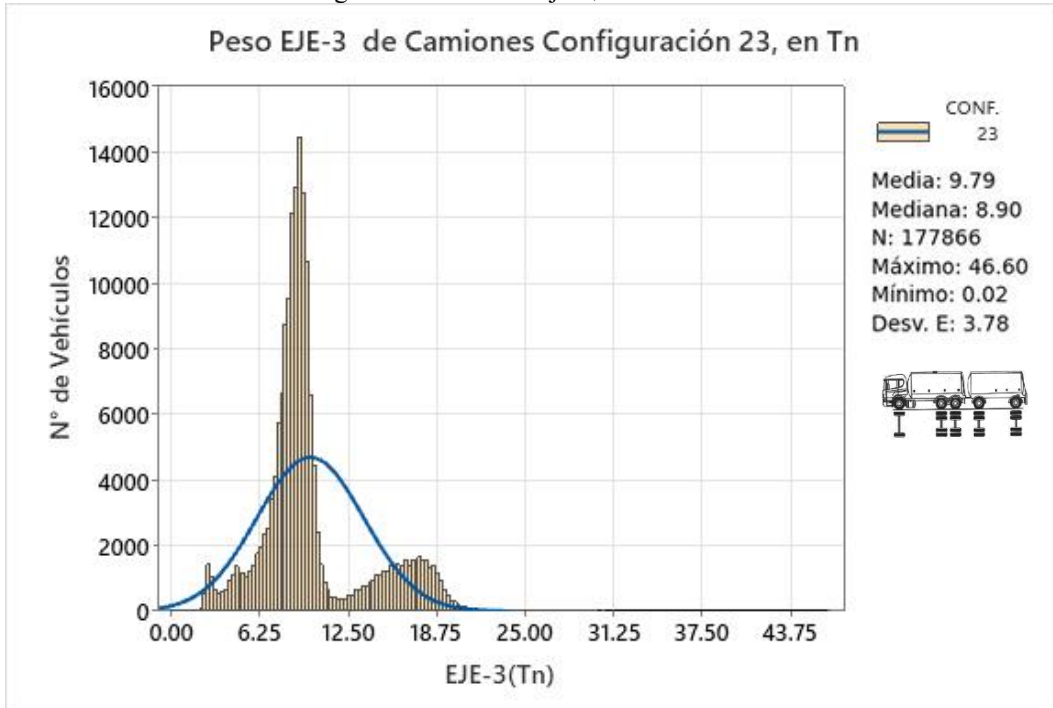
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16: Peso en Eje-2, vehículo C23



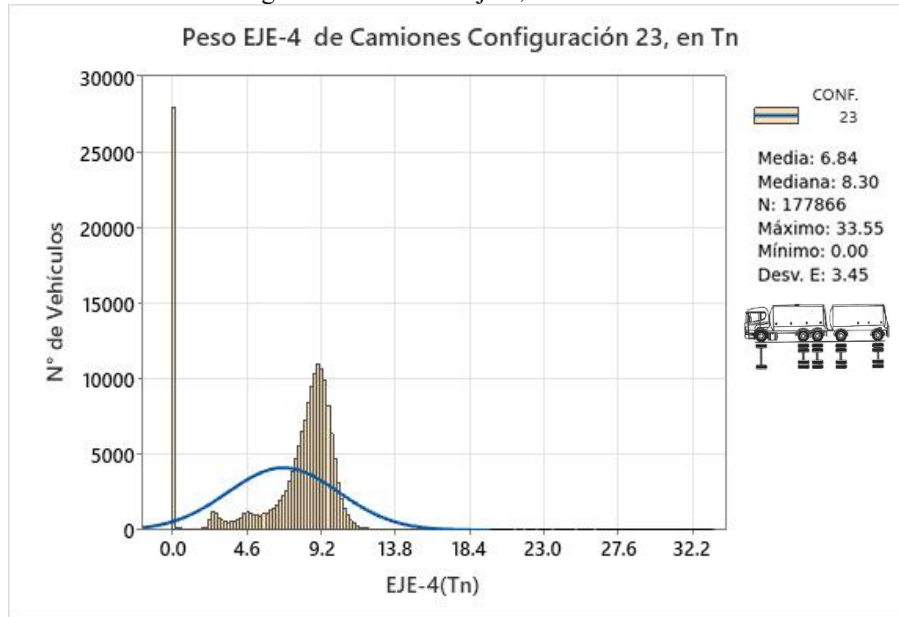
Fuente: Elaboración propia.

Figura 17: Peso en Eje-3, vehículo C23



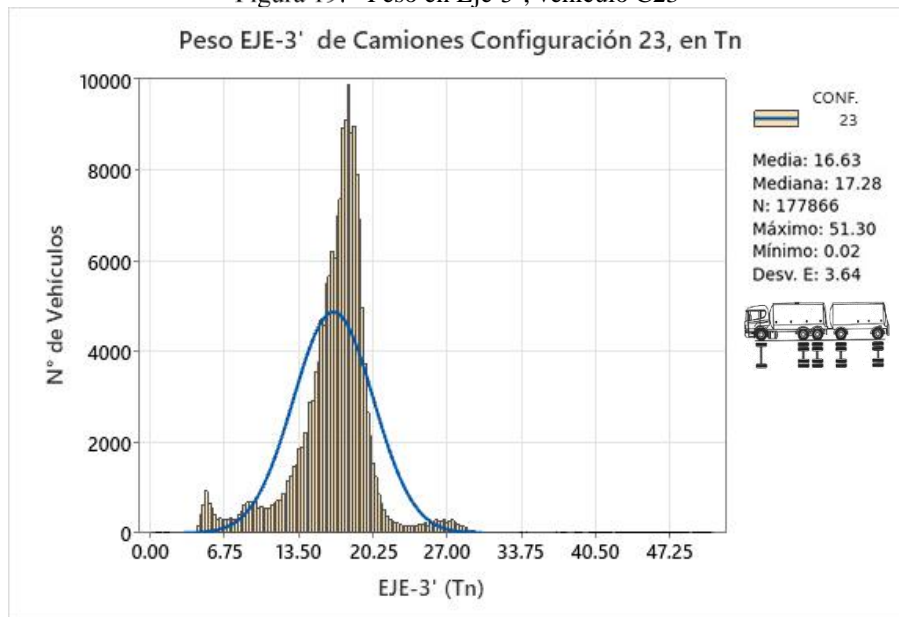
Fuente: Elaboración propia.

Figura 18: Peso en Eje-4, vehículo C23



Fuente: Elaboración propia.

Figura 19: Peso en Eje-3', vehículo C23

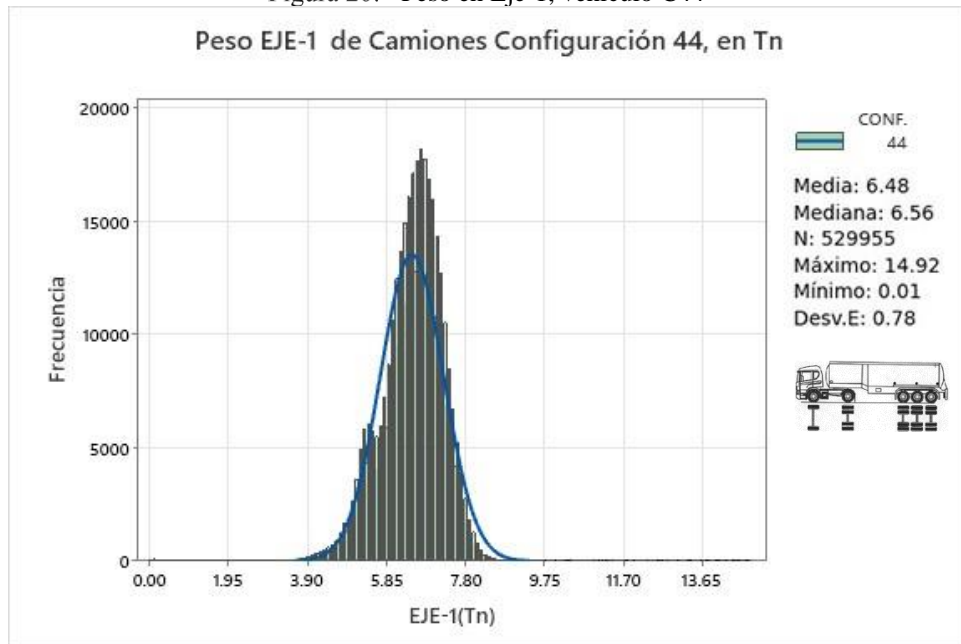


Fuente: Elaboración propia.

Al analizar el vehículo C44, se observaron las gráficas en las figuras 20, 21 y 22. Estas mostraron un comportamiento similar a una distribución normal, lo que indica que la recopilación de datos de este vehículo fue correcta. En el eje 1, el 23% de los vehículos excedía el límite, en el eje 2, el 59%, y en el eje 3, el 23.3%. Al analizar estos datos, se notó que los ejes 1 y 3 eran muy

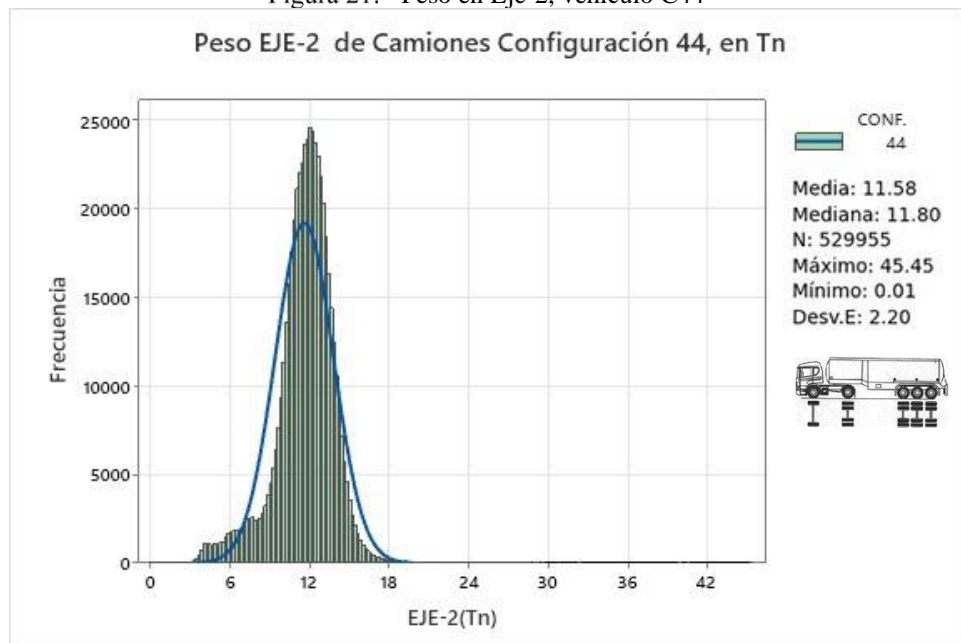
similares, pero había un aumento considerable en el eje 2. Si se calculaba un promedio de estos tres pesos, se obtenía un promedio similar al permitido en la tabla 2 del peso total bruto. Por lo tanto, se pudo asumir que, en este vehículo, en general, existía una mala distribución de carga en los ejes.

Figura 20: Peso en Eje-1, vehículo C44



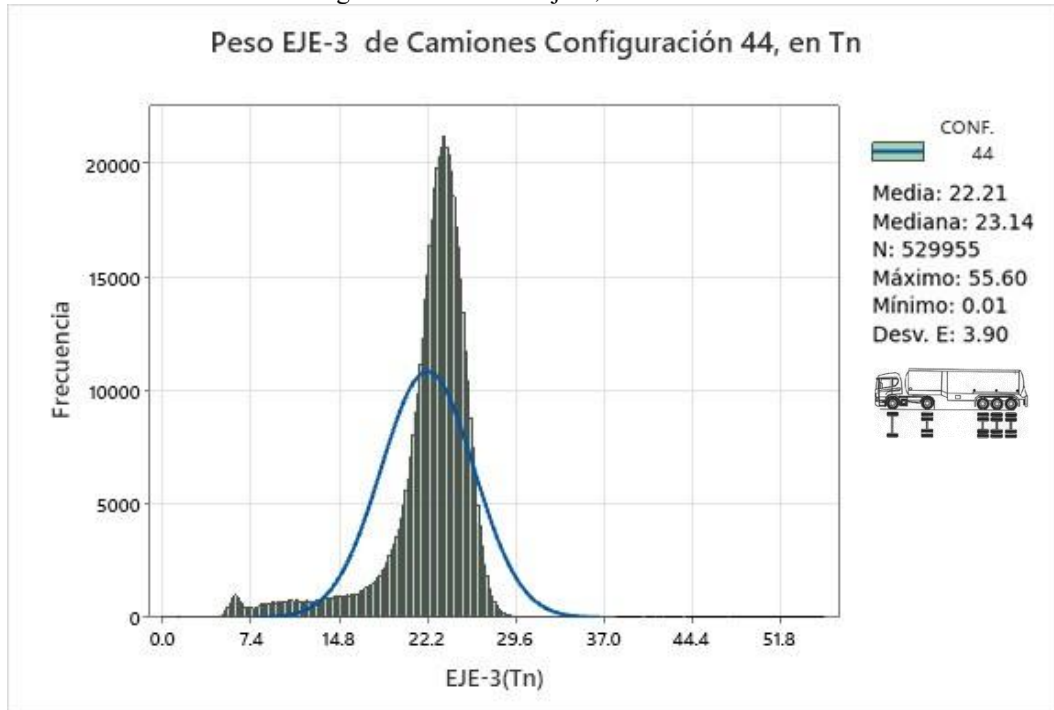
Fuente: Elaboración propia.

Figura 21: Peso en Eje-2, vehículo C44



Fuente: Elaboración propia.

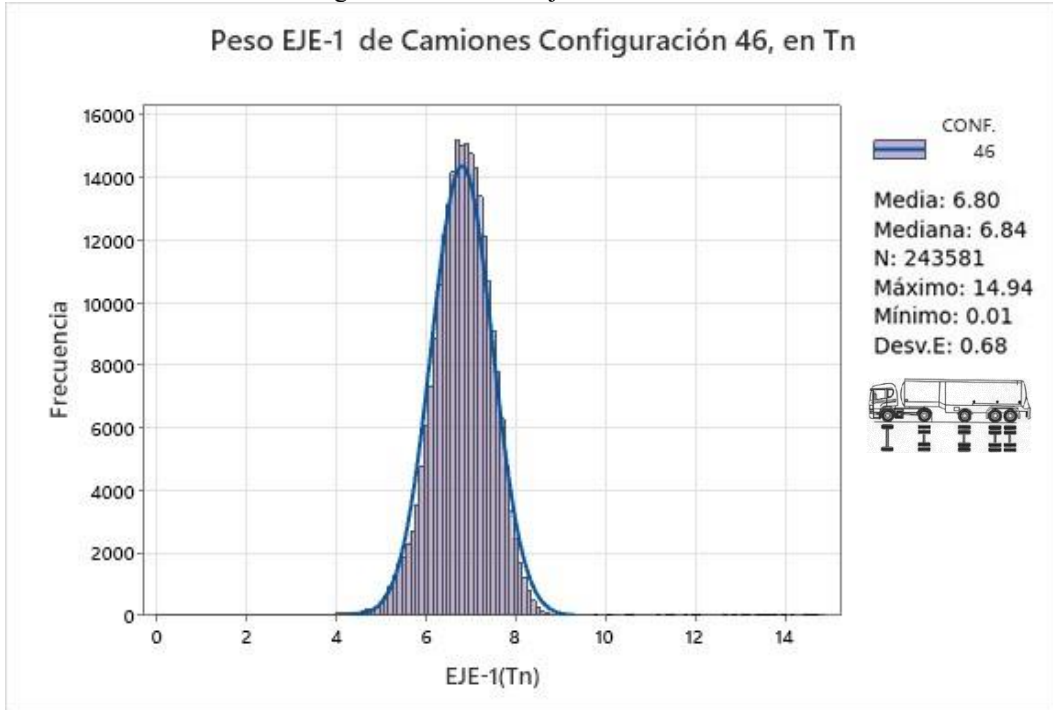
Figura 22: Peso en Eje-3, vehículo C44



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al vehículo C46, se examinaron las gráficas en las figuras 23 a 27. Al igual que en la configuración C23, había cuatro ejes, que para fines de análisis se convirtieron en solo tres ejes. En los ejes 1 y 2, las distribuciones eran normales, y se observó una gran relación entre los datos recopilados y la curva ideal generada. Sin embargo, en los ejes 3 y 4, mostrados en las figuras 25 y 26, las distribuciones eran atípicas. Por lo tanto, al igual que en la configuración C23, se sumaron los ejes 3 y 4 para obtener un eje 3', representado en la figura 27, que mostró una distribución normal aceptable para continuar con el cálculo estadístico. Al analizar las frecuencias relativas acumuladas de los ejes de esta configuración, se encontró que en el eje 1, el 37.6% de los vehículos excedía el límite permisible, en el eje 2, el 68.8% y en el eje 3', el 6.2%. Esto era comprensible, ya que para determinar el límite de peso en este eje, se sumaron los ejes 3 y 4 de la Ley N° 441.

Figura 23: Peso en Eje-1, vehículo C46



Fuente: Elaboración propia.

Figura 24: Peso en Eje-2, vehículo C46



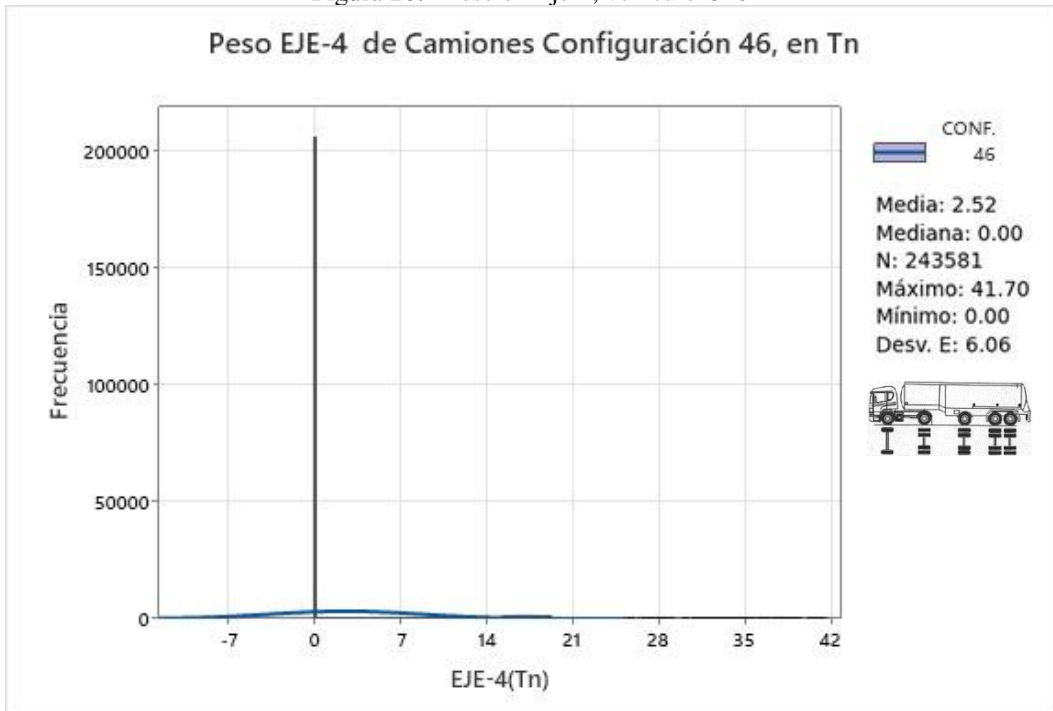
Fuente: Elaboración propia.

Figura 25: Peso en Eje-3, vehículo C46



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26: Peso en Eje-4, vehículo C46



Fuente: Elaboración propia.

Figura 27: Peso en Eje-3', vehículo C23



Fuente: Elaboración propia.

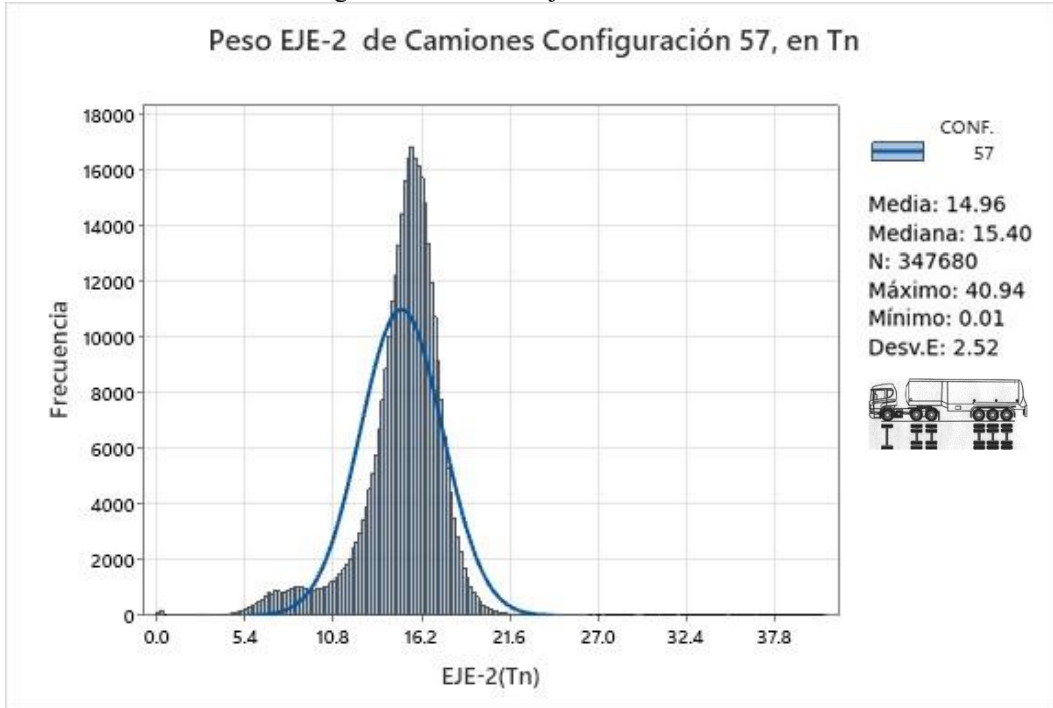
Finalmente, al analizar el vehículo C57 en las figuras 28, 29 y 30, se observó una distribución normal en los tres ejes. Al examinar las frecuencias relativas acumuladas, se encontró que en los ejes 1, 2 y 3, el porcentaje de vehículos que excedían el límite permitido era del 9.2%, 10.7% y 16.8% respectivamente. Estos valores estaban mejor distribuidos que en el resto de los vehículos analizados.

Figura 28: Peso en Eje-1, vehículo C57



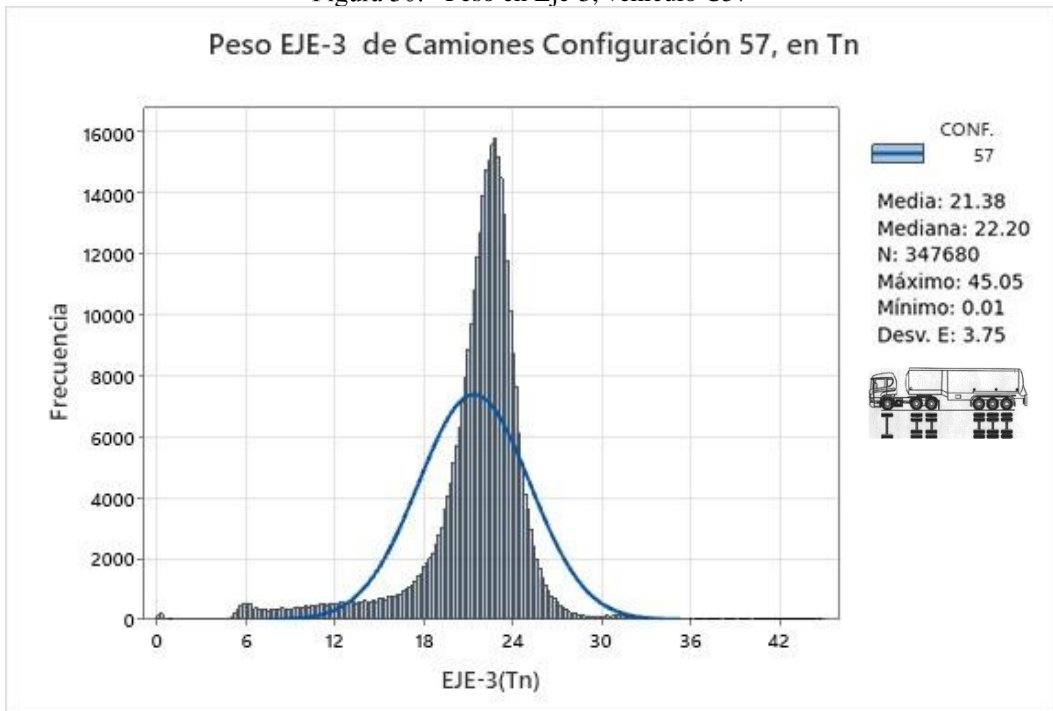
Fuente: Elaboración propia.

Figura 29: Peso en Eje-2, vehículo C57



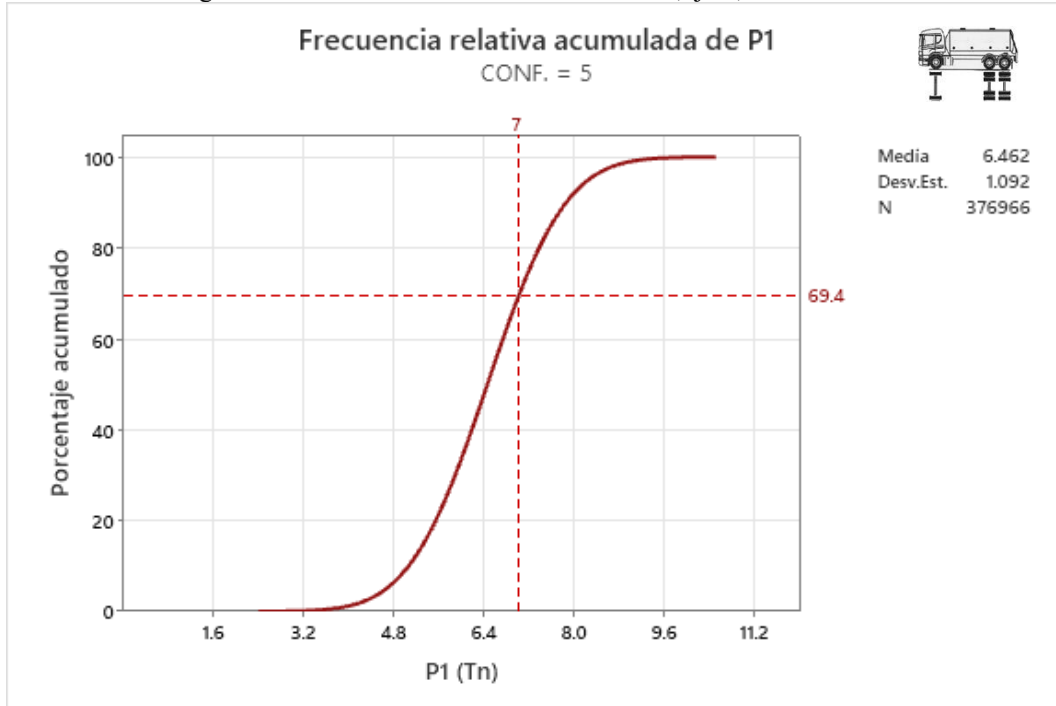
Fuente: Elaboración propia.

Figura 30: Peso en Eje-3, vehículo C57



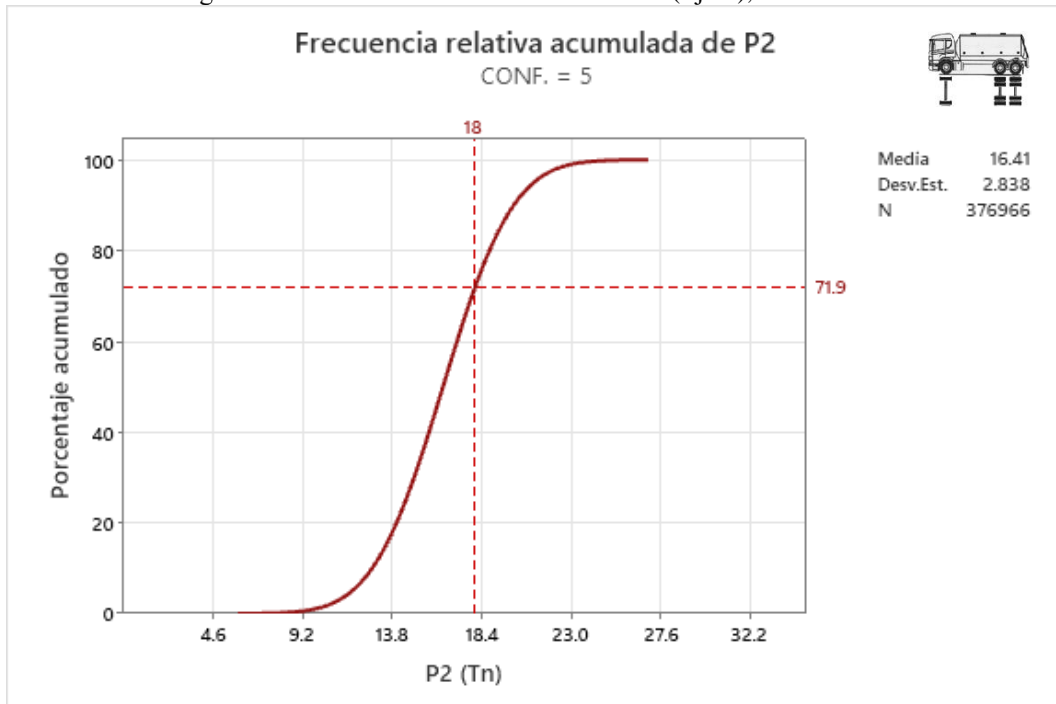
Fuente: Elaboración propia.

Figura 31: Frecuencia relativa acumulada P1(Eje-1), vehículo C5



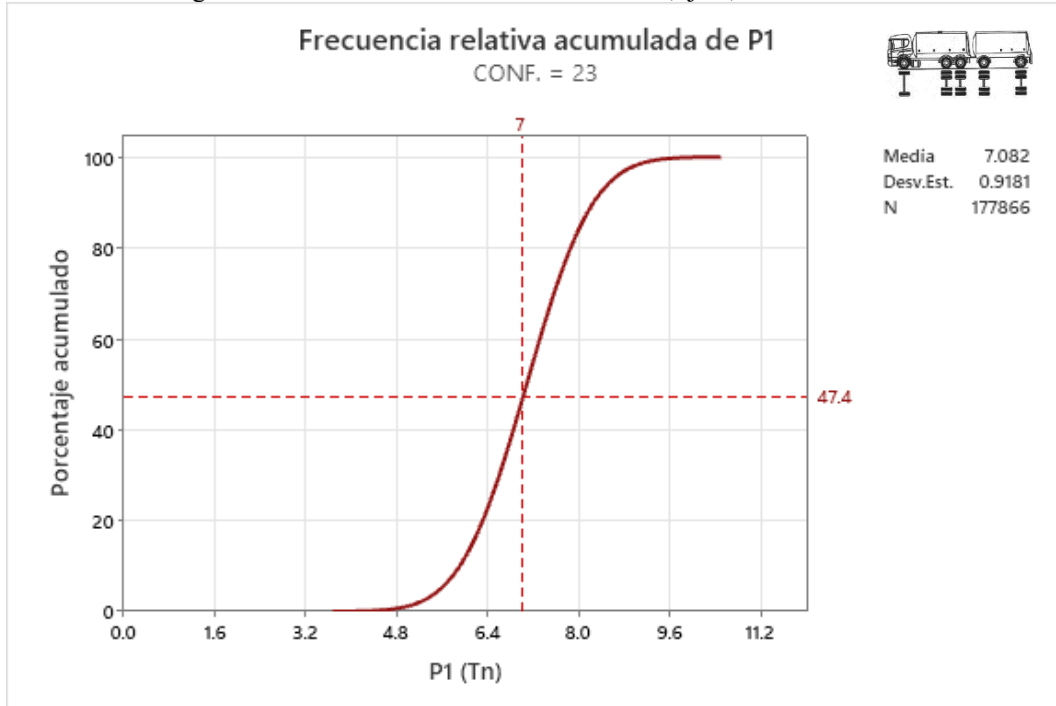
Fuente: Elaboración propia.

Figura 32: Frecuencia relativa acumulada P2(Eje-2), vehículo C5



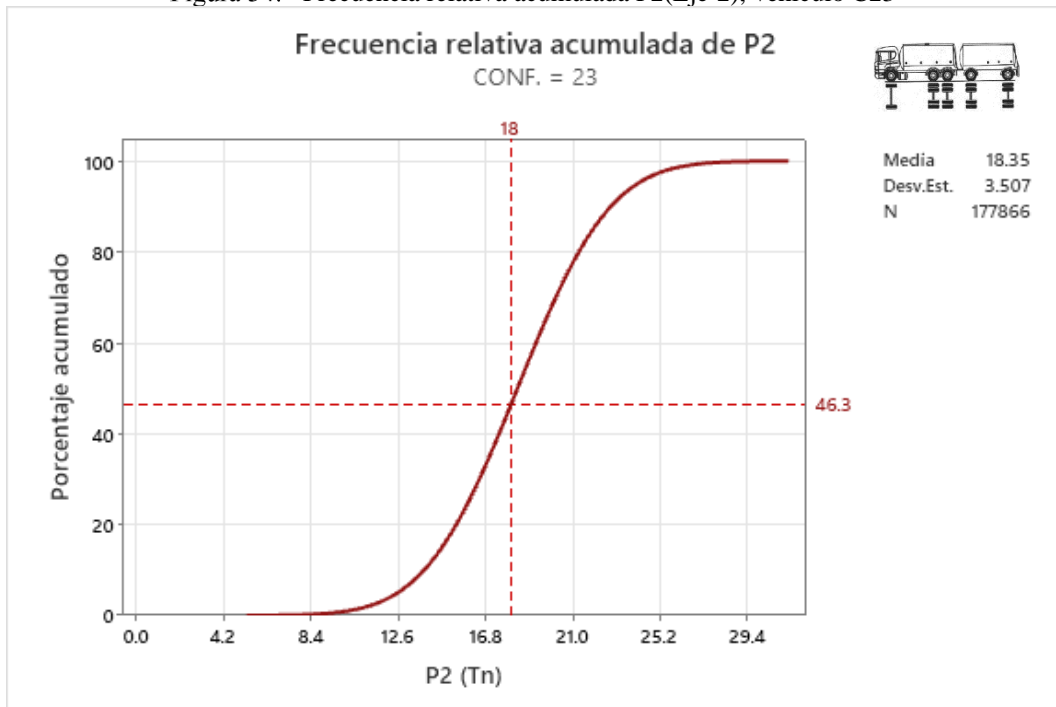
Fuente: Elaboración propia.

Figura 33: Frecuencia relativa acumulada P1(Eje-1), vehículo C23



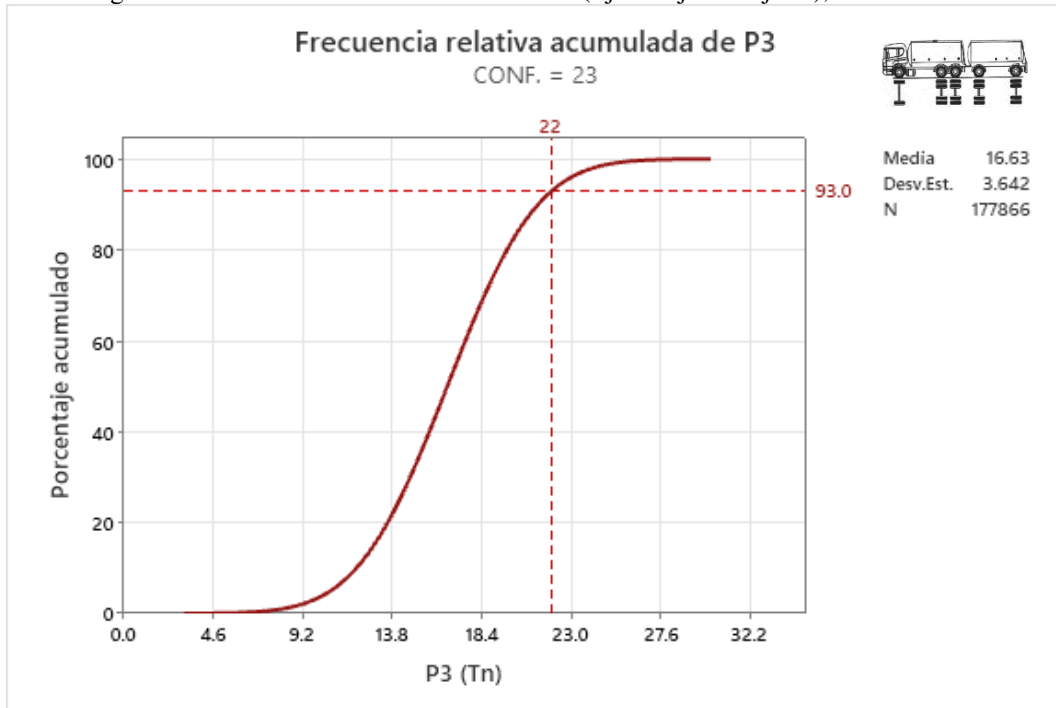
Fuente: Elaboración propia.

Figura 34: Frecuencia relativa acumulada P2(Eje-2), vehículo C23



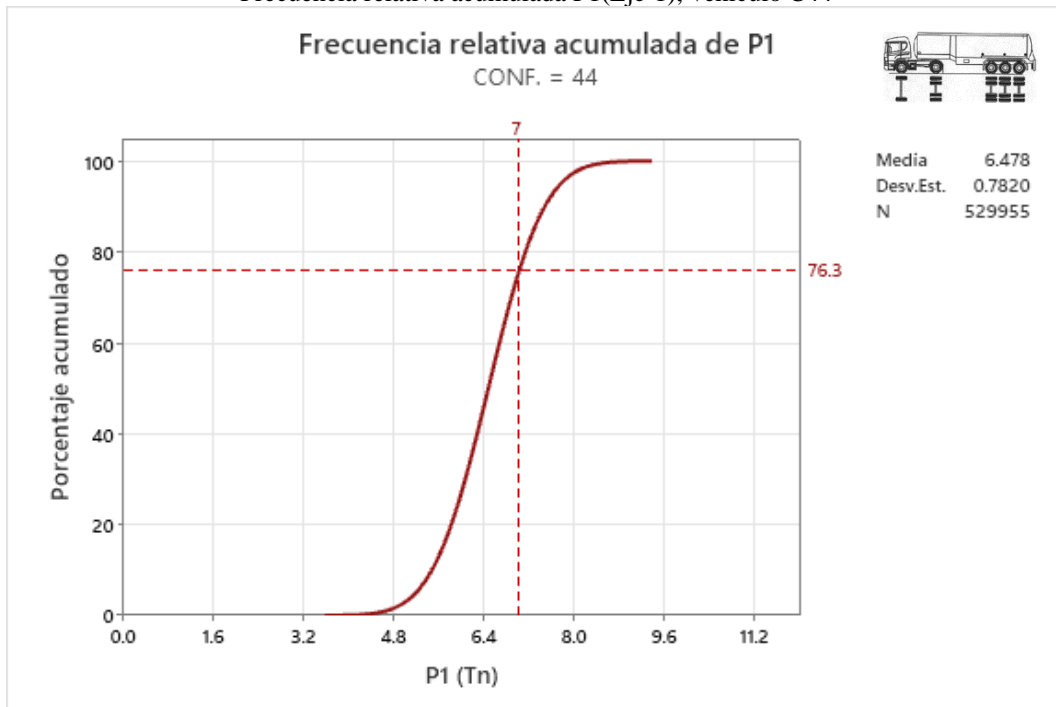
Fuente: Elaboración propia.

Figura 35: Frecuencia relativa acumulada P3(Eje-3+Eje-4 o Eje-3'), vehículo C23



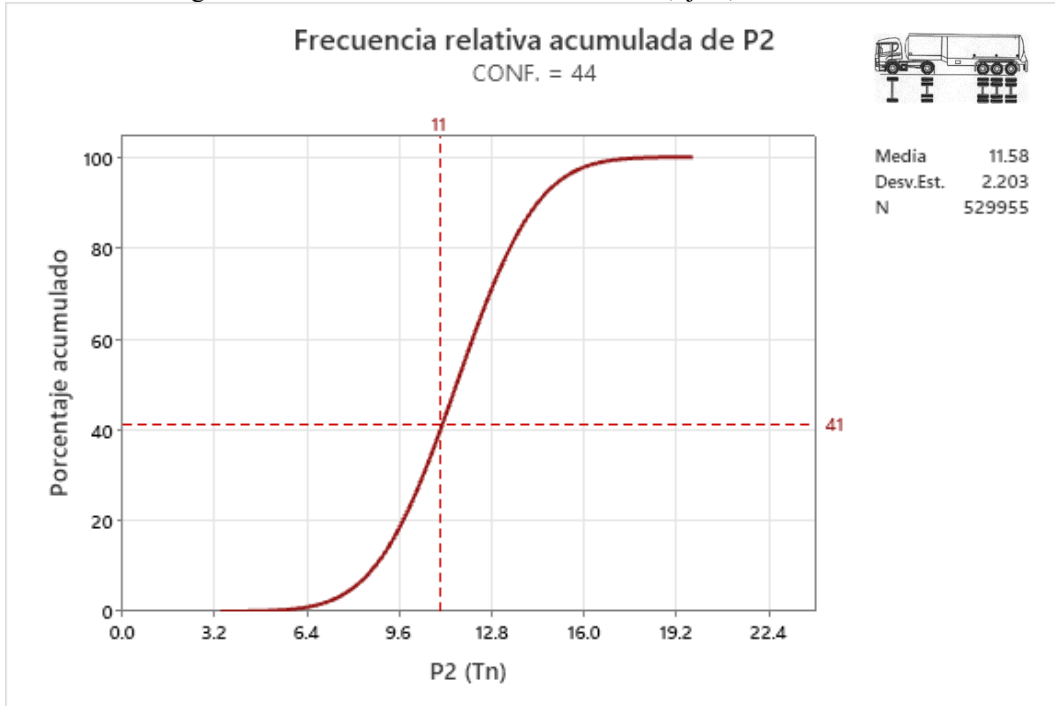
Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia relativa acumulada P1(Eje-1), vehículo C44



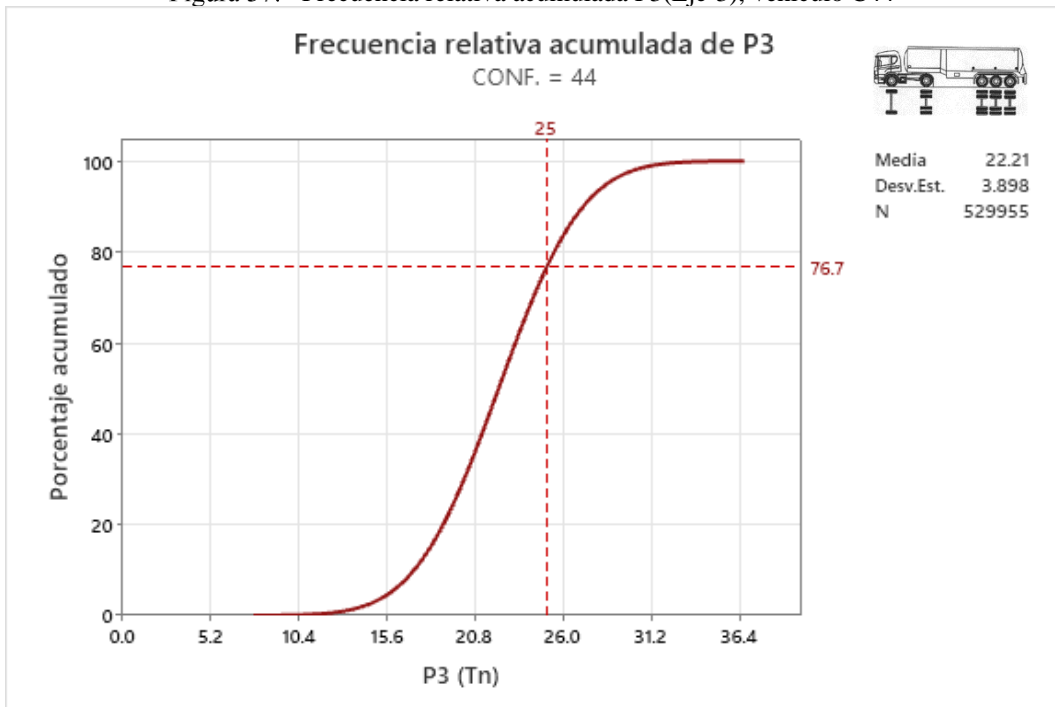
Fuente: Elaboración propia.

Figura 36: Frecuencia relativa acumulada P2(Eje-2), vehículo C44



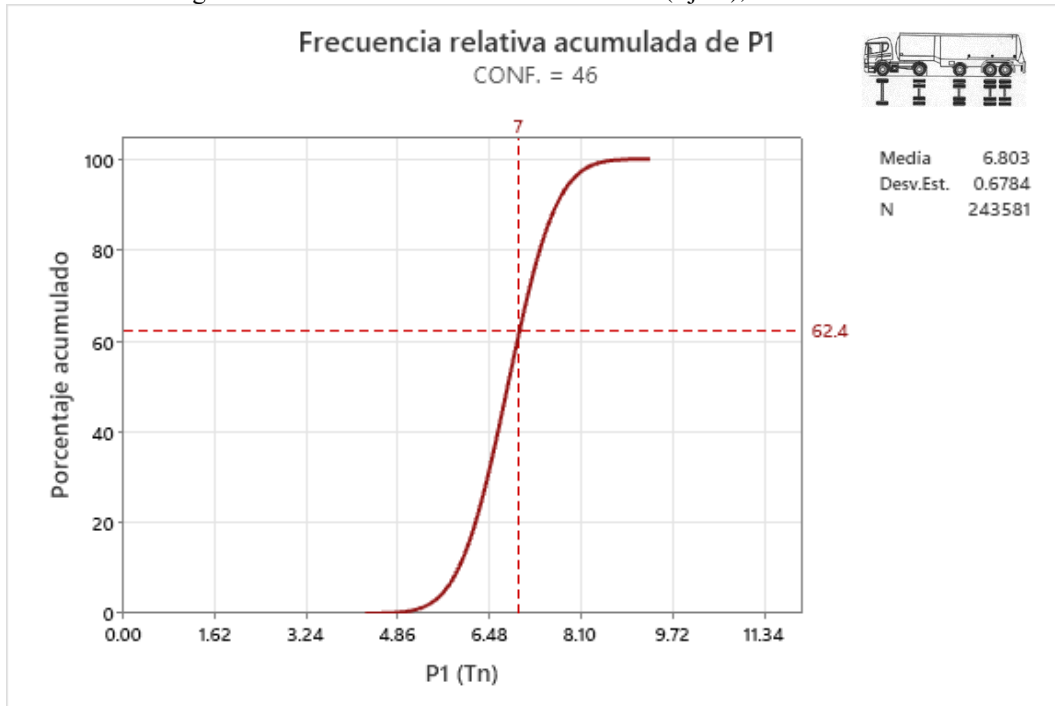
Fuente: Elaboración propia.

Figura 37: Frecuencia relativa acumulada P3(Eje-3), vehículo C44



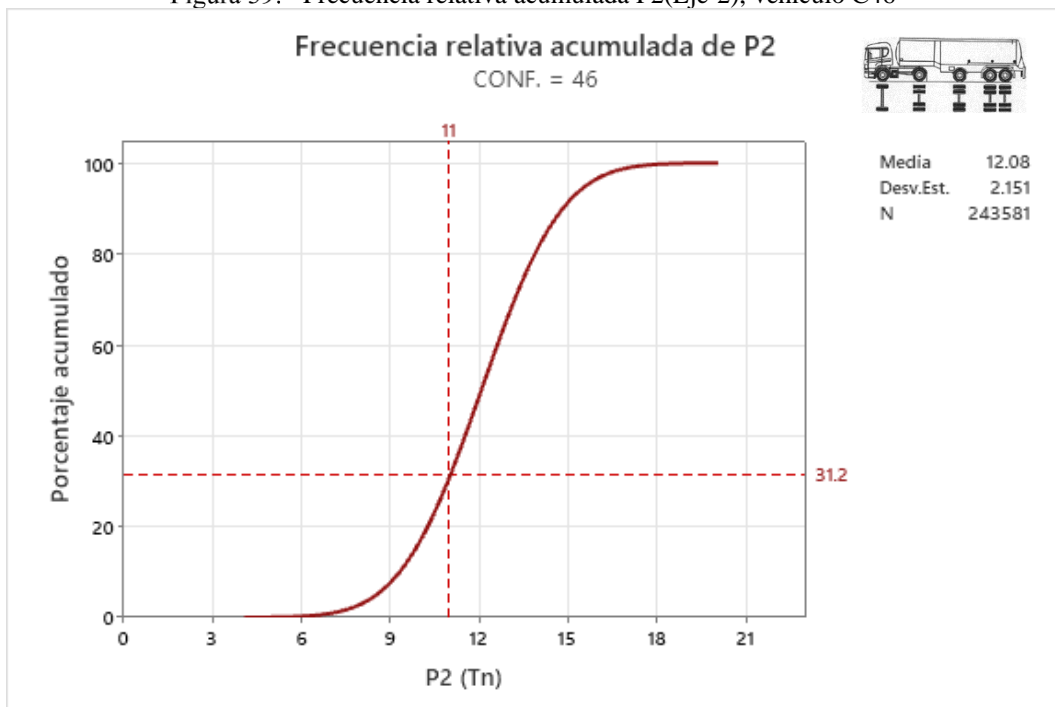
Fuente: Elaboración propia.

Figura 38: Frecuencia relativa acumulada P1(Eje-1), vehículo C46



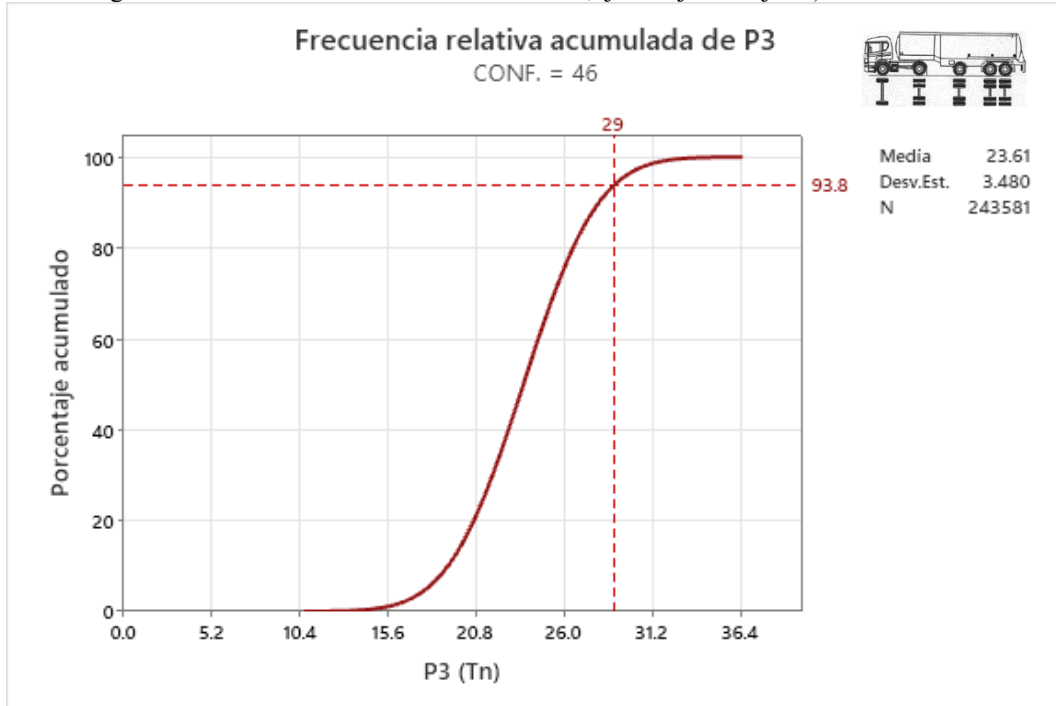
Fuente: Elaboración propia.

Figura 39: Frecuencia relativa acumulada P2(Eje-2), vehículo C46



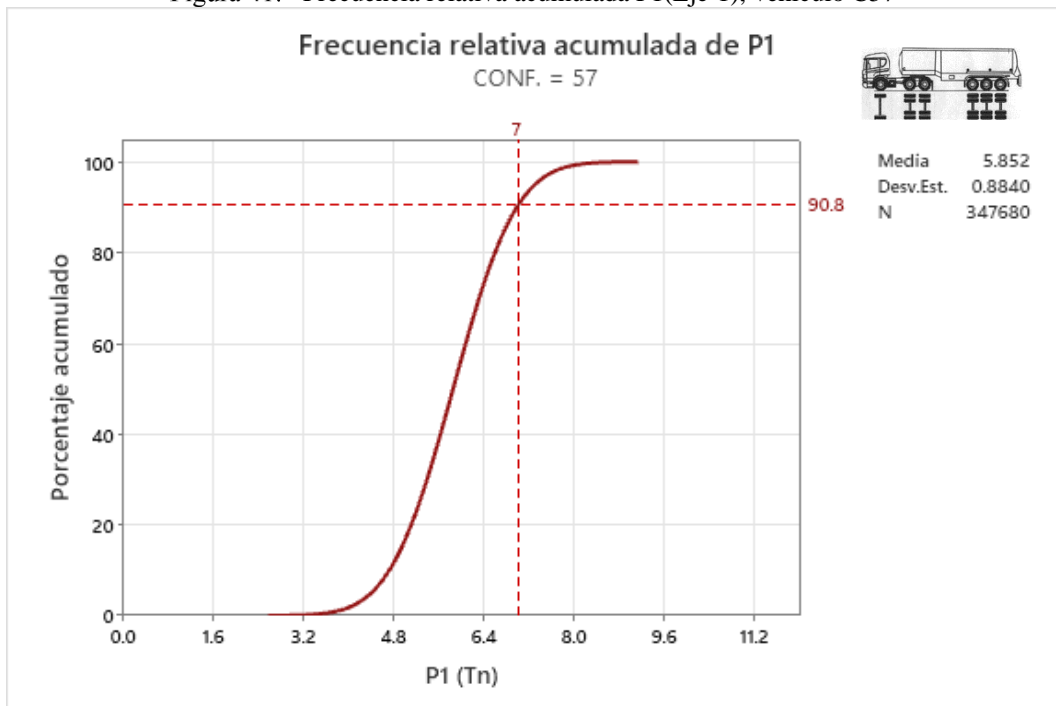
Fuente: Elaboración propia.

Figura 40: Frecuencia relativa acumulada P3(Eje-3+Eje-4 o Eje-3'), vehículo C46



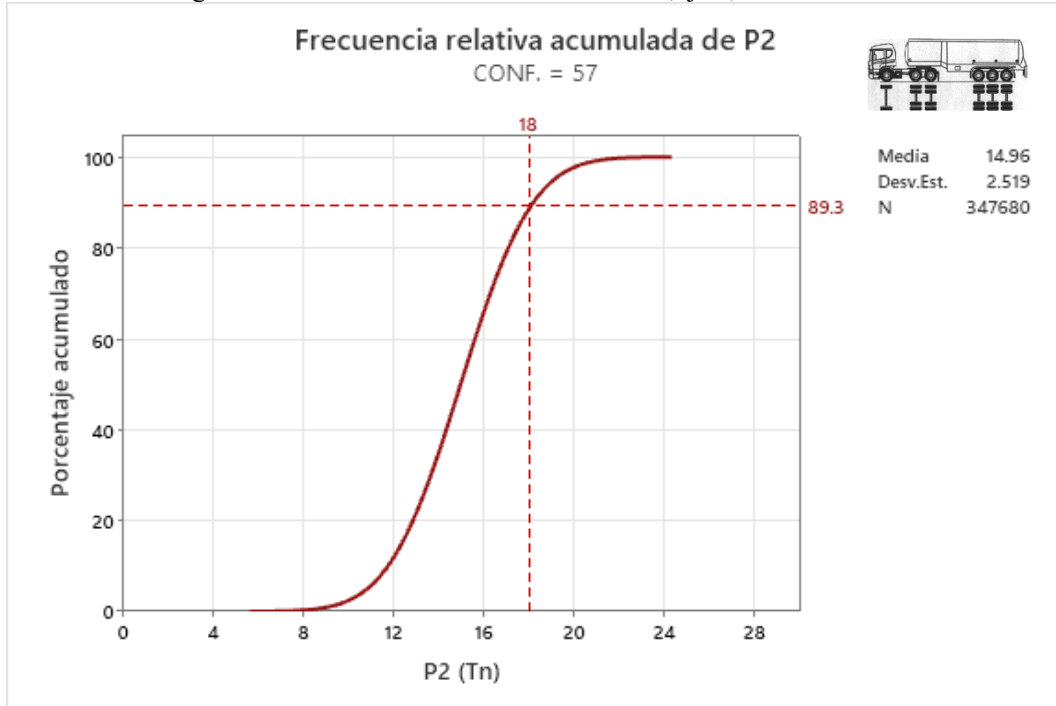
Fuente: Elaboración propia.

Figura 41: Frecuencia relativa acumulada P1(Eje-1), vehículo C57



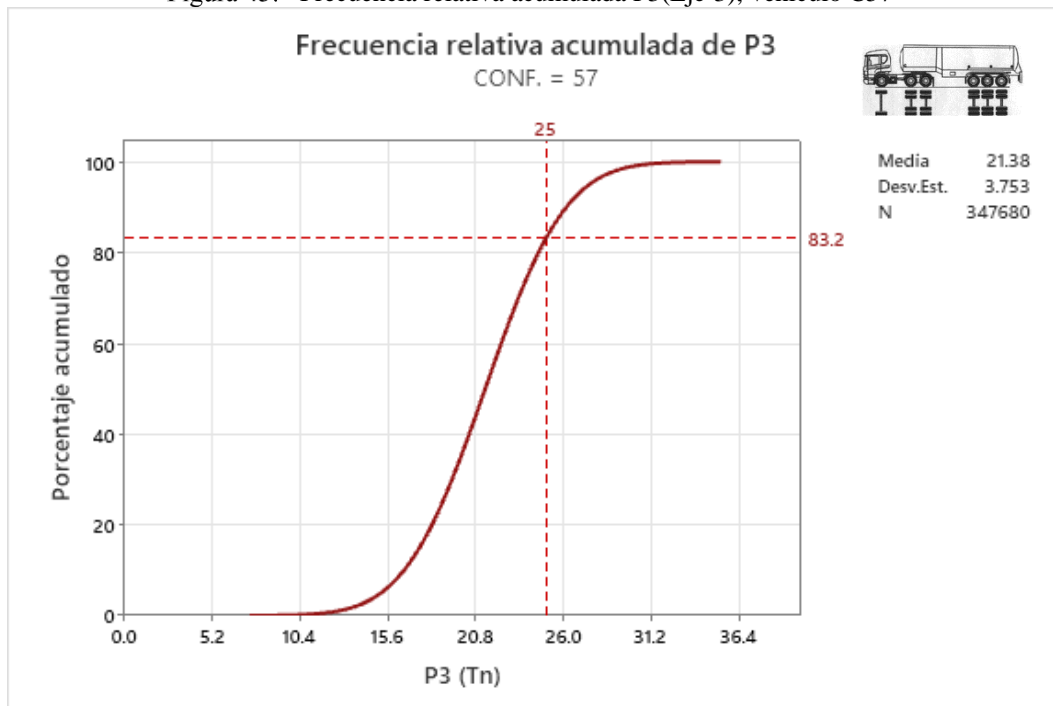
Fuente: Elaboración propia.

Figura 42: Frecuencia relativa acumulada P2(Eje-2), vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

Figura 43: Frecuencia relativa acumulada P3(Eje-3), vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos a partir de este análisis permitieron identificar patrones y tendencias en la distribución de cargas entre los diferentes ejes de los vehículos estudiados. Además, los porcentajes de vehículos que excedían los límites de peso establecidos en la Ley N° 441 proporcionaron información valiosa sobre el cumplimiento de la normativa vigente y las posibles áreas de mejora en términos de diseño y regulación de vehículos de carga.

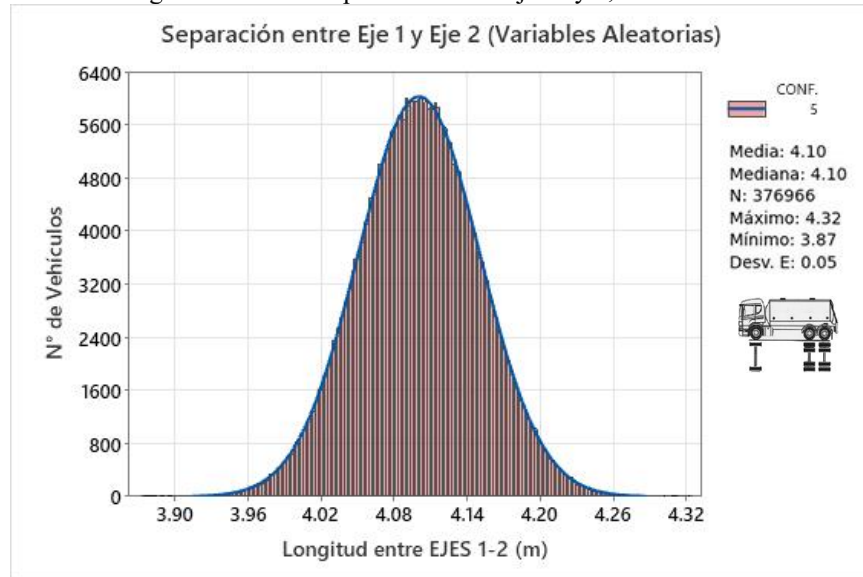
En conclusión, el análisis de pesos por eje en las configuraciones vehiculares principales mostró una variedad de comportamientos y características en función de cada tipo de vehículo. Algunas configuraciones presentaron una mayor tendencia a exceder los límites de peso permitidos en ciertos ejes, mientras que otras mostraron una distribución de carga más equilibrada. Este estudio proporcionó información útil para futuras investigaciones en el campo de la ingeniería estructural y el diseño de vehículos de carga, así como para la revisión y actualización de las regulaciones de tráfico y transporte.

4.2. Simulación de variables aleatorias de las distancias entre ejes d1 y d2

Se llevó a cabo la simulación de las distancias entre ejes 1-2 y ejes 2-3 mediante una simulación de variables aleatorias. Para realizar esta simulación, se tomaron en cuenta ciertos criterios. Dado que no se disponía de registros que incluyeran las distancias o separaciones entre ejes de los vehículos, se asumieron parámetros comerciales tomando en cuenta que, según la Cámara Departamental de Transporte Público en el año 2020, el 90% de los camiones que circulan en Bolivia son de la marca Volvo. Con base en este dato, se consultaron las especificaciones de los vehículos Volvo que cumplían con las configuraciones analizadas en la investigación, lo que proporcionó una alta certidumbre sobre la validez de los promedios de estas medidas a nivel nacional e internacional.

En la Figura 44, se observa la separación entre ejes 1 y 2 de la configuración 5. Para generar las variables aleatorias correspondientes a esta configuración, se consideró que el valor promedio de la separación entre ejes es 4.1 m y se permitió una variación del 15%, con una desviación estándar de 0.05, lo que permitió generar datos aleatorios a partir de una distribución normal.

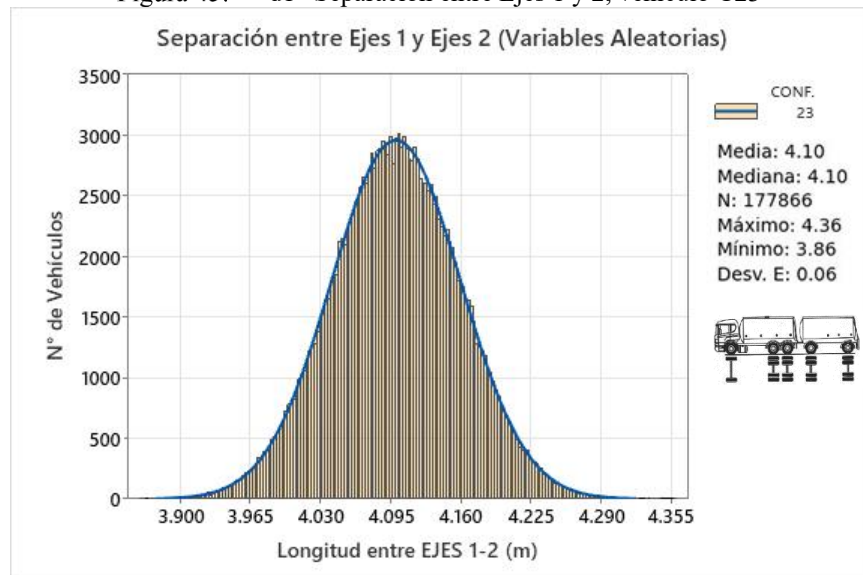
Figura 44: “d1” Separación entre Ejes 1 y 2, vehículo C5



Fuente: Elaboración propia.

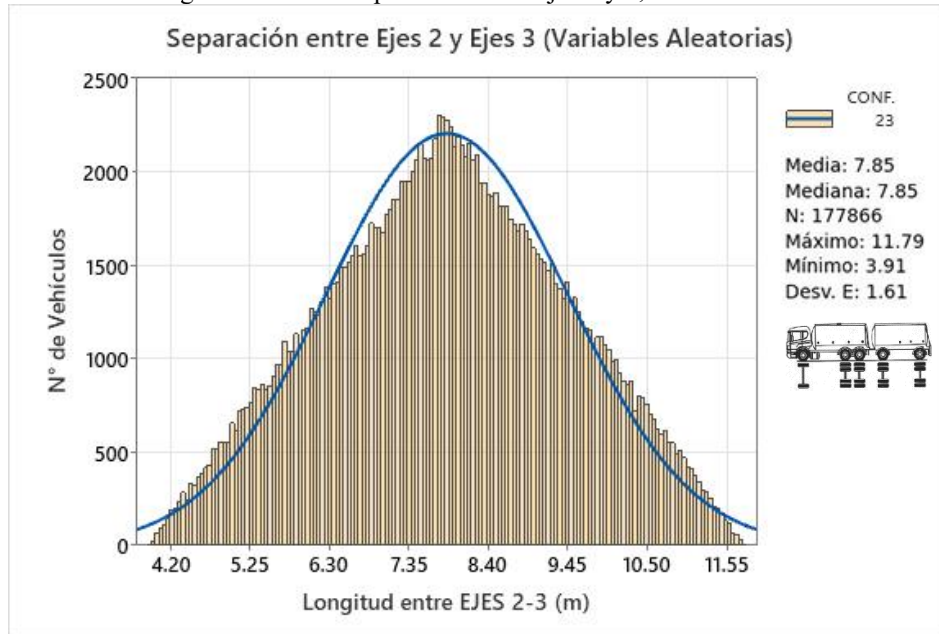
Las Figuras 45 y 46 muestran las distancias d_1 y d_2 , respectivamente, del camión C23. Para el tren delantero, se empleó una distribución normal similar a la del vehículo C5, dado que, según la Ley N° 441, ambos vehículos tienen la misma configuración en la parte delantera. Para la parte trasera, correspondiente a la distancia d_2 , se utilizó una distribución triangular, ya que esta configuración se obtuvo a partir de la suma de las distancias de los ejes 3 y 4, tomando como valor promedio 7.85, mínimo 3.9 y máximo 11.8, basándose en la regulación Ontario 413.

Figura 45: “d1” Separación entre Ejes 1 y 2, vehículo C23



Fuente: Elaboración propia.

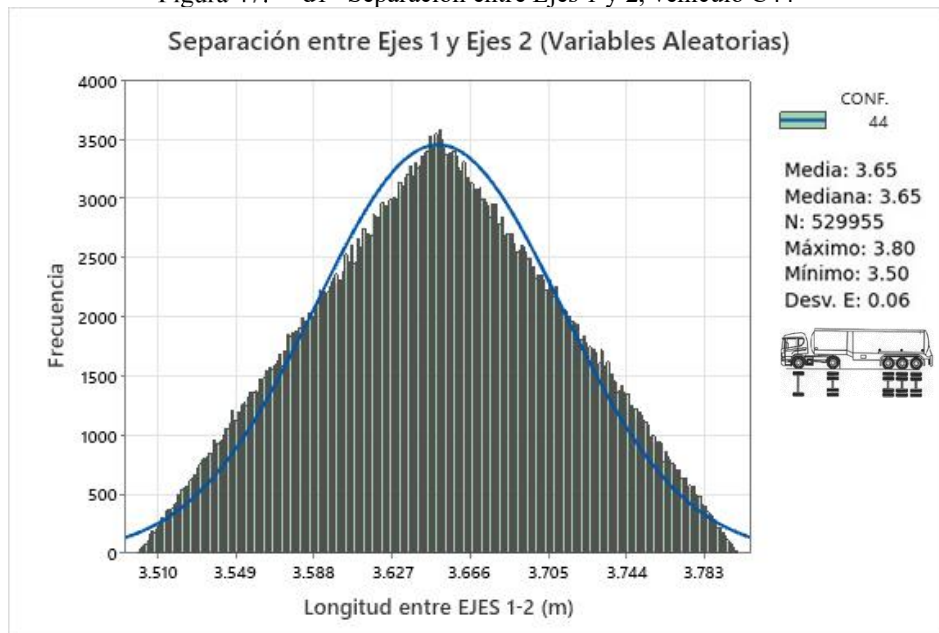
Figura 46: “d2” Separación entre Ejes 2 y 3, vehículo C23



Fuente: Elaboración propia.

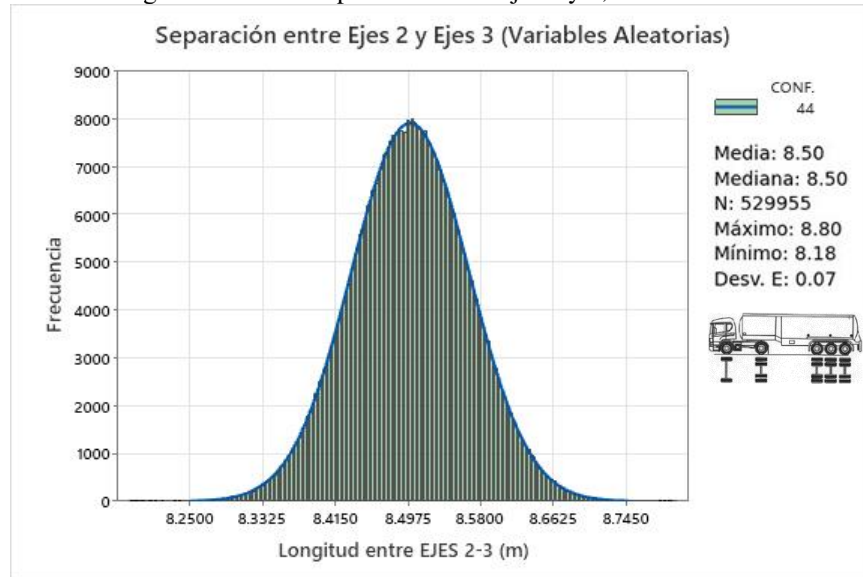
Las Figuras 47 y 48 presentan las distancias d1 y d2 para el vehículo C44. Se utilizó una distribución triangular para d1, con una media de 3.65, máximo de 3.8 y mínimo de 3.5, medidas estándares de este tipo de camiones. Para d2, se empleó una distribución normal con una media de 8.5 y desviación estándar de 0.07, lo que resulta en una variación del 21%.

Figura 47: “d1” Separación entre Ejes 1 y 2, vehículo C44



Fuente: Elaboración propia.

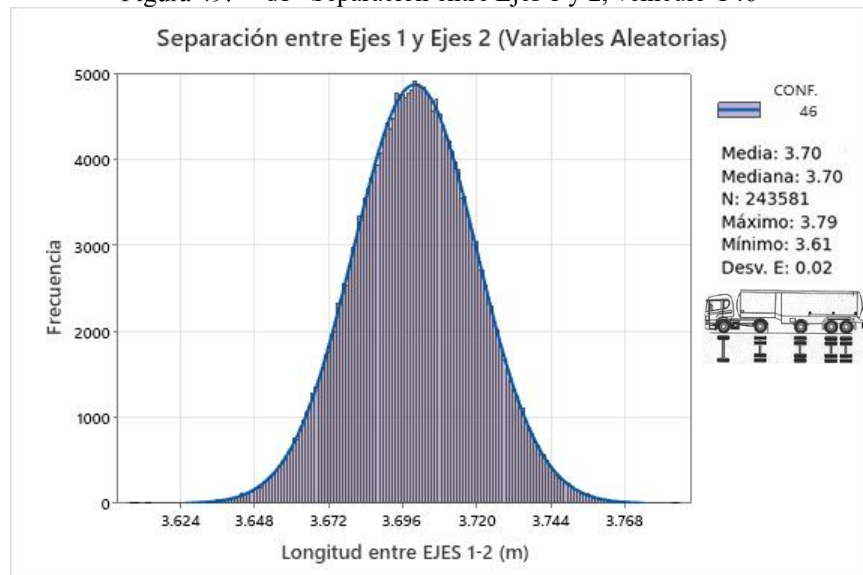
Figura 48: “d2” Separación entre Ejes 2 y 3, vehículo C44



Fuente: Elaboración propia.

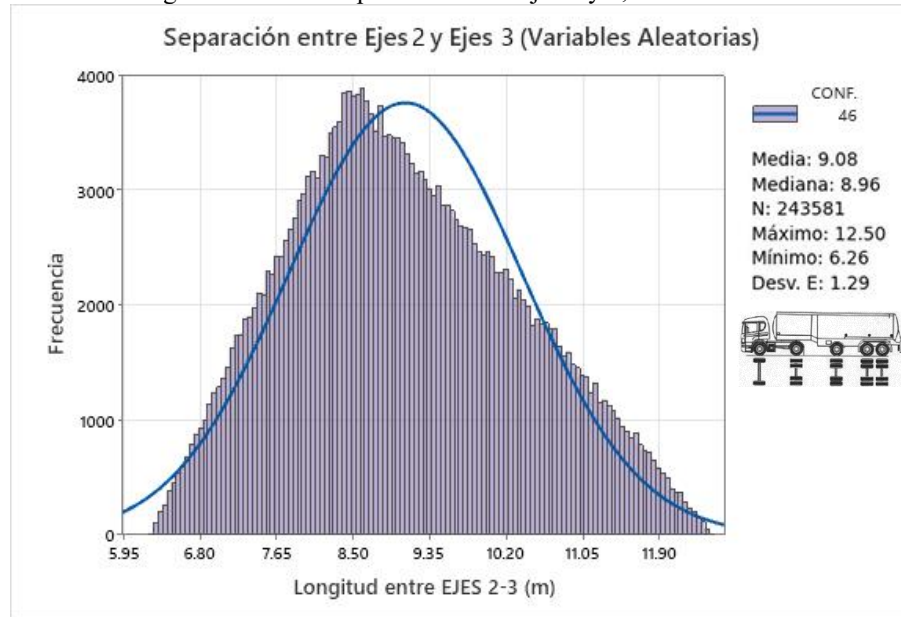
En el caso del vehículo C46, las distancias d1 y d2 se ilustran en las Figuras 49 y 50, respectivamente. Para d1, se consideró una media de 3.7, similar a la Figura 47, ya que en la parte delantera tienen la misma configuración, y una desviación estándar de 0.02, lo que proporciona un máximo y mínimo de 3.79 y 3.61, respectivamente. Para el eje trasero, se empleó una distribución triangular con valores máximos y mínimos de 12.5 y 6.26, respectivamente, y una media de 9.1 m, debido al resultado de la suma de los ejes 3 y 4.

Figura 49: “d1” Separación entre Ejes 1 y 2, vehículo C46



Fuente: Elaboración propia.

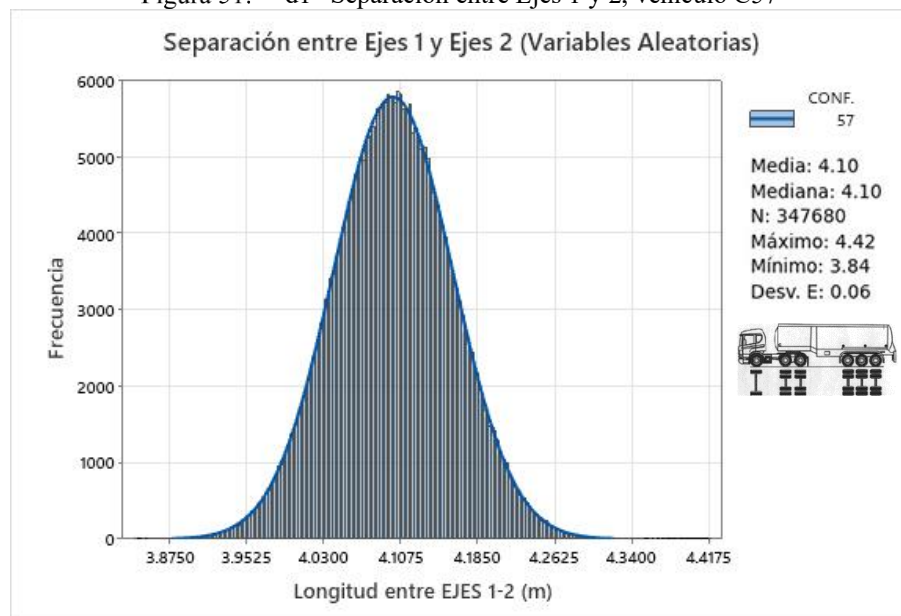
Figura 50: “d2” Separación entre Ejes 2 y 3, vehículo C46



Fuente: Elaboración propia.

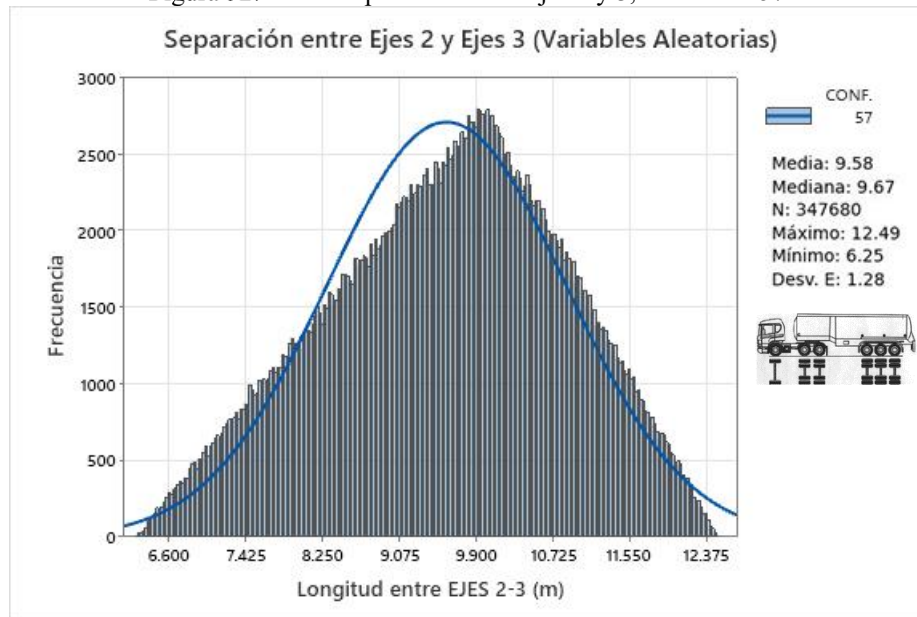
Finalmente, para la configuración C57, la Figura 51 muestra la separación de los ejes delanteros, la cual sigue una distribución normal con una media de 4.1 y una desviación estándar de 0.06. Este caso es diferente a las otras configuraciones, ya que está compuesto por un eje simple en el eje 1 y un tándem en el eje 2. La Figura 52 ilustra la separación d2, que sigue una distribución triangular con una media de 9.58, un máximo de 12.49 y un mínimo de 6.25, respectivamente.

Figura 51: “d1” Separación entre Ejes 1 y 2, vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

Figura 52: “d2” Separación entre Ejes 2 y 3, vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

Mediante el análisis de las simulaciones de variables aleatorias en las distancias entre ejes d1 y d2, se logró obtener una aproximación razonablemente precisa de las configuraciones de los vehículos considerados en la investigación. Estos resultados permitieron avanzar en el estudio de los efectos estructurales de las distintas configuraciones vehiculares y proporcionaron información relevante para el cálculo de los momentos que generan estos vehículos en los puentes.

4.3. Cálculo y análisis de elementos mecánicos a distintas luces.

Para el desarrollo de este subtítulo se llevó a cabo el cálculo y análisis de elementos mecánicos en puentes de diversas luces, abarcando desde los 10 m hasta los 60 m. Para realizar este análisis, se asignaron distancias d1 y d2 a cada camión según su configuración, y las separaciones entre ejes se generaron de forma aleatoria. De esta manera, se obtuvieron las cargas de los camiones y sus separaciones en diferentes instancias genéricas. Al contar con los camiones y sus respectivas cargas y distancias, se calcularon los momentos flectores y cortantes máximos con ayuda de las líneas de influencia y el teorema de Barré.

Para los momentos flectores máximos, se asumió el teorema de Barré. En cuanto al cálculo de los cortantes máximos, se consideró que la carga del eje trasero se apoyaba en uno de los apoyos.

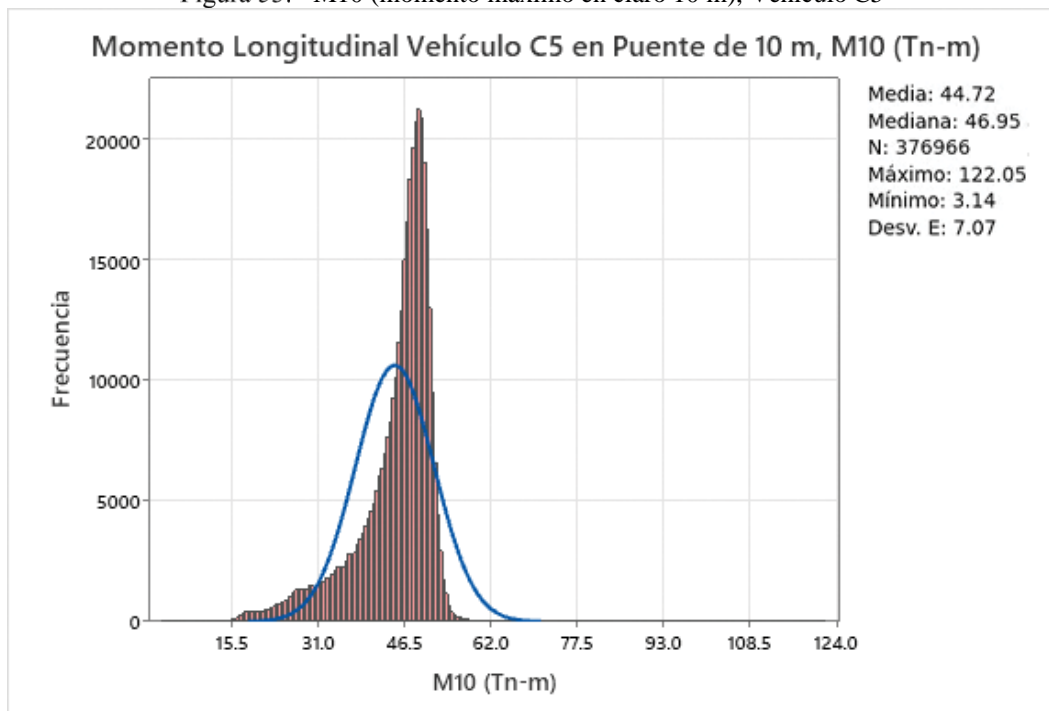
Aunque la cortante máxima ocurre en el instante en que la carga pasa el apoyo, en el análisis de puentes, la cortante máxima se desplaza a una distancia 'd' del apoyo. Dado que en el análisis no se contaba con secciones de puentes definidas, se determinó que la cortante máxima estaría cuando la carga del eje trasero se encontrara sobre uno de los apoyos.

4.3.1. Cálculo de momentos flectores máximos

Para el cálculo de los momentos flectores máximos, se aplicó el teorema de Barré a cada vehículo en cada longitud de puente analizada, tal como se mencionó en la introducción de este capítulo.

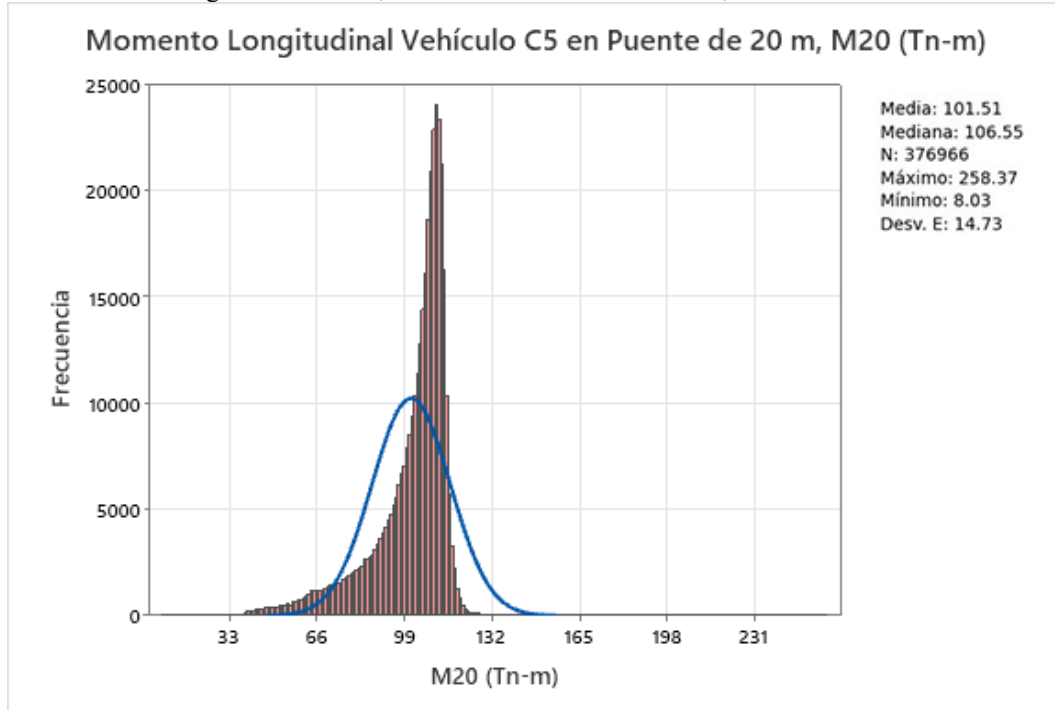
Desde la Figura 53 hasta la Figura 58, se observaron los momentos relacionados al vehículo C5. Todas las gráficas mostraron que el comportamiento de los momentos sigue una distribución normal, lo cual se consideró aceptable debido a la gran cantidad de datos analizados.

Figura 53: M10 (momento máximo en claro 10 m), Vehículo C5



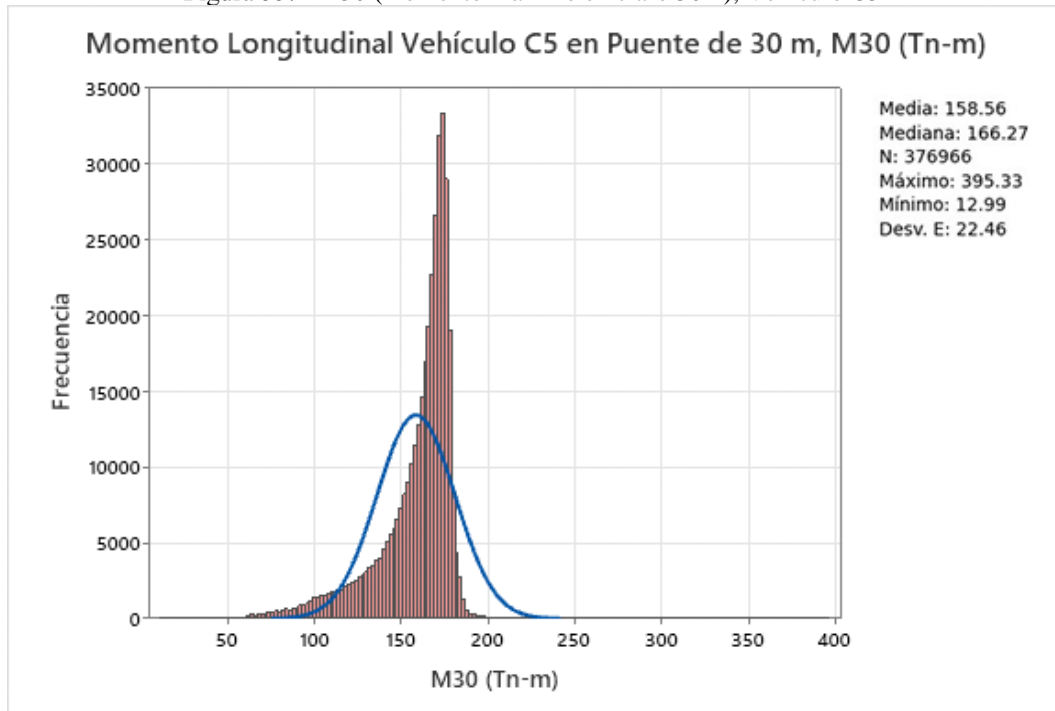
Fuente: Elaboración propia.

Figura 54: M20 (momento máximo en claro 20m), Vehículo C5



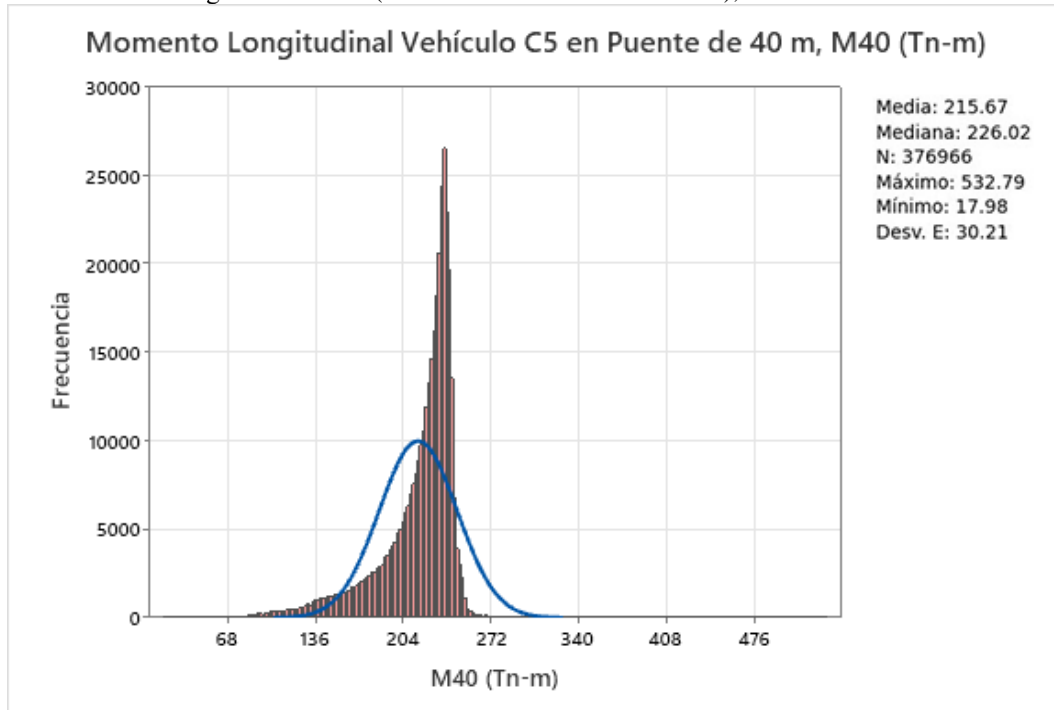
Fuente: Elaboración propia.

Figura 55: M30 (momento máximo en claro 30m), Vehículo C5



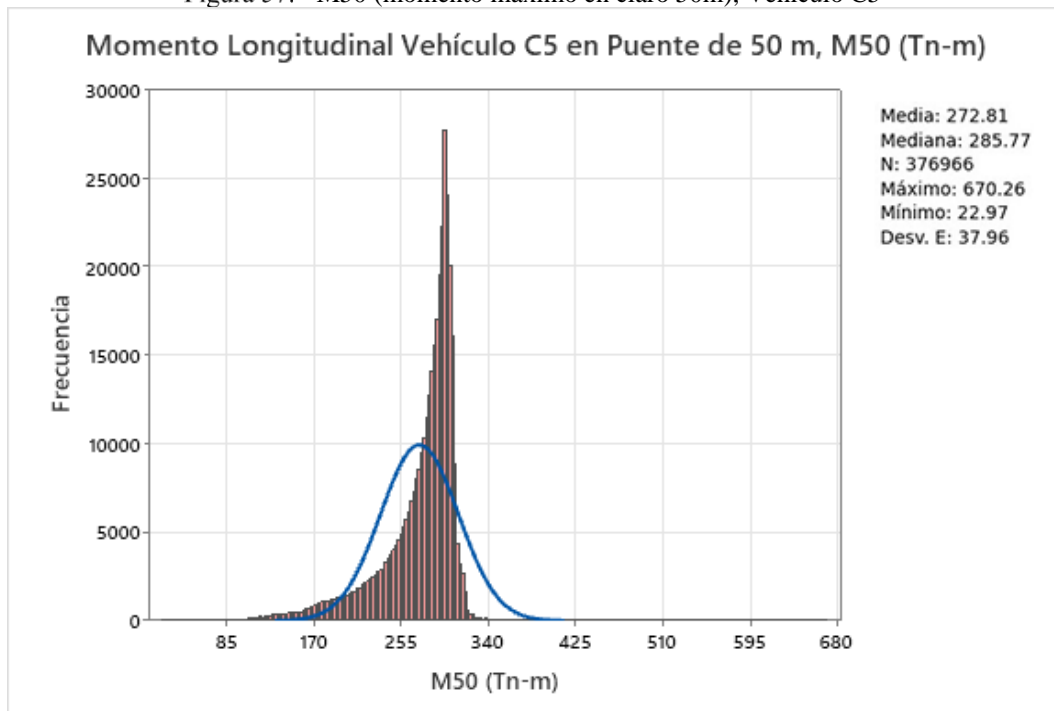
Fuente: Elaboración propia.

Figura 56: M40 (momento máximo en claro 40m), Vehículo C5



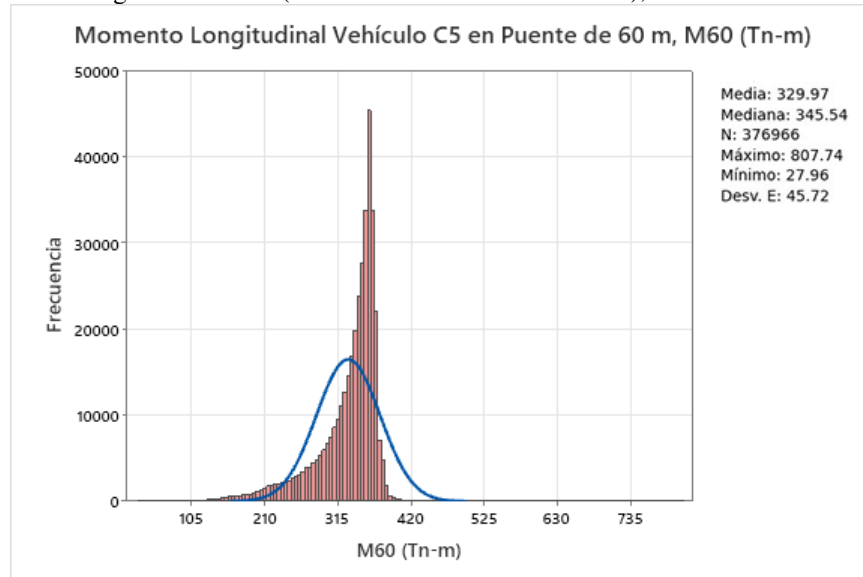
Fuente: Elaboración propia.

Figura 57: M50 (momento máximo en claro 50m), Vehículo C5



Fuente: Elaboración propia.

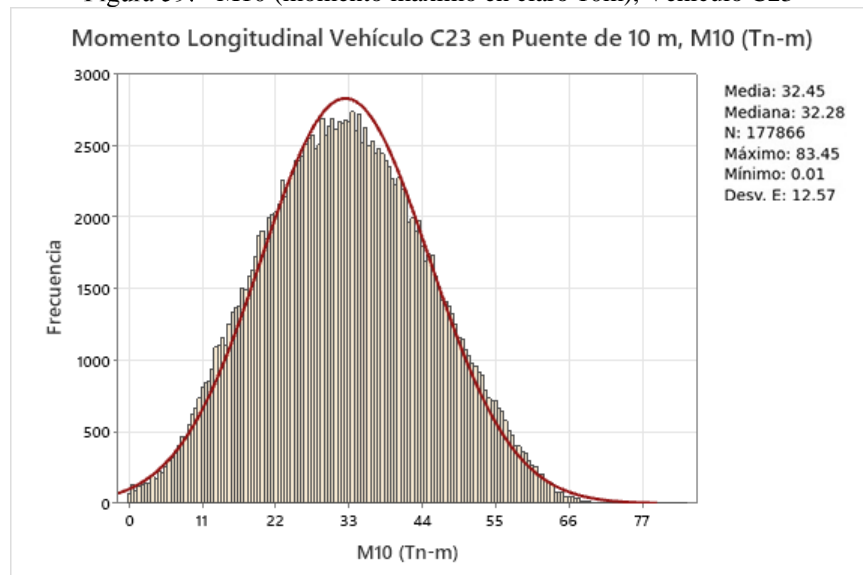
Figura 58: M60 (momento máximo en claro 60m), Vehículo C5



Fuente: Elaboración propia.

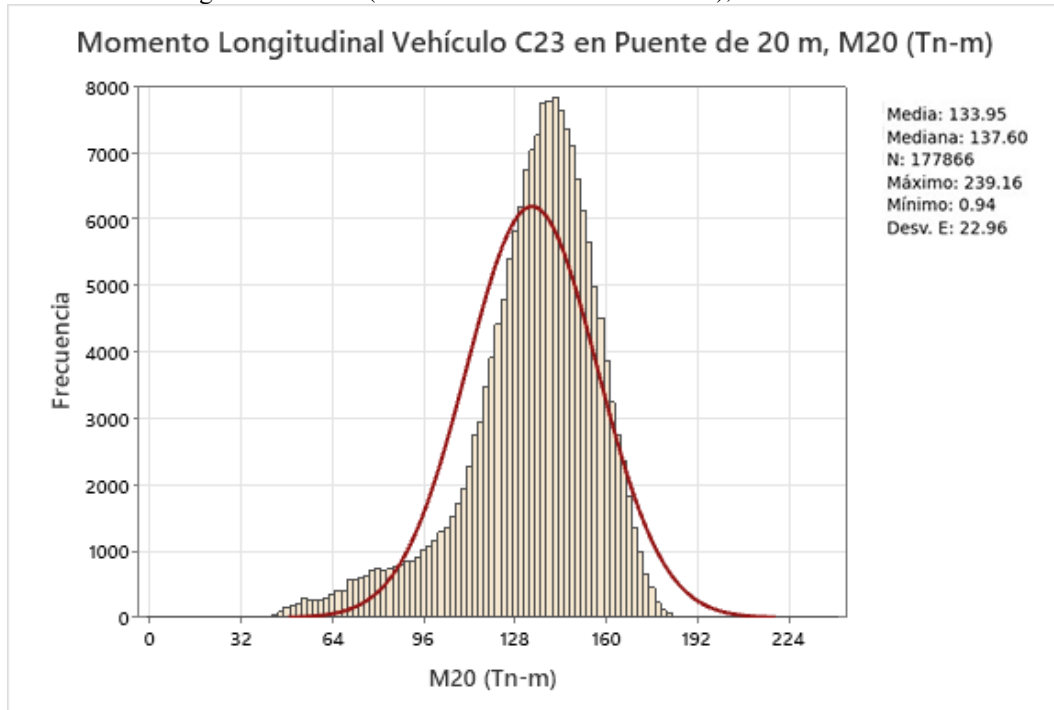
En el caso del camión C23, se analizaron las gráficas de momentos en las distintas longitudes de puente desde la Figura 59 hasta la Figura 64. En estas gráficas, se observaron distribuciones normales similares a las del vehículo C5. Esto se debe a que, en puentes de 10 m, los camiones largos como el C23 generalmente no aplican sus tres cargas sobre el puente, sino únicamente el tren delantero o el tren trasero. Por esta razón, después de los 20 m, las tendencias y distribuciones vuelven a parecerse.

Figura 59: M10 (momento máximo en claro 10m), Vehículo C23



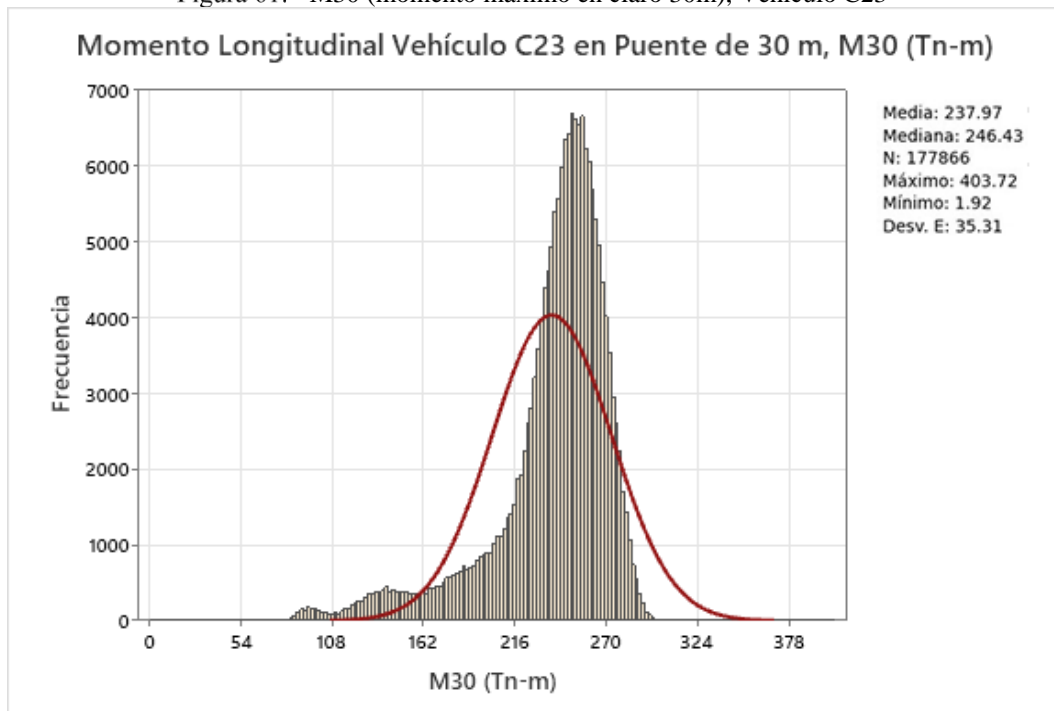
Fuente: Elaboración propia.

Figura 60: M20 (momento máximo en claro 20m), Vehículo C23



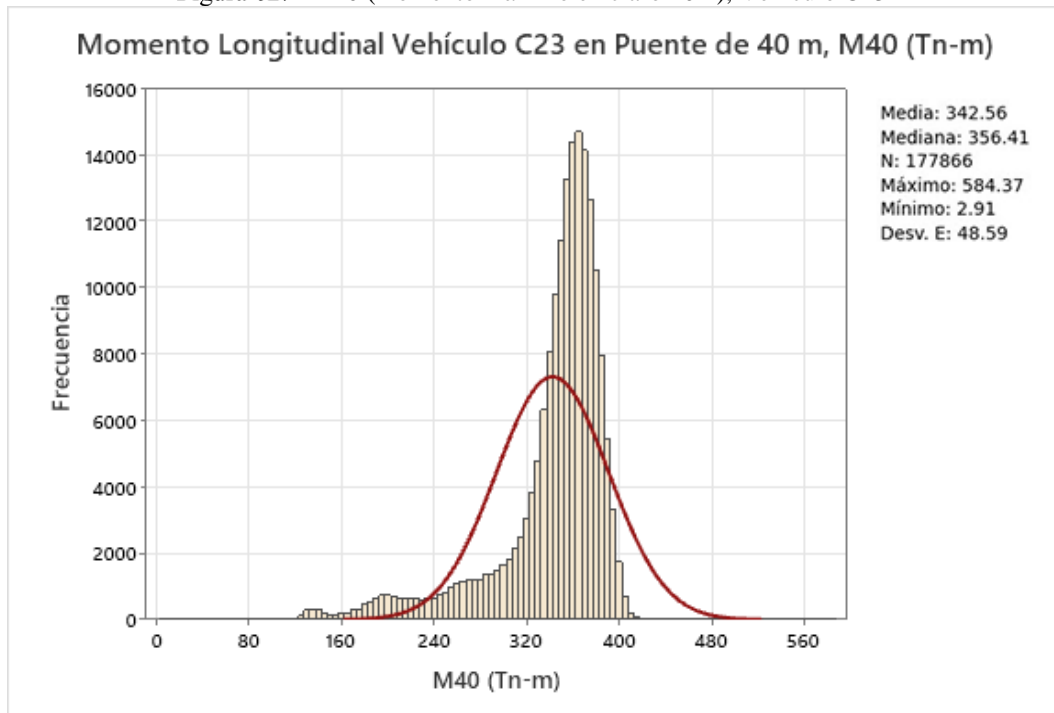
Fuente: Elaboración propia.

Figura 61: M30 (momento máximo en claro 30m), Vehículo C23



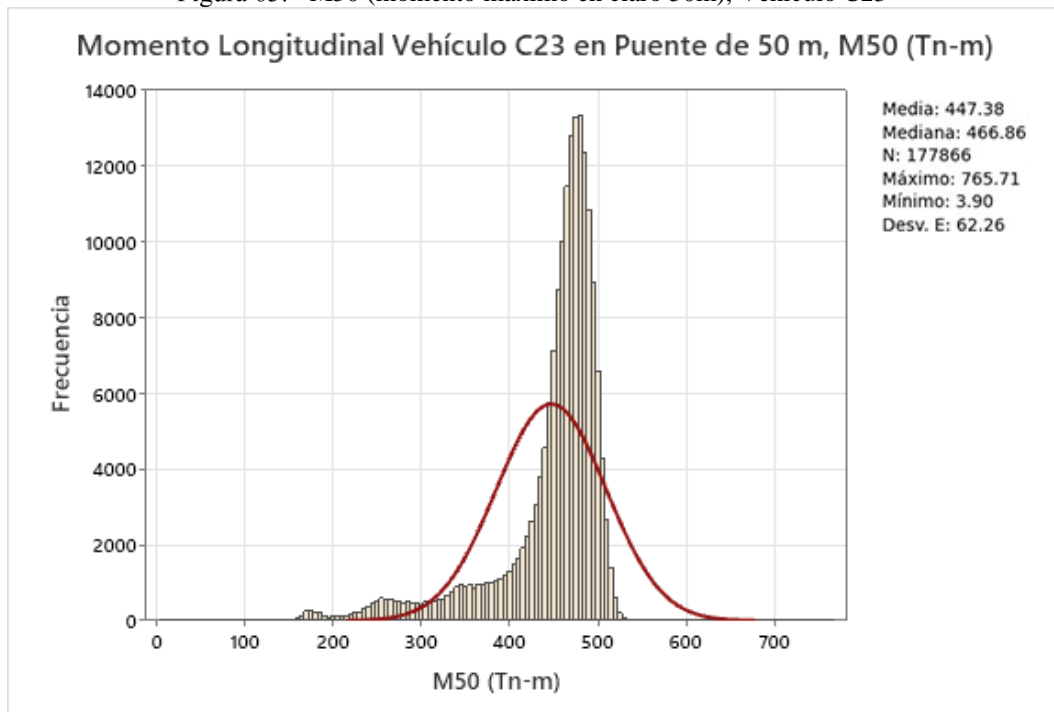
Fuente: Elaboración propia.

Figura 62: M40 (momento máximo en claro 40m), Vehículo C23



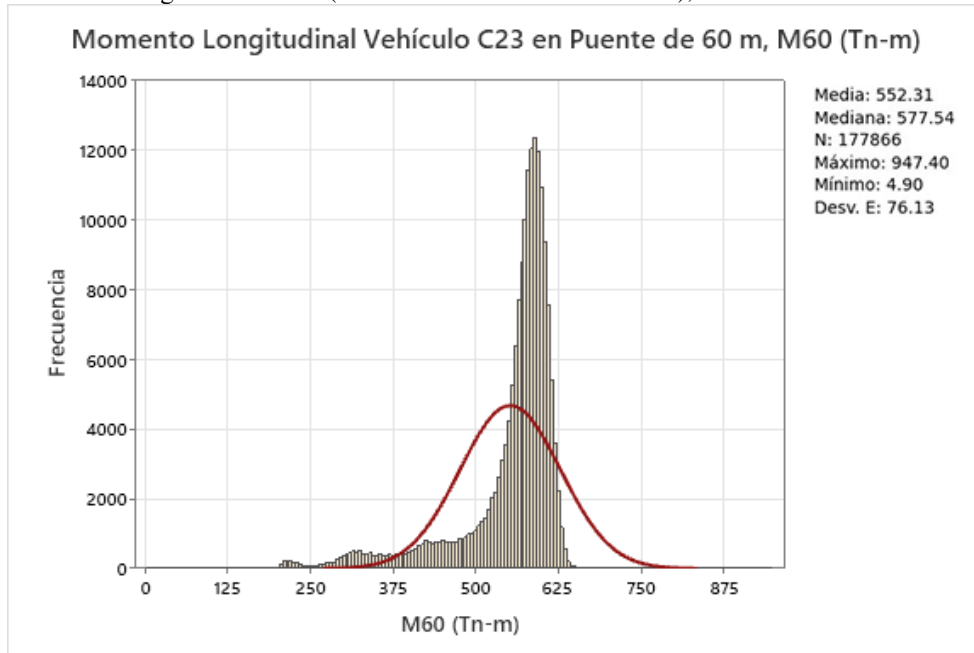
Fuente: Elaboración propia.

Figura 63: M50 (momento máximo en claro 50m), Vehículo C23



Fuente: Elaboración propia.

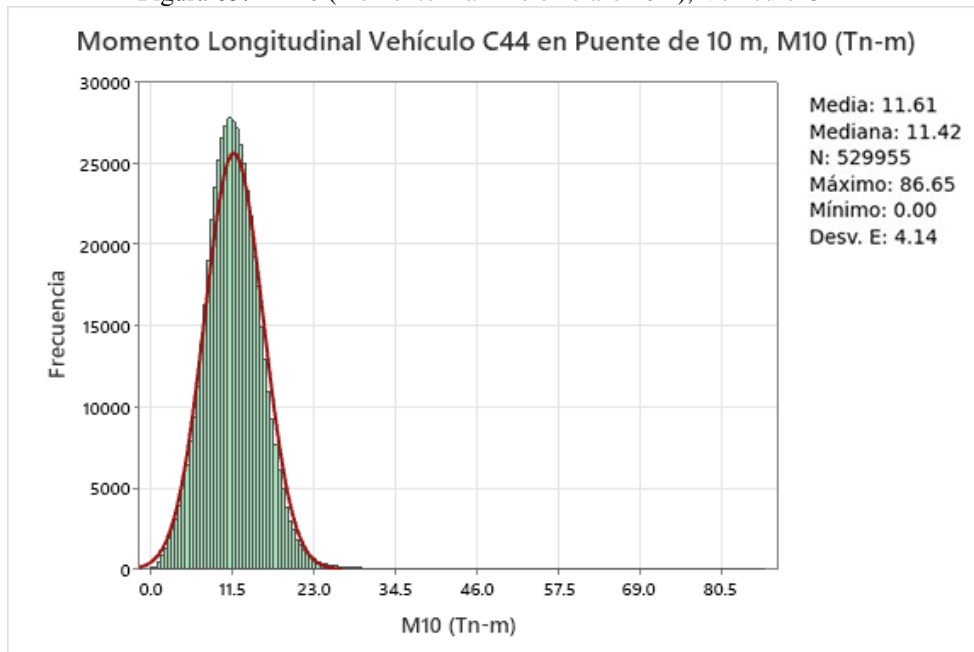
Figura 64: M60 (momento máximo en claro 60m), Vehículo C23



Fuente: Elaboración propia.

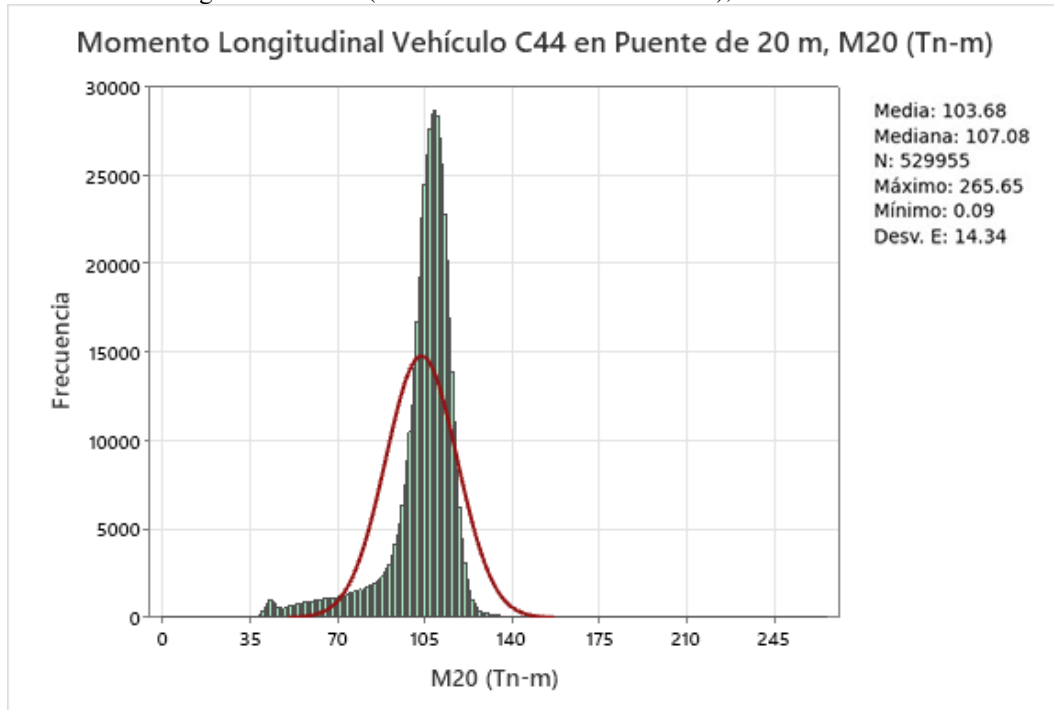
En el caso del vehículo C44, las gráficas mostradas en la Figura 65 hasta la Figura 70 también exhibieron una tendencia normal y una distribución normal casi perfecta para la luz de 10 m.

Figura 65: M10 (momento máximo en claro 10m), Vehículo C44



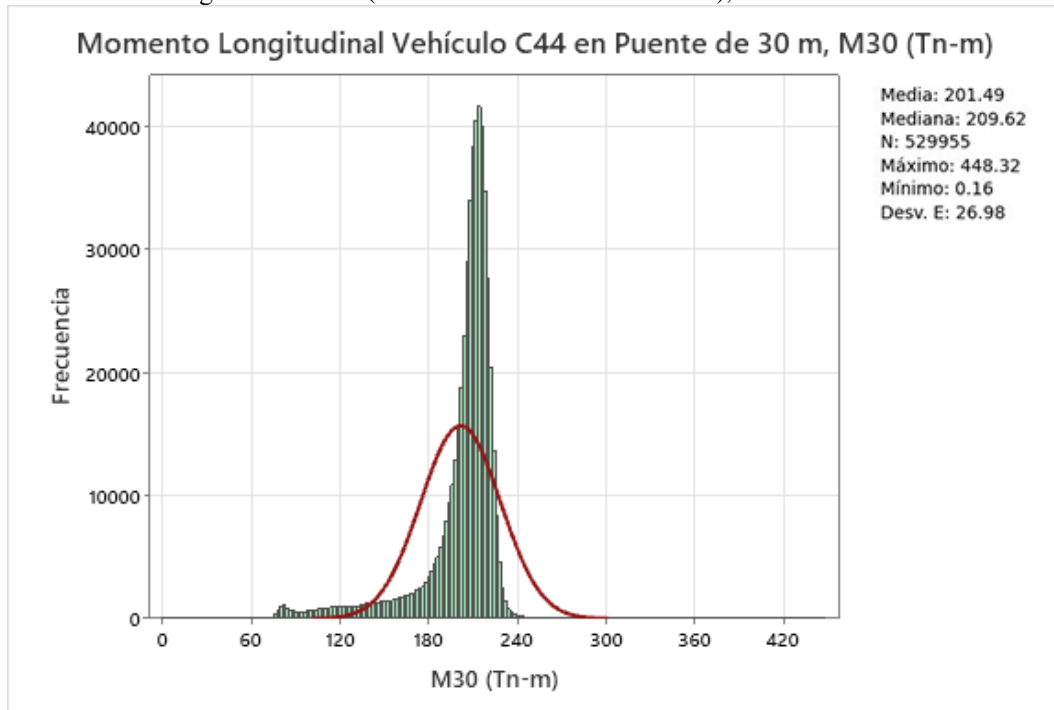
Fuente: Elaboración propia.

Figura 66: M20 (momento máximo en claro 20m), Vehículo C44



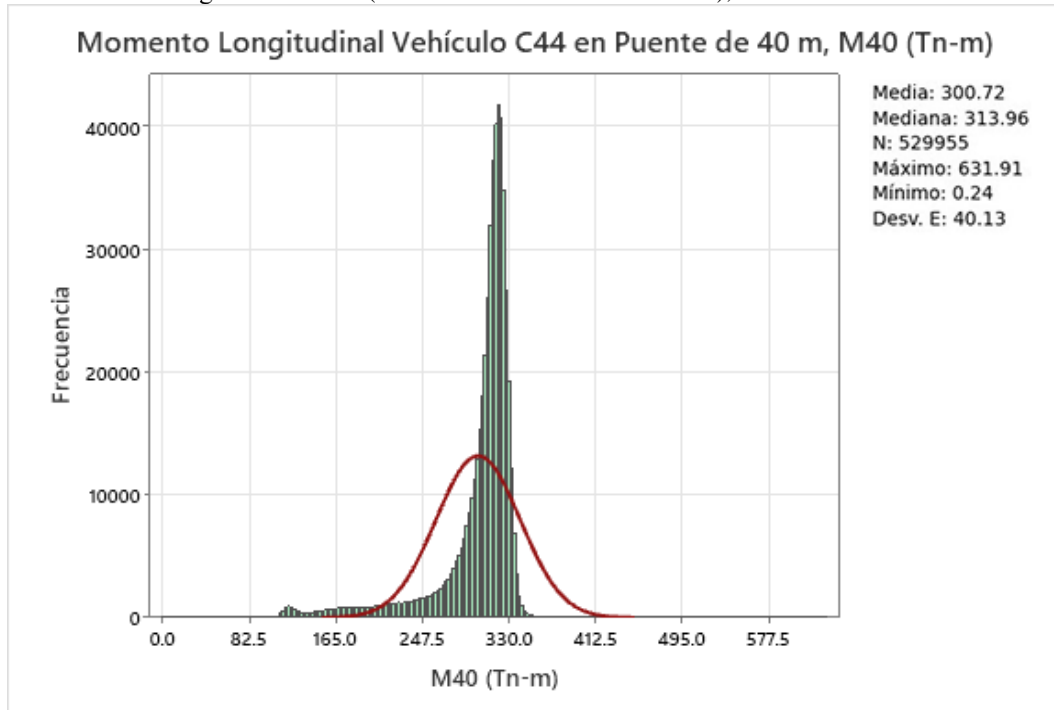
Fuente: Elaboración propia.

Figura 67: M30 (momento máximo en claro 30m), Vehículo C44



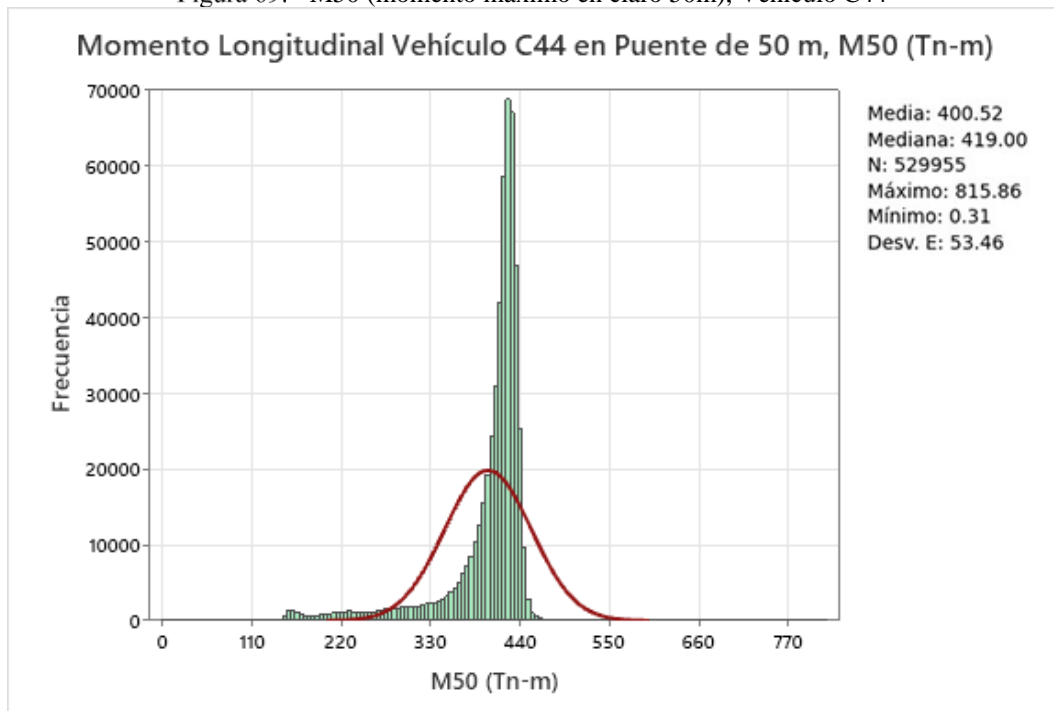
Fuente: Elaboración propia.

Figura 68: M40 (momento máximo en claro 40m), Vehículo C44



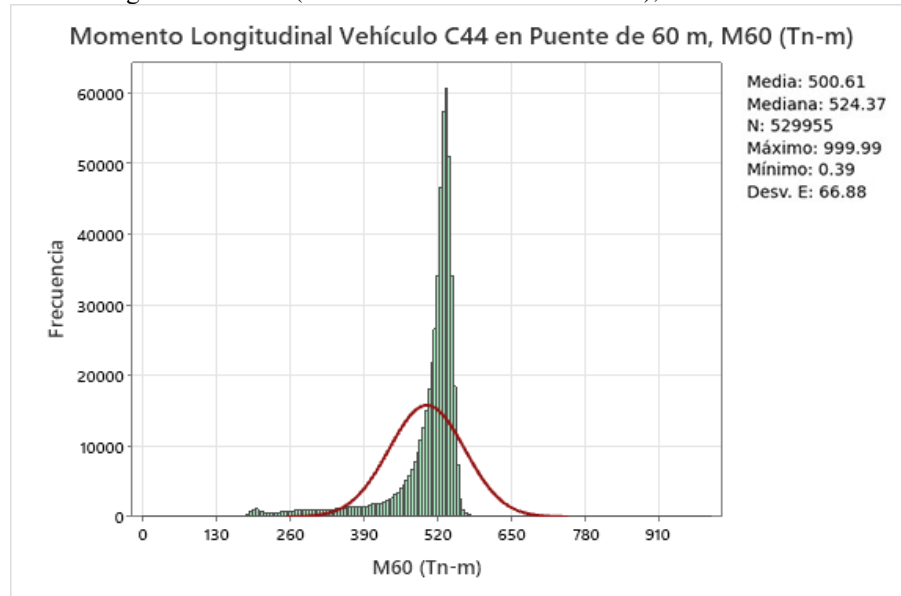
Fuente: Elaboración propia.

Figura 69: M50 (momento máximo en claro 50m), Vehículo C44



Fuente: Elaboración propia.

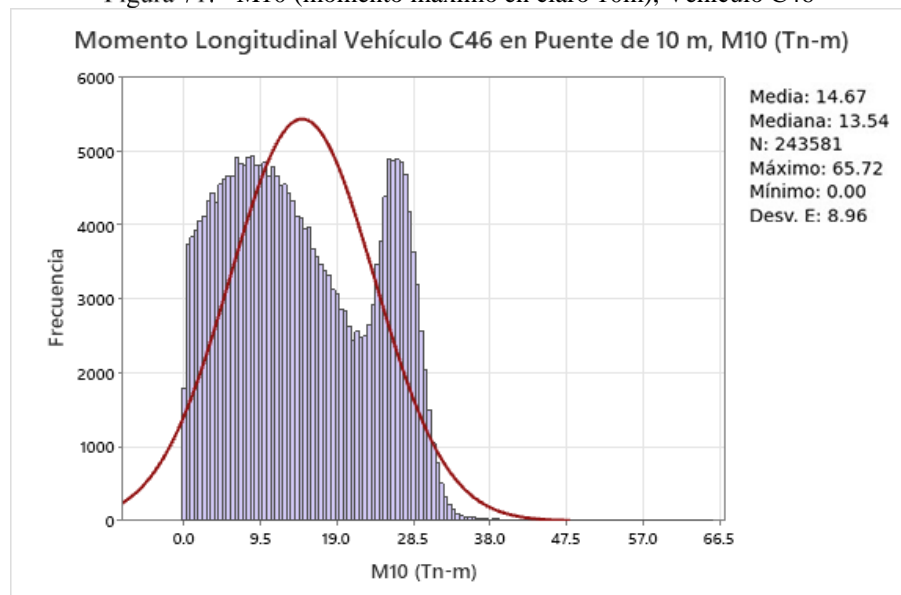
Figura 70: M60 (momento máximo en claro 60m), Vehículo C44



Fuente: Elaboración propia.

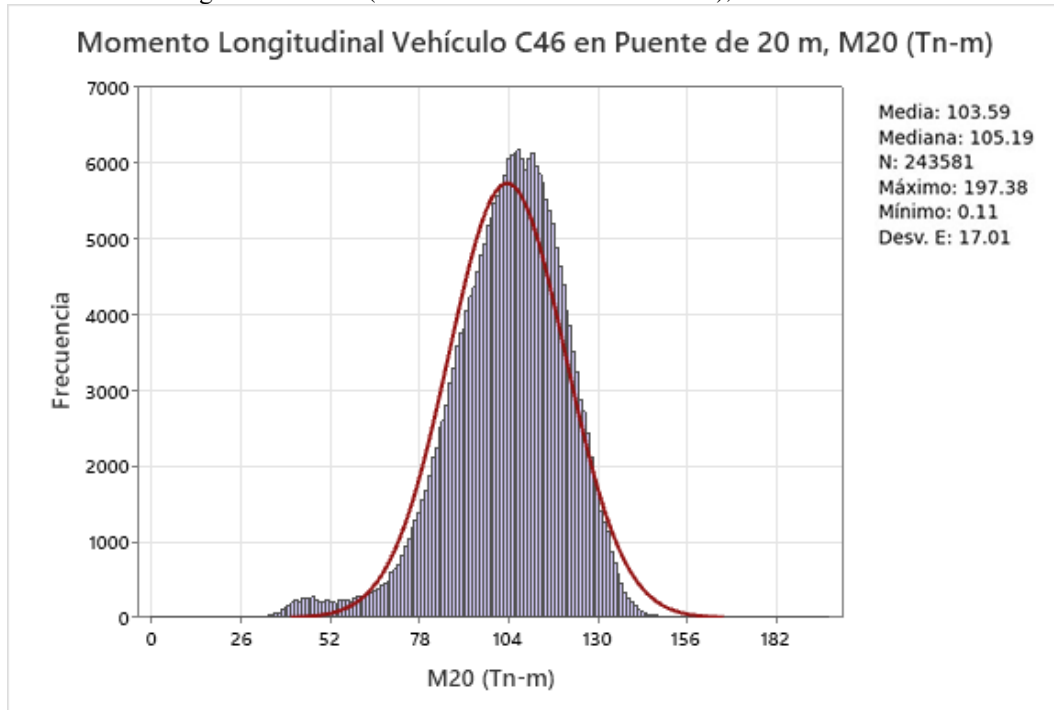
Para el vehículo C46, se analizaron las gráficas desde la Figura 71 hasta la Figura 76. Se observó que, en puentes de diez metros y 20 metros, la distribución de los momentos ajustó perfectamente a una distribución teórica normal. En los claros de 30, 40, 50 y 60 metros, se mantuvo la misma tendencia y distribución que los otros vehículos, pero con mayores momentos.

Figura 71: M10 (momento máximo en claro 10m), Vehículo C46



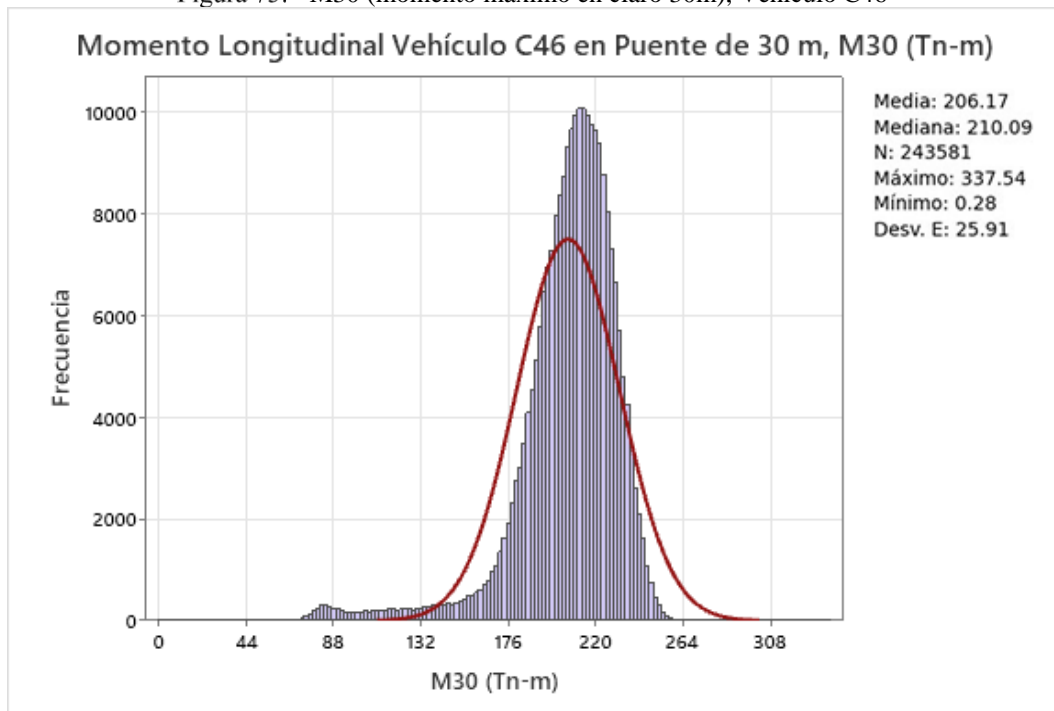
Fuente: Elaboración propia.

Figura 72: M20 (momento máximo en claro 20m), Vehículo C46



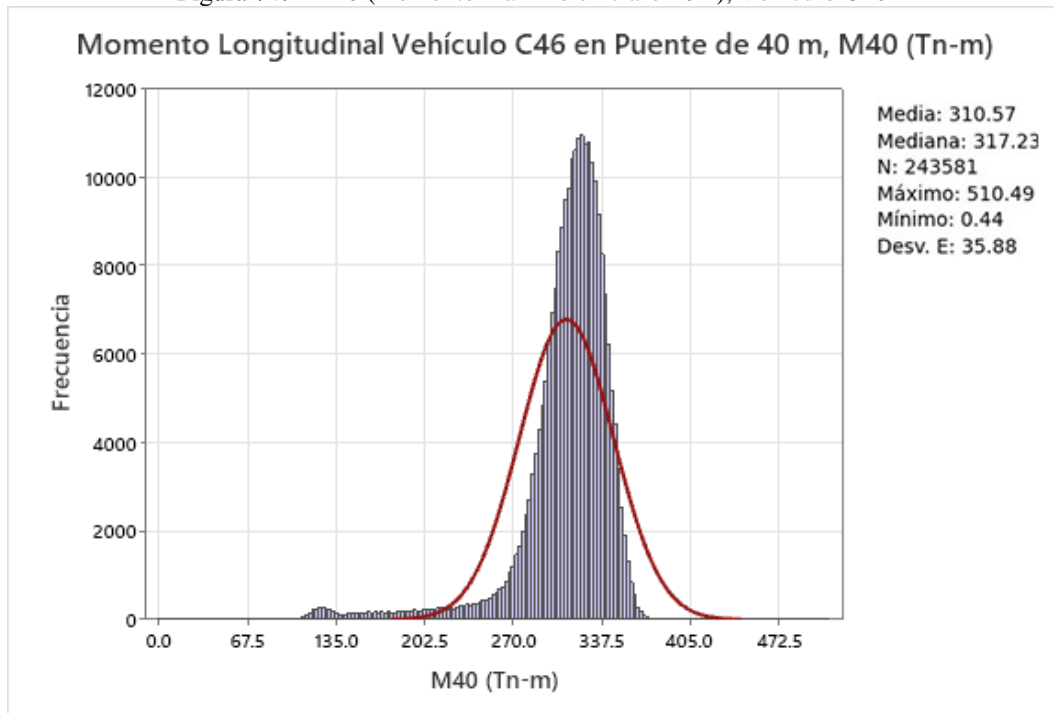
Fuente: Elaboración propia.

Figura 73: M30 (momento máximo en claro 30m), Vehículo C46



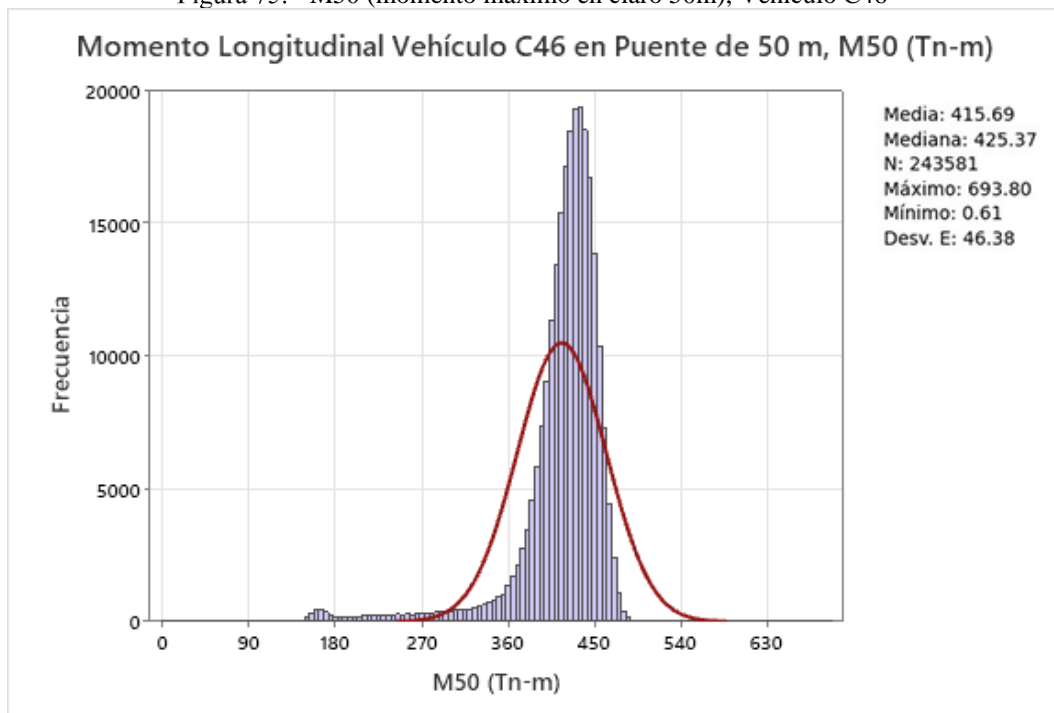
Fuente: Elaboración propia.

Figura 74: M40 (momento máximo en claro 40m), Vehículo C46



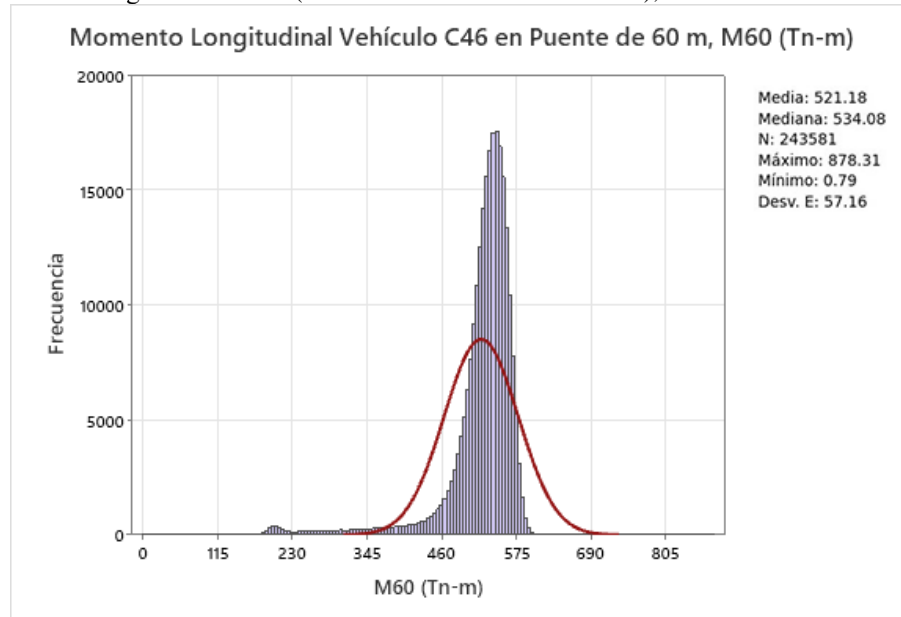
Fuente: Elaboración propia.

Figura 75: M50 (momento máximo en claro 50m), Vehículo C46



Fuente: Elaboración propia.

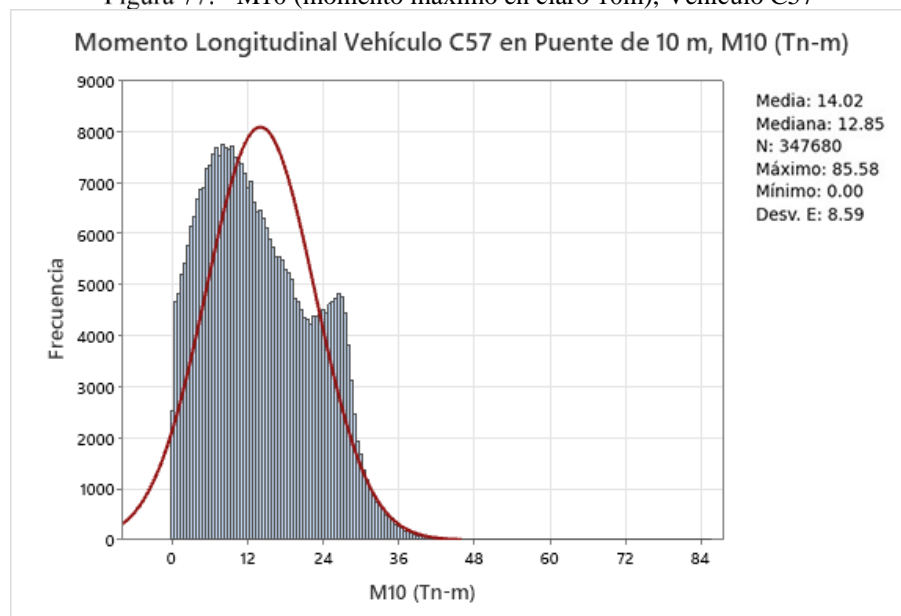
Figura 76: M60 (momento máximo en claro 60m), Vehículo C46



Fuente: Elaboración propia.

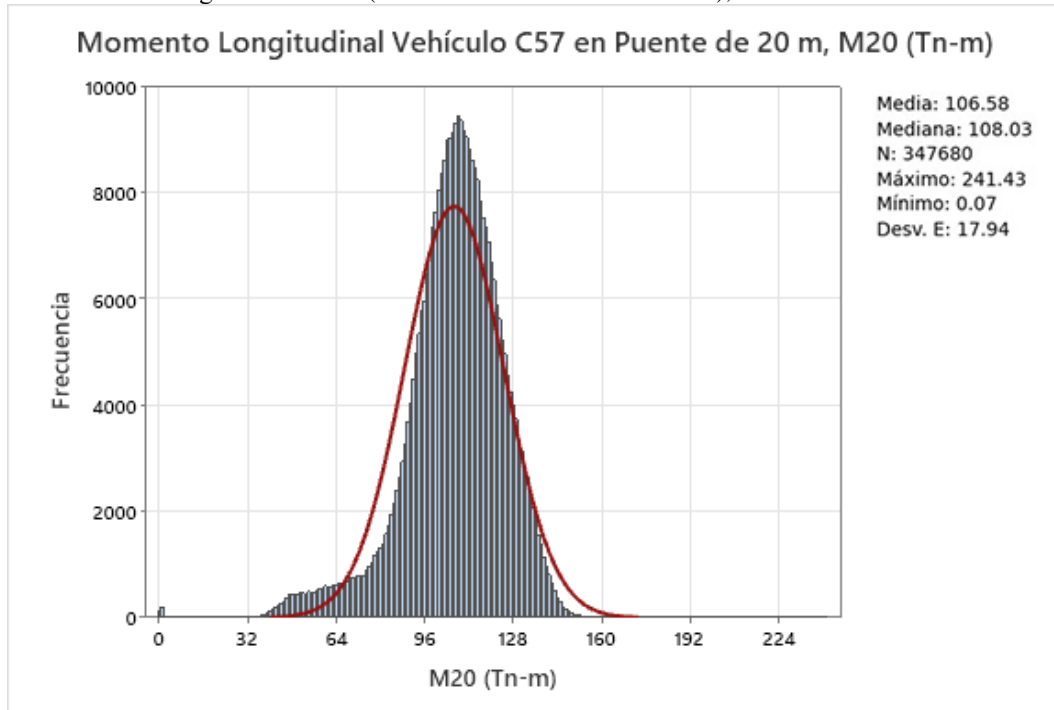
En el vehículo con configuración 57, se estudiaron las gráficas de momentos máximos desde la Figura 77 hasta la Figura 82. Al igual que en los otros casos, las distribuciones normales se ajustaron perfectamente para los casos donde la luz era menor a 20 metros, y en las longitudes de 30 metros en adelante, se observó la misma tendencia que en el resto de los vehículos.

Figura 77: M10 (momento máximo en claro 10m), Vehículo C57



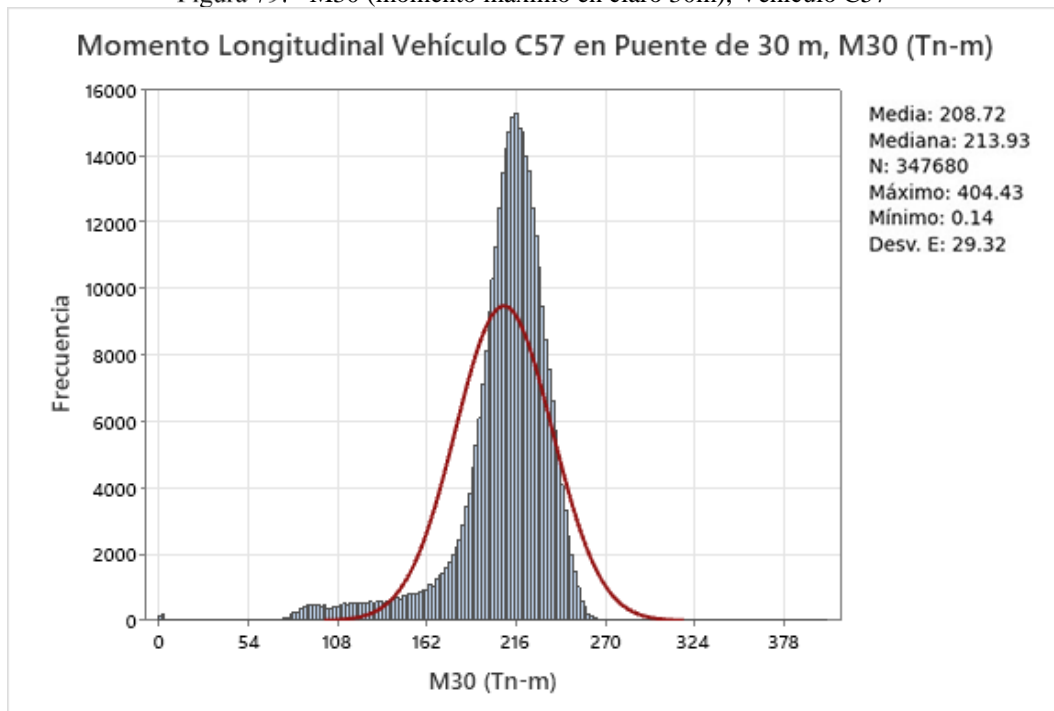
Fuente: Elaboración propia.

Figura 78: M20 (momento máximo en claro 20m), Vehículo C57



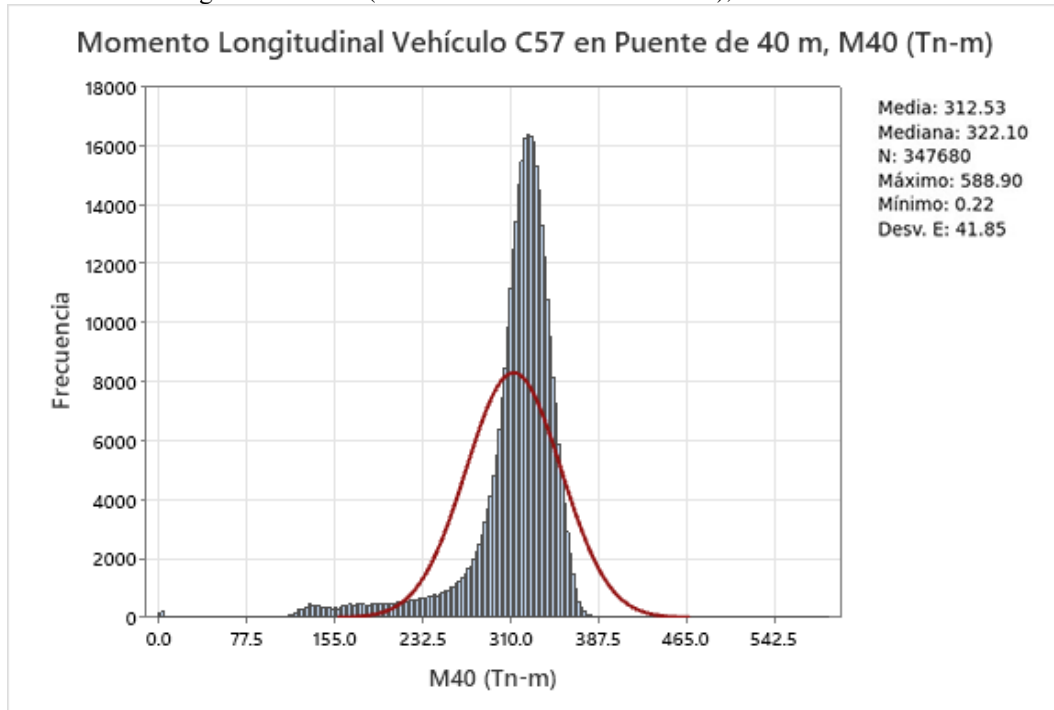
Fuente: Elaboración propia.

Figura 79: M30 (momento máximo en claro 30m), Vehículo C57



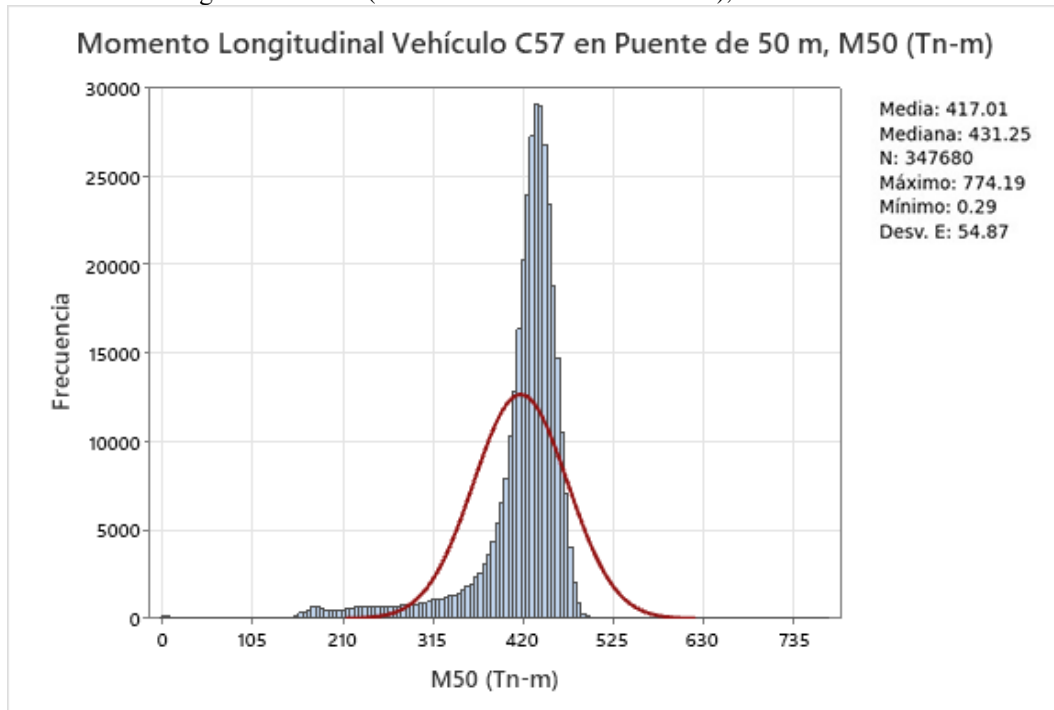
Fuente: Elaboración propia.

Figura 80: M40 (momento máximo en claro 40m), Vehículo C57



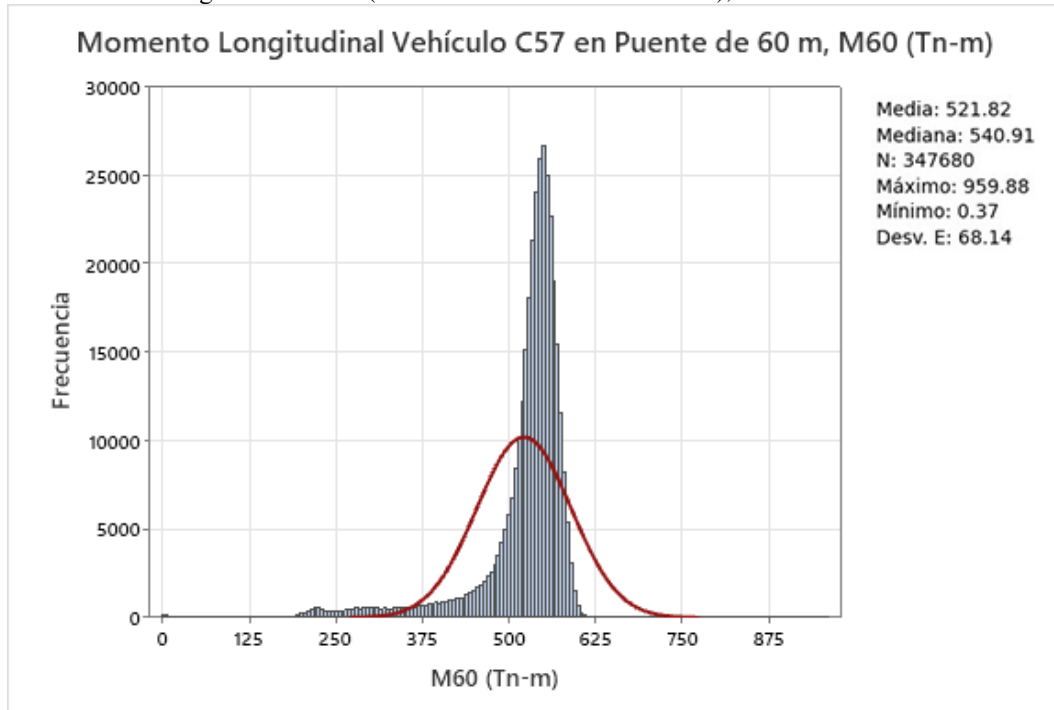
Fuente: Elaboración propia.

Figura 81: M50 (momento máximo en claro 50m), Vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

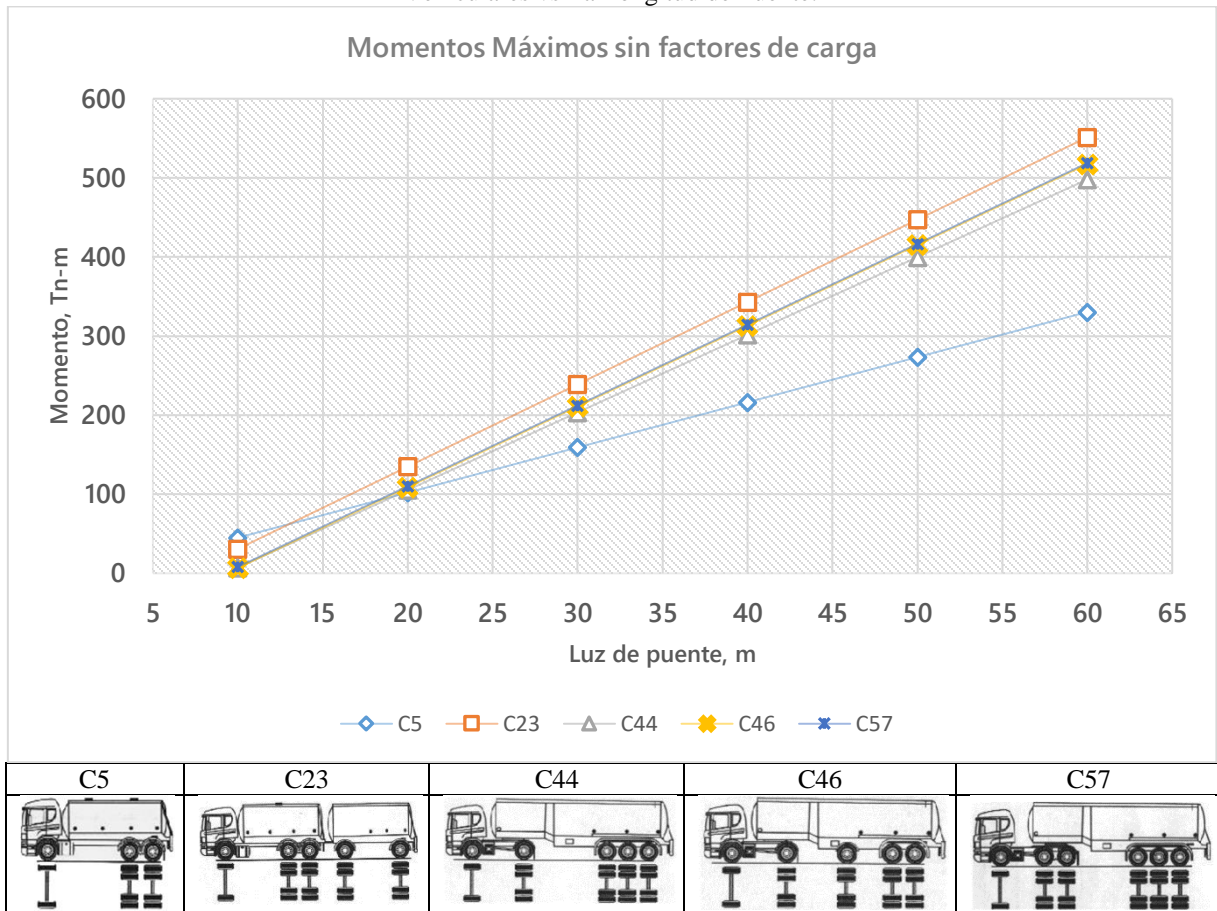
Figura 82: M60 (momento máximo en claro 60m), Vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 83, se resumen los momentos generados anteriormente. Se reunieron los datos analizados y, mediante una regresión lineal por mínimos cuadrados, se determinaron las ecuaciones correspondientes a cada configuración. En esta gráfica, se observó que el camión C23 generó mayores momentos en relación a los otros camiones. También se pudo apreciar que los camiones C57 y C46 generaron momentos muy similares, mientras que el camión C44 presentó momentos ligeramente menores a los otros tres mencionados. Esto se debe a que, según la Ley N°441, el C44 tiene un límite de peso bruto 2 toneladas menor que los otros camiones. Por otro lado, el camión C5 generó mayores momentos en puentes de 10 a 20 metros, pero a partir de los 20 metros en adelante, la diferencia fue bastante notoria en comparación con los momentos generados por los otros camiones. Esto se explica porque el camión C5 es un camión de dos ejes y lleva menos carga que el resto de los camiones. Sin embargo, se tomó en cuenta este vehículo para realizar un análisis y evaluar la posibilidad de sustituir el Tándem de diseño propuesto por la AASHTO LRFD.

Figura 83: Momentos Máximos Generados por las distintas Configuraciones Vehiculares vs La Longitud de Puente.



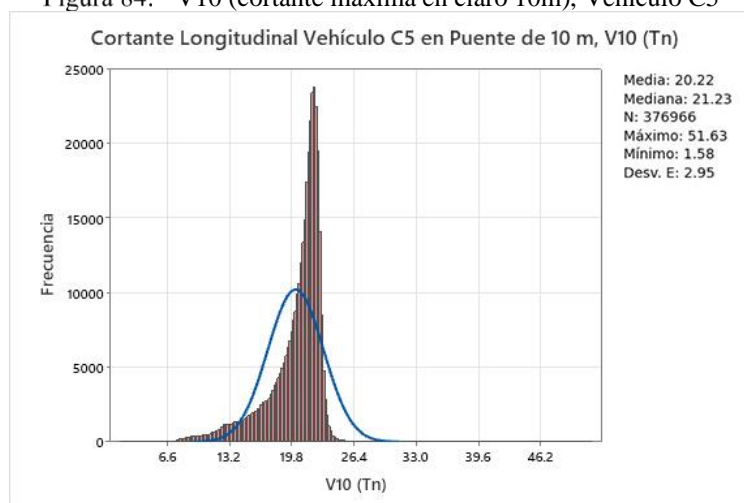
En esta sección se presentó el análisis de momentos flectores máximos en distintas longitudes de puente y para diferentes vehículos, lo cual proporcionó información valiosa para comprender el comportamiento de los momentos en diferentes condiciones y configuraciones. Los resultados obtenidos permitieron identificar tendencias y variaciones en los momentos flectores, proporcionando información relevante para el diseño y la evaluación de puentes en ingeniería estructural.

4.3.2. Cálculo de fuerzas cortantes máximas

En esta sección, se abordó el cálculo de las fuerzas cortantes máximas utilizando el método de líneas de influencia. Se aplicó una carga unitaria en uno de los apoyos y se ubicó la carga del eje trasero en el apoyo, como se mencionó en la introducción del capítulo.

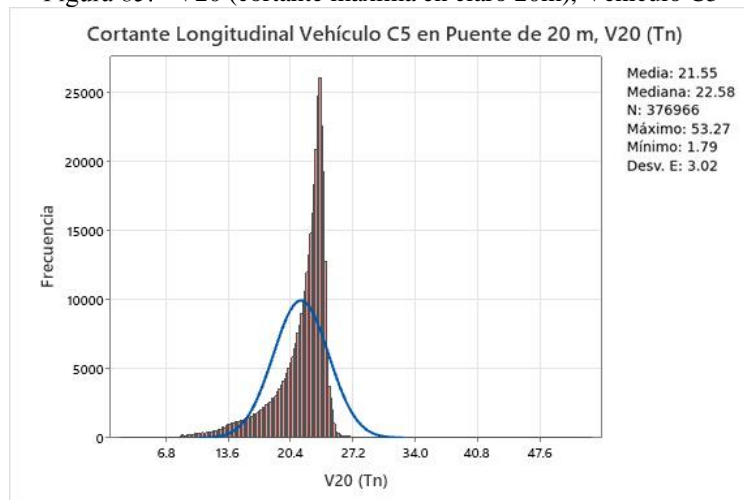
Para las cortantes del camión C5, se analizaron las gráficas de cortantes mostradas en las figuras 84 a 89. En estas gráficas, se observó una distribución similar y un comportamiento normal en la concentración de las cortantes. Aunque hubo un pico saliendo de la función de distribución normal, no fue alarmante, ya que se atribuyó a la gran cantidad de datos manejados.

Figura 84: V10 (cortante máxima en claro 10m), Vehículo C5



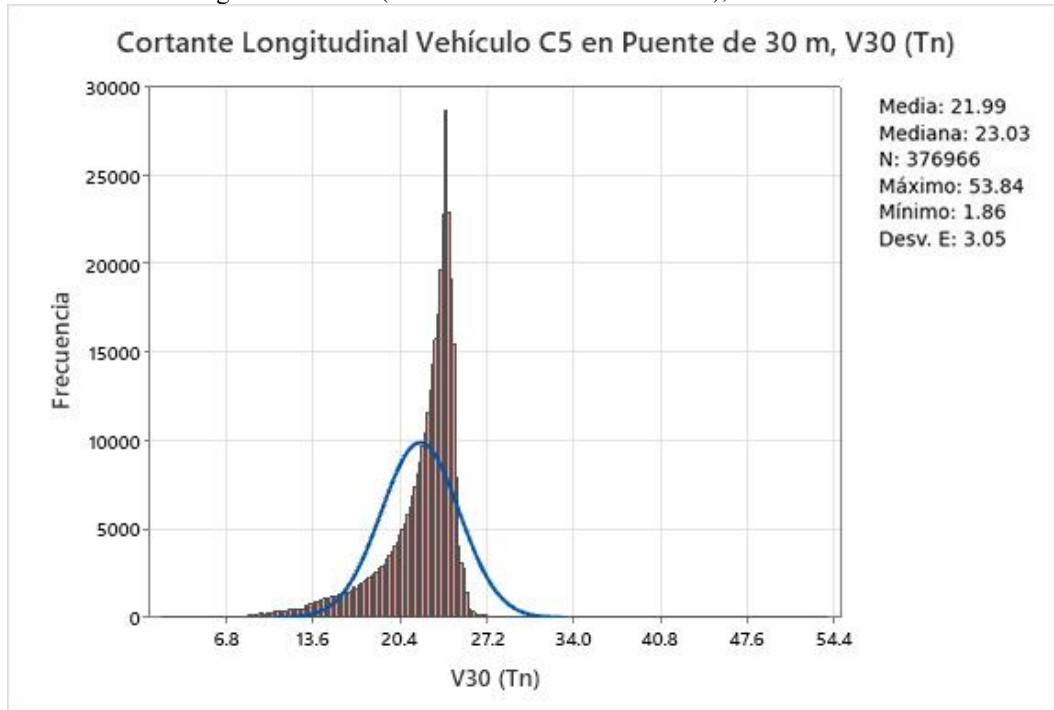
Fuente: Elaboración propia.

Figura 85: V20 (cortante máxima en claro 20m), Vehículo C5



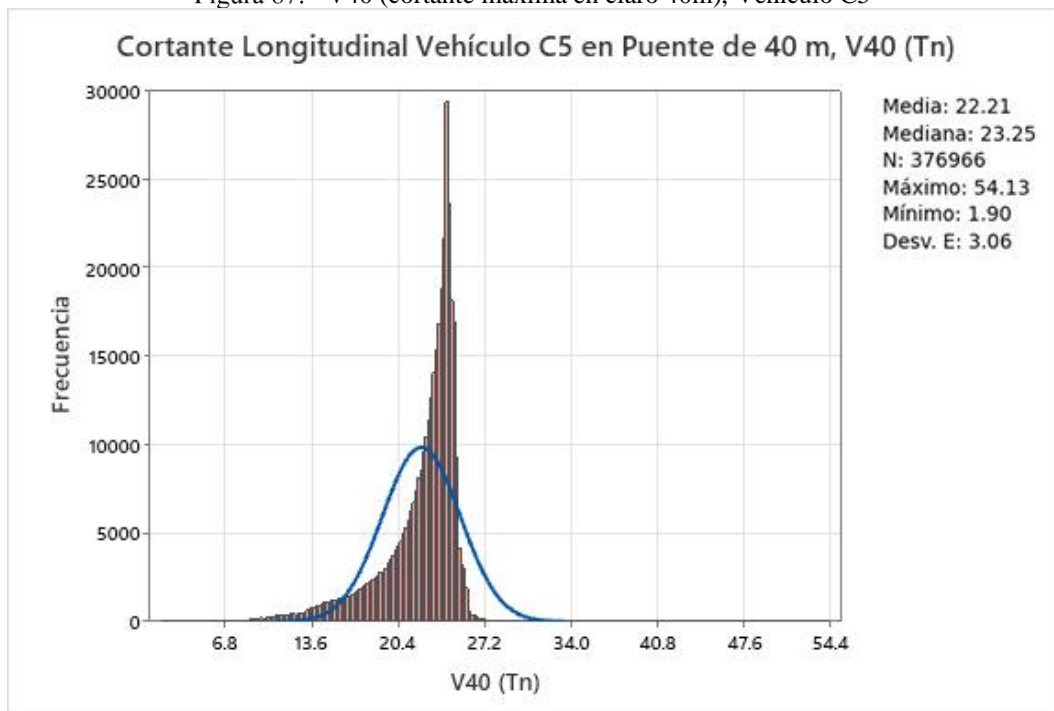
Fuente: Elaboración propia.

Figura 86: V30 (cortante máxima en claro 30m), Vehículo C5



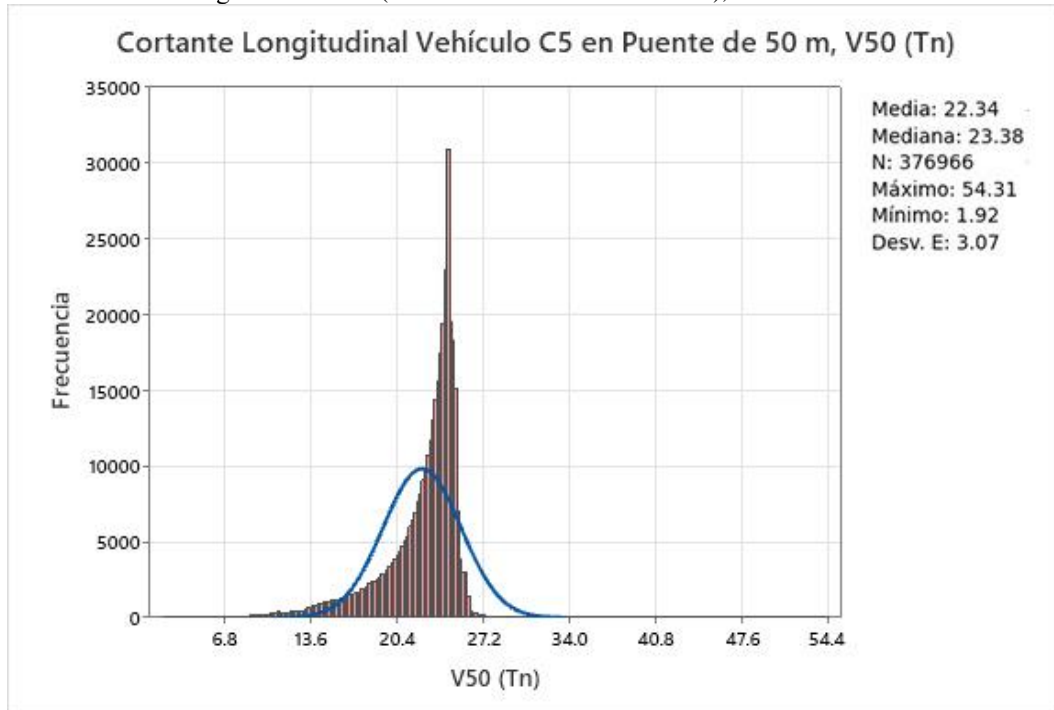
Fuente: Elaboración propia.

Figura 87: V40 (cortante máxima en claro 40m), Vehículo C5



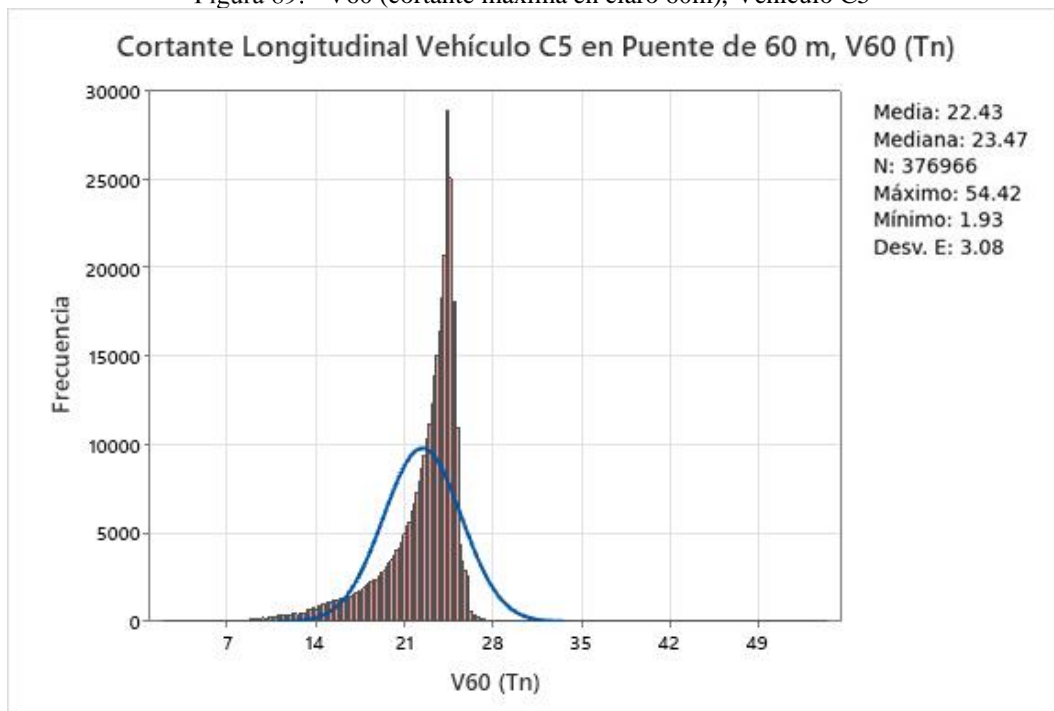
Fuente: Elaboración propia.

Figura 88: V50 (cortante máxima en claro 50m), Vehículo C5



Fuente: Elaboración propia.

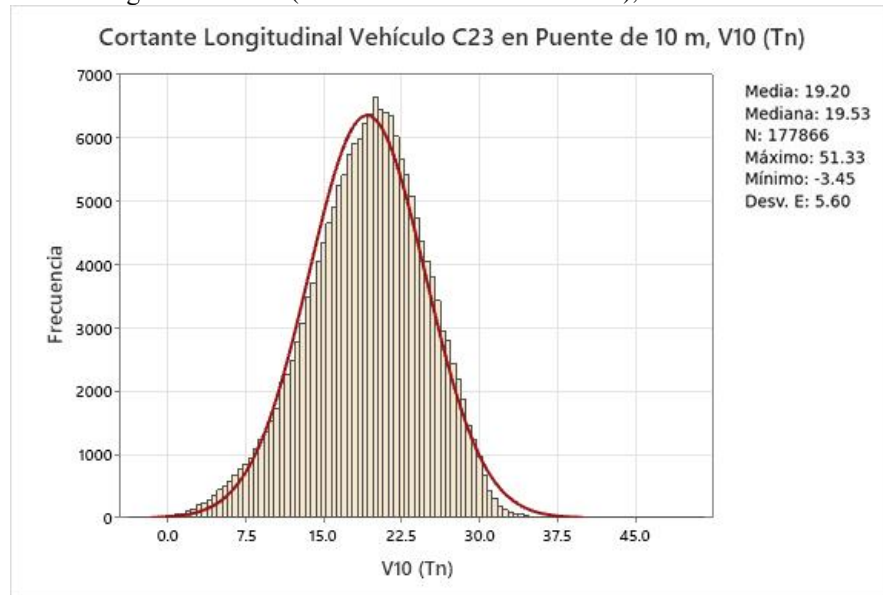
Figura 89: V60 (cortante máxima en claro 60m), Vehículo C5



Fuente: Elaboración propia.

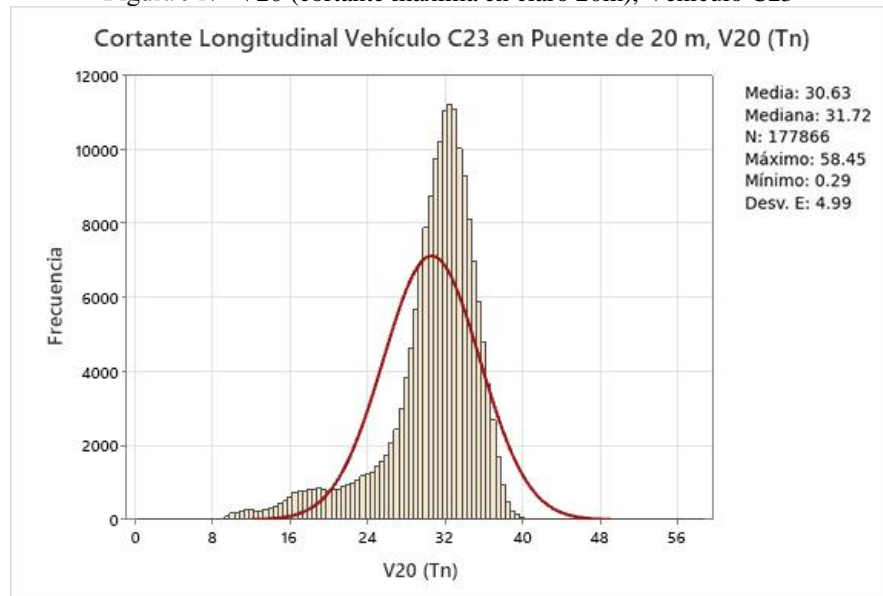
En el caso del camión C23, las gráficas de cortantes máximas (figuras 90 a 95) mostraron una distribución normal casi perfecta para el claro de 10 m. Para las distintas longitudes, se observó también un comportamiento normal de los datos. Además, había una mayor cantidad de vehículos en el lado izquierdo que en el derecho, lo cual tiene sentido ya que el lado derecho sobrepasaría por mucho los límites y en el lado izquierdo hay una gran cantidad de vehículos que no están cargados.

Figura 90: V10 (cortante máxima en claro 10m), Vehículo C23



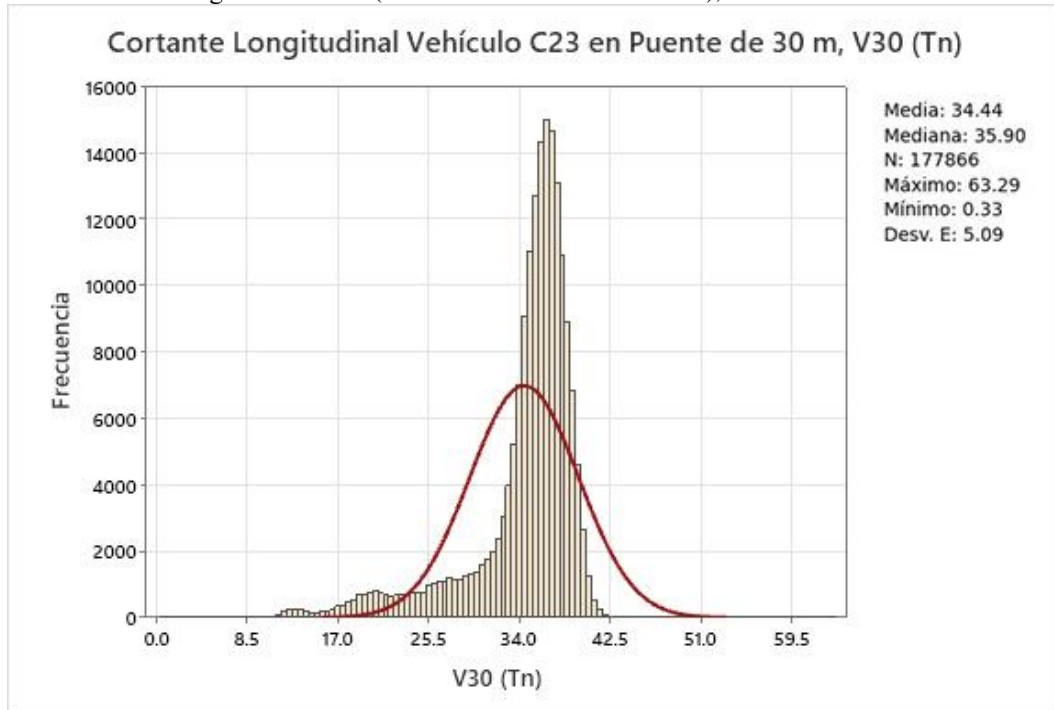
Fuente: Elaboración propia.

Figura 91: V20 (cortante máxima en claro 20m), Vehículo C23



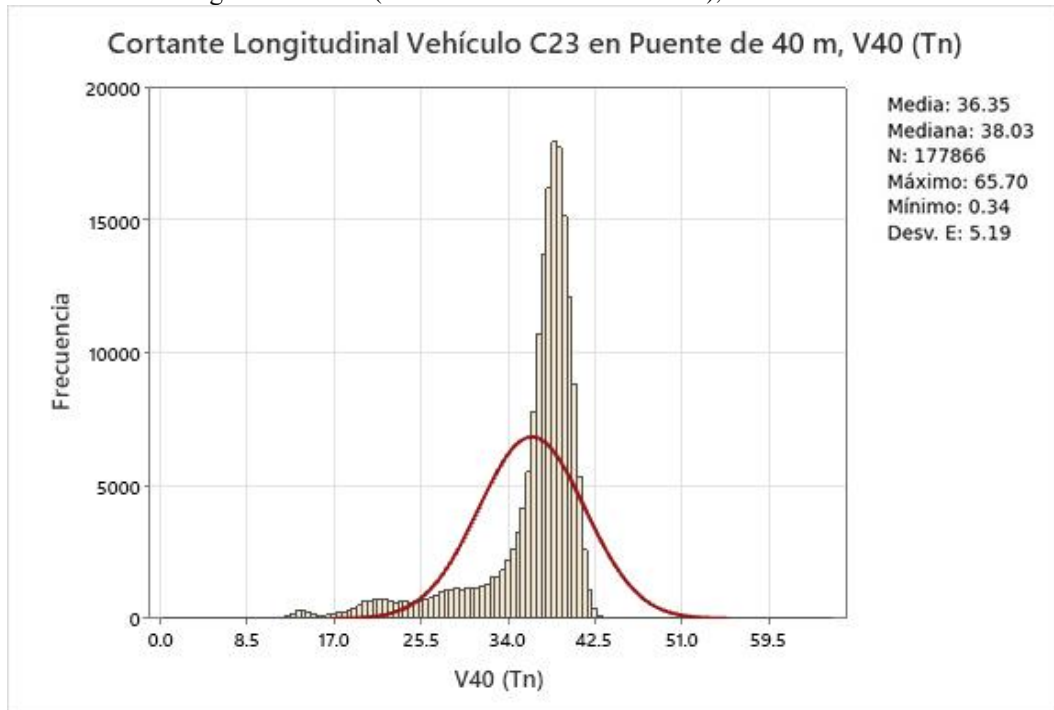
Fuente: Elaboración propia.

Figura 92: V30 (cortante máxima en claro 30m), Vehículo C23



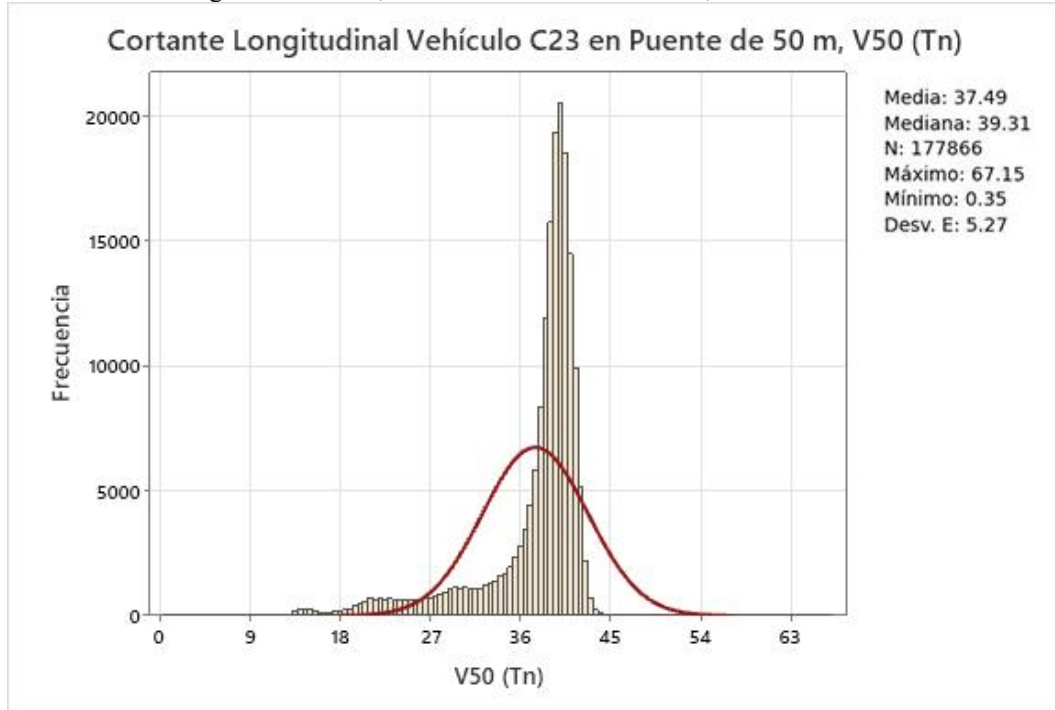
Fuente: Elaboración propia.

Figura 93: V40 (cortante máxima en claro 40m), Vehículo C23



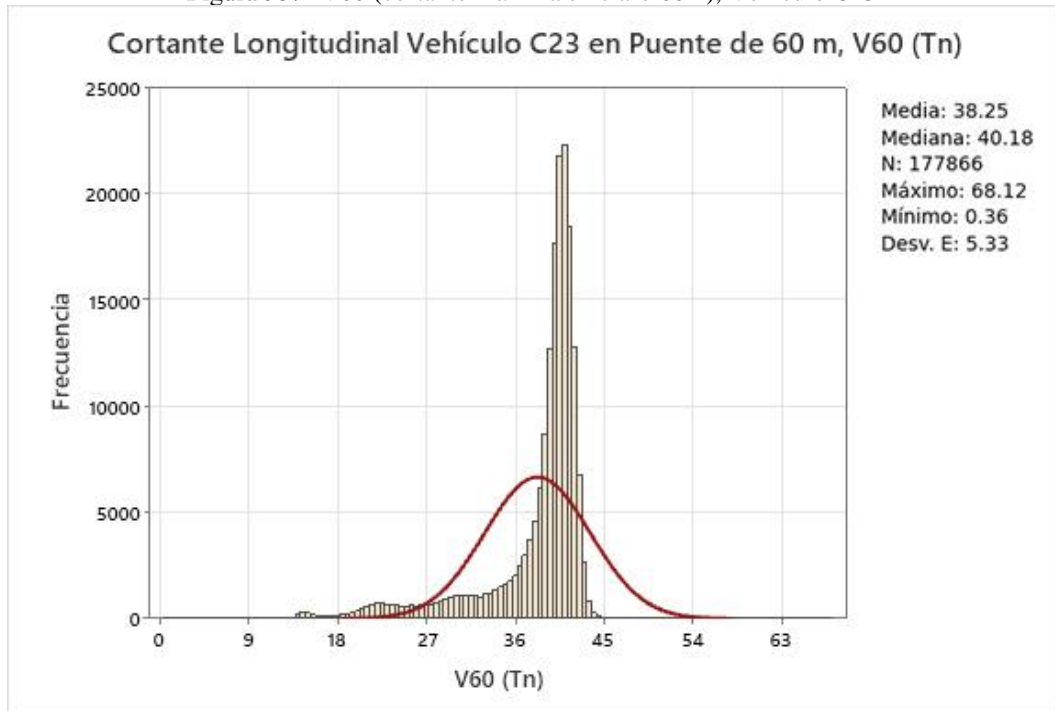
Fuente: Elaboración propia.

Figura 94: V50 (cortante máxima en claro 50m), Vehículo C23



Fuente: Elaboración propia.

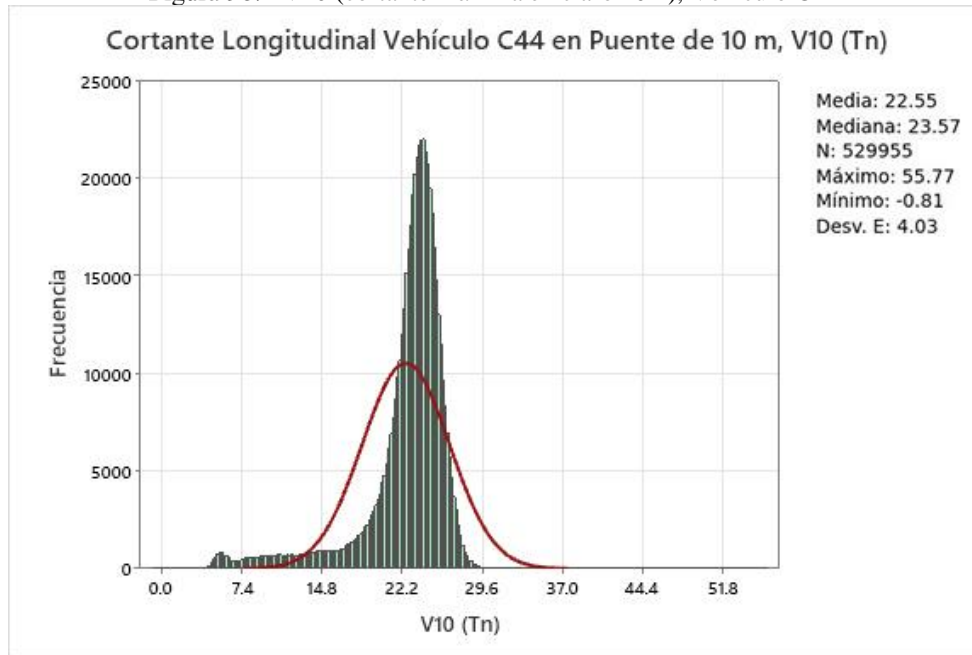
Figura 95: V60 (cortante máxima en claro 60m), Vehículo C23



Fuente: Elaboración propia.

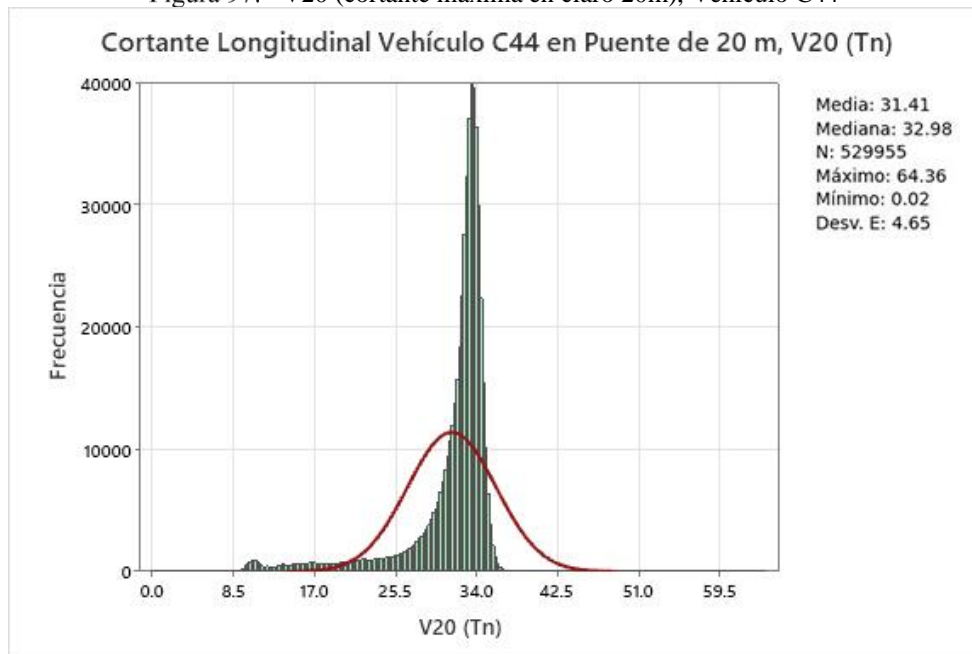
Con respecto a la configuración C44, se analizaron las gráficas de cortantes en las figuras 96 a 101, donde se observó una distribución normal en todos los claros y una ligera tendencia de datos hacia el lado derecho, debido a que la mayoría de los vehículos están cargados.

Figura 96: V10 (cortante máxima en claro 10m), Vehículo C44



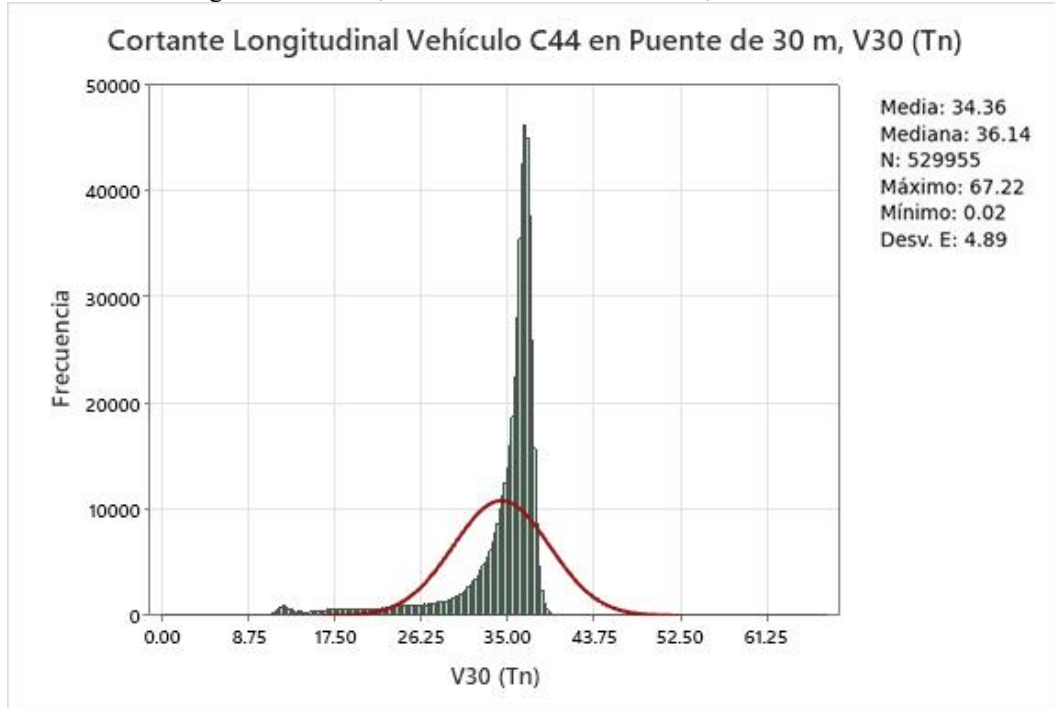
Fuente: Elaboración propia.

Figura 97: V20 (cortante máxima en claro 20m), Vehículo C44



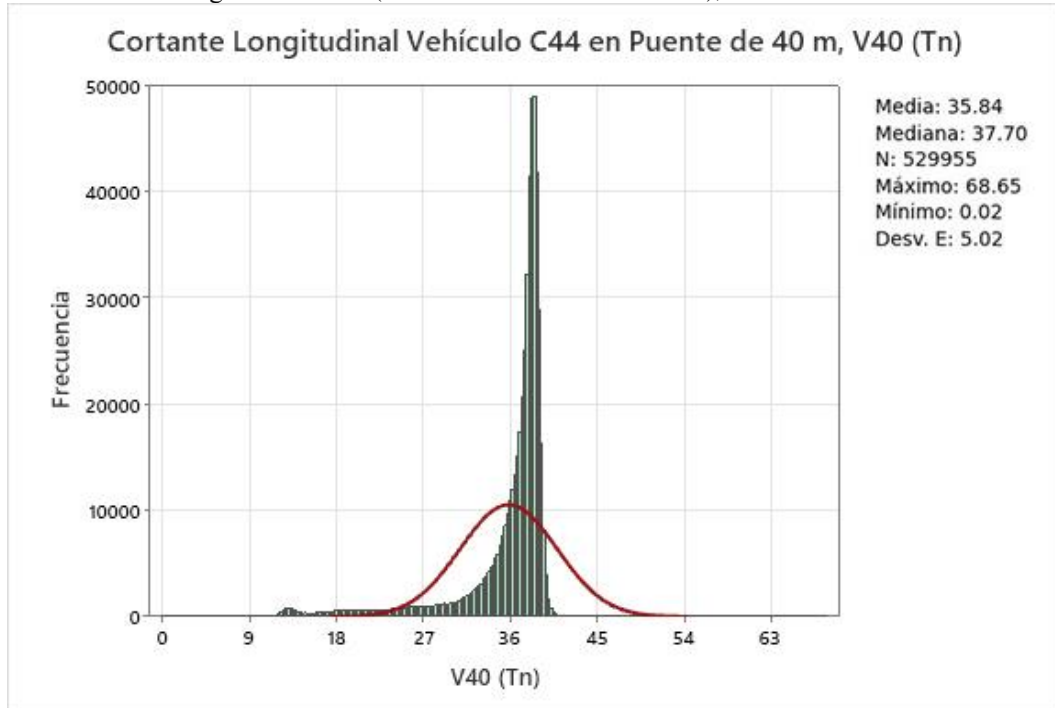
Fuente: Elaboración propia.

Figura 98: V30 (cortante máxima en claro 30m), Vehículo C44



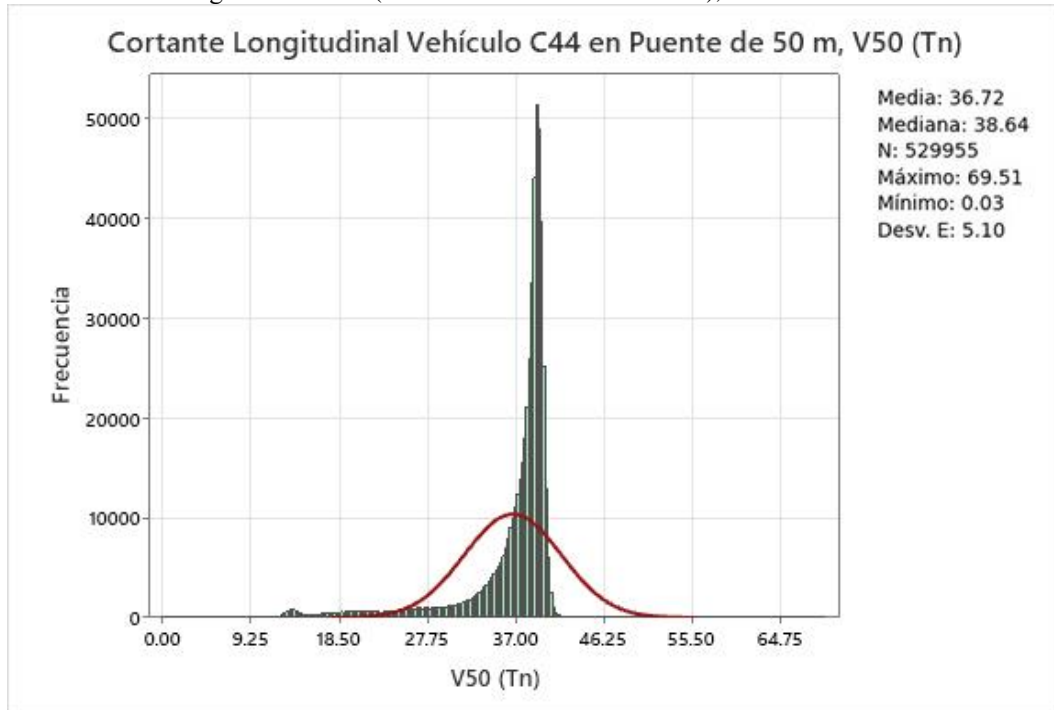
Fuente: Elaboración propia.

Figura 99: V40 (cortante máxima en claro 40m), Vehículo C44



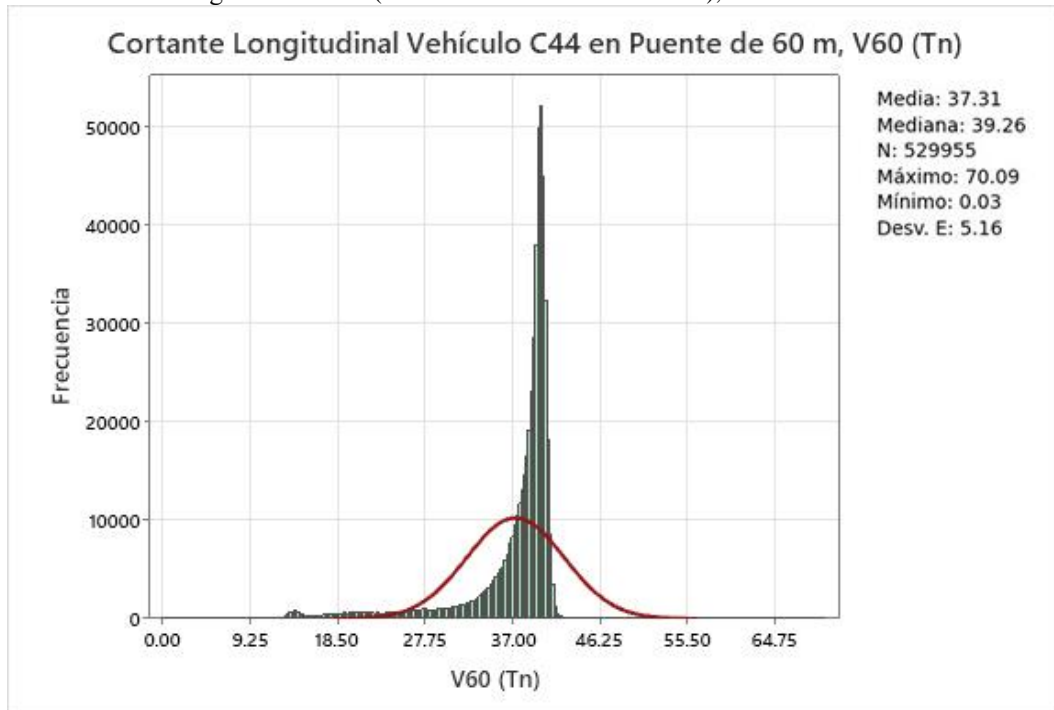
Fuente: Elaboración propia.

Figura 100: V50 (cortante máxima en claro 50m), Vehículo C44



Fuente: Elaboración propia.

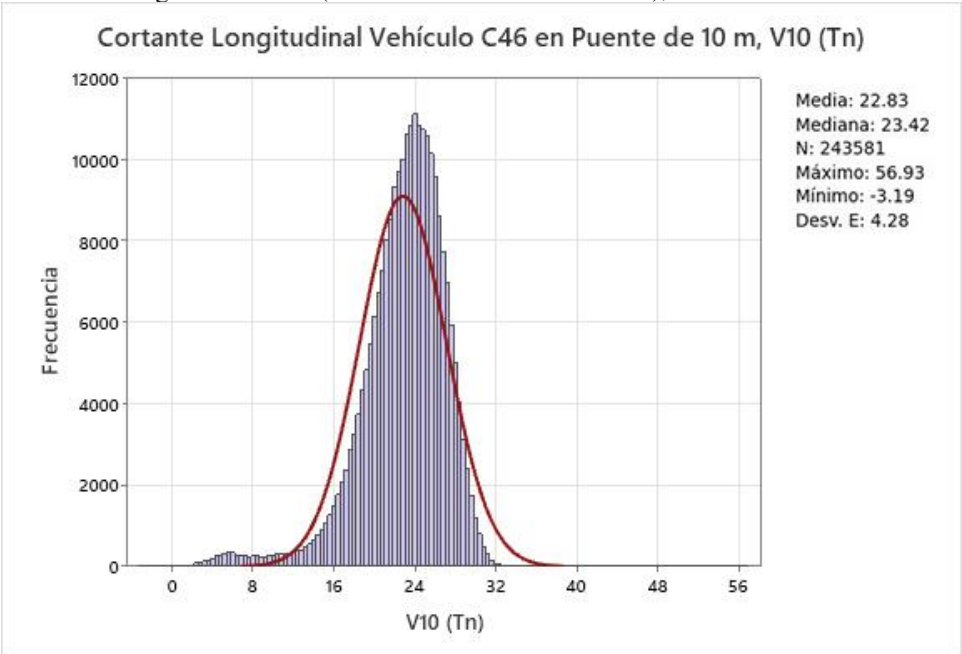
Figura 101: V60 (cortante máxima en claro 60m), Vehículo C44



Fuente: Elaboración propia.

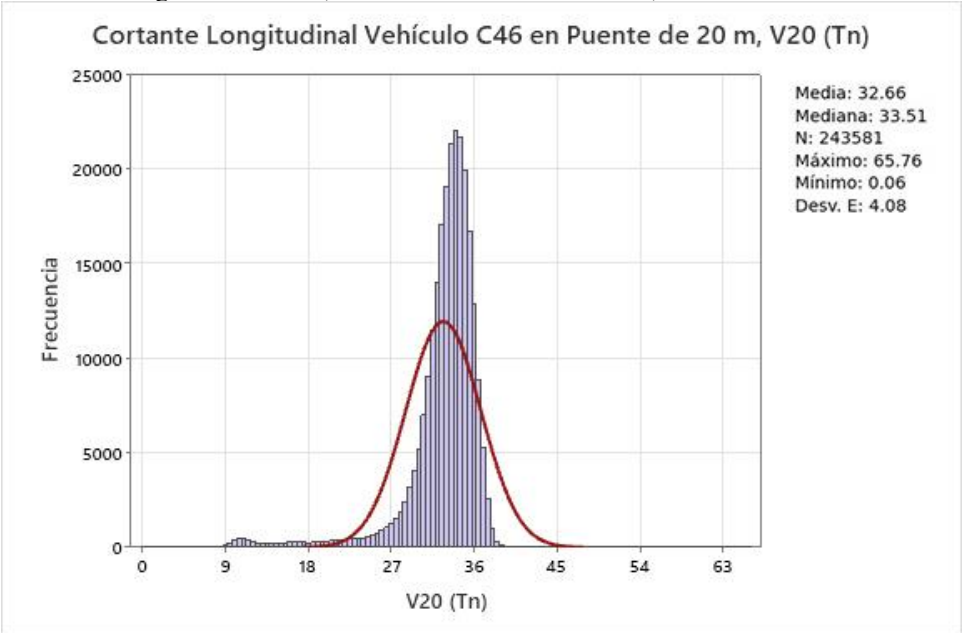
En la configuración del vehículo C46, se estudiaron las gráficas de cortante máxima para distintas longitudes de puente en las figuras 102 a 107. Al igual que en los demás vehículos, se observó una distribución normal, lo que indica que los datos son coherentes y están correctamente calculados.

Figura 102: V10 (cortante máxima en claro 10m), Vehículo C46



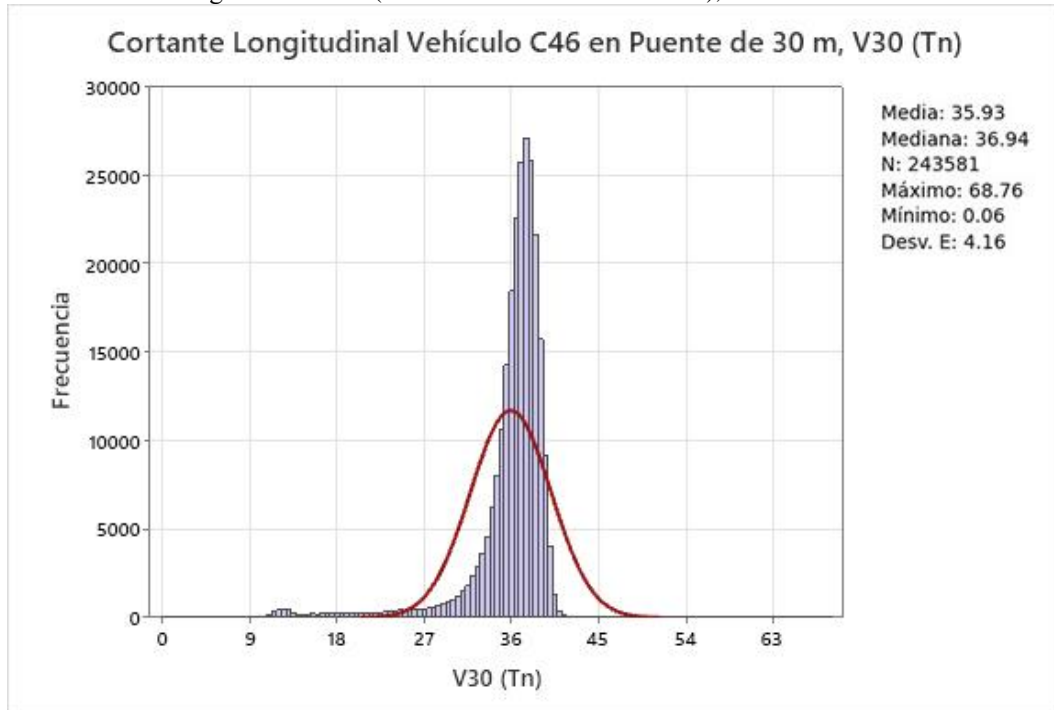
Fuente: Elaboración propia.

Figura 103: V20 (cortante máxima en claro 20m), Vehículo C46



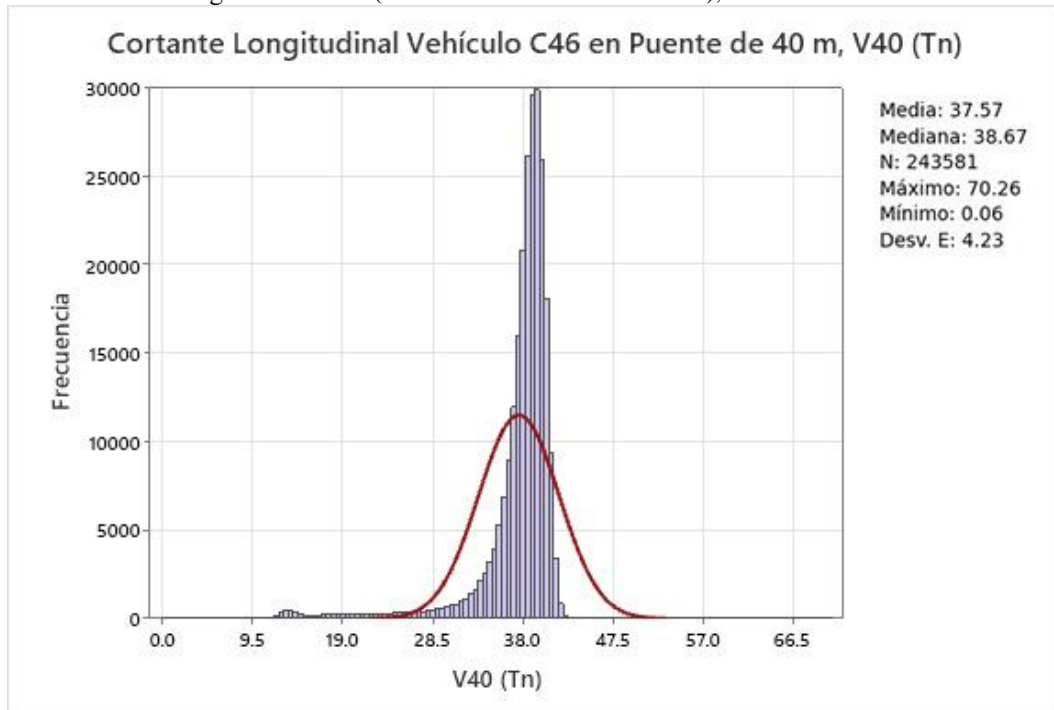
Fuente: Elaboración propia.

Figura 104: V30 (cortante máxima en claro 30m), Vehículo C46



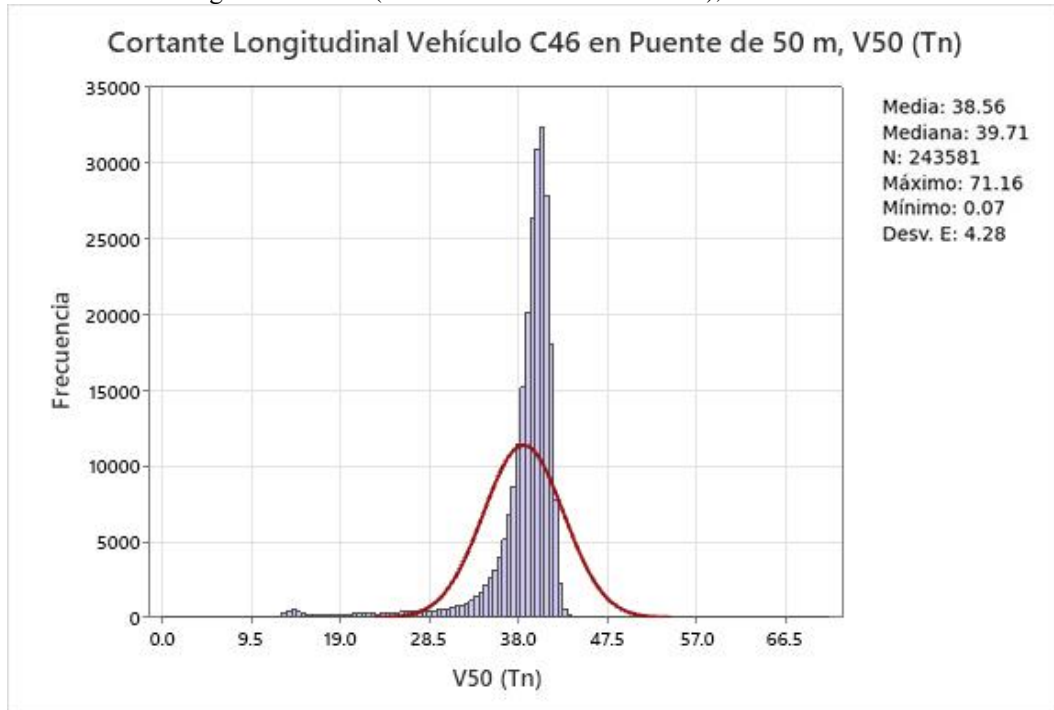
Fuente: Elaboración propia.

Figura 105: V40 (cortante máxima en claro 40m), Vehículo C46



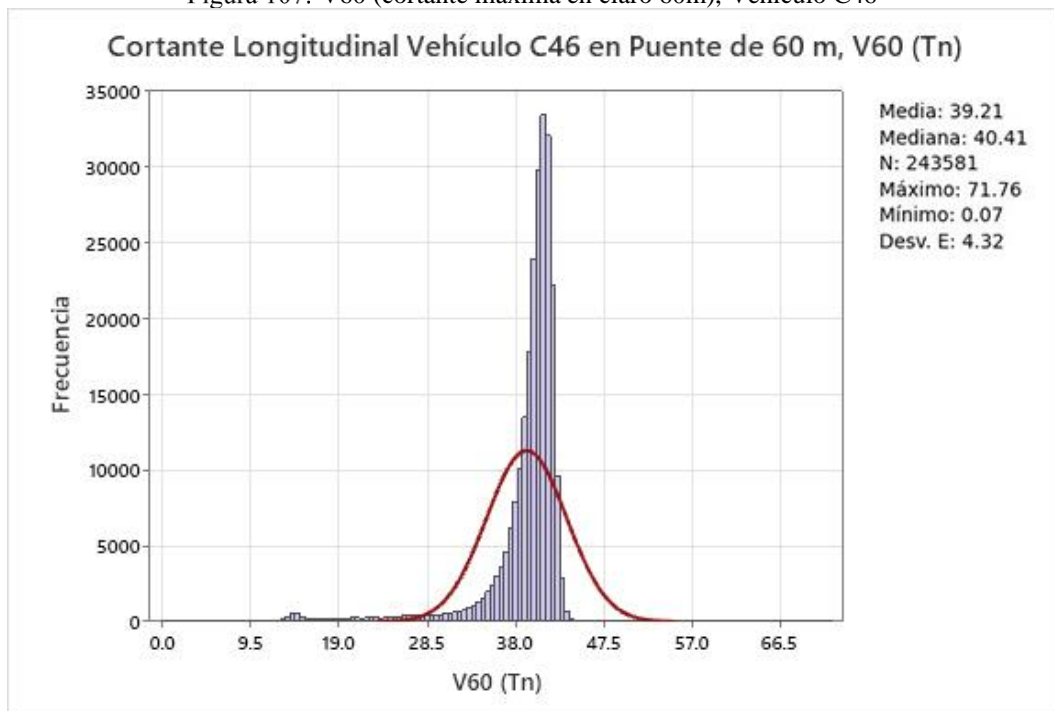
Fuente: Elaboración propia.

Figura 106: V50 (cortante máxima en claro 50m), Vehículo C46



Fuente: Elaboración propia.

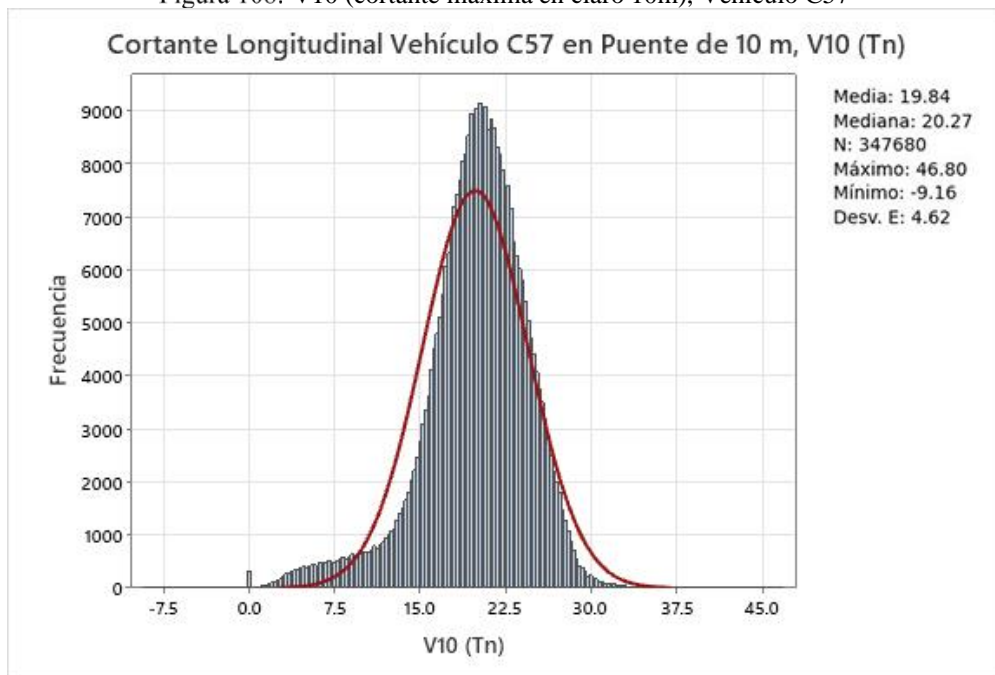
Figura 107: V60 (cortante máxima en claro 60m), Vehículo C46



Fuente: Elaboración propia.

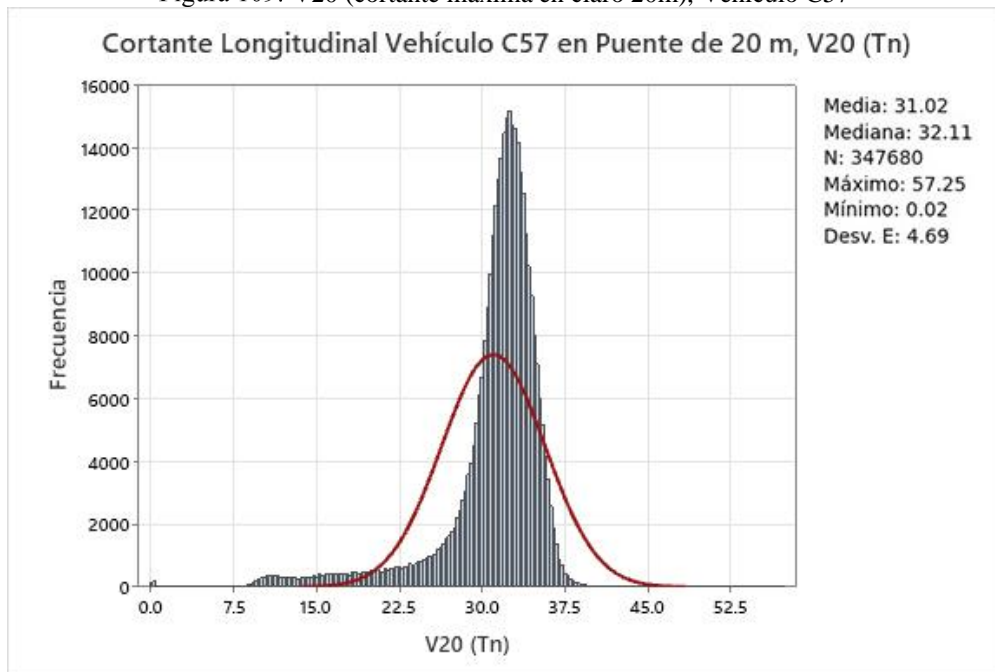
Para la configuración del vehículo C57, se analizaron las gráficas de cortante máxima en las figuras 108 a 113. En estos casos, se observó una distribución normal, con un pico en el lado derecho debido a que la mayoría de los vehículos suelen estar cargados.

Figura 108: V10 (cortante máxima en claro 10m), Vehículo C57



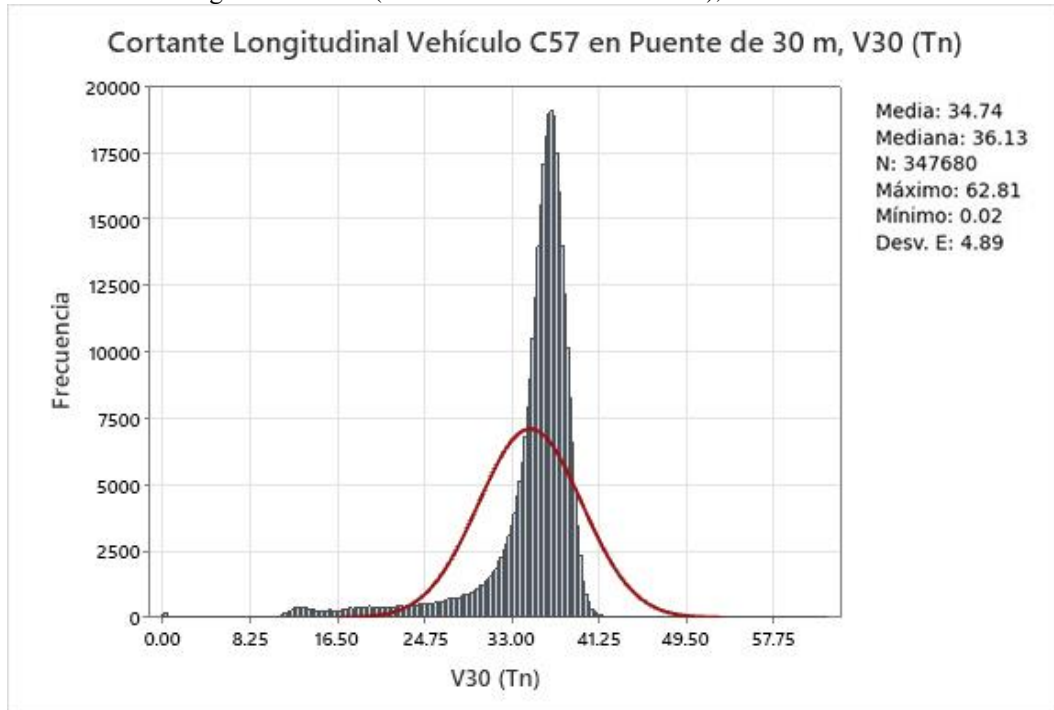
Fuente: Elaboración propia.

Figura 109: V20 (cortante máxima en claro 20m), Vehículo C57



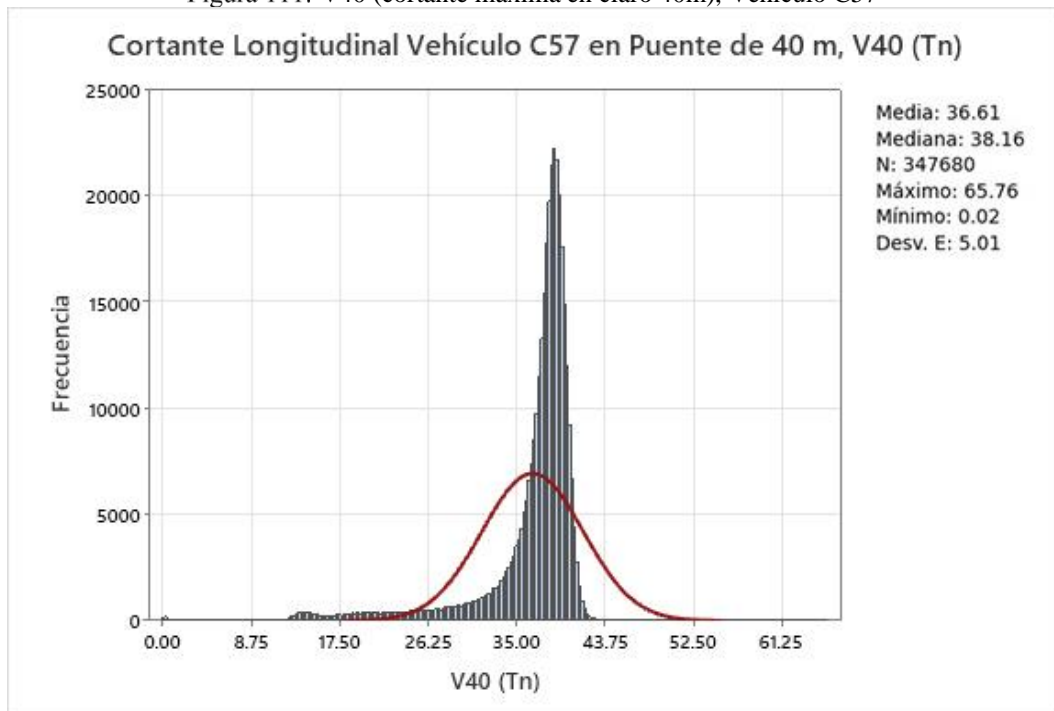
Fuente: Elaboración propia.

Figura 110: V30 (cortante máxima en claro 30m), Vehículo C57



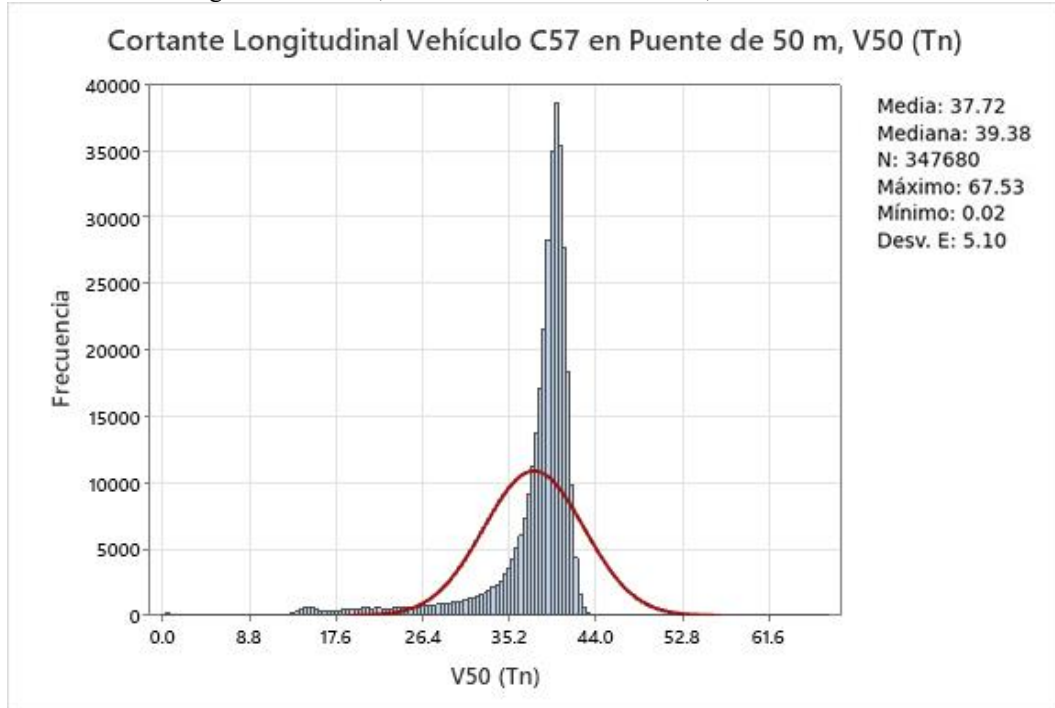
Fuente: Elaboración propia.

Figura 111: V40 (cortante máxima en claro 40m), Vehículo C57



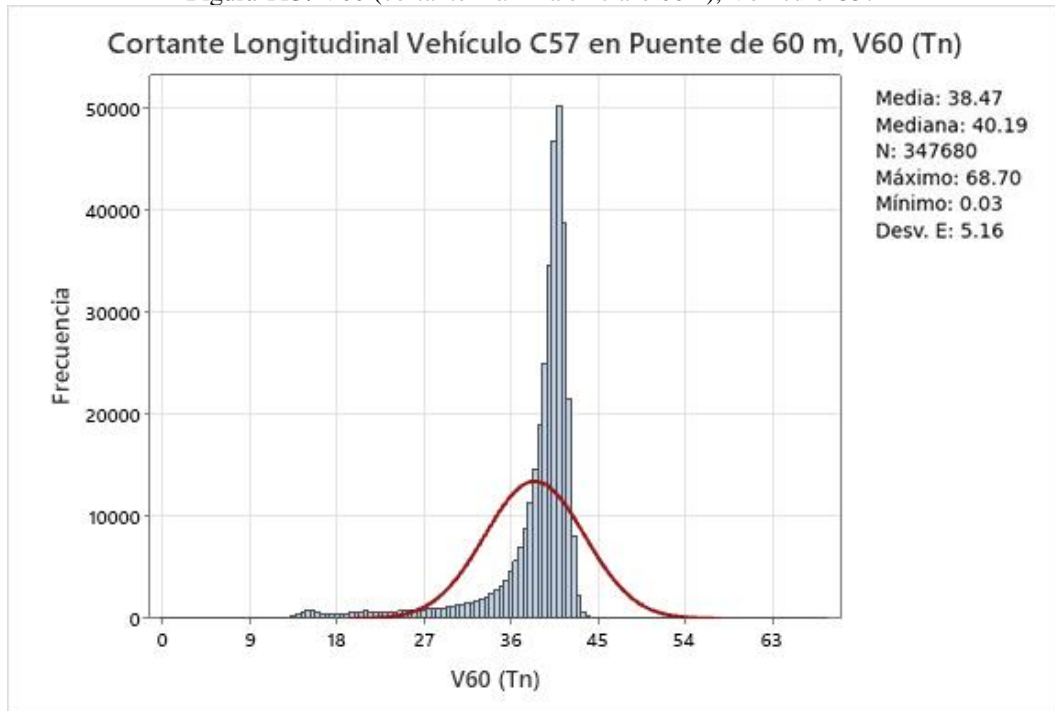
Fuente: Elaboración propia.

Figura 112: V50 (cortante máxima en claro 50m), Vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

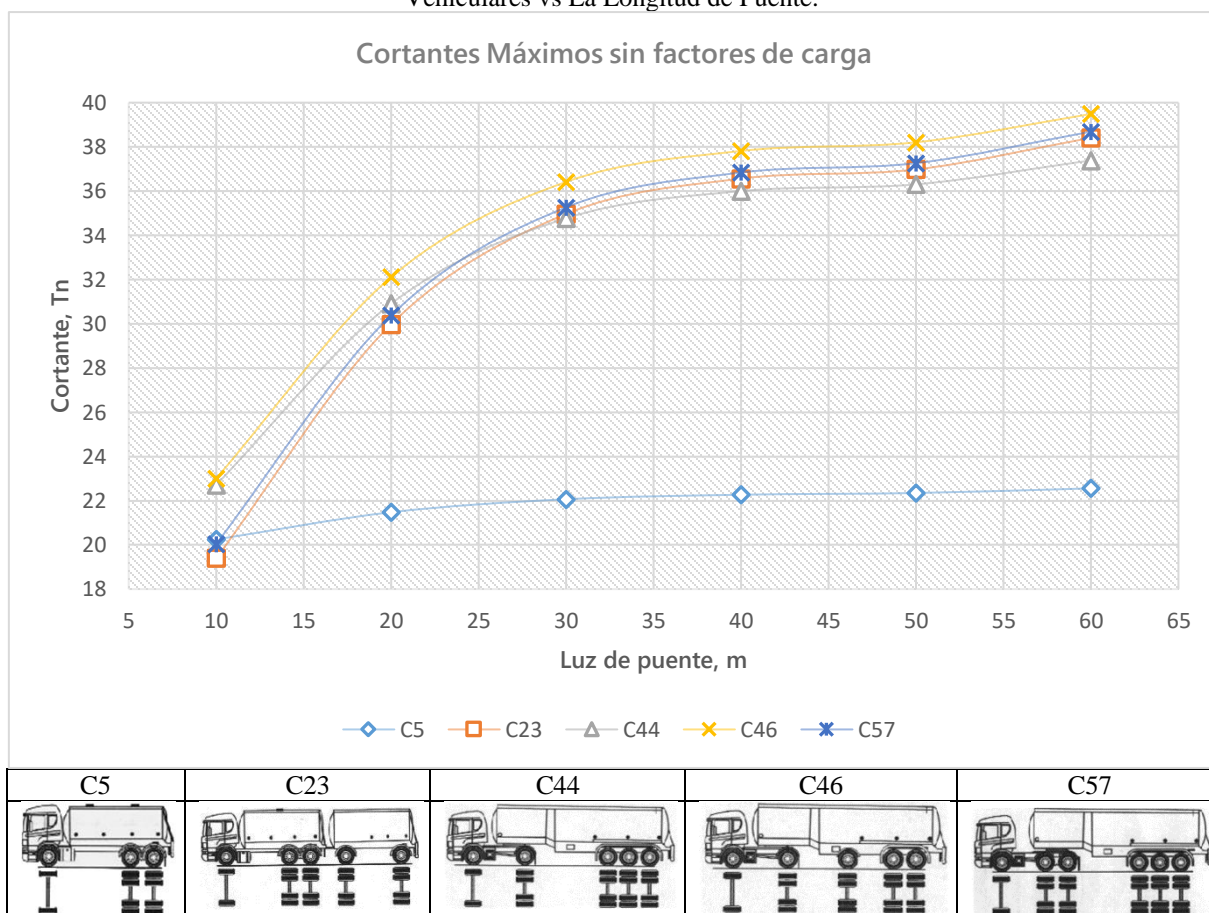
Figura 113: V60 (cortante máxima en claro 60m), Vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

La figura 114 resume las cortantes máximas generadas por las distintas configuraciones vehiculares en cada longitud de puente. Se determinaron mediante ecuaciones de regresión polinómica de tercer grado, ya que se ajustaban mejor al comportamiento de la cortante. Como resultado, se observó que los camiones C23, C44, C46 y C57 tienen cortantes similares, siendo las configuraciones 23 y 57 las que más se ajustan entre sí. La configuración que generó mayor cortante fue el camión C46, lo cual se esperaba debido a que esta configuración lleva mayor carga en el eje trasero. Cabe destacar que el camión que genera mayor momento no necesariamente genera mayor cortante, lo cual es un dato relevante para la toma de decisiones y la selección del camión de diseño. En cuanto al vehículo C5, se observó que genera una cortante máxima bastante menor en comparación con los otros camiones, lo cual es lógico debido a que lleva menos carga. Este resultado puede ser útil para determinar si es posible sustituir el tándem de camión HL-93 en el análisis.

Figura 114: Cortantes Máximos Generados por las distintas Configuraciones Vehiculares vs La Longitud de Puente.



Fuente: Elaboración propia.

En resumen, el cálculo de las fuerzas cortantes máximas y su comparación entre diferentes configuraciones vehiculares proporcionó información valiosa para el diseño de puentes. Se analizaron las distribuciones de los datos y se ajustaron mediante ecuaciones de regresión polinómica de tercer grado, lo que permitió una mejor comprensión del comportamiento de las cortantes en función de la longitud del puente y la configuración vehicular.

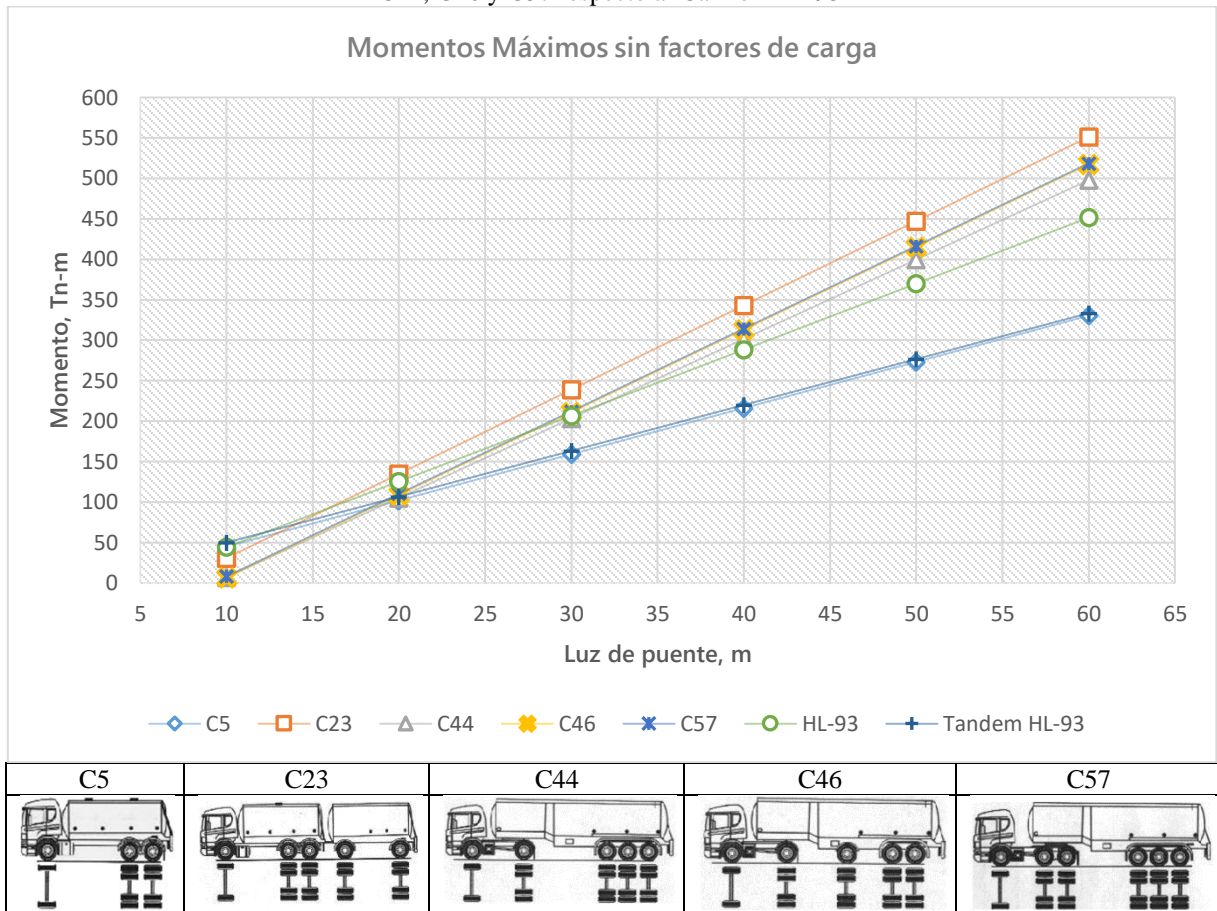
Esta información es fundamental para la toma de decisiones en el proceso de diseño y la selección del camión de diseño adecuado para garantizar la seguridad y la eficiencia de las estructuras de puentes. La observación de que el camión que genera mayor momento no necesariamente genera mayor cortante enfatiza la importancia de considerar múltiples factores y configuraciones vehiculares en el proceso de diseño.

4.4. Comparación de elementos mecánicos máximos de las configuraciones vehiculares principales con las especificaciones de la AASHTO LRFD

Al comparar los elementos mecánicos máximos de las configuraciones vehiculares principales (C5, C23, C44, C46, C57) con las especificaciones de la AASHTO LRFD, se tuvieron en cuenta el camión de diseño HL-93 y el Tandem de diseño HL-93. El objetivo era examinar la influencia de estas cargas en puentes de distintas longitudes. Se encontraron dos hallazgos principales: el camión que produce el mayor momento general es el C23, mientras que el que produce la mayor cortante es el C46. Al analizar estos datos, se garantiza que el camión de diseño calculado sea adecuado para Bolivia.

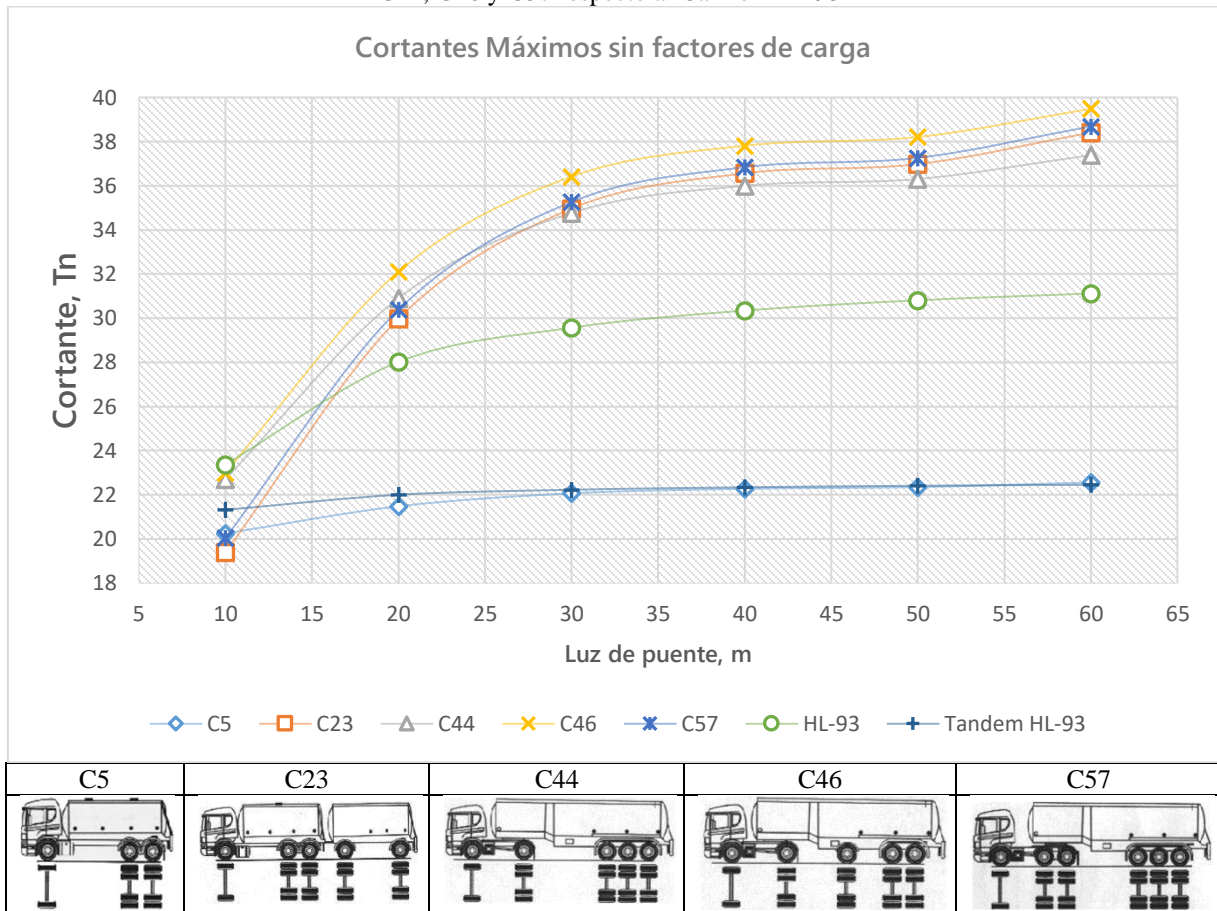
Examinando los gráficos de manera independiente, se observó en la Figura 115 que todos los momentos de los camiones considerados son mayores que el HL-93, con la excepción de la configuración C5, que tiene cargas mucho menores. Sin embargo, se constató que el momento generado por esta configuración es ligeramente inferior al Tándem de diseño HL-93. Esto indica que la carga del tándem de camión C5 (Eje-2) será menor que la que asume en el tándem de diseño HL-93, lo que se deberá tomar en cuenta para calcular un nuevo Tándem de diseño o mantener el Tándem propuesto por la AASHTO LRFD, lo cual será validado más adelante.

Figura 115: Comparación de Momentos Máximos de las Configuraciones C5, C23, C44, C46 y C57 respecto al Camión HL-93



En cuanto a las cortantes máximas, la Figura 116 muestra que todas las configuraciones, excepto el camión C5, superan significativamente las cortantes generadas por el camión de diseño HL-93. Esto respalda la idea de desarrollar un camión de diseño específico para el territorio boliviano. Al analizar la configuración C5 en relación con el Tándem HL-93, se observa que las cortantes del Tándem son mayores en puentes de 10 metros, debido principalmente a que las cargas del Tándem están más juntas que las del camión C5. Posteriormente, se aprecia que el comportamiento es muy similar, lo que confirma nuevamente que los momentos mecánicos generados por el Tándem de diseño HL-93, son mayores al tándem del camión C5.

Figura 116: Comparación de Cortantes Máximos de las Configuraciones C5, C23, C44, C46 y C57 respecto al Camión HL-93



Al analizar los elementos mecánicos, como momentos flectores y fuerzas cortantes, se pudo concluir que los camiones predominantes presentan características similares entre sí y generan elementos mecánicos significativamente superiores a los producidos por el camión HL-93. Por lo tanto, para el diseño del modelo de cargas vivas, se consideraron únicamente los camiones C23, C44, C46 y C57.

Para establecer el tándem de diseño, será necesario evaluar si las cargas proyectadas debido a los tándems presentes en las configuraciones principales superarán el diseño propuesto por la AASHTO. Al combinar las cargas de los ejes 3 y 4 con el objetivo de mejorar el comportamiento de los datos, se perdió la posibilidad y se generó poca confiabilidad para utilizar el tándem del camión C46 correspondiente a su eje 4. Por esta razón, para determinar las cargas del tándem de diseño, se emplearon los camiones C5 (Eje-2), C23 (Eje-2) y C57 (Eje-2), ya que estos camiones poseen un tándem en su configuración.

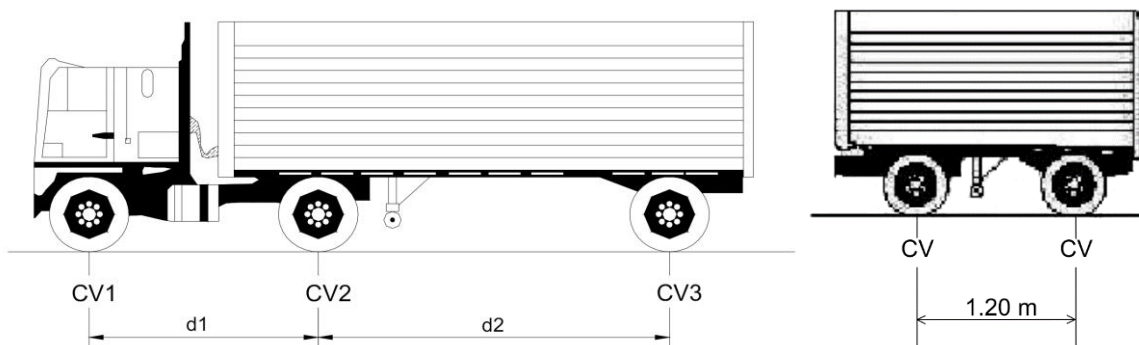
4.5. Diseño conceptual del modelo de cargas vivas vehiculares en Bolivia

El diseño conceptual del modelo de cargas vivas vehiculares en Bolivia busca adaptarse a las condiciones específicas del país, considerando tanto cargas concentradas como uniformemente repartidas. Para lograr esto, se utilizaron métodos estadísticos y probabilísticos en conjunto con análisis de la información disponible sobre las configuraciones vehiculares y las prácticas de pesaje en Bolivia.

Para diseñar la topología del modelo de cargas vivas vehiculares en Bolivia, se tomaron en cuenta las conclusiones obtenidas en el punto 4.4. Se consideró que los camiones de tres ejes son los que tienen mayor carga y se buscó uniformizar los camiones de cuatro ejes, convirtiéndolos en camiones de tres ejes, sumando el eje 3 y el eje 4 para obtener un nuevo eje 3'. Asimismo, se consideraron los modelos de cargas vivas establecidos por diferentes normas o reglamentos a nivel internacional, los cuales consisten en un sistema de cargas concentradas y una carga uniformemente repartida.

Teniendo en cuenta que el pesaje de los camiones en Bolivia se realiza por grupos de ejes, se decidió crear un vehículo virtual con tres cargas virtuales CV1, CV2 y CV3, una por cada eje virtual, separadas por dos distancias $d1$ y $d2$, como se observa en la figura 117. Este vehículo virtual se basa en el anexo 1 "Distancias entre ejes vehiculares" de la Ley N°441 "Ley de Control de Pesos y Dimensiones Vehiculares en la Red Vial Fundamental", la cual indica que cuando las distancias entre ejes son menores a 2.4 m, estos se consideran como un solo eje lo que permite la fácil agrupación de los mismos.

Figura 117: Modelo conceptual del Camión y Tándem de Diseño



Fuente: Elaboración propia.

Para validar el modelo propuesto, se llevaron a cabo análisis correlacionales y de regresión de los datos de los cinco componentes del sistema de cargas concentradas mediante métodos probabilísticos y estadísticos. De esta manera, se buscaron niveles de seguridad estructural adecuados a las condiciones reales del tránsito vehicular en Bolivia.

En cuanto al valor de la carga uniformemente repartida propuesta para el modelo, se obtuvo a través de un proceso de simulación estocástica que buscaba un alto nivel de confiabilidad. Este proceso se describirá en detalle más adelante en el documento.

4.6. Análisis estadístico correlacional y regresión de los datos para validación del modelo conceptual.

Para realizar un análisis correlacional de los datos y validar el modelo conceptual, se verificó inicialmente la incidencia de las cinco variables en los momentos y cortantes generados, determinando el coeficiente de corrección entre las variables asumidas en el modelo conceptual y los momentos y cortantes. Para ello, se aplicó las siguientes fórmulas:

$$M = A + B \cdot P2 + C \cdot P3 + E \cdot d2$$

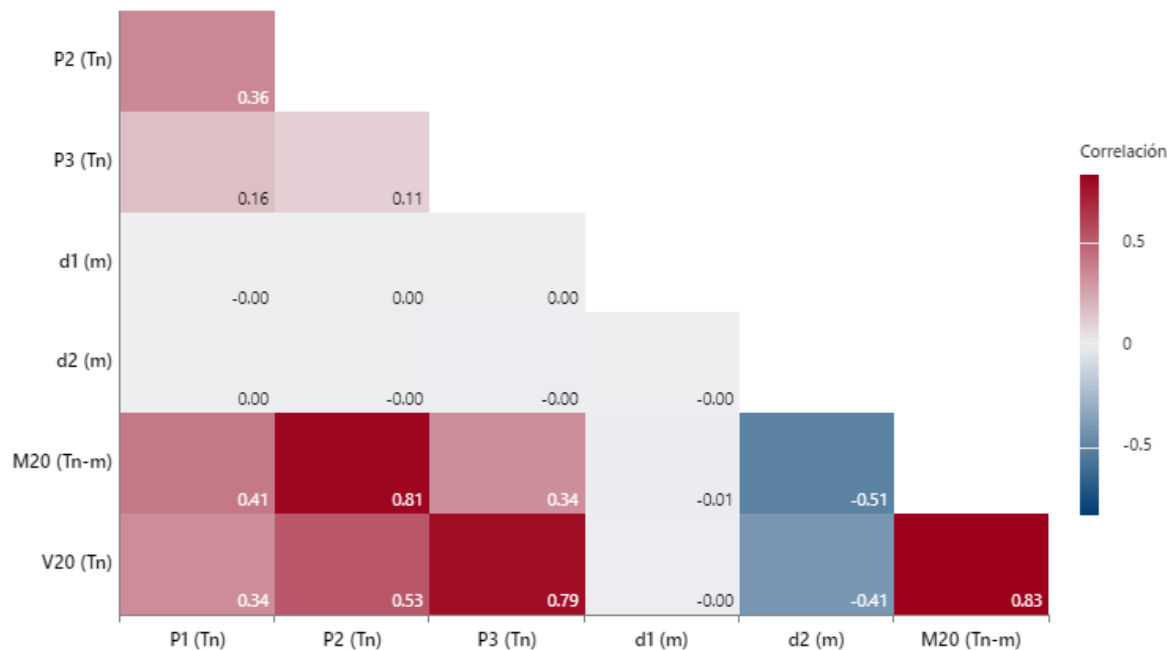
$$V = A + B \cdot P2 + C \cdot P3 + E \cdot d2$$

Se tomó en cuenta que las variables que afectan principalmente a los momentos y cortantes serían P2, P3 y d2, asumiendo analíticamente que estas variables aportan más al cálculo de los momentos y cortantes. En el pasado, realizar este análisis hubiera requerido un trabajo más pesado e iterativo, realizando varias regresiones de correlación múltiple y verificando individualmente la incidencia de estas variables mediante los valores de correlación obtenidos por distintas fórmulas de regresión lineal entre 2 variables o un diagrama de Pareto.

Actualmente, la tecnología y los softwares de análisis estadístico y probabilístico ofrecen diversas herramientas para facilitar este tipo de validaciones. Por tanto, se realizó el análisis correlacional de las cinco variables consideradas en el modelo conceptual y se analizó en un correlograma.

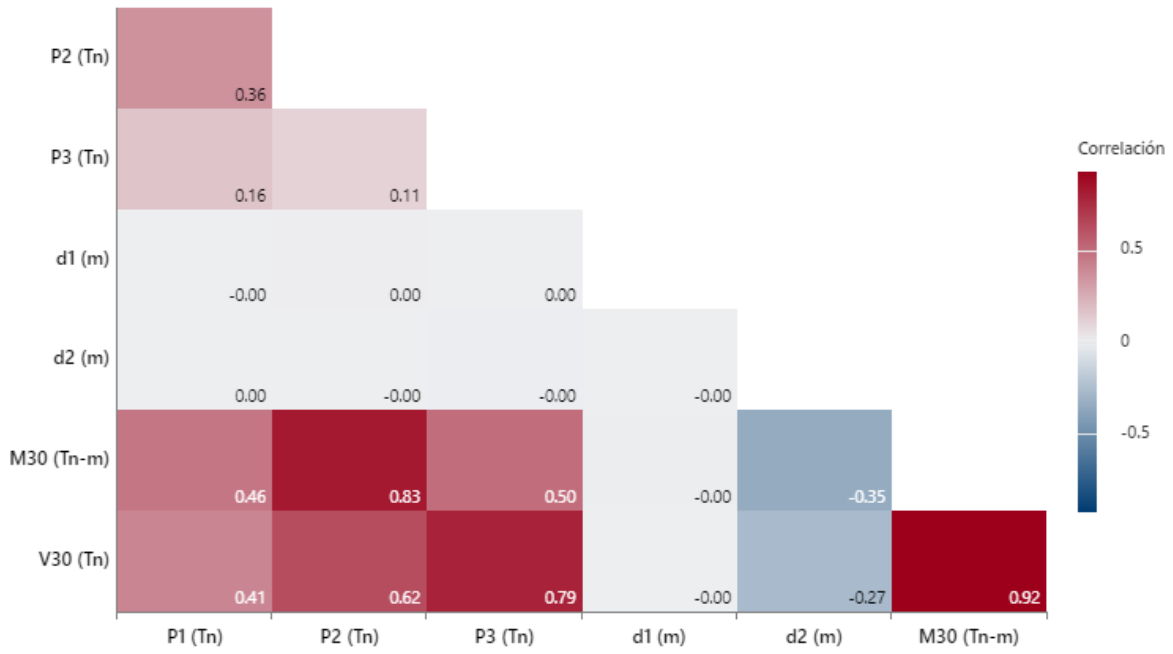
Se analizaron los momentos y cortantes de las luces aplicadas en puentes de 20 m en adelante, ya que se observó que la configuración de tres ejes no se comportaba adecuadamente en longitudes de 10 m. A partir de los correlogramas encontrados en las figuras 118 hasta 137, se pudo observar que las variables con mayor influencia e impacto en los momentos y cortantes eran P2 y P3, lo cual estaba en línea con lo planteado inicialmente. También se apreció un aporte importante de la distancia d2 en los momentos y cortantes, aunque con un aporte negativo, indicando que a menor distancia d2, mayor sería el momento. Estos correlogramas confirmaron y validaron que el modelo conceptual propuesto era adecuado y válido para su uso.

Figura 118: Correlograma de *M20, V20, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C23



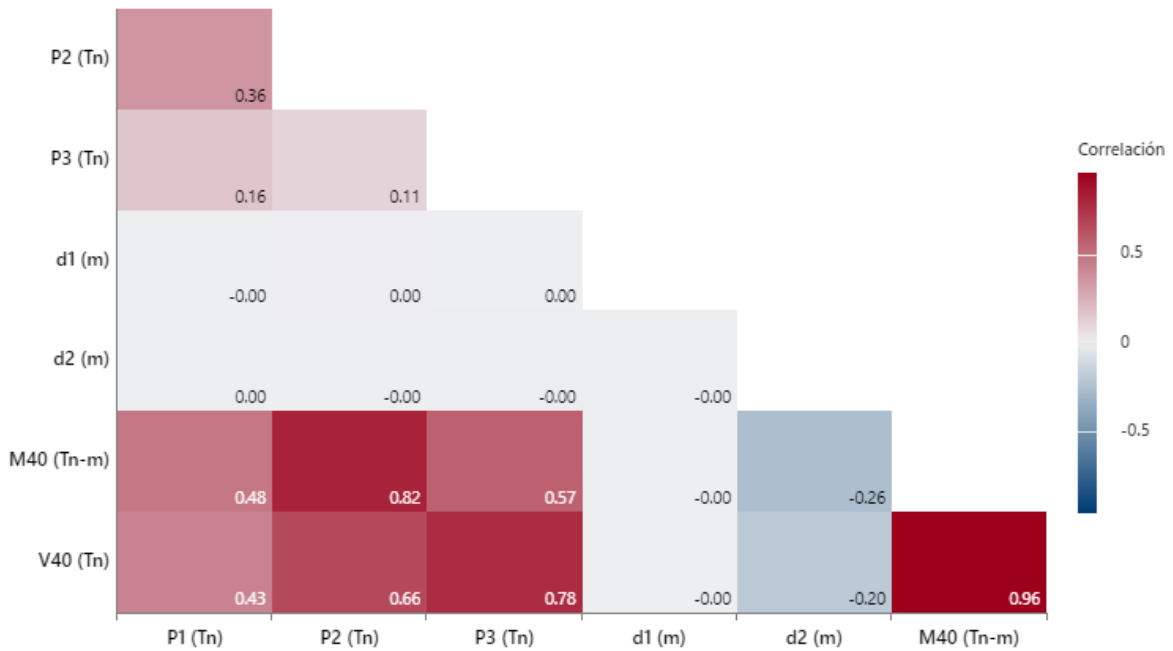
Fuente: Elaboración propia.

Figura 119: Correlograma de M30, V30, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C23



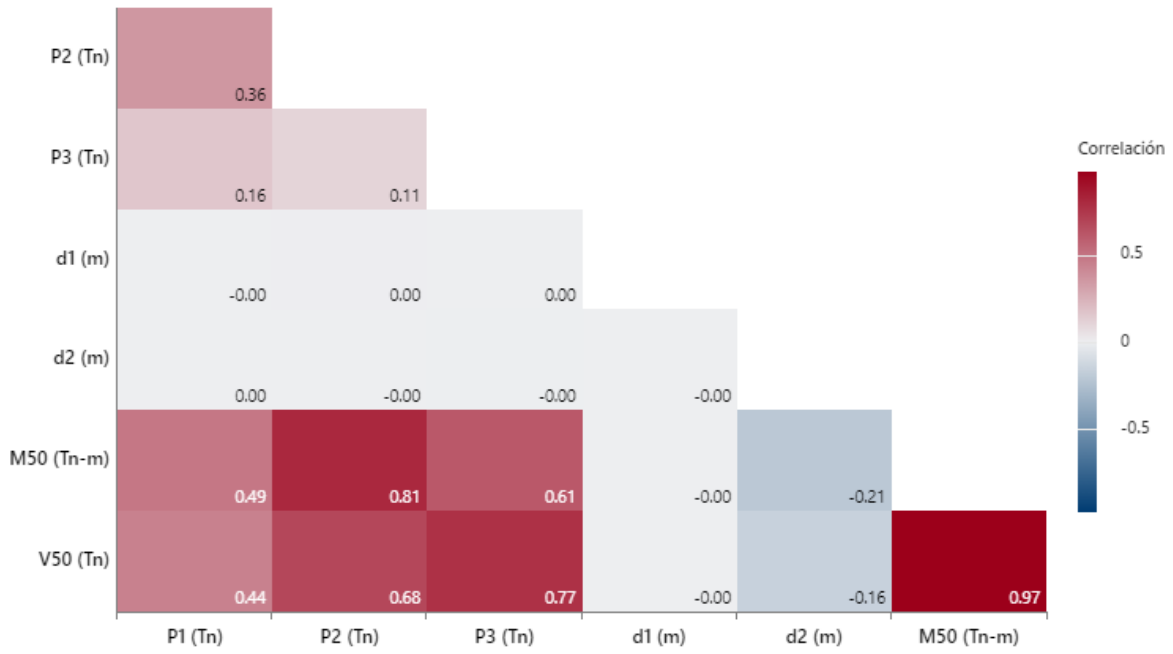
Fuente: Elaboración propia.

Figura 120: Correlograma de M40, V40, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C23



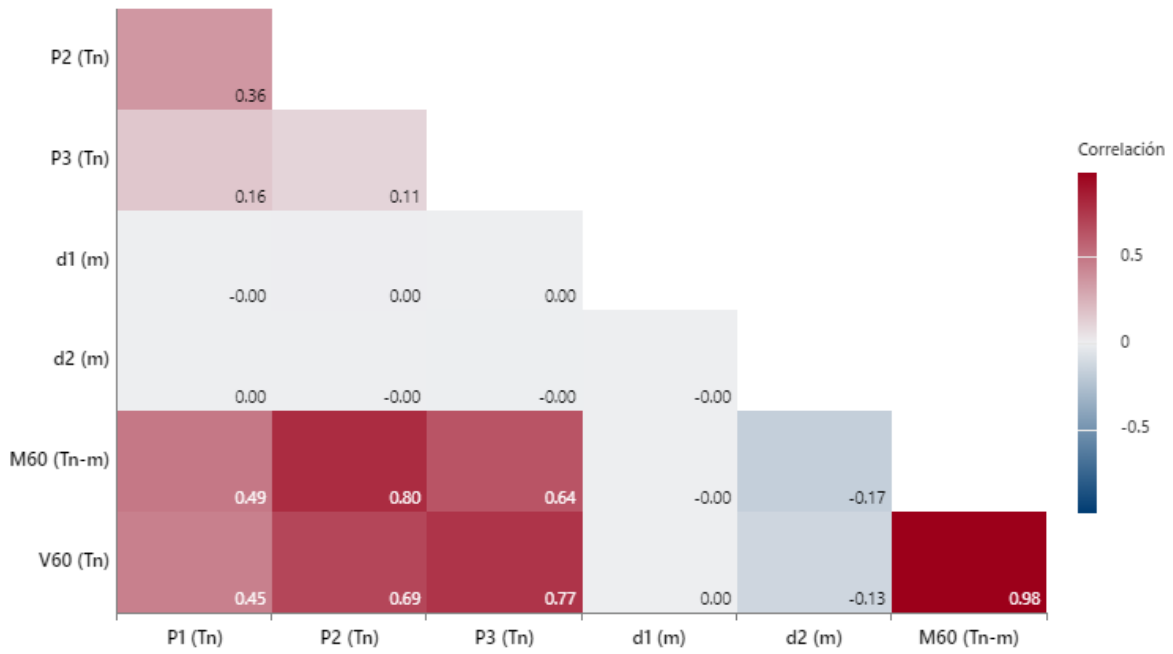
Fuente: Elaboración propia.

Figura 121: Correlograma de M50, V50, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C23



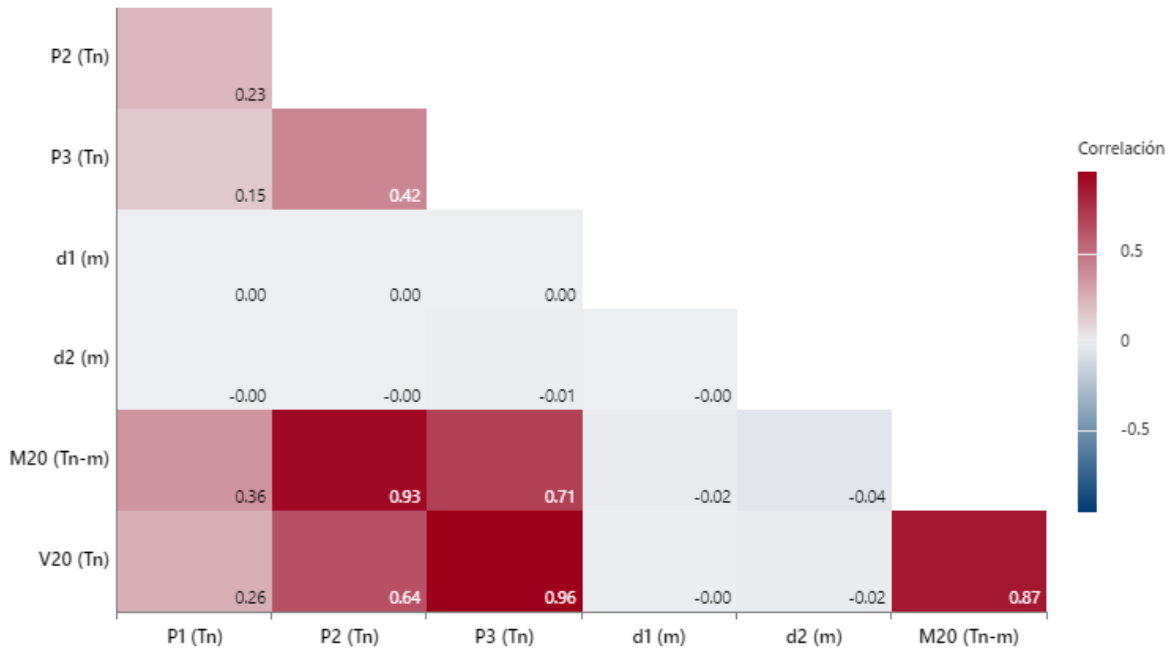
Fuente: Elaboración propia.

Figura 122: Correlograma de M60, V60, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C23



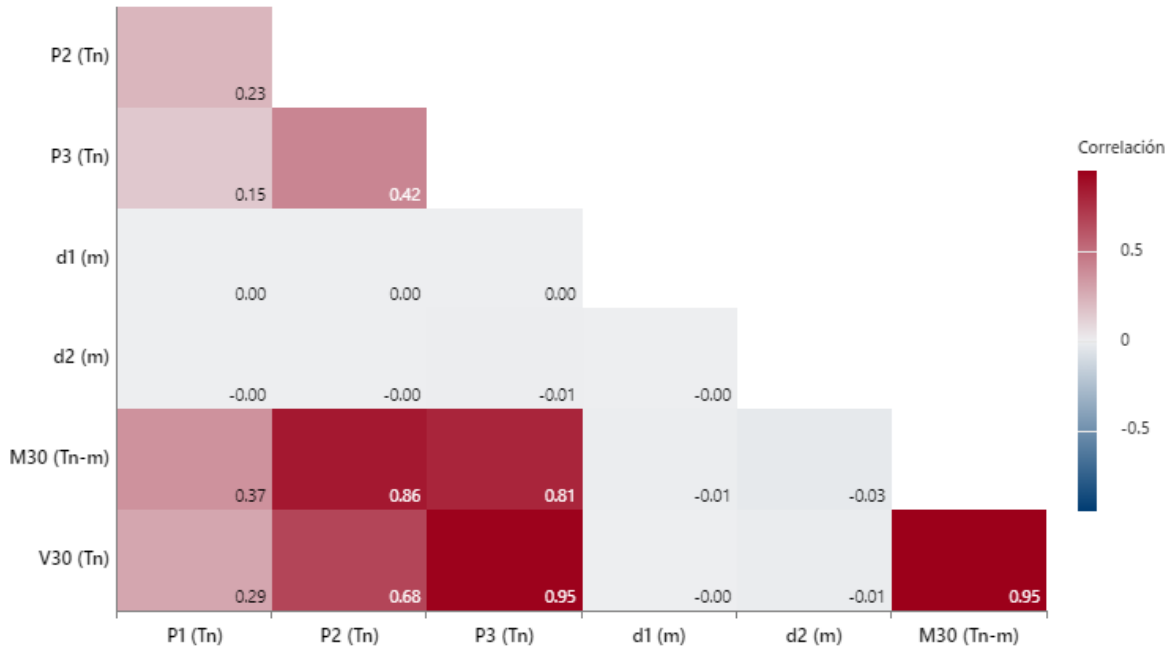
Fuente: Elaboración propia.

Figura 123: Correlograma de M20, V20, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C44



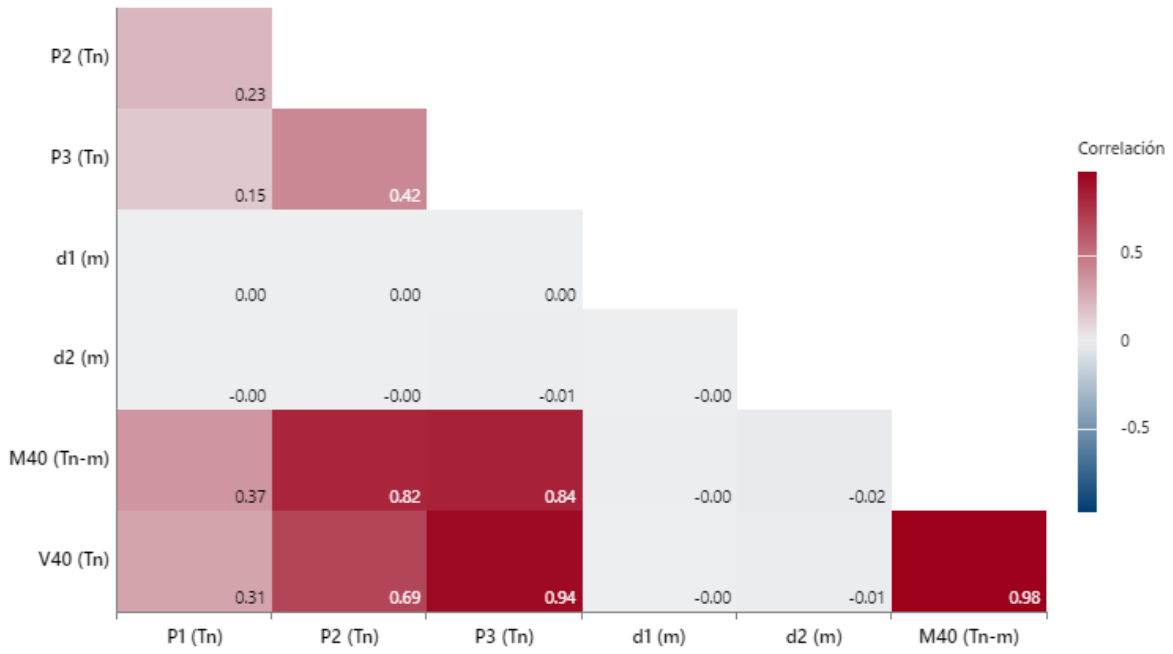
Fuente: Elaboración propia.

Figura 124: Correlograma de M30, V30, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C44



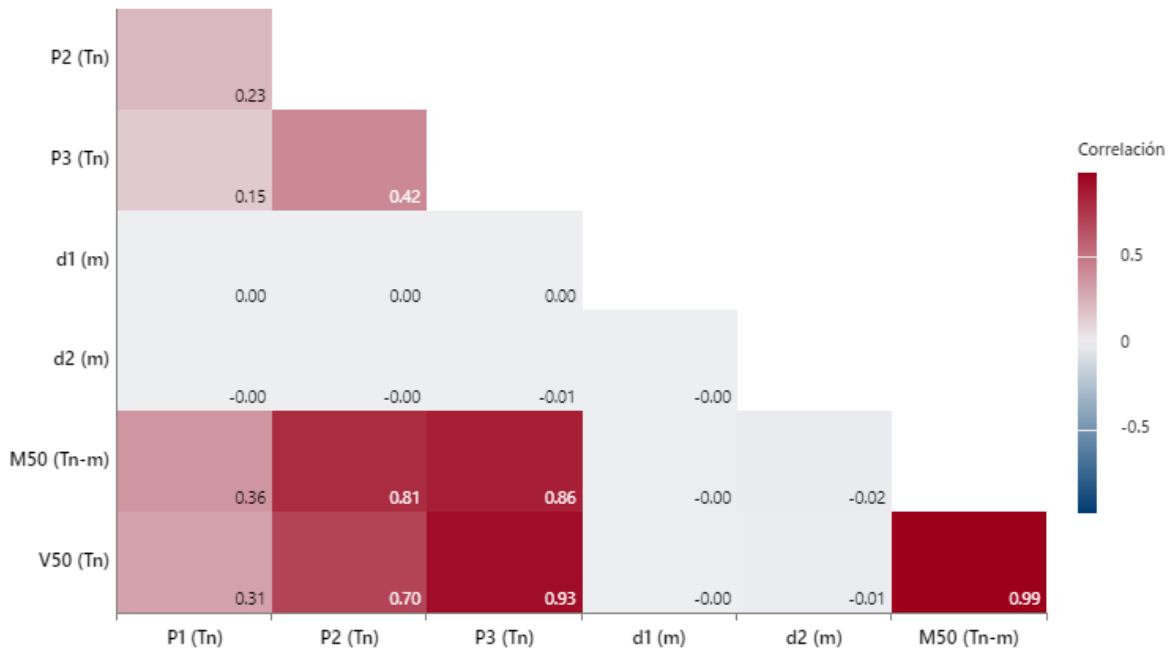
Fuente: Elaboración propia.

Figura 125: Correlograma de M40, V40, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C44



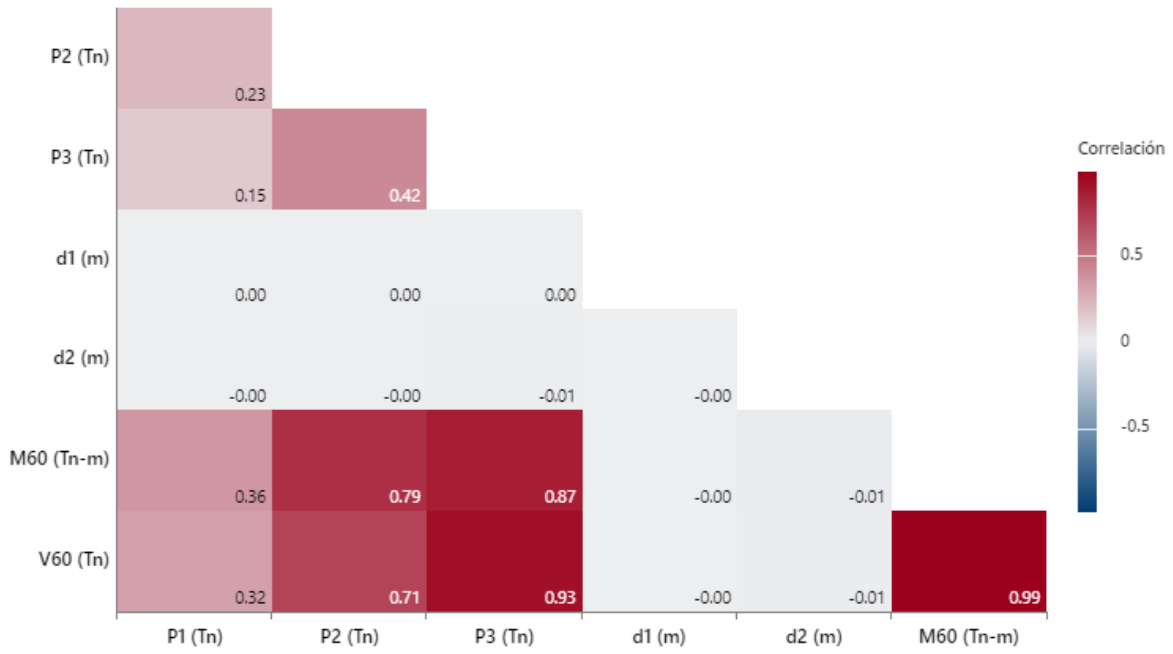
Fuente: Elaboración propia.

Figura 126: Correlograma de M50, V50, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C44



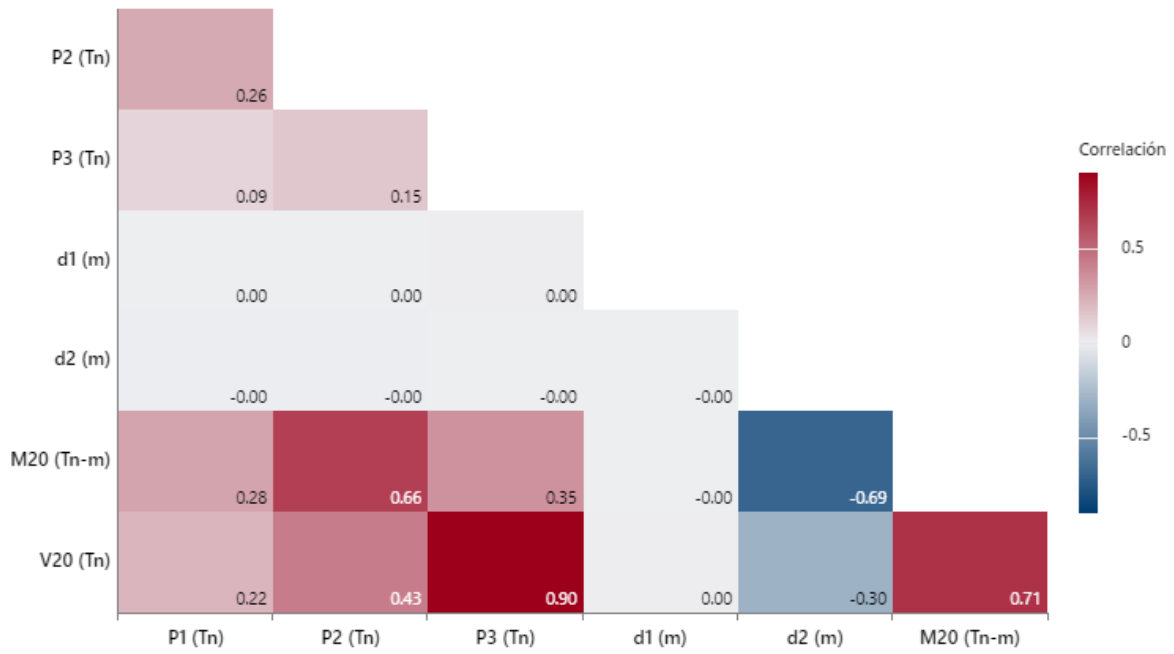
Fuente: Elaboración propia.

Figura 127: Correlograma de M60, V60, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C44



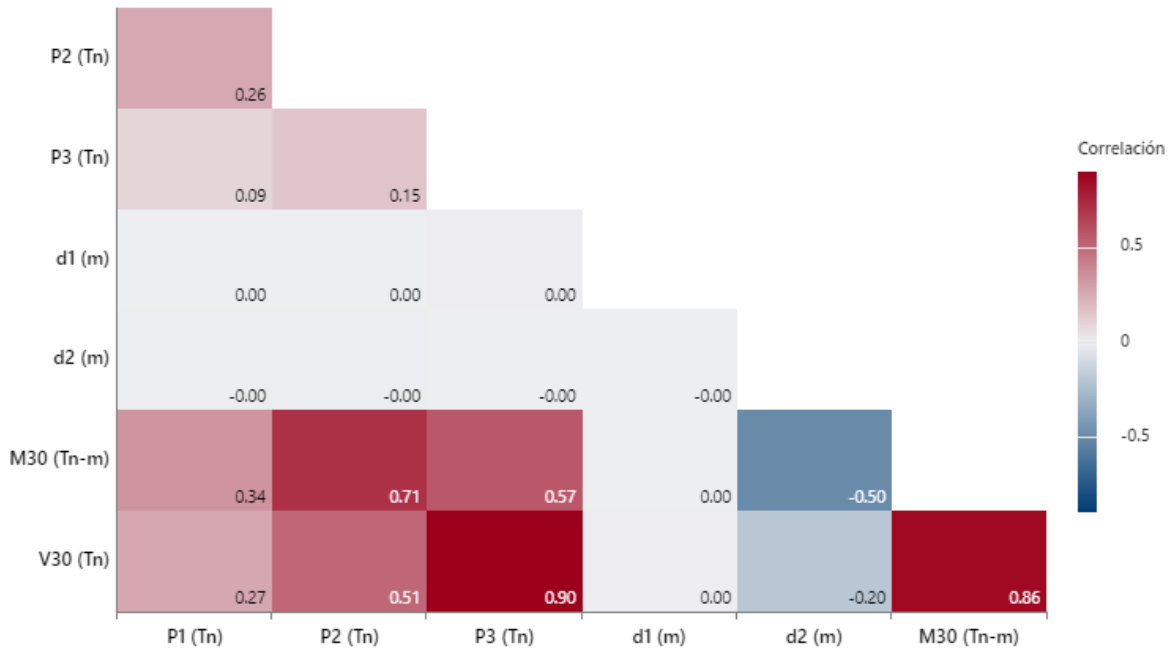
Fuente: Elaboración propia.

Figura 128: Correlograma de M20, V20, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C46



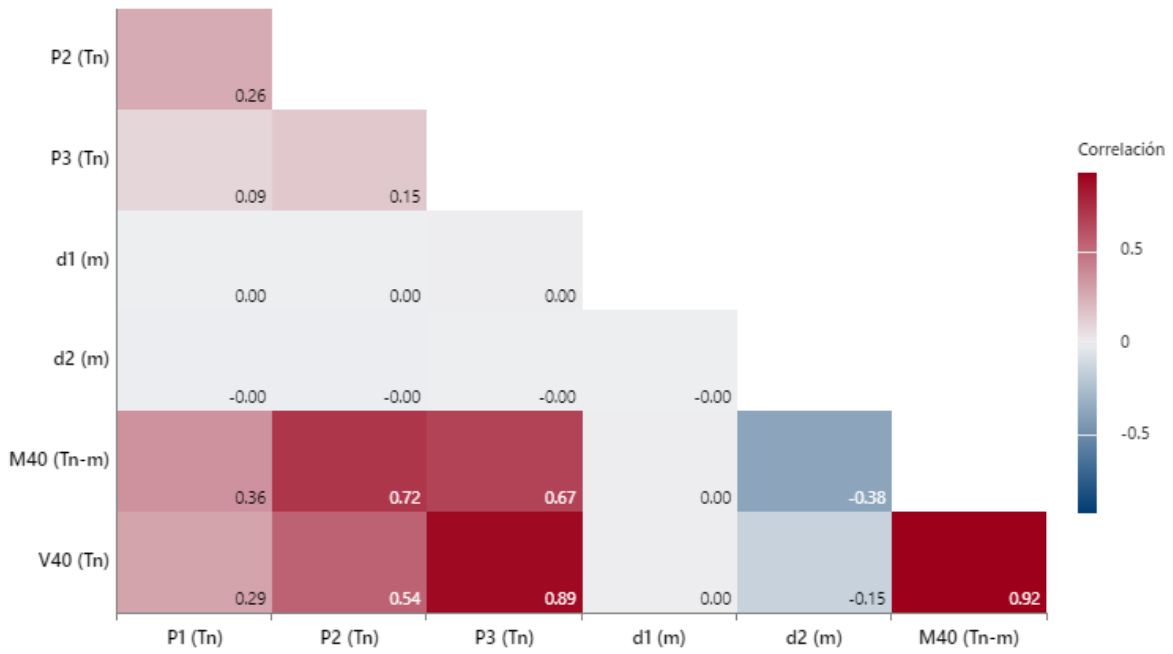
Fuente: Elaboración propia.

Figura 129: Correlograma de M30, V30, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C46



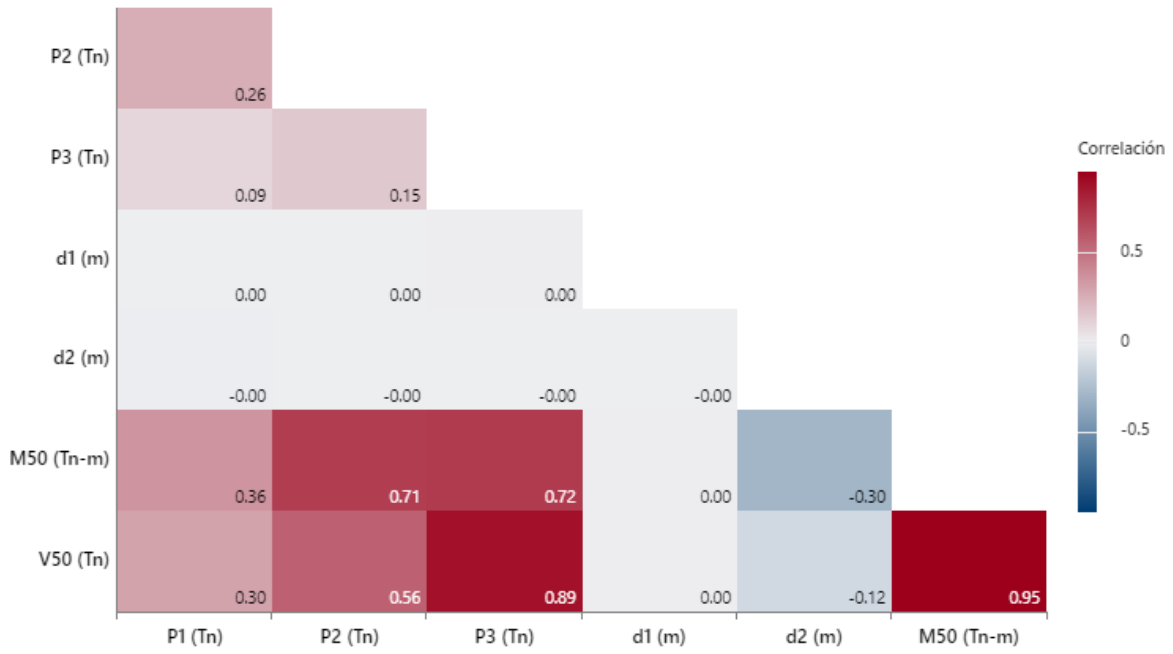
Fuente: Elaboración propia.

Figura 130: Correlograma de M40, V40, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C46



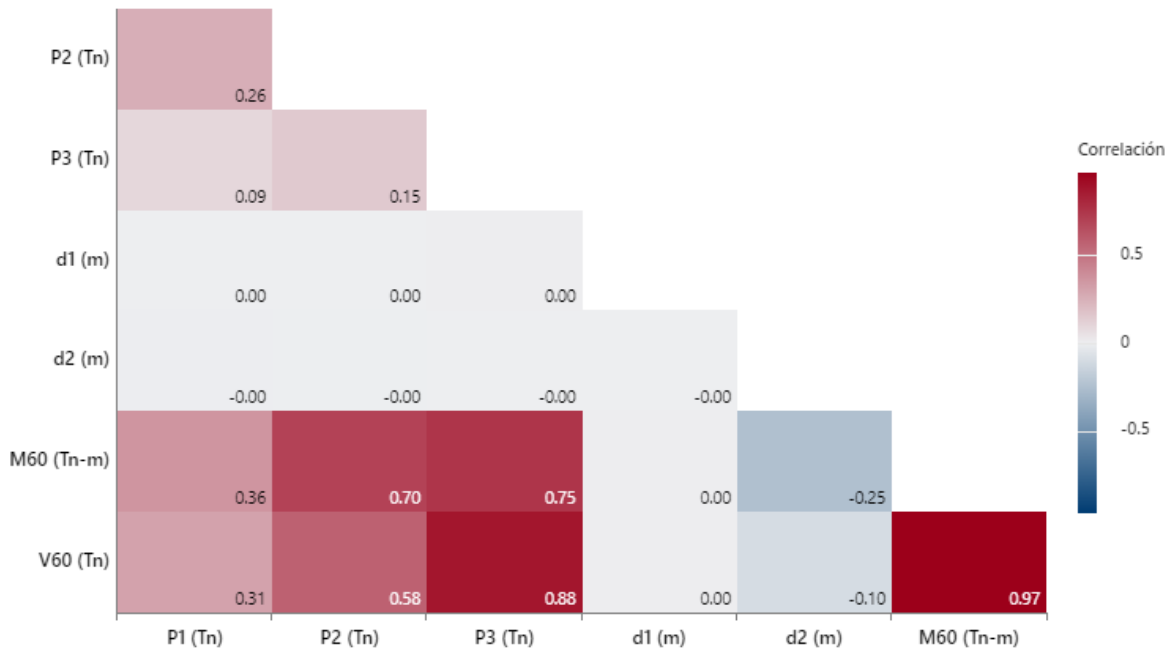
Fuente: Elaboración propia.

Figura 131: Correlograma de M50, V50, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C46



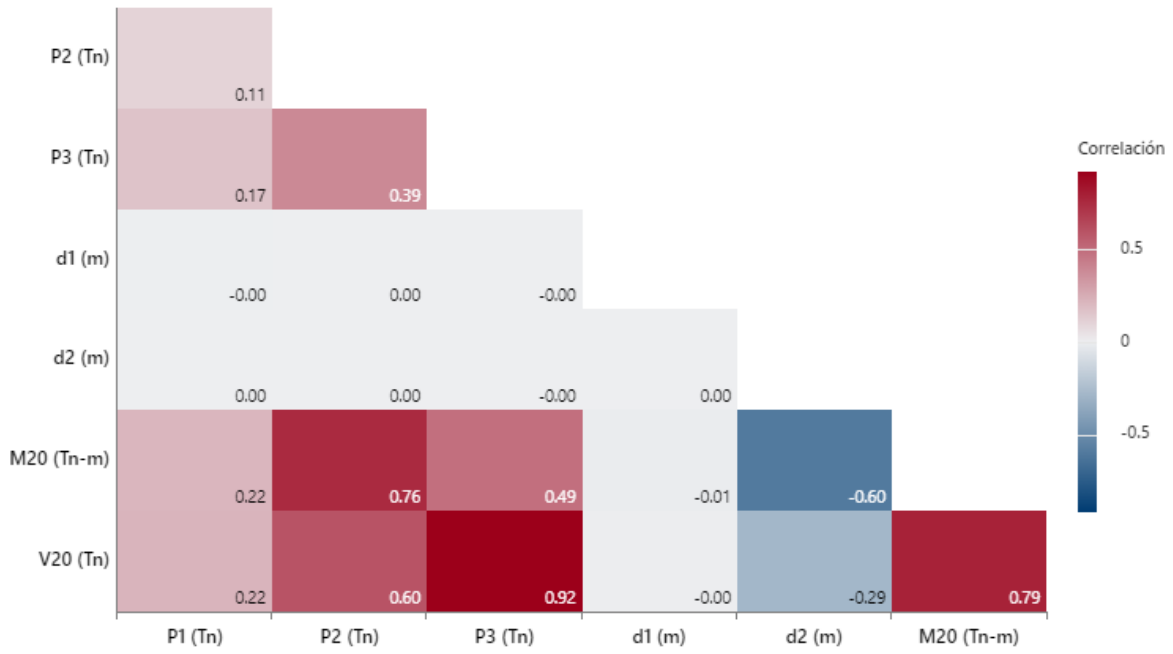
Fuente: Elaboración propia.

Figura 132: Correlograma de M60, V60, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C46



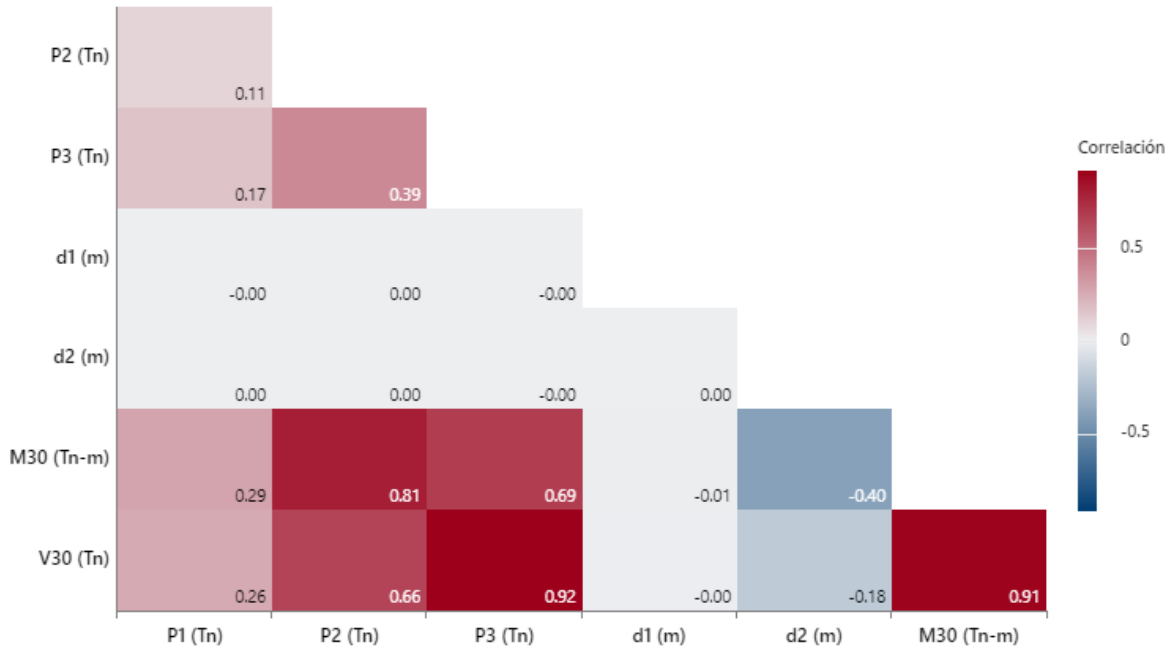
Fuente: Elaboración propia.

Figura 133: Correlograma de *M20, V20, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C57



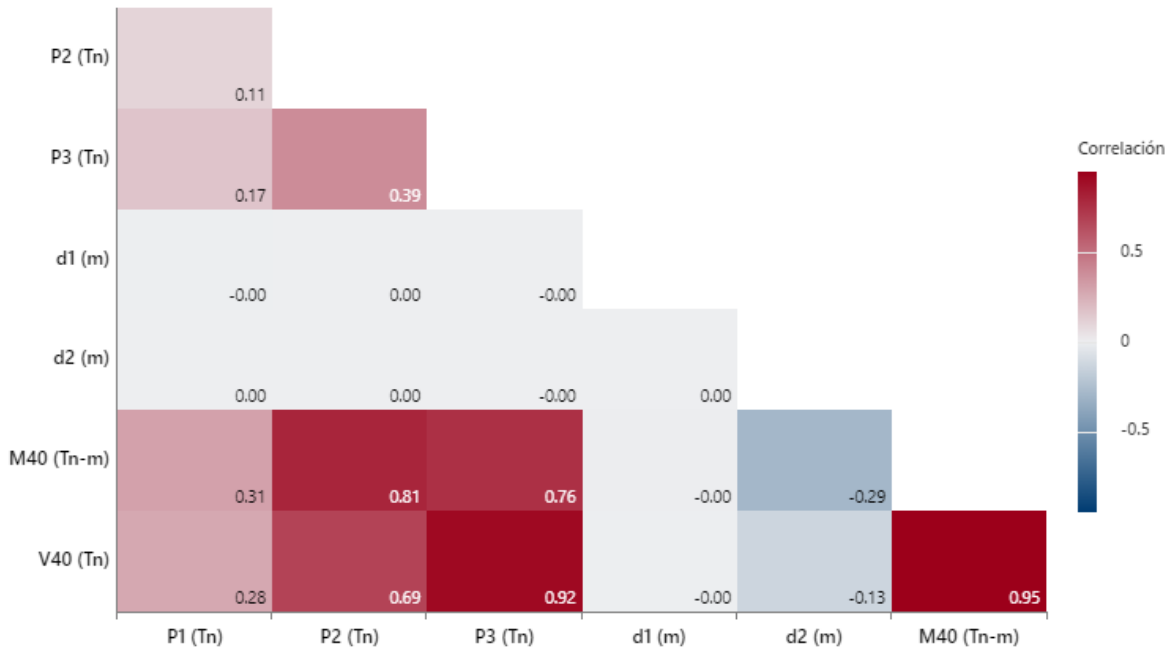
Fuente: Elaboración propia.

Figura 134: Correlograma de M30, V30, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C57



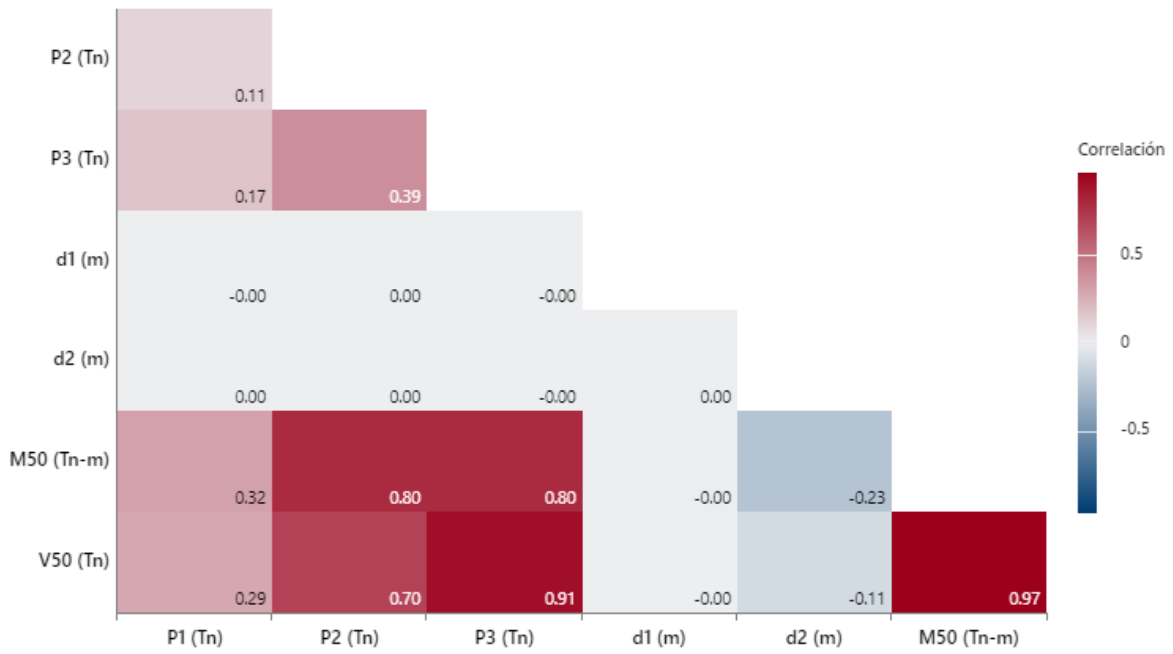
Fuente: Elaboración propia.

Figura 135: Correlograma de M40, V40, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C57



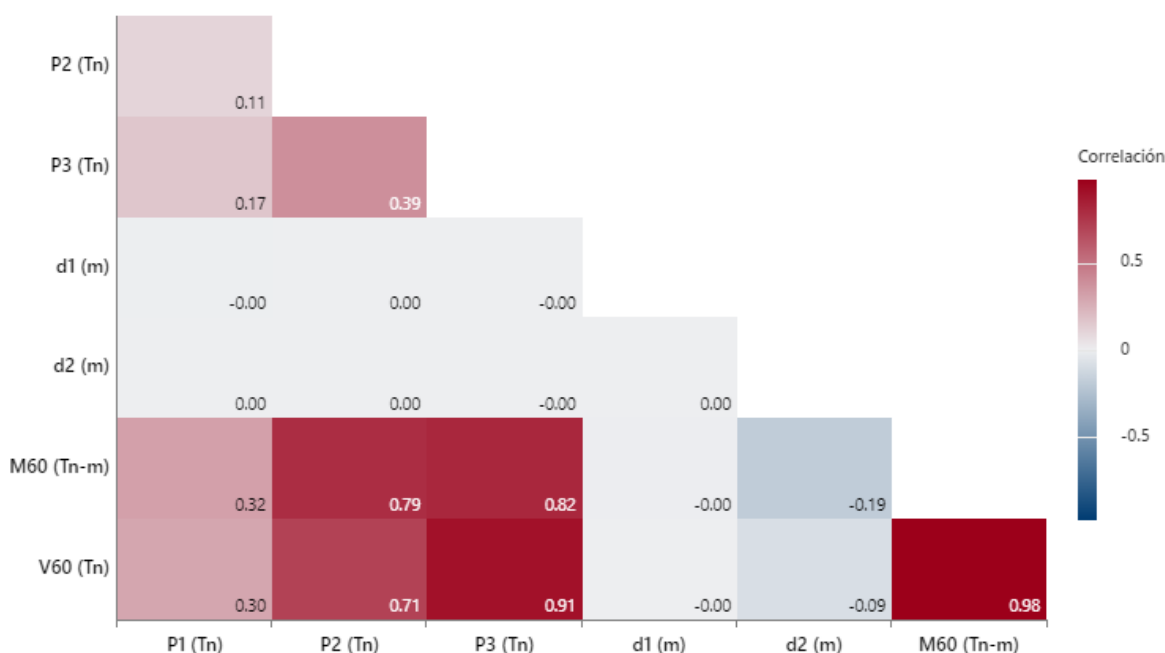
Fuente: Elaboración propia.

Figura 136: Correlograma de M50, V50, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

Figura 137: Correlograma de M60, V60, P1, P2, P3, d1 y d2 para Vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

Se presentaron los coeficientes de correlación múltiple de los elementos mecánicos versus P1, P2, P3 y d2 en las tablas 7, 8, 9 y 10, respectivamente. No se consideró necesario realizar una tabla para d1, ya que, en los correlogramas, su aporte era prácticamente nulo.

Tabla 7: Coeficientes de correlación múltiple, Elementos Mecánicos vs P1

Longitud (m)	C23		C44		C46		C57	
	Coeficientes de correlación,% para							
	Momento	Cortante	Momento	Cortante	Momento	Cortante	Momento	Cortante
20	41%	34%	36%	26%	28%	22%	22%	22%
30	46%	41%	37%	29%	34%	27%	29%	26%
40	48%	43%	37%	31%	36%	29%	31%	28%
50	49%	44%	36%	31%	36%	30%	32%	29%
60	49%	45%	36%	32%	36%	31%	32%	30%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8: Coeficientes de correlación múltiple, Elementos Mecánicos vs P2

Longitud (m)	C23		C44		C46		C57	
	Coeficientes de correlación,% para							
	Momento	Cortante	Momento	Cortante	Momento	Cortante	Momento	Cortante
20	81%	53%	93%	64%	66%	43%	76%	60%
30	83%	62%	86%	68%	71%	51%	81%	66%
40	82%	66%	82%	69%	72%	54%	81%	69%
50	81%	68%	81%	70%	71%	56%	80%	70%
60	80%	69%	79%	71%	70%	58%	79%	71%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9: Coeficientes de correlación múltiple, Elementos Mecánicos vs P3

Longitud (m)	C23		C44		C46		C57	
	Coeficientes de correlación,% para							
	Momento	Cortante	Momento	Cortante	Momento	Cortante	Momento	Cortante
20	34%	79%	71%	96%	35%	90%	49%	92%
30	50%	79%	81%	95%	57%	90%	69%	92%
40	57%	78%	84%	94%	67%	89%	76%	92%
50	61%	77%	96%	93%	72%	89%	80%	91%
60	64%	77%	87%	93%	75%	88%	82%	91%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Coeficientes de correlación múltiple, Elementos Mecánicos vs d2

Longitud (m)	C23		C44		C46		C57	
	Coeficientes de correlación,% para							
	Momento	Cortante	Momento	Cortante	Momento	Cortante	Momento	Cortante
20	-51%	-41%	-2%	-4%	-69%	-30%	-60%	-29%
30	-35%	-27%	-3%	-1%	-50%	-20%	-40%	-18%
40	-26%	-20%	-2%	-1%	-38%	-15%	-29%	-13%
50	-21%	-16%	-2%	-2%	-30%	-12%	-23%	-11%
60	-17%	-13%	-1%	-1%	-25%	-10%	-19%	-9%

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar estas tablas y considerar influyentes aquellos aportes de variables por encima del 50%, se decidió mantener únicamente las variables P2 y P3 para generar ecuaciones de regresión múltiple y validar el modelo con base en las siguientes ecuaciones:

$$M = A + B \cdot P2 + C \cdot P3$$

$$V = A + B \cdot P2 + C \cdot P3$$

En la tabla 11, se presentaron los resultados de los elementos mecánicos generados al reemplazar P2 y P3 de las ecuaciones de cada camión por 14.52 Tn correspondiente a las cargas del camión HL-93, facilitando la interpretación de los resultados para identificar las ecuaciones que generan los elementos mecánicos máximos.

Tabla 11: Resultado de Ecuaciones de Regresión Múltiple aplicando cargas unitarias

Ubicación	C23	C44	C46	C57
M20	110.96	107.37	104.36	96.92
M30	199.21	195.39	193.07	181.93
M40	287.98	283.91	282.35	267.75
M50	376.95	372.64	371.86	353.88
M60	466.02	461.47	461.47	440.17
V20	26.02	25.45	24.94	23.85
V30	29.25	28.84	28.60	27.45
V40	30.87	30.53	30.44	29.25
V50	31.84	31.55	31.54	30.33
V60	32.48	32.22	32.27	31.05

Fuente: Elaboración propia.

Después de realizar las correlaciones múltiples en función de P2 y P3, se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

Ecuación de regresión

$$M20 (Tn - m) = 13.437 + 5.12715 \cdot P2 + 1.58936 \cdot P3$$

$$M30 (Tn - m) = 26.016 + 7.89780 \cdot P2 + 4.03036 \cdot P3$$

$$M40 (Tn - m) = 38.435 + 10.6458 \cdot P2 + 6.54033 \cdot P3$$

$$M50 (Tn - m) = 50.790 + 13.3847 \cdot P2 + 9.0779 \cdot P3$$

$$M60 (Tn - m) = 63.113 + 16.1190 \cdot P2 + 11.6292 \cdot P3$$

$$V20 (Tn) = 1.9527 + 0.64394 \cdot P2 + 1.01377 \cdot P3$$

$$V30 (Tn) = 2.9364 + 0.79266 \cdot P2 + 1.01971 \cdot P3$$

$$V40 (Tn) = 3.4282 + 0.867026 \cdot P2 + 1.02267 \cdot P3$$

$$V50 (Tn) = 3.7233 + 0.911643 \cdot P2 + 1.02445 \cdot P3$$

$$V60 (Tn) = 3.9200 + 0.941388 \cdot P2 + 1.02564 \cdot P3$$

Se escogieron las ecuaciones que generaban los elementos mecánicos máximos de los cuatro camiones analizados en este proyecto. Después del análisis respectivo, se optó por utilizar las ecuaciones generadas para el camión C23.

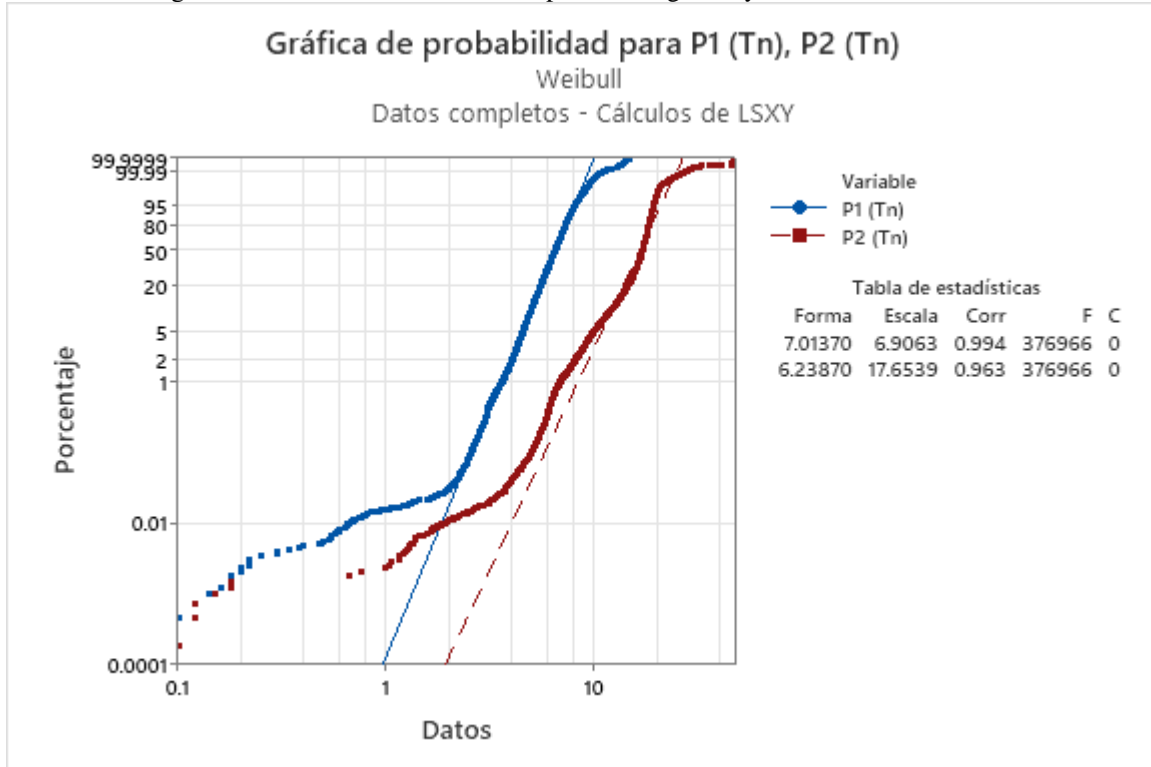
A partir del análisis correlacional y regresión múltiple de los datos, se validó el modelo conceptual propuesto para el diseño de cargas vivas vehiculares en Bolivia. Las ecuaciones obtenidas permiten determinar los momentos y cortantes máximos en función de las variables P2 y P3, que fueron identificadas como las más influyentes en este análisis. Estas ecuaciones servirán más adelante para validar el modelo de cargas vivas.

4.7. Análisis inferencial de las cargas vivas vehiculares para la asignación de cargas del modelo conceptual

Para llevar a cabo el análisis inferencial de las cargas vivas vehiculares y asignar las cargas al modelo conceptual, primero se realizaron distribuciones de Weibull, ya que esta distribución se adapta mejor a los datos y a los requerimientos necesarios. La distribución de Weibull permite predecir sucesos a lo largo del tiempo, razón por la cual se decidió trabajar con ella. Posteriormente, se generaron distribuciones para las cargas P1, P2 y P3, correspondientes a los ejes 1, 2 y 3 de los camiones. Se llevaron a cabo distribuciones para cada configuración de vehículo: C23, C44, C46 y C57, además de añadir una distribución para las cargas cuando se analizan las cuatro configuraciones juntas. Adicional a lo mencionado anteriormente también se realiza el análisis de vehículo C5, únicamente porque al tener tándem aporta al diseño del Tándem de Diseño

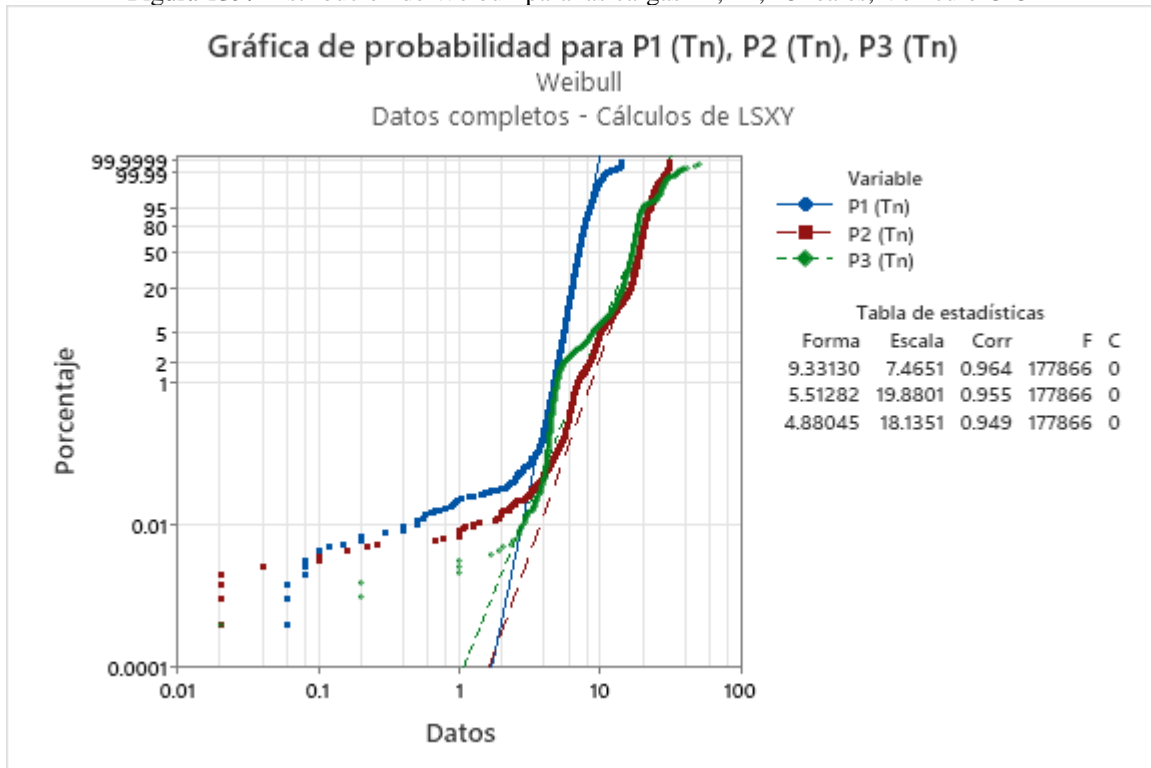
Estas gráficas pueden verse detalladamente en las Figuras 138 a 143, donde se observa que los datos se ajustan adecuadamente entre el 0.5% y el 99.9%. Esto se debe a que se dispone de una gran cantidad de datos y las escalas pueden ajustarse de manera diferente. Sin embargo, para realizar un buen análisis estadístico, se generaron variables aleatorias que cumplen una distribución de Weibull para cada carga de cada vehículo, incluyendo la configuración donde se toma en cuenta las cuatro configuraciones.

Figura 138: Distribución de Weibull para las cargas P1 y P2 reales, Vehículo C5



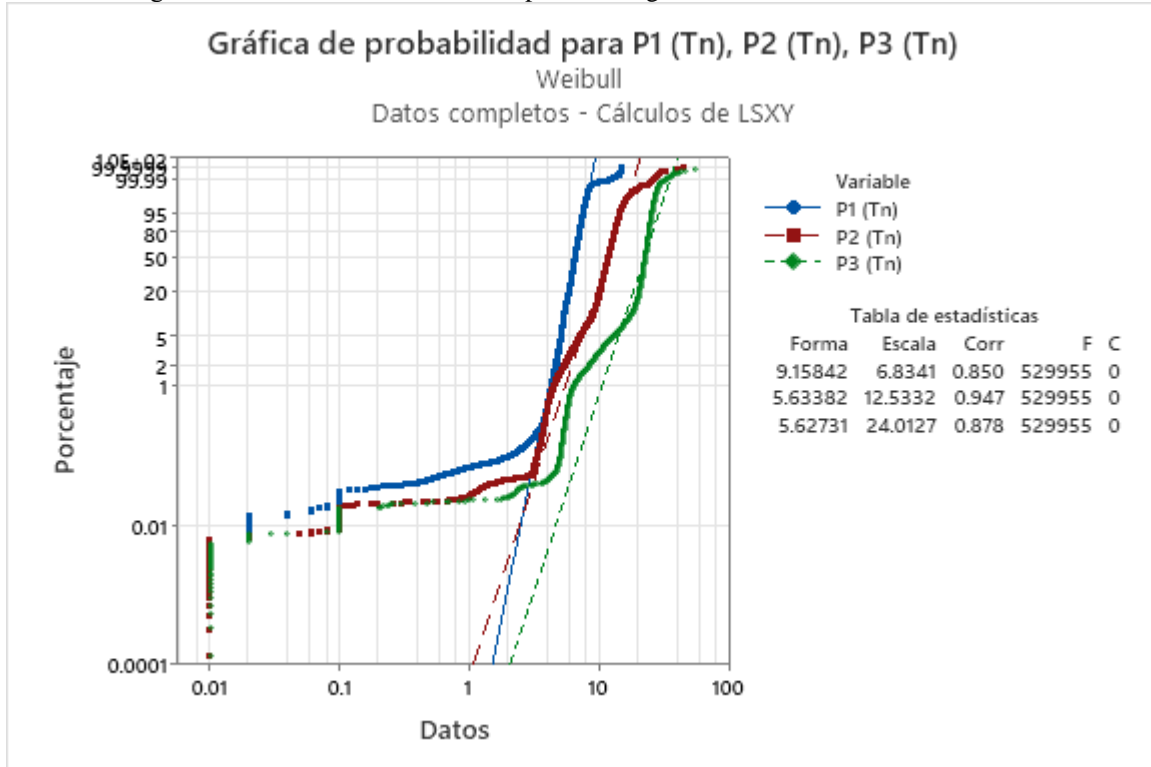
Fuente: Elaboración propia.

Figura 139: Distribución de Weibull para las cargas P1, P2, P3 reales, Vehículo C23



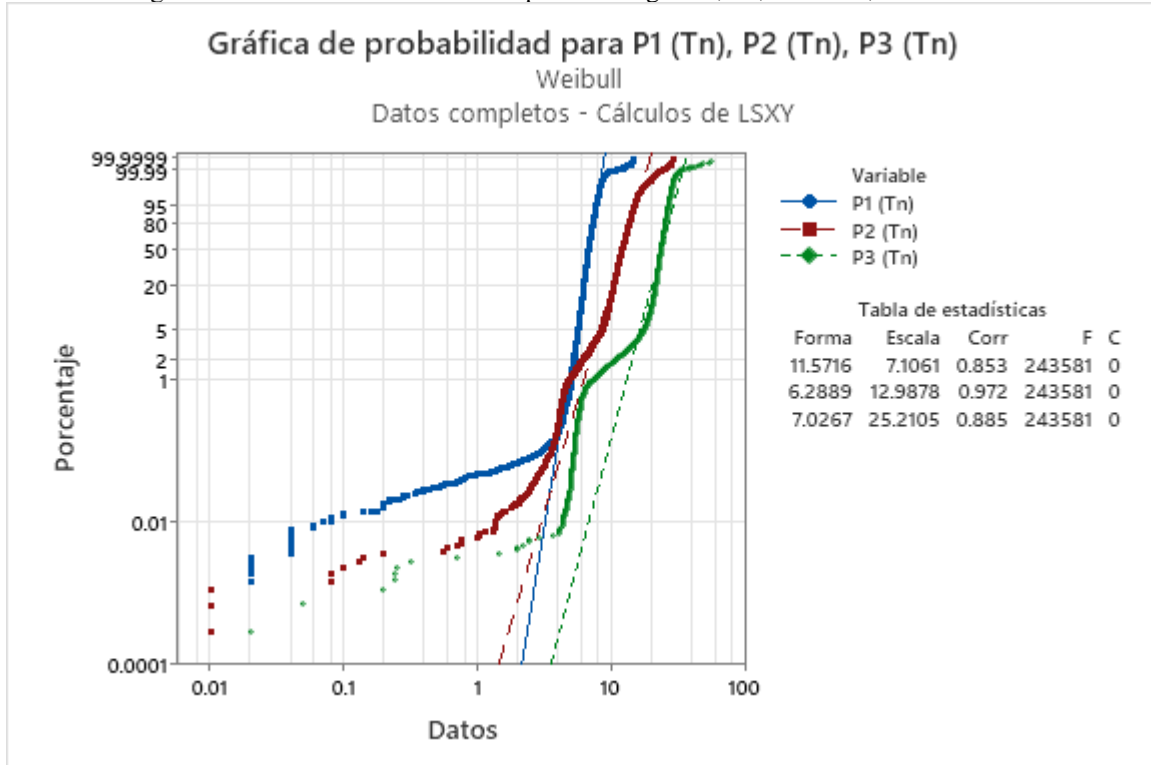
Fuente: Elaboración propia.

Figura 140: Distribución de Weibull para las cargas P1, P2, P3 reales, Vehículo C44



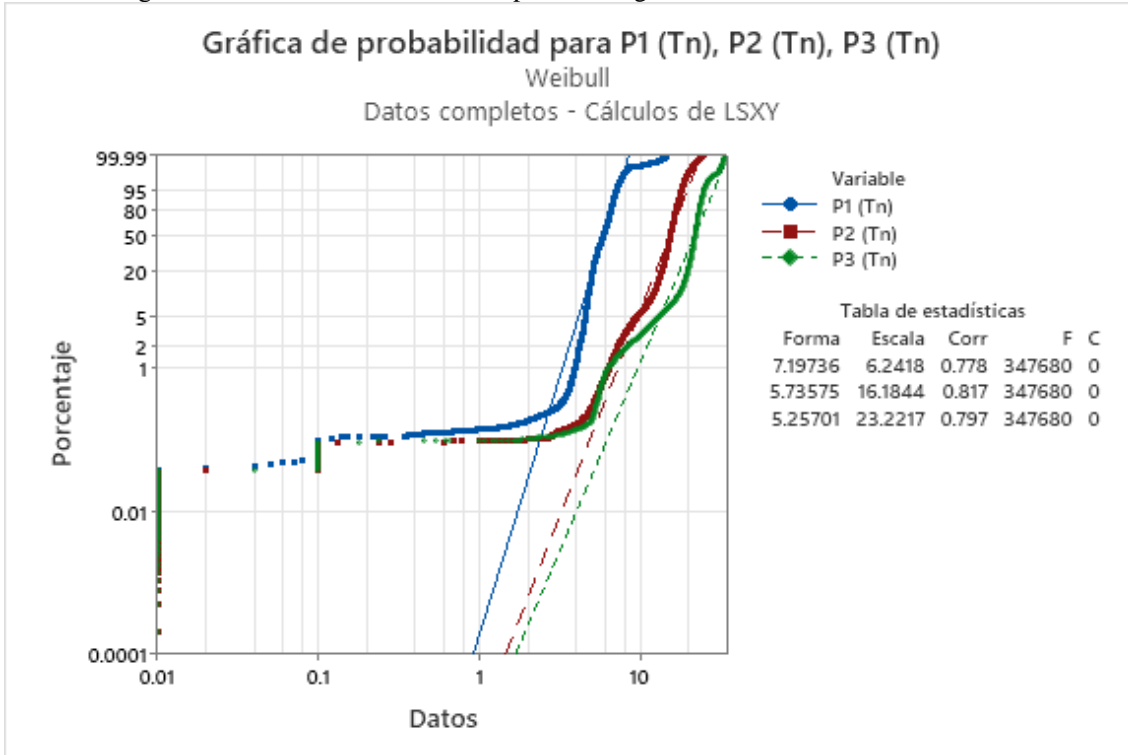
Fuente: Elaboración propia.

Figura 141: Distribución de Weibull para las cargas P1, P2, P3 reales, Vehículo C46



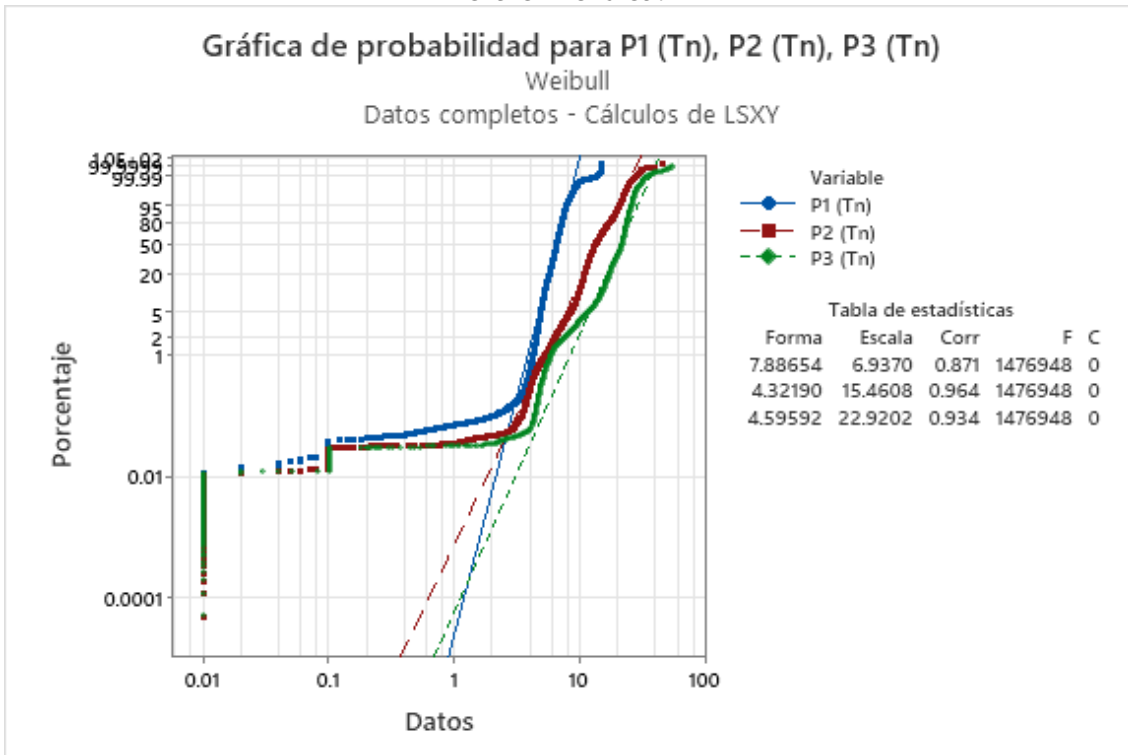
Fuente: Elaboración propia.

Figura 142: Distribución de Weibull para las cargas P1, P2, P3 reales, Vehículo C57



Fuente: Elaboración propia.

Figura 143: Distribución de Weibull para las cargas P1, P2, P3 reales, vehículos C23-C44-C46-C57



Fuente: Elaboración propia.

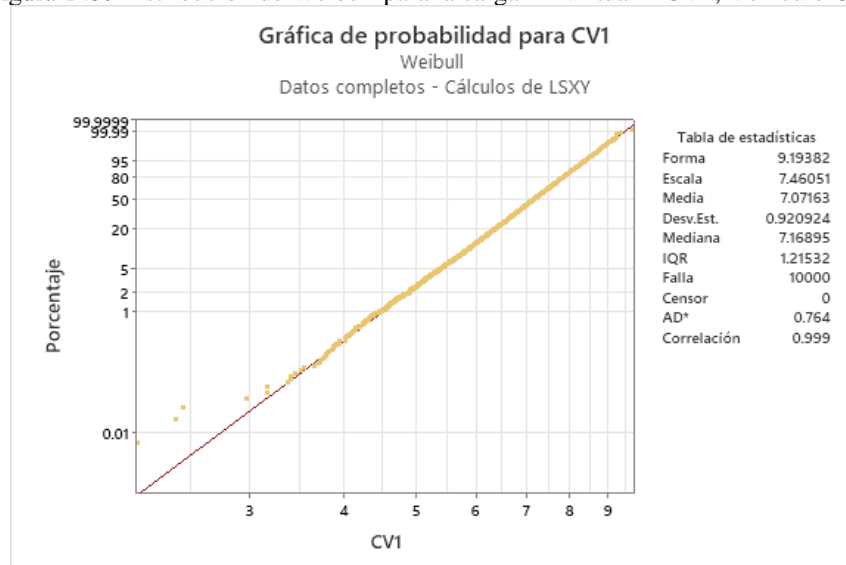
Las variables aleatorias se generaron a partir de los parámetros proporcionados por las gráficas de probabilidad de distribución de Weibull de los valores reales: la escala y la forma. Al adoptar estos dos valores para generar nuevos datos aleatorios y crear nuevas gráficas de probabilidad para cada carga de cada vehículo, se puede observar desde la Figura 144 hasta la Figura 159 que la correlación de los datos es de 0.999, llegando incluso a 1 en algunos casos. Esto se debe principalmente a que, mediante la estadística, se está generando una distribución perfecta para simular el caso que se analiza.

Figura 144: Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV, Vehículo C5



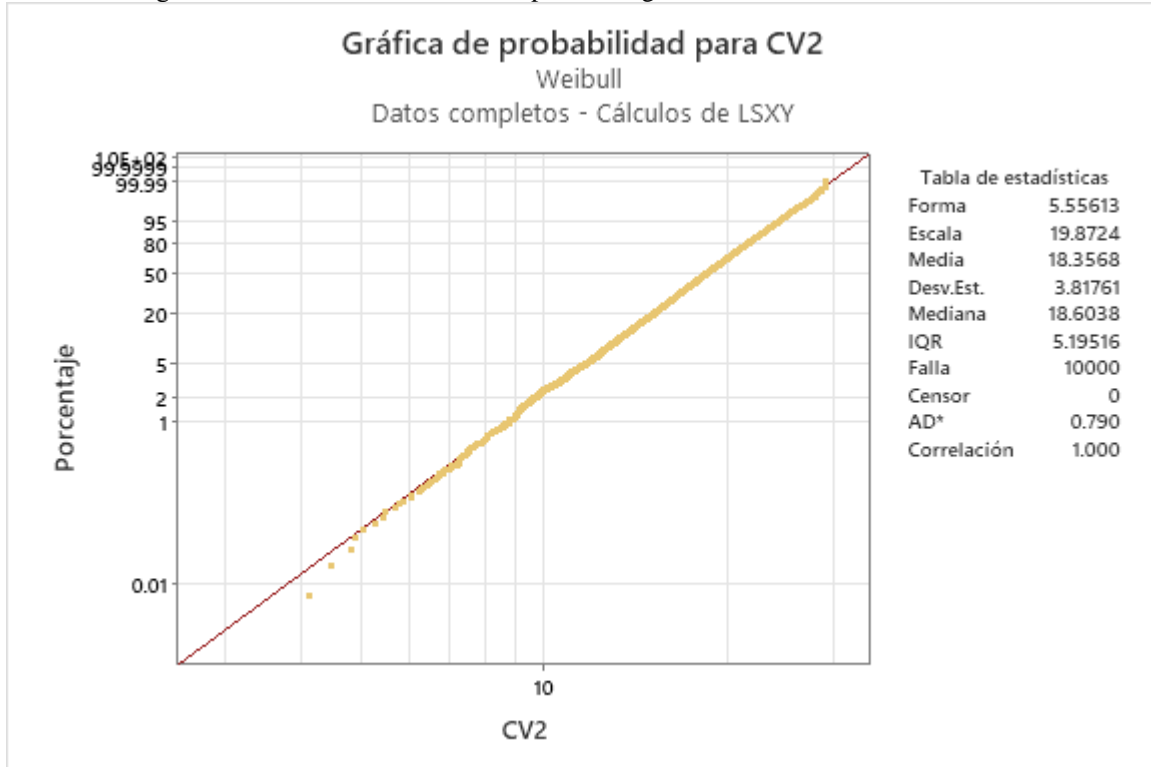
Fuente: Elaboración propia.

Figura 145: Distribución de Weibull para la carga P1 Virtual = CV1, Vehículo C23



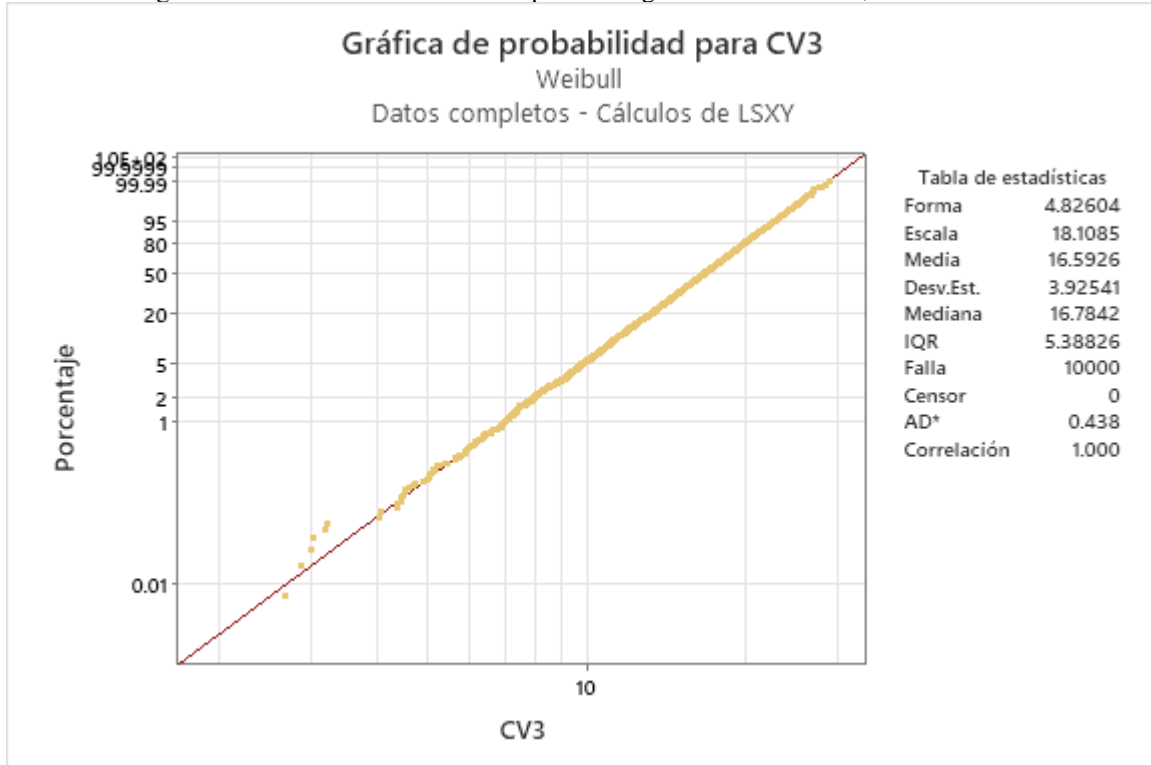
Fuente: Elaboración propia.

Figura 146: Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV2, Vehículo C23



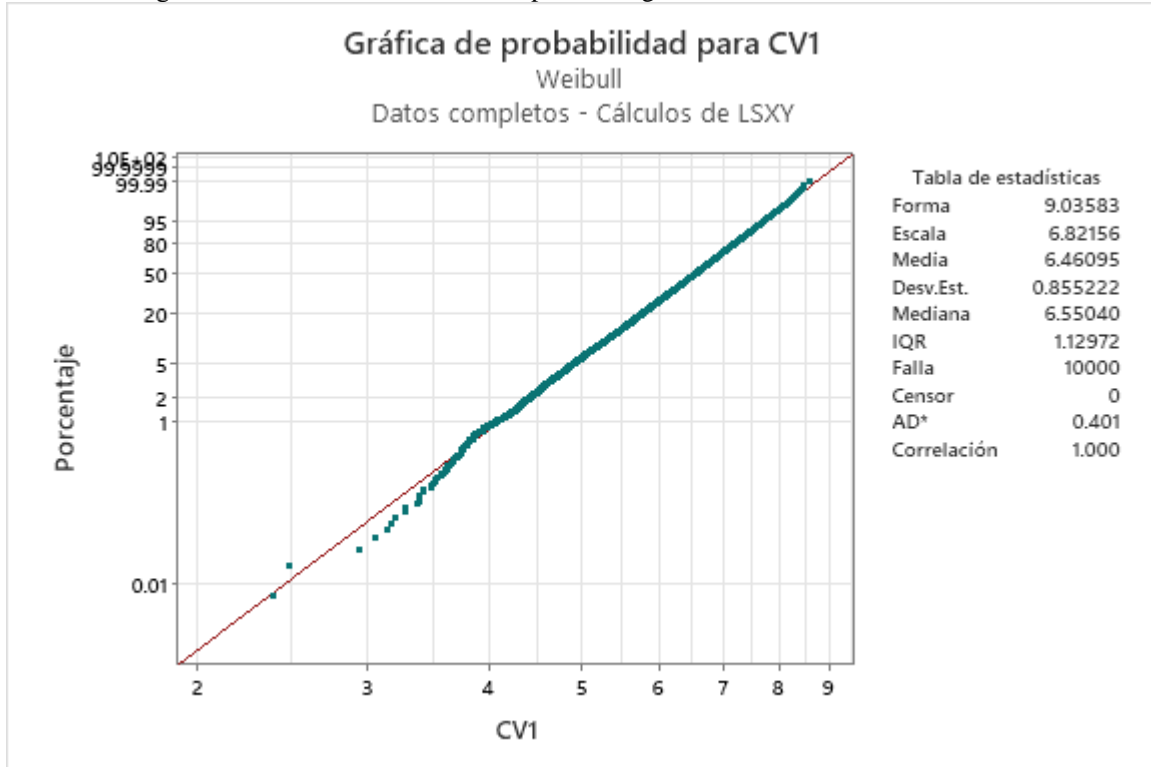
Fuente: Elaboración propia.

Figura 147: Distribución de Weibull para la carga P3 Virtual = CV3, Vehículo C23



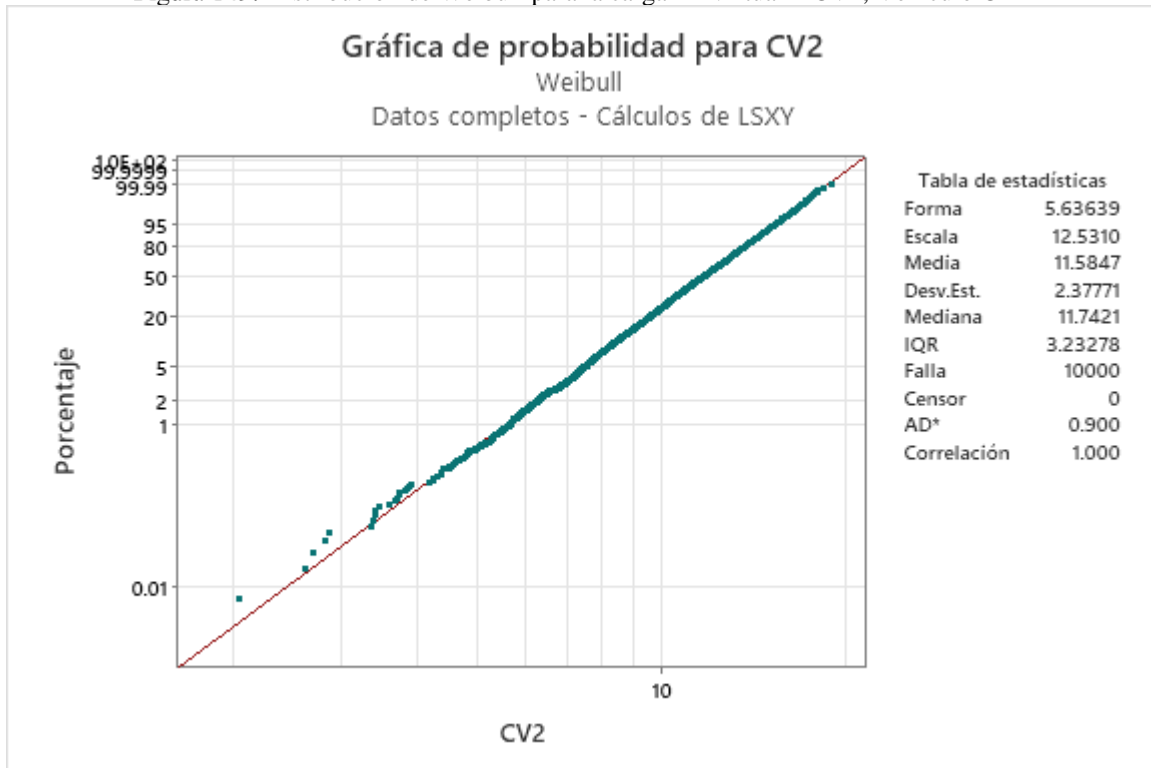
Fuente: Elaboración propia.

Figura 148: Distribución de Weibull para la carga P1 Virtual = CV1, Vehículo C44



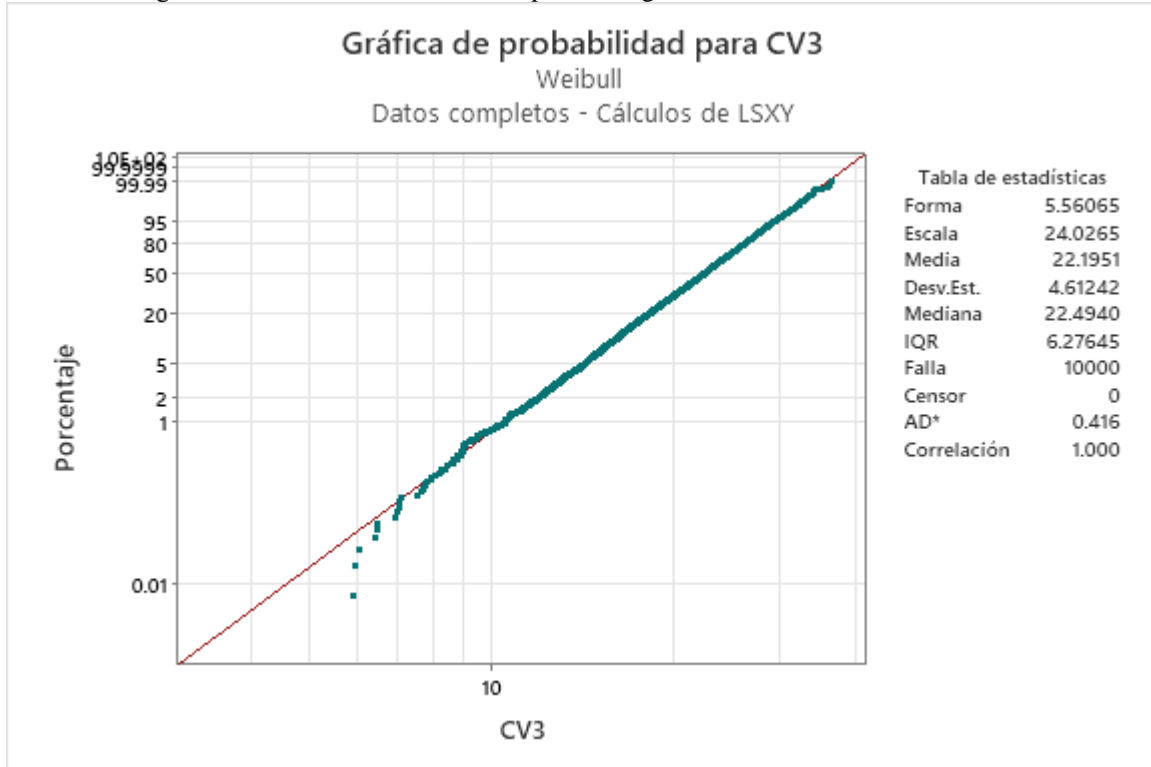
Fuente: Elaboración propia.

Figura 149: Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV2, Vehículo C44



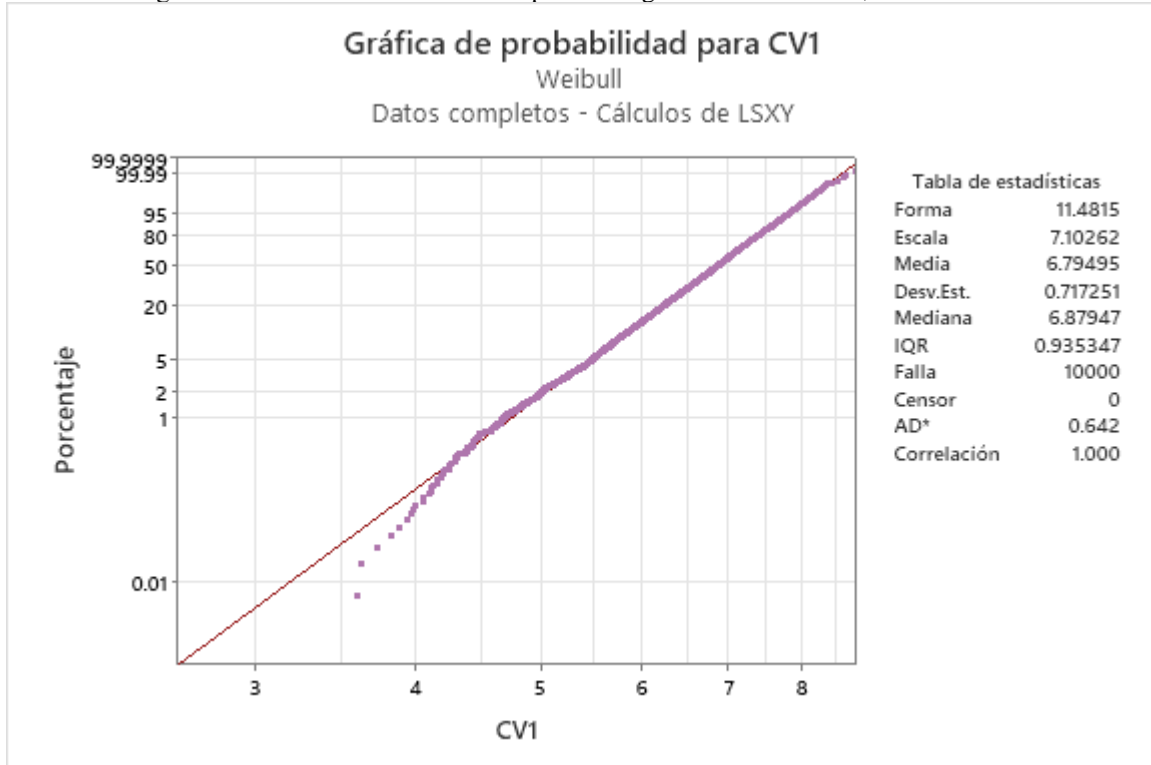
Fuente: Elaboración propia.

Figura 150: Distribución de Weibull para la carga P3 Virtual = CV3, Vehículo C44



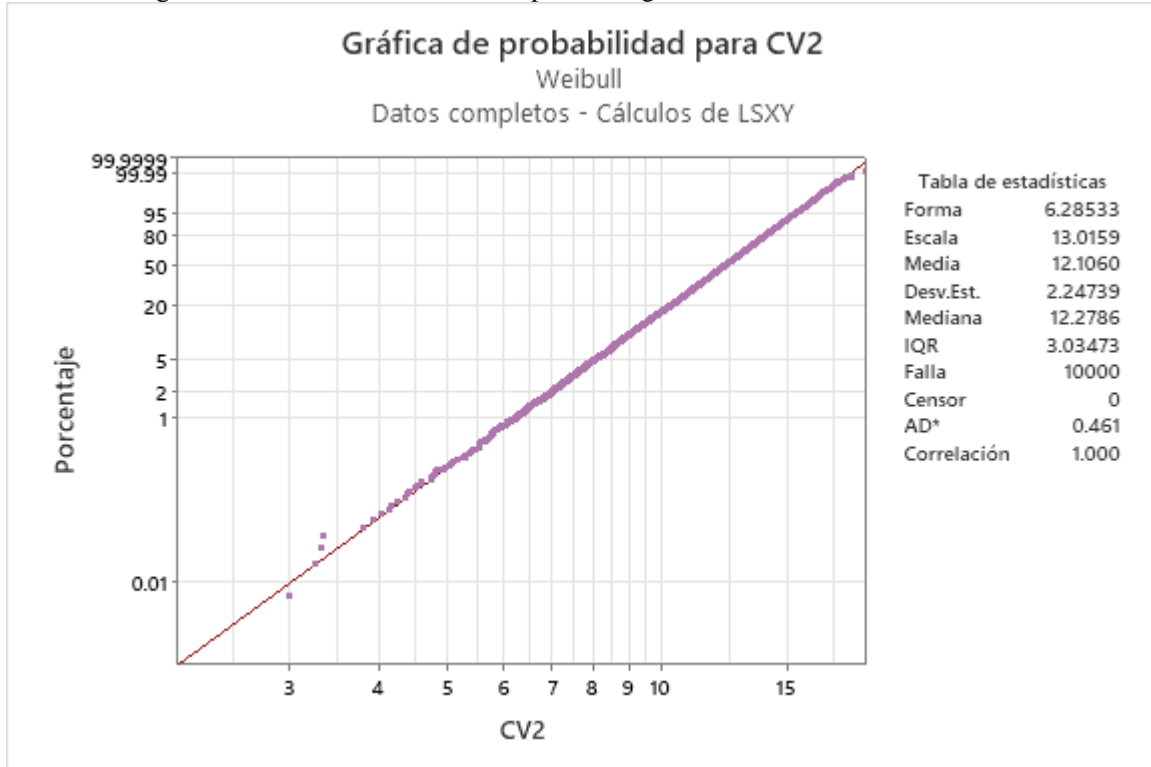
Fuente: Elaboración propia.

Figura 151: Distribución de Weibull para la carga P1 Virtual = CV1, Vehículo C46



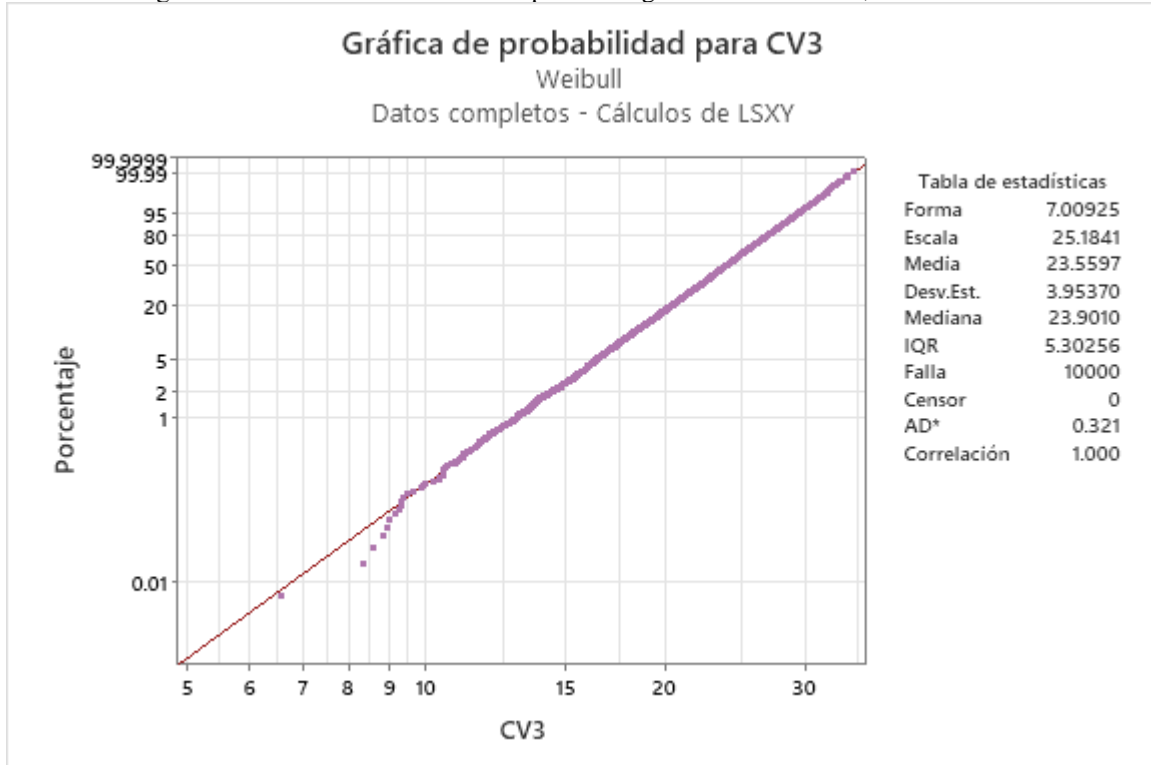
Fuente: Elaboración propia.

Figura 152: Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV2, Vehículo C46



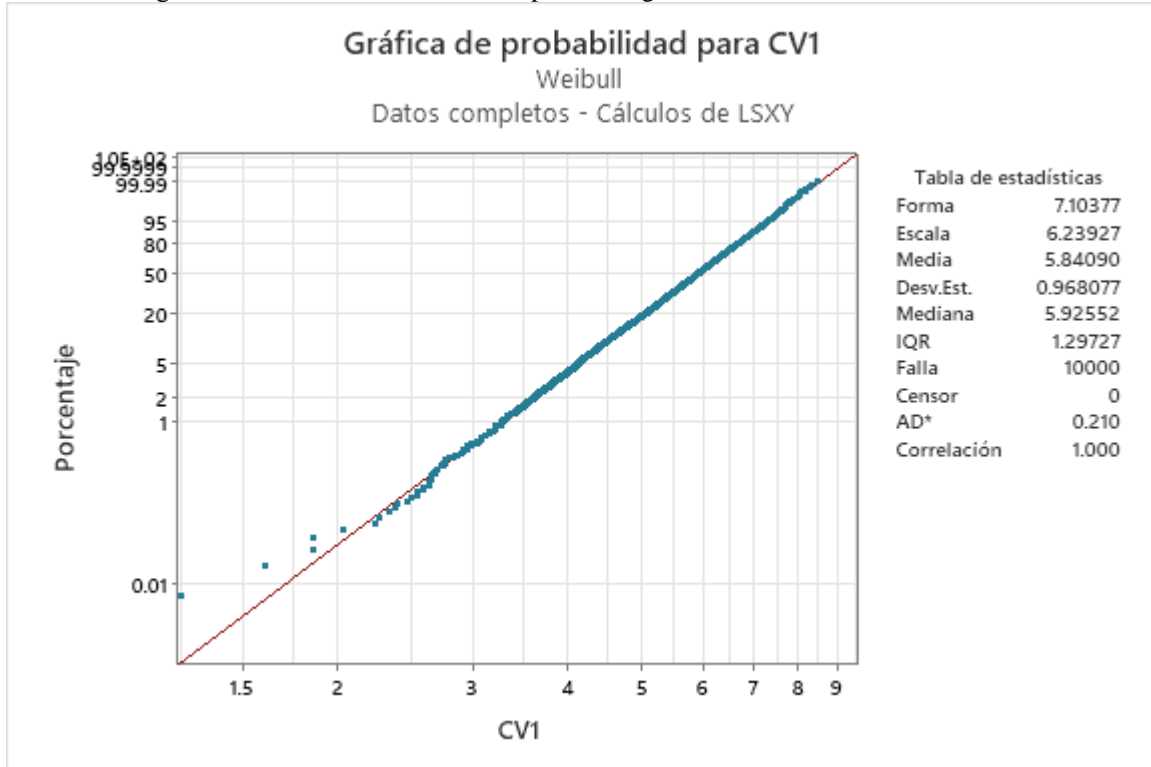
Fuente: Elaboración propia.

Figura 153: Distribución de Weibull para la carga P3 Virtual = CV3, Vehículo C46



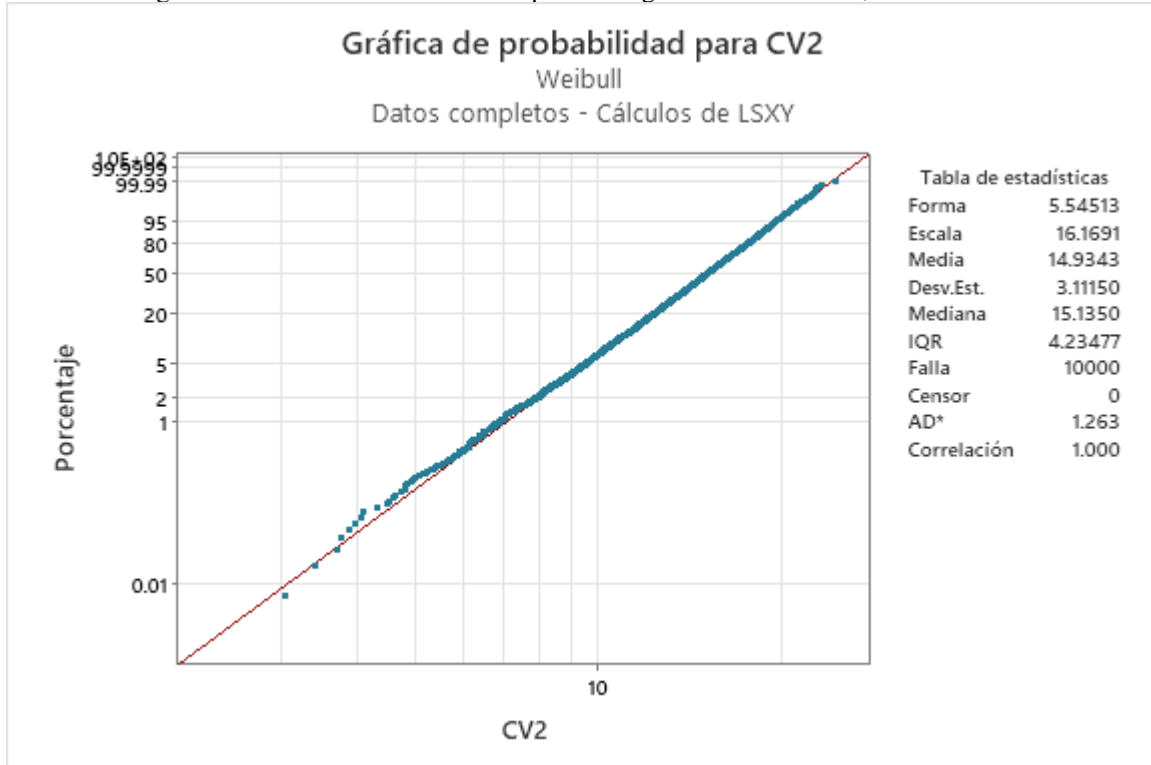
Fuente: Elaboración propia.

Figura 154: Distribución de Weibull para la carga P1 Virtual = CV1, Vehículo C57



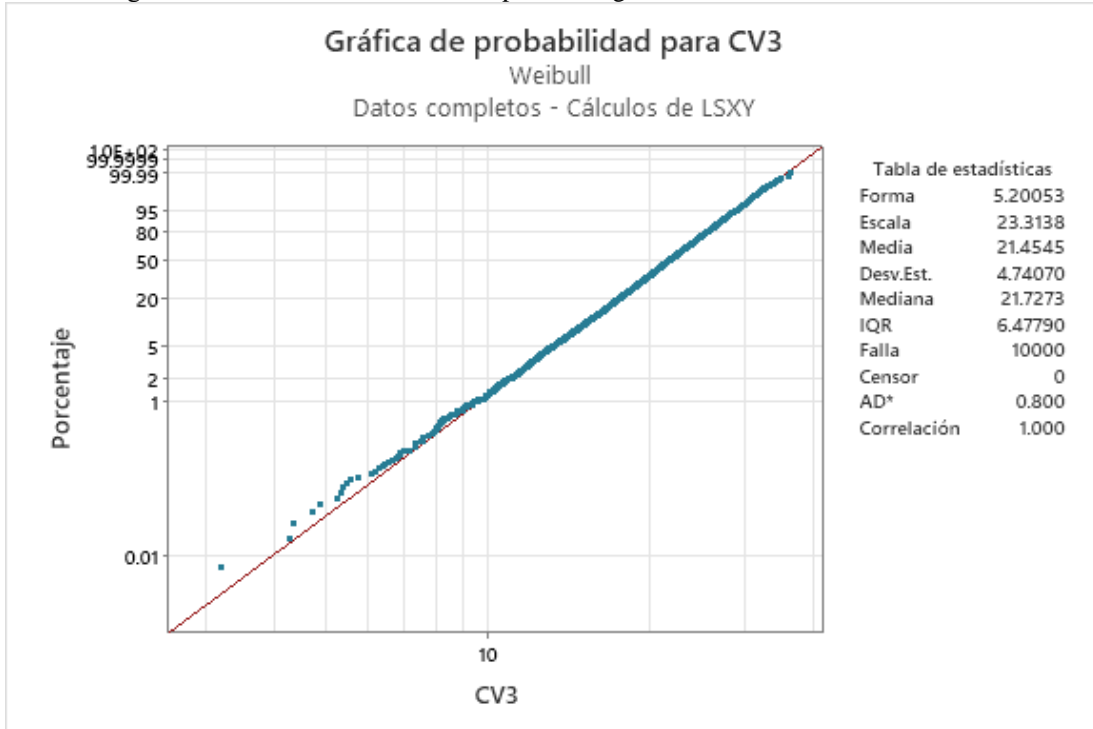
Fuente: Elaboración propia.

Figura 155: Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV2, Vehículo C57



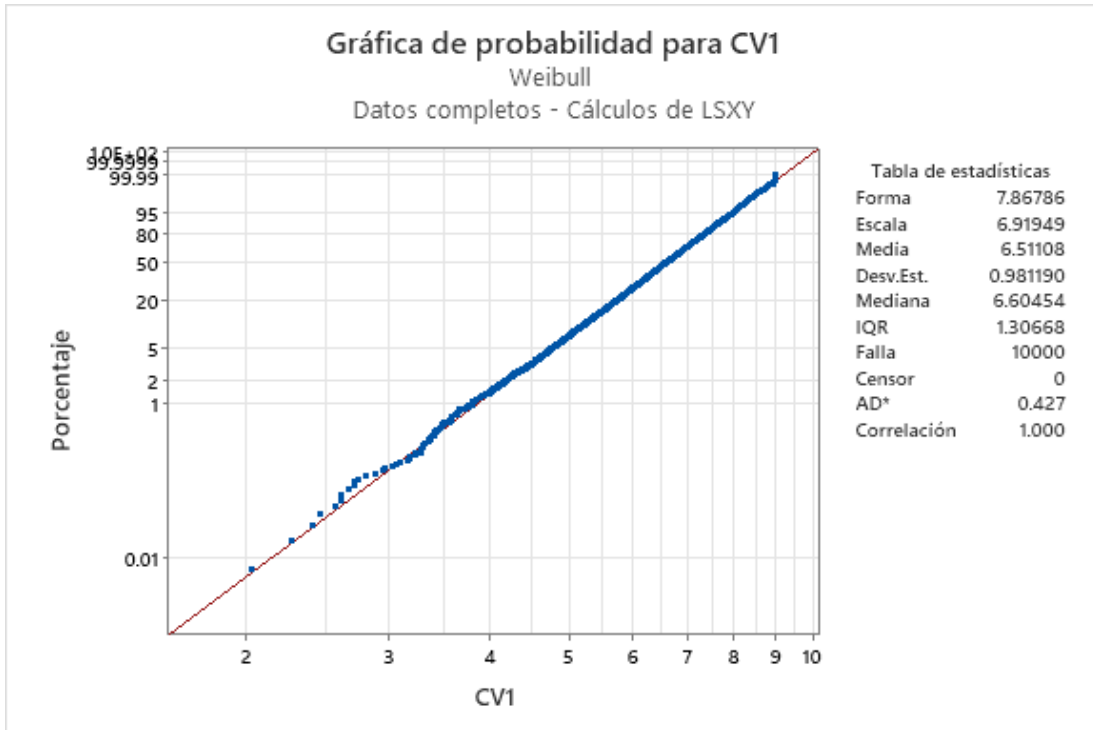
Fuente: Elaboración propia.

Figura 156: Distribución de Weibull para la carga P3 Virtual = CV3, Vehículo C57



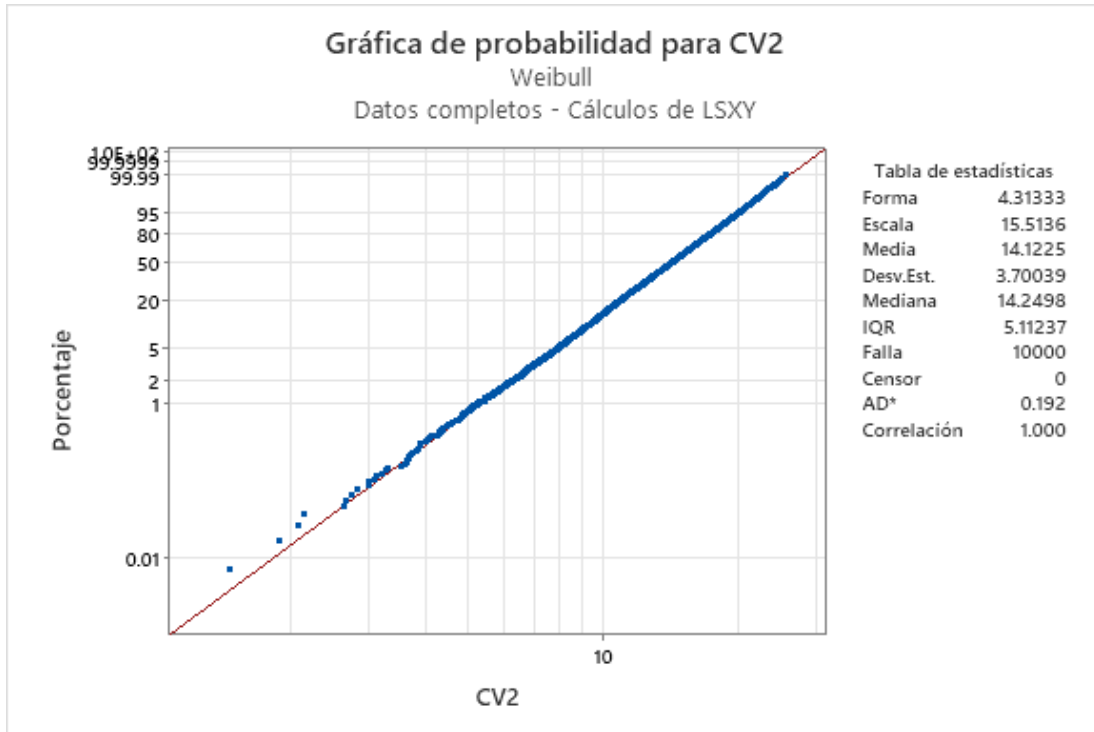
Fuente: Elaboración propia.

Figura 157: Distribución de Weibull para la carga P1 Virtual = CV1, Vehículos C23-C44-C46-C57



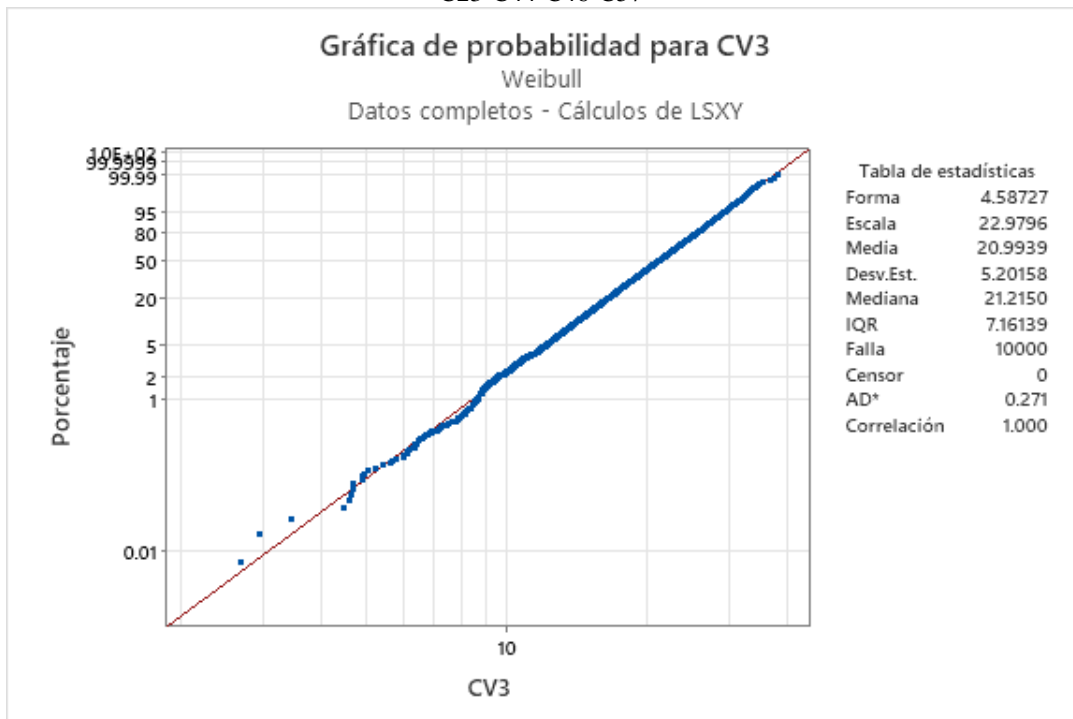
Fuente: Elaboración propia.

Figura 158: Distribución de Weibull para la carga P2 Virtual = CV2, Vehículos C23-C44-C46-C57



Fuente: Elaboración propia.

Figura 159: Distribución de Weibull para la carga P3 Virtual = CV3, Vehículos C23-C44-C46-C57



Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizadas las gráficas, se procedió a determinar la probabilidad de no existencia de los vehículos, generada a partir de la fórmula de probabilidad para un período de tiempo determinado. En este caso, como para el diseño de puentes en Bolivia y a nivel internacional generalmente se asume un período de diseño de 50 años, se adoptó este valor para calcular la probabilidad de no excedencia. En la Tabla 12 se pueden observar las probabilidades de no excedencia "q", que no es más que 1 menos la probabilidad de excedencia, y la probabilidad de excedencia se calculará con la siguiente fórmula:

$$P = Prob(P1 > CV1, T = 50 \text{ años}) = \frac{1}{n}$$

Tabla 12: Probabilidades de no excedencia, q

Tipo	Conteo	Promedio anual	Equivalente a 50 años	p	q=1-p
5	376966	57994.77	2899738.46	3.45E-07	0.999999655
23	177866	22233.25	1111662.5	9.00E-07	0.999999100
44	529955	66244.375	3312218.75	3.02E-07	0.999999698
46	243581	30447.625	1522381.25	6.57E-07	0.999999343
57	347680	43460	2173000	4.60E-07	0.999999540
23-44-46-57	1299082	162385.25	8119262.5	1.23E-07	0.99999988

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener estos valores de no excedencia, se asegura la máxima seguridad para el modelo. Una vez obtenidos los valores de no excedencia, se pueden calcular los valores de las cargas virtuales para cada función de la distribución de Weibull. En este caso, se utilizó la nomenclatura CV1, CV2 y CV3, que son equivalentes a P1, P2 y P3, respectivamente.

En la Tabla 13 se pueden ver las cargas virtuales calculadas para un período de diseño de 50 años, en las cuales se puede observar que las cargas máximas son proporcionadas por el camión C23 para CV1 y CV2 y por el camión C57 para CV3 y por la sumatoria de las cuatro configuraciones.

Tabla 13: Cargas Virtuales calculadas para un Periodo de diseño de 50 años

Configuración Vehicular	CV1 (Tn)	CV2 (Tn)	CV3 (Tn)
5	-	28.72	-
23	10.24	33.57	33.12
44	9.54	21.46	41.44
46	9.15	20.69	38.16
57	9.56	27.93	41.76
23-44-46-57	10.17	31.33	44.49

Fuente: Elaboración propia.

Al concluir este análisis, sería conservador adoptar directamente los valores máximos, ya que se estaría tomando en cuenta factores de seguridad de probabilidad y no excedencia bastante altos, lo que podría llevar a sobredimensionar las estructuras en algunos casos. Por esta razón, no se asumieron los valores máximos, sino que se tomó el promedio de todas las cargas, sin considerar la carga más baja que alguna configuración genera. De esta manera, se obtuvo un valor para P1 de 9.9 Tn, para P2 de 28.6 Tn y para P3 de 41.5 Tn para el camión de diseño, mientras que para el Tándem de diseño se obtuvo 31.5 Tn, como se observa en la Tabla 14.

Tabla 14: Cargas virtuales adoptadas para P1, P2 y P3

	CV1 = P1	CV2 = P2	CV3 = P3	Peso Total (Ton)
Promediado	9.8775	28.5725	41.4625	79.9
Camión de Diseño	9.9	28.6	41.5	80
Tándem de Diseño		31.5		31.5

Fuente: Elaboración propia.

Esta metodología permitió realizar un análisis inferencial riguroso de las cargas vivas vehiculares y asignar las cargas apropiadas al modelo conceptual, garantizando así la seguridad y durabilidad del diseño de puentes propuesto, tomando en cuenta un período de diseño de 50 años y considerando diversas configuraciones de vehículos.

4.8. Cálculo de las separaciones de cargas del Modelo Virtual

Para calcular las separaciones de carga del modelo virtual, se determinaron las medias de cada configuración, tal como se muestra en la Tabla 15. En este punto, se podría optar por asumir los valores promedio de todas las configuraciones, los cuales resultarían en 3.9 m para d1 y 8.7 m para d2. Sin embargo, estas distancias son cuestionables al analizar puentes menores a 20 metros, ya que las distancias que tendría el modelo virtual podrían producir momentos menores que los del camión HL-93

Tabla 15: Distancias entre ejes de las diferentes configuraciones

Configuración	d1 (m)	d2 (m)
23	4.1	7.85
44	3.65	8.5
46	3.7	9
57	4.1	9.5
Promedio	3.9	8.7

Fuente: Elaboración propia.

Al revisar la correlación de datos, se pudo observar que la distancia d2 tiene una influencia inversamente proporcional para los momentos y cortantes. Por esta razón, se decidió mantener las distancias propuestas por la AASHTO LRFD, que establece 4.2 m para d1 y d2, y en casos de carga de fatiga, 4.2 m para d1 y 9 m para d2. De esta manera, se adoptaron las distancias especificadas en la Tabla 16.

Tabla 16: Distancias adoptadas para el Modelo Virtual

Casos	d1 (m)	d2 (m)
Carga	4.2	4.2
Fatiga	4.2	9

Fuente: Elaboración propia.

4.9. Determinación de factor de carga y definición del Modelo Virtual de Cargas Vivas Vehiculares

Para calcular el factor de carga que se utilizará en el modelo propuesto, destinado al diseño de puentes mediante métodos basados en estados límite de resistencia y servicio, se debía considerar la variabilidad e incertidumbre de los valores máximos que eventualmente asumirían las cargas nominales. Los valores calculados previamente para las cargas virtuales ya incorporaban el efecto de la incertidumbre, asociándose a una probabilidad de excedencia que se consideró razonablemente pequeña. Por otra parte, los valores nominales del peso bruto total permitido estaban establecidos por la ley N° 441.

Para calcular el factor de carga, se tomó en cuenta que los valores de las cargas virtuales sumaban 80 Tn y que el peso bruto total permitido (PBTP) era de 45 Tn. El factor de carga viva resultaría del cociente del primero entre el segundo, representado en la siguiente fórmula:

$$F_c = \frac{\Sigma P}{PBTP}$$

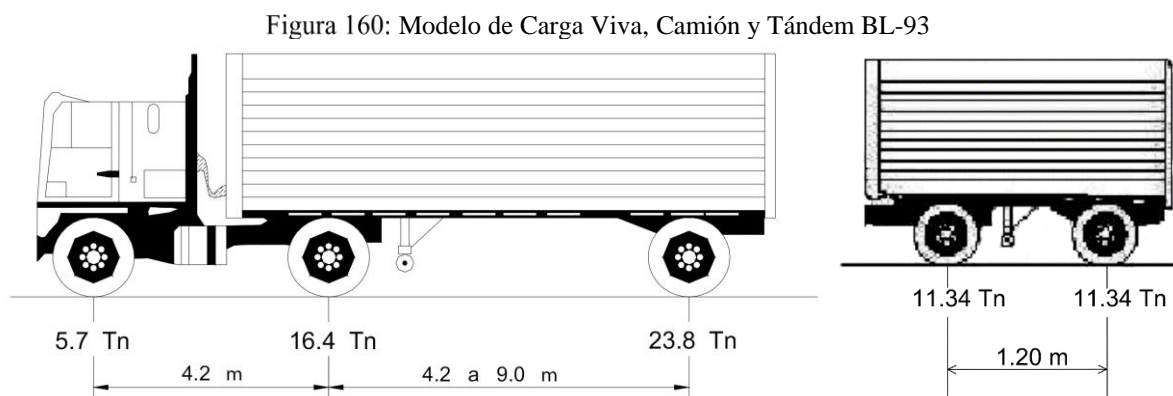
$$F_c = \frac{80}{45} = 1.77$$

$$F_c \cong 1.75$$

De esta manera, se obtuvo un factor de carga viva de 1.77, que, al redondearlo a 1.75, coincidía con el valor utilizado por la AASHTO LRFD. Este hallazgo resultó importante, ya que al emplear el mismo factor de carga viva que el de la AASHTO, se simplificó el trabajo al no requerir encontrar factores equivalentes para el resto de las combinaciones de carga. Por lo tanto, se mantuvieron las combinaciones de carga propuestas por la AASHTO LRFD.

Al dividir las cargas virtuales entre 1.75, se obtuvieron las siguientes cargas concentradas nominales del modelo de cargas vivas, tal como se muestra en la Figura 160. Y siguiendo el mismo procedimiento utilizado para la determinación de las cargas concentradas nominales del camión de diseño, se llevó a cabo un análisis similar para las cargas del tándem. Sin embargo, al dividir las cargas entre dos y, posteriormente, dividir cada una por el factor de carga, se obtuvieron resultados que indicaban cargas de 9 Tn en cada eje del tándem, lo que resultó ser inferior a las cargas especificadas por la AASHTO LRFD.

Dado que las cargas obtenidas eran menores a las establecidas por la AASHTO LRFD, se decidió que las cargas y posiciones finales para el tándem de diseño serían las mismas que las del Tándem HL-93. De esta manera, se descartó la necesidad de validar el tándem propuesto (Figura 160), centrándose en el análisis del camión de diseño.



Fuente: Elaboración propia.

4.10. Determinación de la carga uniformemente distribuida mediante métodos estocásticos.

Para determinar la carga uniformemente distribuida en puentes, se empleó el método de Montecarlo, un enfoque estocástico que simuló puentes cargados con una sucesión de camiones en configuraciones predominantes, separados por 3 metros cada uno. Se generó una serie de cuatro camiones sucesivos dispuestos aleatoriamente, utilizando como parámetros para esta simulación las frecuencias relativas de cada camión y sus intervalos, obtenidos a través de la frecuencia relativa acumulada (Tabla 17). Se consideraron todos los camiones excepto el C5, ya que se puso énfasis en los camiones más pesados.

Tabla 17: Probabilidad de excedencia de los Vehículos Reales

Config.	Cantidad	Frec. Rel.	P	Frec. Rel. Ac	Intervalos	
23	177866	0.1369167	0.0000007	0.14	0	0.14
44	529955	0.4079458	0.0000002	0.54	0.14	0.54
46	243581	0.1875024	0.0000005	0.73	0.54	0.73
57	347680	0.2676351	0.0000004	1.00	0.73	1.00

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida la simulación estocástica mediante el método de Montecarlo, se asignaron cargas a los camiones, utilizando las cargas virtuales previamente calculadas para una probabilidad de no excedencia de 50 años (basada en la distribución de Weibull) y las distancias entre ejes determinadas para cada camión (Tabla 18).

Tabla 18: Vehículos Reales para una probabilidad de no excedencia de 50 años

Configuración	d1 (m)	d2 (m)	CV1 (Tn)	CV2 (Tn)	CV3 (Tn)
23	4.1	7.85	10.24	33.57	33.12
44	3.65	8.5	9.54	21.46	41.44
46	3.7	9	9.15	20.69	38.16
57	4.1	9.5	9.56	27.93	41.76

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se determinaron los momentos máximos y las cortantes máximas generadas a distintas luces con base en el camión de diseño propuesto (BL-93), cuyos valores se pueden observar en la Tabla 19.

Tabla 19: Momentos y Cortantes Máximos debidos al Camión de diseño BL-23

Luz (m)	M _{Max}	V _{Max}
60	628.573464	44.047
50	513.678157	43.6564
40	398.835196	43.0705
30	284.096928	42.094
20	169.620391	40.141

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se calcularon las cargas distribuidas de carril de diseño utilizando los valores previamente obtenidos (Tabla 20). Se estableció que el momento máximo total generado por la distribución sucesiva de camiones en el puente sería igual al momento máximo generado por el camión de diseño propuesto (BL-23), más la suma del momento máximo generado por una carga distribuida (segunda fila de la Tabla 20). Este mismo procedimiento se aplicó para la cortante. Después de sustituir las ecuaciones, se pudo despejar el valor de q, que representa la carga distribuida a lo largo del puente en función de los momentos y cortantes máximas generados por la sucesión de camiones y el camión de diseño (tercera fila de la Tabla 20). Para determinar la carga distribuida de carril de diseño, se dividió la carga distribuida por el factor de carga calculado previamente (1.75), obteniendo así el valor de w (cuarta fila de la Tabla 20).

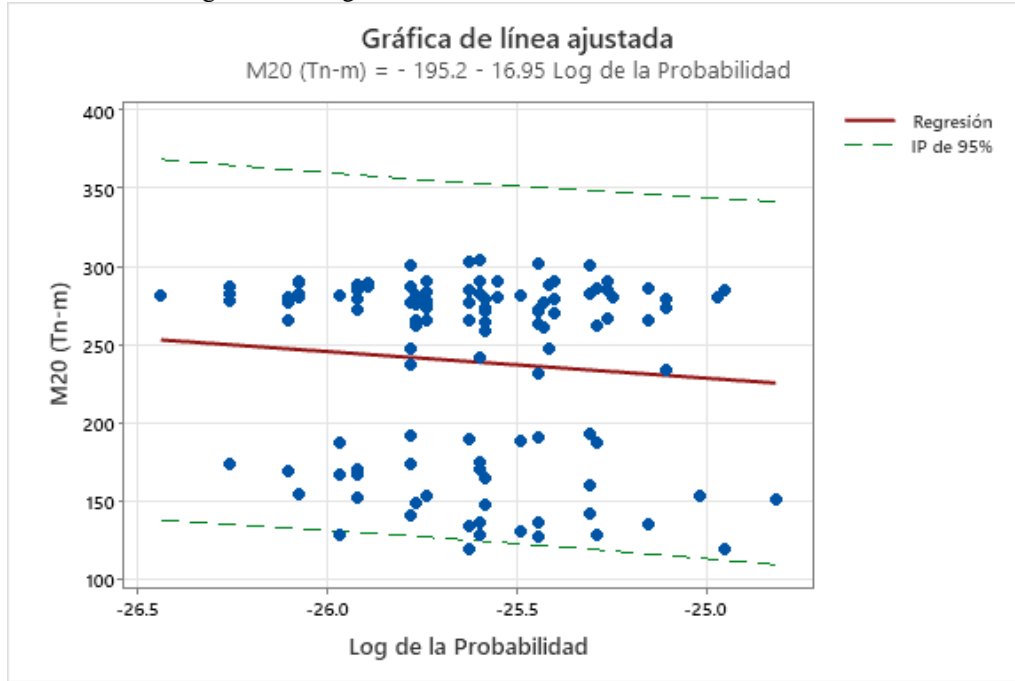
Tabla 20: Ecuaciones para cálculo de la carga distribuida

Elemento Mecánico	Momentos	Cortantes
Total	$M_T = M_c + M_q$	$V_T = V_c + V_q$
Solo generado por la carga distribuida	$M_q = \frac{q \cdot L^2}{8}$	$V_q = \frac{q \cdot L}{2}$
Carga distribuida	$q = \frac{(M_T - M_c) \cdot 8}{L^2}$	$q = \frac{(V_T - V_c) \cdot 2}{L}$
Carga distribuida de carril de diseño	$w = \frac{q}{f_c}$	$w = \frac{q}{f_c}$

Fuente: Elaboración propia.

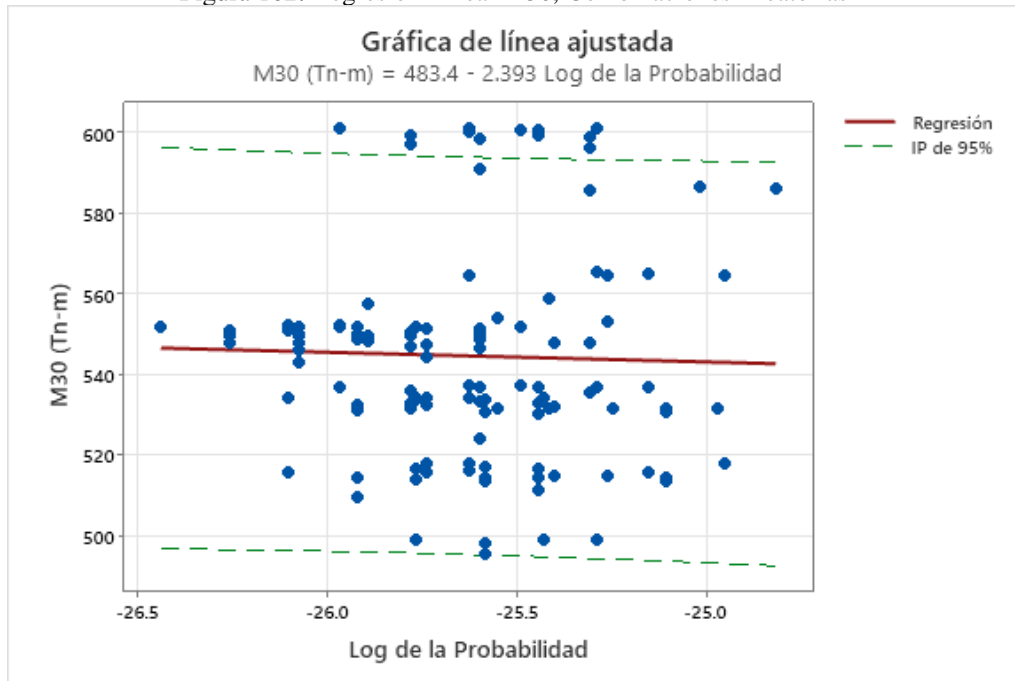
Con estos parámetros definidos, se procedió a determinar los momentos máximos y cortantes máximas para diferentes luces de puente, desde 20 m hasta 60 m, utilizando regresiones lineales con un intervalo de confianza del 95%. La regresión lineal consideró el elemento mecánico frente al logaritmo de la probabilidad de ocurrencia de cada combinación de vehículos, obtenida a partir del producto de las probabilidades de ocurrencia individuales de cada vehículo en la serie (Figuras 161 a 170).

Figura 161: Regresión Lineal M20, Combinaciones Aleatorias



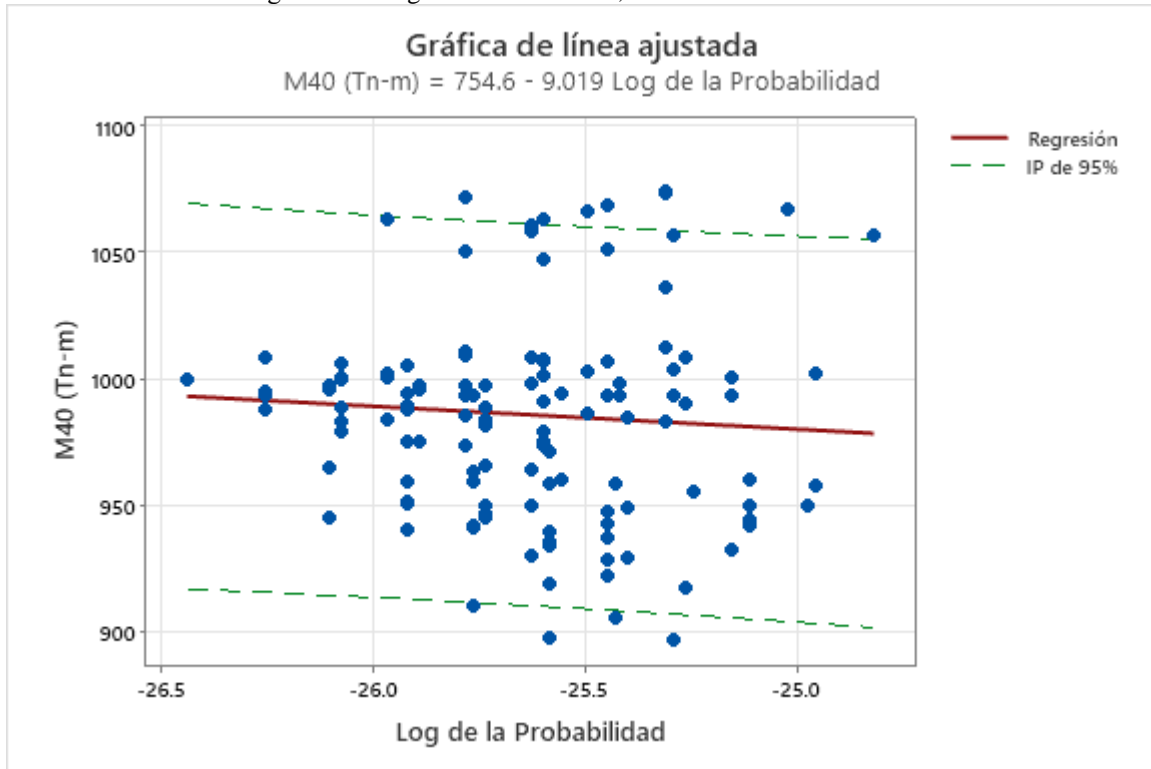
Fuente: Elaboración propia.

Figura 162: Regresión Lineal M30, Combinaciones Aleatorias



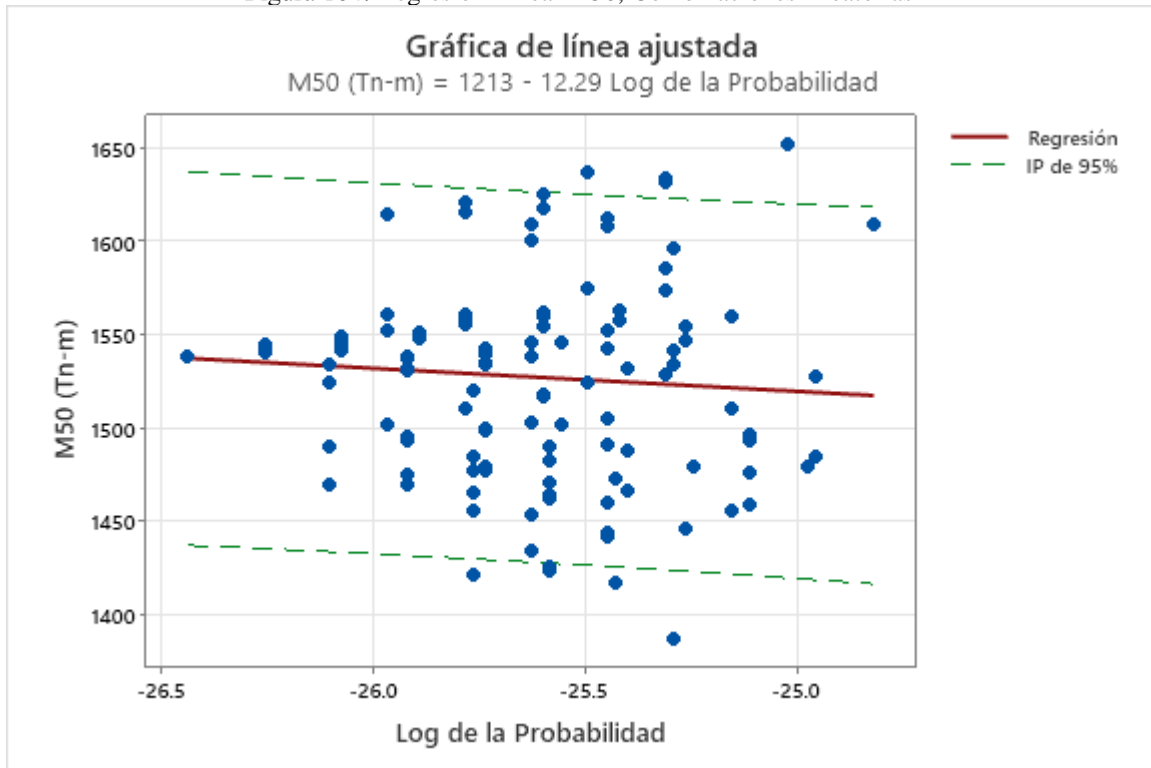
Fuente: Elaboración propia.

Figura 163: Regresión Lineal M40, Combinaciones Aleatorias



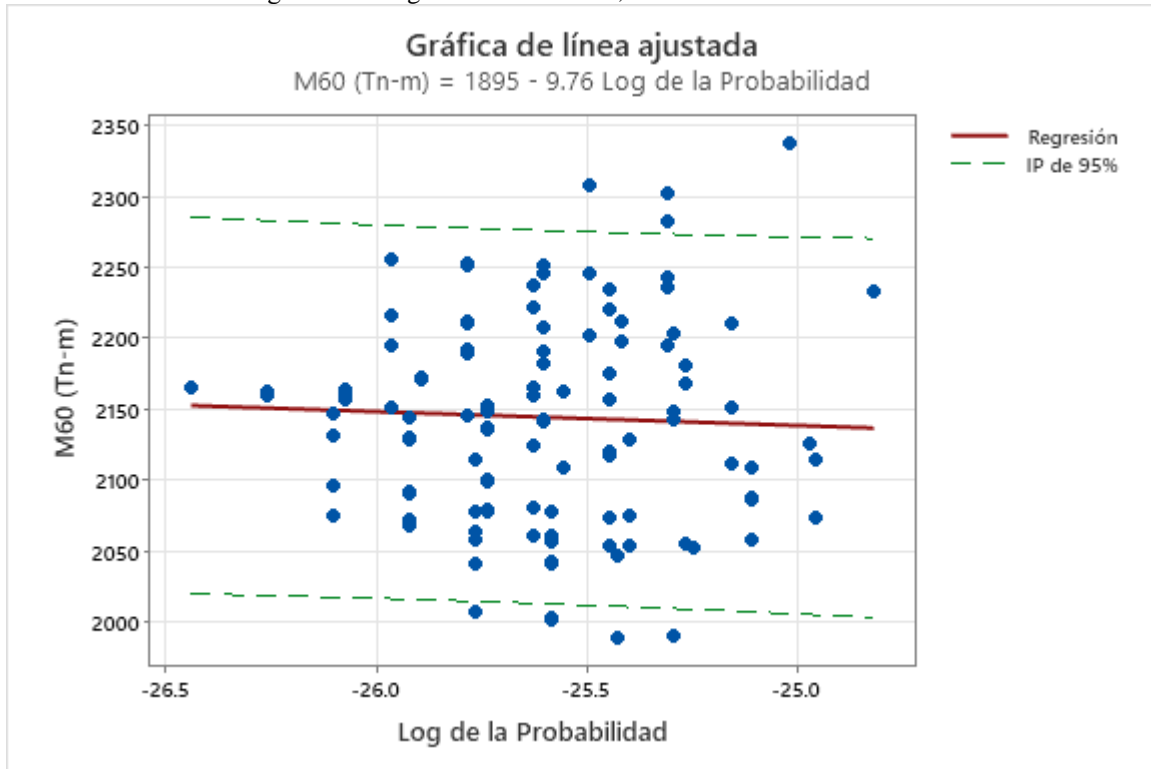
Fuente: Elaboración propia.

Figura 164: Regresión Lineal M50, Combinaciones Aleatorias



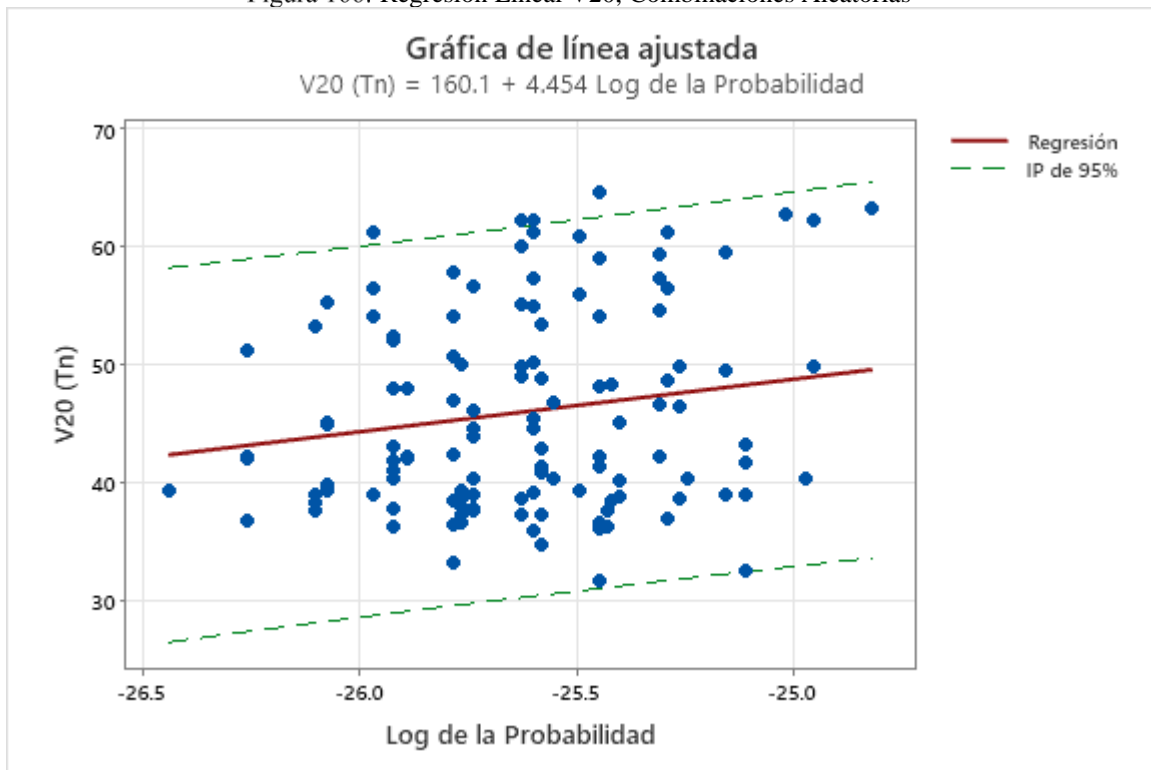
Fuente: Elaboración propia.

Figura 165: Regresión Lineal M60, Combinaciones Aleatorias



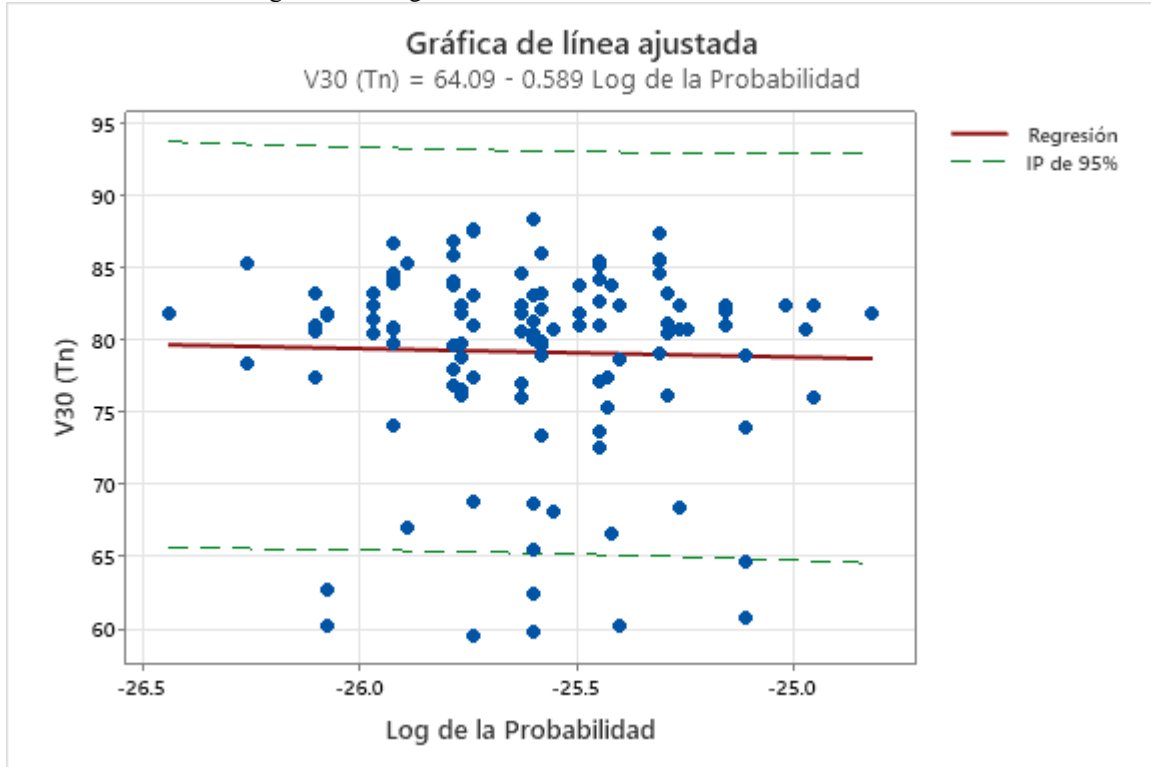
Fuente: Elaboración propia.

Figura 166: Regresión Lineal V20, Combinaciones Aleatorias



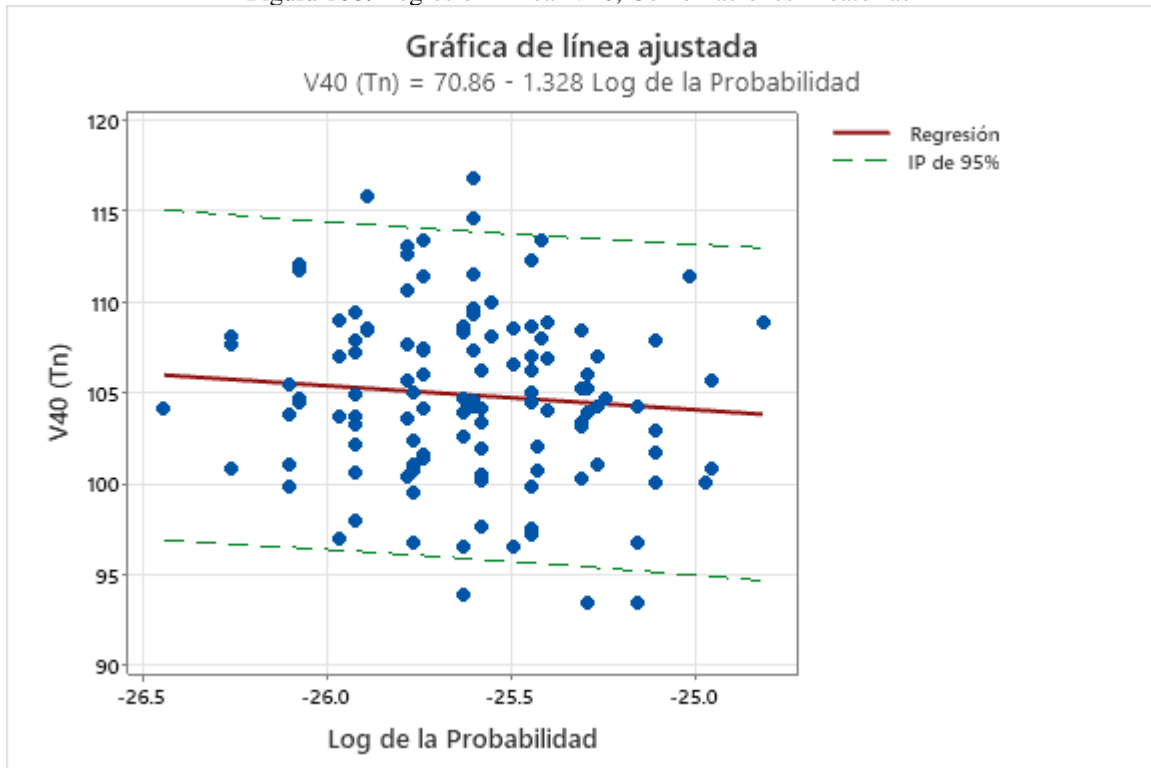
Fuente: Elaboración propia.

Figura 167: Regresión Lineal V30, Combinaciones Aleatorias



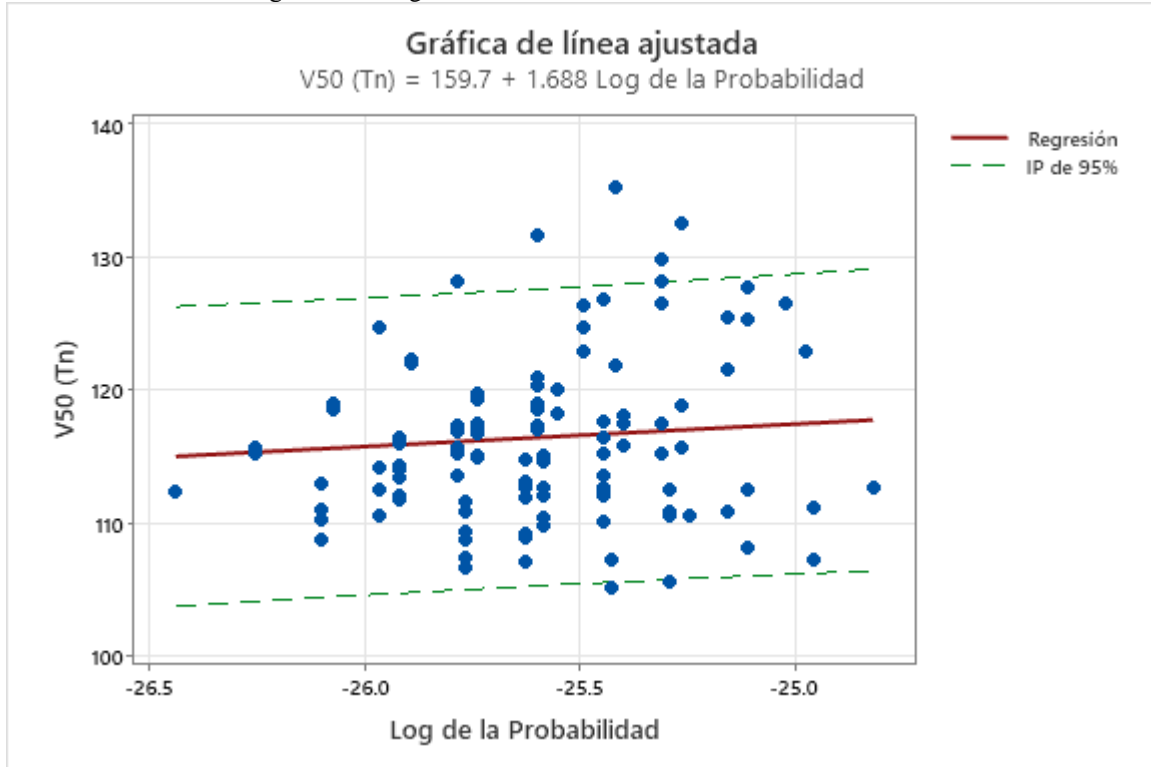
Fuente: Elaboración propia.

Figura 168: Regresión Lineal V40, Combinaciones Aleatorias



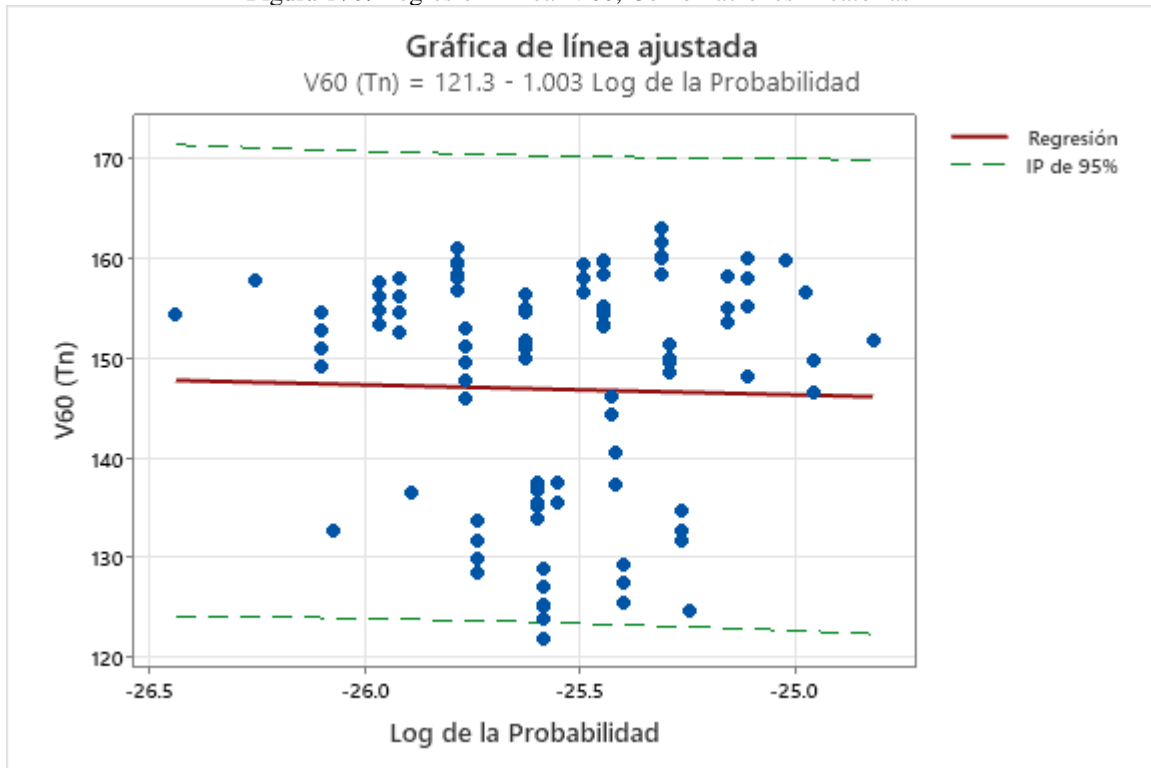
Fuente: Elaboración propia.

Figura 169: Regresión Lineal V50, Combinaciones Aleatorias



Fuente: Elaboración propia.

Figura 170: Regresión Lineal V60, Combinaciones Aleatorias



Fuente: Elaboración propia.

Tras realizar las regresiones, se extrajeron los valores generados por la probabilidad de ocurrencia respectiva, basándose en las fórmulas obtenidas en cada regresión (Tabla 21). Para seleccionar la carga uniforme, se consideraron los valores del intervalo superior, ya que eran los más grandes. Se observó una gran diferencia entre los extremos superior e inferior, lo que indicaba que las cargas distribuidas generadas a partir de los datos de los elementos mecánicos para puentes de 60 m y 20 m eran bastante distintas. Para obtener un valor conservador, se descartaron en el promedio los valores mínimos y máximos, es decir, no se tuvieron en cuenta las luces de 20 m ni las de 60 m. Esta decisión se tomó no solo porque estos valores fueran extremos, sino también porque, en general, los puentes con un sistema isostático de vigas simplemente apoyadas no suelen superar los 50 m. De este modo, se evitó asumir cargas generadas a partir de estudios realizados en puentes que no se construyen, lo que podría afectar la fiabilidad al momento de elaborar y definir las cargas.

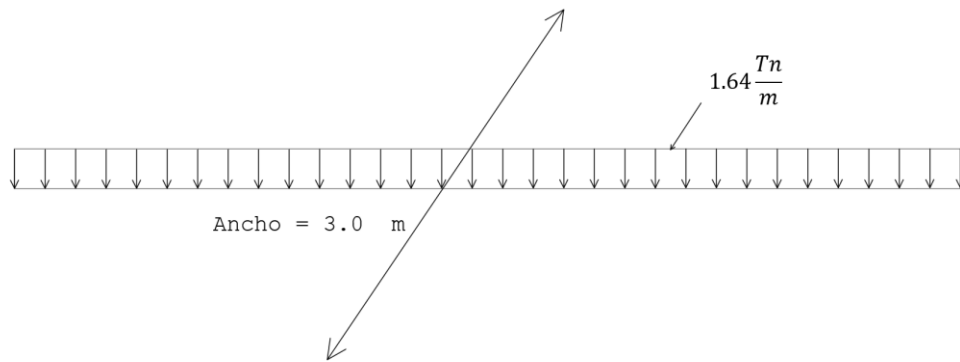
Tabla 21: Cargas uniformemente distribuidas

Variable	Conteo total	Regresión	Mínimo	Máximo	q Tn/m	w Tn/m
M60max	215	2146.2	2137.2	2153.1	3.39	1.94
M50max	215	1529.3	1518	1538	3.28	1.87
M40max	215	986.61	978.33	992.97	2.97	1.70
M30max	215	544.99	542.79	546.67	2.33	1.33
M20max	215	241.02	225.46	252.98	1.67	0.95
V60max	215	147.11	146.19	147.82	3.46	1.98
V50max	215	116.26	115.07	117.81	2.97	1.69
V40max	215	105.04	103.82	105.97	3.14	1.80
V30max	215	79.248	78.708	79.664	2.50	1.43
V20max	215	45.472	42.331	49.562	0.94	0.54
					Promedio	1.64

Fuente: Elaboración propia.

El modelo definido para la carga de carril BL-23 se puede observar en la Figura 171, que, al igual que en la AASHTO, tomó en cuenta un ancho de carril de 3 m. A través de este enfoque riguroso y metodológico, se pudo determinar la carga uniformemente distribuida en puentes, utilizando métodos estocásticos y considerando múltiples parámetros y escenarios de carga.

Figura 171: Carga de Carril BL-23



Fuente: Elaboración propia.

4.11. Validación del modelo de carga viva, Camión de Diseño BL-23

En este capítulo, se aborda la validación del modelo de carga viva propuesto, específicamente el Camión de Diseño BL-23, para garantizar su adecuación y eficacia en el análisis estructural de puentes. Para ello, se consideraron dos enfoques: el modelo de cargas concentradas y el modelo de cargas vivas completo.

4.11.1. Modelo de Cargas Concentradas

Para validar el sistema de cargas concentradas del modelo de cargas vivas vehiculares propuesto, se llevaron a cabo tres comparaciones de los elementos mecánicos, considerando las siguientes condiciones:

1. Los valores máximos reales que se predicen a partir de las regresiones, tomando como referencia la envolvente de los elementos mecánicos vistos en el punto 4.3.
2. Los valores máximos que se predicen a partir de los análisis de regresión múltiple, utilizando las ecuaciones obtenidas en la sección donde se analizó la correlación de las variables y la validación del modelo conceptual.
3. Los elementos mecánicos máximos producidos a partir del camión de diseño adoptado (BL-23), en función de los valores esperados en 50 años según los análisis probabilísticos.

En la Tabla 22, se presentan los momentos máximos y cortantes máximas utilizados para generar las gráficas de validación del modelo de cargas concentradas. En dicha tabla, se incluyen el camión BL-23, la predicción del modelo probabilístico denominada envolvente, la predicción con las ecuaciones de regresión múltiple y el camión de la AASHTO, el HL-93.

Tabla 22: Elementos Mecánicos Máximos para Validar el Modelo de Cargas Concentradas

Luz Puente L (m)	Momento Máximo Mmax (Tn-m)				Cortante Máxima VMax (Tn)			
	BL-23	Envolvente	Regresiones Múltiples	HL-93	BL-23	Envolvente	Regresiones Múltiples	HL-93
10	55.95	45.06	44.60	44.58	34.22	23.01	30.08	23.37
20	169.12	134.89	135.86	125.43	40.06	32.11	36.71	28.02
30	283.35	238.99	252.25	206.83	42.01	36.42	40.28	29.57
40	397.84	343.09	369.75	288.36	42.98	37.82	42.07	30.34
50	512.43	447.19	487.69	369.96	43.56	38.21	43.15	30.81
60	627.07	551.29	605.85	451.58	43.95	39.49	43.86	31.12

Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 172 y 173 muestran los datos gráficos de las dos tablas mencionadas, en las cuales se aprecia que el modelo propuesto BL-23 supera al resto de predicciones, tanto en el modelo probabilístico como en el de regresión múltiple. Al analizar detalladamente, se pudo constatar que el modelo propuesto BL-23 converge con el modelo generado a partir de las regresiones múltiples a medida que aumenta la longitud del puente. En tramos cortos y medios, el modelo propuesto es superior, pero en longitudes más largas, las curvas se superponen, lo que indica congruencia entre los resultados obtenidos.

Figura 172: Validación del modelo con valores esperados, Momentos Flectores

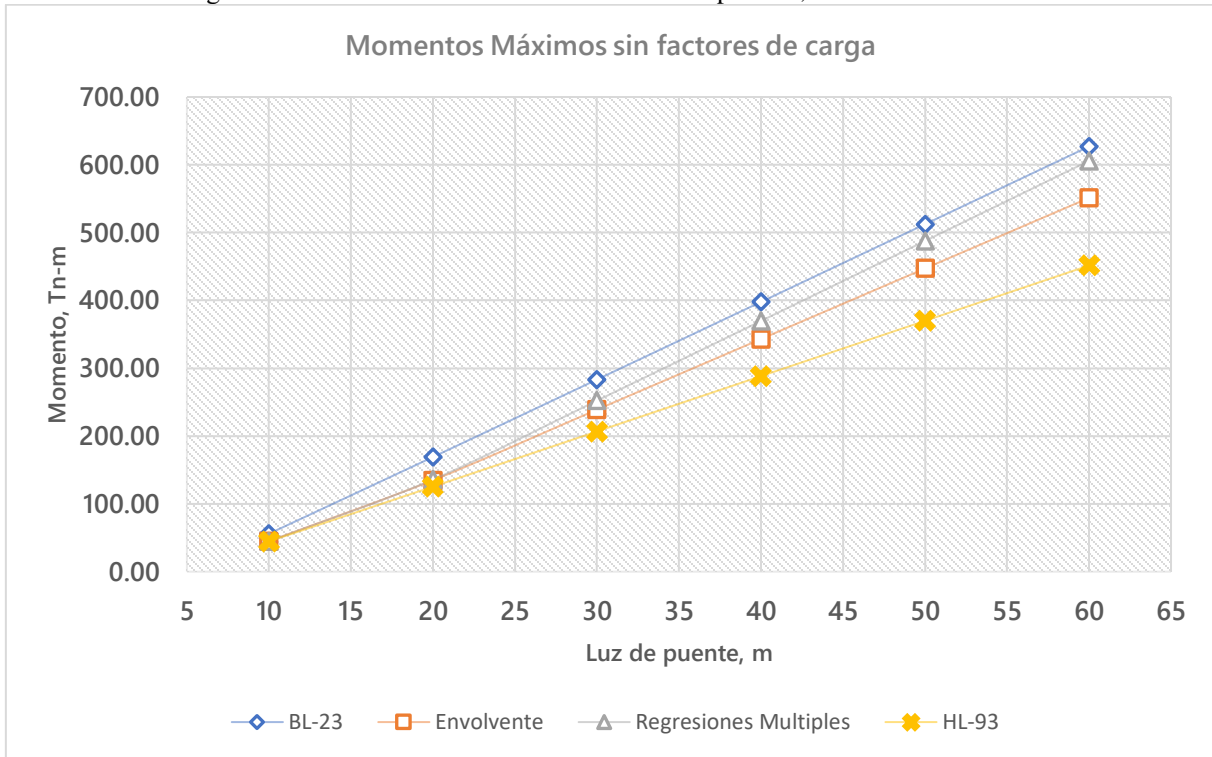
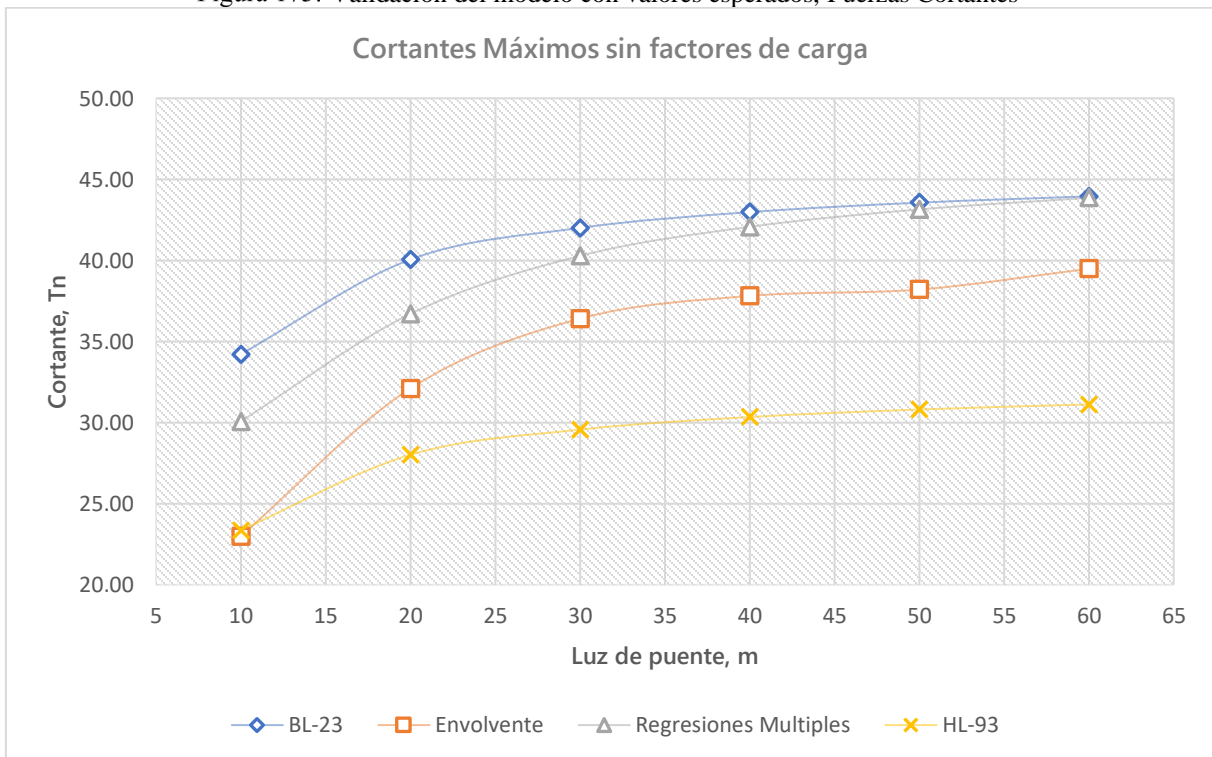


Figura 173: Validación del modelo con valores esperados, Fuerzas Cortantes



La Tabla 23 muestra la relación de elementos mecánicos entre el modelo de cargas concentradas, resumiendo la interpretación de las gráficas presentadas en las Figuras 174 y 175. En esta tabla, se observa que la diferencia entre el modelo propuesto y la envolvente, es decir, la predicción del modelo probabilístico, varía entre el 19% y el 12% en momentos y entre el 33% y el 10% en cortantes. Por otro lado, en el modelo de predicción utilizando las ecuaciones de regresión múltiple, las diferencias varían entre el 20% y el 3% en momentos y entre el 12% y el 0% en cortantes. Se constata que las diferencias entre estos modelos disminuyen a medida que aumenta la longitud del puente, lo cual respalda la validez del modelo de cargas vivas concentradas propuesto para su uso en la práctica profesional en el análisis estructural de puentes.

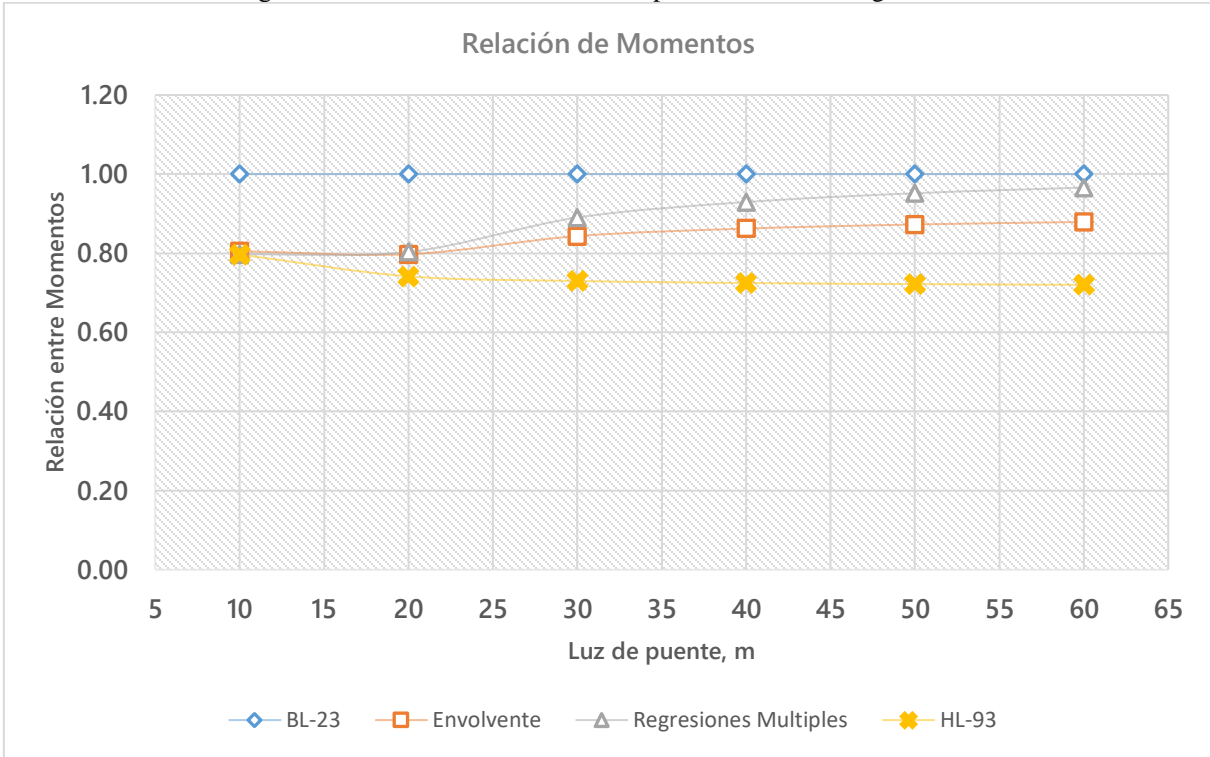
Tabla 23: Relación de Elementos Mecánicos entre el Modelo de Cargas Concentradas

Luz Puente L (m)	Momento Máximo Mmax (Tn-m)				Cortante Máxima VMax (Tn)			
	BL-23	Envolvente	Regresiones Múltiples	HL-93	BL-23	Envolvente	Regresiones Múltiples	HL-93
10	1	0.81	0.80	0.80	1	0.67	0.88	0.68
20	1	0.80	0.80	0.74	1	0.80	0.92	0.70
30	1	0.84	0.89	0.73	1	0.87	0.96	0.70
40	1	0.86	0.93	0.72	1	0.88	0.98	0.71
50	1	0.87	0.95	0.72	1	0.88	0.99	0.71
60	1	0.88	0.97	0.72	1	0.90	1.00	0.71

Fuente: Elaboración propia.

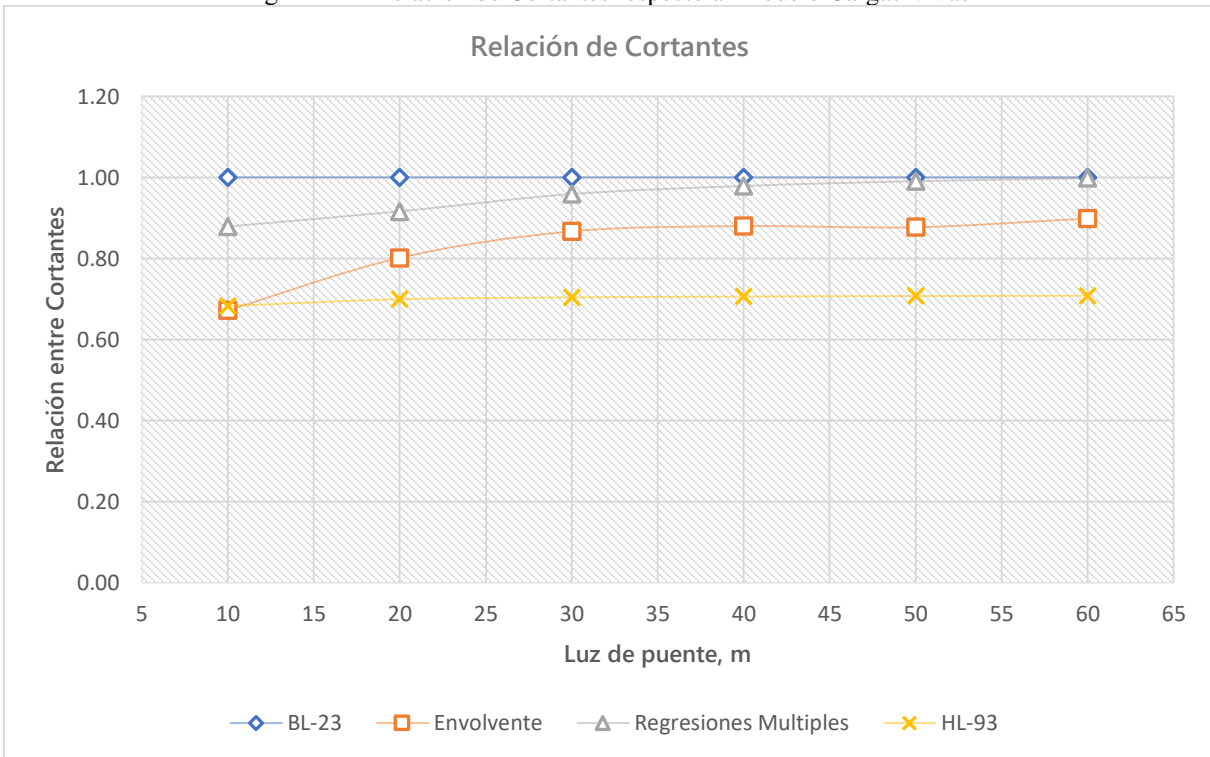
Además, se observa la diferencia respecto al modelo propuesto por la AASHTO, con variaciones en momentos entre el 20% y el 28% y en cortantes entre el 32% y el 29%. Es importante destacar que, a mayor longitud, existe una mayor diferencia entre el camión BL-23 y el HL-93 en cuanto a momentos y cortantes. Tras realizar este análisis, se puede concluir que el modelo propuesto es apto y válido para su aplicación en el diseño de puentes.

Figura 174: Relación de Momentos respecto al Modelo Cargas Vivas



Fuente: Elaboración propia.

Figura 175: Relación de Cortantes respecto al Modelo Cargas Vivas



Fuente: Elaboración propia.

4.11.2. Modelo de Cargas Vivas Completo

Con el objetivo de evaluar el modelo de cargas vivas vehiculares completo desarrollado a lo largo del trabajo, se aplicó dicho modelo a puentes de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 metros, idealizándolos como simplemente apoyados, y se compararon los elementos mecánicos producidos por los valores extremos en el caso más desfavorable.

Para ello, se llevaron a cabo comparaciones con los resultados obtenidos de puentes cargados con camiones de manera sucesiva, tal como se visualizó en el cálculo de la carga de carril. De esta sucesión aleatoria, se extrajeron momentos y cortantes máximos para su comparación. Esta situación, en la que se encontraron los elementos mecánicos máximos en función de la simulación estocástica, se denominó "Máximo Maximorum". Además, se comparó y verificó la validación final del modelo con el sistema de cargas vivas propuesto por la AASHTO LRFD (Camión HL-93). El modelo propuesto BL-23 y el modelo de la AASHTO HL-93 se aplicaron con su factor de carga respectivo (1.75).

Inicialmente, se determinaron los momentos y cortantes máximos generados por las cargas distribuidas de cada camión de diseño, el BL-23 propuesto en este proyecto y el HL-93 de la AASHTO, tal como se presenta en la Tabla 24.

Tabla 24: Elementos Mecánicos Máximos debidos a las cargas distribuidas

L (m)	Carril de Diseño			
	Momento Máximo M_{max} (Tn-m)		Cortante Máxima V_{Max} (Tn)	
	BL-23	HL-93	BL-23	HL-93
10	20.50	11.90	8.2	4.76
20	82.00	47.60	16.4	9.52
30	184.50	107.10	24.6	14.28
40	328.00	190.40	32.8	19.04
50	512.50	297.50	41	23.8
60	738.00	428.40	49.2	28.56

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos valores, se calcularon los elementos mecánicos máximos para cada modelo virtual aplicando un incremento de carga dinámica de 1.33 a los modelos de cargas concentradas y sumando los elementos mecánicos máximos debidos a las cargas uniformemente distribuidas. Luego, se multiplicaron los resultados por el factor de carga 1.75 en ambos casos, lo cual se puede resumir en las siguientes fórmulas:

$$M_{Max} = F_c \cdot ((1 + IM) \cdot M_c + M_w) \quad V_{Max} = F_c \cdot ((1 + IM) \cdot V_c + V_w)$$

$$M_{Max} = 1.75 \cdot (1.33 \cdot M_c + M_w) \quad V_{Max} = 1.75 \cdot (1.33 \cdot V_c + V_w)$$

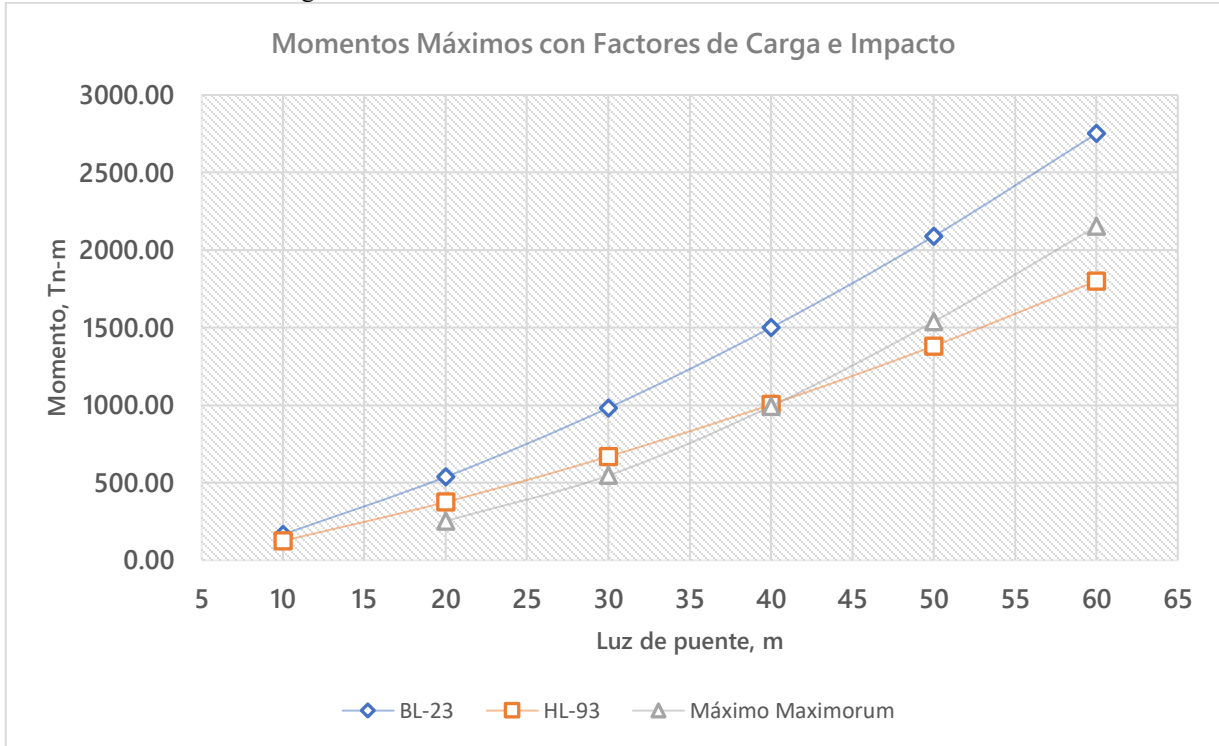
Los resultados de este análisis se encuentran en la Tabla 25, que contiene los valores graficados en las Figuras 176 y 177. En estas gráficas, se aprecia cómo el modelo propuesto (BL-23) supera al modelo máximo maximorum esperado y al modelo de la AASHTO (HL-93). A pesar de que el camión propuesto es mayor, se observa un comportamiento similar en las curvas tanto para cortantes como para momentos. Además, se constata que, para puentes cercanos a los 40 metros, el modelo de la AASHTO resulta insuficiente para los elementos mecánicos generados en Bolivia, lo que indica que el modelo propuesto (BL-23) es más adecuado para el contexto local.

Tabla 25: Elementos Mecánicos Máximos para Validar el Sistema de Cargas Vivas

Sistemas de Cargas Vivas						
Luz Puente	Momento Máximo M_{max} (Tn-m)			Cortante Máxima V_{Max} (Tn)		
L (m)	BL-23	HL-93	Máximo Maximorum	BL-23	HL-93	Máximo Maximorum
10	166.09	124.58	-	94.01	62.72	-
20	537.14	375.23	252.98	121.94	81.88	49.56
30	982.37	668.81	546.67	140.82	93.81	79.66
40	1499.97	1004.37	992.97	157.44	103.95	105.97
50	2089.55	1381.70	1538.00	173.15	113.36	117.81
60	2751.02	1800.74	2153.10	188.40	122.41	147.82

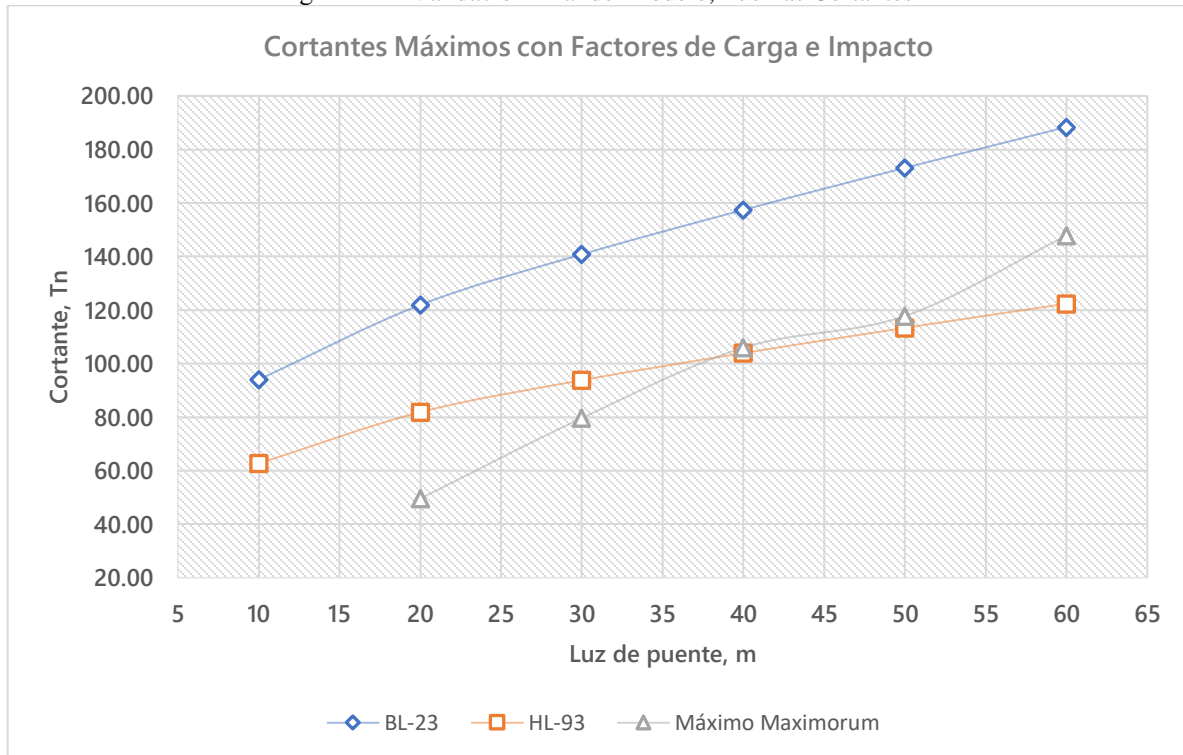
Fuente: Elaboración propia.

Figura 176: Validación final del modelo, Momentos Flectores



Fuente: Elaboración propia.

Figura 177: Validación final del modelo, Fuerzas Cortantes



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 26 presenta la relación entre los elementos mecánicos del modelo propuesto (BL-23), el modelo máximo maximorum y el modelo de la AASHTO LRFD (HL-93), que se refleja en las Figuras 178 y 179. Se observa que la variación entre el modelo propuesto y el de la AASHTO oscila entre el 25% y el 35% en momentos y entre el 33% y el 35% en cortantes, aumentando la diferencia a medida que crece la longitud del puente. En cuanto al modelo máximo maximorum, a partir de los 40 metros se aprecia una diferencia del 34% al 22% en momentos y del 33% al 22% en cortantes, mostrando una tendencia a reducirse conforme aumenta la longitud, tal como se observó en la validación del modelo de cargas concentradas.

Tabla 26: Relación de Elementos Mecánicos respecto al Modelo Cargas Vivas

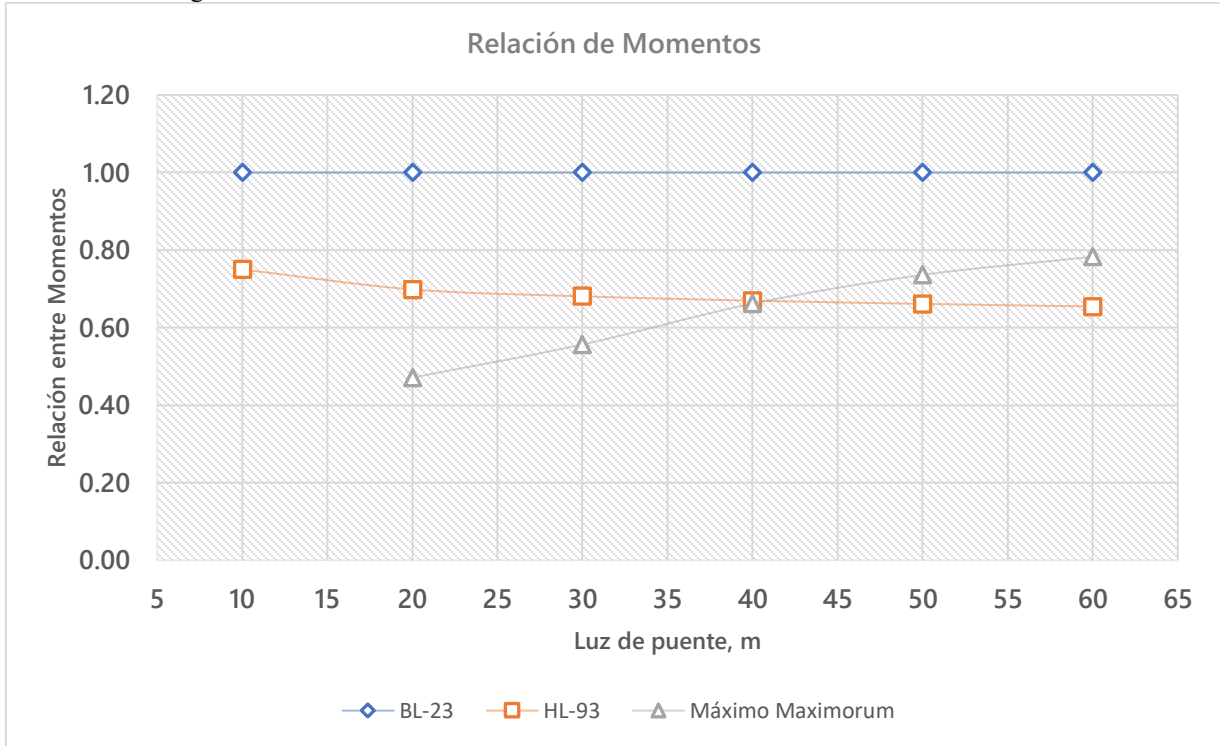
Sistemas de Cargas Vivas						
Luz Puente	Momento Máximo M_{max} (Tn-m)			Cortante Máxima V_{Max} (Tn)		
L (m)	BL-23	HL-93	Máximo Maximorum	BL-23	HL-93	Máximo Maximorum
10	1	0.75	-	1	0.67	-
20	1	0.70	0.47	1	0.67	0.41
30	1	0.68	0.56	1	0.67	0.57
40	1	0.67	0.66	1	0.66	0.67
50	1	0.66	0.74	1	0.65	0.68
60	1	0.65	0.78	1	0.65	0.78

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados demuestran una relación coherente entre los datos, considerando que el modelo propuesto BL-23 fue desarrollado para un período de diseño de 50 años, lo que garantiza seguridad y confiabilidad en el diseño estructural de puentes. Por lo tanto, se puede validar el modelo propuesto en este proyecto para su uso en el cálculo estructural de puentes.

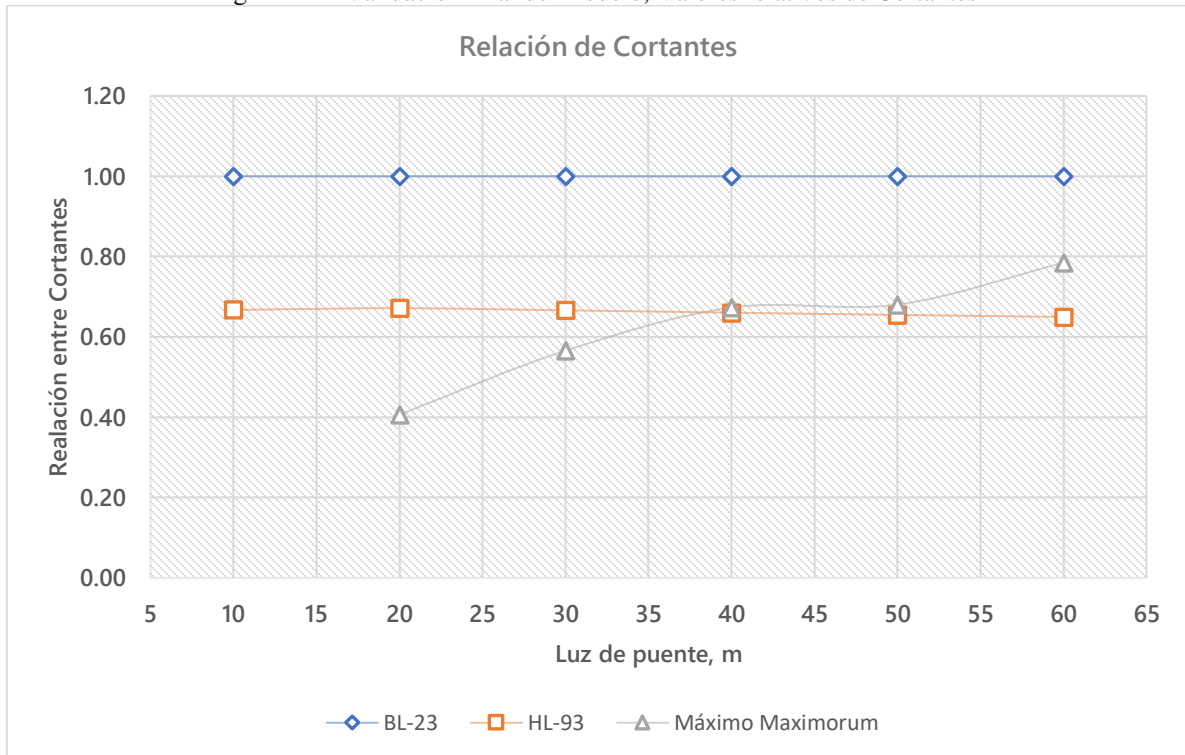
Como aporte adicional, es relevante destacar que la adaptación de modelos de cargas vivas a las condiciones locales y a los vehículos que transitan en la región específica es fundamental para asegurar la seguridad y durabilidad de las estructuras de puentes. Al validar el modelo propuesto en comparación con los modelos existentes, como el de la AASHTO, se demuestra la importancia de tomar en cuenta las características regionales y las tendencias en el transporte para un diseño estructural más adecuado y eficiente.

Figura 178: Validación final del modelo, Valores relativos de Momentos Flectores



Fuente: Elaboración propia.

Figura 179: Validación final del modelo, Valores relativos de Cortantes



Fuente: Elaboración propia.

4.12. Factores de Carga Viva, Presencia Múltiple de Cargas Vivas, Efecto dinámico de la Carga Viva Vehicular.

En este capítulo se abordan aspectos fundamentales para el diseño de puentes, como son los factores de carga viva, la presencia de múltiples sobrecargas y el efecto dinámico de la carga viva vehicular. Se presenta una introducción a estos temas y cómo se relacionan con el reglamento AASHTO LRFD para el diseño estructural de puentes.

4.12.1. Factores de carga viva

Dado que en el reglamento vigente de la AASHTO LRFD para el diseño estructural de puentes se vierten una gran experiencia y una serie de resultados experimentales, se propone seguir utilizando la normativa General que en él se establece, cambiando el modelo de cargas vivas por el desarrollado en este trabajo, debido a que los factores de carga para el diseño y otros valores son muy similares no se realizará modificaciones a los factores de carga para diseño, servicio y fatiga que propone esta norma.

Es por eso que en la Tabla 27 se muestra los factores de carga que propone la AASHTO en función de los diferentes estados límite:

Tabla 27: Factores de Carga (Tabla 3.4.1-1, AASHTO LRFD 2017)

Combinación de Carga	Factor de Carga Viva (LL, IM, CE, BR, PL, LS)
Strength I o Resistencia I	1.75
Strength II o Resistencia II	1.35
Strength V o Resistencia V	1.35
Extreme Event II o Evento extremo II	0.5
Service I o Servicio I	1
Service I o Servicio II	1.3
Fatigue I o Fatiga I	1.75
Fatigue II o Fatiga II	1.75

Fuente: Elaboración propia.

La tabla completa se la puede encontrar en la tabla 3.4.1-1 de la AASHTO LRFD 2017. Estos factores se aplican todas las cargas vivas y fuerzas generadas a partir de estas que son las siguientes:

BR = fuerza de frenado de los vehículos

CE = fuerza centrífuga de los vehículos

IM = incremento por carga vehicular dinámica

LL = sobrecarga vehicular

LS = sobrecarga de la carga viva

PL = sobrecarga peatonal

4.12.2. Presencia de Múltiples Sobrecargas

En el diseño de puentes, es crucial tener en cuenta la presencia de múltiples sobrecargas y cómo estas interactúan entre sí. Esto incluye la consideración de posibles combinaciones de carriles cargados y su efecto en la estructura.

La solicitación extrema correspondiente a sobrecargas se determinará considerando las posibles combinaciones de carriles cargados, multiplicando por un factor de presencia múltiple. No es aplicable al estado límite de fatiga. En la tabla 28 se puede observar los valores de factor de presencia.

Tabla 28: Factor de presencia múltiple (Tabla 3.6.1.1.2-1, AASHTO LRFD 2017)

Número de carriles cargados	Factor de presencia múltiple, m
1	1.2
2	1
3	0.85
>3	0.65

Fuente: Elaboración propia.

No es aplicable para el estado de Fatiga, para el cual se utiliza la carga de fatiga sin importar el número de carriles. Los factores de distribución de los Art. 4.6.2.2 y 4.6.2.3 (excepto cuando se utiliza el método estático) se deberán dividir por 1.20 Las cargas peatonales se pueden considerar como un carril cargado.

4.12.3. Incremento por Carga Dinámica: IM

El efecto dinámico de la carga viva vehicular es un factor clave a considerar en el diseño de puentes. Este efecto puede causar variaciones significativas en las fuerzas y momentos experimentados por la estructura en comparación con las cargas estáticas.

Los efectos estáticos del camión o tándem de diseño, a excepción de las fuerzas centrífugas y de frenado, se deberán mayorar en los siguientes porcentajes mostrados en la Tabla 29:

Tabla 29: Factor de incremento por carga dinámica IM (Tabla 3.6.2.1.-1, AASHTO LRFD 2017)

Componente	IM
Juntas del tablero – Todos los Estados Límites	75%
Todos los demás componentes	
Estado Límite de fatiga y fractura	15%
Todos los demás Estados Límites	33%

Fuente: Elaboración propia.

Algo importante mencionado en la norma es que no se aplica a cargas peatonales ni a cargas de carril de diseño. Tampoco en muros de sostenimiento no solicitados por reacciones verticales de la superestructura ni en componentes de fundaciones que estén completamente por debajo del nivel del terreno.

En caso de componentes enterrados, como en el caso de alcantarillas, el porcentaje se deberá tomar como:

$$IM = 33(1.0 - 0.41 \cdot D_E) \geq 0\% \quad (3.6.2.2-1, \text{AASHTO LRFD})$$

Siendo D_E = profundidad mínima de la cubierta de tierra sobre la estructura (m).

Al no modificar nada en esta sección, se recomienda para un mejor diseño y también para que se pueda ver a más detalle la información el capítulo 3.6 de la AASHTO LRFD 2017. Este capítulo proporciona información detallada sobre los factores de carga viva, la presencia de múltiples sobrecargas y el efecto dinámico de la carga viva vehicular, que son fundamentales para el diseño estructural de puentes de acuerdo con el reglamento AASHTO LRFD.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

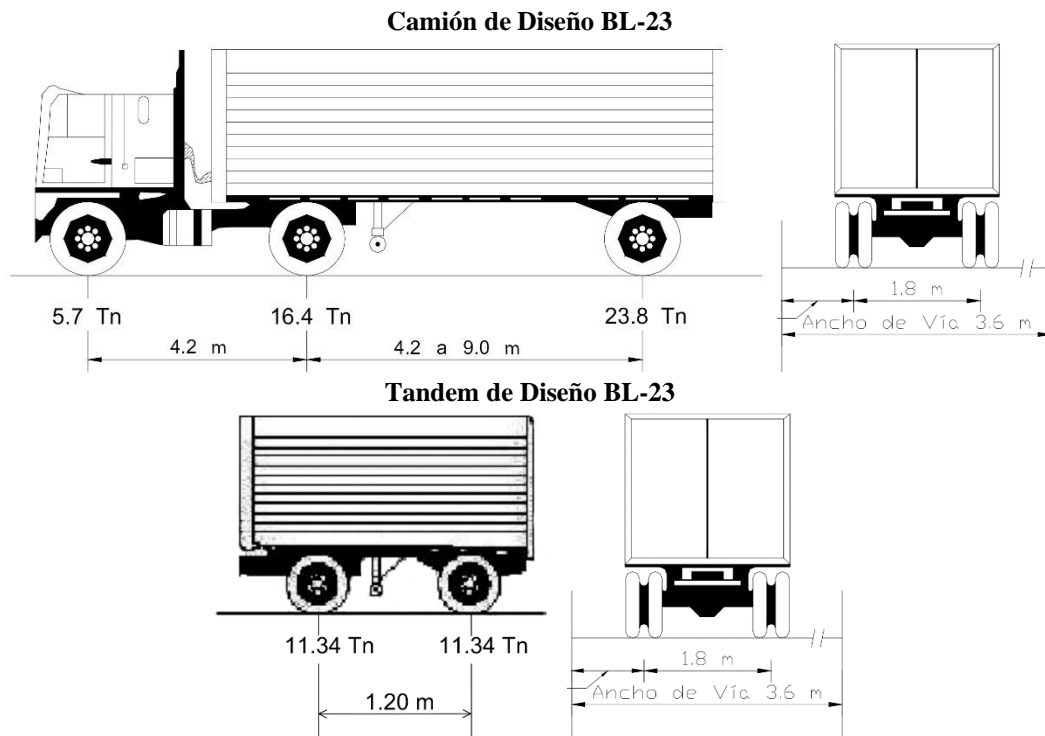
5.1. Conclusiones

5.1.1. Conclusión en relación con el objetivo general

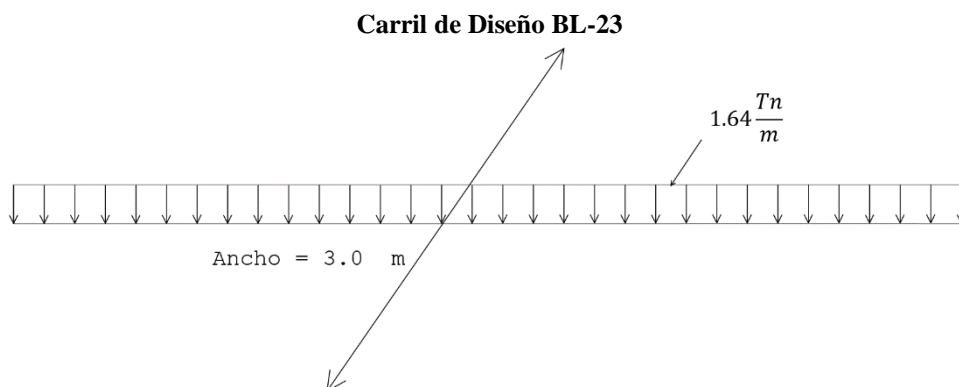
El objetivo general del presente proyecto fue definir un modelo de cargas vivas vehiculares para el diseño estructural de puentes en Bolivia. A través del análisis exhaustivo del tráfico local, las características de los vehículos de carga y la normativa vigente, se ha logrado desarrollar un modelo de cargas vivas (BL-23) adaptado a las condiciones específicas del país.

El modelo propuesto (BL-23) se basa en datos estadísticos y en la observación de las características de los vehículos de carga en Bolivia, lo que garantiza una mayor precisión y fiabilidad en el diseño estructural de puentes. Además, se ha demostrado que el modelo de cargas vivas propuesto es más adecuado que el modelo estándar de la AASHTO (HL-93) para el contexto boliviano, ya que produce momentos flectores y fuerzas cortantes superiores. El Modelo de Cargas Vivas Vehiculares BL-23 se conforma de la siguiente manera:

1. Sistema de cargas concentradas nominales



2. Carga uniformemente distribuida



Por lo tanto, se puede concluir que se ha alcanzado el objetivo general del proyecto al definir y desarrollar exitosamente un modelo de cargas vivas vehiculares (BL-23) específico para el diseño estructural de puentes en Bolivia, lo que contribuye a mejorar la seguridad y la eficiencia en la construcción de infraestructuras en el país.

5.1.2. Conclusión en relación con la hipótesis

La hipótesis planteada en este proyecto sugiere que un modelo de cargas vivas vehiculares que tenga en cuenta los pesos que regularmente transportan los grandes vehículos de carga en Bolivia permitiría obtener momentos flectores y fuerzas cortantes superiores a los que se producen aplicando el modelo de la AASHTO LRFD.

A lo largo del proyecto, se ha demostrado que el modelo de cargas vivas propuesto (BL-23) es más adecuado para las condiciones específicas de Bolivia en comparación con el modelo estándar de la AASHTO (HL-93), ya que considera las características locales de tráfico y carga. Los resultados obtenidos en el análisis de los momentos y cortantes máximos indican una variación entre el modelo propuesto (BL-23) y el modelo de la AASHTO (HL-93) que oscila entre el 25% y el 35%, aumentando con la longitud del puente.

Por lo tanto, se puede concluir que la hipótesis planteada en el proyecto se ha confirmado, ya que el uso del modelo de cargas vivas propuesto (BL-23) para el diseño de puentes en Bolivia permite obtener momentos flectores y fuerzas cortantes superiores a los que se producen aplicando el modelo de la AASHTO LRFD, garantizando así un diseño estructural más seguro y confiable.

5.2. Recomendaciones

En vista de las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto, se sugieren las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y prácticas de diseño en el campo de la ingeniería estructural y de puentes en particular:

1. Adoptar el modelo de cargas vivas propuesto (BL-23) para el diseño de puentes en Bolivia, ya que se ha demostrado ser más adecuado que el modelo de la AASHTO (HL-93) en el contexto local.
2. Continuar utilizando los factores de carga viva, presencia de múltiples sobrecargas y el efecto dinámico de la carga viva vehicular establecidos en el reglamento AASHTO LRFD en combinación con el modelo de cargas vivas propuesto (BL-23).
3. Realizar investigaciones adicionales en el campo de la ingeniería estructural, centrándose en áreas específicas donde se puedan mejorar los modelos y métodos de diseño existentes. Esto incluye, por ejemplo, la consideración de factores ambientales y climáticos en el diseño de puentes y la investigación de nuevos materiales y técnicas de construcción que puedan mejorar la seguridad y durabilidad de las estructuras de puentes.
4. Promover la capacitación y actualización de los profesionales en el campo de la ingeniería estructural para que puedan aplicar de manera efectiva los modelos y métodos de diseño propuestos en este proyecto en sus futuras prácticas profesionales. Esto incluye la realización de talleres, seminarios y cursos de formación en el uso del modelo de cargas vivas propuesto (BL-23) y los reglamentos AASHTO LRFD en el diseño de puentes en Bolivia.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2004). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.
- American Psychological Association. (2019). *American Psychological Association: APA Online; Psychology Online* (7a ed.). APA.
- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles. (2019, julio). Reglamento CIRSOC 801. En *Reglamento Argentino para el Diseño de Puentes Carreteros*. INTI.
- Gaceta Oficial de Bolivia. (2013, 25 noviembre). *Ley N°441. Ley de Control de Pesos y Dimensiones Vehiculares en la Red Vial Fundamental*.
- Mccormac, J. (s. f.). *Análisis de estructuras - métodos clásico y matricial - 4a ed.* (1.^a ed.). Alfaomega Grupo Editor.
- Ministerio de Transporte & Instituto Nacional de Vías. (2013). *Norma Colombiana de Diseño de Puentes - LRFD - CCP 14*.
- Rascón C., O. A. & Instituto Mexicano del Transporte. (1999). *Modelo de cargas vivas vehiculares para diseño estructural de puentes en México*. Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Rascón C., Octavio A. (2004). *Norma SCT de Cargas Vehiculares para Diseño Estructural de Puentes Carreteros*.
- Sampieri, R. H., Fernández C., C. & Baptista L., M. P. (2014). *Metodología De La Investigación* (6ta ed.). McGraw-Hill.
- U.S. Department of Transportation. (2015, mayo). *Compilation of Existing State Truck Size and Weight Limit Laws*.

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. & Keying Ye. (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias* (9na ed.). Pearson Educación.

ANEXOS

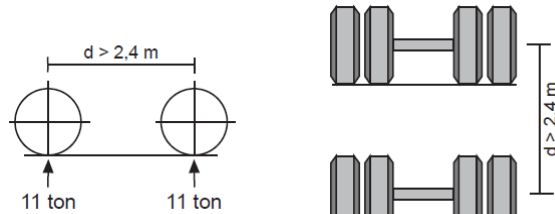
ANEXO I

(ANEXO I-II-III DE LA LEY N°441
“LEY DE CONTROL DE PESOS Y
DIMENSIONES VEHICULARES EN
LA RED VIAL FUNDAMENTAL”)

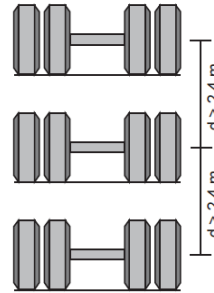
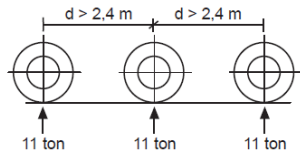
ANEXO I

DISTANCIA ENTRE EJES VEHICULARES

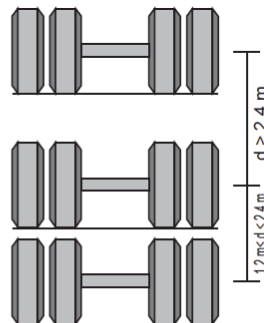
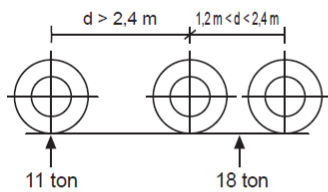
Se considerará como grupo de ejes a aquellos cuyas distancias entre ejes sean menores a 2,4 metros:



DOS EJES SIMPLES DISTANCIADOS
Rodado doble, más rodado doble
distanziado a más de 2,4 m. c/u
(1RD + 1RD)



TRES EJES SIMPLES DISTANCIADOS
Rodado doble, más rodado doble, más rodado
doble, distanziado a mas de 2,4 m c/u
(1RD + 1RD + 1RD)






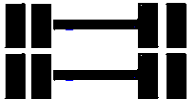

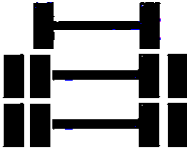
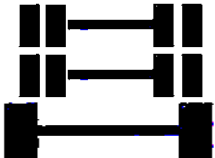
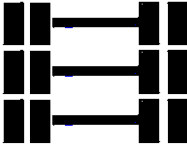
TRES EJES SIMPLES DISTANCIADOS
2 rodado doble, mas 1 rodado doble distanziado
a mas de 2,4 m (2RD + 1RD)

ANEXO II

**PESOS MÁXIMOS PERMITIDOS POR EJES Y GRUPOS DE EJES
Y TOLERANCIAS DEL SISTEMA DE PESAJE EN LA MEDICIÓN DE EJES Y
GRUPOS DE EJES VEHICULARES**

El peso para eje o grupo de ejes establecido en la tabla, se refiere al peso del eje o grupo de ejes más todo tipo de carga transmitida a la superficie de la carretera:

EJES	TIPOS DE CONFIGURACIONES DE EJES Y GRUPOS DE EJES VEHICULARES	PESO MÁXIMO PERMITIDO (TONELADAS)	TOLERANCIA DEL SISTEMA DE PESAJE EN LA MEDICIÓN DE EJES Y GRUPO DE EJES (TONELADAS) EXCENTA DE MULTA*
	Eje sencillo (direccional o fijo) de 2 llantas	7,00	0,35
	Eje sencillo de 2 llantas con cubierta extra ancha y suspensión neumática	7,70	0,39
	Eje tipo tándem de 4 llantas	10,00	0,50
	Eje sencillo de cuatro llantas	11,00	0,55
	Eje tipo tándem de 4 llantas con cubierta extra ancha y suspensión neumática	12,00	0,60
	Eje tipo tándem de 6 llantas	14,00	0,70
	Eje tipo tándem de 6 llantas con un eje con cubiertas extra anchas y suspensión neumática	16,00	0,80
	Eje tipo trídem de 6 llantas	17,00	0,85

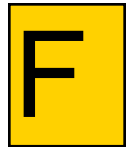
EJES	TIPOS DE CONFIGURACIONES DE EJES Y GRUPOS DE EJES VEHICULARES	PESO MÁXIMO PERMITIDO (TONELADAS)	TOLERANCIA DEL SISTEMA DE PESAJE EN LA MEDICIÓN DE EJES Y GRUPO DE EJES (TONELADAS) EXCENTA DE MULTA*
			
	Eje tipo tándem de 8 llantas	18,00	0,90
	Eje tipo trídem de 6 llantas con cubierta extra ancha y suspensión neumática	18,00	0,90
	Eje tipo trídem de 10 llantas	21,00	1,05
	Eje tipo trídem de 10 llantas con un eje con cubiertas extra anchas y suspensión neumática	22,00	1,10
	Eje tipo trídem de 12 llantas	25,00	1,25

*Estas tolerancias del sistema de pesaje, no implican de ningún modo una capacidad adicional de carga a la indicada en el Artículo 8, ni eximen al conductor del vehículo de la obligación de re-estibar o trasladar la sobrecarga a otro vehículo hasta estar dentro del peso máximo permitido, caso contrario no podrá circular en la Red Vial Fundamental.




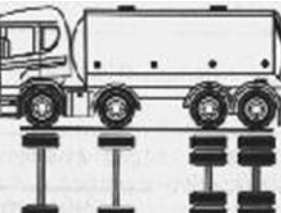
ANEXO III

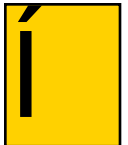
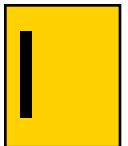
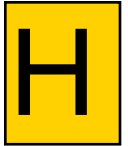
PESOS Y DIMENSIONES VEHICULARES PERMITIDAS SEGÚN CONFIGURACIÓN VEHICULAR

Configuraciones vehiculares	N° de Ejes / llantas	Long. Máx. Metros	Pesos brutos máximos permitidos por eje o grupo de ejes					Peso bruto total permitido
			Eje delantero	Ejes traseros				
			Eje 1	Eje 2	Eje 3	Eje 4	Eje 5	
CAMIONES								
	1RS-1RS	12,00	7	7				14
	1RS-1RS-1RS	12,50	7	7	7			21

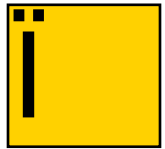


GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	1RS-1RD	12,00	7	11				18
	1RS-1RD1RS	12,50	7	14				21
	1RS-2RD	12,50	7	18				25
	1RS-1RS-2RD	12,50	7	7	18			32



	1RS-2RD1RS	12,50	7	21				28
	1RS-3RD	12,50	7	25				32
	2RS-2RD	12,50	10	18				28
CAMIONES CON REMOLQUE								

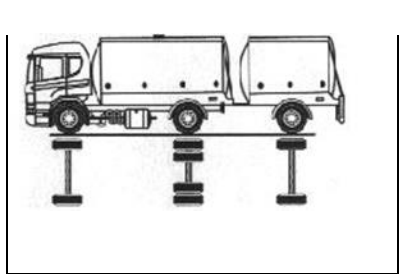
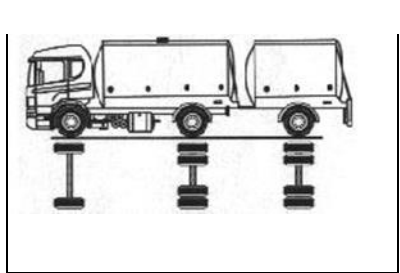
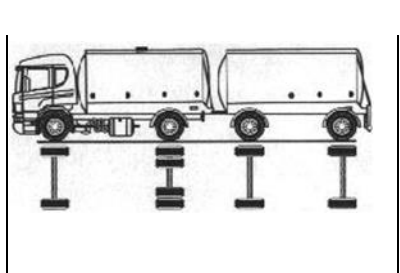
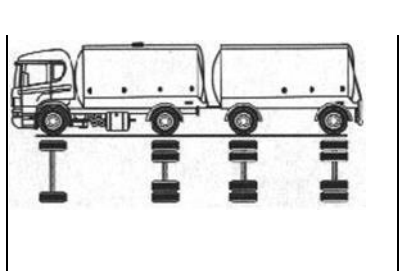


GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	1RS-1RS 1RS	20,50	7	7	7			21
	1RS-1RS 1RD	20,50	7	7	11			25
	1RS-1RS- 1RS 1RS	20,50	7	7	7	7		28
	1RS-1RS- 1RS 1RD	20,50	7	7	7	11		32

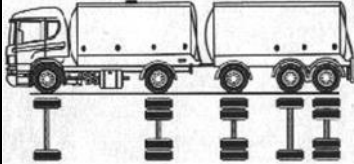
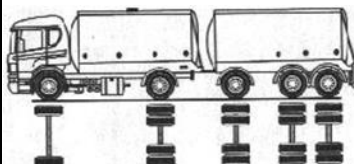
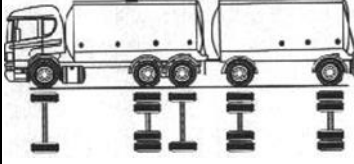
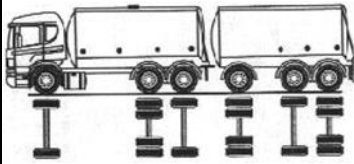


GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	1RS-1RD 1RS	20,50	7	11	7			25
	1RS-1RD 1RD	20,50	7	11	11			29
	1RS-1RD 1RS-1RS	20,50	7	11	7	7		32
	1RS-1RD 1RD-1RD	20,50	7	11	11	11		40

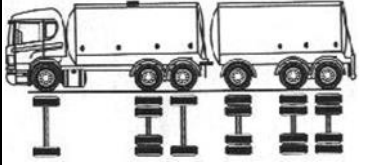
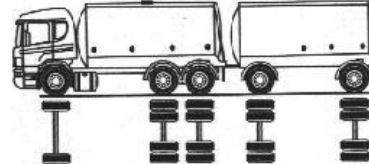
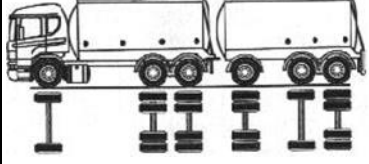
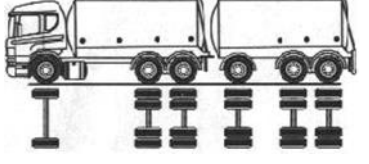


GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	1RS-1RD 1RD- 1RS1RD	20,50	7	11	11	14		43
	1RS-1RD 1RD-2RD	20,50	7	11	11	18		45
	1RS-1RD1RS 1RD-1RD	20,50	7	14	11	11		43
	1RS-1RD1RS 1RD- 1RS1RD	20,50	7	14	11	14		45



GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	1RS-1RD1RS 1RD-2RD	20,50	7	14	11	18		45
	1RS-2RD 1RD-1RD	20,50	7	18	11	11		45
	1RS-2RD 1RD- 1RS1RD	20,50	7	18	11	14		45
	1RS-2RD 1RD-2RD	20,50	7	18	11	18		45

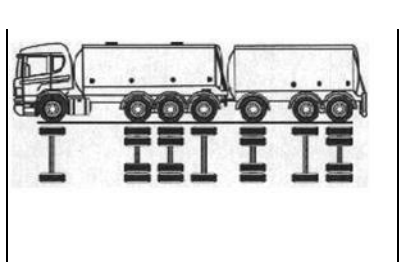
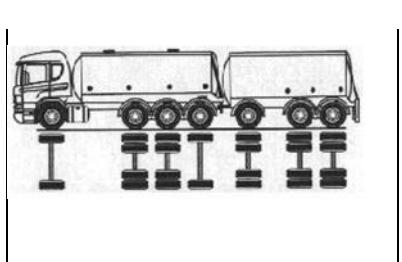
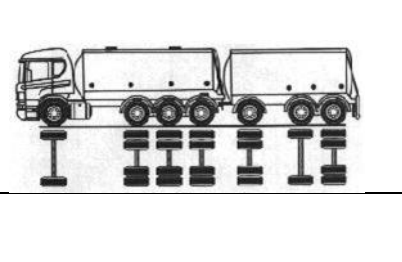


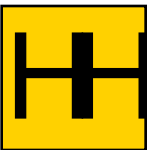
GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	2RS-2RD 1RD-1RD	20,50	10	18	11	11		45
	2RS-2RD 1RD-1RS 1RD	20,50	10	18	11	14		45
	2RS-2RD 1RD-2RD	20,50	10	18	11	18		45
	1RS-2RD 1RS 1RD-1RD	20,50	7	21	11	11		45



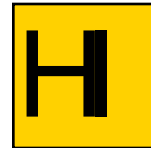
GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	1RS-2RD1RS 1RD- 1RS1RD	20,50	7	21	11	14	45
	1RS-2RD1RS 1RD-2RD	20,50	7	21	11	18	45
	1RS-3RD 1RD-1RD	20,50	7	25	11	11	45
	1RS-3RD 1RD- 1RS1RD	20,50	7	25	11	14	45

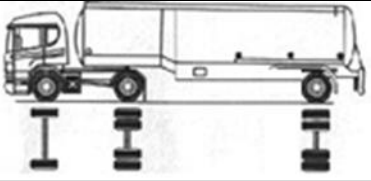
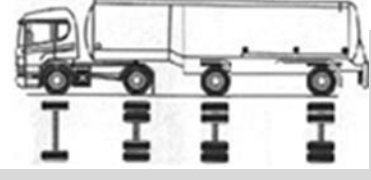
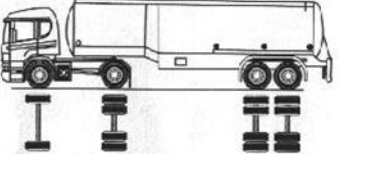
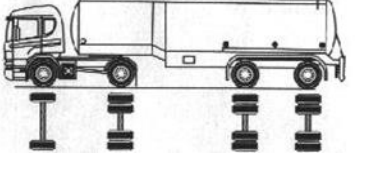


GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	<p>1RS-3RD 1RD-2RD</p>	<p>20,50</p>	<p>7</p>	<p>25</p>	<p>11</p>	<p>18</p>		<p>45</p>
	<p>2RS-2RD 1RD-1RD</p>	<p>20,50</p>	<p>10</p>	<p>18</p>	<p>11</p>	<p>11</p>		<p>45</p>
	<p>2RS-2RD 1RD-1RS 1RD</p>	<p>20,50</p>	<p>10</p>	<p>18</p>	<p>11</p>	<p>14</p>		<p>45</p>
	<p>2RS-2RD 1RD-2RD</p>	<p>20,50</p>	<p>10</p>	<p>18</p>	<p>11</p>	<p>14</p>		<p>45</p>
<p align="center">TRACTO CAMIONES CON SEMIRREMOLQUE</p>								



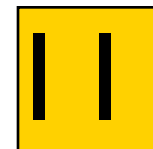
GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	1RS-1RD-1RD	18,60	7	11	11			29
	1RS-1RD-1RD-1RD	18,60	7	11	11	11		40
	1RS-1RD-2RD	18,60	7	11	18			36
	1RS-1RD-1RD-1RD	18,60	7	11	11	11		40

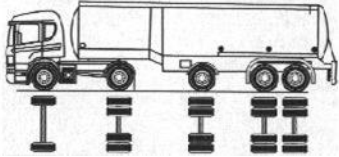
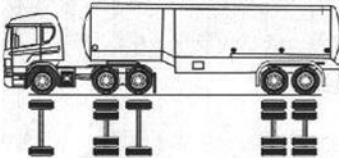
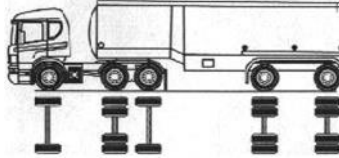


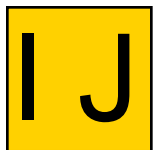
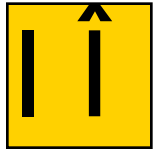
GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	1RS-1RD-3RS	18,60	7	11	17			35
	1RS-1RD 1RS2RD	18,60	7	11	21			39
	1RS-1RD 3RD	18,60	7	11	25			43
	1RS-1RD-1RS-2RD	18,60	7	11	7	18		43

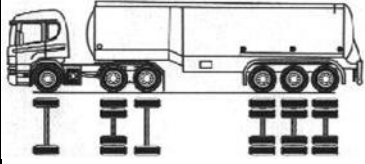
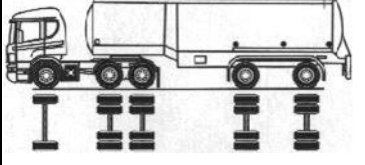


GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	<p>1RS-1RD 1RD-2RD</p>	<p>18,60</p>	<p>7</p>	<p>11</p>	<p>11</p>	<p>18</p>		<p>45</p>
	<p>1RS-1RD1RS 2RD</p>	<p>18,60</p>	<p>7</p>	<p>14</p>	<p>18</p>			<p>39</p>
	<p>1RS-1RD1RS 1RD-1RD</p>	<p>18,60</p>	<p>7</p>	<p>14</p>	<p>11</p>	<p>11</p>		<p>43</p>
	<p>1RS-1RD1RS 1RS2RD</p>	<p>18,60</p>	<p>7</p>	<p>14</p>	<p>21</p>			<p>42</p>



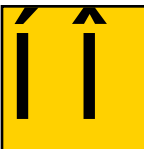
GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	1RS-1RD1RS 3RD	18,60	7	14	25			45
	1RS-1RD1RS 1RD-2RD	18,60	7	14	11	18		45
	1RS-2RD 2RD	18,60	7	18	18			43
	1RS-2RD 1RD-1RD	18,60	7	18	11	11		45

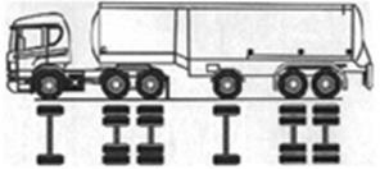
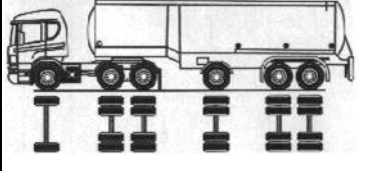
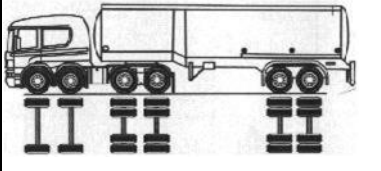
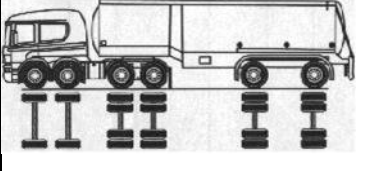


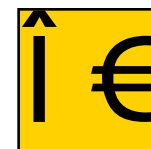
GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	<p>1RS-2RD-3RS</p>	<p>18,60</p>	<p>7</p>	<p>18</p>	<p>17</p>			<p>42</p>
	<p>1RS-1RD1RS-3RS</p>	<p>18,60</p>	<p>7</p>	<p>14</p>	<p>17</p>			<p>38</p>
	<p>1RS-2RD 1RS2RD</p>	<p>18,60</p>	<p>7</p>	<p>18</p>	<p>21</p>			<p>45</p>
	<p>1RS-2RD 3RD</p>	<p>18,60</p>	<p>7</p>	<p>18</p>	<p>25</p>			<p>45</p>



GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

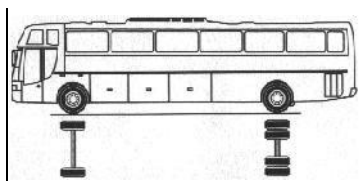
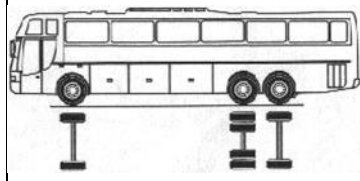
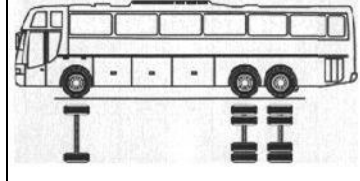
	1RS-2RD- 1RS-2RD	18,60	7	18	7	18		45
	1RS-2RD 1RD-2RD	18,60	7	18	11	18		45
	2RS-2RD 2RD	18,60	10	18	18			45
	2RS-2RD 1RD-1RD	18,60	10	18	11	11		45

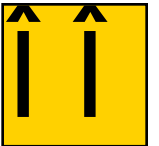


GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	2RS-2RD 1RS2RD	18,60	10	18	21			45
	2RS-2RD 3RD	18,60	10	18	25			45
	2RS-2RD 1RD-2RD	18,60	10	18	11	18		45

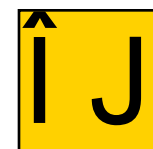
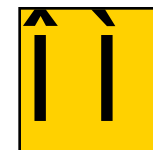


BUSES							
	1RS-1RD	14,00	7	11			18
	1RS-1RD1RS	14,00	7	14			21
	1RS-2RD	14,00	7	18			25



GACETA OFICIAL DE BOLIVIA

	2RS-1RD1RS	14,00	10	14				24
	2RS-2RD	14,00	10	18				28



ANEXO II
(ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN
ANUAL DE VEHÍCULOS PESADOS)

ANEXOS II (Análisis de la evolución anual de vehículos pesados)

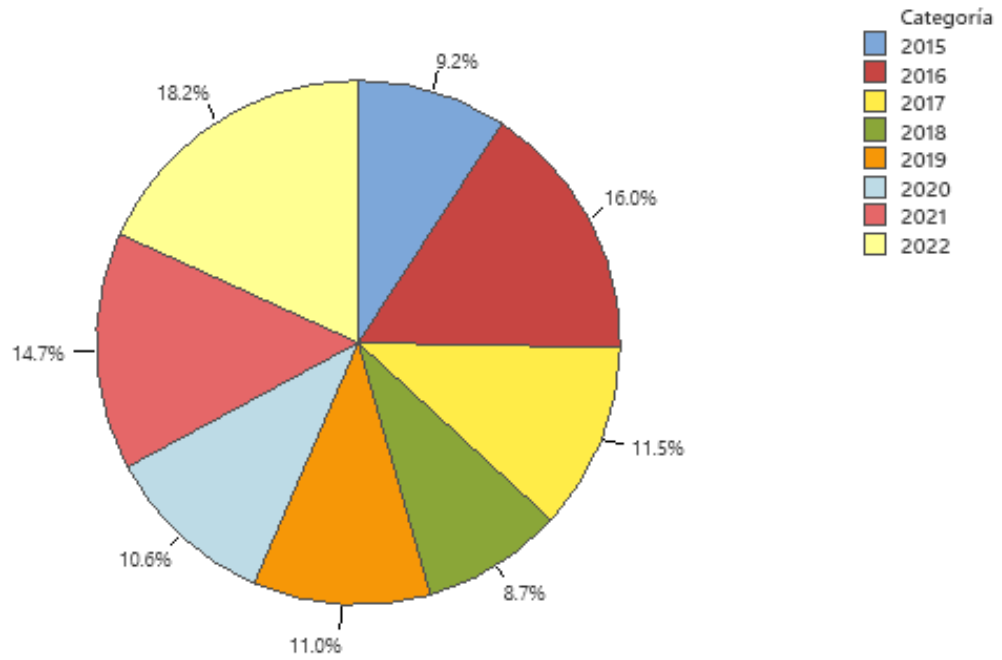
El análisis de las gráficas realizadas con base en los datos recopilados por Vías Bolivia muestra una perspectiva detallada de la distribución del tráfico vehicular en el país. A simple vista, se observa un crecimiento continuo en el tráfico año tras año. Al examinar la distribución del tráfico según las configuraciones de los vehículos, es evidente que, en los últimos años, los vehículos pesados representan una proporción cada vez mayor del tráfico total.

Esta tendencia subraya la importancia de analizar y monitorear la evolución de estos datos para generar modelos de distribución probabilística que se ajusten y aproximen a las condiciones futuras del tráfico vehicular en Bolivia. Al observar las gráficas por configuración vehicular, se aprecia que, en 2022, las configuraciones más pesadas predominan en el tráfico. Esto indica un cambio en las preferencias y necesidades de transporte en el país.

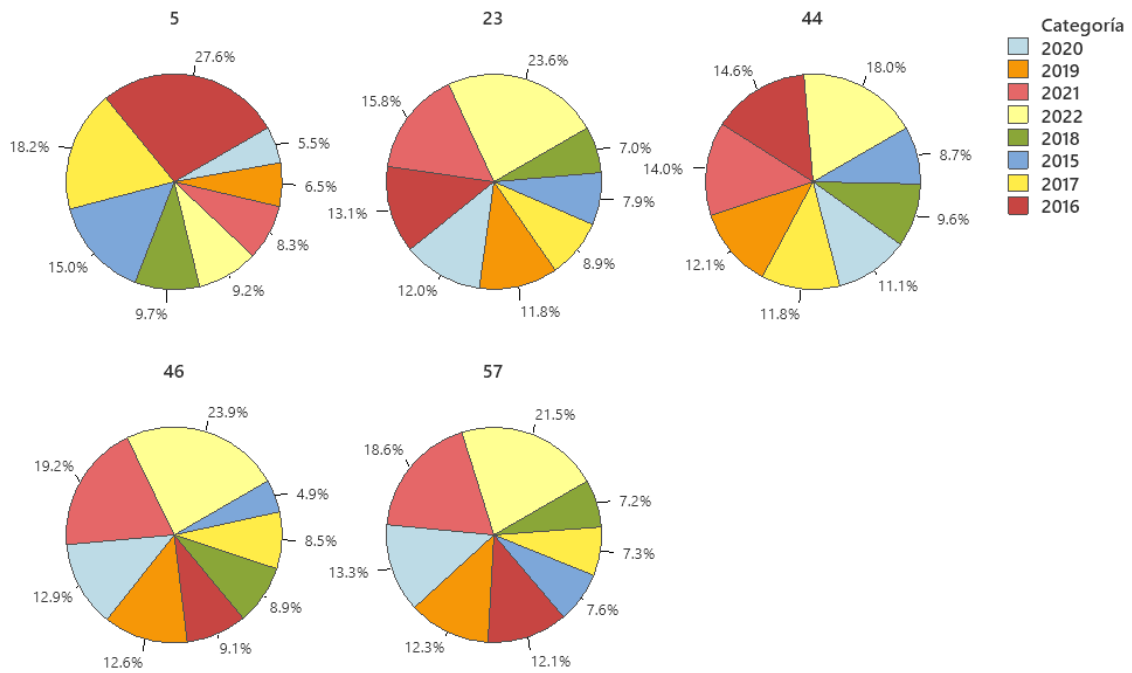
Por otro lado, si bien los vehículos pequeños eran populares en 2016, el análisis de las gráficas muestra que, con el paso de los años, la tendencia ha sido adquirir vehículos cada vez más grandes. Este cambio puede deberse a diversos factores, como el aumento en la demanda de transporte de mercancías, el crecimiento económico y la expansión de la infraestructura vial.

En consecuencia, es fundamental que los modelos de distribución y las proyecciones futuras del tráfico vehicular en Bolivia tengan en cuenta estas tendencias y cambios en las configuraciones de los vehículos. Esto permitirá a los planificadores, ingenieros y responsables de políticas anticiparse a las necesidades futuras de infraestructura y desarrollar estrategias adecuadas para garantizar la seguridad y la eficiencia en el sistema de transporte del país.

Distribución del Tráfico Vehicular Anual desde 2015 hasta 2022

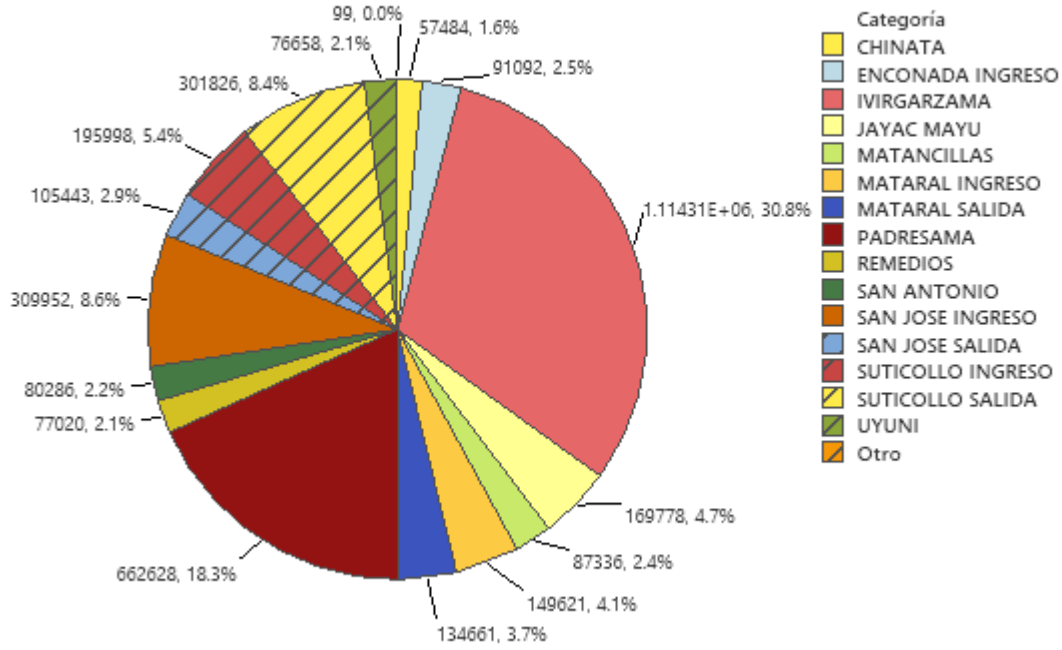


Distribución del Tráfico Vehicular Anual por Configuración

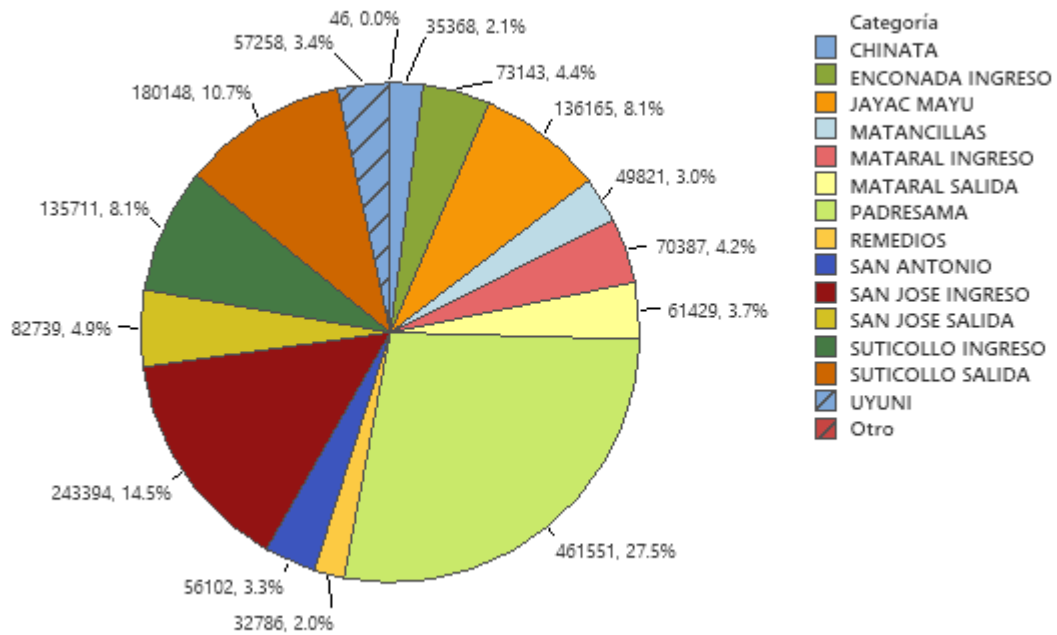


ANEXO III
(ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN
DE VEHÍCULOS PESADOS POR
ESTACIÓN DE PESAJE)

Distribución del Tráfico Vehicular Total por Estaciones de Pesaje



Distribución del Tráfico Vehicular Total por Estaciones de Pesaje (Depurado)



ANEXO IV
(PLANILLAS DE CÁLCULO DE
MOMENTOS Y CORTANTES)

Camión HL-93

Eje 1 (Tn)	3.63
d1 (m)	4.27
Eje 2 (Tn)	14.52
d2 (m)	4.27
Eje 3 (Tn)	14.52
R (Tn)	32.67
e (m)	1.423

Tandem HL-93

Eje 1 (Tn)	11.34
d1 (m)	1.2
Eje 2 (Tn)	11.34
R (Tn)	22.68
e (m)	0.6

Luz (m)	X _{C.Diseño} (m)	M _{C.Diseño}	V _{C.Diseño}	X _{Tandem} (m)	M _{Tandem}	V _{Tandem}	M _{Max}	V _{Max}
1	0.50	3.63	14.52	0.50	2.84	9.07	3.63	14.52
2	1.00	7.26	14.52	1.00	4.54	15.88	7.26	15.88
3	1.50	10.89	8.37	1.50	10.21	18.14	10.89	18.14
4	1.29	14.52	9.42	1.70	16.39	19.28	16.39	19.28
5	1.79	5.40	14.07	2.20	21.95	19.96	21.95	19.96
6	2.29	13.01	17.17	2.70	27.56	20.41	27.56	20.41
7	2.79	20.79	19.38	3.20	33.18	20.74	33.18	20.74
8	3.29	28.66	21.04	3.70	38.81	20.98	38.81	21.04
9	3.79	36.60	22.34	4.20	44.45	21.17	44.45	22.34
10	4.29	44.58	23.37	4.70	50.10	21.32	50.10	23.37
11	4.79	52.60	24.22	5.20	55.75	21.44	55.75	24.22
12	5.29	60.64	24.92	5.70	61.41	21.55	61.41	24.92
13	5.79	68.70	25.52	6.20	67.06	21.63	68.70	25.52
14	6.29	76.78	26.03	6.70	72.72	21.71	76.78	26.03
15	6.79	84.87	26.47	7.20	78.38	21.77	84.87	26.47
16	7.29	92.96	26.86	7.70	84.04	21.83	92.96	26.86
17	7.79	101.07	27.20	8.20	89.71	21.88	101.07	27.20
18	8.29	109.18	27.50	8.70	95.37	21.92	109.18	27.50
19	8.79	117.30	27.78	9.20	101.03	21.96	117.30	27.78
20	9.29	125.43	28.02	9.70	106.70	22.00	125.43	28.02
21	9.79	133.56	28.24	10.20	112.36	22.03	133.56	28.24
22	10.29	141.69	28.44	10.70	118.03	22.06	141.69	28.44
23	10.79	149.82	28.63	11.20	123.69	22.09	149.82	28.63
24	11.29	157.96	28.79	11.70	129.36	22.11	157.96	28.79
25	11.79	166.10	28.95	12.20	135.03	22.14	166.10	28.95
26	12.29	174.24	29.09	12.70	140.69	22.16	174.24	29.09
10	4.29	44.58	23.37	4.70	50.10	21.32	50.10	23.37
20	9.29	125.43	28.02	9.70	106.70	22.00	125.43	28.02
30	14.29	206.83	29.57	14.70	163.36	22.23	206.83	29.57
40	19.29	288.36	30.34	19.70	220.05	22.34	288.36	30.34
50	24.29	369.96	30.81	24.70	276.74	22.41	369.96	30.81
60	29.29	451.58	31.12	29.70	333.43	22.45	451.58	31.12

Camión Diseño BL-23

Eje 1 (Tn)	5.7
d1 (m)	4.2
Eje 2 (Tn)	16.4
d2 (m)	4.2
Eje 3 (Tn)	23.8
R (Tn)	45.9
e (m)	1.656

Tandem HL-93

Eje 1 (Tn)	11.34
d1 (m)	1.2
Eje 2 (Tn)	11.34
R (Tn)	22.68
e (m)	0.6

Luz (m)	X _{C.Diseño} (m)	M _{C.Diseño}	V _{C.Diseño}	X _{Tandem} (m)	M _{Tandem}	V _{Tandem}	M _{Max}	V _{Max}
1	0.50	4.10	23.80	0.50	2.84	9.07	4.10	23.80
2	1.00	8.20	23.80	1.00	4.54	15.88	8.20	23.80
3	1.50	12.30	17.24	1.50	10.21	18.14	12.30	18.14
4	1.17	16.40	16.71	1.70	16.39	19.28	16.40	19.28
5	1.67	1.72	22.55	2.20	21.95	19.96	21.95	22.55
6	2.17	12.15	26.44	2.70	27.56	20.41	27.56	26.44
7	2.67	22.87	29.22	3.20	33.18	20.74	33.18	29.22
8	3.17	33.78	31.31	3.70	38.81	20.98	38.81	31.31
9	3.67	44.82	32.93	4.20	44.45	21.17	44.82	32.93
10	4.17	55.95	34.22	4.70	50.10	21.32	55.95	34.22
11	4.67	67.14	35.29	5.20	55.75	21.44	67.14	35.29
12	5.17	78.37	36.17	5.70	61.41	21.55	78.37	36.17
13	5.67	89.65	36.92	6.20	67.06	21.63	89.65	36.92
14	6.17	100.95	37.56	6.70	72.72	21.71	100.95	37.56
15	6.67	112.27	38.12	7.20	78.38	21.77	112.27	38.12
16	7.17	123.62	38.60	7.70	84.04	21.83	123.62	38.60
17	7.67	134.98	39.03	8.20	89.71	21.88	134.98	39.03
18	8.17	146.35	39.41	8.70	95.37	21.92	146.35	39.41
19	8.67	157.73	39.75	9.20	101.03	21.96	157.73	39.75
20	9.17	169.12	40.06	9.70	106.70	22.00	169.12	40.06
21	9.67	180.52	40.34	10.20	112.36	22.03	180.52	40.34
22	10.17	191.93	40.59	10.70	118.03	22.06	191.93	40.59
23	10.67	203.34	40.82	11.20	123.69	22.09	203.34	40.82
24	11.17	214.76	41.04	11.70	129.36	22.11	214.76	41.04
25	11.67	226.18	41.23	12.20	135.03	22.14	226.18	41.23
26	12.17	237.61	41.41	12.70	140.69	22.16	237.61	41.41
10	4.17	55.95	34.22	4.70	50.10	21.32	55.95	34.22
20	9.17	169.12	40.06	9.70	106.70	22.00	169.12	40.06
30	14.17	283.35	42.01	14.70	163.36	22.23	283.35	42.01
40	19.17	397.84	42.98	19.70	220.05	22.34	397.84	42.98
50	24.17	512.43	43.56	24.70	276.74	22.41	512.43	43.56
60	29.17	627.07	43.95	29.70	333.43	22.45	627.07	43.95

ANEXO V
(SOLICITUD DE DATOS Y
RESPUESTA DE VÍAS BOLIVIA)



VÍASBOLIVIA
ADMINISTRADORA DE RODAJE Y PESAJE

OFICINA NACIONAL, 15 de diciembre de 2022
VB/DOP/2022-0130

Señor
Fernando Manuel Mita Calderón
INGENIERO CIVIL S.I.B
Presente.-

REF.: **REMISIÓN DE LA NOTA SOLICITADA**

A tiempo de expresarle un cordial saludo y deseos de éxito en sus funciones que desempeña.

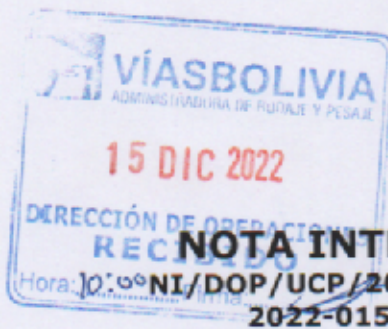
Remito a su persona la presente nota; **NI/DOP/UCP/2022-1017; 2022-01555**, referente a la solicitud de información solicitada, para su conocimiento y fines consiguientes.

Sin otro particular, me despido con las mayores consideraciones.

Jose Nivardo Rivera Balderrama
DIRECTOR DE OPERACIONES
Abg. José N. Rivera Balderrama
DIRECTOR DE OPERACIONES
VIAS BOLIVIA

Adj. lo citado
JNRB

2022-01555



A: Abg. José Nivardo Rivera Balderrama
DIRECTOR DE OPERACIONES

Abg. José N. Rivera Balderrama
DIRECTOR DE OPERACIONES
VIAS BOLIVIA

Vía: Lic. Luis Rodrigo Pari Yujra
JEFE DE UNIDAD DE CONTROL DE PESOS Y DIMENSIONES

Lic. Luis Rodrigo Pari Yujra
JEFE UNIDAD DE CONTROL DE
PESOS Y DIMENSIONES
VIAS BOLIVIA

De: Ing. Jose Erwin Matias Cucull
PROFESIONAL EN CONTROL DE PERMISOS ESPECIALES

Ing. José Erwin Matias Cucull
PROFESIONAL EN CONTROL DE
PERMISOS ESPECIALES
VIAS BOLIVIA

FECHA: 14 de diciembre de 2022

Ref.: REMISION DE INFORMACION SOLICITADA.

De mi consideración:

Por el presente remito información solicitada como ser:

Actualmente Vias Bolivia hace cumplir la Ley 441 de Pesos y dimensiones permitidas a Nivel nacional, DS 25629 Reg.:

FLUJO VEHICULAR A NIVEL NACIONAL DEL SNCPD: los datos son proporcionados del Sistema SNCPD.

ANO	DEPARTAMENTO	ESTACION DE PESAJE	Multados	Multas Canceladas	No Multados	Total
2016	SANTA CRUZ	ABAPO INGRESO	0	3	0	3
		ENCONADA INGRESO	480	91	8927	9498
		MATARAL INGRESO	84	14	13272	13370
		MATARAL SALIDA	175	31	10956	11162
		SAN JOSE INGRESO	160	88	30380	30628
		SAN JOSE SALIDA	42	13	5639	5694
	COCHABAMBA	CHINATA	0	0	36175	36175
		IVIRGARZAMA	957	179	101669	102805
		SUTICOLLO INGRESO	0	0	102311	102311
		SUTICOLLO SALIDA	0	0	147102	147102
POTOSI	JAYAC MAYU	30	54	17498	17582	

AÑO	DEPARTAMENTO	ESTACION DE PESAJE	Multados	Multas Canceladas	No Multados	Total
2017		MATANCILLAS	12	32	10306	10350
		REMEDIOS	12	49	11556	11617
		SAN ANTONIO	11	20	26414	26445
		UYUNI	4	9	4431	4444
	LA PAZ	CONTROL MOVIL LA PAZ	0	0	92	92
	SANTA CRUZ	ENCONADA INGRESO	580	79	16956	17615
	COCHABAMBA	MATARAL INGRESO	71	16	28852	28939
		MATARAL SALIDA	112	13	21743	21868
		SAN JOSE INGRESO	117	43	34856	35016
		SAN JOSE SALIDA	25	4	9162	9191
CHINATA		0	0	3909	3909	
IVIRGARZAMA		700	120	121359	122179	
SUTICOLLO INGRESO		0	0	43401	43401	
SUTICOLLO SALIDA		0	0	58067	58067	
POTOSI	JAYAC MAYU	25	34	28214	28273	
2018	SANTA CRUZ	REMEDIOS	10	41	15768	15819
		SAN ANTONIO	0	0	20079	20079
		UYUNI	12	8	5763	5783
		MATARAL INGRESO	53	8	25294	25355
COCHABAMBA	MATARAL SALIDA	81	2	19644	19727	
	SAN JOSE INGRESO	108	40	42643	42791	
	SAN JOSE SALIDA	26	4	10856	10886	
	IVIRGARZAMA	730	126	177080	177936	
	PADRESAMA	127	17	41006	41150	
	POTOSI	JAYAC MAYU	41	99	31318	31458
	MATANCILLAS	12	11	10340	10363	
	REMEDIOS	14	61	9461	9536	
2019	SANTA CRUZ	SAN ANTONIO	0	0	19440	19440
		UYUNI	29	51	8480	8560
		MATARAL INGRESO	42	2	20151	20195
		MATARAL SALIDA	56	3	20517	20576
	COCHABAMBA	SAN JOSE INGRESO	111	32	45447	45590
		SAN JOSE SALIDA	33	6	13479	13518
		IVIRGARZAMA	657	96	179496	180249
		PADRESAMA	278	40	133022	133340
POTOSI	JAYAC MAYU	31	46	10635	10712	
	MATANCILLAS	22	19	13017	13058	
	REMEDIOS	33	73	9326	9432	
	UYUNI	32	57	9133	9222	
2020	SANTA CRUZ	MATARAL INGRESO	50	4	14572	14626
		MATARAL SALIDA	106	5	17654	17765
		SAN JOSE INGRESO	209	40	35426	35675
		SAN JOSE SALIDA	41	4	8685	8730
	COCHABAMBA	IVIRGARZAMA	1216	161	151162	152539
		PADRESAMA	333	34	149782	150149
	POTOSI	JAYAC MAYU	34	70	9939	10043
		MATANCILLAS	21	18	11429	11468
		REMEDIOS	29	39	5657	5725



AÑO	DEPARTAMENTO	ESTACION DE PESAJE	Multados	Multas Canceladas	No Multados	Total
2021	SANTA CRUZ	UYUNI	35	66	6923	7024
		MATARAL INGRESO	110	1	17070	17181
		MATARAL SALIDA	151	7	18860	19018
		SAN JOSE INGRESO	463	93	50124	50680
		SAN JOSE SALIDA	183	32	24469	24684
	COCHABAMBA	IVIRGARZAMA	974	85	185063	186122
		PADRESAMA	435	32	180692	181159
	POTOSI	JAYAC MAYU	58	50	23861	23969
		MATANCILLAS	29	32	12761	12822
		REMEDIOS	36	42	9332	9410
UYUNI		78	97	13390	13565	
TOTAL			10736	2661	2744675	2758072

Fuente: SNCPD (DATOS RESUMIDOS POR RESTRICCIÓN DEL SERVIDOR)

ESTACIONES DE PESAJE PUNITIVAS: estas balanzas están actualmente en funcionamiento, en operación y certificadas con IBMETRO y emiten infracciones a los que incumplen la Ley 441.

REGIONAL	ESTACION DE PESAJE	FECHA DE OPERACIÓN	AREA DE ESTIBAJE	Tipo de Balanza
COCHABAMBA	IVIRGARZAMA	2013-2022	NO TIENE	Uniplataforma de Peso Bruto Total
	PADRESAMA	2013-2022	NO TIENE	
POTOSI	JAYAC MAYU	2013-2022	TIENE	Multiplataforma estática medición por ejes, grupo de ejes y peso bruto total.
	UYUNI	2013-2022	TIENE	
	MATANCILLAS	2015-2022	TIENE	
	REMEDIOS	2015-2022	TIENE	
SANTA CRUZ	MATARAL INGRESO	2011-2022	TIENE	
	MATARAL SALIDA	2011-2022	TIENE	
	SAN JOSE INGRESO	2012-2022	TIENE	
	SAN JOSE SALIDA	2012-2022	TIENE	



ESTACIONES DE PESAJE NO PUNITIVAS: estas balanzas están en operación y funcionamiento y están certificadas con IBMETRO, pero no emiten boleta de infracciones a la Ley 441 solo es de control y regulación.

REGIONAL	PUESTO DE	FECHA DE OPERACIÓN	BALANZA	ESTADO ACTUAL	AREA DE ESTIBAJE
----------	-----------	--------------------	---------	---------------	------------------

	CONTROL				
LA PAZ	LAJA	2018-2022	ESTATICA POR EJES	EN PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	NO TIENE
	GUAQUI	2018-2022	DINAMICA DE BAJA VELOCIDAD	EN MANTENIMIENTO	NO TIENE
BENI-PANDO	RURRENABAQUE	2017-2022	UNIPLATAFORMA PBT	EN MANTENIMIENTO	TIENE
CHUQUISACA	SUNCHUTAMBO	2018-2019	ESTATICA POR EJES	EN MANTENIMIENTO	NO TIENE
	CRUZ PAMPA	2018-2022	DINAMICA DE BAJA VELOCIDAD	EN PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	NO TIENE
TARIJA	CHIMEO	2016-2022	ESTATICA POR EJES	EN PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	NO TIENE
SANTA CRUZ	ENCONADA INGRESO	2014-2022	MULTIPLATAFORMA	EN PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	TIENE
	ENCONADA SALIDA	2014-2015	ESTATICA POR EJES	EN MANTENIMIENTO	TIENE
POTOSI	COLCHANI	2016-2022	DINAMICA DE BAJA VELOCIDAD	EN PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	NO TIENE

ESTACIONES DE PESAJE SIN FUNCIONAMIENTO: estas balanza fueron cerradas por fallas mecánicas y falta de repuestos e por estar en zonas pobladas.

REGIONAL	ESTACION DE PESAJE	FECHA DE OPERACIÓN	AREA DE ESTIBAJE	Tipo de Balanza
CHUQUISACA	LA ZAPATERA	2011-2015	NO TIENE	Uniplataforma de Peso Bruto Total
ORURO	CAHIUASI	2011-2015	NO TIENE	Uniplataforma de Peso Bruto Total
COCHABAMBA	SUTICOLLO SALIDA	2012-2015	NO TIENE	Uniplataforma de Peso Bruto Total

