



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Dirección de Postgrado

Facultad de Ingeniería - Programa de Magister en Ciencias de la Ingeniería con Mención en
Ingeniería Civil

**MODELACIÓN DE ACELERACIONES LONGITUDINALES
MEDIDAS CON GPS EN CAMINOS RURALES**

Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en
Ingeniería Civil

CRISTIAN HUMBERTO HENRÍQUEZ GONZÁLEZ
CONCEPCIÓN - CHILE
2015

Profesor Guía: Dr. Tomás Echaveguren Navarro
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

En la actualidad la Ingeniería de Caminos busca cambiar el diseño tradicional con el fin de mejorar la seguridad vial de las carreteras, enfocándose en comprender la respuesta de los conductores ante una determinada configuración geométrica, dadas ciertas características propias de la zona de emplazamiento, de los usuarios de la vía y del tipo de vehículo utilizado.

Los esfuerzos se han enfocado en predecir la velocidad de operación en función de los parámetros geométricos que definen la vía. Sin embargo, no se ha estudiado suficientemente bien el efecto que producen las aceleraciones en la forma real de los perfiles de velocidad y la influencia que tiene esta variable en la seguridad vial y en la comodidad de los conductores.

La hipótesis del trabajo propone que “la aceleración de operación en cada punto característico de una curva de inflexión en S es función de la geometría del alineamiento, antes y después de dicho punto, y de la velocidad de operación en el punto característico inmediatamente anterior”. El objetivo general fue establecer un modelo matemático para predecir correctamente la aceleración de operación de vehículos livianos que circulan por curvas en S en caminos rurales.

Los resultados evidenciaron que las aceleraciones/deceleraciones obedecen a una distribución Burr de cuatro parámetros, mostrando una importante asimetría que cambia en cada punto del trazado.

Se demostró que el uso de ecuaciones cinemáticas para derivar la aceleración a partir de mediciones de velocidad subestima los valores reales. Además, se observó que para radios menores a 400 m existe una tendencia de los conductores a decelerar al entrar a la curva y para radios superiores existe una percepción casi recta de la geometría, lo que lleva a acelerar o mantener la velocidad en vez de decelerar.

Finalmente, se concluyó que el percentil 95 resulta ser un buen descriptor del comportamiento de los usuarios en la entidad geométrica, valor con el cual se calibraron y validaron modelos de aceleración y/o deceleración en cada punto característico de la curva en S. Esto implica que no existe un único valor de aceleración que permita caracterizar una determinada curva, factor que deber ser considerado al momento de diseñar y utilizar valores de aceleración/deceleración para construir perfiles de velocidad y evaluar la seguridad de la vía, entre otras aplicaciones posibles.



*A Paola y David, mis amados padres,
a mi abuela Carmen (Q.E.P.D.),
y a mi tía Patty (Q.E.P.D.).*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a mis padres, Paola González y David Henríquez, por el apoyo brindado en todo este tiempo, por todo lo que me han entregado, por su cariño y apoyo incondicional y por haberme formado como un hombre de bien; sin ellos nada de esto sería posible.

A Pablo y Nicolás, mis hermanos, a mi tío Luis, a mis primos y a toda mi familia, por su apoyo incondicional y palabras de aliento en momentos difíciles.

Un agradecimiento especial para tres seres queridos que me acompañaron en los inicios de este proceso y que, lamentablemente, no alcanzaron a verme terminar esta etapa de mi vida; mi abuela Carmen y mis tíos Octavio y Patty. A pesar de no estar presentes siempre los sentí cercanos.

También deseo agradecer a los profesores Tomás Echaveguren y Alejandro Tudela por su apoyo, dedicación y buena disposición al momento de desarrollar este trabajo.

A mis compañeros y amigos del Departamento de Ingeniería Civil, quienes de una u otra manera también fueron parte de este proceso.

Finalmente quiero agradecer al profesor César León por su amistad, confianza y por los sabios consejos entregados durante mi paso por la Universidad.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Hipótesis	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Plan de trabajo	3
1.5 Principales resultados y conclusiones	4
1.6 Alcances de la Tesis	4
1.7 Estructura del informe	5
CAPÍTULO 2 LA ACELERACIÓN LONGITUDINAL EN CURVAS HORIZONTALES	6
2.1 Introducción	6
2.2 Las curvas de inflexión en S	6
2.3 El concepto de aceleración longitudinal	7
2.4 Aceleraciones y perfil de velocidad	8
2.5 La aceleración longitudinal en función de la velocidad	10
2.6 Modelos de aceleración longitudinal	11
2.7 Las aceleraciones como medida de la seguridad vial en curvas horizontales	16
2.8 Las tangentes como elementos propios de la curva	17
2.9 Conclusiones	18
CAPÍTULO 3 DISEÑO EXPERIMENTAL	20
3.1 Introducción	20
3.2 Diseño factorial	20
3.3 Tamaño muestral	22
3.4 Conclusiones	23
CAPÍTULO 4 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	24
4.1 Introducción	24
4.2 Mediciones de campo	24

4.3	Base de datos de geometría	27
4.4	Identificación de la velocidad de aproximación	29
4.5	Asignación de datos a la matriz factorial	30
4.6	Conclusiones	31
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ACELERACIONES		32
5.1	Introducción	32
5.2	Discretización de la curva en S	32
5.3	Distribución de probabilidades y bondad de ajuste	33
5.4	Parámetros de la distribución	39
5.5	Media y varianza de la muestra	39
5.6	Análisis de los percentiles de aceleración	41
5.7	Conclusiones	50
CAPÍTULO 6 MODELACIÓN DE ACELERACIONES LONGITUDINALES		53
6.1	Introducción	53
6.2	Base de datos de modelación	53
6.3	Formulación de los modelos	54
6.4	Modelos calibrados	58
6.5	Comparación con otros modelos	74
6.6	Caso de aplicación	79
6.7	Conclusiones	83
7.	CONCLUSIONES	85
REFERENCIAS		89
ANEXOS		95
ANEXO 4.1	Procedimiento de identificación de la velocidad de aproximación	95
ANEXO 5.1	Distribuciones de probabilidad y test de bondad de ajuste	100
ANEXO 5.2	Gráficas de percentiles de aceleración	102

ANEXO 5.3	Patrones de comportamiento según geometría	111
ANEXO 5.4	Aceleración de operación	113
ANEXO 5.5	Perfiles de aceleración.....	115
ANEXO 6.1	Modelos de aceleración y deceleración para curvas en S	120



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Valores de aceleración obtenidos por distintos investigadores	11
Tabla 2.2	Valores de aceleración en función del radio	13
Tabla 2.3	Modelos de aceleración	14
Tabla 2.4	Longitud de tangentes.....	18
Tabla 3.1	Matriz factorial	21
Tabla 4.1	Precisión del equipo VBox Mini	25
Tabla 4.2	Base de datos de geometría	27
Tabla 4.3	Codificación de las vías	28
Tabla 4.4	Número de ruta - código B	28
Tabla 4.5	Matriz factorial con asignación de mediciones	30
Tabla 5.1	Correlación de parámetros de la distribución con variables geométricas y operativas	39
Tabla 5.2	Correlación de la media y la varianza con las variables geométricas y operativas	41
Tabla 5.3	Valores de aceleración para la tangente y curva de entrada, en función del radio	48
Tabla 6.1	Indicadores de validación de la Ecuación 6.8.....	60
Tabla 6.2	Indicadores de validación de la Ecuación 6.9.....	61
Tabla 6.3	Indicadores de validación de la Ecuación 6.10.....	61
Tabla 6.4	Indicadores de validación de la Ecuación 6.11	62
Tabla 6.5	Indicadores de validación de la Ecuación 6.12.....	63
Tabla 6.6	Indicadores de validación de la Ecuación 6.13.....	64
Tabla 6.7	Indicadores de validación de la Ecuación 6.15.....	65
Tabla 6.8	Indicadores de validación de la Ecuación 6.16.....	65
Tabla 6.9	Valores de aceleración/deceleración en el punto medio de la tangente intermedia, MTi, en función de la geometría.....	67
Tabla 6.10	Indicadores de validación de la Ecuación 6.17	67
Tabla 6.11	Indicadores de validación de la Ecuación 6.18.....	68
Tabla 6.12	Indicadores de validación de la Ecuación 6.19.....	69
Tabla 6.13	Indicadores de validación de la Ecuación 6.20.....	70
Tabla 6.14	Indicadores de validación de la Ecuación 6.21	70
Tabla 6.15	Indicadores de validación de la Ecuación 6.22.....	71

Tabla 6.16	Indicadores de validación de la Ecuación 6.23	72
Tabla 6.17	Indicadores de validación de la Ecuación 6.24	73
Tabla 6.18	Indicadores de validación de la Ecuación 6.25	73
Tabla 6.19	Geometría de las curvas usadas para el caso de aplicación	79
Tabla 6.20	Velocidad en puntos característicos de las curvas usadas para el caso de aplicación	79
Tabla 6.21	Aceleración/deceleración predicha y observada para curvas del caso de aplicación	80
Tabla A.4.1	Ejemplo de identificación del punto 3, para la repetición 15 de la curva 50.10.1.1	96
Tabla A.4.2	Estadística descriptiva de la velocidad de aproximación y su ubicación, para cada curva de la base de datos	98
Tabla A.5.13	Patrones de comportamiento para distintas combinaciones de geometría y velocidad	111
Tabla A.5.24	Valores de la aceleración de operación	113
Tabla A.6.1	Modelos de aceleración para el principio de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m	121
Tabla A.6.2	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.1	122
Tabla A.6.3	Modelos de deceleración para el principio de la curva de entrada	123
Tabla A.6.4	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.3	124
Tabla A.6.5	Modelos de deceleración para el principio de la curva de entrada con radios entre 190 y 399 m	126
Tabla A.6.6	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.5	127
Tabla A.6.7	Modelos de deceleración para el principio de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m	128
Tabla A.6.8	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.7	128
Tabla A.6.9	Modelos de aceleración para la mitad de la curva de entrada	129
Tabla A.6.10	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.9	130
Tabla A.6.11	Modelos de aceleración para la mitad de la curva de entrada con radios entre 190 y 399 m	131
Tabla A.6.12	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.11	132
Tabla A.6.13	Modelos de aceleración para la mitad de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m	133

Tabla A.6.14	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.13	134
Tabla A.6.15	Modelos de deceleración para la mitad de la curva de entrada	136
Tabla A.6.16	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.15	136
Tabla A.6.17	Modelos de deceleración para la mitad de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m	137
Tabla A.6.18	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.17	138
Tabla A.6.19	Modelos de aceleración para el final de la curva de entrada con radios entre 190 y 399 m	139
Tabla A.6.20	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.19	140
Tabla A.6.21	Modelos de aceleración para el final de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m	141
Tabla A.6.22	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.21	141
Tabla A.6.23	Modelos de deceleración para el final de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m	143
Tabla A.6.24	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.23	143
Tabla A.6.25	Modelos de aceleración para el principio de la curva de salida	145
Tabla A.6.26	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.25	145
Tabla A.6.27	Modelos de deceleración para el principio de la curva de salida	147
Tabla A.6.28	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.27	148
Tabla A.6.29	Modelos de deceleración para el principio de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m	149
Tabla A.6.30	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.29	149
Tabla A.6.31	Modelos de deceleración para el principio de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m	150
Tabla A.6.32	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.31	151
Tabla A.6.33	Modelos de aceleración para la mitad de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m	153
Tabla A.6.34	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.33	153
Tabla A.6.35	Modelos de aceleración para la mitad de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m	154
Tabla A.6.36	Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.35	155

Tabla A.6.37 Modelos de deceleración para la mitad de la curva de salida	157
Tabla A.6.38 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.37	157
Tabla A.6.39 Modelos de deceleración para la mitad de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m	158
Tabla A.6.40 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.39	159
Tabla A.6.41 Modelos de deceleración para la mitad de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m	160
Tabla A.6.42 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.41	161
Tabla A.6.43 Modelos de aceleración para el final de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m	163
Tabla A.6.44 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.43	164
Tabla A.6.45 Modelos de aceleración para el final de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m	165
Tabla A.6.46 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.45	166
Tabla A.6.47 Modelos de deceleración para el final de la curva de salida	167
Tabla A.6.48 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.47	167
Tabla A.6.49 Modelos de deceleración para el final de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m	168
Tabla A.6.50 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.49	169
Tabla A.6.51 Modelos de deceleración para el final de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m	170
Tabla A.6.52 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.51	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Curva de inflexión en S	6
Figura 2.2	Componentes de la aceleración	7
Figura 2.3	Representación gráfica de perfil de velocidad teórico en una curva de inflexión en S, con variaciones de velocidad en la curva horizontal	9
Figura 2.4	Perfil teórico de aceleraciones derivado de un perfil de velocidad	9
Figura 2.5	Modelos de deceleración en función del radio de la curva	15
Figura 2.6	Modelos de aceleración en función del radio de la curva	15
Figura 3.1	Potencia estadística en función del tamaño muestral y del efecto tamaño, para un experimento ANOVA a priori	22
Figura 4.1	Equipo VBox mini	25
Figura 4.2	Puntos característicos de la trayectoria en una curva en S	29
Figura 5.1	Puntos seleccionados para el análisis	32
Figura 5.2	FDP en puntos característicos de la curva 47.9.1.2.....	35
Figura 5.3	FDP en puntos característicos de la curva 54.11.1.1.....	36
Figura 5.4	FDP en los puntos característicos del conjunto de curvas de la celda 1-C de la matriz factorial.....	38
Figura 5.5	Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h	42
Figura 5.6	Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h	42
Figura 5.7	Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h ...	43
Figura 5.8	Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h .	43
Figura 5.9	Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h.....	43
Figura 5.10	Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h.....	43

Figura 5.11	Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h.....	44
Figura 5.12	Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h.....	44
Figura 5.13	Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h	44
Figura 5.14	Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h	44
Figura 5.15	Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h	45
Figura 5.16	Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h	45
Figura 5.17	Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h	45
Figura 6.1	Puntos seleccionados para la modelación	53
Figura 6.2	Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.8	60
Figura 6.3	Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.9	61
Figura 6.4	Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.10	62
Figura 6.5	Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.11	63
Figura 6.6	Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.12	63
Figura 6.7	Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.13	64
Figura 6.8	Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.15	65
Figura 6.9	Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.16	66
Figura 6.10	Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.17	68
Figura 6.11	Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.18	68
Figura 6.12	Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.19	69
Figura 6.13	Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.20	70
Figura 6.14	Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.21	71
Figura 6.15	Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.22	71
Figura 6.16	Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.23	72
Figura 6.17	Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.24	73

Figura 6.18 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.25	74
Figura 6.19 Comparación de modelos para el principio de la curva de entrada con radios entre 175 y 399 m	75
Figura 6.20 Comparación de modelos para el principio de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m	76
Figura 6.21 Modelos existentes para el final de la curva de entrada con radios entre 175 y 399 m	77
Figura 6.22 Modelos propuestos para el final de la curva de entrada con radios entre 175 y 399 m	77
Figura 6.23 Modelos existentes para el final de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m	78
Figura 6.24 Modelos propuestos para el final de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m	78
Figura 6.25 Perfil de aceleración observada v/s predicha para la curva 50.10.1.1-13	80
Figura 6.26 Perfil de aceleración observada v/s predicha para la curva 67.15.1.2-13	80
Figura 6.27 Perfil de aceleración observada v/s predicha para la curva 46.9.1.2-61	81
Figura 6.28 Perfil de aceleración observada v/s predicha para la curva 63.13.3.2-21	81
Figura 6.29 Perfil de aceleración observada v/s predicha para la curva 21.6.1.1-80	81
Figura A.4.1 Identificación gráfica de la velocidad de aproximación y otros puntos de interés.	95
Figura A.5.1 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor o igual a 70 km/h	102
Figura A.5.2 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor entre 71 y 80 km/h	102
Figura A.5.3 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor entre 81 y 90 km/h	102
Figura A.5.4 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor entre 91 y 100 km/h	103
Figura A.5.5 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor entre 101 y 110 km/h	103

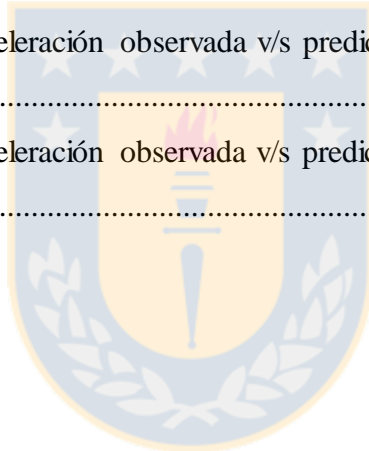
Figura A.5.6 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h	103
Figura A.5.7 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h	103
Figura A.5.8 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h	104
Figura A.5.9 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h	104
Figura A.5.10 Percentiles de aceleración para radios de entrada menores a 200 m, L _{Ti} y radio de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h	104
Figura A.5.11 Percentiles de aceleración para radios de entrada menores a 200 m, L _{Ti} y radio de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h	104
Figura A.5.12 Percentiles de aceleración para radios de entrada menores a 200 m, L _{Ti} y radio de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h	105
Figura A.5.13 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, longitud de tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h	105
Figura A.5.14 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, longitud de tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h	105
Figura A.5.15 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, longitud de tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h	105
Figura A.5.16 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, L _{Ti} menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h.....	106
Figura A.5.17 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, L _{Ti} menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h.....	106

Figura A.5.18 Percentiles de aceleración para radios de entrada y LT_i entre 201 y 400 m, radios de salida menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h	106
Figura A.5.19 Percentiles de aceleración para radios de entrada y LT_i entre 201 y 400 m, radios de salida menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h	106
Figura A.5.20 Percentiles de aceleración para radios de entrada y LT_i entre 201 y 400 m, radios de salida menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h	107
Figura A.5.21 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h.....	107
Figura A.5.22 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h.....	107
Figura A.5.23 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h.....	107
Figura A.5.24 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h.....	108
Figura A.5.25 Percentiles de aceleración para radios de entrada entre 201 y 400 m, LT_i mayor a 400 m, radios de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h.....	108
Figura A.5.26 Percentiles de aceleración para radios de entrada entre 201 y 400 m, LT_i mayor a 400 m, radios de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h.....	108
Figura A.5.27 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, LT_i mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h.....	108
Figura A.5.28 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, LT_i mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h.....	109
Figura A.5.29 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, LT_i mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h.....	109
Figura A.5.30 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, LT_i mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h.....	109
Figura A.5.31 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h	109
Figura A.5.32 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h	110

Figura A.5.33 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h	110
Figura A.5.34 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h	110
Figura A.5.35 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h	110
Figura A.5.36 Perfil de aceleraciones para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida menores a 200 m	115
Figura A.5.37 Perfil de aceleraciones para radios de entrada y salida menores a 200 m y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m	115
Figura A.5.38 Perfil de aceleraciones para radios de entrada menor a 200 m y longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m	116
Figura A.5.39 Perfil de aceleraciones para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m y longitud de tangente intermedia menor a 200 m	116
Figura A.5.40 Perfil de aceleraciones para radios de entrada y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y radios de salida menores a 200 m	117
Figura A.5.41 Perfil de aceleraciones para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m	117
Figura A.5.42 Perfil de aceleraciones para radios de entrada entre 201 y 400 m, longitud de tangente intermedia mayor a 400 m y radios de salida menores a 200 m	118
Figura A.5.43 Perfil de aceleraciones para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m y longitud de tangente intermedia mayor a 400 m	118
Figura A.5.44 Perfil de aceleraciones para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m	119
Figura A.6.1 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.1	122
Figura A.6.2 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.3	125
Figura A.6.3 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.5	127

Figura A.6.4 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.7	129
Figura A.6.5 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.9	130
Figura A.6.6 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.11	132
Figura A.6.7 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.13	135
Figura A.6.8 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.15	137
Figura A.6.9 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.17	138
Figura A.6.10 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.19	140
Figura A.6.11 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.21	142
Figura A.6.12 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.23	144
Figura A.6.13 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.25	146
Figura A.6.14 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.27	148
Figura A.6.15 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.29	150
Figura A.6.16 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.31	152
Figura A.6.17 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.33	154
Figura A.6.18 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.35	156

Figura A.6.19 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.37	158
Figura A.6.20 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.39	159
Figura A.6.21 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.41	162
Figura A.6.22 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.43	164
Figura A.6.23 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.45	166
Figura A.6.24 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.47	168
Figura A.6.25 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.49	170
Figura A.6.26 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.51	171



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

La ingeniería de transporte moderna se enfoca en el estudio del comportamiento de los usuarios para tomar decisiones en función de los patrones observados. En ingeniería vial, esto se traduce en comprender la respuesta de los conductores ante una determinada configuración geométrica, dadas las características de la zona de emplazamiento, del conductor y del vehículo.

La respuesta de los conductores ante una determinada geometría se visualiza en los perfiles de velocidad, los que se definen como una representación gráfica de la velocidad de operación, generalmente asumida como la velocidad percentil 85, en distintos puntos del trazado. Es allí donde las aceleraciones son particularmente importantes porque definen la geometría real del perfil, mostrando la forma en que varía la velocidad.

Las deceleraciones y aceleraciones que sufre un vehículo influyen directamente en la comodidad de sus ocupantes. Además, es sabido que la deceleración está fundamentalmente ligada con la siniestralidad. Está comprobado que en aquellos lugares donde se dan las máximas reducciones de la velocidad, es decir donde se producen las máximas deceleraciones, la accidentalidad es mayor.

Dado lo anterior, el estudio de las aceleraciones y deceleraciones es importante desde dos puntos de vista: para conformar un perfil de velocidades adecuado y para obtener las transiciones que no impliquen valores muy elevados de los mismos, con el objetivo de limitar la accidentalidad.

En los últimos años ha aumentado el interés por estos valores, multiplicando el número de investigaciones acerca de los mismos. De hecho, muchos de los estudios en este campo no están encaminados a la obtención de modelos de calibración de estos valores, sino a un paso previo: el estudio del comportamiento de los valores de aceleración y deceleración en diferentes condiciones.

Las aceleraciones pueden ser un valor representativo de un tramo de la vía, estratificados en función de la geometría o no, o un modelo que considere explícitamente las variables geométricas del

trazado. Sin embargo, cualquiera sea el método utilizado, es imprescindible que los valores se calculen correctamente para que representen el comportamiento real de los conductores.

La forma en que actualmente se han calculado las aceleraciones en función de la velocidad, presenta limitaciones conceptuales y prácticas al no considerar, entre otras cosas, la naturaleza aleatoria de la aceleración y la auto-correlación entre perfiles de velocidad de secciones contiguas.

En esta Tesis se estudian y caracterizan estadísticamente las aceleraciones y deceleraciones que experimentan los vehículos al transitar por una curva de inflexión en S, en base a datos de campo obtenidos con un equipo GPS, con el fin de identificar patrones conductuales que permitan modelar matemáticamente el fenómeno. Se utilizó como sujeto de estudio la curva de inflexión en S, ya que los problemas de análisis de consistencia, los cuales requieren perfiles de velocidad de alta precisión, están enfocados a dicha geometría.

1.2 Hipótesis

La aceleración de operación en cada punto característico de una curva de inflexión en S es función de la geometría del alineamiento, antes y después de dicho punto, y de la velocidad de operación en el punto característico inmediatamente anterior.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Modelar matemáticamente la aceleración de operación de vehículos livianos que transitan por curvas de inflexión en S de caminos rurales.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Identificar las principales variables que determinan el valor de las aceleraciones y deceleraciones.
- b) Construir un diseño experimental que permita analizar estadísticamente las aceleraciones y deceleraciones en una curva de inflexión en S.
- c) A partir de mediciones existentes, generar una base de datos que permita estudiar el fenómeno.
- d) Caracterizar estadísticamente la aceleración y deceleración longitudinal de conductores sobre vehículos livianos.
- e) Identificar patrones de comportamiento en función de los parámetros geométricos que definen una curva en S.
- f) Calibrar y validar un conjunto de modelos que permitan predecir la aceleración de operación en distintos puntos del alineamiento.

1.4 Plan de trabajo

El plan de trabajo se dividió en seis etapas: revisión del estado del arte, diseño experimental, procesamiento de datos, análisis estadístico, identificación de patrones y modelación. La primera etapa consistió en la identificación de las principales variables que caracterizan e inciden en las aceleraciones longitudinales, a partir de la literatura. Posteriormente se realizó un diseño experimental que permitió definir el tamaño muestral necesario para estudiar el fenómeno, en función de las variables explicativas identificadas en la etapa anterior. La tercera etapa contempló la extracción de los datos de mediciones crudas capturadas con el equipo de medición y la aplicación del filtro de Kalman para acoplar las variables con la geometría. En seguida se caracterizaron estadísticamente las aceleraciones, lo que implicó ajustar distribuciones estadísticas y aplicar test de bondad de ajuste, explorar distintos percentiles de aceleración y definir aquel que representa de mejor manera a toda la muestra. A continuación se identificaron y analizaron patrones de comportamiento de los datos para distintas configuraciones geométricas y se definió la aceleración característica con la que, finalmente, se calibraron y validaron distintos modelos para predecir la aceleración/deceleración de operación en los puntos característicos de una curva en S.

1.5 Principales resultados y conclusiones

Se observó que las aceleraciones/deceleraciones obedecen a una distribución Burr de cuatro parámetros, evidenciando una asimetría que se desplaza hacia la izquierda o hacia la derecha, dependiendo del punto dentro de la curva que se analice.

Se demostró que la utilización de ecuaciones cinemáticas para derivar aceleraciones a partir de mediciones de velocidad, independientemente del método de recolección de los datos, subestiman los valores reales. En general los resultados obtenidos con este método son inferiores al percentil 50 de aceleraciones medidas directamente.

En base a los análisis realizados, se concluyó que el mejor descriptor de la aceleración de operación es el percentil 95 y es el que se propone para construir perfiles de aceleración y de velocidad. Adicionalmente se demostró que no existe un único valor representativo de la aceleración/deceleración para toda la curva ya que dicho parámetro varía de un punto a otro.

Se propone un conjunto de modelos lineales para predecir la aceleración/deceleración de operación en cada uno de los puntos característicos que definen una curva de inflexión en S, en función de las variables geométricas de la entidad y de la velocidad de operación en puntos anteriores.

Los valores de aceleración/deceleración encontrados en esta investigación son de mayor magnitud a los propuestos en estudios anteriores, ya sea en Chile o en otras partes del mundo, y eso se ve reflejado en los modelos calibrados, dando cuenta que existen falencias importantes al momento de trabajar con aceleraciones/deceleraciones para construir perfiles de velocidad adecuados.

1.6 Alcances de la Tesis

La investigación se enfoca en vehículos livianos (autos y camionetas) que operan en caminos pavimentados, bidireccionales, de una pista por sentido y con velocidades de proyecto que fluctúan entre 50 y 120 km/h.

Las mediciones consideran el caso de pavimento seco y en buen estado de conservación, conducción diurna, condiciones climáticas favorables, existencia de visibilidad del trazado en toda la curva, condiciones de flujo libre (TMDA menor a 5000 vehículos/día-año), terreno plano (pendiente máxima de un 4%), zona despejada (existencia de visibilidad lateral) y no existencia de señalización y control explícita de velocidad.

1.7 Estructura del informe

El documento se estructura en seis capítulos. En el primero se presenta la motivación del estudio, la hipótesis, los objetivos, el plan de trabajo y los alcances. En el capítulo dos se define el concepto físico de las aceleraciones, particularmente el de aceleración longitudinal, se describe el estado del arte en cuanto a modelación de aceleraciones y deceleraciones y la importancia de este parámetro en la seguridad vial. En el tercer capítulo se muestra el diseño experimental que, a través de un diseño factorial completo, permitió definir el tamaño muestral requerido para el estudio, describiendo las variables explicativas consideradas, su interacción y los rangos en los que se agrupan dichas variables para la construcción de la matriz factorial. El cuarto capítulo describe la metodología de recolección y procesamiento de datos de terreno que permitió confeccionar la base de datos de trabajo, se describe el equipo de medición y se realiza la asignación de datos en la matriz factorial. En el capítulo cinco se muestra el análisis estadístico de los datos, lo que implicó ajustar distribuciones estadísticas y aplicar test de bondad de ajuste para definir la distribución que mejor representa en fenómeno, se comparan distintos percentiles de aceleración medidos directamente con un equipo GPS y se contrastan con los valores obtenidos al derivar la aceleración en función de la velocidad percentil 85, se identifican patrones de comportamiento y se define la aceleración de operación. En el sexto capítulo se detalla la confección de la base de datos de modelación, se describe el proceso de calibración y validación de ecuaciones predictoras de la aceleración/deceleración de operación en todos los puntos característicos de una curva de inflexión en S, se comparan los modelos calibrados con los existentes en el estado del arte y se utilizan para un caso práctico donde se contrastan los resultados predichos con los observados en terreno. Finalmente, en el capítulo siete se presentan las principales conclusiones del trabajo y las líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 2 LA ACELERACIÓN LONGITUDINAL EN CURVAS HORIZONTALES

2.1 Introducción

El capítulo se inicia con la definición de curvas de inflexión en S y los elementos que las constituyen. Se precisa el concepto físico de aceleraciones, y cómo éstas se relacionan con la velocidad y los perfiles de velocidad. Luego, se presentan los valores y modelos de aceleración existentes en el estado del arte y su relación con la seguridad vial. A continuación se muestra la relación que existe entre las tangentes y la curva horizontal, la importancia del conjunto geométrico tangente-curva-tangente y, finalmente, las conclusiones del capítulo.

2.2 Las curvas de inflexión en S

Una curva de inflexión en S se define como un alineamiento horizontal constituido por dos curvas inversas (una a la izquierda y la otra a la derecha, o viceversa) y tres tangentes, denominadas tangente de entrada, tangente intermedia y tangente de salida, respectivamente (ver Figura 2.1).

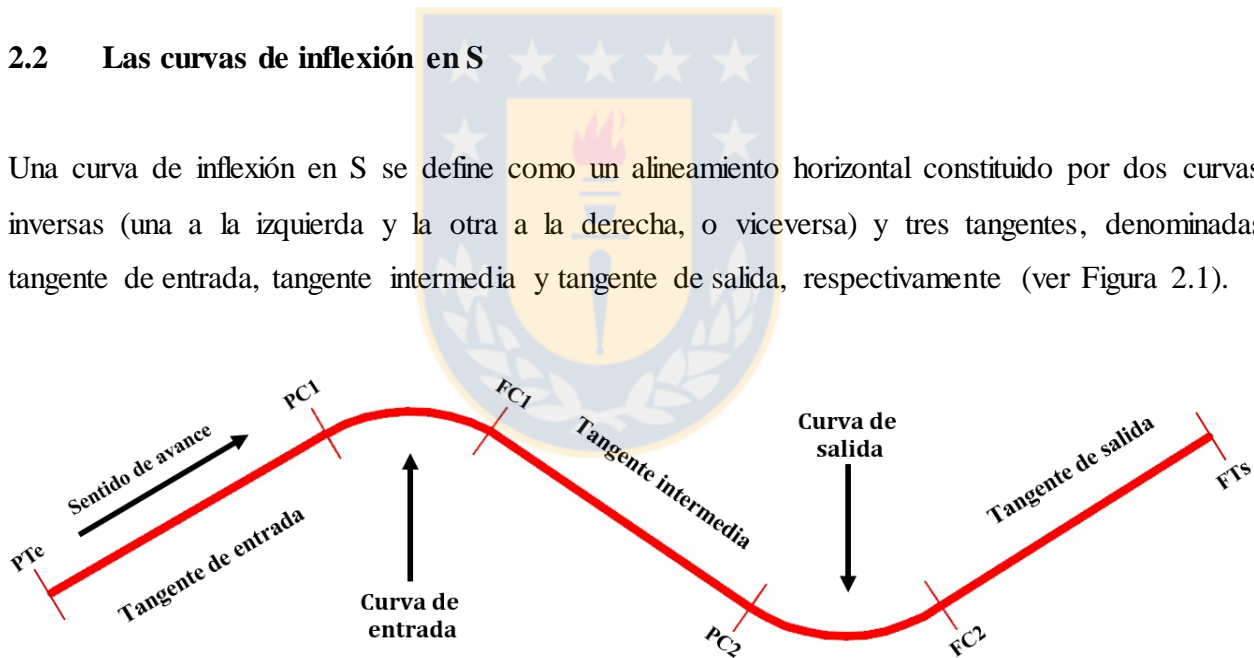


Figura 2.1 Curva de inflexión en S

En la Figura 2.1 PTe es el principio de la tangente de entrada, PC1, PC2, FC1 y FC2 son los principios y finales de las curvas 1 y 2, respectivamente y FTs es el final de la tangente de salida.

Lamm *et al.* (1988), basados en un criterio cinemático, proponen que existe una longitud de tangente intermedia que hace independiente a dos curvas. Díaz (2013) define que dos curvas sucesivas inversas constituyen una curva en S, o son compuestas, cuando la velocidad de la curva

de entrada afecta a la velocidad en la tangente intermedia y en la curva de salida. Es decir, cuando existe una dependencia entre la operación de ambas curvas; en caso contrario son curvas aisladas.

2.3 El concepto de aceleración longitudinal

La aceleración/deceleración es una magnitud vectorial que indica la razón de cambio de la velocidad por unidad de tiempo. Su unidad en el sistema internacional es m/s^2 .

Las aceleraciones y deceleraciones explican los cambios en la velocidad que experimenta un vehículo. Si la velocidad es constante, entonces la aceleración/deceleración es nula.

En el caso particular del movimiento de un vehículo en terreno plano, el vector de aceleraciones posee dos componentes: la aceleración tangencial o longitudinal (\vec{a}_t) y la aceleración centrípeta o normal (\vec{a}_n). La primera produce cambios en el módulo de la velocidad y expresa la rapidez con que ésta cambia, mientras que la segunda aparece sólo cuando el movimiento es curvilíneo y se relaciona con la comodidad de los conductores al desplazarse por el elemento geométrico. La aceleración normal en sí no afecta la velocidad de circulación de un vehículo.

En la Figura 2.2 se muestran las componentes de aceleración tangencial y normal en una trayectoria curvilínea.

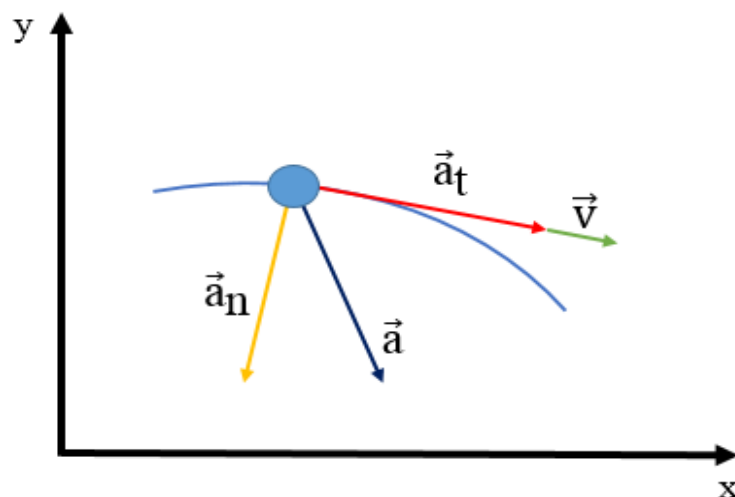


Figura 2.2 Componentes de la aceleración

Matemáticamente, el vector de aceleraciones se define según la Ecuación 2.1:

$$\vec{a} = \frac{d}{dt}(v \cdot \hat{e}_t) = \frac{dv}{dt} \cdot \hat{e}_t + v \cdot \frac{d\hat{e}_t}{dt} = \vec{a}_t + \vec{a}_n . \quad (2.1)$$

En la Ecuación 2.1, \vec{a} es el vector de aceleraciones, v es la velocidad y \hat{e}_t es el vector unitario tangente. El término $\frac{dv}{dt} \cdot \hat{e}_t$ representa la aceleración longitudinal y $v \cdot \frac{d\hat{e}_t}{dt}$ es la aceleración normal.

En el caso particular de este estudio, se trabajó sólo con las aceleraciones longitudinales, ya que son las que se relacionan directamente con la velocidad de operación de los vehículos en la vía.

En adelante, los términos aceleración y aceleración longitudinal se utilizarán indistintamente. Cuando se haga referencia a las aceleraciones laterales o normales, se explicitará. Del mismo modo, los términos aceleración y deceleración se diferenciarán exclusivamente por el signo; las primeras serán positivas y las segundas negativas.

2.4 Aceleraciones y perfil de velocidad

El perfil de velocidad es una representación gráfica de la velocidad de operación en un alineamiento, generalmente definida como la velocidad percentil 85, versus la distancia recorrida.

Diversos autores han descrito la forma teórica del perfil de velocidad. Lamm *et al.* (1988), Psarianos y García (2011) y Dimaiuta *et al.* (2011) consideran que el vehículo circula a velocidad uniforme en la curva horizontal; otros autores han mostrado que la velocidad no es constante al interior de la curva (Echaveguren y Basualto, 2003; Figueroa y Tarko, 2007; Memon *et al.* 2008).

En la Figura 2.3 se muestra un perfil de velocidad típico para una curva en S, que considera variaciones de velocidad dentro de la curva.

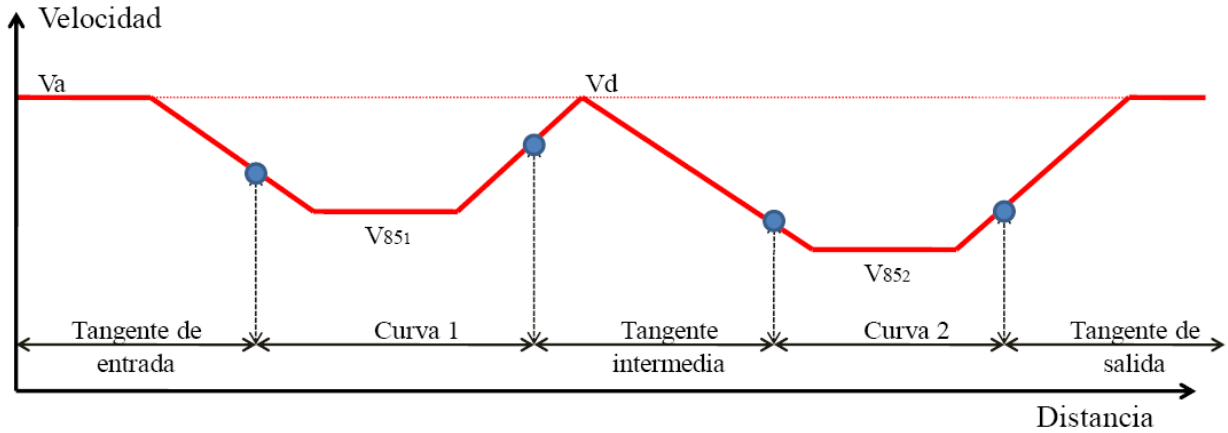


Figura 2.3 Representación gráfica de perfil de velocidad teórico en una curva de inflexión en S, con variaciones de velocidad en la curva horizontal (Díaz, 2013)

V_a es la velocidad de aproximación y V_{851} y V_{852} son las velocidades de operación en las curvas 1 y 2, respectivamente. A partir de la Figura 2.3 es posible derivar un perfil de aceleraciones como el que se muestra en la Figura 2.4.

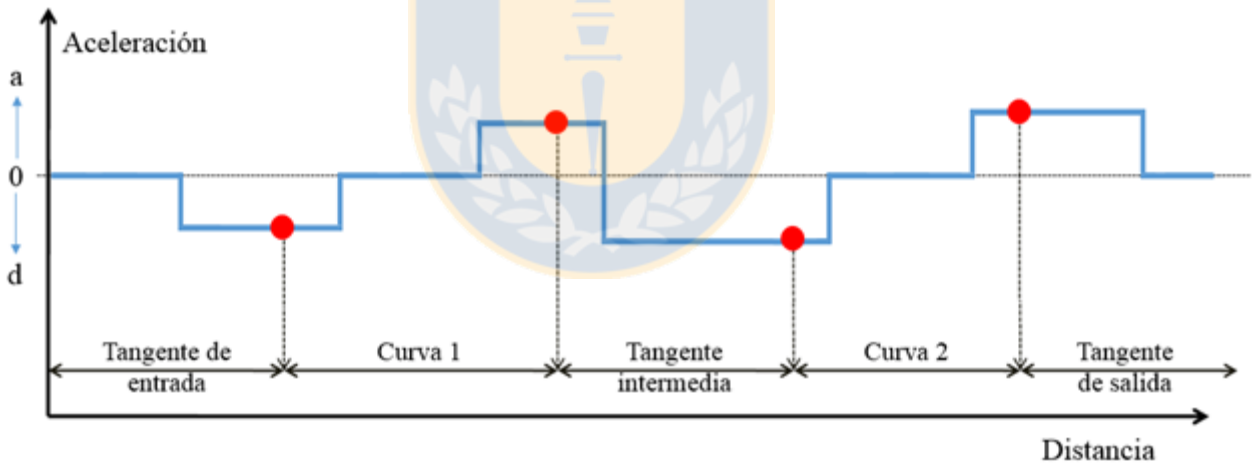


Figura 2.4 Perfil teórico de aceleraciones derivado de un perfil de velocidad

En la Figura 2.4 se muestra que la aceleración es nula cuando la velocidad es constante y que la aceleración es constante en la tangente intermedia y al entrar y salir de las curvas. Sin embargo, existe evidencia que las variaciones de velocidad llevan asociados cambios en la aceleración longitudinal que no son homogéneas (Díaz, 2013). Dado lo anterior, es discutible la veracidad del perfil de aceleraciones de la Figura 2.4, y por ende, del perfil de velocidad de la Figura 2.3.

2.5 La aceleración longitudinal en función de la velocidad

Bajo el supuesto de aceleración constante, la cinemática entrega una expresión que permite calcular la aceleración media en función de la diferencia de velocidades y la distancia entre dos puntos. La expresión matemática que entrega la aceleración media entre los puntos 1 y 2 queda definida por la Ecuación 2.2.

$$a_{1-2} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{25,92 \cdot D}, \quad (2.2)$$

donde a_{1-2} es la aceleración longitudinal media (en m/s^2) entre los puntos 1 y 2, v_1 y v_2 son las velocidades (en km/h) en los puntos 1 y 2, respectivamente, y D (en m) es la distancia que separa ambos puntos.

Diversos autores han hecho uso de la Ecuación 2.2 para obtener la aceleración longitudinal, utilizando la velocidad percentil 85. Sin embargo, su uso genera errores al asumir una aceleración constante entre dos puntos, por lo que los valores obtenidos no necesariamente representan la aceleración que realmente experimentan los conductores.

El uso de la Ecuación 2.2 ha sido cuestionado por diversos autores. Por ejemplo, Pérez *et al.* (2010) concluyen que la simple resta de velocidades subestima los valores de aceleración y deceleración. Park y Saccomanno (2006) postulan que no existe independencia de datos entre dos puntos cercanos y que realizar inferencias estadísticas con esos datos conduce a una falacia de pseudo-replicación. Bella (2008) demostró que el uso de la ecuación subestima los valores reales de aceleración y deceleración, resultados que son coincidentes con lo encontrado por Hirsh (1987) y Crisman *et al.* (2007), debido a que las distribuciones de velocidad son distintas en cada punto y el conductor de percentil 85 no tiene por qué ser el mismo en las dos ubicaciones, producto del sesgo generado por el método de medición.

2.6 Modelos de aceleración longitudinal

En la literatura se identificaron artículos desde el año 1987 en adelante, que abordan el tema de las aceleraciones longitudinales en diversas partes del mundo, los cuales se analizaron y sus resultados se clasificaron en dos grandes grupos: valores y modelos de aceleración.

2.7.1 Valores de aceleración

Los valores de aceleración generalmente se derivan a partir de mediciones puntuales de velocidad, haciendo uso de la Ecuación 2.2. La Tabla 2.1 muestra los valores de aceleración, a , y/o deceleración, d , obtenidos en diversos estudios a nivel mundial.

Tabla 2.1 Valores de aceleración obtenidos por distintos investigadores

Autor(es) - año	Lugar	a (m/s ²)	d (m/s ²)	Observaciones
Kockelke y Steinbrecher (1987)	Alemania	Sin resultados	< 1,00	Observaron valores de hasta 2,50 m/s ²
Lamm <i>et al.</i> (1988)	Estados Unidos	0,85	0,85	Encontraron valores entre 0,85 y 0,88 m/s ²
VSS (1991)	Suiza	0,80	0,80	Norma Suiza
Steierwald y Buck (1992)	Alemania	Sin resultados	0,23	Antes de señales de límite de velocidad
Steierwald y Buck (1992)	Alemania	Sin resultados	0,40 – 0,60	Antes de carteles con nombres de ciudades
Collins y Krammes (1996)	España	0,12 -0,53	0,35 – 1,19	Mínimo y máximo, respectivamente
Fitzpatrick y Collins (2000)	Estados Unidos	0,54	1,00	Observaron valores máximos de 1,77 y 1,44 (m/s ²) para a y d , respectivamente
Fitzpatrick y Collins (2000)	Estados Unidos	0,54	1,00	Observaron valores máximos de 1,77 y 1,44 (m/s ²) para a y d , respectivamente
Basualto (2003)	Chile	0,09 – 0,31	0,13 – 0,46	Mínimo y máximo, respectivamente
Echaveguren y Basualto (2003)	Chile	0,30	0,65	Midieron velocidad con pistola laser
Perco y Robba (2005)	Italia	Sin resultados	0,54	Deceleración media a través de la velocidad media

Autor(es) - año	Lugar	a (m/s ²)	d (m/s ²)	Observaciones
Perco y Robba (2005)	Italia	Sin resultados	0,71	Deceleración percentil 85 a través de la velocidad percentil 85
Figueroa y Tarko (2007)	Estados Unidos	0,49	0,73	Calculadas a partir de la velocidad percentil 85
Yang y Hassan (2008)	Canadá	0,20	0,20	Para velocidades de operación mayores o igual a 70 km/h
Dell' Acqua <i>et al.</i> (2008)	Italia	0,60	0,71	Midieron con pistola laser
Hu y Donnell (2008)	Estados Unidos	1,46	1,49	Medición continua de aceleraciones con GPS, en conducción nocturna
Bella (2008) ¹ Estudio en función de la velocidad percentil 85	Italia	0,09 – 0,31 – 0,66	0,08 – 0,60 – 1,45	Valor mínimo, promedio y máximo, respectivamente
Bella (2008) ² Análisis de medición directa de aceleraciones y deceleraciones	Italia	0,26 – 0,50 – 0,84	0,49 – 1,02 – 1,81	Valor mínimo, promedio y máximo, respectivamente
Altamira <i>et al.</i> (2014)	Argentina	0,10 – 0,20	0,10 – 0,50	Utilizaron equipo GPS Video VBox

En la Tabla 2.1 se observa que no existe coincidencia entre los distintos investigadores al definir valores representativos de aceleración/ entre los diversos estudios analizados. Esto se puede asociar, entre otros factores, a la metodología de trabajo, origen, recolección y procesamiento de los datos, características propias de la zona de estudio, de los vehículos y de los conductores.

Los valores de aceleración y deceleración encontrados por Basualto (2003) y Echaveguren y Basualto (2003) muestran que el valor de 0,85 m/s² propuesto por Lamm (1988), y utilizado por autores como Krammes *et al.* (1995) y Jeffery y Krammes (2007), sobrestima sus resultados.

La principal desventaja de trabajar con valores de aceleración constante radica en que se asume que éstos son únicos para todos los conductores y configuraciones geométricas, hipótesis que ha sido refutada por diversos investigadores:

- i. Echaveguren y Sáez (2001), en Chile, determinaron que las variaciones de velocidad al interior de la curva dependen de tipo de vehículo y del ángulo de deflexión de la misma.

¹ Estudio realizado en un simulador de conducción.

² Estudio realizado en un simulador de conducción.

- ii. Basualto (2003) y Echaveguren y Basualto (2003) comprobaron que existe una relación funcional entre las aceleraciones y las variables geométricas del alineamiento, principalmente con el radio de la curva, encontrando coeficientes de correlación entre el 60 y 90%.
- iii. Yang y Hassan (2008) proponen que el desempeño de un determinado conductor está relacionado con el tipo de vehículo, las características de la vía, características y circunstancias personales de los conductores, el tipo de carretera, su diseño y alrededores, la cantidad y composición del tráfico y las condiciones ambientales prevalecientes.
- iv. Perco y Robba (2005) demuestran que los valores de aceleración y deceleración varían a lo largo de la tangente de entrada, de la curva horizontal y de una curva a otra.
- v. Díaz (2013) verificó que entre puntos sucesivos de una curva en S, se producen variaciones de velocidad tanto dentro como fuera de la curva horizontal. Además, verificó que las variaciones de velocidad llevan asociados cambios en la aceleración longitudinal que no son homogéneos.

Buscando mejorar la representatividad y aplicabilidad de los valores de aceleración constante, otros autores han definido aceleraciones en función del radio de la curva horizontal (ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Valores de aceleración en función del radio

Autores	Lugar	a (m/s²)	d (m/s²)	R (m)	Observaciones
Fitzpatrick <i>et al.</i> (2001).	Estados Unidos	0	-	> 875	En terreno observan valores máximos de aceleración y deceleración iguales a 1,44 y 1,77 m/s ² , respectivamente, por lo que el modelo subestima los valores reales.
		0,21	-	436 ≤ R ≤ 875	
		0,43	-	250 ≤ R ≤ 436	
		0,54	-	175 < R ≤ 250	
		-	0	> 436	
		-	1,00	< 175	
Cristman <i>et al.</i> (2004 y 2005).	Italia	0,54	1,00	≤ 178	Trabajaron con la velocidad percentil 85
		0,43	0,50	178 < R < 437	
		0,20	0,20	437 ≤ R ≤ 2187	

En la Tabla 2.2 se observa que para radios mayores a 400 m, tanto la aceleración como la deceleración se aproximan a cero, pues el conductor no logra percibir la curva como tal sino más bien como una recta. Todo lo contrario ocurre para radios pequeños, donde se observan los mayores valores de aceleración y deceleración.

2.7.2 Modelos de aceleración en función de la geometría

En la Tabla 2.3 se muestran los modelos existentes en la literatura, que buscan definir la aceleración y/o deceleración en función de las variables geométricas de la vía.

Tabla 2.3 Modelos de aceleración

Autor(es)	Lugar	Modelo(s) (a y d en m/s ²)	R ²	Observaciones
Fitzpatrick <i>et al.</i> (2001)	Estados Unidos	$d = 0,6749 - \frac{295,14}{R}, 175 \leq R < 436$	0,48	d = 0, R ≥ 436 d = 1, R < 175
Basualto (2003)	Chile	$a = \frac{52,524}{R}, 250 \leq R \leq 436$	0,63	a = 0,21, R < 250 a = 0,06, R > 436 Modelo propio
		$d = -\frac{131,418}{R}, 250 \leq R \leq 436$	0,82	d = - 0,55, R < 250 d = - 0,24, R > 436 Réplica de Fitzpatrick <i>et al.</i> (2001)
Bella (2008)	Italia	$a_{85} = -0,567 + \frac{74,47}{R} + 0,007 \cdot v_{85\text{máx}}$	0,59	Autores trabajaron en un simulador de conducción
		$d_{85} = -1,316 + \frac{148,28}{R} + 0,015 \cdot v_{85\text{máx}}$	0,54	
Pérez <i>et al.</i> (2010)	España	$d_{85} = 0,242186 + 0,00150693 \cdot \text{CCR}$ $\text{CCR} = \frac{ \alpha }{L}$	0,71	Modelos para transición recta-curva
		$d_{85} = 0,263571 + \frac{67,7999}{R}$	0,70	
Pérez <i>et al.</i> (2011)	España	$d_{85} = 0,313 + \frac{114,436}{R}$	0,66	Modelo para transición recta-curva
Marchiolo y Perco (2008), citados por Psarianos y García (2011)	Europa	$a = 1,328 - 0,159 \cdot \ln(R)$	0,74	Aceleración después de la curva
		$d = 1,757 - 0,222 \cdot \ln(R)$	0,45	Deceleración antes de la curva

Nomenclatura:

R² : Coeficiente de correlación

d / a : Deceleración (m/s²) / Aceleración (m/s²)

R / L : Radio de la curva (m) / Longitud de la curva (km)

a₈₅ / d₈₅ : Aceleración percentil 85 (m/s²) / Deceleración percentil 85 (m/s²)

v_{85máx} : Velocidad de aproximación a la curva (km/h)

CCR : Tasa de cambio de curvatura (grad/km)

α : Ángulo de deflexión de la curva (grad)

Los modelos en función del Radio de la Tabla 2.3, se graficaron en las Figuras 2.5 y 2.6.

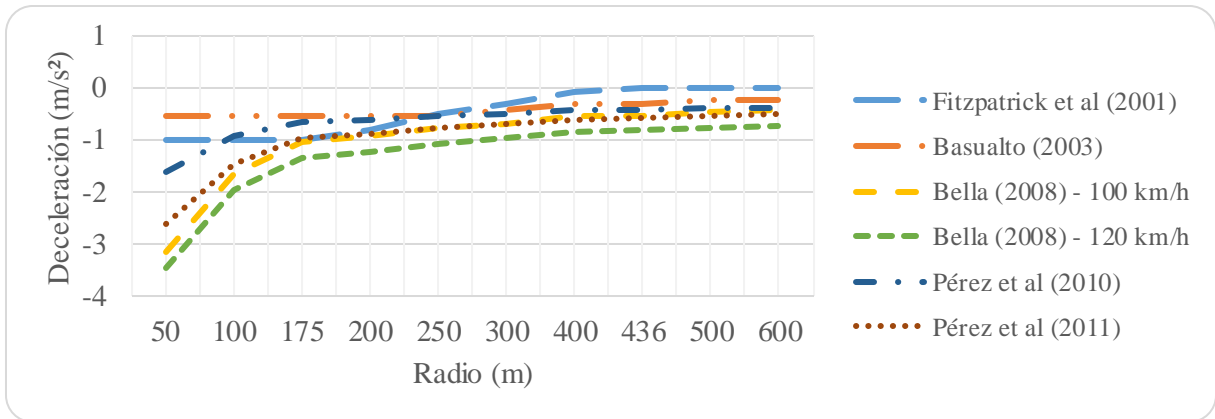


Figura 2.5 Modelos de deceleración en función del radio de la curva

De la Figura 2.5, para los modelos de deceleración, se observa que:

- i. La deceleración es inversamente proporcional al radio de la curva.
- ii. Para radios de 75 m y más, se observa una convergencia de los modelos, con una diferencia dentro de un intervalo de 1 m/s², aproximadamente. Para radios menores los modelos divergen entre sí.
- iii. El modelo de Basualto (2003), único calibrado en Chile, muestra que todos los demás autores sobrestiman los valores de deceleración para la realidad local.
- iv. El modelo de Bella (2008), es sensible a la velocidad de aproximación a la curva.

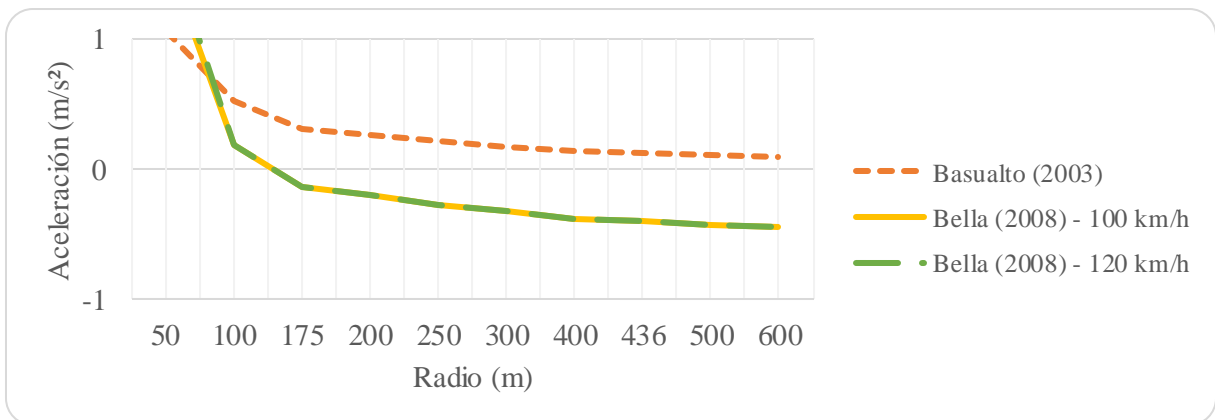


Figura 2.6 Modelos de aceleración en función del radio de la curva

De la Figura 2.6, para los modelos de aceleración, se observa que:

- i. El modelo de Bella (2008) no es sensible a la velocidad de aproximación a la curva. Además, para radios mayores a 150 m entrega aceleraciones negativas, lo que no coincide con los patrones de aceleración/deceleración observados.
- ii. Las aceleraciones disminuyen a medida que el radio de la curva aumenta. Esto se explica porque a mayor radio, el conductor tiende a percibir la curva como recta, manteniendo una velocidad más uniforme.

Bella (2008), a diferencia de los otros autores analizados que midieron conducción real, utilizaron un simulador de conducción en Italia, lo que hace que sus resultados no sean comparables con otros estudios ya que es posible que las condiciones de conducción de terreno no se repliquen a cabalidad en el simulador. Entre otros factores, no existe el riesgo de sufrir un accidente.

2.7 Las aceleraciones como medida de la seguridad vial en curvas horizontales

La geometría de un trazado y la operación de los conductores están directamente relacionada con la seguridad vial del mismo. En ese sentido, existen autores que relacionan las aceleraciones y deceleraciones en la vecindad y en la curva misma, con la consistencia del diseño.

Echaveguren y Sáez (2001) y Echaveguren y Basualto (2003) definen el análisis de consistencia como un instrumento de apoyo a la verificación del diseño geométrico, el cual se fundamenta en la hipótesis de McLean (1981), quien plantea que las inconsistencias se deben a que el trazado induce una variación en la velocidad de operación, lo cual se traduce en continuas aceleraciones y deceleraciones en tramos cortos de la vía. Esto lleva al conductor a tomar decisiones que pueden inducir una situación de accidente o no accidente.

Además, Fitzpatrick *et al.* (2001) demuestran que la velocidad dentro de la curva es variable y que, en combinación con la tangente de entrada y salida, se pueden producir deceleraciones y aceleraciones que tienen una influencia directa en la seguridad vial.

Steyer *et al.* (2000) y Fitzpatrick *et al.* (2001), clasifican el diseño de una curva en función de la aceleración y/o deceleración que experimentan los conductores que circulan por ella. La interpretación de estos criterios indica que, en la medida que no exista consistencia entre los elementos sucesivos de un trazado (tangente-curva-tangente), se requerirán deceleraciones mayores para entrar en la curva y aceleraciones mayores al salir de la misma. En la medida que aumenta la consistencia, se requieren cambios más graduales de velocidad de operación, lo que mejora la consistencia geométrica y la seguridad vial.

2.8 Las tangentes como elementos propios de la curva

En el diseño del trazado horizontal de una carretera, las curvas horizontales y las tangentes de entrada y salida se consideran como elementos independientes. La mayoría de los manuales de diseño geométrico, incluido el Manual de Carreteras de Chile (MOP, 2014), entregan recomendaciones para una longitud mínima y/o máxima de tangente intermedia en el caso de curvas en S, pero no hacen referencia a las tangentes de entrada y/o salida.

Sin embargo, las tangentes no son elementos independientes, forman parte de la curva, y deben ser consideradas en el proceso de diseño como una secuencia tangente-curva-tangente (Lamm, 1988). Esta importancia radica en el hecho que la operación en la tangente está correlacionada espacialmente con la operación en la curva horizontal. Así, la velocidad con la que circula un conductor en la tangente de entrada depende de las características geométricas de la curva inmediatamente posterior, y viceversa, y la operación en la tangente de salida está condicionada por la curva inmediatamente anterior.

En la literatura se reconoce la existencia de correlación entre elementos sucesivos. En ese sentido, Basualto (2003) indica que es necesario estudiar las variaciones de velocidad ocurridas en el interior de la curva y el efecto que ocasiona la tangente de aproximación y salida en esos cambios de velocidad. Crisman *et al.* (2004) y Perco y Robba (2005) muestran que la elección de velocidad de un conductor está condicionada por las características geométricas de la carretera inmediatamente anterior al punto en cuestión. Echaveguren y Díaz (2013) concluyen que la

longitud de la tangente de entrada tiene relación con la distancia requerida por los conductores para adaptar la velocidad antes de entrar a la curva, resultado coincidente con lo obtenido por Altamira *et al.* (2014).

La Tabla 2.4 resume la longitud de tangente de entrada y salida propuestos por algunos autores.

Tabla 2.4 Longitud de tangentes

Autor(es)	Tangente de entrada (m)	Tangente de salida (m)
McFadden y Elefediariou (2000)	200	No proponen
Fitzpatrick <i>et al.</i> (2001)	200	No proponen
Cristman <i>et al.</i> (2007)	114 (promedio, con un mínimo de 40 y un máximo de 280 m)	No proponen
Dell' Acqua <i>et al.</i> (2008)	115	122
Bella (2008)	210 (promedio, con un mín. de 100 y un máx. de 322 m)	310 (promedio, con un mínimo de 166 y un máximo de 654 m)
Campbell <i>et al.</i> (2008)	75 – 100	No proponen
Altamira <i>et al.</i> (2014)	150 – 230	150 – 270

Cabe destacar que la longitud de tangente de entrada de 200 m propuesta por McFadden y Elefediariou (2000) y Fitzpatrick *et al.* (2001), y utilizada por Echaveguren y Basualto (2003) y Díaz (2013), entre otros, no se basa en un análisis estadístico u otro tipo de estudio científico, sino que se trata de una recomendación práctica de los autores.

2.9 Conclusiones

En este capítulo se realizó una descripción teórica de la aceleración y, a partir de un perfil de velocidad típico, se derivó un perfil de aceleraciones para curvas en S. Se concluyó que dicho perfil posee falencias importantes porque asume, entre otras cosas, aceleraciones/deceleraciones constantes en distintos puntos del trazado. Además, se mostró que este perfil no posee continuidad, lo que resulta contra intuitivo al querer representar el comportamiento de cualquier conductor.

Se analizó el estado del arte identificando dos métodos para obtener aceleraciones y deceleraciones. El primero, y más utilizado, consiste en calcular estos valores a partir de mediciones puntuales de velocidad en distintos puntos del trazado, mientras que el segundo mide directamente los valores

de aceleración y deceleración. La tecnología asociada a cada una de las metodologías también es variable. Para mediciones de velocidad se ha utilizado tecnología GPS y pistolas laser (radar) mientras que para mediciones directas de aceleración se ha usado un simulador de conducción.

Los estudios previos se pueden clasificar en dos grandes grupos: valores de aceleración constante, pudiendo estar estratificados por radio de la curva o no, y modelos de aceleración que consideran explícitamente variables geométricas, donde destacan el radio de la curva y la velocidad de aproximación en la tangente de entrada como las más utilizadas. Sin embargo, no existe coincidencia entre los resultados de los modelos propuestos por diversos autores. Particularmente, según un estudio realizado en Chile, se observa que la mayoría de los valores de aceleración y deceleración propuestos en el estado del arte sobrestiman los resultados obtenidos en el país.

Se advirtió la importancia de conocer los valores de aceleraciones y deceleraciones en un trazado geométrico, particularmente en las curvas, ya que éstos se relacionan directamente con la seguridad vial, con la comodidad de los conductores y usuarios de los vehículos en circulación y son necesarios para construir perfiles de velocidad.

Finalmente, se concluye que los modelos desarrollados en la literatura, tanto para aceleración y deceleración, pueden mejorarse. Particularmente, se puede precisar la variación de velocidad en las cercanías de una curva horizontal o en una curva de inflexión en S y en la curva misma, ya que resulta poco realista y contra intuitivo asumir valores únicos y constantes de aceleración/deceleración en toda la curva.

CAPÍTULO 3 DISEÑO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En este capítulo se describe el diseño experimental que permitió definir el tamaño muestral mínimo necesario para realizar el estudio con una determinada potencia estadística. Está dividido en tres secciones: en la primera se define el diseño factorial, se describen las variables independientes con sus respectivos niveles y se presenta la matriz factorial; en la segunda se define el tamaño muestral para cada una de las celdas de la matriz y, en la última, se presentan las conclusiones del capítulo.

3.2 Diseño factorial

El diseño factorial completo es un método experimental que consiste en cruzar todos los niveles de todas las variables explicativas, con el fin de estudiar la interacción de cada una de ellas.

Se realizó un diseño factorial completo, identificando dos grupos de variables independientes: las variables geométricas y las variables operativas, cada una de ellas con diferentes niveles. Este diseño experimental busca conocer la cantidad mínima de datos que se requieren para asegurar la representatividad de la muestra y el rango de validez de los resultados obtenidos.

3.2.1 Variables dependientes e independientes

La variable dependiente es la aceleración longitudinal, en m/s^2 , y las variables explicativas o independientes, se identificaron a partir del análisis del estado del arte y se clasificaron en dos grupos:

a) **Variables geométricas:** son aquellas que forman parte de la configuración geométrica del trazado. Pertenecen a este grupo el radio de la curva de entrada (R_e), longitud de tangente

3.3 Tamaño muestral

El tamaño muestral se determinó a través del análisis de potencia empleando los métodos de Cohen (1988), aplicados mediante el *software* GPower 3.0.5. El análisis consideró una evaluación a priori del test F, con una interacción total de variables, para una confiabilidad, potencia y efecto tamaño determinado. La especificación de los datos de entrada para el análisis se muestra a continuación:

N° de factores	: 4	Efecto tamaño (f)	: 0,25 (efecto tamaño medio)
N° de grupos	: 162	Error probable (α)	: 0,05 (5%)
Grados de libertad	: 40	Potencia (1- β)	: 0,95 (95%)

En la Figura 3.1 se muestra la variación de la potencia estadística en función del tamaño muestral, para un experimento ANOVA *a priori* y un efecto tamaño dado.

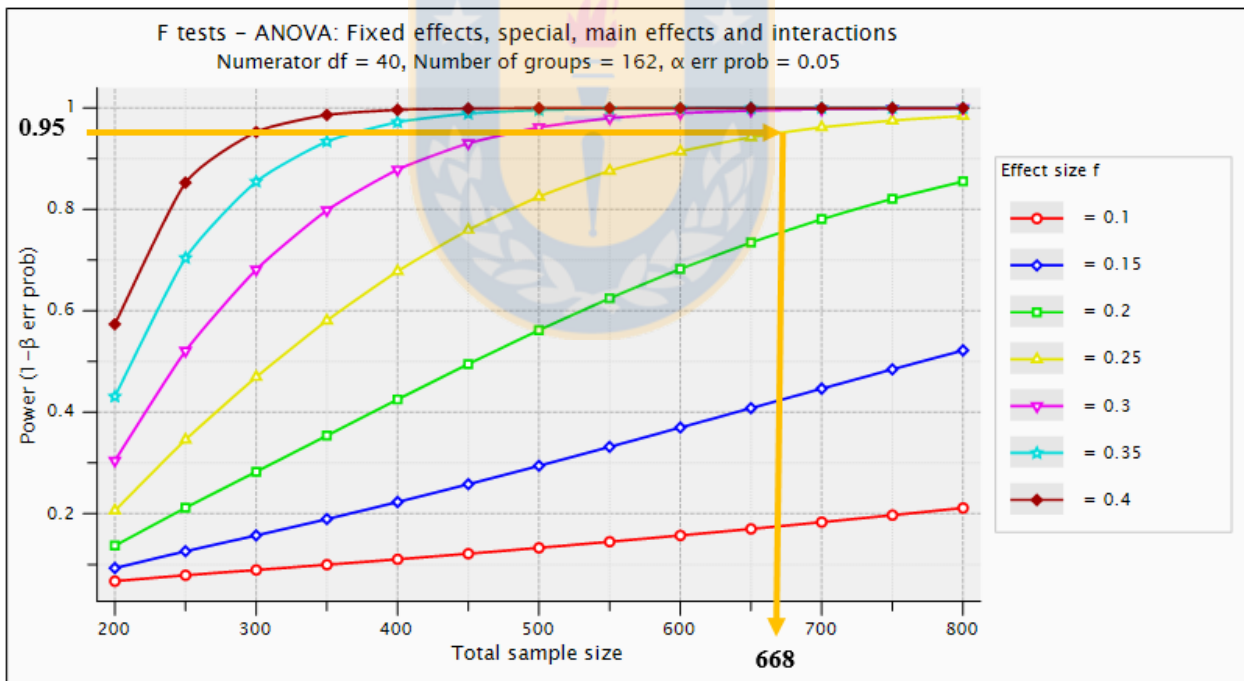


Figura 3.1 Potencia estadística en función del tamaño muestral y del efecto tamaño, para un experimento ANOVA *a priori*

A partir del gráfico anterior, se escoge un tamaño muestral mínimo de 668 muestras, las cuales distribuidas homogéneamente en la matriz, lleva a cinco réplicas por celda.

Más allá de que el diseño experimental indique que se requieren cinco muestras por celda, se debe tener en consideración que la matriz factorial definida en la sección 3.2 es una herramienta teórica que considera todas las combinaciones posibles de las variables independientes y sus respectivos niveles. Sin embargo, por normativas y restricciones de diseño, algunas de esas combinaciones geométricas no existen y no es posible tener registros en todas las celdas de la matriz factorial.

Lo anterior se traduce en que algunas o varias celdas de la matriz factorial de la Tabla 3.1 no tendrán datos y no se podrán emitir inferencias o conclusiones respecto a esas combinaciones geométricas.

3.4 Conclusiones

En este capítulo se definió la matriz factorial que contiene las variables independientes del estudio, las que se clasificaron en variables operacionales y geométricas. La variable operacional es la velocidad de aproximación, con seis niveles y las variables geométricas son el radio de entrada, el radio de salida y la longitud de tangente intermedia, con tres niveles cada una, reflejando tangentes cortas, medias y largas.

Se desarrolló el diseño experimental que permitió definir que el tamaño muestral mínimo, para una potencia estadística del 95%, es de cinco réplicas por celda, con un efecto tamaño medio y un error probable del 5%. Este tamaño muestral mínimo es el que permite estudiar el fenómeno, garantizando la representatividad de la muestra.

CAPÍTULO 4 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1 Introducción

En este capítulo se describe la metodología de recolección y el procesamiento de los datos de terreno que permitió confeccionar una base de datos de trabajo. Se comienza con la descripción del equipo de trabajo, sus principales características y la técnica de medición usada en terreno. En seguida, se presenta la base de datos utilizada en la investigación y se detalla el proceso de confección de ésta. A continuación, se delinea el proceso de identificación de la velocidad de aproximación a la curva y se asignan los datos a la matriz factorial definida en el capítulo anterior. Finalmente, se plantean las principales conclusiones del capítulo.

4.2 Mediciones de campo

El proceso de captura de datos no formó parte de esta Tesis, sino que se trabajó con datos existentes, medidos por Díaz (2013), basado en la experiencia de Fonseca (2012) y Arellano (2013). Las mediciones se realizaron en Chile, en las regiones del Maule y del Biobío.

El trabajo de Díaz (2013) se enfocó exclusivamente en el estudio de la velocidad de operación. En esta investigación se utilizó la base de datos de aceleraciones longitudinales, la cual no había sido analizada anteriormente.

4.2.1 Equipo de medición

El equipo utilizado fue el VBox Mini (ver Figura 4.1). Este equipo es un sistema de adquisición de datos a partir de un sistema de posicionamiento satelital en base a adquisición dinámica de datos (RTK) y medidor de desempeño en pista, de 10 Hz., con capacidad de almacenamiento en tarjeta de memoria y pantalla integrada, capaz de captar señales de ocho satélites.

El VBox Mini permite registrar simultáneamente velocidad instantánea, aceleración longitudinal, lateral y vertical, geometría, *heading* (azimut), entre otras variables de interés, con una frecuencia de registro cada 0,1 segundos.



Figura 4.1 Equipo VBox mini (Racelogic, 2008)

En la Tabla 4.1 se muestra la precisión del equipo para las variables de interés de este estudio.

Tabla 4.1 Precisión del equipo VBox Mini (Racelogic, 2008)

Variable	Precisión
Aceleración	1,00%
Azimut	0,2°
Velocidad	0,2 km/h
Distancia	0,05%
Precisión absoluta	2,5 m 95% CEP ³

El equipo VBox cuenta con el *software* VBox Tools (Racelogic, 2008), el que permite generar informes de los datos recopilados de acuerdo a las necesidades del estudio. Posee herramientas gráficas, de mapas, de información en directo, de acoplamiento y suavización de datos, y de configuración, las que al combinarlas permiten generar una base de datos muy versátil.

Para este estudio se utilizaron dos herramientas de procesamiento del *software*: i) “*Report generator*”, que permitió construir una tabla de registro de todas las variables requeridas en el estudio y exportarlas a Excel® y ii) “*Kalman Filter*”, la cual permitió suavizar los registros eliminando perturbaciones ambientales y acoplando las mediciones con la geometría.

³ CEP = *Circle Error Probable*. 2,5 m 95% CEP indica que el 95% del tiempo, la medición de la posición se ubicará en un círculo de radio 2,5 m.

El uso del equipo VBox Mini, para mediciones de velocidad, fue validado por Echaveguren *et al.* (2011) a través de un estudio de repetibilidad y reproducibilidad. Además, Echaveguren *et al.* (2012) observaron que el equipo entrega buenos registros de datos en terrenos abiertos y que presenta errores en sitios escarpados o con presencia de obstáculos laterales.

4.2.2 Metodología de recolección de datos

Las mediciones de terreno fueron efectuadas en un vehículo liviano, en el que se instaló el equipo VBox Mini, mediante la técnica de *car following* o seguimiento vehicular (Wagner, 2005), usando un conductor único. Esta técnica permite obtener directamente las variables operacionales del vehículo seguido y las variables geométricas de la vía, en forma directa o indirecta.

La técnica de *car following* es una de las múltiples alternativas existentes para el registro de datos de vehículos circulando por la vía, que posee ventajas con respecto a otros métodos, como el uso de la pistola láser, por ejemplo, pero donde también es posible identificar fuentes de error.

Dentro de las ventajas destacan que la metodología, y particularmente la tecnología utilizada, permite obtener registros continuos de todas las variables que el dispositivo es capaz de medir y no sólo mediciones puntuales de velocidad, como en el caso del radar. Además, evita el sesgo que produce la medición con pistola laser que hace que los conductores reduzcan su velocidad en siete km/h, en promedio (Yang y Hassan, 2008). Como fuentes de error posibles está la no existencia de una brecha constante entre el vehículo en seguimiento y el que sigue, una mala replicación de la trayectoria del vehículo objetivo por parte del conductor del vehículo seguidor, fallas asociadas a la caída de la señal satelital y el error propio del equipo de medición, entre otras. Los errores asociados a la metodología se pueden minimizar usando un conductor único y capacitado. Sin embargo, aquellos asociados al funcionamiento del equipo, no pueden ser controlados por el usuario, pero sí por las condiciones de medición (por ejemplo los días nublados, con viento excesivo, lluvia y/o tormenta eléctrica, afectan la recepción de la señal de los satélites en el equipo).

4.3 Base de datos de geometría

La base de datos de geometría utilizada en esta investigación fue generada por Díaz (2013), quien realizó un procesamiento de los datos registrados en terreno para reconstituir geoméricamente las curvas, identificando los parámetros que las describen (radios, ángulos de deflexión, desarrollos de las curvas de entrada y salida, longitud de la tangente intermedia y posición de los puntos PC1, MC1, FC1, PC2, MC2 y FC2 respecto del punto de inicio de la medición). Sin embargo, el procesamiento de la base de datos de aceleraciones y velocidades se realizó íntegramente en esta Tesis; del trabajo de Díaz (2013) se utilizaron las mediciones de terreno sin procesar.

Los radios de entrada y salida varían entre 190 y 687 m, la longitud de tangente intermedia fluctúa entre 87 y 1341 m, los ángulos de deflexión están entre 18 y 106 g y los desarrollos de curva entre 97 y 402 m. Las curvas seleccionadas, su geometría y cantidad de repeticiones se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Base de datos de geometría, Díaz (2013)

N°	N° rep.	Curva	R ₁ (m)	W ₁ (g)	D ₁ (m)	LT _i (m)	R ₂ (m)	W ₂ (g)	D ₂ (m)
1	16	4.1.1.1	456,96	45,78	328,60	677,40	456,96	53,33	382,80
2	20	7.1.1.2	456,96	53,33	382,80	677,40	456,96	45,78	328,60
3	21	11.1.2.1	626,70	40,86	402,23	717,93	509,19	46,86	374,80
4	20	12.1.2.2	509,19	46,86	374,80	717,93	626,70	40,86	402,23
5	19	19.5.1.2	455,33	29,03	207,63	479,26	221,97	45,24	157,74
6	23	20.6.1.2	221,97	45,24	157,74	479,26	455,33	29,03	207,63
7	21	21.6.1.1	488,13	38,57	295,74	970,87	465,94	17,67	129,33
8	20	22.6.1.2	465,94	17,67	129,33	970,87	488,13	38,57	295,74
9	32	37.8.1.1	340,16	36,25	193,69	113,03	311,82	43,31	212,13
10	29	41.8.1.2	311,82	43,31	212,13	113,03	340,16	36,25	193,69
11	30	44.9.1.1	222,50	106,25	371,35	223,96	192,84	89,12	269,96
12	32	46.9.1.2	330,00	40,83	211,65	681,03	192,84	89,12	269,96
13	33	47.9.1.2	192,84	89,12	269,96	223,96	222,50	106,25	371,35
14	30	50.10.1.1	190,43	47,19	141,16	86,75	190,43	32,35	96,77
15	31	52.10.1.2	190,43	32,35	96,77	86,75	190,43	47,19	141,16
16	31	54.11.1.1	686,53	17,69	190,77	1340,73	686,53	19,22	207,27
17	19	55.11.1.2	686,53	19,22	207,27	1340,73	686,53	17,69	190,77
18	30	60.13.1.1	516,90	47,06	382,10	607,31	675,95	16,87	179,12
19	21	61.13.2.2	327,45	51,92	267,05	434,00	446,52	41,42	290,52
20	21	62.13.2.2	401,87	45,35	286,27	176,93	446,52	40,86	286,59
21	22	63.13.3.2	252,98	59,56	236,68	259,58	357,14	50,39	282,68
22	21	66.15.1.1	355,20	46,41	258,94	225,41	192,40	77,45	234,07
23	21	67.15.1.2	192,40	77,45	234,07	225,41	355,20	46,41	258,94

Nomenclatura de la tabla 4.2:

- N° es el número correlativo de la curva,
- $N^\circ \text{ rep.}$ es el número de repeticiones válidas medidas en cada curva,
- Curva (A.B.C.D) es la codificación de las vías (según Tabla 4.3),
- R es el radio de la curva (m),
- W es el ángulo de deflexión (g),
- D es el desarrollo circular (m),
- LT_i es la longitud de la tangente intermedia (m) y
- Los subíndices 1 y 2 hacen referencia a las curvas de entrada y salida, respectivamente.

Tabla 4.3 Codificación de las vías, Díaz (2013)

Código	Descripción
A	Número correlativo asignado a cada conjunto de curvas.
B	Número asignado a cada ruta (ver Tabla 4.4).
C	Sector o ubicación, para una misma ruta, medido según kilometraje de la ruta.
D	Sentido (1 en sentido positivo del kilometraje y 2 en sentido opuesto).

Tabla 4.4 Número de ruta - código B, Díaz (2013)

Ruta	Código	Región	Ruta	Código	Región
128	1	Maule	N-69	10	Biobío
P-22	5	Biobío	O-50	11	Biobío
N-50	6	Biobío	O-364	13	Biobío
N-59-Q	8	Biobío	Q-90	15	Biobío
N-66	9	Biobío			

Las repeticiones de aceleraciones y velocidades de cada una de las 23 curvas de la Tabla 4.2 se procesaron con el *software* VBox Tools. El trabajo realizado contempló los siguientes pasos:

- i) Se aplicó el filtro de Kalman para eliminar las caídas de satélite (*dropouts*) y acoplar las mediciones en tiempo y geometría. Luego de distintas pruebas, se eligió aplicar el filtro con los valores que el *software* entrega por defecto: filtro nivel medio (50%).
- ii) Posteriormente, se utilizó la herramienta “*Report Generator*” para obtener los registros de cada variable medida, vinculadas al km 0,00 de cada trayectoria, cada 0,1 segundos. Los datos se exportaron a una planilla Excel®.

iii) Para cada repetición se identificaron los puntos representativos de la trayectoria seguida por el vehículo (PC1, MC1, FC1, PC2, MC2 y FC2), lo que permitió calcular la geometría percibida por el conductor, trabajo que fue realizado por Díaz (2013). La ubicación de los puntos característicos se muestra en la Figura 4.2.

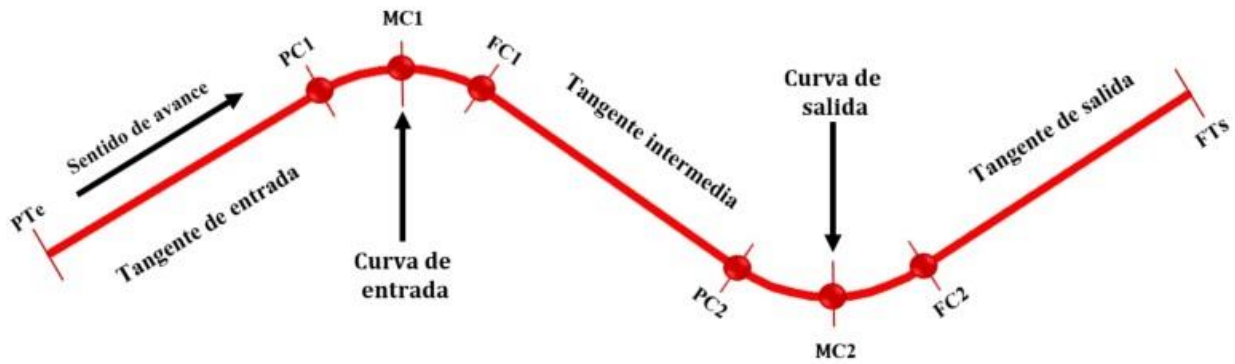


Figura 4.2 Puntos característicos de la trayectoria en una curva en S

En la Figura 4.2 PTe es el principio de la tangente de entrada, PC, MC y FC son el principio, mitad y final de curva y FTs es el final de la tangente de salida. Los números 1 y 2 hacen referencia a la curva de entrada y salida, respectivamente.

4.4 Identificación de la velocidad de aproximación

La velocidad de aproximación es la velocidad a la que circula el conductor en el momento que inicia las maniobras para ingresar a la curva. Este parámetro resulta particularmente importante en este trabajo porque es una de las variables que define la agrupación de la matriz factorial y requiere ser conocida para asignar registros a dicha matriz.

El procedimiento adoptado para identificar gráficamente esta variable se detalla en el Anexo 4.1.

Cabe destacar que, si bien es cierto existe una suerte de interpretación al ubicar gráficamente la posición de la velocidad de aproximación, el método desarrollado y empleado posee la particularidad de ser lo suficientemente preciso para el nivel de error aceptable en este trabajo, lo que hace confiable continuar con los análisis en función de estos resultados.

4.5 Asignación de datos a la matriz factorial

Conocidas las variables geométricas y operativas de cada repetición de la base de datos, se asignaron las mediciones a la matriz factorial. La cantidad de repeticiones por celda se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Matriz factorial con asignación de mediciones

		Radio de la curva de entrada, Re (m)									Radio de la curva de salida, Rs (m)									Columna		
		< 200			201 - 400			> 400			< 200			201 - 400			> 400					
		Longitud de la Tangente Intermedia, LTi (m)									Radio de la curva de salida, Rs (m)									Columna		
		< 200			201 - 400			> 400			< 200			201 - 400			> 400					
v _{ap} (km/h)		< 200	201 - 400	> 400	< 200	201 - 400	> 400	< 200	201 - 400	> 400	< 200	201 - 400	> 400	< 200	201 - 400	> 400	< 200	201 - 400	> 400	> 400		
		≤ 70	8		X	X					X		X	X								X
71 - 80	15		12	7					13	X	X		9	X							7	B
81 - 90	16		12	23					13	10	6		18	9							14	C
91 - 100	12		27	10					22	19	16		X	27							42	D
101 - 110	10	-	-	8	X	-	-	-	21	9	6			20							36	E
111 - 120	-	-	-	X		-	-	-	10	X	7			15							16	F
Fila	1		2	3					4	5	6		7	8								9

Esta matriz posee un total de 525 repeticiones, de las 563 existentes, repartidas en 35 de las 162 celdas. El resto de las mediciones fueron desechadas ya que, al poseer velocidades de aproximación mayores a 120 km/h, no se ajustaron a la distribución de grupos de la matriz factorial. Tampoco se amplió la cantidad de columnas por tener baja representatividad dentro de la muestra. Además, se descartaron del análisis las celdas con menos de cinco registros, obedeciendo a los resultados del diseño experimental del Capítulo 3.

Cabe destacar que no se completó la matriz factorial porque realizar mediciones no formaba parte de los alcances de este trabajo. Tampoco se utilizaron herramientas de simulación porque no existe evidencia que muestre que la mezcla de datos obtenidos por distintos métodos no conduce a errores al momento de analizarlos.

Según se indica en la matriz de la Tabla 4.5, las filas se denotan por letras y las columnas por números. Así por ejemplo, la celda 1-A es la primera celda de la matriz y la celda 9-F es la última. Esta notación se utiliza en capítulos posteriores.

En la Tabla 4.5 las celdas marcadas con una “X” son aquellas que se descartaron del análisis por poseer baja representatividad (menos de cinco registros) y las celdas marcadas con un “-“ son aquellas combinaciones físicamente poco factibles de encontrar en terreno, ya sea por restricciones de diseño o por restricciones operativas. Por ejemplo, difícilmente se podrán observar velocidades de aproximación entre 110 y 120 km/h antes de una curva de radio menor a 200 m.

4.6 Conclusiones

Para la base de datos de trabajo se seleccionaron 23 curvas, contenidas en nueve rutas distintas entre las regiones del Maule y del Biobío, obteniendo un total de 563 mediciones, de las cuales 525 fueron válidamente asignadas a 35 celdas de la matriz factorial, las que serán analizadas en capítulos posteriores. El resto de los datos no forman parte del análisis.

El rango de validez de los resultados de este trabajo estará dado por las combinaciones geométricas y operativas (celdas de la matriz factorial) en las que efectivamente se tienen al menos cinco registros; para el resto de las celdas no será posible entregar resultados ni conclusiones.

Respecto a la asignación de datos a la matriz factorial, se observó que la mayoría de las curvas de la base de datos poseen radios de entrada y salida muy parecidos entre sí, lo que obedece a criterios normativos y de diseño, y es muy poco probable identificar curvas que permitan llenar la totalidad de la matriz factorial con datos de terreno. En estas circunstancias se podrían explorar herramientas para modelación de velocidades y aceleraciones a partir de combinaciones geométricas teóricas, lo cual escapa a los alcances de este trabajo.

Finalmente, se destaca que sólo 35 celdas, correspondientes a un 21,6% del total de celdas de la matriz factorial, poseen al menos cinco registros, 13 celdas, equivalentes a un 8,0%, no se analizarán por poseer menos de cinco registros, 29 celdas, correspondientes al 17,9% son combinaciones físicamente poco probables de encontrar y 85 celdas, equivalentes al 52,5% de las celdas, son combinaciones factibles de encontrar pero no se cuenta con datos para analizarlas.

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE ACELERACIONES

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los análisis estadísticos efectuados en este trabajo de investigación. En primera instancia se describe el proceso de construcción de la base de datos de modelación, se analiza la distribución de probabilidades y la relación de los parámetros de la distribución con la geometría de la curva. Luego se estudian los percentiles de aceleración, se compara el uso de la Ecuación 2.2 con la medición directa de aceleraciones y se define la aceleración de operación. Finalmente, se entregan las principales conclusiones del capítulo.

5.2 Discretización de la curva en S

Para el análisis estadístico se definieron 20 puntos de interés dentro del conjunto geométrico. Los primeros ocho se ubican en la tangente de entrada y están en función de la distancia geométrica antes del principio de la primera curva, los cinco siguientes están en la curva de entrada, un punto se ubicó en la mitad de la tangente intermedia, cinco puntos están en la curva de salida y, finalmente, un punto ubicado a 50 m del final de la segunda curva. En la Figura 5.1 se muestra la ubicación de los 20 puntos antes mencionados.

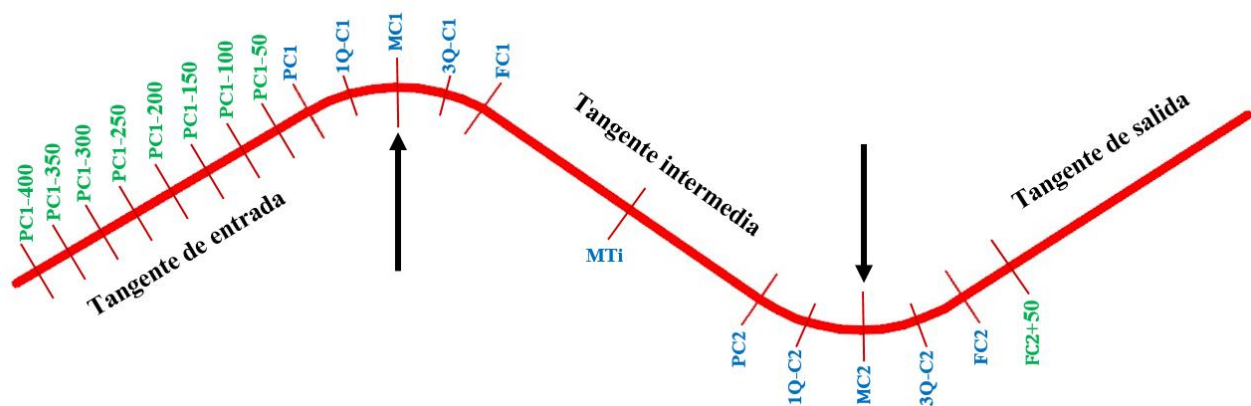


Figura 5.1 Puntos seleccionados para el análisis

En la Figura 5.1 $PCi-X$ denota una distancia “X” antes del punto de inicio de la curva “ I ”, $1Q-Ci$ y $3Q-Ci$ son el primer y tercer cuarto de la curva “ I ”, Mci y Fci son el principio y final de la curva “ I ”, respectivamente, MTi es la mitad de la tangente intermedia y $FC2+50$ es un punto ubicado a 50 m del final de la curva de salida.

En la vecindad de los puntos seleccionados para el análisis, se realizó un agrupamiento de datos para aumentar la cantidad de registros. De este modo, se consideraron 10 datos antes y 10 después del punto central, logrando una muestra de 21 datos por punto, en cada repetición, los que a una velocidad de circulación de 90 km/h (velocidad normal a alta dentro de la muestra), se encuentran en un intervalo de 52,5 m (considerando que los datos fueron registrados cada 0,1 s), lo que representa un rango admisible para este trabajo.

Cabe destacar que el agrupamiento de datos en torno a cada punto de interés, está basado en un análisis estadístico en donde se verificó gráficamente que la distribución de probabilidades de la velocidad de operación en el intervalo, es uniforme. No se verificó la uniformidad de las aceleraciones por ser una variable que posee un comportamiento más oscilante que la velocidad en un intervalo pequeño.

Este agrupamiento permite ampliar la cantidad de datos en torno a los puntos de interés de la curva, los que multiplicados por la cantidad de repeticiones de cada configuración geométrica medida, genera una base de datos suficientemente grande en cada punto discreto, geoméricamente acoplados, para caracterizar la distribución de frecuencias y realizar distintos análisis estadísticos, los cuales se describen en las secciones siguientes.

5.3 Distribución de probabilidades y bondad de ajuste

El análisis estadístico se realizó en cada uno de los puntos definidos en la sección 5.2. Para ello se utilizó el *software* EasyFit® v5.5 (MathWave, 2010), el cual permite ajustar automáticamente alrededor de 50 distribuciones de probabilidad continuas y discretas, y evaluar la bondad del ajuste mediante las pruebas estadísticas de Kolmogorov-Smirnov, Chi-Cuadrado y Anderson-Darling.

En el Anexo 5.1 se listan las distribuciones de probabilidad y los test de bondad de ajuste utilizados por el *software*.

Para todas las celdas no vacías de la matriz factorial de la Tabla 4.5, en todos los puntos característicos definidos en la Figura 5.1, se probaron las distribuciones del Anexo 5.1 y se evaluó la bondad de ajuste de cada una de ellas, listando las 10 distribuciones que mejor se ajustaron a cada punto característico, en cada repetición. Posteriormente, se analizaron las distribuciones que mejor se ajustaron a toda la muestra, las cuales no necesariamente siempre tenían el mejor ajuste en una repetición individual, pero siempre estaban dentro de las primeras 10. Los resultados mostraron que la distribución que se adecuó de mejor forma a toda la base de datos, fue la Burr de cuatro parámetros (Burr 4P).

La distribución Burr, también conocida como Burr Tipo XII o distribución Singh-Maddala, es una generalización de la distribución de Pearson, perteneciente a la familia de las log-logísticas, cuyas variables aleatorias son no negativas (Burr, 1942; Singhi y Madala, 1976; McDonald, 1984; MathWave, 2010). La función de densidad de probabilidad de la distribución Burr 4P, se muestra en la Ecuación 5.1.

$$f(x) = \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right)^{k+1}}, \quad (5.1)$$

donde k y α son los parámetros de forma ($k, \alpha > 0$), β es el parámetro de escala ($\beta > 0$), γ es el parámetro de localización ($-\infty < \gamma < +\infty$) y x es la variable aleatoria continua ($\gamma \leq x < +\infty$).

En las Figuras 5.2 y 5.3 se muestra la función de densidad de probabilidades, FDP, en distintos puntos de la curva de entrada, tangente intermedia y curva de salida, para el caso particular de la curva 47.9.1.2, cuyo radio de entrada es 193 m, la longitud de tangente intermedia es 224 m y el radio de la curva de salida es 224 m y para la curva 54.11.1.1, cuyos radios de entrada y salida son 687 m y la longitud de la tangente intermedia es 1341 m, respectivamente.

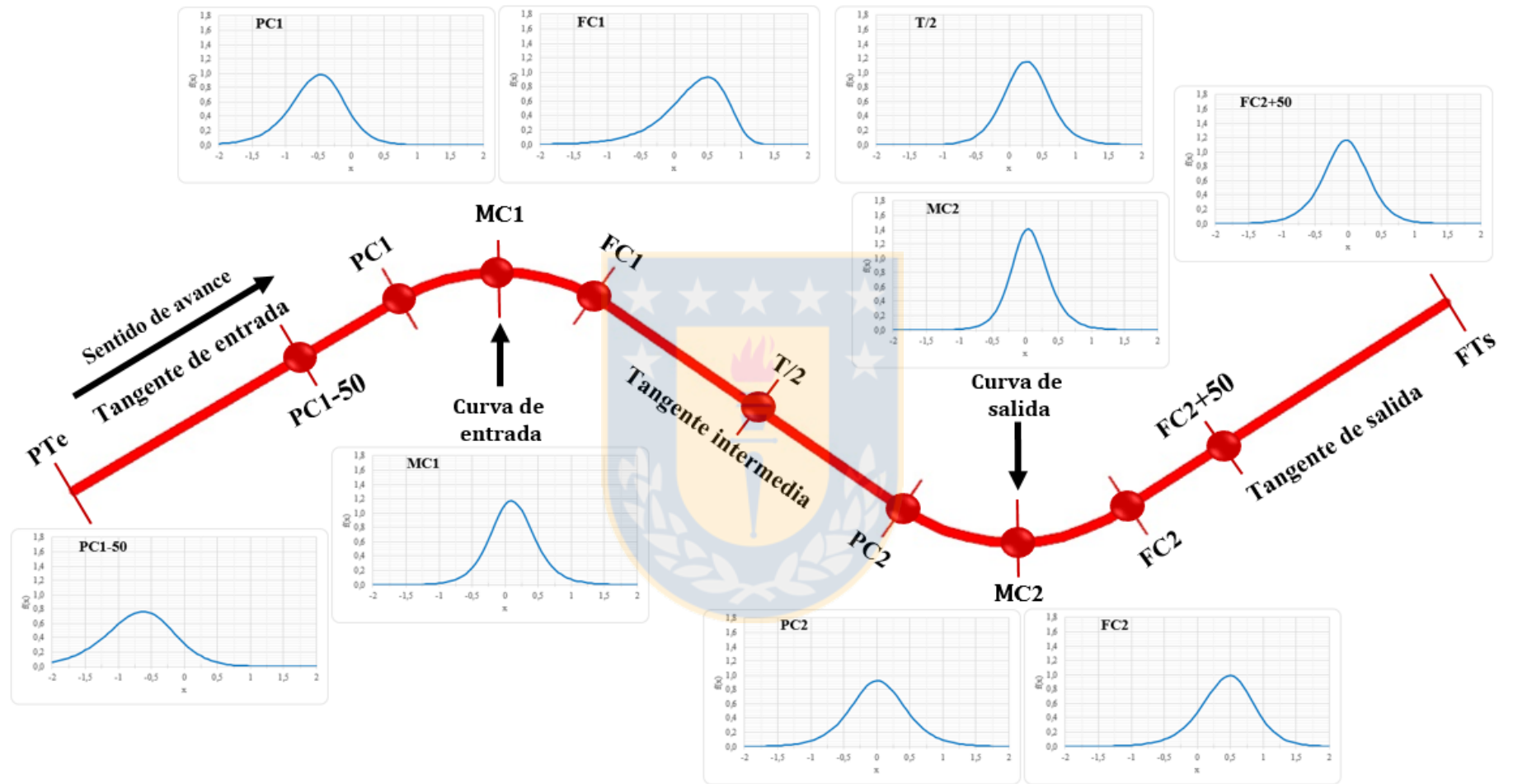


Figura 5.2 FDP en puntos característicos de la curva 47.9.1.2

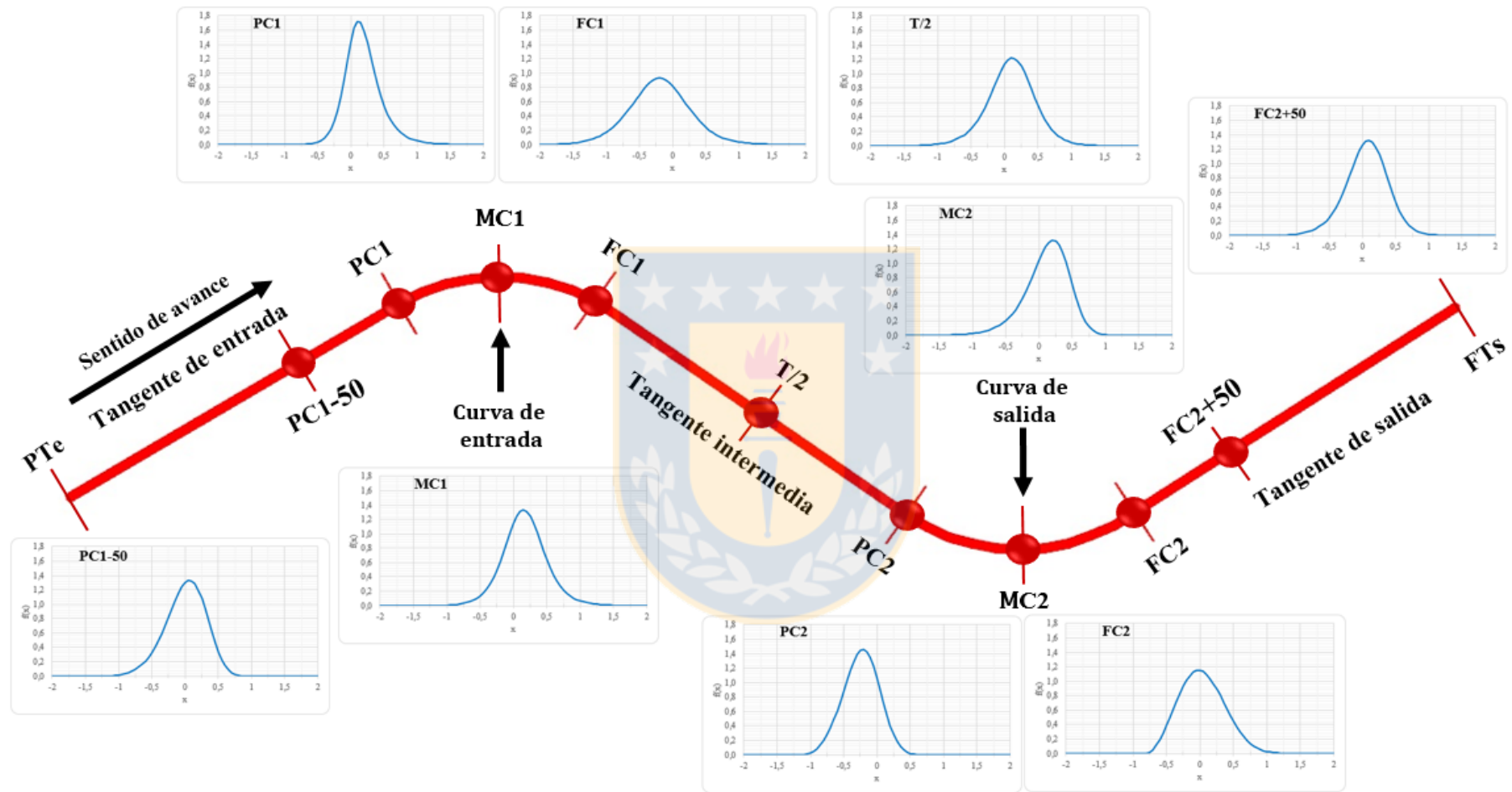


Figura 5.3 FDP en puntos característicos de la curva 54.11.1.1

En la Figura 5.2 se observa que, a medida que el conductor se va adentrando en la curva, la distribución de desplaza hacia la derecha, cambiando también su amplitud y valor máximo. En PC1, el punto más alto de la curva se encuentra en torno a $1,0 \text{ m/s}^2$; en MC1 se observa una distribución de menor amplitud, lo que hace que gran cantidad de la muestra se concentre en torno a un mismo valor (aproximadamente $1,2 \text{ m/s}^2$); en FC1 la distribución se desplaza aún más a la derecha y se torna más achatada, similar a la curva en PC1, pero con la cola hacia el otro extremo. En otras palabras, se observa que el conductor tiende a decelerar entre el principio y la mitad de la curva, para luego acelerar de allí en adelante. La magnitud de las aceleraciones al final de la curva es mayor que en la mitad de esta (la curva se ubica más a la derecha en FC1 que en MC1).

En la tangente intermedia se identifica una distribución más simétrica que dentro de la curva de entrada, centrada en $0,3 \text{ m/s}^2$, dando cuenta que los conductores salen de FC1 y tienden a acelerar en la tangente y, en la curva de salida, se observa un comportamiento similar al de la curva de entrada; el conductor decelera entre PC2 y MC2 y de allí en adelante acelera. A 50 m del final de la curva de salida se distingue una distribución centrada en $0,5 \text{ m/s}^2$ y con la mayoría de la curva de densidad a la derecha del cero, lo que indica que casi todos los conductores van acelerando este punto y que además, el percentil 50 de aceleraciones está alrededor de $0,5 \text{ m/s}^2$.

Estos resultados coinciden con Memon *et al.* (2008), quienes encontraron que los conductores deceleran desde que se acercan a la curva hasta la mitad de ella y luego tienden a acelerar.

En la Figura 5.3 se muestra cómo varía la función de densidad de probabilidad en los principales puntos característicos de la curva 54.11.1.1, cuyas variables geométricas (radio de entrada, radio de salida y longitud de tangente intermedia) son muchos más grandes que en el caso anterior. La principal diferencia en este caso radica en que se observa una mayor variabilidad de la aceleración en cada punto, lo que se refleja en distribuciones con mayor amplitud y más simétricas.

En la Figura 5.4 se muestra la variación de la FDP para los puntos característicos de las curvas de la celda 1-C de la matriz factorial. En ella se observa que la tendencia se mantiene al analizar datos agregados, pero aumenta la dispersión de los mismos.

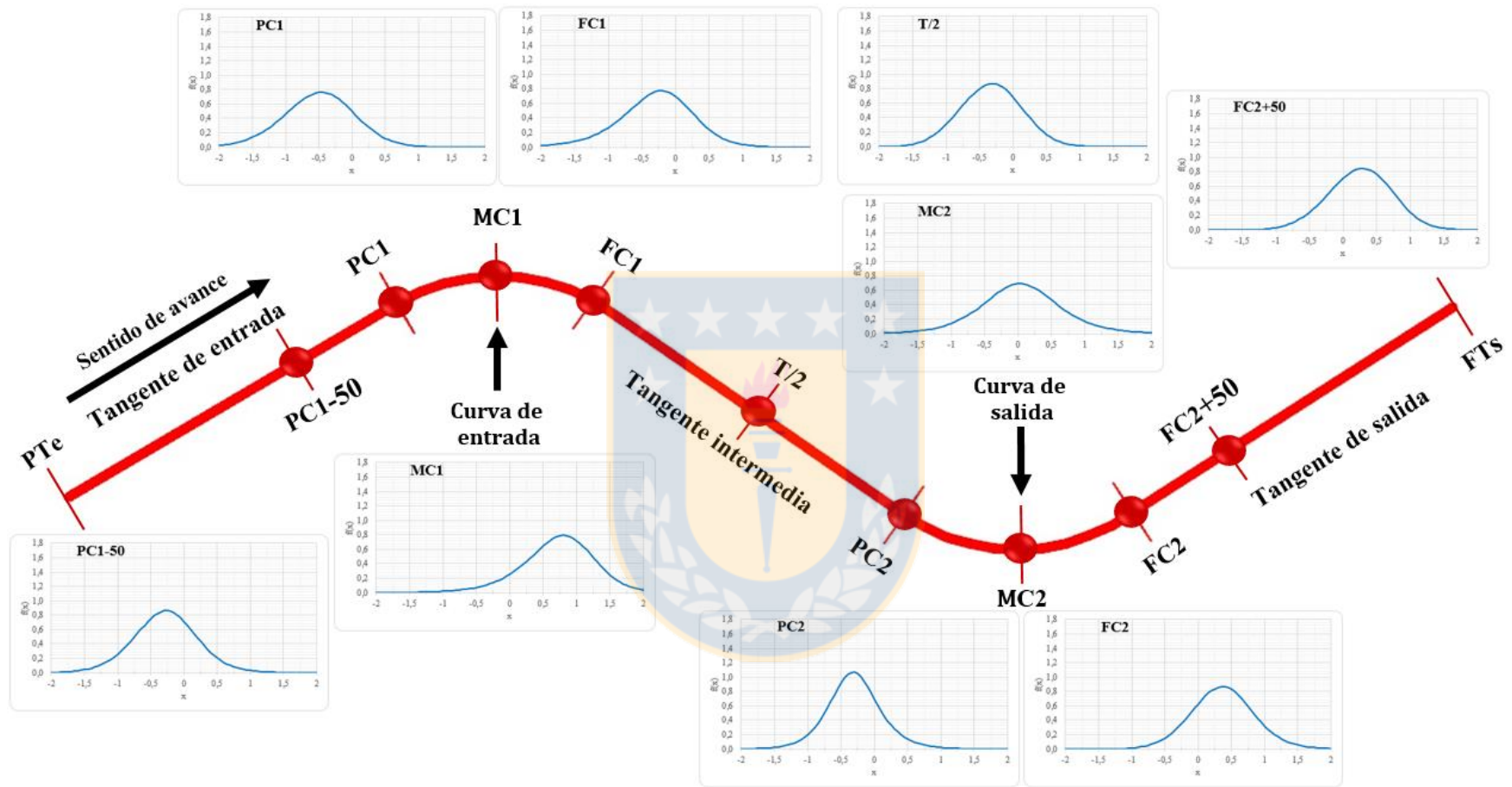


Figura 5.4 FDP en los puntos característicos del conjunto de curvas de la celda 1-C de la matriz factorial

5.4 Parámetros de la distribución

Se realizó un análisis de correlación de los parámetros de la distribución Burr (de k , α , β y γ), para cada repetición de la base de datos, con las características geométricas y operativas de la curva. El objetivo de esto fue estudiar el efecto de la geometría y la velocidad de aproximación en el valor.

Los resultados no fueron concluyentes, mostrando con una correlación máxima del 11%, que no existe una relación matemática entre los parámetros geométricos/operativos y los parámetros de la distribución. En la Tabla 5.1 se muestran las correlaciones de k , α , β y γ con las variables geométricas y operativas de la curva, para los puntos PC1, MC1 y FC1.

Tabla 5.1 Correlación de parámetros de la distribución con variables geométricas y operativas

Parámetro	k			α			β			γ			
	Variable	PC ₁	MC ₁	FC ₁	PC ₁	MC ₁	FC ₁	PC ₁	MC ₁	FC ₁	PC ₁	MC ₁	FC ₁
v_{ap}		0,04	-0,01	0,01	-0,01	-0,01	0,07	0,04	-0,02	0,00	0,03	0,02	-0,09
R_1		0,04	0,02	-0,05	0,01	-0,06	-0,01	0,04	0,01	-0,04	-0,01	0,05	0,02
W_1		-0,03	-0,01	-0,03	0,04	0,02	-0,10	-0,04	-0,02	0,01	0,03	-0,02	0,02
D_1		0,02	0,01	-0,05	0,03	-0,04	-0,05	-0,01	-0,01	-0,03	0,03	0,01	0,02
$1/R_1$		-0,04	-0,03	0,05	0,00	0,06	0,00	-0,04	-0,01	0,03	0,00	-0,04	-0,01
$1/W_1$		0,03	0,01	0,03	-0,05	-0,03	0,09	0,05	0,01	-0,01	-0,03	0,03	-0,01
$1/D_1$		-0,03	-0,02	0,06	-0,04	0,02	0,07	-0,01	0,00	0,02	-0,01	0,01	-0,01
LT_1		0,03	0,05	-0,03	0,02	-0,04	-0,04	0,03	0,04	-0,01	-0,03	0,03	0,05
$1/LT_1$		-0,03	-0,03	0,05	-0,02	-0,01	0,02	-0,03	-0,03	0,02	0,02	0,01	-0,04
R_2		0,06	0,02	-0,07	0,00	0,00	0,00	0,06	0,03	-0,07	-0,01	-0,02	0,01
W_2		-0,08	-0,01	0,05	-0,01	0,06	0,04	-0,04	-0,03	-0,04	0,03	0,01	0,00
D_2		-0,03	0,01	-0,04	-0,01	0,04	0,02	0,00	-0,01	-0,07	0,01	-0,02	0,01
$1/R_2$		-0,05	-0,03	0,09	0,01	-0,02	-0,03	-0,05	-0,04	0,09	0,01	0,03	0,01
$1/W_2$		0,11	-0,01	-0,02	0,00	-0,05	-0,04	0,04	0,01	0,04	-0,02	0,00	0,01
$1/D_2$		0,01	-0,03	0,04	-0,01	-0,04	-0,04	-0,02	-0,02	0,10	-0,02	0,01	0,01

5.5 Media y varianza de la muestra

Se realizó un análisis de correlaciones para vincular la media y la varianza de cada registro de datos con las variables geométricas y operativas de las curvas estudiadas.

Para una distribución Burr de cuatro parámetros, la media, μ , y la varianza, σ^2 , quedan definidas por las ecuaciones 5.2 y 5.3, respectivamente.

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{k+1}} dx, \quad (5.2)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x-\mu)^2 \cdot \frac{\alpha k \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1}}{\beta \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^{\alpha}\right)^{k+1}} dx, \quad (5.3)$$

donde k , α , β , γ son los parámetros de la distribución Burr y x es una variable aleatoria continua.

Cabe destacar que las ecuaciones 5.2 y 5.3 no tienen solución analítica por lo que los cálculos de la media y la varianza se realizaron en el *software* EasyFit 5.5 (Mathwave, 2010).

Los resultados del análisis de correlaciones se muestran en la Tabla 5.2. En ella se observa que la media en PC1 posee una correlación cercana al 45% con el radio de la curva y alrededor del 54% con la longitud de la tangente intermedia. Este nivel de correlación va disminuyendo a medida que los conductores se adentran en la curva. En MC1 el grado de correlación con el radio de la curva es de 39% y de 49% con la longitud de la tangente intermedia. Por su parte en FC1 las correlaciones son aún más bajas: 18% con el radio de la curva y 25% con la longitud de la tangente intermedia.

Con respecto a la varianza, se observa que en PC1 las mayores correlaciones se obtienen para el radio de entrada (-25%) y la longitud de la tangente intermedia (-17%). Nótese que en este caso existe una correlación de signo negativo, lo que indica que a menor radio y/o menor longitud de la tangente intermedia, mayor es la varianza (y viceversa). En MC1 no se observa una correlación importante de las aceleraciones con el radio y la tangente intermedia y en FC1 la mayor correlación se alcanza con el radio (-17%) y el desarrollo de la curva (18%).

La interpretación de estos resultados indica que a medida que los conductores se adentran en la curva, las aceleraciones/deceleraciones medias se van haciendo menos dependientes de la geometría y la varianza va disminuyendo. La aceleración media en PC1 está fuertemente

condicionada por el radio de la curva de entrada y la longitud de la tangente intermedia. En MC1 la correlación se hace menos fuerte y en FC1 disminuye aún más. Del mismo modo, la varianza en PC1 es mucho mayor ya que el valor de la aceleración/deceleración en dicho punto va a depender de la velocidad de aproximación, la cual también posee una dispersión importante. En MC1 la varianza es menor al 10%, lo que indica que las aceleraciones no son muy disímiles entre sí. Finalmente, en FC1 la varianza aumenta un poco ya que los conductores tienen a acelerar.

Tabla 5.2 Correlación de la media y la varianza con las variables geométricas y operativas

		μ_{PC1}	σ^2_{PC1}	μ_{MC1}	σ^2_{MC1}	μ_{FC1}	σ^2_{FC1}
Variable	v_{ap}	-0,011	0,076	0,081	0,147	0,076	-0,048
	R_1	0,447	-0,251	0,394	-0,087	0,182	-0,170
	LT_i	0,541	-0,166	0,486	-0,045	0,254	-0,025
	W_1	0,028	0,036	-0,034	-0,020	-0,082	0,144
	D_1	0,025	-0,046	-0,030	-0,104	-0,014	0,175

5.6 Análisis de los percentiles de aceleración

El análisis de los datos de terreno abarcó tres etapas, las cuales se describen a continuación:

1. Percentiles de aceleración versus geometría de la curva y velocidad de aproximación: Se analizaron gráficamente los percentiles de aceleración para identificar patrones de comportamiento, identificando si el conductor acelera o decelera en cada punto característico del trazado, para distintas combinaciones geométricas y velocidades de aproximación a la curva.
2. Proposición de la aceleración de operación: Se compararon gráficamente las diferencias en los valores de aceleración de distintos percentiles de la base de datos, según la agrupación de la matriz factorial de la sección 4.5, con el fin de identificar aquel que sea capaz de describir de mejor manera a toda la muestra. Se propuso el uso de un determinado percentil para describir los valores de aceleración en distintos puntos del trazado, la cual se denominó aceleración de operación y permitió construir perfiles de aceleración para distintas configuraciones geométricas y velocidades.

3. Aceleración en función de la velocidad percentil 85: Se graficó la aceleración obtenida al aplicar la Ecuación 2.2 y se contrastó con distintos percentiles de aceleración obtenidos por medición directa haciendo uso del equipo VBox. Esto se hizo con la finalidad de validar o invalidar el uso de la expresión derivada de las ecuaciones de la cinemática.

5.6.1 Percentiles de aceleración versus geometría de la curva y velocidad de aproximación

A continuación se presentan gráficas de los percentiles 50, 80, 85, 90, 95 y 99, para distintas combinaciones de geometría y velocidad de aproximación en curvas de inflexión en S, en los principales puntos característicos del trazado, según la agrupación de la matriz factorial de la sección 4.5.

Adicionalmente, se grafica el valor de la aceleración calculada con la Ecuación 2.2, resultado que se analizará en la sección 5.6.3.

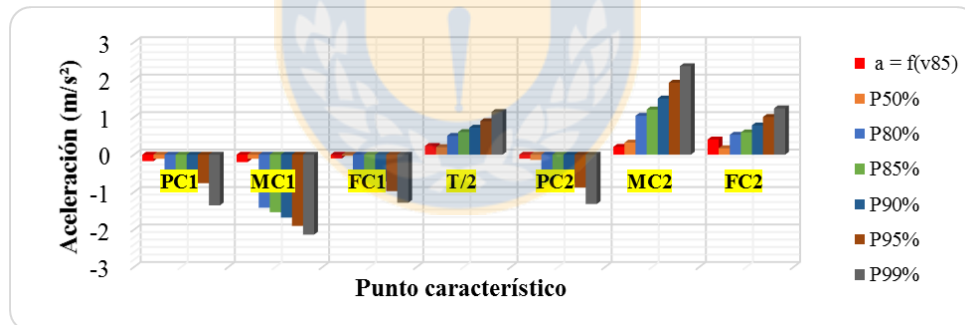


Figura 5.5 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h

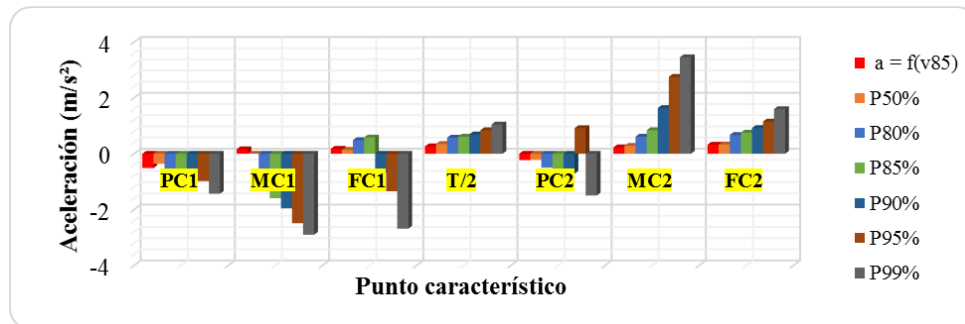


Figura 5.6 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

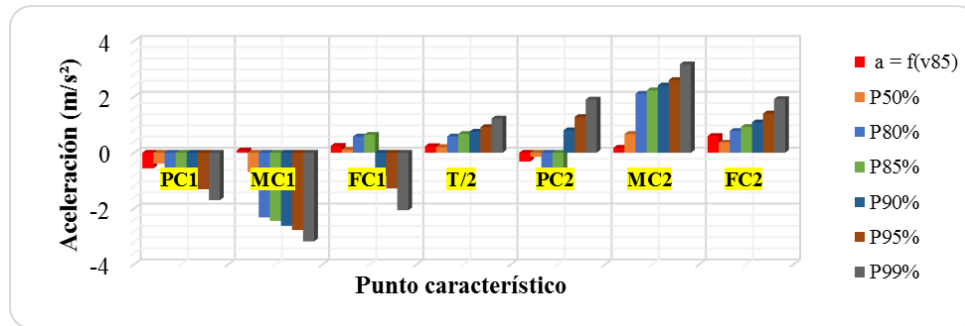


Figura 5.7 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h

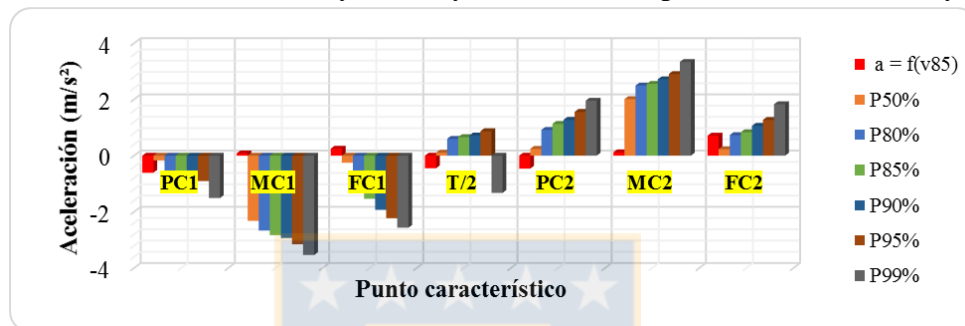


Figura 5.8 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h

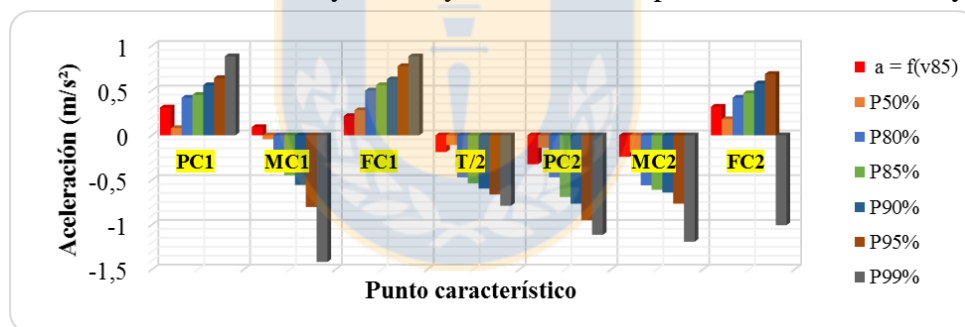


Figura 5.9 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

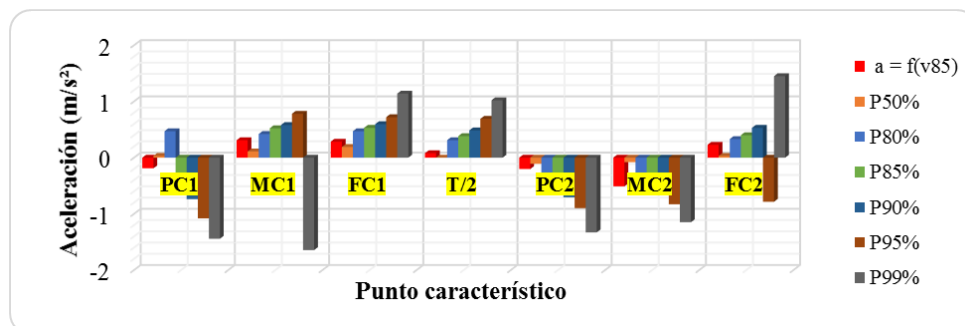


Figura 5.10 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h

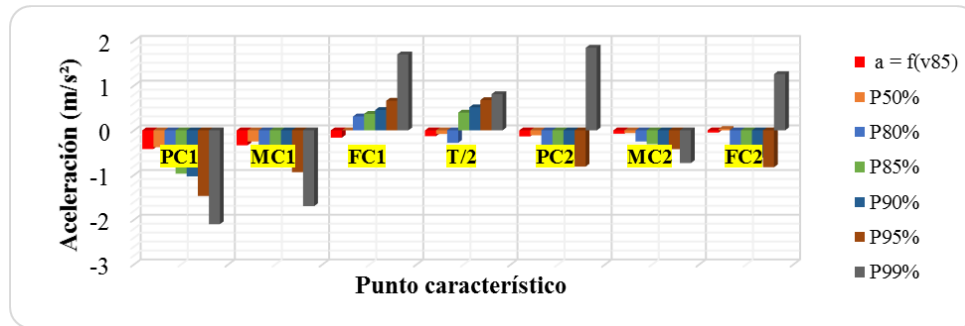


Figura 5.11 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h

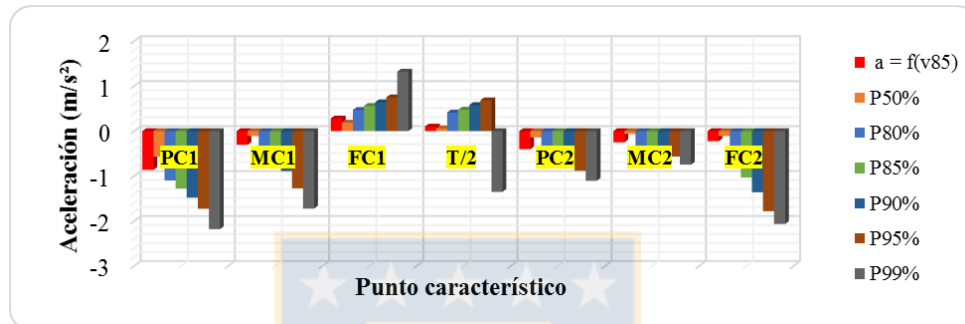


Figura 5.12 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h

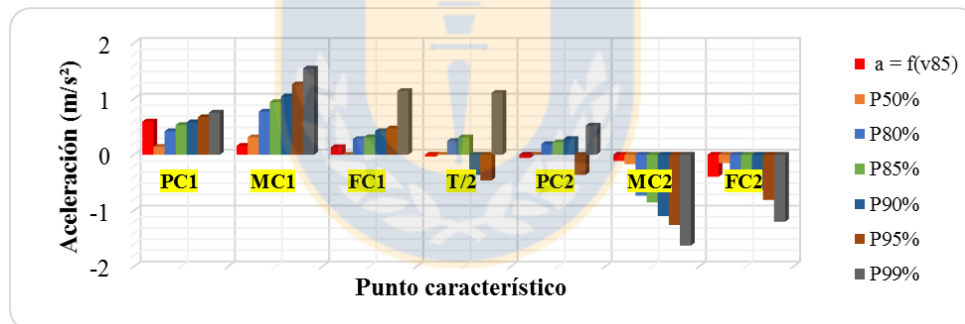


Figura 5.13 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h

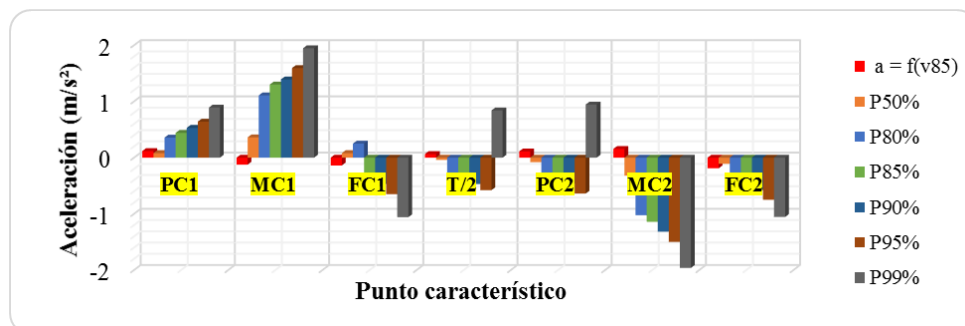


Figura 5.14 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

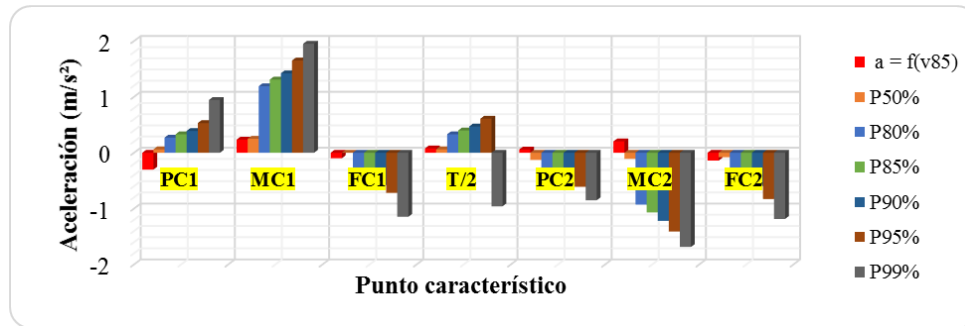


Figura 5.15 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h

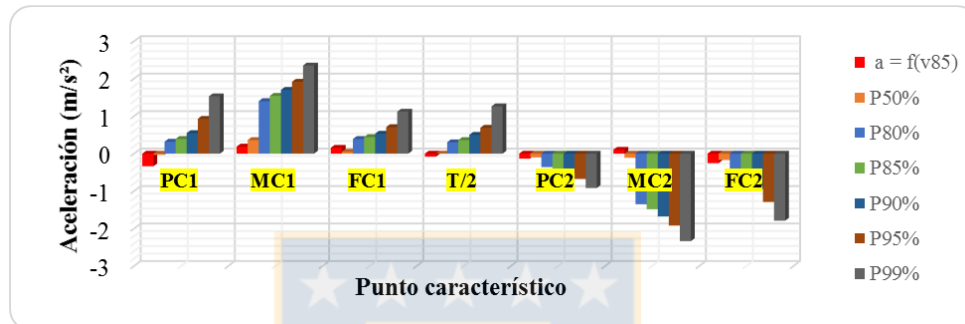


Figura 5.16 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h

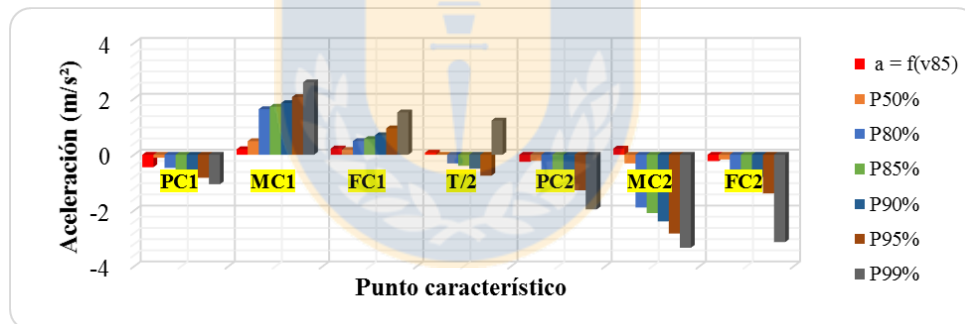


Figura 5.17 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h

En las Figuras 5.5 a la 5.12 se identifica una clara tendencia a decelerar en PC1 y hasta MC1 en el caso de radios de entrada pequeños (menores a 400 m); para radios mayores los conductores no deceleran al ingresar a la curva sino más bien aceleran, lo que se explica por una percepción casi recta de la entidad geométrica (Figuras 5.13 a la 5.17). Estos patrones de comportamiento son independientes de la velocidad de aproximación a la curva.

En la tangente intermedia (T/2) se observa que los conductores tienden a acelerar, lo que permite inferir que las curvas son independientes entre sí, es decir, que la operación en la curva de salida

no está condicionada por la operación en la curva de entrada. Cabe destacar que este resultado es válido para longitudes de tangente intermedia mayores a 200 m (Figuras 5.5 a la 5.17). En PC2 los patrones de comportamiento ya no son tan claros, pero en general se observa una tendencia a decelerar, aunque esto depende de la longitud de la tangente intermedia y de la velocidad deseada por el conductor.

También se observa que las gráficas pierden suavidad en percentiles extremos, lo que indica que existen conductores que se comportan muy distinto al resto de la muestra, lo que permite inferir que en la base de datos existen al menos dos tipos de conductores según el estilo de conducción: conductores agresivos y no agresivos.

En percentiles intermedios, como el percentil 50, se pierde información, por lo que no es un buen descriptor del fenómeno. En la sección 5.6.2 se aborda en mayor detalle la interrogante de qué percentiles resultan ser los mejores descriptores de las aceleraciones y deceleraciones.

Sin embargo, no todos los resultados anteriores se pueden generalizar a toda muestra, pues los patrones de comportamiento varían en función de las variables geométricas. En el Anexo 5.2 se muestran gráficas de los percentiles de perfiles de aceleración longitudinal a lo largo del trazado, para cada celda no vacía de la matriz factorial de la Tabla 4.5.

La Tabla A.5.1, del Anexo 5.3, resume la tendencia a acelerar o decelerar para distintas configuraciones geométricas en combinación con velocidades de aproximación, según las gráficas del Anexo 5.2.

La Tabla A.5.1 en conjunto con los gráficos del Anexo 5.2, entregan la siguiente información:

- i. El valor de aceleración-deceleración en la tangente de entrada (longitud de inicio de maniobras) es variable. Lo mismo ocurre al interior de las curvas y la tangente intermedia.

- ii. Para radios de entrada de hasta 400 m se observa una tendencia a decelerar en PC1. De allí en adelante, ya no es tan claro que los conductores deceleren al entrar a la curva sino más bien aceleran. Esto queda explicado por una percepción casi recta de la curva.
- iii. En longitudes de tangente intermedia mayores a 200 m, se identifica un comportamiento más errático en la curva de salida.
- iv. Velocidades superiores a 100 km/h se asocian a un comportamiento agresivo de los usuarios, lo que en combinación con radios menores a 400 m muestra una conducta errática en la conducción, observándose sucesivas aceleraciones y deceleraciones, de gran magnitud, tanto dentro como fuera de la curva.
- v. Por último, se observa que, en general, la tendencia a acelerar o decelerar en distintos puntos del trazado es independiente de la velocidad de aproximación a la curva y que está fuertemente relacionada con la geometría de la misma, con excepción del punto PC1, donde la velocidad de aproximación sí juega un rol importante.

5.6.2 Proposición de la aceleración de operación

Considerando que la distribución Burr 4P posee una cola asintótica, que se desplaza hacia la izquierda o derecha dependiendo de si priman las aceleraciones o deceleraciones, el número que describe la aceleración de operación está condicionado por la probabilidad de que pequeños cambios en el percentil, impliquen grandes cambios en su magnitud (Altamira *et al.*, 2014).

Se realizó un análisis gráfico de los percentiles 50, 80, 85, 90, 95 y 99 para aceleraciones y deceleraciones, el cual permitió definir que los valores que mejor caracterizan el fenómeno corresponden al percentil 95 debido a que representan el comportamiento de la mayor parte de los usuarios, sin esconder información, como en el caso del percentil 50, y sin verse afectados por valores extremos, como ocurre con el percentil 99.

En el Anexo 5.4 se muestra, para cada celda de la matriz factorial definida en el Capítulo 3, el detalle de la aceleración de operación en cada punto característico de la curva y en el Anexo 5.5 se muestran los perfiles de aceleración de operación (percentil 95), encontrados en este estudio.

La Tabla 5.3 resume los valores típicos de aceleración para la tangente y curva de entrada, de forma agregada y estratificada en función del radio de entrada.

Tabla 5.3 Valores de aceleración para la tangente y curva de entrada, en función del radio

Re (m)	TE⁴	PC1	MC1	FC1
< 200	-0,48	-1,08	-2,10	-1,14
201 - 400	-0,53	-0,98	-1,77	1,22
> 400	-0,26	0,39	1,70	0,15

No se muestran resultados agregados para la tangente intermedia y curva de salida porque en esos elementos geométricos los valores dependen de la configuración geométrica anterior, las cuales son muy disímiles entre sí y no permiten la agregación ya que se podría incurrir en una “falacia ecológica”, la que se refiere a que conclusiones respecto a un grupo pueden no ser verdaderas para los individuos de dicho grupo, introduciendo una importante fuente de incertidumbre en la inferencia ecológica (Greenland, 2001 y Hauer, 2005).

Los resultados para el resto del trazado de la curva de inflexión en S pueden ser consultados en las tablas desagregadas del Anexo 5.4.

De la Tabla 5.3 se concluye que:

- i. Los conductores deceleran en la tangente de entrada para abordar la curva, con un valor de deceleración cercano a $-0,5 \text{ m/s}^2$ para radios menores a 400 m y a $-0,26 \text{ m/s}^2$ para radios superiores.
- ii. La magnitud de la deceleración aumenta a medida que el conductor se adentra en las curvas de radio menor a 400 m; para radios mayores no existe deceleración en la curva, sino que aceleran.

⁴ TE es el valor de aceleración en la tangente de entrada a la curva

- iii. Se infiere que un radio de entrada de 400 m o superior es percibido como una recta por los conductores, resultado coincidente con lo encontrado por Fitzpatrick *et al* (2001), Basualto (2003), Bella (2008) y Pérez *et al* (2010 y 2011), entre otros autores.
- iv. Fitzpatrick *et al.* (2001), midieron aceleraciones de $1,44 \text{ m/s}^2$ y deceleraciones de $-1,77 \text{ m/s}^2$, valores que se asemejan a los de encontrados en este estudio. Sin embargo, los modelos calibrados con dichos datos subestiman los valores reales, arrojando valores un 50% menor.
- v. Un resultado interesante de contrastar es el de Hu y Donnell (2008), quienes encontraron aceleraciones y deceleraciones de $1,46$ y $-1,49 \text{ m/s}^2$, valores muy similares a los encontrados en el presente trabajo. Esta coincidencia se asocia a que en ambos estudios se trabajó con GPS, realizando mediciones directas de aceleración, eliminando el error asociado al uso de la Ecuación 2.2 y de la pistola laser.
- vi. Los trabajos de Lamm *et al.* (1988), Basualto (2003), Figueroa y Tarko (2007) y Dell'Acqua *et al.* (2008), se asocian a valores de aceleración en torno al percentil 50 según los resultados del presente estudio, por lo que no se recomienda usar los valores propuestos por dichos autores. La diferencia puede explicarse por el método de medición (pistola laser) y por el uso de la Ecuación 2.2 para calcular los valores de aceleración y deceleración.
- vii. Altamira *et al.* (2014), al igual que este estudio, utilizaron el equipo VBox Mini para realizar las mediciones de campo. Sin embargo, sus resultados corresponden al percentil 50 de los encontrados en la presente investigación, lo que se asocia a que no trabajaron con mediciones directas de aceleración sino que la derivaron mediante la Ecuación 2.2, haciendo uso de los registros de velocidad obtenidos con el equipo.

5.6.3 Aceleración en función de la velocidad percentil 85

Para comparar los resultados de la sección 5.6.1 y 5.6.2, se usó la Ecuación 2.2 para calcular la aceleración en función de la velocidad percentil 85, en cada punto característico de la curva.

Las gráficas de la Figuras 5.5 a la 5.17 y las Figuras del Anexo 5.2 permiten comparar la aceleración/deceleración de los percentiles 50, 80, 85, 90, 95, y 99, medidos directamente con el equipo VBox, y la aceleración calculada con la Ecuación 2.2, de donde se concluye que, independientemente del punto geométrico que se analice, la ecuación de la cinemática subestima las aceleraciones/deceleraciones, por lo que su uso no es recomendable ya que no representa el comportamiento real de los conductores en la entidad geométrica.

De las Figuras 5.5 a la 5.17 se observa que, en general, el uso de la Ecuación 2.2 arroja valores de aceleración correspondientes al percentiles 50 o inferiores, lo que se explica por la diferencia de velocidades que la expresión contiene en el numerador, las que al estar en puntos cercanos, son muy parecidas entre sí y la diferencia tiende a cero. Si contrariamente se utilizaran puntos más distantes, se asume un comportamiento lineal en el intervalo, lo que tampoco es del todo correcto.

5.7 Conclusiones

En este capítulo se explicó la forma en que se elaboró la base de datos utilizada para la caracterización estadística y las principales conclusiones respecto a la misma.

Se concluyó que la distribución de probabilidades que mejor se ajusta a los datos es la distribución Burr 4P, cuyos parámetros no presentan correlación con las variables geométricas ni operativas. Sin embargo, la media de las aceleraciones en PC1 se correlaciona fuertemente con el radio de la curva y la longitud de la tangente intermedia y existe una correlación inversa con la varianza, lo que da cuenta que la variabilidad aumenta a medida que los radios son menores. En MC1 y FC1 la media de las aceleraciones se hace menos dependiente de la geometría y la varianza disminuye.

La forma gráfica de la distribución muestra una cola asintótica que se desplaza hacia la izquierda o derecha, dependiendo de si priman las deceleraciones o aceleraciones. Este resultado condiciona el análisis de patrones y la modelación ya que, al variar la distribución en cada punto del trazado, los valores no se pueden comparar directamente. Sin embargo, esto también se traduce en una ventaja de la distribución Burr por sobre otras distribuciones estadísticas, pues permite observar

gráficamente patrones de comportamiento de los datos en cada punto del trazado y cómo éstos varían de un lugar a otro sin necesidad de aplicar un test de asimetría, curtosis o similar.

Para la aceleración y para la deceleración, se estudiaron distintos percentiles que permitieron identificar patrones conductuales y definir la aceleración de operación, resultado ser el percentil 95 la aceleración que mejor representa el comportamiento de la mayoría de los usuarios de la vía.

Se observó que para radios menores a 400 m, los conductores deceleran para entrar a la curva y que para radios mayores, ésta es percibida como recta, por lo que no existen patrones de comportamiento muy homogéneos, aunque sí una tendencia a acelerar.

De acuerdo a la conducta de los usuarios en la vía, es posible identificar al menos dos grupos de conductores: conductores agresivos y no agresivos. La diferencia entre ellos radica en que, los primeros muestran valores de aceleración y deceleración mayores en longitudes cortas, cosa que no ocurre con los conductores no agresivos.

Además, se concluyó que independientemente de la forma de obtención de los datos (pistola laser, GPS, etc.), el uso de la Ecuación 2.2 subestima las aceleraciones y sobrestima las deceleraciones.

Se propusieron valores de aceleración y deceleración para la tangente y curva de entrada en función del radio de la curva. Estos valores indican que:

- i. La mayoría de los conductores deceleran en toda la extensión de la curva cuando los radios son menores a 200 m y la mayor deceleración ocurre justo en la mitad de la curva, con un valor de aproximadamente -2 m/s^2 . En el principio y final de curva se observan valores de aproximadamente -1 m/s^2 y en la tangente de entrada la deceleración está en torno a $-0,5 \text{ m/s}^2$.
- ii. Para radios de curva entre 201 y 400 m, los conductores deceleran a $-0,5 \text{ m/s}^2$ en la tangente de entrada. En el principio de la curva continúan decelerando a un valor de -1 m/s^2 , en la mitad de la curva se observa la mayor deceleración, la que corresponde a $-1,8 \text{ m/s}^2$ y en el final de la curva se observa que aceleran a aproximadamente $1,2 \text{ m/s}^2$.

iii. Para radios mayores a 400 m se observa un comportamiento muy distinto a los dos casos anteriores. En la tangente de entrada se identifica una deceleración de $-0,26 \text{ m/s}^2$, lo que representa un 50% del valor observado para radios menores. En el principio de la curva no existe deceleración sino que los conductores comienzan a acelerar a $0,4 \text{ m/s}^2$, lo mismo ocurre dentro de la curva y en la tangente de salida, con valores de $1,7 \text{ m/s}^2$ y $0,15 \text{ m/s}^2$, respectivamente.

Estos resultados demuestran que para radios mayores a 400 m los conductores no perciben la curva como tal sino más bien como una recta. Además, se observa que a medida que los radios de curva aumentan, los valores de deceleración disminuyen y aumenta la aceleración.

Se concluye que los valores propuestos en este estudio son mayores en magnitud que cualquiera propuesto anteriormente en la literatura. Sin embargo, los resultados no son comparables con los de otros autores por diversos motivos, dentro de los que destacan la metodología de recolección de datos y la forma de obtención de las aceleraciones y deceleraciones.

Anteriormente las aceleraciones han sido derivadas a través de mediciones puntuales de velocidad, lo cual lleva a resultados que corresponden a percentiles generalmente menores al 50% del valor real, según quedó demostrado en este estudio. Por otro lado, en la literatura se propone un único valor representativo de la curva, el cual puede depender o no de las variables geométricas de ésta. Sin embargo, se ha demostrado que no existe un único valor representativo de las aceleraciones en la curva ya que estos parámetros varían en cada punto del trazado, junto con la distribución estadística de los mismos.

Estos resultados no tienen mayor implicancia en el diseño ya que la normativa chilena, y particularmente el manual de carreteras, se basa en la existencia de un conductor único para diseñar. Sin embargo, representan un avance importante en los tópicos relacionados con los modelos de velocidad, perfiles de velocidad y el análisis de consistencia. Además, son la base para la calibración de los modelos predictores de aceleración/deceleración de operación que se presentan en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 6 MODELACIÓN DE ACELERACIONES LONGITUDINALES

6.1 Introducción

En el presente capítulo se describe la calibración y validación de los modelos de aceleración y deceleración que se proponen en este trabajo. El capítulo se inicia con la descripción de la base de datos de modelación. En seguida se discute la formulación de los modelos a calibrar, se presentan las herramientas estadísticas utilizadas, la forma funcional de las ecuaciones y los indicadores utilizados para validar las mismas. A continuación se presentan los modelos calibrados para cada punto característico y sus respectivas validaciones. Luego se comparan los modelos formulados con los modelos existentes en el estado del arte, se utilizan las ecuaciones calibradas en un caso práctico y se presentan las principales conclusiones del capítulo.

6.2 Base de datos de modelación

La base de datos de modelación fue construida a partir de los resultados del Capítulo 5 de este trabajo (sección 5.6.2). Se calculó la aceleración de operación (percentil 95) y velocidad de operación (percentil 85) en todos los puntos característicos del trazado, los que se muestran en la Figura 6.1, para cada una de las 525 mediciones validadas en el Capítulo 4. Estos datos, en conjunto con la base de datos de geometría generada por Díaz (2013), fueron utilizados para calibrar y validar los modelos de aceleración y deceleración que se presentan en las siguientes secciones.

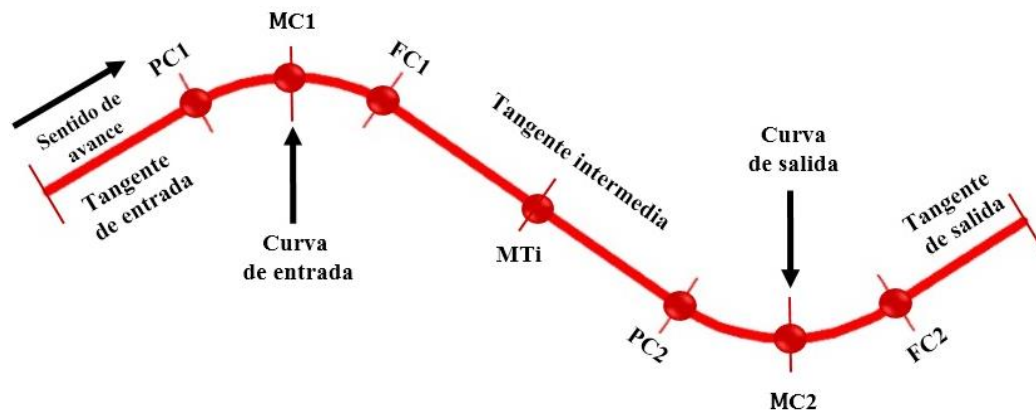


Figura 6.1 Puntos seleccionados para la modelación

En la Figura 6.1 PC, MC y FC son el principio, mitad y final de la curva 1 y 2 y MTi es el punto medio de la tangente intermedia.

6.3 Formulación de los modelos

Para definir las formas funcionales de los modelos de predicción de aceleración o deceleración en cada punto característico del trazado (Figura 6.1), se probaron distintas especificaciones lineales y no lineales con los *softwares* CurveExpert Pro 2.0.4 (Hyams, 2011) y STATGRAPHICS Centurion XVI 16.2.04 (StatPoint Technologies, Inc., 2013), concluyendo que los mejores resultados se obtuvieron para los modelos lineales.

Dentro de los supuestos que se deben cumplir al calibrar modelos de regresión lineal destacan la homocedasticidad (homogeneidad de varianzas), independencia y normalidad de los errores con media nula, entre otros. Si alguno(s) de estos supuestos no se cumple(n), los modelos de regresión estarán mal especificados.

En el sección 5.3 se mostró que las aceleraciones y deceleraciones obedecen a una distribución Burr 4P, por lo que los supuestos del análisis de regresión lineal no se cumplen a cabalidad para dichas variables. Otro factor que se debe tener en consideración es que los parámetros que definen a la distribución Burr 4P varían en cada punto del trazado, violando el supuesto de homocedasticidad al aplicar la regresión lineal entre dos puntos sucesivos.

Box y Cox (1964) propusieron una familia de transformaciones, denominadas transformaciones o método de Box-Cox, para solucionar problemas de no normalidad y heterocedasticidad (no homogeneidad de varianzas) al estimar un modelo de regresión lineal. La transformación depende del parámetro λ_1 y asegura que los residuales de la regresión lineal posean una distribución aproximadamente normal.

Las transformaciones de Box-Cox son transformaciones de potencia definidas por la Ecuación 6.1.

$$y_i^{(\lambda_1)} = \begin{cases} \frac{y_i^{\lambda_1-1}}{\lambda_1} & , \quad \text{si } \lambda_1 \neq 0 \\ \log(y_i) & , \quad \text{si } \lambda_1 = 0 \end{cases} \quad (6.1)$$

En la Ecuación 6.1 $y_i^{(\lambda_1)}$ es la variable dependiente transformada, y_i es la variable dependiente sin transformar y λ_1 es el parámetro de la transformación de Box y Cox.

Existe un valor óptimo de λ_1 que garantiza que la transformación de y_i es la mejor aproximación a la normalidad y homocedasticidad de los residuos de $y_i^{(\lambda_1)}$. Box y Cox (1964) propusieron utilizar el método de máxima verosimilitud y/o los métodos bayesianos para estimar el mejor valor de λ_1 .

La Ecuación 6.1 supone valores positivos de y_i . Si tal condición no se cumple, se puede generalizar el método de Box-Cox a la Ecuación 6.2, donde la variable dependiente se incrementa en un valor $\lambda_2 > 0$, fijo, tal que siempre se cumpla que $y_i + \lambda_2 \geq 0, \forall i$ (Box y Cox, 1964).

$$y_i^{(\lambda_1, \lambda_2)} = \begin{cases} \frac{(y_i + \lambda_2)^{\lambda_1-1}}{\lambda_1} & , \quad \text{si } \lambda_1 \neq 0 \\ \log(y_i + \lambda_2) & , \quad \text{si } \lambda_1 = 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

En la Ecuación 6.2 $y_i^{(\lambda_1, \lambda_2)}$ es la variable dependiente transformada, y_i es la variable dependiente sin transformar y λ_1 y λ_2 son los parámetros de la transformación de Box-Cox.

6.3.1 Estimación de los modelos

En el contexto de esta investigación, para calibrar modelos de aceleración se utilizó la Ecuación 6.1 y para calibrar modelos de deceleración se utilizó la Ecuación 6.2. En el segundo caso el valor del parámetro λ_2 se fijó en 4 ya que dicho número garantizaba, para todos los casos, que se cumpliera la condición $y_i + 4 \geq 0$ y λ_1 óptimo se obtuvo en el *software* STATGRAPHICS Centurion XVI 16.2.04 (StatPoint Technologies, Inc., 2013).

La forma funcional de los modelos lineales trabajados, tanto para aceleración como para deceleración, obedecen a la Ecuación 6.3.

$$y_i^{(\lambda_1, \lambda_2)} = \beta_0 + \sum_i \beta_i \cdot x_i . \quad (6.3)$$

En la Ecuación 6.3 $y_i^{(\lambda_1, \lambda_2)}$ es la variable dependiente transformada, β_0 es el término constante del modelo lineal y β_i son los coeficientes de las i variables dependientes, x_i . Nótese que en el caso de los modelos de aceleración el parámetro λ_2 no existe.

6.3.2 Validación de los modelos

Para validar los modelos formulados, tanto de aceleración como de deceleración, se utilizó el 20% de la base de datos de modelación descrita en la sección 6.2. Cabe mencionar que la base de datos de validación, escogida aleatoriamente, no se utilizó para calibrar los modelos.

La validación de las ecuaciones de predicción tuvo por objetivo evaluar la precisión de los modelos formulados. Dicha validación consistió en el análisis de cinco indicadores distintos: gráficas de valores observados v/s estimados, cálculo de los errores del pronóstico MSE, MAE, MAPE y la prueba estadística Chi-cuadrado (χ^2), los que se describen a continuación.

a) Gráfica de valores observados v/s estimados: Se calcularon los valores estimados de aceleración o deceleración, dependiendo del modelo, y se contrastaron gráficamente con los valores observados de la misma variable. Los puntos de la gráfica debiesen estar en torno a una recta de referencia de 45° , en caso contrario, se concluye que el modelo no se ajusta correctamente a los datos observados.

b) Cálculo de errores del pronóstico: El error del pronóstico muestra la diferencia que existe entre el valor estimado y el valor observado. Los principales indicadores son el error cuadrático medio (MSE), el error absoluto de la media (MAE) y el error absoluto porcentual de la media

(MAPE). Estos estadísticos se calcularon usando la base de datos de validación, para cada ecuación calibrada.

A continuación se muestran las ecuaciones que permiten calcular estos indicadores.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{observado}_i - \text{estimado}_i)^2, \quad (6.4)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{observado}_i - \text{estimado}_i|, \quad (6.5)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\text{observado}_i - \text{estimado}_i}{\text{estimado}_i} \right| \cdot 100. \quad (6.6)$$

En las ecuaciones 6.4, 6.5 y 6.6 n es el número de registros y observado_i y estimado_i son el valor de aceleración o deceleración observado y estimado para el registro i , respectivamente.

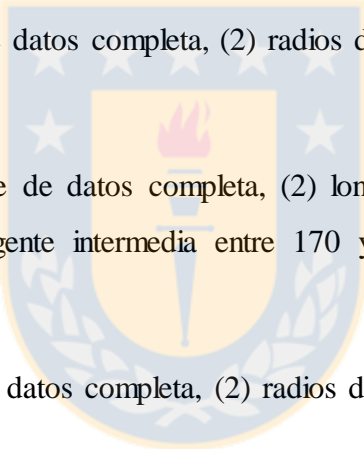
c) Prueba Chi-cuadrado (χ^2): Se evaluó el ajuste de los modelos calibrados mediante la prueba estadística Chi-cuadrado. Si el valor calculado del estadístico es mayor que el valor crítico obtenido de una tabla estandarizada, se concluye que existe una diferencia significativa entre los valores observados y predichos, en caso contrario, se concluye que los valores son estadísticamente iguales con un determinado nivel de confianza. El estadístico Chi-cuadrado se estima con la ecuación 6.7.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\text{observado}_i - \text{estimado}_i)^2}{\text{estimado}_i}. \quad (6.7)$$

6.4 Modelos calibrados

En esta sección se presentan los modelos de regresión lineal múltiple propuestos en esta investigación, que permiten predecir los valores de la aceleración y/o deceleración de operación que experimentan los vehículos livianos en los puntos característicos de una curva de inflexión en S, definidos en la Figura 6.1, al transitar por ella.

Siguiendo las recomendaciones prácticas de autores descritos en el Capítulo 2, y de acuerdo a los análisis gráficos, estadísticos y de patrones de comportamiento de los datos, realizados en el Capítulo 5, la base de datos de modelación, tanto de aceleraciones como de deceleraciones, se segmentó de acuerdo a lo siguiente:

- 
- i. Curva de entrada: (1) Base de datos completa, (2) radios de 190 a 399 m y (3) radios de 400 a 700 m.
 - ii. Tangente intermedia: (1) Base de datos completa, (2) longitud de tangente intermedia entre 80 y 120 m, (3) longitud de tangente intermedia entre 170 y 260 m y (4) longitud de tangente intermedia mayor a 400 m.
 - iii. Curva de salida: (1) Base de datos completa, (2) radios de 190 a 399 m y (3) radios de 400 a 700 m.

La forma funcional genérica de los modelos desarrollados obedece a la Ecuación 6.3.

Cabe destacar que los modelos que se presentan en esta sección son los que lograron el mejor ajuste estadístico de entre todas las especificaciones analizadas, las que se detallan en el Anexo 6.1. A continuación se indican los criterios utilizados para seleccionar los mejores modelos:

- a. Patrones de comportamiento: Para definir si los conductores aceleran o deceleran en un determinado punto se consideraron los patrones de comportamiento estudiados en el Capítulo 5.
- b. Nivel de ajuste de los modelos: El nivel de ajuste de los modelos se evaluó según los indicadores R cuadrado, R^2 , y R cuadrado ajustado, R^2_a .

- c. Significancia estadística de las variables independientes: Se estudió la pertinencia de las variables explicativas en los modelos calibrados mediante la prueba estadística t (en el modelo se muestra entre paréntesis bajo el coeficiente estimado) y el valor p de cada variable (ver Anexo 6.1).
- d. Indicadores de validación: Se consideró la validación de los modelos mediante los criterios e indicadores descritos en la sección 6.3.2.
- e. Número de datos: Se consideró el número de datos con los que se calibraron y validaron los modelos puesto que si el número de registros es muy bajo (menor a 30), los indicadores del nivel de ajuste y de validación podrían estar sesgados.

En aquellos casos en que no se obtuvieron buenos resultados con los modelos según los criterios antes enunciados, se proponen valores de aceleración/deceleración constante basados en los resultados obtenidos en el Capítulo 5 de este documento.

La nomenclatura utilizada en los modelos calibrados se describe a continuación:

- V_{ap} : Velocidad de aproximación a la curva de entrada, en m/s
- R_1, R_2 : Radio de la curva de entrada y salida, respectivamente, en m
- W_1, W_2 : Ángulo de deflexión de la curva de entrada y salida, respectivamente, en grad
- D_1, D_2 : Desarrollo de la curva de entrada y salida, respectivamente, en m
- LT_i : Longitud de la tangente intermedia, en m
- a_i : Aceleración predicha en el punto i del alineamiento, en m/s^2
- d_i : Deceleración predicha en el punto i del alineamiento, en m/s^2
- V_i : Velocidad de operación en el punto i del alineamiento, en m/s

El índice “i” representa los puntos característicos de la curva. PC1, MC1 y FC1 se refieren al principio, mitad y final de la curva de entrada, respectivamente, MTi es el punto medio de la tangente intermedia y PC2, MC2 y FC2 representan al principio, mitad y final de la curva de salida, respectivamente.

6.4.1 Modelos para la curva de entrada

➤ Modelos para el principio de la curva de entrada

i. Radio de la curva de entrada entre 190 y 700 m (base de datos completa)

$$0,96094 - 0,00604 \cdot V_{ap} + 0,07485 \cdot \sqrt{R_1} + 0,00055 \cdot D_1 = Y, \quad R_a^2 = 56,12\% \quad (6.8)$$

(6,88) (-3,99) (14,68) (2,58)

donde $Y = 1 + \frac{(d_{pCl} + 4)^{4,08145} - 1}{126,35385}$

Tabla 6.1 Indicadores de validación de la Ecuación 6.8

N° de datos	60	MAPE (%)	21,61
MSE (m/s ²)	0,06	χ ² calculado	-3,78
MAE (m/s ²)	0,20	χ ² crítico (5%)	77,93

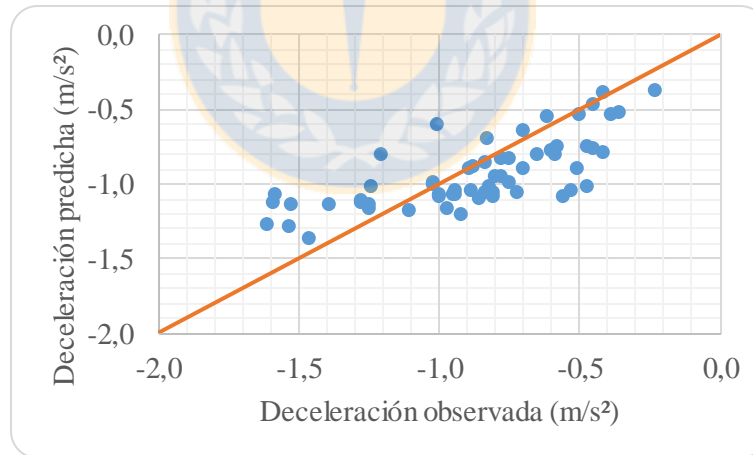


Figura 6.2 Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.8

ii. Radio de la curva de entrada entre 190 y 399 m

$$1,34742 - 0,00665 \cdot V_{ap} + 0,00408 \cdot R_1 + 0,00696 \cdot W_1 = Y, \quad R_a^2 = 77,23\% \quad (6.9)$$

(11,64) (-5,81) (18,95) (11,39)

donde $Y = 1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{2,56473} - 1}{14,54976}$

Tabla 6.2 Indicadores de validación de la Ecuación 6.9

N° de datos	43	MAPE (%)	21,91
MSE (m/s ²)	0,07	χ^2 calculado	-3,20
MAE (m/s ²)	0,20	χ^2 crítico (5%)	58,12

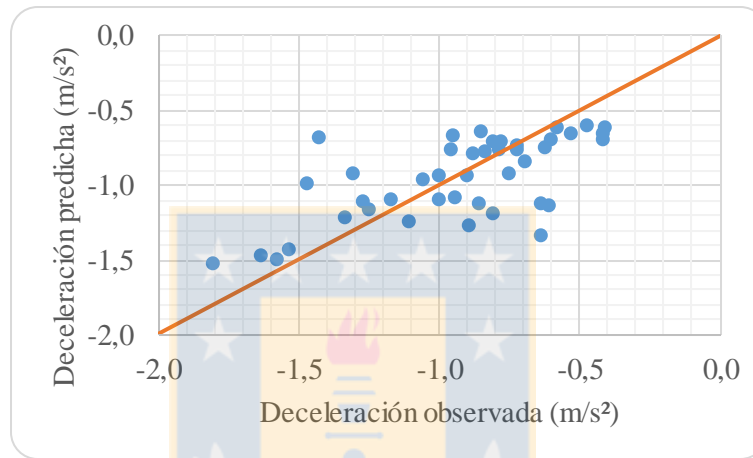


Figura 6.3 Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.9

iii. Radio de la curva de entrada entre 400 y 700 m

$$4,20842 - 0,14853 \cdot \sqrt{R_1} = 1 + \frac{a_{PCI}^{0,05319} - 1}{0,07379}, \quad R_a^2 = 79,50\% \quad (6.10)$$

(21,68) (-17,84)

Tabla 6.3 Indicadores de validación de la Ecuación 6.10

N° de datos	23	MAPE (%)	29,35
MSE (m/s ²)	0,09	χ^2 calculado	2,30
MAE (m/s ²)	0,23	χ^2 crítico (5%)	30,81

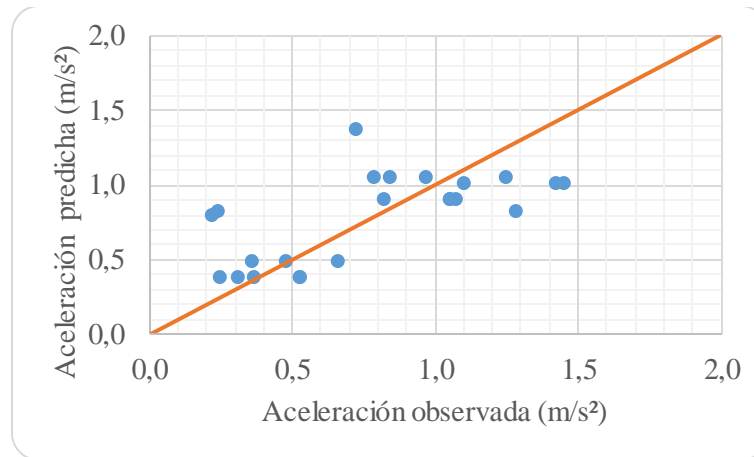


Figura 6.4 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.10

➤ **Modelos para la mitad de la curva de entrada**

i. Radio de la curva de entrada entre 190 y 700 m (base de datos completa)

$$2,71838 - \frac{414,14300}{R_1} = 1 + \frac{a \frac{-0,50094}{MCI} - 1}{0,43647}, \quad R^2_a = 68,99\% \quad (6.11)$$

(36,75) (-18,95)

Tabla 6.4 Indicadores de validación de la Ecuación 6.11

N° de datos	37	MAPE (%)	33,63
MSE (m/s²)	0,59	χ² calculado	16,70
MAE (m/s²)	0,55	χ² crítico (5%)	51,00

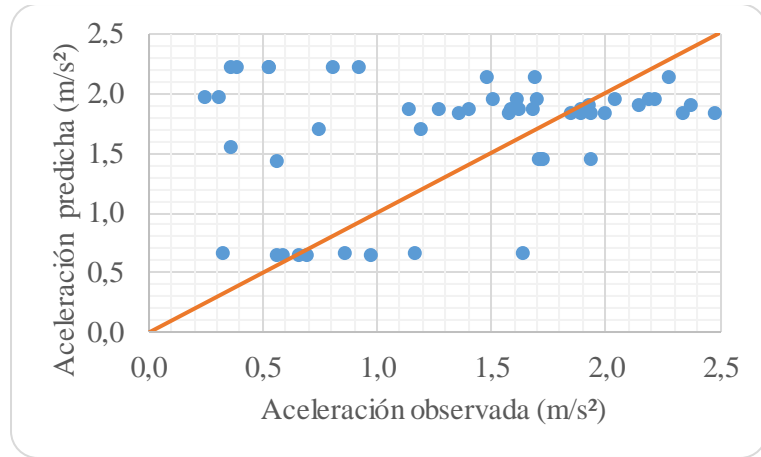


Figura 6.5 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.11

ii. Radio de la curva de entrada entre 190 y 399 m

$$-1,54623 + 0,01168 \cdot R_1 = 1 + \frac{a^{2,01002} - 1}{1,61054} \cdot R_1 \quad R_a^2 = 94,12\% \quad (6.12)$$

(-16,60) (28,59)

Tabla 6.5 Indicadores de validación de la Ecuación 6.12

N° de datos	18	MAPE (%)	20,41
MSE (m/s ²)	0,05	χ ² calculado	0,94
MAE (m/s ²)	0,19	χ ² crítico (5%)	27,59

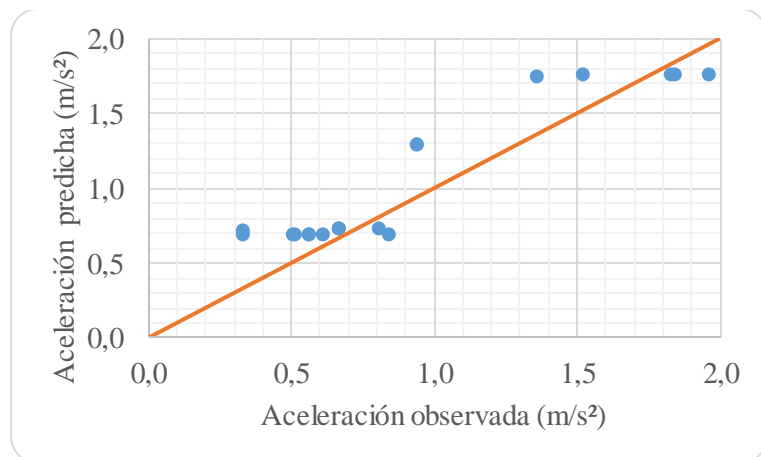


Figura 6.6 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.12

iii. Radio de la curva de entrada entre 400 y 700 m

$$2,64443 - 0,00600 \cdot R_1 + 0,02204 \cdot V_{PC1} = 1 + \frac{a_{MCI}^{0,72752} - 1}{0,66530}, \quad R^2_a = 73,30\% \quad (6.13)$$

(4,23) (-15,30) (3,86)

Tabla 6.6 Indicadores de validación de la Ecuación 6.13

N° de datos	31	MAPE (%)	27,89
MSE (m/s ²)	0,12	χ ² calculado	3,44
MAE (m/s ²)	0,29	χ ² crítico (5%)	43,77

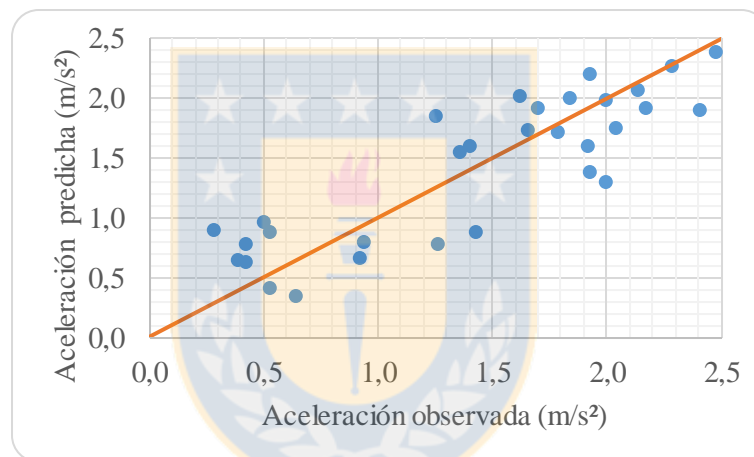


Figura 6.7 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.13

➤ **Modelos para el final de la curva de entrada**

i. Radio de la curva de entrada entre 190 y 700 m (base de datos completa)

$$d_{FC1} = - 1,00 \text{ m/s}^2 \quad (6.14)$$

ii. Radio de la curva de entrada entre 190 y 399 m

$$1,44417 + 0,00124 \cdot LT_i - 0,01330 \cdot V_{MCI} = 1 + \frac{a_{FCI}^{0,63007} - 1}{0,72633}, \quad R^2_a = 74,90\% \quad (6.15)$$

(11,92) (13,12) (-8,86)

Tabla 6.7 Indicadores de validación de la Ecuación 6.15

N° de datos	23	MAPE (%)	34,52
MSE (m/s ²)	0,07	χ ² calculado	2,75
MAE (m/s ²)	0,20	χ ² crítico (5%)	33,92

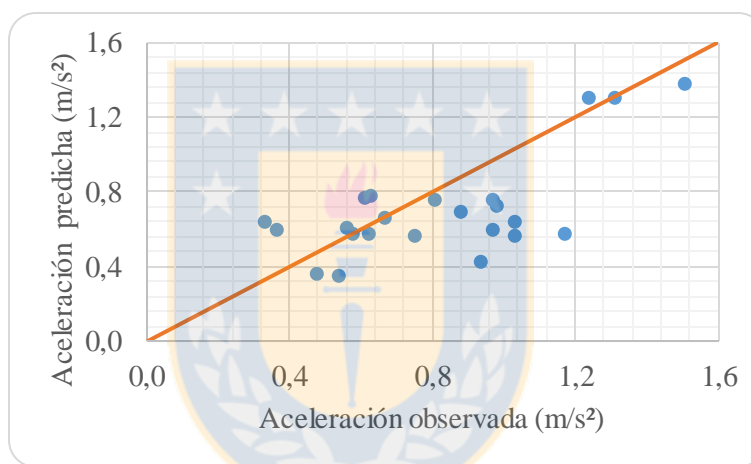


Figura 6.8 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.15

iii. Radio de la curva de entrada entre 400 y 700 m

$$-1,92542 + 0,00169 \cdot LT_i + 0,01466 \cdot V_{MCI} = 1 + \frac{a_{FCI}^{0,56988} - 1}{0,64160}, \quad R^2_a = 63,12\% \quad (6.16)$$

(-6,00) (9,02) (4,25)

Tabla 6.8 Indicadores de validación de la Ecuación 6.16

N° de datos	24	MAPE (%)	89,03
MSE (m/s ²)	0,08	χ ² calculado	6,90
MAE (m/s ²)	0,22	χ ² crítico (5%)	35,17

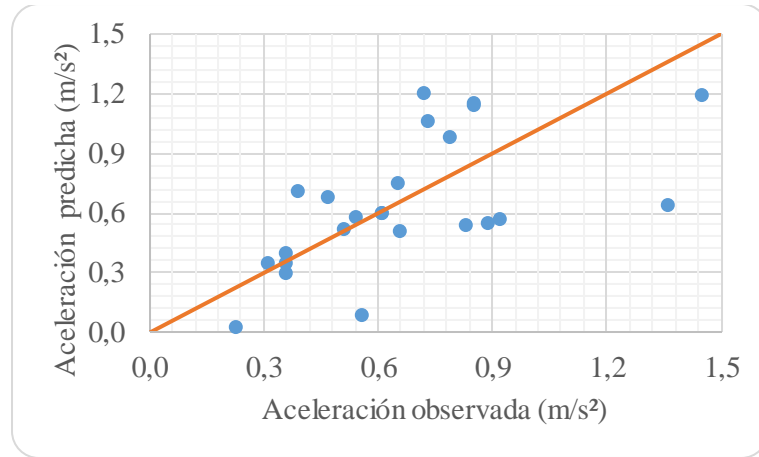


Figura 6.9 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.16

Los modelos calibrados para la curva de entrada evidencian que al trabajar con datos agrupados (base de datos completa) se generan distorsiones importantes en los errores del pronóstico (MSE, MAE y MAPE) y se empeora el nivel de ajuste de la ecuación. Al segmentar la base de datos en función del radio de la curva de entrada se mejora considerablemente el nivel de ajuste de los modelos (R cuadrado ajustado) y se disminuyen los errores del pronóstico.

Nótese particularmente que para el final de la curva de entrada (FC1), no fue posible calibrar un modelo global para predecir aceleraciones o deceleraciones en el punto geométrico, pero al estratificar los datos en función del radio de la curva, se obtuvieron modelos con un ajuste estadístico cercano al 80%. Esto queda explicado, en parte, por el comportamiento de los conductores en la entidad geométrica. Mientras en las curvas de radio entre 190 y 399 m los conductores deceleran, en aquellas curvas de radio entre 400 y 700 m aceleran, diferencia que el modelo global no es capaz de capturar.

6.4.2 Modelos para la tangente intermedia

A diferencia de la curva de entrada, para la tangente intermedia no se obtuvieron buenos resultados en la modelación matemática-estadística de las aceleraciones y/o deceleraciones. El nivel de ajuste de los modelos analizados no logró superar el 40% en el valor del R cuadrado, lo que llevó a proponer valores de aceleración constante en función de la geometría en lugar de calibrar

ecuaciones. Los resultados, basados en el análisis de patrones estadísticos del Capítulo 5, se muestran en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9 Valores de aceleración/deceleración en el punto medio de la tangente intermedia, MT_i, en función de la geometría

R ₁ (m)	LT _i (m)	R ₂ (m)	Acel / decel MT _i (m/s ²)
< 200	< 200	< 200	-1,17
< 200	201 - 400	< 200	0,88
< 200	201 - 400	201 - 400	0,66
201 - 400	< 200	201 - 400	0,67
201 - 400	201 - 400	< 200	-0,60
201 - 400	201 - 400	201 - 400	0,68
201 - 400	> 400	< 200	-0,66
201 - 400	> 400	201 - 400	0,73
201 - 400	> 400	> 400	0,80
> 400	> 400	> 400	0,65

6.4.3 Modelos para la curva de salida

➤ Modelos para el principio de la curva de salida

i. Radio de la curva de salida entre 190 y 700 m (base de datos completa)

$$4,22035 - 0,01598 \cdot V_{MTi} - 197,82400 \cdot \frac{1}{R_2} = 1 + \frac{(d_{PC2} + 4)^{2,66209} - 1}{18,10689}, \quad R^2_a = 56,10\% \quad (6.17)$$

(27,31) (-11,03) (-15,96)

Tabla 6.10 Indicadores de validación de la Ecuación 6.17

N° de datos	55	MAPE (%)	26,70
MSE (m/s ²)	0,06	χ ² calculado	-4,26
MAE (m/s ²)	0,20	χ ² crítico (5%)	72,15

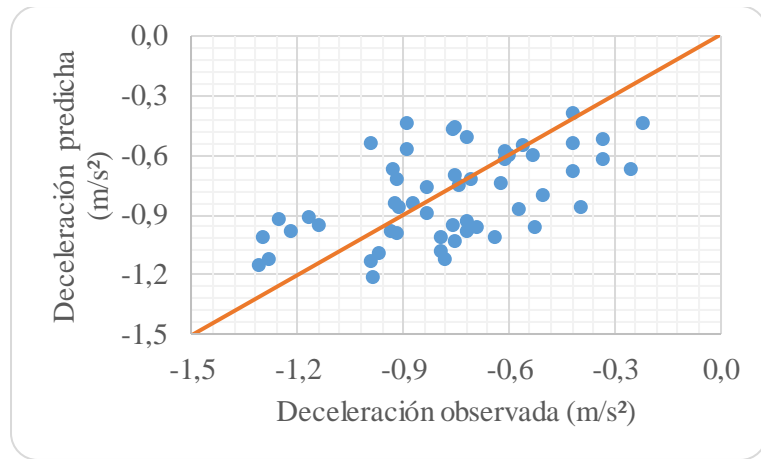


Figura 6.10 Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.17

ii. Radio de la curva de salida entre 190 y 399 m

$$-0,87693 + 0,17935 \cdot \sqrt{R_2} = 1 + \frac{(d_{PC2} + 4)^{4,48403} - 1}{7884,06210}, \quad R_a^2 = 50,76\% \quad (6.18)$$

(-3,12) (9,41)

Tabla 6.11 Indicadores de validación de la Ecuación 6.18

N° de datos	20	MAPE (%)	18,84
MSE (m/s ²)	0,04	χ ² calculado	-0,83
MAE (m/s ²)	0,17	χ ² crítico (5%)	30,14

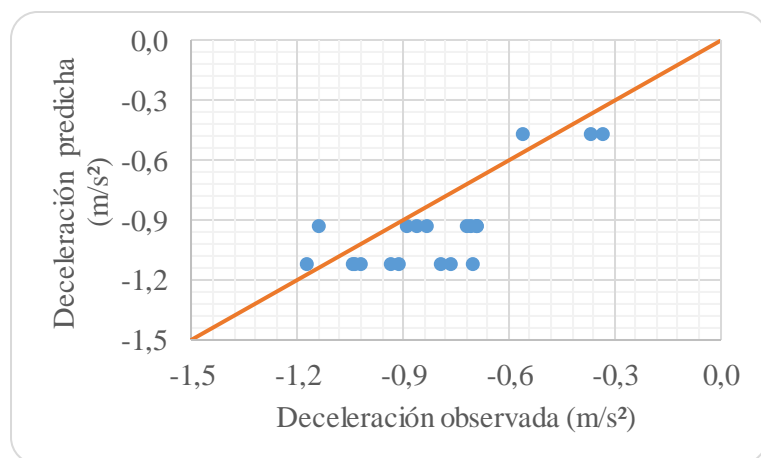


Figura 6.11 Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.18

iii. Radio de la curva de salida entre 400 y 700 m

$$4,37758 - 0,01049 \cdot V_{MTi} - 0,00035 \cdot LT_i - 709,97500 \cdot \frac{1}{R_2} = Y, \quad R^2_a = 67,16\% \quad (6.19)$$

(25,16) (-7,07) (-5,10) (-12,13)

donde $Y = 1 + \frac{(d_{PC2} + 4)^{4,91381} - 1}{476,15053}$

Tabla 6.12 Indicadores de validación de la Ecuación 6.19

N° de datos	27	MAPE (%)	20,67
MSE (m/s ²)	0,02	χ ² calculado	-1,17
MAE (m/s ²)	0,12	χ ² crítico (5%)	38,89

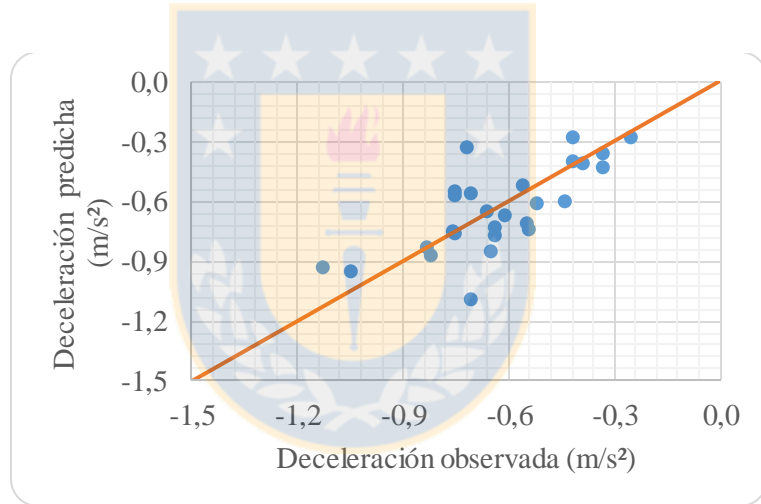


Figura 6.12 Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.19

➤ **Modelos para la mitad de la curva de salida**

i. Radio de la curva de salida entre 190 y 700 m (base de datos completa)

$$7,35419 - 0,03486 \cdot W_2 - 0,03505 \cdot V_{PC2} = 1 + \frac{(d_{MC2} + 4)^{0,78651} - 1}{0,65733}, \quad R^2_a = 56,06\% \quad (6.20)$$

(16,18) (-14,60) (-8,00)

Tabla 6.13 Indicadores de validación de la Ecuación 6.20

N° de datos	45	MAPE (%)	25,45
MSE (m/s ²)	0,41	χ ² calculado	-49,54
MAE (m/s ²)	0,46	χ ² crítico (5%)	60,49

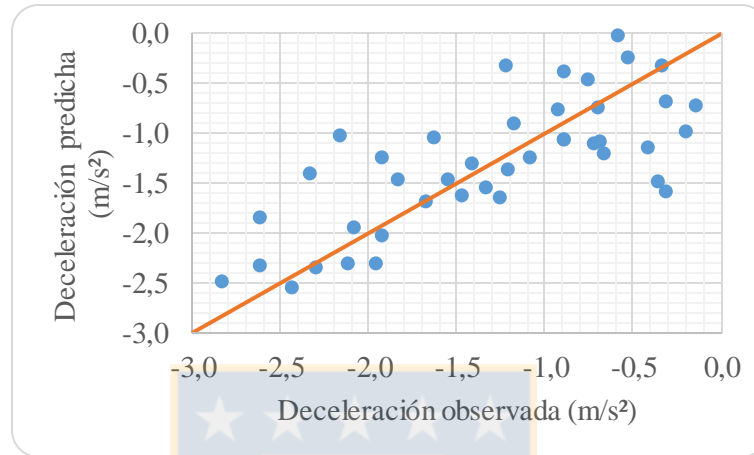


Figura 6.13 Deceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.20

ii. Radio de la curva de salida entre 190 y 399 m

$$\underset{(-10,51)}{-3,64794} + \underset{(6,78)}{0,01576} \cdot W_2 + \underset{(15,35)}{0,06034} \cdot V_{PC2} = 1 + \frac{\underset{1,35122}{a_{MC2}} - 1}{\underset{1,67428}{1,67428}}, \quad R^2_a = 71,75\% \quad (6.21)$$

Tabla 6.14 Indicadores de validación de la Ecuación 6.21

N° de datos	30	MAPE (%)	18,43
MSE (m/s ²)	0,10	χ ² calculado	2,56
MAE (m/s ²)	0,25	χ ² crítico (5%)	42,56

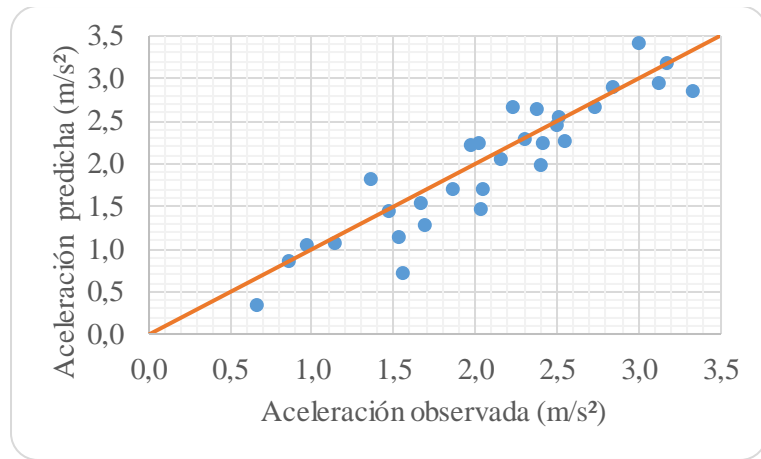


Figura 6.14 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.21

iii. Radio de la curva de salida entre 400 y 700 m

$$-2,01416 + 0,13353 \cdot W_2 = 1 + \frac{a_{MC2}^{0,51980} - 1}{0,58794}, \quad R^2_a = 92,16\% \quad (6.22)$$

(-15,91) (23,77)

Tabla 6.15 Indicadores de validación de la Ecuación 6.22

N° de datos	13	MAPE (%)	29,70
MSE (m/s ²)	0,05	χ ² calculado	1,18
MAE (m/s ²)	0,18	χ ² crítico (5%)	21,03

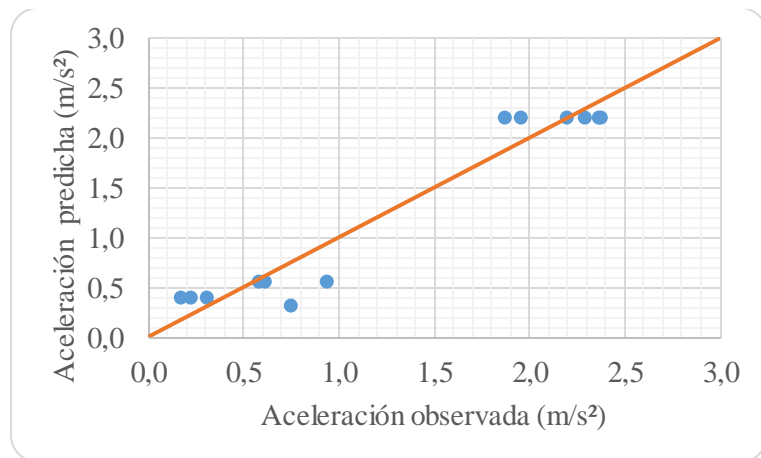


Figura 6.15 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.22

Tabla 6.17 Indicadores de validación de la Ecuación 6.24

N° de datos	40	MAPE (%)	30,15
MSE (m/s ²)	0,12	χ^2 calculado	4,84
MAE (m/s ²)	0,28	χ^2 crítico (5%)	55,76

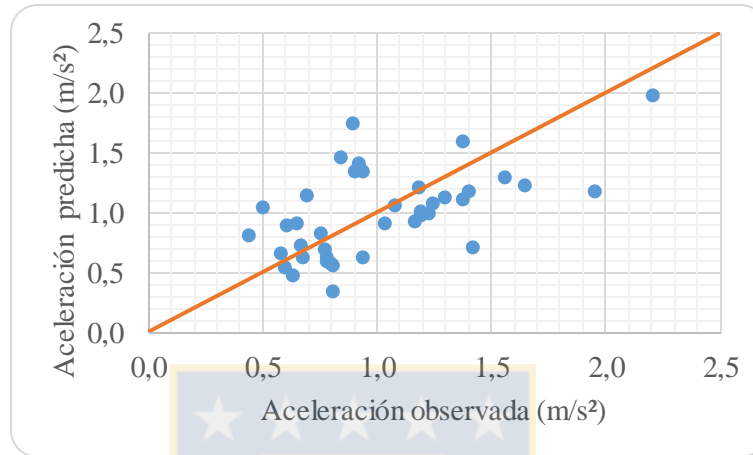


Figura 6.17 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.24

iii. Radio de la curva de salida entre 400 y 700 m

$$0,72775 - 0,00181 \cdot R_2 + 0,01057 \cdot V_{MC2} = 1 - \frac{a_{FC2}^{-0,61563} - 1}{1,39889}, \quad R_a^2 = 73,72\% \quad (6.25)$$

(3,78) (-9,34) (5,44)

Tabla 6.18 Indicadores de validación de la Ecuación 6.25

N° de datos	9	MAPE (%)	35,00
MSE (m/s ²)	0,09	χ^2 calculado	1,05
MAE (m/s ²)	0,25	χ^2 crítico (5%)	15,51

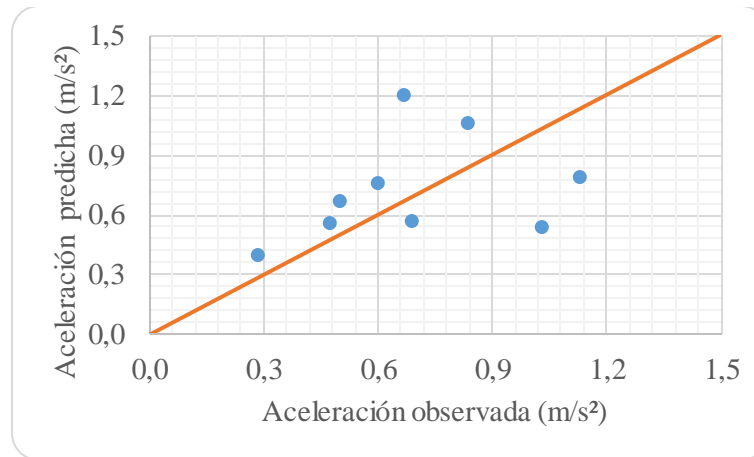


Figura 6.18 Aceleración observada v/s predicha por la Ecuación 6.25

Al igual que en la curva de entrada, los modelos calibrados para la curva de salida muestran que, en general, trabajar con datos agrupados (base de datos completa) genera distorsiones importantes en los errores del pronóstico (MSE, MAE y MAPE) y empeora el nivel de ajuste de la ecuación, condición que se mejora al separar la base de datos en función del radio de la curva.

Nótese que todos los modelos calibrados para los distintos puntos de la entidad geométrica poseen ajustes estadísticos superiores al 40% y contienen variables estadísticamente significativas con un 95% de confianza (test t superior a 1,96).

Al comparar los modelos calibrados en cada punto del alineamiento, se concluye que aquellos formulados con la base de datos segmentada en función del radio de la curva (de entrada o salida) son más robustos y confiables que aquellos formulados con la base de datos completa. Se propone trabajar con los segundos.

6.5 Comparación con otros modelos

Se realizó una comparación gráfica entre la aceleración/deceleración calculada con los modelos propuestos en esta Tesis y la aceleración/deceleración calculada con modelos anteriormente desarrollados y presentados en el Capítulo 2. Los puntos en los que se compararon los resultados

fueron el principio y el final de la curva de entrada ya que son los únicos abordados en estudios anteriores.

Los modelos del estado del arte seleccionados para la comparación fueron los de Fitzpatrick *et al* (2001), Basualto (2003), Pérez *et al* (2010), Pérez *et al* (2011) y Bella (2008) para velocidades de 80, 90 y 100 km/h. El resto de los modelos presentados en el Capítulo 2 no se utilizaron por considerar variables distintas a las abordadas en este estudio, haciéndolos no comparables, o por ser modelos constantes o con valores estratificados por radio, lo que hace poco atractiva la comparación.

En las Figuras 6.19 y 6.20 se muestra la comparación de los modelos antes mencionados en el principio de la curva de entrada para el caso de radios entre 175 y 399 m y para radios entre 400 y 700 m, respectivamente.

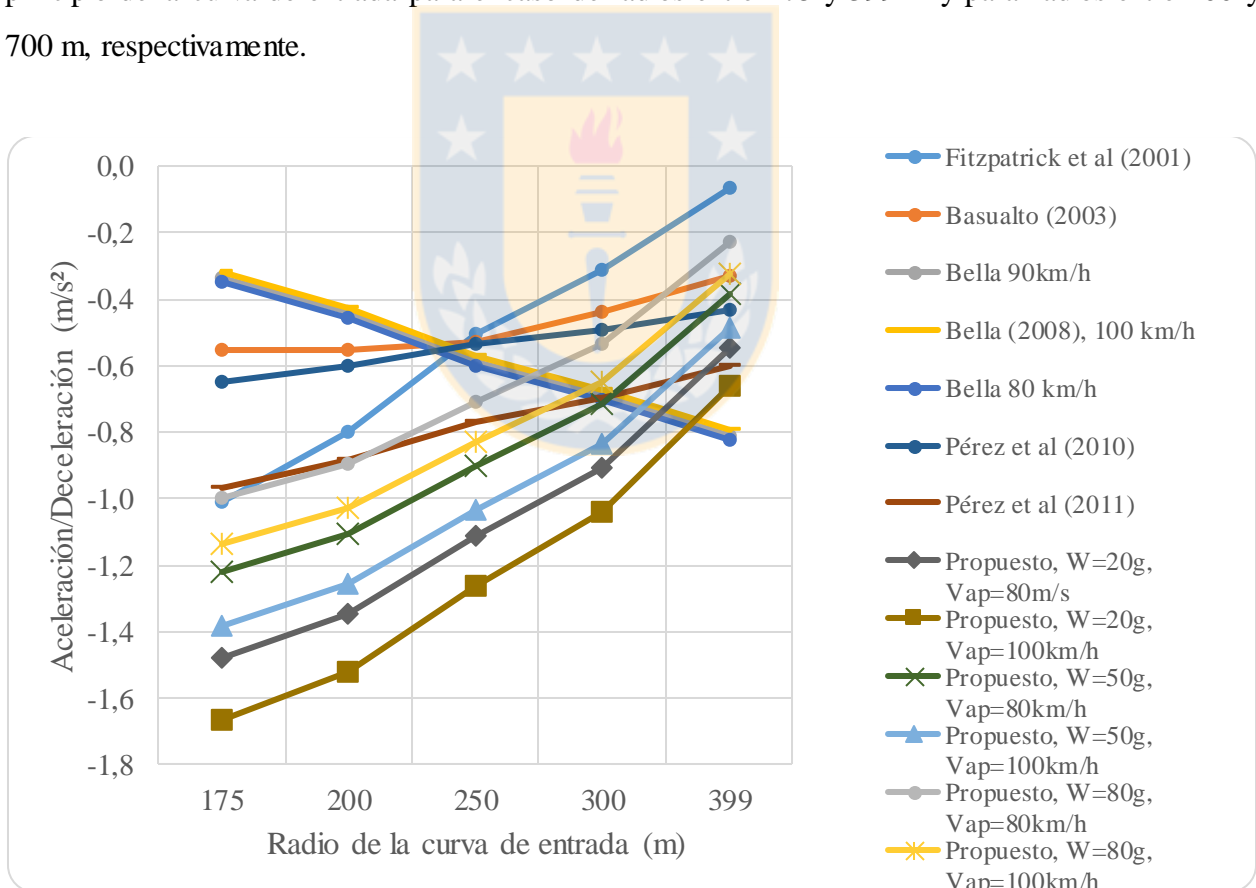


Figura 6.19 Comparación de modelos para el principio de la curva de entrada con radios entre 175 y 399 m

En la Figura 6.19 se observa que las gráficas de los modelos propuestos poseen un comportamiento similar al del modelo de Basualto (2003) y de Pérez *et al* (2010 y 2011). Sin embargo, queda en evidencia que los valores de deceleración en el principio de la curva dependen, además del radio de la misma, de la velocidad de aproximación a la curva y del ángulo de deflexión, característica que los modelos existentes en el estado del arte no consideran. Por otro lado, se observa que el modelo de Bella (2008) posee un comportamiento distinto al de todos los demás, aumentando el valor de la deceleración con el radio, lo que resulta contra intuitivo.

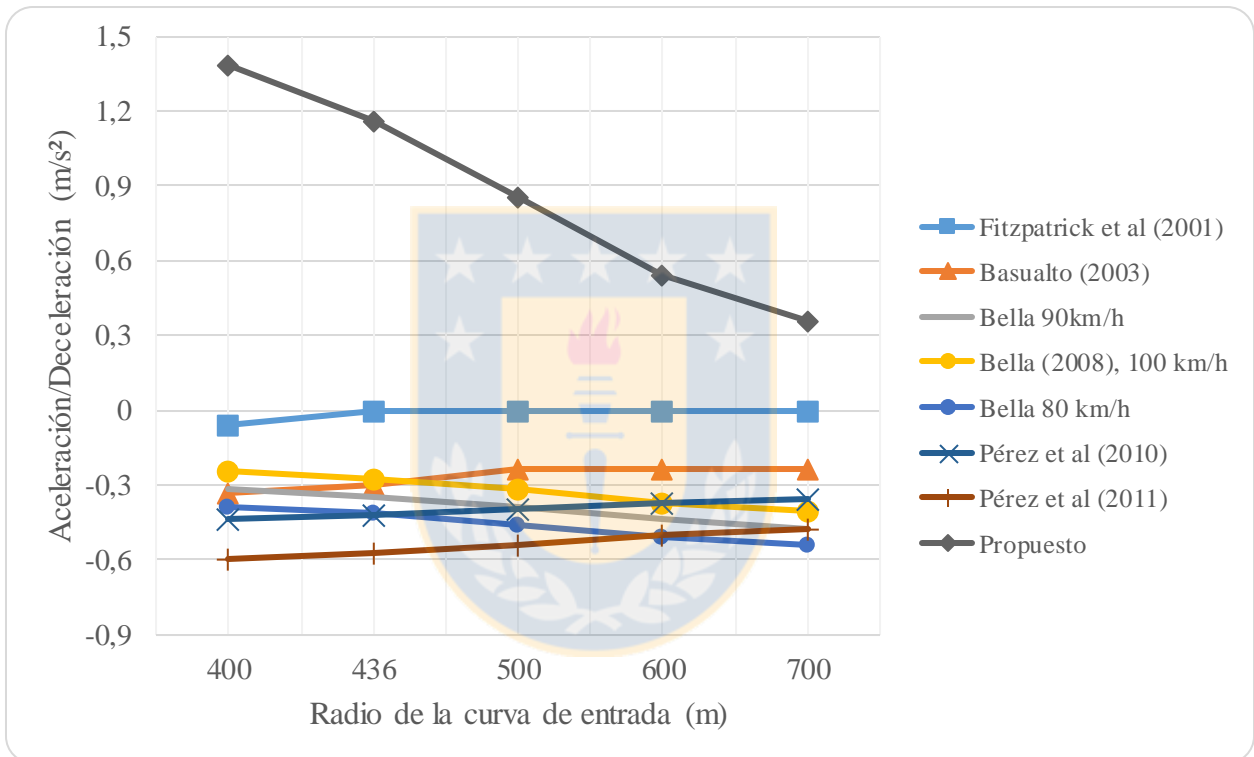


Figura 6.20 Comparación de modelos para el principio de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m

En la Figura 6.20 se observa que para el caso de radios entre 400 y 700 m existen diferencias importantes entre el modelo propuesto (Ecuación 6.10) y los modelos del estado del arte. La principal razón se debe a que el modelo calibrado en esta Tesis considera que los conductores aceleran en lugar de decelerar cuando los radios de la curva son superiores a 400 m y que la magnitud de la aceleración es inversamente proporcional al radio de la curva. Este resultado se

condice con la percepción casi recta de la curva que tienen los conductores cuando los radios son superior a 400 m, evidenciado en el análisis de patrones realizado en el Capítulo 5.

La Figura 6.21 muestra la gráfica de los modelos existentes en el estado del arte para predecir la aceleración al final de la curva de entrada de radios entre 175 y 399 m. La Figura 6.22 muestra las gráficas de los modelos propuestos en esta investigación para el mismo caso.

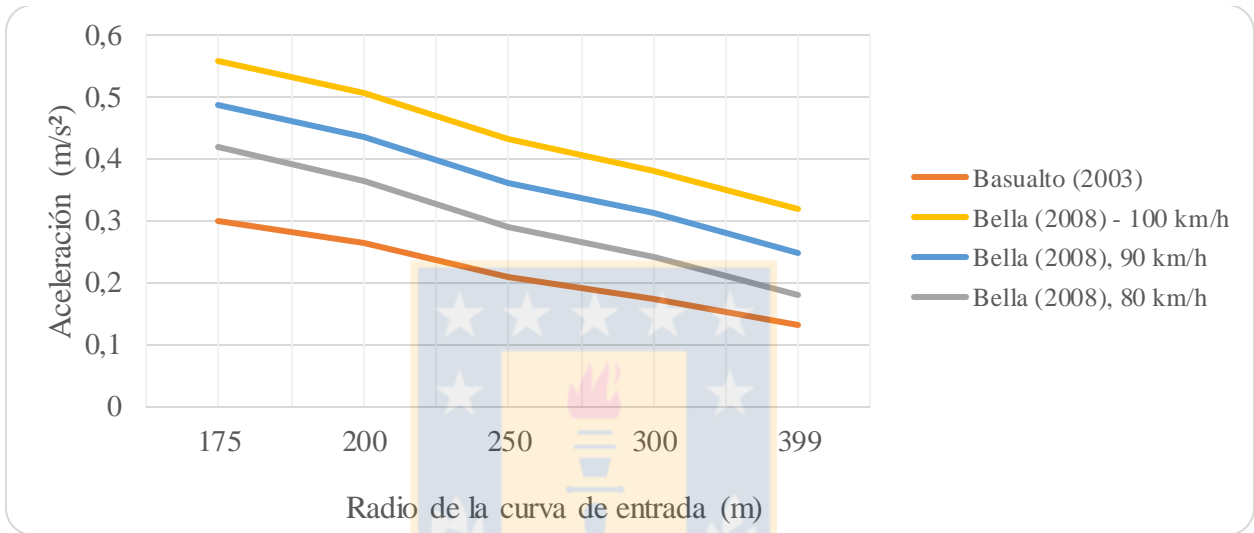


Figura 6.21 Modelos existentes para el final de la curva de entrada con radios entre 175 y 399 m

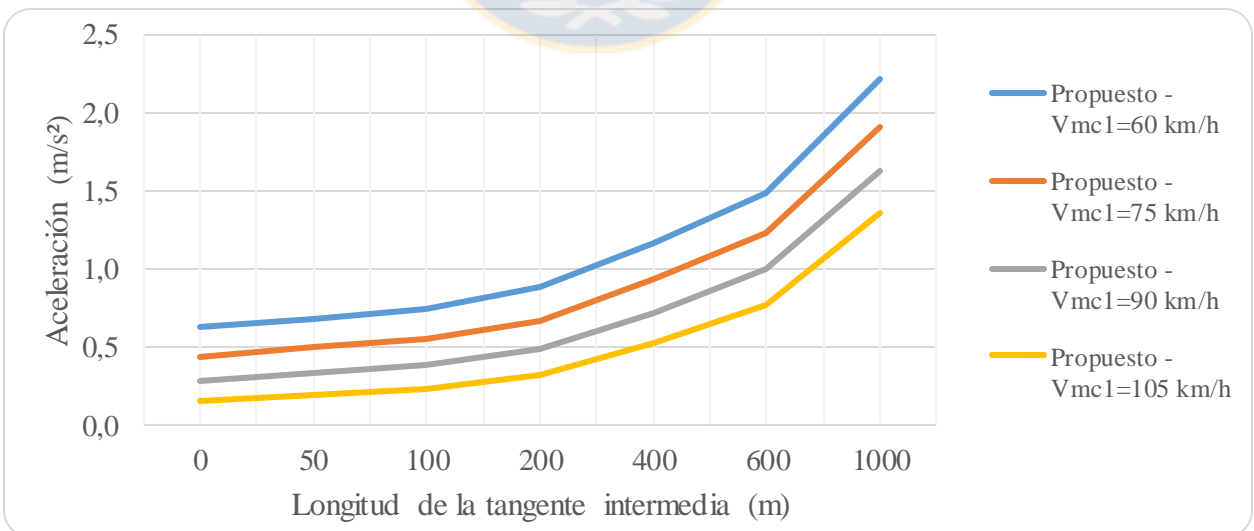


Figura 6.22 Modelos propuestos para el final de la curva de entrada con radios entre 175 y 399 m

La Figura 6.21 permite inferir que la aceleración al final de la curva es inversamente proporcional al radio de la misma. Sin embargo, los resultados de este trabajo (Figura 6.22) muestran que la aceleración al final de la curva de entrada es función directa de la velocidad en el punto medio de la curva y de la longitud de la tangente intermedia. Esta última variable no ha sido considerada en estudios anteriores ya que no se han estudiado las aceleraciones/deceleraciones en curvas de inflexión en S, haciendo que los resultados de este trabajo no sean comparables con los existentes. Lo mismo ocurre en el caso de radios de curva entre 400 y 700 m (Figuras 6.23 y 6.24).

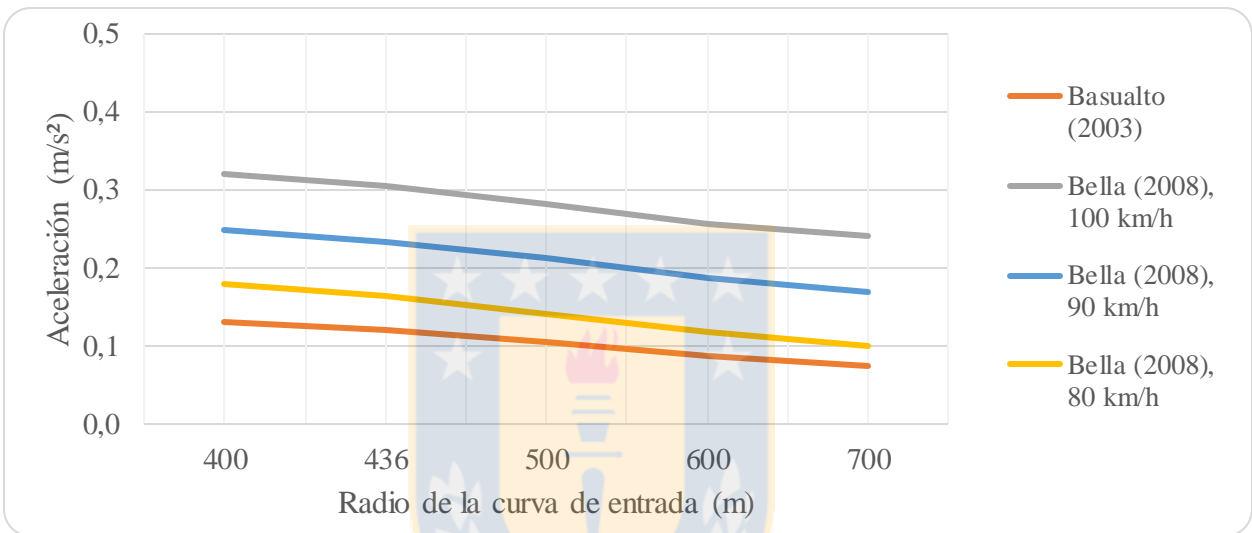


Figura 6.23 Modelos existentes para el final de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m

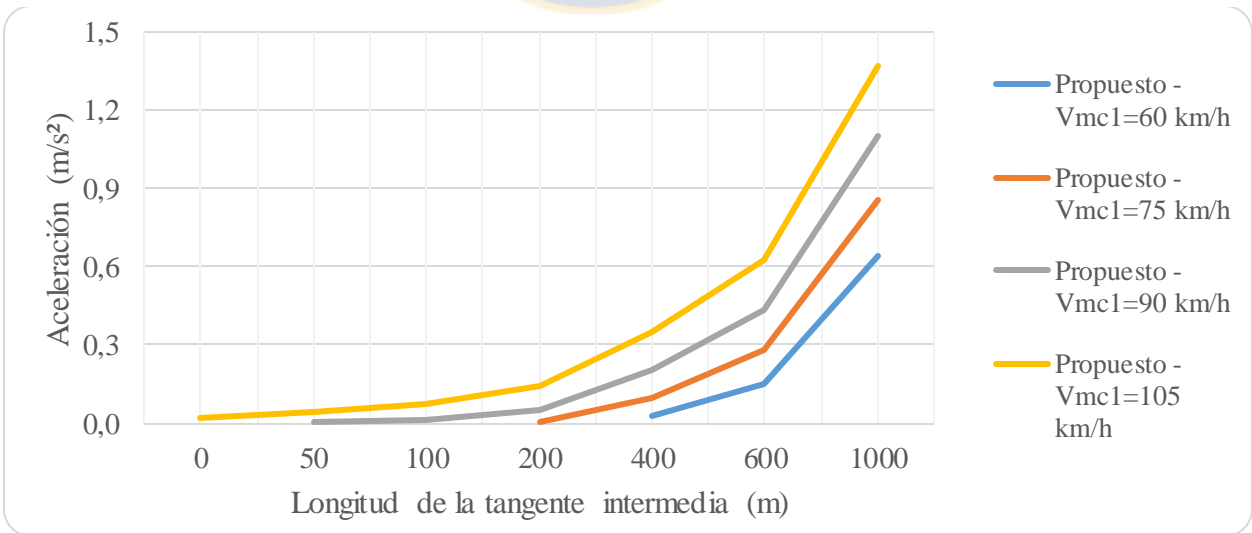


Figura 6.24 Modelos propuestos para el final de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m

6.6 Caso de estudio

Con el fin de poner a prueba los modelos calibrados y validados en la sección anterior, en este apartado se muestra la construcción de los perfiles de aceleración de cinco curvas en S, seleccionadas aleatoriamente de la base de datos. La aceleración/deceleración predicha por los modelos se compara gráficamente con la aceleración/deceleración real, registrada en terreno con el equipo VBox.

En la Tabla 6.19 se describen las características geométricas y en la Tabla 6.20 se muestra la velocidad de aproximación y velocidad de operación en los puntos característicos de las curvas a trabajar.

Tabla 6.19 Geometría de las curvas usadas para el caso de aplicación

Curva	Repetición	R ₁ (m)	W ₁ (g)	D ₁ (m)	LT _i (m)	R ₂ (m)	W ₂ (g)	D ₂ (m)
50.10.1.1	13	190	47	141	87	190	32	97
67.15.1.2	13	190	47	141	87	190	32	97
46.9.1.2	61	190	32	97	87	190	47	141
63.13.3.2	21	192	77	234	225	355	46	259
21.6.1.1	80	192	77	234	225	355	46	259

Tabla 6.20 Velocidad en puntos característicos de las curvas usadas para el caso de aplicación

Curva	Rep.	V _{ap} (m/s)	V _{PC1} (m/s)	V _{MC1} (m/s)	V _{FC1} (m/s)	V _{MTi} (m/s)	V _{PC2} (m/s)	V _{MC2} (m/s)	V _{FC2} (m/s)
50.10.1.1	13	78,3	77,1	69,8	71,0	70,4	69,9	71,8	74,7
67.15.1.2	13	77,1	87,2	70,2	69,7	69,0	68,8	68,9	76,4
46.9.1.2	61	103,8	79,3	90,6	92,2	91,2	85,4	78,0	86,0
63.13.3.2	21	89,3	97,8	83,4	86,2	86,8	87,4	89,2	91,1
21.6.1.1	80	78,5	93,7	83,3	81,9	81,9	81,4	80,8	81,4

La Tabla 6.21 muestra los resultados obtenidos en la predicción (Pred) de aceleraciones/deceleración utilizando los modelos de la Sección 6.4 y los valores de la aceleración/deceleración observada (Obs) en terreno.

Tabla 6.21 Aceleración/deceleración predicha y observada para curvas del caso de aplicación

Curva	Rep.	Punto característico de la curva													
		PC1		MC1		FC1		MTi		PC2		MC2		FC2	
		Obs	Pred	Obs	Pred	Obs	Pred	Obs	Pred	Obs	Pred	Obs	Pred	Obs	Pred
50.10.1.1	13	-1,2	-1,2	0,6	0,7	0,8	0,6	-0,5	-1,2	-0,6	-1,1	0,7	1,1	0,7	0,9
67.15.1.2	13	-0,9	-1,0	-1,0	0,7	0,4	0,6	0,4	0,7	0,6	-0,5	0,4	2,4	0,3	1,1
46.9.1.2	61	0,8	-0,7	1,9	1,8	1,2	1,3	0,5	-0,7	-0,8	-1,1	-2,5	2,6	0,6	1,1
63.13.3.2	21	-2,3	-1,1	0,9	1,3	0,8	0,6	0,7	0,7	-0,9	-0,5	0,4	2,8	-2,2	0,9
21.6.1.1	80	0,9	0,9	2,3	1,8	1,3	1,0	-0,2	0,7	-0,7	-0,8	-1,4	0,4	-1,1	0,7

En las siguientes Figuras se muestra gráficamente la diferencia entre los perfiles de aceleración/deceleración observada en terreno y predicha por los modelos calibrados.

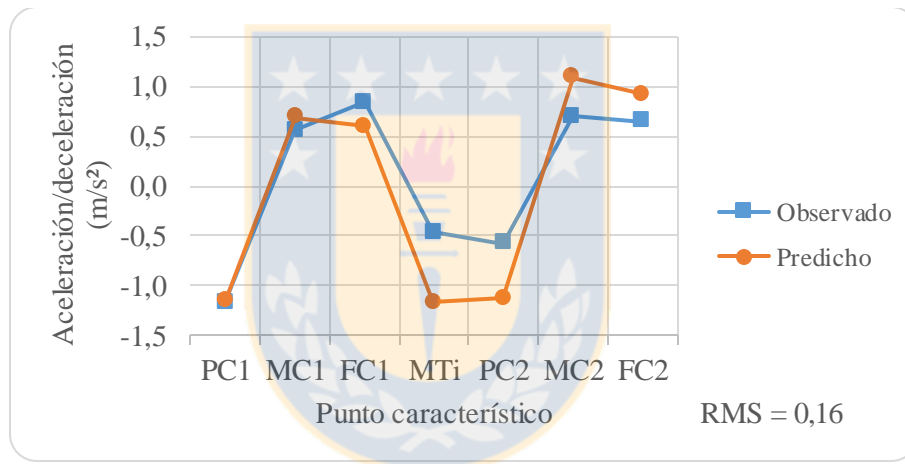


Figura 6.25 Perfil de aceleración observada v/s predicha para la curva 50.10.1.1-13

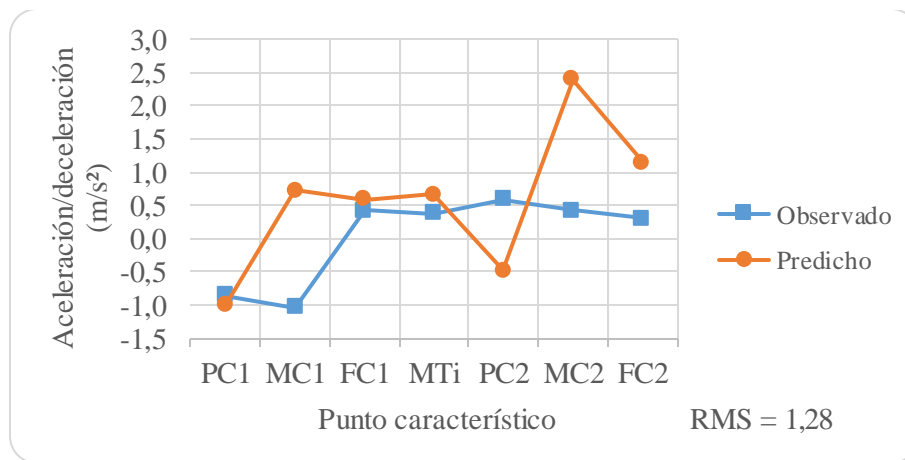


Figura 6.26 Perfil de aceleración observada v/s predicha para la curva 67.15.1.2-13

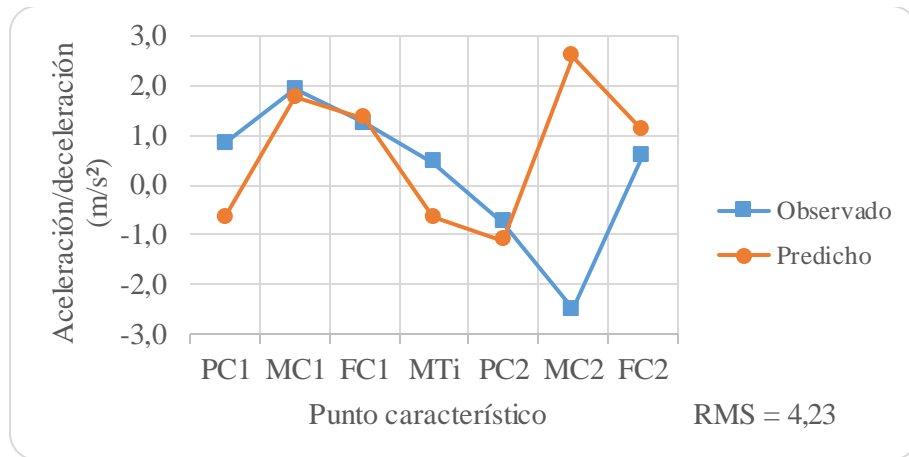


Figura 6.27 Perfil de aceleración observada v/s predicha para la curva 46.9.1.2-61



Figura 6.28 Perfil de aceleración observada v/s predicha para la curva 63.13.3.2-21

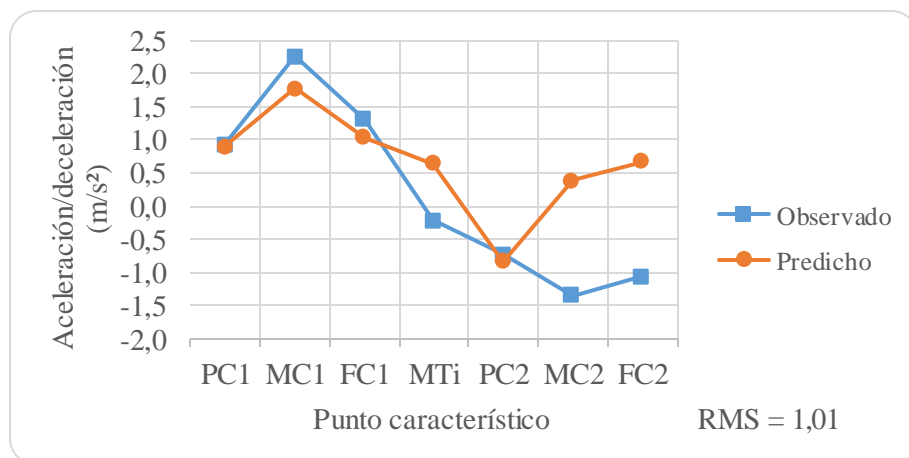


Figura 6.29 Perfil de aceleración observada v/s predicha para la curva 21.6.1.1-80

De las Figuras 6.25 a la 6.29 se observa que, en general, los modelos propuestos tienen un buen comportamiento y las gráficas se asemejan bastante a los perfiles de aceleración/deceleración registrados en terreno con el equipo VBox. Las mayores diferencias se presentan en la tangente intermedia (MTi), en el principio de la curva de salida (PC2) y en el final de la curva de salida (FC2).

Las diferencias en MTi y PC2 se asocian al comportamiento de los conductores al salir de la curva de entrada y en la tangente misma. Mientras aquellos conductores que tienen un comportamiento más agresivo en la conducción tenderán a salir con mayor velocidad de la curva de entrada y luego a decelerar para entrar a la curva de salida, aquellos con un comportamiento más pasivo buscarán una velocidad relativamente constante y las aceleraciones/deceleraciones tenderán a disminuir o a ser mucho más pequeñas.

La mayor diferencia entre los valores predichos y observados se presenta hacia el final de la curva de salida, entre los puntos MC2 y FC2. Esto queda explicado por la geometría del alineamiento más allá del final de la curva de salida, efecto que los modelos calibrados no pueden capturar porque la base de datos de modelación no lo permite ya que no existe información de la geometría después de la curva de salida. Si después de FC2 existe una tangente lo suficientemente larga los conductores acelerarán hasta alcanzar la velocidad deseada, pero si la geometría presenta singularidades esto no será posible. Por otro lado, si se comparan los modelos de aceleración/deceleración para FC1 y FC2, presentados en la sección 6.4, se observa que en los primeros la variable “longitud de tangente intermedia (LTi)” resulta estadísticamente significativa, mientras que en los segundos no existe la variable “longitud de tangente de salida” que permita estudiar la influencia de la geometría después de la curva de salida, lo que reafirma la hipótesis antes mencionada.

Si bien es cierto en los puntos antes descritos existen diferencias importantes, las cuales se ven reflejadas en el indicador RMS, en general los modelos calibrados representan una buena aproximación al fenómeno real y sirven de base para continuar estudiando las características de las aceleraciones/deceleraciones en la entidad geométrica con el fin de mejorar los perfiles de velocidad, estudiar la seguridad vial mediante el análisis de consistencia y evaluar la comodidad de los conductores al transitar por la vía, entre otros.

6.7 Conclusiones

En este capítulo se describió la metodología utilizada para calibrar y validar los distintos modelos de aceleración/deceleración que se formularon en el contexto de este trabajo y la selección de los mejores de ellos, los cuales se compararon con los existentes en el estado del arte y se pusieron a prueba en un caso práctico concluyendo que:

La aceleración/deceleración en un determinado punto del alineamiento es función directa de la geometría anterior y siguiente y de la velocidad de operación en el punto anterior.

Los modelos calibrados con toda la base de datos no son capaces de capturar la percepción que tienen los conductores de la geometría de la curva. Para solucionar esto se calibraron modelos estratificados por radio mejorando considerablemente la bondad de ajuste y los indicadores de validación. Esto comprueba que para radios superiores a 400 m los conductores se comportan como si se desplazaran por una recta más que por una curva, acelerando en lugar de decelerar o mantener una velocidad relativamente constante.

En la tangente intermedia no fue posible calibrar modelos con un buen nivel de ajuste, lo que se puede estar explicado por tres factores: (1) que los datos están mal medidos, (2) que los datos son insensibles y (3) que existen variables no consideradas en el estudio. Los primeros dos factores se descartan porque para el resto de los puntos del alineamiento sí fue posible calibrar y validar modelos con un buen nivel de ajuste, concluyendo que para explicar el fenómeno en la tangente intermedia faltaron variables explicativas, las cuales no necesariamente son variables geométricas u operativas, sino que pueden estar relacionadas con las características psicológicas y la conducta del conductor, como la velocidad deseada, el nivel de agresividad en la conducción, el hábito de conducir a una determinada velocidad (pudiendo ser alta o baja), etc.

Al comparar gráficamente los modelos calibrados con otros modelos del estado del arte se observó que en el principio de la curva de entrada existe coincidencia en el comportamiento con los modelos de Fitzpatrick *et al* (2001), Basualto (2003) y Pérez *et al* (2010 y 2011) para radios de curva entre 175 y 399 m. Sin embargo, se proponen mejoras al considerar el efecto de otras variables como el

ángulo de deflexión y la velocidad de aproximación a la curva. Los autores antes mencionados utilizaron únicamente el radio de la curva como variable explicativa.

Para radios superiores a 400 m los modelos propuestos en el principio de la curva de entrada se comportan distinto a los modelos de otros autores, lo que se explica por la percepción de los conductores para radios de curva superiores a 400 m evidenciada en el análisis de patrones de comportamiento realizado en el Capítulo 5 de esta Tesis.

En el punto final de la curva de entrada los modelos propuestos se hacen independientes del radio de la curva y son función directa de la velocidad en el punto medio de la misma y de la longitud de la tangente intermedia. Esto hace que los resultados no sean comparables con los modelos del estado del arte ya que autores anteriores relacionan la aceleración y deceleración en este punto con el radio de la curva. Una diferencia importante es que este trabajo está enfocado en las curvas en S y los estudios anteriores fueron realizados en curvas simples.

Al utilizar los modelos calibrados en un caso práctico se observó que, en general, poseen un buen comportamiento y los resultados se asemejan a los datos reales medidos en terreno con el equipo VBox. Sin embargo, también se evidencian algunas falencias en puntos como la tangente intermedia y el final de la curva de salida producto de la variabilidad de conductores y de la geometría después del punto final de la curva de salida, generando ruidos en los modelos.

Finalmente, más allá de que los modelos posean algunas diferencias importantes en ciertos puntos del trazado con respecto a los datos reales, se concluye que representan una buena aproximación al fenómeno y sirven de base para conducir nuevas investigaciones en el tema de las aceleraciones y deceleraciones que experimentan los conductores que circulan por caminos rurales.

7. CONCLUSIONES

En esta Tesis se caracterizaron y modelaron las aceleraciones y deceleraciones longitudinales que enfrentan los conductores al transitar por un alineamiento horizontal compuesto por dos curvas opuestas unidas por una tangente intermedia, definido también como curva de inflexión en S.

Para lograr tal resultado se realizó un diseño factorial que fue utilizado para construir una base de datos cruda compuesta por 563 mediciones, equivalentes a 23 curvas de inflexión en S, las que fueron filtradas y procesadas hasta conformar una base de datos compuesta por 525 registros.

Acto seguido se caracterizó estadísticamente el fenómeno de la aceleración longitudinal, definiendo la aceleración característica, o de operación, que representa el comportamiento de la mayoría de los usuarios de la vía, proponiendo valores en distintos puntos del trazado con los que se calibraron y validaron 87 modelos de los cuales, finalmente, se propone trabajar con los 12 que lograron representar de mejor manera el comportamiento de los conductores y obtuvieron el mejor ajuste de bondad.

En la ejecución de los trabajos realizados se concluyó que:

Antes del desarrollo de esta investigación, en el estado del arte no fue posible distinguir estudios que relacionan la aceleración longitudinal con la operación y geometría horizontal de curvas de inflexión en S. Los únicos estudios de aceleración existentes hasta entonces, corresponden a estudios para curvas aisladas.

La mayoría de los trabajos presentes en el estado del arte simplemente entregan un único valor de aceleración que describe el comportamiento de los conductores en la entidad geométrica; otros estudios entregan valores estratificados en función del radio de la curva y, por último, algunos utilizan otras variables geométricas para definir la aceleración en determinados puntos del alineamiento.

Se analizaron los estudios existentes en el estado del arte, concluyendo que las principales variables que describen las aceleraciones son la velocidad de aproximación en la tangente de entrada y el radio de la curva horizontal.

Con una base de datos de 525 mediciones continuas, repartidas en 23 curvas entre la séptima y octava región de Chile, se concluyó que tanto las aceleraciones como las deceleraciones obedecen a una distribución Burr de 4 parámetros, los cuales no presentan correlaciones con las variables geométricas ni operativas de la curva.

Producto de la asimetría de la distribución Burr 4P, pequeños cambios en percentiles implican grandes cambios en aceleraciones/deceleraciones en la cola. Dado lo anterior, y en base a los resultados de la presente investigación, se propone trabajar con el percentil 95 como valor representativo de las aceleraciones y deceleraciones.

Se identificó una tendencia a decelerar antes de entrar a la curva para radios de hasta 400 m; para radios superiores no existe un patrón conductual claro pero sí una tendencia a acelerar, pues los conductores perciben una recta más que una curva.

En general, los conductores tienden a decelerar desde el punto de inicio de maniobras hasta la mitad de la curva de entrada. Luego, dependiendo de la longitud de la tangente intermedia, pueden mantener la velocidad, acelerar o decelerar, para mostrar un comportamiento similar en la curva de salida.

En función de la conducta que presentan los usuarios en la vía, los conductores pueden ser clasificados como agresivos y no agresivos. Los primeros presentan un comportamiento más errático en la conducción, reflejado en sucesivas aceleraciones y deceleraciones en tramos cortos de la vía.

Se observó que, independientemente del origen de los datos, la ecuación de la cinemática que deriva la aceleración en función de la velocidad, no es una herramienta confiable porque subestima las aceleraciones y sobrestima las deceleraciones.

Se propuso un conjunto de modelos lineales que permiten predecir la aceleración/deceleración de operación en distintos puntos característicos de una curva de inflexión en S, lo que representa un aporte significativo al estado del arte ya que no existen modelos en puntos distintos al principio y final de la curva de entrada. Particularmente antes de esta Tesis no existían modelos de aceleración/deceleración para curvas de inflexión en S.

Se comprueba que los modelos desarrollados presentan indicadores de correlación significativos y buenos indicadores de validación, haciendo confiable trabajar con las ecuaciones que resultan de esta investigación.

En base a los resultados obtenidos, al nivel de ajuste de los modelos desarrollados y a la significancia estadística de las variables explicativas que los definen, se verifica la hipótesis de que la aceleración de operación en cada punto característico de una curva de inflexión en S es función de la geometría del alineamiento, antes y después de dicho punto, y de la velocidad de operación en el punto característico inmediatamente anterior.

Finalmente, se concluye que los resultados de este trabajo no son comparables con los existentes en el estado del arte por distintos motivos. El primero de ellos tiene relación con la metodología de recolección y tratamiento de los datos pues, al derivar la aceleración/deceleración de mediciones puntuales de velocidad, no es posible obtener valores en distintos puntos del trazado, asumiendo que un único valor (constante) es representativo para toda la curva. Un segundo motivo tiene que ver con el análisis y metodología estadística utilizada anteriormente, pues no considera la naturaleza de los datos ni la diferencia de distribuciones en cada punto, según quedó demostrado en esta investigación. Por último, otra razón que hace no comparable este estudio con otros del estado del arte es que ningún trabajo anterior se basa en mediciones continuas de aceleración y deceleración en todo el trazado geométrico de interés, con mediciones reales y sin hacer uso de un simulador de conducción, lo que hace que esta investigación sea completamente distinta de cualquier otra.

Cabe destacar que esta investigación se centró en vehículos livianos, operando en caminos pavimentados, bidireccionales, de una pista por sentido y con velocidades de proyecto que fluctúan

entre 50 y 120 km/h. Además, para las mediciones se consideró el caso de pavimento seco y en buen estado de conservación, conducción diurna, condiciones climáticas favorables, existencia de visibilidad del trazado en toda la curva, condiciones de flujo libre (TMDA menor a 5000 vehículos/día-año), terreno plano (pendiente máxima de un 4%), zona despejada (existencia de visibilidad lateral) y no existencia de señalización y control (no existen límites de velocidad de circulación en las curvas a estudiar), por lo que los resultados de esta investigación serán válidos bajo las mismas condiciones.

El trabajo realizado en este estudio permite sugerir las siguientes líneas de investigación:

- i. Analizar el impacto de otras variables geométricas y del entorno, tales como visibilidad, pendiente longitudinal y número de pistas, en los valores de aceleración y deceleración.
- ii. Estudiar el comportamiento de los conductores según edad y género, y relacionarlo con la agresividad en la conducción.
- iii. Identificar la influencia de las características del vehículo, principalmente del tamaño y capacidad del motor, en la aceleración y deceleración.
- iv. Calibrar perfiles de velocidad que consideren explícitamente el efecto de las aceleraciones y deceleraciones en la realidad local.
- v. Estudiar técnicas de suavización de datos válidas para registros de aceleraciones.
- vi. Definir criterios de diseño de curvas, considerando la longitud de la tangente de entrada para controlar efectos de grandes deceleraciones en distancias cortas.
- vii. Proponer clasificaciones de curvas en S como compuestas o aisladas en función de las aceleraciones y/o deceleraciones experimentadas en la tangente intermedia.

REFERENCIAS

Altamira, A., Y. García, T. Echaveguren y J. Marcet (2014) Acceleration and deceleration patterns on horizontal curves and their tangents on two-lane rural roads. **93rd Transportation Research Board Annual Meeting**. Washington, D.C. Estados Unidos. Enero.

Arellano, D. (2013) **Análisis de perfiles de velocidades de camiones en pendientes ascendentes**. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción, Concepción.

Basualto, J. (2003) **Incorporación de las aceleraciones en el análisis de consistencia del alineamiento horizontal**. Memoria de Título Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción, Concepción.

Bella, F. (2008) Assumptions of operating speed-profile models on deceleration and acceleration rates: verification in the driving simulator. **87th Annual Meeting Transportation Research Board**. Washington, D.C. Estados Unidos. Enero.

Box, G. y Cox, D. (1964) **An analysis of transformations**. Journal of the Royal Statistical Society. (26) 211-252.

Burr, I. (1942) Cumulative frequency functions. **Annals of Mathematical Statistics**. **13**. 215-32.

Campbell, J., C. Richard y J. Graham (2008) Human factors guidelines for road systems. **NCHRP Report 600-B. Transportation Research Board**. Washington, D.C. Estados Unidos. Septiembre.

Cohen, J. (1988) **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. 2a Edición. Academic Press. Nueva York.

Collins, K. M., y R. A. Krammes (1996) Preliminary validation of a speed-profile model for design consistency evaluation. **Transportation Research Record**. **1523**. 11-21.

Crisman B., A. Marchionna, P. Perco, A. Robba y R. Roberti (2005) Operating speed prediction model for two-lane rural roads. **3rd. International Symposium on Highway Geometric Design**. Chicago. Estados Unidos. Junio.

Crisman, B., A. Marchionna, P. Perco y R. Roberti (2004) Operating speed prediction model for two-lane rural roads. **II° International Congress S.I.I.V.** 27-29. Florencia. Italia. Octubre.

Crisman, B., P. Perco, A. Robba y R. Roberti (2007) Deceleration model for two-lane rural roads. **Advanced in Transportation Studies an International Journal, XI. 19-32.** Roma. Italia.

Dell'Acqua, G., F. Russo, T. Esposito y R. Lamberti (2008) Accelerazione e decelerazione in curva: indagine sperimentale. **17° Convegno Nazionale di Trasporti.** Enna. Italia. Septiembre.

Díaz W., A. (2013) **Modelación de Perfiles de Velocidad de Operación en Alineamientos Horizontales Compuestos.** Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción. Concepción.

Dimaiuta M., E. Donell, S. Himes y R. Porter (2011) Speed models in North America. **Transportation Research Circular E-C151 Modeling Operating Speed, Synthesis Report, Transportation Research Board.** Washington, D. C. Estados Unidos. Julio.

Echaveguren, T., P. Sepúlveda y S. Vargas-Tejeda (2011) Evaluación de precisión de mediciones de velocidad de operación en carreteras obtenidas con GPS. **XV Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte.** Santiago. Octubre.

Echaveguren, T., P. Sepúlveda y A. Díaz (2012) Estudio comparativo de mediciones de velocidad usando Pistola Laser y logger GPS. **Nota Técnica NT-003-10. FONDECYT 11090029.** Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Chile.

Echaveguren, T. y M. Basualto (2003). El análisis de aceleraciones en la consistencia de elementos simples de alineamientos horizontales. **XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**. Santiago. Octubre.

Echaveguren, T. y J. Sáez (2001) Estudio de relaciones velocidad-geometría horizontal en vías de la VIII Región. **X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**. Santiago. Octubre.

Echaveguren, T. y A. Díaz (2013) Perfiles de velocidad de operación para curvas horizontales aisladas. **XVI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte**. Santiago. Octubre.

Figueroa, A. y A. Tarko (2007) Speed changes in the vicinity of horizontal curves on two-lane rural roads. **Journal of Transportation Engineering**, **133(4)**. 215 – 222.

Fitzpatrick, K., L. Elefteriadou, D. Harwood, J. Collins, J. McFadden, I. Anderson, R. Krammes, N. Irizarry, K. Parma, K. Bauer y K. Passetti (2001) Speed Prediction for two-lane rural highways. **Publicación Federal Highway Administration**. **99 – 171**. Washington, D. C. Estados Unidos.

Fitzpatrick, K. y J. M. Collins (2000) Speed-profile model for two-lane rural highways. **Transportation Research Record**. **1737**. 42–49.

Fonseca, C. (2012) **Análisis de técnicas de suavización de datos de velocidad medidos con GPS VBox Mini**. Memoria de Título Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Concepción, Concepción.

Greenland, S. (2001) Ecologic versus individual-level sources of bias in ecologic estimates of contextual health effects. **International Epidemiological Association**. **30**. 1343–1350.

Hauer, E. (2005) Cause and effect in observational cross-section studies on road safety. **84th Annual Meeting of Transportation Research Board**. Washington, D.C. Estados Unidos. Enero.

Hirsh, M. (1987) Probabilistic approach to consistency in geometric design. **Journal of Transportation Engineering** **113** (3). 268–276.

Hu, W. y E. Donnell (2008) Models of acceleration and deceleration rates on a complex two-lane rural highway: results from a nighttime driving experiment. **Transportation Research Board**. **13(6)**. 397-408.

Hyams, D. (2011) **CurveExpert Profesional**. Versión 2.0.4. Estados Unidos.

Jeffery, L. y R. Krammes (2007) Speed-profile model for a design-consistency evaluation procedure in the United States. **Transportation Research Record**. **1701**. 76-85.

Kockelke W. y J. Steinbrecher (1987) Driving behavior investigations with respect to traffic safety in the area of community entrances. **Report of the Research Project 8363 of the German Federal Research Institute (Bundesanstalt für Strassenwesen Bereich Unfallforschung - BAST)**. **153**. Bergisch Gladbach. Alemania.

Krammes, R. A., R. Q. Brakett, M. A. Shafer, J. L. Ottesen, I. B. Anderson, K. L. Fink, K. M. Collins, y C. J. Messer (1995) Horizontal alignment design consistency for rural two-lane highways. **Federal Highway Administration 94-034**. Washington, D.C. Estados Unidos.

Lamm, R., E. Choueiri y J. Hayward (1988) Tangent as an independent design element. **Transportation Research Record**, **1195**. 123 – 131.

MathWave Technologies (2010). **EasyFit Profesional v. 5.5**. Ucrania.

McDonald, J. B. (1984) Some generalized functions for the size distribution of income. **Econometrica**, **52** (3). 647-663.

McFadden, J. y L. Elefteriadou (2000) Evaluating horizontal alignment design consistency for two-lane rural highways: development of a new procedure. **Transportation Research Record. 1737.** 9-17.

McLean, J. (1981) Driver speed behaviour and rural road alignment. **Traffic Engineering & Control. 22(4).** 208 – 211.

Memon, R., G. B. Khaskheli y A. S. Qureshi (2008) Operating speed models for two lane rural roads in Pakistan. **Canadian Journal of Civil Engineering. 35(5).** 443 – 453.

Ministerio de Obras Públicas, MOP, (2014). **Instrucciones y Criterios de Diseño.** Manual de Carreteras, Volumen 3. Santiago.

Park, Y. J. y F. Saccomanno (2006) Evaluating speed consistency between successive elements of a two-lane rural highway. **Transportation Research Part A: Policy & Practice. 40(5).** 375-385.

Perco, P. y A. Robba (2005) Evaluation of the deceleration rate for the operating speed-profile model. **III International Congress S.I.I.V.** Florencia. Italia. Octubre.

Pérez Zuriaga, A.M., A. García y F. J. Torregrosa (2011) Study of tangent to curve transition on two-lane rural roads with continuous speed profiles. **90th Annual Meeting Transportation Research Record.**

Pérez, A., A. García, F. Torregrosa y P. D'Attoma (2010) Modeling operating speed and deceleration on two-lane rural roads with global positioning system data. **Transportation Research Record, 2171.** 11-20.

Psarianos B. y A. García (2011) Speed models in Europe. **Transportation Research Circular E-C151 Modeling Operating Speed. Synthesis Report, Transportation Research Board.** Washington, D. C. Estados Unidos. Julio.

- Racelogic (2008). **VBOX Mini User Guide**. Reino Unido.
- Singhi, S. K., y G. S. Maddala (1976) A function for the size distribution of incomes. **Econometrica**, **44(5)**. 963-970.
- StatPoint Technologies, Inc. (2013) **STATGRAPHICS Centurion XVI**. Versión 16.2.04. Estados Unidos.
- Steierwald, G., y M. Buck (1992) Speed behaviour on two-lane rural roads with regard to design, operational and traffic related conditions. **Research Road Construction and Traffic Technique. 621**. Ministry of Transportation. Alemania.
- Steyer, R., A. Sossoumihen y G. Weise (2000) Traffic safety on two-lane roads. News concepts and findings. **2nd International Symposium on Highway Geometric Design Practices**. Maguncia. Alemania. Junio.
- Universität Düsseldorf (2006) **G*Power v. 3.0.5**. Alemania.
- VSS. (1991) **Highway Design, Fundamentals, Speed as a Design Element. Publication Swiss Norm SN 640 080 a/b**. Swiss Association of Road Specialist, Zurich, Suiza.
- Wagner, P. (2005) Empirical Description of Car-Following. **Traffic & Granular Flow. 3**. 15-27.
- Yang, L. y Y. Hassan. (2008) Driver speed and acceleration behavior on Canadian roads. **87th Annual Meeting Transportation Research Board**. 13 – 17. Washington, D.C. Estados Unidos. Enero.

ANEXOS

ANEXO 4.1 Procedimiento de identificación de la velocidad de aproximación

El procedimiento adoptado para identificar gráficamente esta variable consideró los siguientes pasos:

- i) Se graficó la velocidad de operación y la aceleración longitudinal para cada una de las repeticiones, desde el inicio de la medición (posición 0,0 m) hasta el principio de la curva de entrada (PC₁).
- ii) En el gráfico se identificaron cuatro puntos y tres zonas de importancia, los que para el caso particular de la repetición 15 de la curva 50.10.1.1, se muestran en la Figura A.4.1.

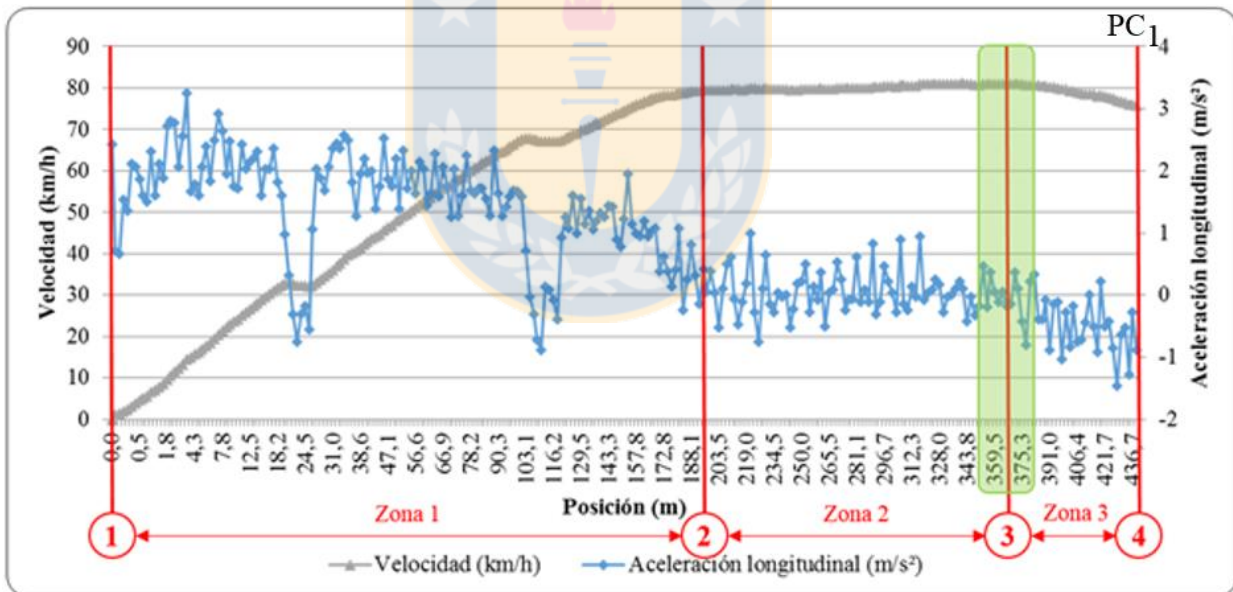


Figura A.4.1 Identificación gráfica de la velocidad de aproximación y otros puntos de interés

- El punto 1 representa el punto inicio de medición. Se vincula a la posición 0,0 m.
- El punto 2 se identifica gráficamente y se vincula a la posición en la que el vehículo objetivo es alcanzado por el vehículo seguidor, dando inicio al seguimiento propiamente tal. La

zona 1, ubicada entre los puntos 1 y 2, se define como la zona de acomodamiento del seguimiento y se eliminó de la base de datos por no representar la operación real del conductor objetivo.

- El punto 3 representa el punto de inicio de maniobras para el ingreso a la curva. La zona 2, ubicada entre los puntos 2 y 3, es la zona de seguimiento antes de la curva. Nótese que el punto 3 está contenido dentro del intervalo de área sombreada, pero no es posible precisarlo completamente de forma gráfica; su identificación se describe en el punto iii).

- El punto 4 es el punto de inicio de la curva de entrada, (PC_1). La zona 3, ubicada entre los puntos 3 y 4, es la zona en la que el conductor realiza las maniobras necesarias para ajustar su velocidad y entrar a la curva; representa la distancia de inicio de maniobras.

iii) Gráficamente se obtiene un intervalo de localización del punto 3 (área sombreada de la Figura A.4.1). Para precisarlo, se ubicó el punto de máxima velocidad dentro del intervalo, el cual corresponde al punto de inicio de maniobras.

La Tabla A.4.1 muestra un ejemplo de identificación del punto 3, para el caso particular de la repetición 15 de la curva 50.10.1.1.

Tabla A.4.1 Ejemplo de identificación del punto 3, para la repetición 15 de la curva 50.10.1.1

Distancia(m)	Velocidad (km/h)	Acel. longitudinal (m/s ²)
350,53	80,8	-0,17
352,77	81,0	0,47
355,02	80,9	-0,19
357,27	81,0	0,36
359,52	81,1	0,06
361,77	81,0	-0,11
364,02	81,5	0,06
366,27	80,9	-0,17
368,52	80,9	-0,14
370,77	81,0	0,36
373,02	81,1	0,11
375,27	80,9	-0,42

El valor máximo de velocidad, sombreado en la Tabla A.4.1, se obtiene en la posición 364,02 m y corresponde a 81,5 km/h.

iv) La velocidad en el punto 3, se asumió como la velocidad de aproximación, V_{ap} , definida anteriormente.

v) Se repite el proceso para cada una de las mediciones de la base de datos.

A modo de resumen, la Tabla A.4.2 muestra la estadística descriptiva de la velocidad de aproximación, medida en (km/h), y su posición, medida en m antes del principio de la curva de entrada (PC_1), para cada repetición de las 23 curvas de la base de datos.



Tabla A.4.2 Estadística descriptiva de la velocidad de aproximación y su ubicación, para cada curva de la base de datos

	CURVA											
	4.1.1.1		7.1.1.2		11.1.2.1		12.1.2.1		19.5.1.2		20.6.1.2	
	v_{ap} (km/)	Pos. (m)	v_{ap} (km/)	Pos. (m)	v_{ap} (km/)	Pos. (m)	v_{ap} (km/)	Pos. (m)	v_{ap} (km/)	Pos. (m)	v_{ap} (km/)	Pos. (m)
Media	98,5	879,6	105,2	822,7	99,1	475,0	99,3	446,6	95,2	218,5	84,7	98,8
Desviación estándar	12,5	374,1	13,6	141,4	11,8	47,8	9,0	51,9	4,9	50,3	6,0	15,4
Mínimo	78,7	149,4	73,8	431,9	72,3	304,5	79,3	263,0	85,0	114,0	63,3	70,0
Máximo	125,2	1797,2	126,8	1049,2	118,0	529,2	116,5	507,2	103,5	309,9	90,9	124,0
Percentil 50	97,4	928,4	107,8	832,5	100,9	470,2	99,4	451,4	96,4	213,1	86,1	100,3
Percentil 85	110,7	1105,2	118,2	958,6	111,0	517,1	106,4	486,2	99,8	269,9	89,9	115,9
Percentil 99	123,5	1701,8	125,7	1048,5	117,2	528,9	116,4	505,2	103,2	306,1	90,9	123,6
	CURVA											
	21.6.1.1		22.6.1.2		37.8.1.1		41.8.1.2		44.9.1.1		46.9.1.2	
	v_{ap} (km/)	Pos. (m)	v_{ap} (km/)	Pos. (m)	v_{ap} (km/)	Pos. (m)	v_{ap} (km/)	Pos. (m)	v_{ap} (km/)	Pos. (m)	v_{ap} (km/)	Pos. (m)
Media	101,1	328,9	101,3	352,5	92,2	302,6	96,8	411,1	97,0	609,3	82,3	197,1
Desviación estándar	8,6	48,6	7,9	87,6	12,3	41,2	13,5	126,5	10,6	28,5	6,1	39,9
Mínimo	88,0	245,3	85,4	197,4	71,4	185,9	72,1	190,0	73,0	550,0	66,7	120,6
Máximo	114,8	408,4	117,0	585,5	114,1	377,2	134,7	640,0	116,0	664,3	90,9	283,6
Percentil 50	99,7	341,5	100,4	361,8	92,7	306,9	96,4	396,0	98,6	609,8	83,4	204,4
Percentil 85	110,1	376,1	109,4	395,1	107,0	328,7	108,6	582,0	106,8	644,4	87,7	231,9
Percentil 99	114,5	406,0	115,8	566,5	114,0	377,0	129,3	637,2	115,4	662,5	90,7	274,6

Tabla A.4.2 Estadística descriptiva de la velocidad de aproximación y su ubicación, para cada curva de la base de datos (continuación)

	CURVA											
	47.9.1.2		50.10.1.1		52.10.1.2		54.11.1.1		55.11.1.2		60.13.1.1	
	V _{ap} (km/)	Pos. (m)	V _{ap} (km/)	Pos. (m)	V _{ap} (km/)	Pos. (m)	V _{ap} (km/)	Pos. (m)	V _{ap} (km/)	Pos. (m)	V _{ap} (km/)	Pos. (m)
Media	87,0	524,8	76,9	247,4	92,7	622,4	95,0	481,0	100,2	385,0	99,7	385,3
Desviación estándar	8,4	47,3	8,4	36,1	11,9	163,0	10,0	205,0	8,2	143,2	16,9	61,2
Mínimo	66,1	376,0	59,7	141,2	69,1	309,6	73,5	213,0	88,5	288,1	62,0	221,6
Máximo	98,4	600,1	91,8	312,4	109,3	901,4	107,5	698,6	111,7	809,8	130,2	505,3
Percentil 50	87,9	527,0	78,2	250,0	97,6	620,5	97,7	383,5	100,7	315,1	99,4	397,8
Percentil 85	96,0	555,4	85,5	279,8	103,8	820,2	103,5	687,6	110,3	535,7	118,1	441,5
Percentil 99	98,3	599,0	90,7	307,0	108,8	900,0	107,5	698,5	111,6	773,4	128,5	497,3
	CURVA											
	61.12.2.2		62.13.2.2		63.13.3.2		66.15.1.1		67.15.1.2			
	V _{ap} (km/)	Pos. (m)	V _{ap} (km/)	Pos. (m)	V _{ap} (km/)	Pos. (m)	V _{ap} (km/)	Pos. (m)	V _{ap} (km/)	Pos. (m)		
Media	86,1	194,4	101,5	732,9	102,6	468,5	94,4	353,0	86,9	494,3		
Desviación estándar	10,6	27,5	13,6	250,3	14,4	107,8	9,1	45,6	9,9	86,8		
Mínimo	65,9	142,0	66,8	420,5	71,7	138,1	77,1	281,1	66,3	298,0		
Máximo	100,0	233,1	123,5	1349,0	122,3	613,3	112,6	483,0	104,8	774,3		
Percentil 50	91,7	192,6	101,5	653,7	106,6	476,7	97,1	357,0	88,9	498,0		
Percentil 85	93,9	230,1	115,4	930,8	116,1	562,0	102,0	378,0	95,8	525,7		
Percentil 99	99,5	232,8	122,4	1342,1	121,7	605,6	111,2	467,9	103,9	732,4		

La Tabla A.4.2 muestra que la velocidad de aproximación media fluctúa entre los 82 y 103 km/h, con una desviación estándar entre 5 y 17 km/h. Se observan además los valores mínimos, máximos y los percentiles 50, 85 y 99, lo que entrega una noción de la variabilidad de la velocidad de aproximación, en cada curva de la base de datos.

ANEXO 5.1 Distribuciones de probabilidad y test de bondad de ajuste

En la presente sección se listan las distribuciones de probabilidad que se probaron en la base de datos de trabajo. Este proceso fue realizado mediante el *software* EasyFit, el cual evalúa la bondad de ajuste mediante tres test estadísticos.

Las funciones de distribución de probabilidad, pdf, que se ajustaron a los datos del presente estudio, son las siguientes:

1. *Beta*
2. *Johnson SB*
3. *Kumaraswamy*
4. *Pert*
5. *Power Function*
6. *Reciprocal*
7. *Triangular*
8. *Uniform*
9. *Cauchy*
10. *Error*
11. *Error Function*
12. *Gumbel Max*
13. *Gumbel Min*
14. *Hyperbolic Secant*
15. *Johnson SU*
16. *Laplace (Double Exponential)*
17. *Logistic*
18. *Normal*
19. *Student's t*
20. *Burr*
21. *Chi-Squared*
22. *Dagum*
23. *Erlang*
24. *Exponential*
25. *F Distribution*
26. *Fatigue Life (Birnbaum-Saunders)*
27. *Frechet*
28. *Gamma*
29. *Generalized Gamma*
30. *Inverse Gaussian*
31. *Levy*
32. *Log-Gamma*
33. *Log-Logistic*
34. *Lognormal*
35. *Nakagami*
36. *Pareto (First Kind)*
37. *Pareto (Second Kind)*
38. *Pearson Type 5*
39. *Pearson Type 6*
40. *Rayleigh*
41. *Rice*
42. *Weibull*
43. *Generalized Extreme Value*
44. *Generalized Logistic*

45. *Generalized Pareto*

48. *Phased Bi-Weibull*

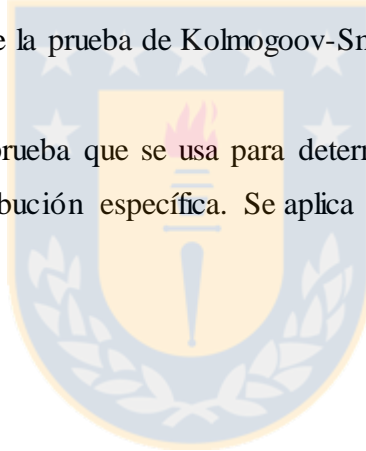
46. *Log-Pearson 3*

49. *Wakeby*

47. *Phased Bi-Exponential*

Los test estadísticos utilizados para evaluar la bondad de ajuste son:

- a) Kolmogorov-Smirnov: Es una prueba que se utiliza para decidir si una muestra procede o no de una distribución continua de hipótesis.
- b) Anderson-Darling: Es un test que compara el ajuste de una función de distribución acumulada observada con una función de distribución acumulada esperada. Esta prueba da más peso a las colas que la prueba de Kolmogorov-Smirnov.
- c) Chi-Cuadrado: Es una prueba que se usa para determinar si una muestra proviene o no de una población con distribución específica. Se aplica sólo a datos agrupados.



ANEXO 5.2 Gráficas de percentiles de aceleración

En esta sección se muestran las gráficas de los percentiles 50, 80, 85, 90, 95 y 99, para cada una de las filas no vacías de la matriz factorial de la Tabla 4.5. Además, se muestra el valor de aceleración calculado con la Ecuación 2.2 para compararlo con la aceleración medida directamente.

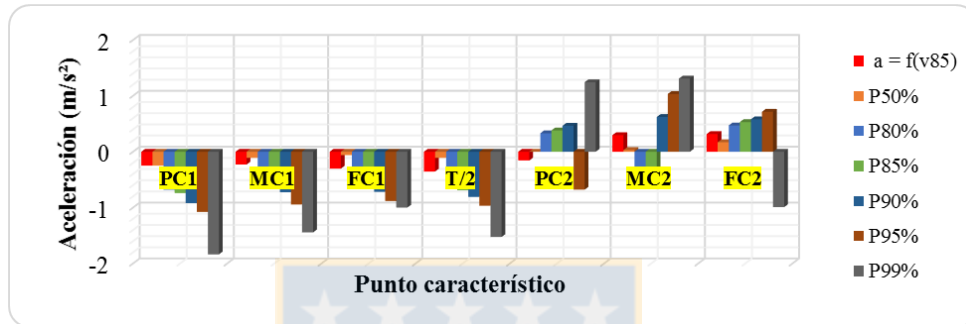


Figura A.5.1 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor o igual a 70 km/h

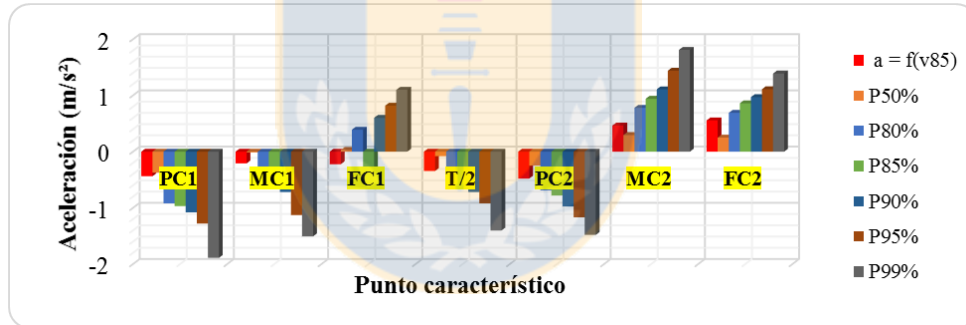


Figura A.5.2 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor entre 71 y 80 km/h

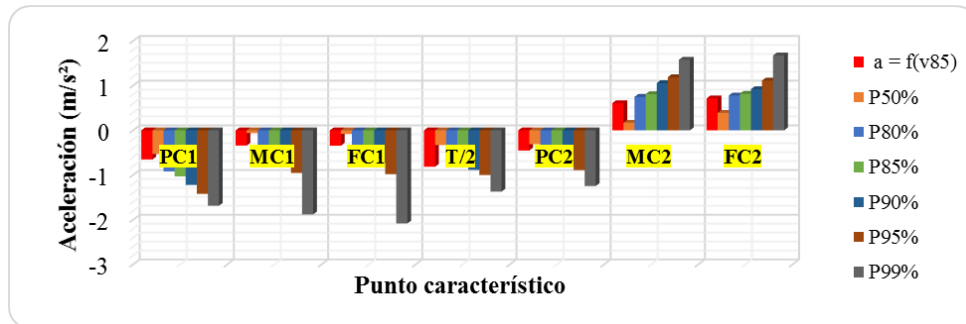


Figura A.5.3 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor entre 81 y 90 km/h

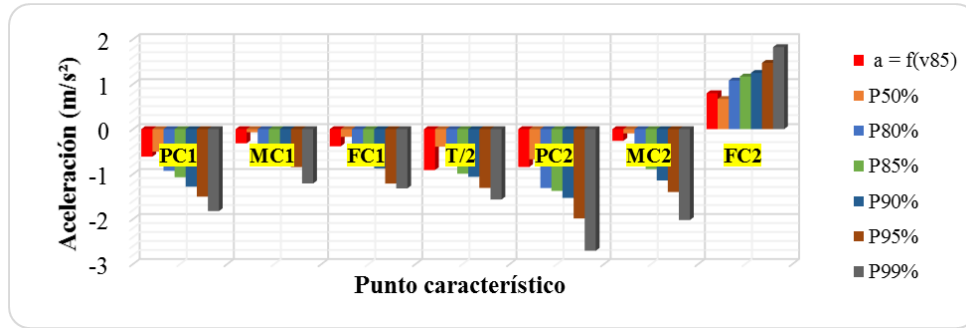


Figura A.5.4 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor entre 91 y 100 km/h

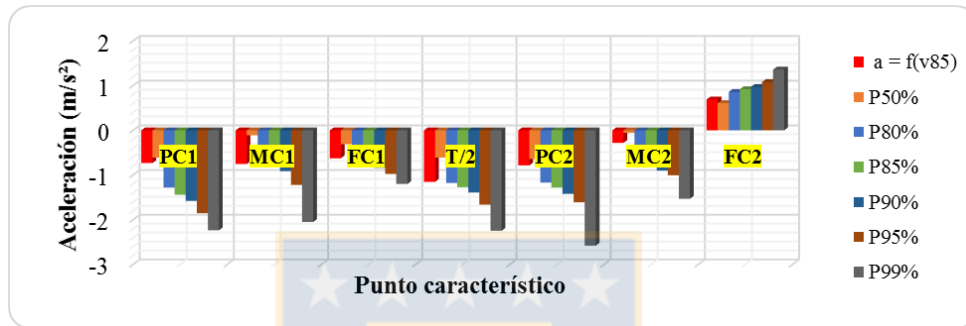


Figura A.5.5 Percentiles de aceleración para radios de entrada, salida y longitud de tangente intermedia menores a 200 m y velocidad de aproximación menor entre 101 y 110 km/h

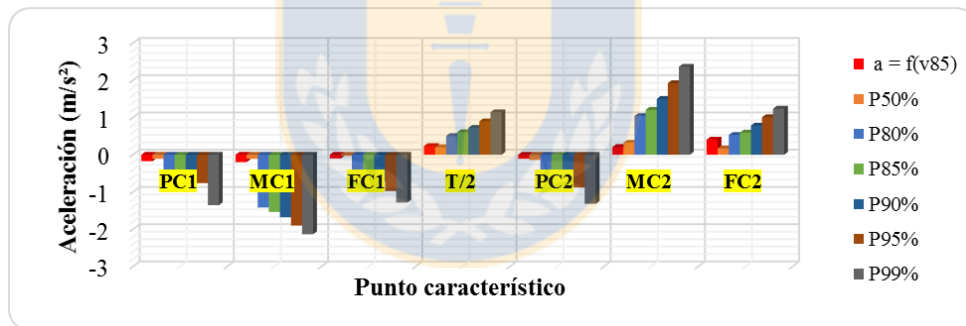


Figura A.5.6 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h

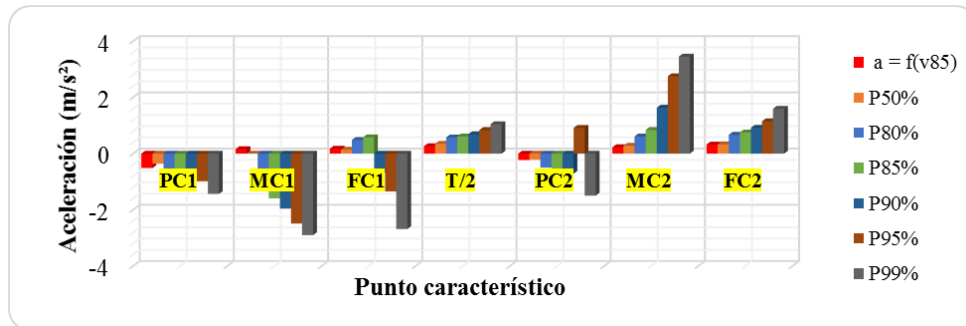


Figura A.5.7 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

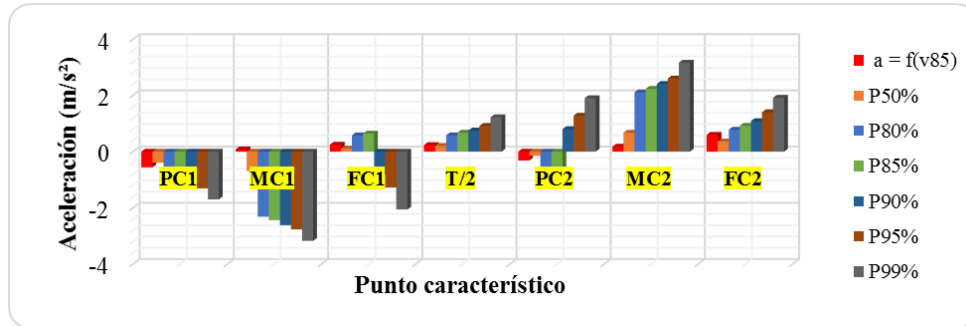


Figura A.5.8 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h

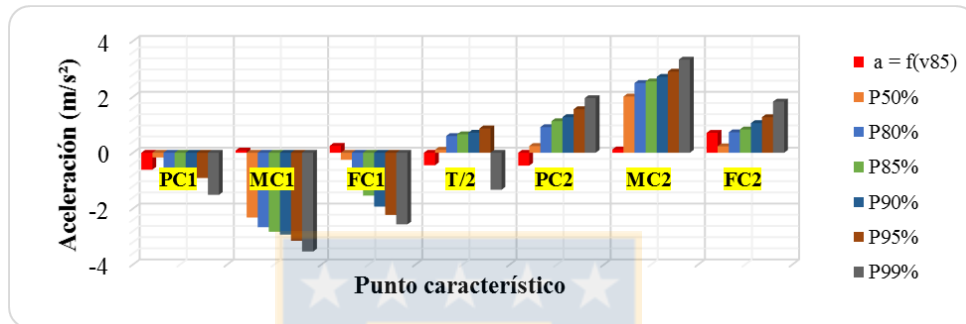


Figura A.5.9 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida menores a 200 m, longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h

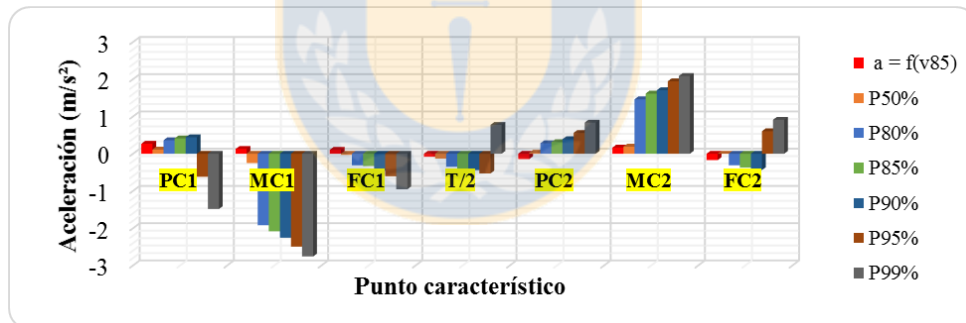


Figura A.5.10 Percentiles de aceleración para radios de entrada menores a 200 m, L_{Ti} y radio de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h

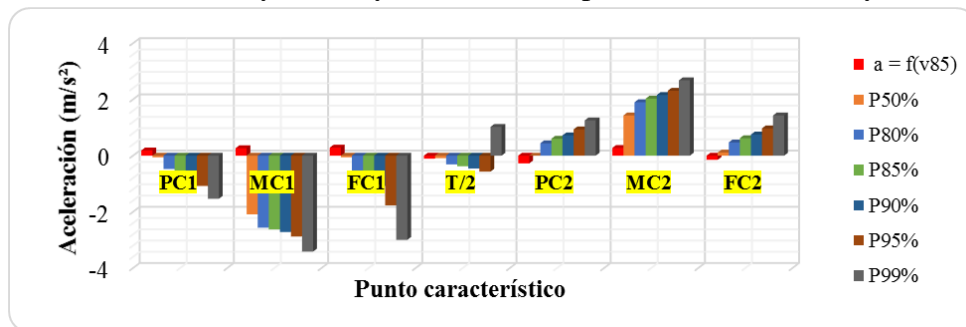


Figura A.5.11 Percentiles de aceleración para radios de entrada menores a 200 m, L_{Ti} y radio de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

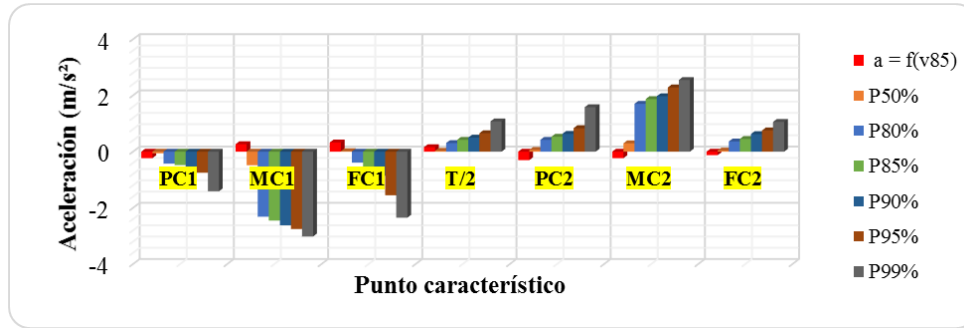


Figura A.5.12 Percentiles de aceleración para radios de entrada menores a 200 m, LTI y radio de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h

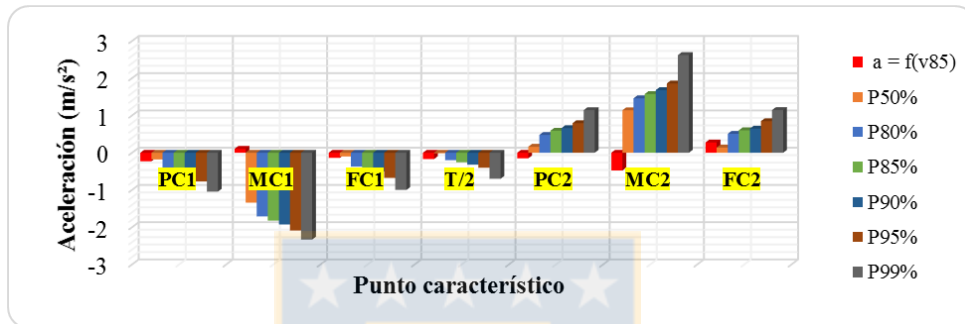


Figura A.5.13 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, longitud de tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h

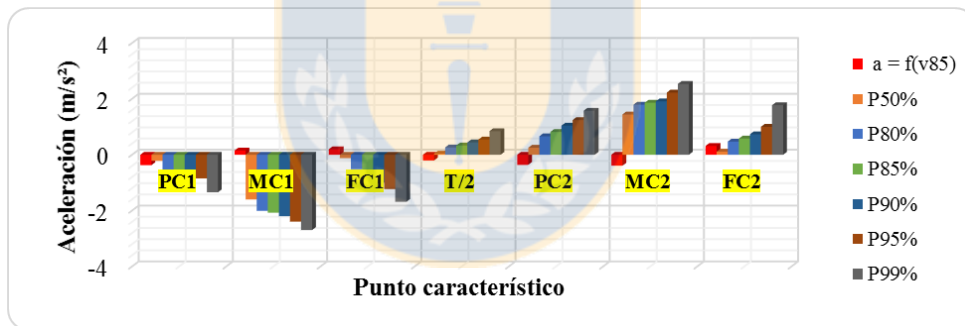


Figura A.5.14 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, longitud de tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

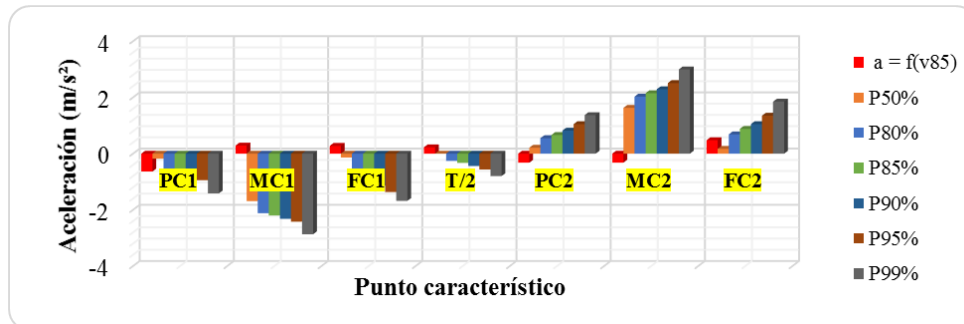


Figura A.5.15 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, longitud de tangente intermedia menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h

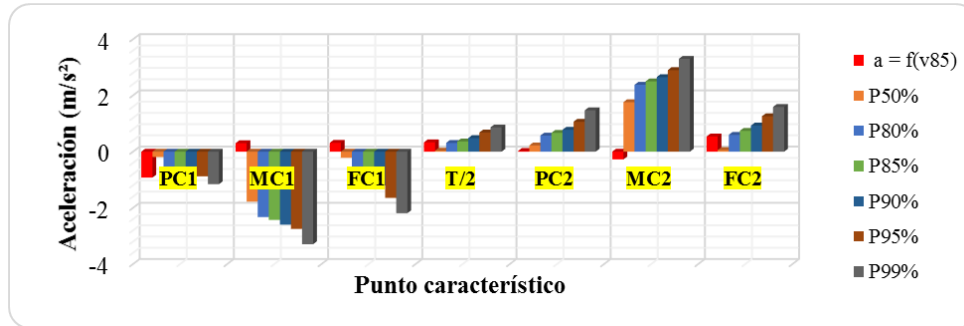


Figura A.5.16 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, LTI menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h

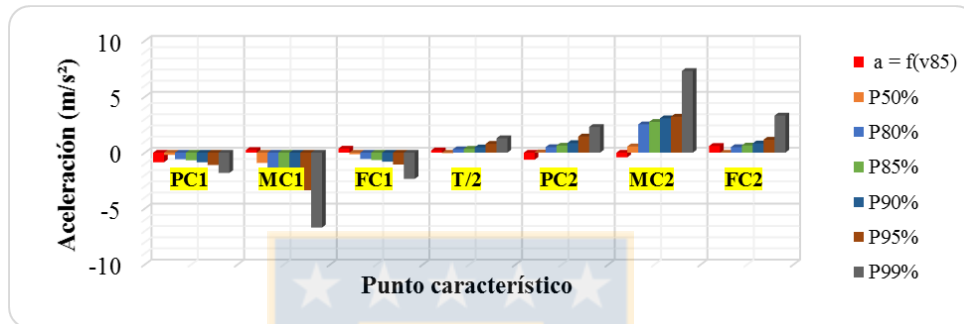


Figura A.5.17 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, LTI menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h

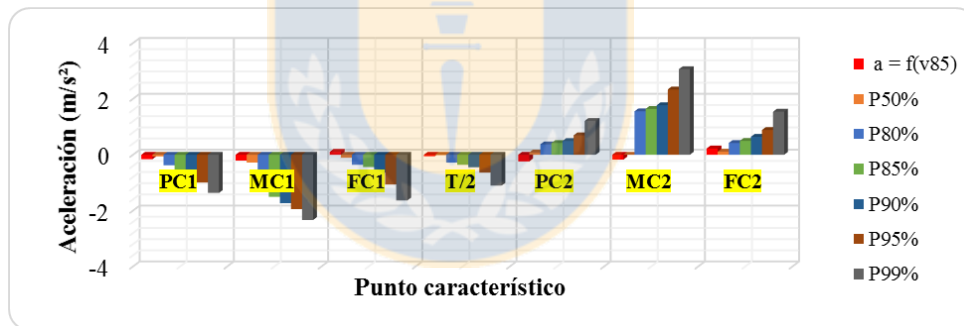


Figura A.5.18 Percentiles de aceleración para radios de entrada y LTI entre 201 y 400 m, radios de salida menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

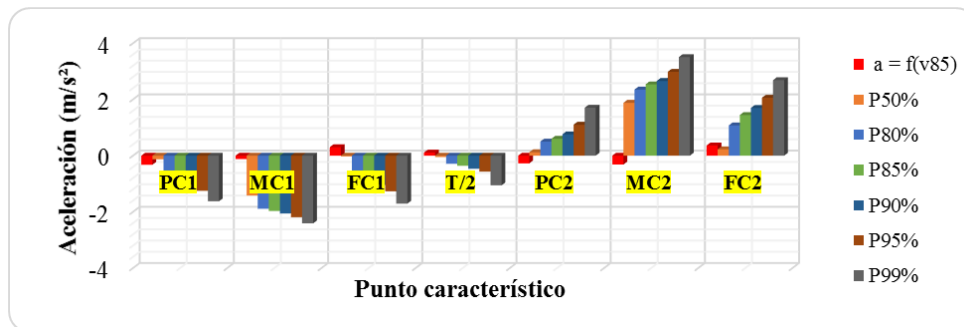


Figura A.5.19 Percentiles de aceleración para radios de entrada y LTI entre 201 y 400 m, radios de salida menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h

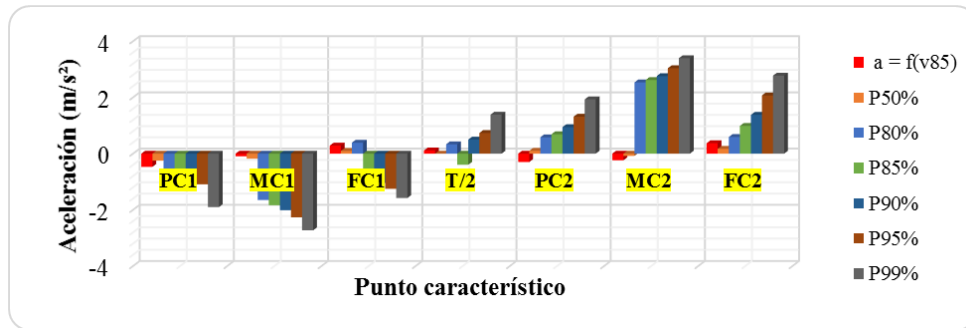


Figura A.5.20 Percentiles de aceleración para radios de entrada y LTI entre 201 y 400 m, radios de salida menores a 200 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h

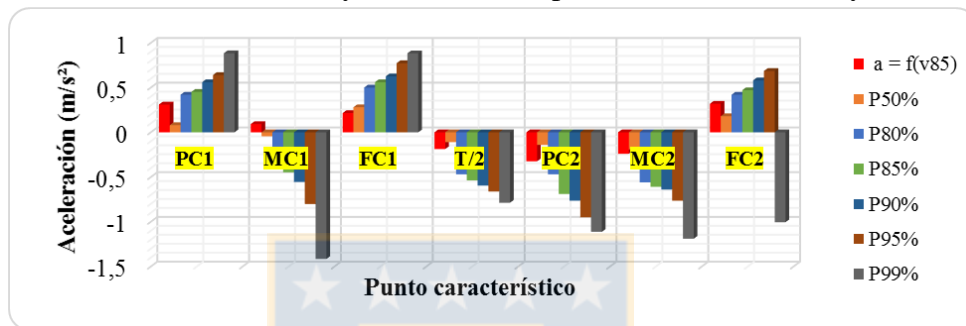


Figura A.5.21 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

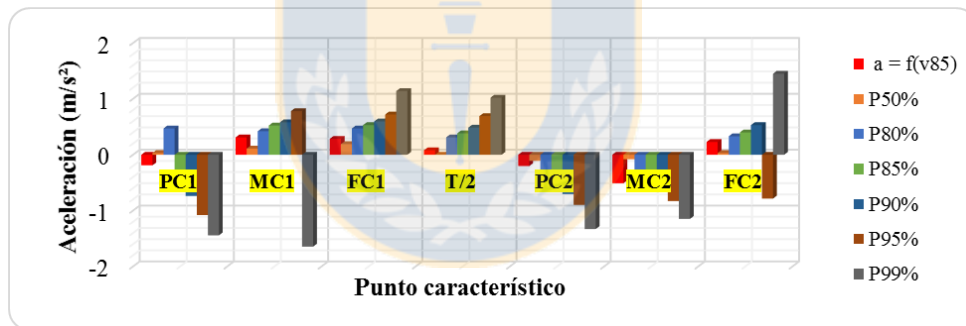


Figura A.5.22 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h

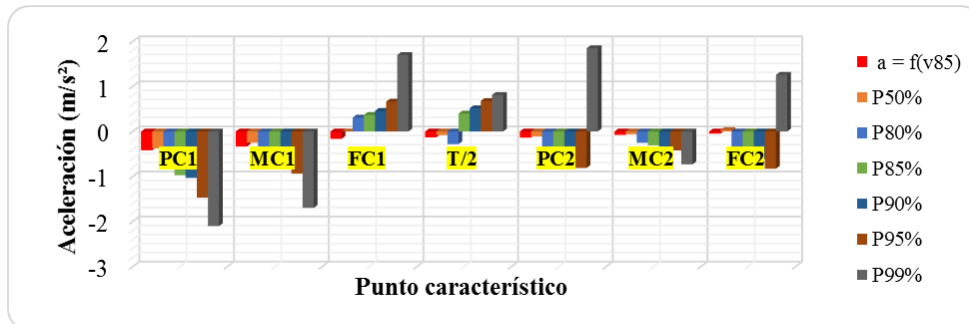


Figura A.5.23 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h

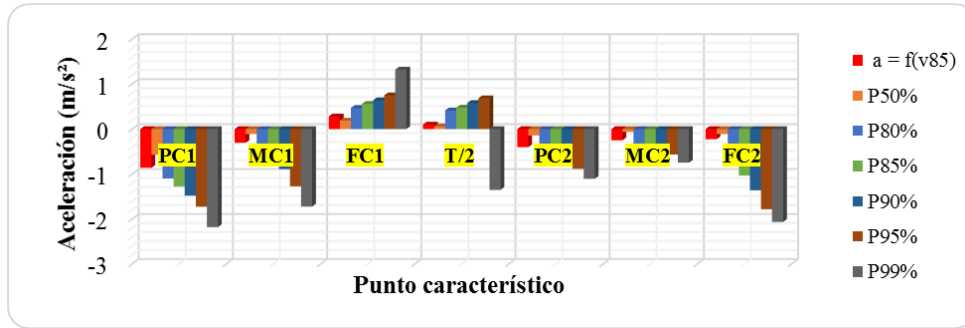


Figura A.5.24 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m y velocidad de aproximación entre 1111 y 120 km/h

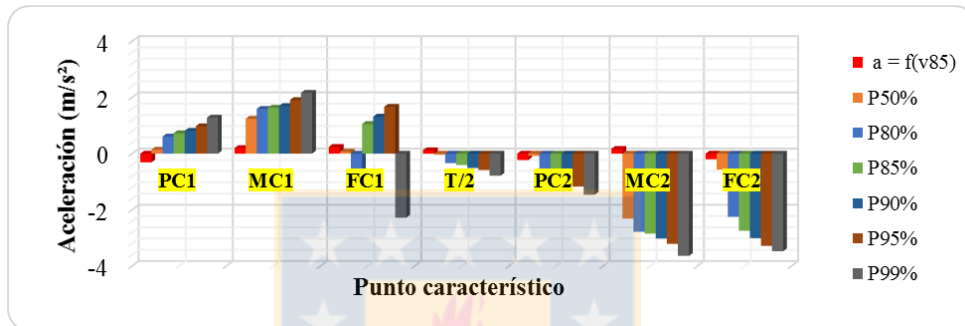


Figura A.5.25 Percentiles de aceleración para radios de entrada entre 201 y 400 m, L_{Ti} mayor a 400 m, radios de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h

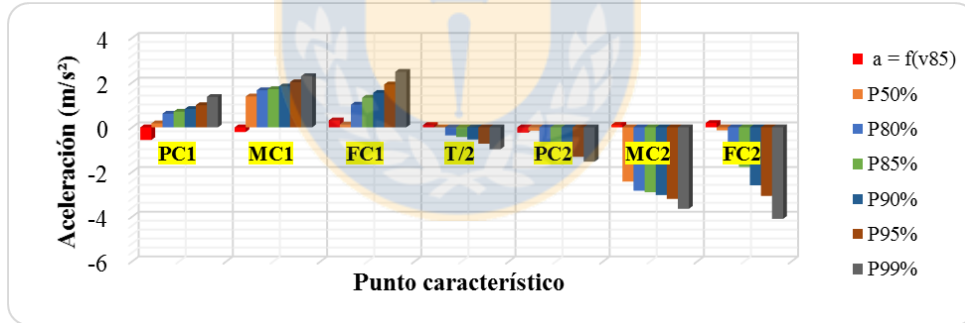


Figura A.5.26 Percentiles de aceleración para radios de entrada entre 201 y 400 m, L_{Ti} mayor a 400 m, radios de salida menor a 200 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

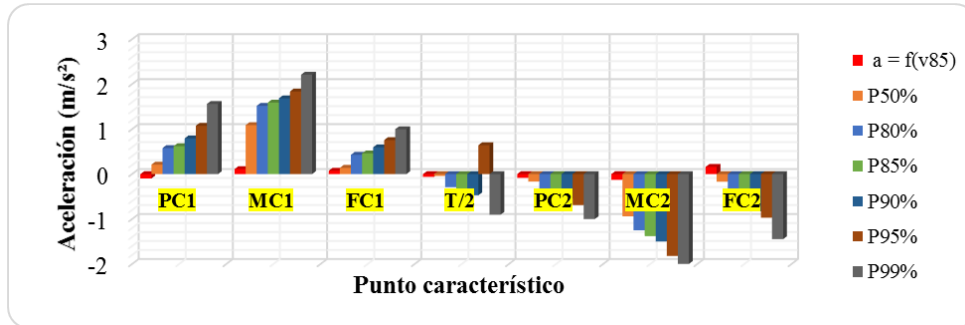


Figura A.5.27 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, L_{Ti} mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

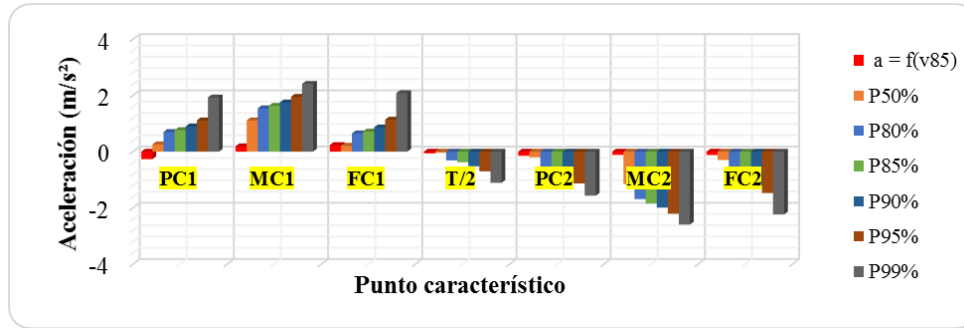


Figura A.5.28 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, LTI mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h

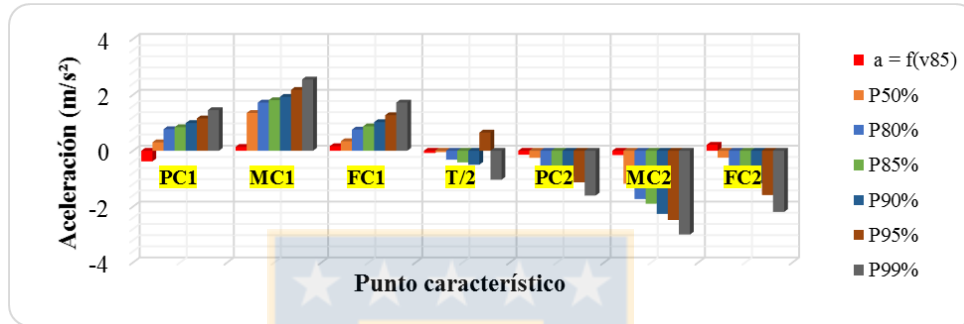


Figura A.5.29 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, LTI mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h

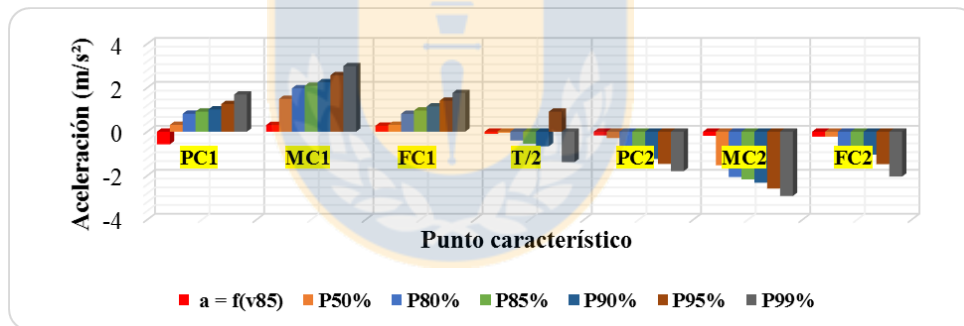


Figura A.5.30 Percentiles de aceleración para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m, LTI mayor a 400 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h

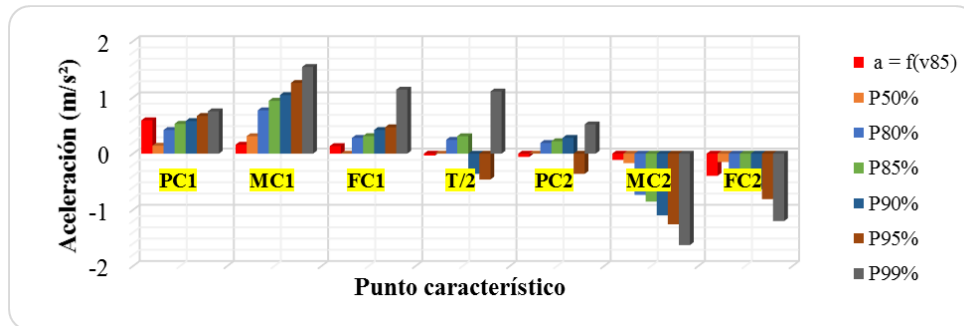


Figura A.5.31 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 71 y 80 km/h

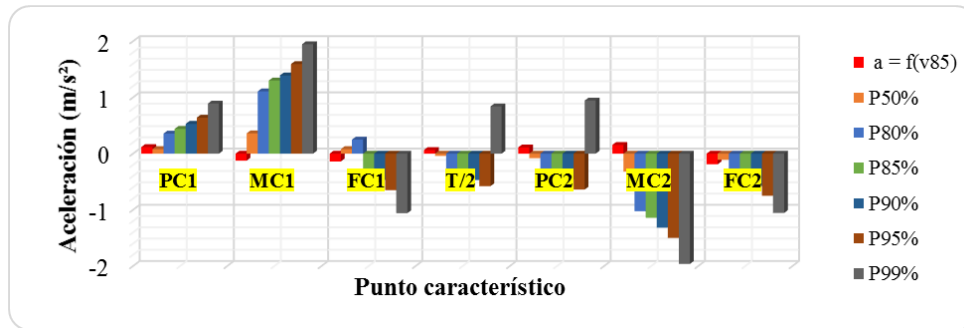


Figura A.5.32 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 81 y 90 km/h

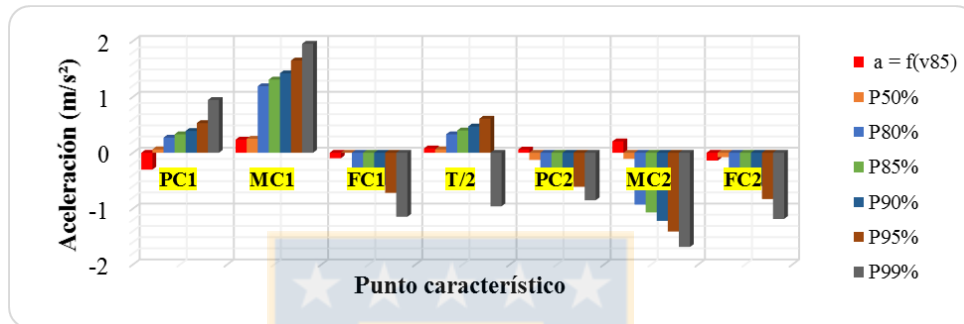


Figura A.5.33 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 91 y 100 km/h

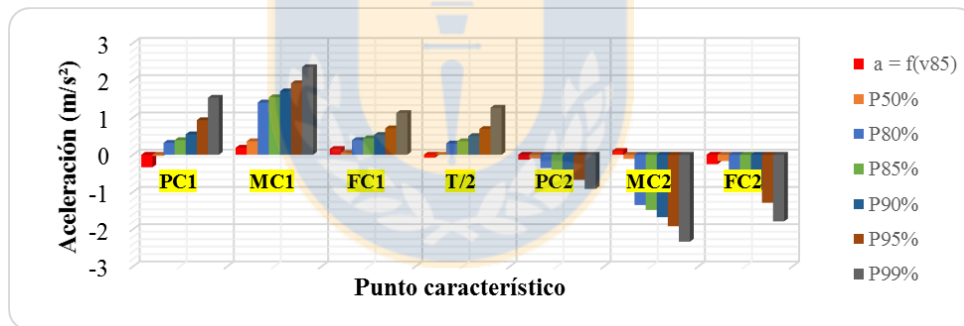


Figura A.5.34 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 101 y 110 km/h

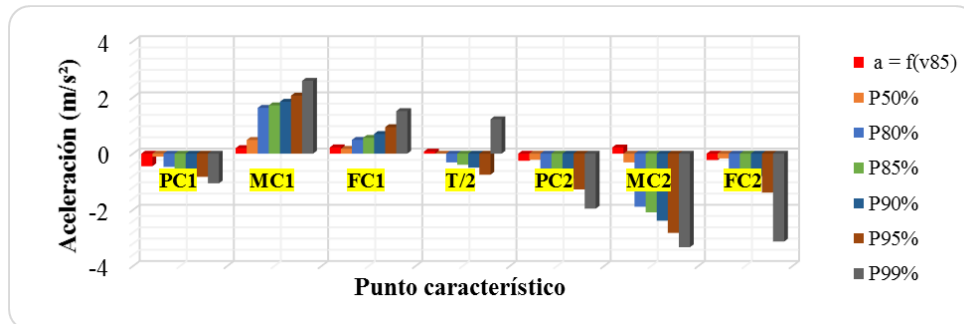


Figura A.5.35 Percentiles de aceleración para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m y velocidad de aproximación entre 111 y 120 km/h

ANEXO 5.3 Patrones de comportamiento según geometría

Tabla A.5.1 Patrones de comportamiento para distintas combinaciones de geometría y velocidad

Fila de la Matriz Factorial	Combinación geométrica	Punto	V _{ap} (km/h)					
			≤ 70	71 - 80	81 - 90	91 - 100	101 - 110	111 - 120
1	Re, LTi y Rs < 200 m	PC1	d	d	d	d	d	-
		MC1	d	d	d	d	d	-
		FC1	d	a	d	d	d	-
		T/2	d	d	d	d	d	-
		PC2	a	d	d	d	d	-
		MC2	a	a	a	d	d	-
		FC2	a	a	a	a	a	-
2	Re y Rs < 200 m y LTi entre 201 y 400 m	PC1	-	d	d	d	d	-
		MC1	-	d	d	d	d	-
		FC1	-	d	d	d	d	-
		T/2	-	a	a	a	a	-
		PC2	-	d	d	a	a	-
		MC2	-	a	a	a	a	-
		FC2	-	a	a	a	a	-
3	Re < 200 m y LTi y Rs entre 201 y 400 m	PC1	-	d	d	d	-	-
		MC1	-	d	d	d	-	-
		FC1	-	d	d	d	-	-
		T/2	-	d	d	a	-	-
		PC2	-	a	a	a	-	-
		MC2	-	a	a	a	-	-
		FC2	-	a	a	a	-	-
4	Re y Rs entre 201 y 400 m y LTi < 200 m	PC1	-	d	d	d	d	d
		MC1	-	d	d	d	d	d
		FC1	-	d	d	d	d	d
		T/2	-	d	a	d	a	a
		PC2	-	a	a	a	a	a
		MC2	-	a	a	a	a	a
		FC2	-	a	a	a	a	a
5	Re y LTi entre 201 y 400 m y Rs < 200 m	PC1	-	-	d	d	d	-
		MC1	-	-	d	d	d	-
		FC1	-	-	d	d	d	-
		T/2	-	-	d	d	a	-
		PC2	-	-	a	a	a	-
		MC2	-	-	a	a	a	-
		FC2	-	-	a	a	a	-

Fila de la Matriz Factorial	Combinación geométrica	Punto	V _{ap} (km/h)					
			≤ 70	71 - 80	81 - 90	91 - 100	101 - 110	111 - 120
6	Re, Rs y LTi entre 201 y 400 m	PC1	-	-	a	d	d	d
		MC1	-	-	d	a	d	d
		FC1	-	-	a	a	a	a
		T/2	-	-	d	a	a	a
		PC2	-	-	d	d	d	d
		MC2	-	-	d	d	d	d
		FC2	-	-	a	a	d	d
7	Re entre 201 y 400 m, LTi > 400 m y Rs < 200 m	PC1	-	a	a	-	-	-
		MC1	-	a	a	-	-	-
		FC1	-	a	a	-	-	-
		T/2	-	d	d	-	-	-
		PC2	-	d	d	-	-	-
		MC2	-	d	d	-	-	-
		FC2	-	d	d	-	-	-
8	Re entre 201 y 400 m, LTi > 400 m y Rs entre 201 y 400 m	PC1	-	-	a	a	a	a
		MC1	-	-	a	a	a	a
		FC1	-	-	a	a	a	a
		T/2	-	-	d	d	d	d
		PC2	-	-	d	d	d	d
		MC2	-	-	d	d	d	d
		FC2	-	-	d	d	d	d
9	Re, Rs y LTi > 400 m	PC1	-	a	a	a	a	d
		MC1	-	a	a	a	a	a
		FC1	-	a	d	d	a	a
		T/2	-	d	d	a	a	d
		PC2	-	d	d	d	d	d
		MC2	-	d	d	d	d	d
		FC2	-	d	d	d	d	d

En la Tabla A.5.1, a y d indica una tendencia a acelerar y decelerar, respectivamente y “-” da cuenta de la no existencia de registros para una determinada combinación de geometría y velocidad de aproximación.

ANEXO 5.4 Aceleración de operación

En esta sección se presentan los valores de la aceleración de operación, percentil 95, en cada punto característico de la curva y para cada celda no vacía de la matriz factorial de la Tabla 4.5.

Tabla A.5.2 Valores de la aceleración de operación

Celda de la matriz factorial	Punto Característico										
	PC1-200	PC1-100	PC1-50	PC1	MC1	FC1	T/2	PC2	MC2	FC2	FC2+50
A1	0,89	-0,72	-0,97	-1,08	-0,95	-0,88	-0,97	-0,68	1,03	0,72	0,72
A2	-0,82	-0,83	-1,01	-1,28	-1,13	0,82	-0,92	-1,17	1,44	1,11	0,98
A3	1,01	-0,78	-1,07	-1,42	-0,95	-0,98	-1,00	-0,89	1,19	1,11	1,01
A4	-0,64	-0,70	-0,94	-1,50	-0,84	-1,21	-1,31	-1,99	-1,40	1,47	1,08
A5	-0,75	-0,83	-1,07	-1,85	-1,22	-0,97	-1,66	-1,61	-1,00	1,08	1,03
B2	0,44	0,65	-0,81	-0,76	-1,90	-0,97	0,89	-0,88	1,92	1,01	0,82
B3	-0,78	-1,00	-1,18	-0,98	-2,49	-1,34	0,84	0,92	2,75	1,15	1,02
B4	0,53	-1,00	-1,39	-1,31	-2,77	-1,28	0,91	1,28	2,60	1,40	0,97
B5	0,59	1,25	0,59	-0,91	-3,16	-2,23	0,87	1,56	2,90	1,27	0,75
C2	-0,50	0,47	0,58	-0,62	-2,49	-0,61	-0,53	0,56	1,94	0,60	0,48
C3	-1,06	-0,74	-0,55	-1,08	-2,88	-1,77	-0,57	0,93	2,31	0,97	0,72
C4	-0,73	-0,92	-0,53	-0,75	-2,76	-1,55	0,66	0,83	2,28	0,75	0,60
D2	0,40	-0,50	-0,56	-0,77	-2,09	-0,68	-0,41	0,79	1,86	0,85	0,49
D3	0,47	-0,83	-0,57	-0,85	-2,39	-1,23	0,54	1,24	2,23	1,00	0,78
D4	-0,54	-0,71	-0,75	-0,95	-2,42	-1,37	-0,56	1,05	2,51	1,35	0,58
D5	-0,70	-0,81	-0,78	-0,88	-2,75	-1,65	0,68	1,06	2,90	1,26	-0,97
D6	-0,55	-0,89	-0,88	-1,11	-3,37	-1,06	0,79	1,45	3,22	1,16	-1,00

Celda de la matriz factorial	Punto Característico										
	PC1-200	PC1-100	PC1-50	PC1	MC1	FC1	T/2	PC2	MC2	FC2	FC2+50
E3	0,57	-0,65	-0,65	-0,99	-1,95	-1,07	-0,64	0,70	2,34	0,88	0,66
E4	-0,56	-0,76	-0,86	-1,25	-2,19	-1,27	-0,57	1,10	2,98	2,06	0,66
E5	0,63	-0,64	-0,85	-1,09	-2,27	-1,25	0,74	1,32	3,04	2,07	0,72
F3	0,78	1,02	-0,91	0,64	-0,80	0,77	-0,66	-0,95	-0,77	0,69	-0,87
F4	1,29	1,31	1,08	-1,08	0,78	0,72	0,69	-0,90	-0,83	-0,79	-0,88
F5	-1,42	-0,93	-1,32	-1,47	-0,94	0,66	0,68	-0,81	-0,42	-0,83	-1,16
F6	-1,60	-1,56	-1,42	-1,72	-1,27	0,75	0,68	-0,88	-0,57	-1,78	-1,43
G2	-0,58	-0,44	0,46	0,97	1,91	1,67	-0,58	-1,17	-3,21	-3,28	0,69
G3	-0,57	0,47	0,46	0,99	2,02	1,92	-0,73	-1,32	-3,20	-3,07	0,57
H3	-0,62	-0,71	0,57	1,07	1,84	0,76	0,64	-0,69	-1,82	-0,97	0,47
H4	-0,66	0,65	-0,59	1,11	1,95	1,14	-0,70	-1,13	-2,21	-1,47	-0,60
H5	-0,73	-0,63	0,63	1,16	2,18	1,27	0,65	-1,13	-2,48	-1,59	0,55
H6	-0,70	-0,71	0,73	1,26	2,56	1,41	0,91	-1,47	-2,59	-1,48	-0,83
I2	-0,81	0,64	0,44	0,67	1,26	0,47	-0,46	-0,36	-1,26	-0,81	-0,55
I3	-0,60	-0,61	0,53	0,64	1,59	-0,65	-0,58	-0,64	-1,50	-0,75	-0,58
I4	-0,83	-0,72	-0,56	0,53	1,65	-0,72	0,61	-0,61	-1,41	-0,83	-0,53
I5	0,76	-0,58	-0,58	0,93	1,92	0,71	0,69	-0,68	-1,92	-1,29	-0,51
I6	0,82	-0,98	-0,89	-0,83	2,06	0,94	-0,75	-1,27	-2,82	-1,38	-0,69

ANEXO 5.5 Perfiles de aceleración

En esta sección se muestran los perfiles de aceleración de operación (percentil 95) de las columnas no vacías de la matriz factorial de la Tabla 4.5, para distintas velocidades de aproximación.

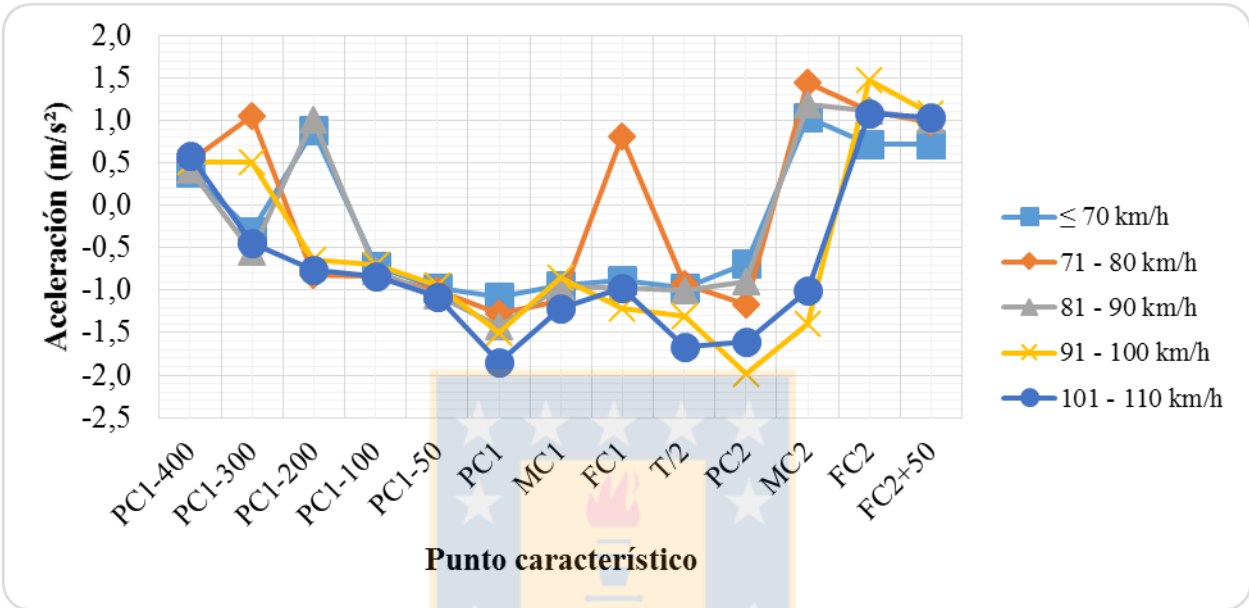


Figura A.5.36 Perfil de aceleraciones para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida menores a 200 m

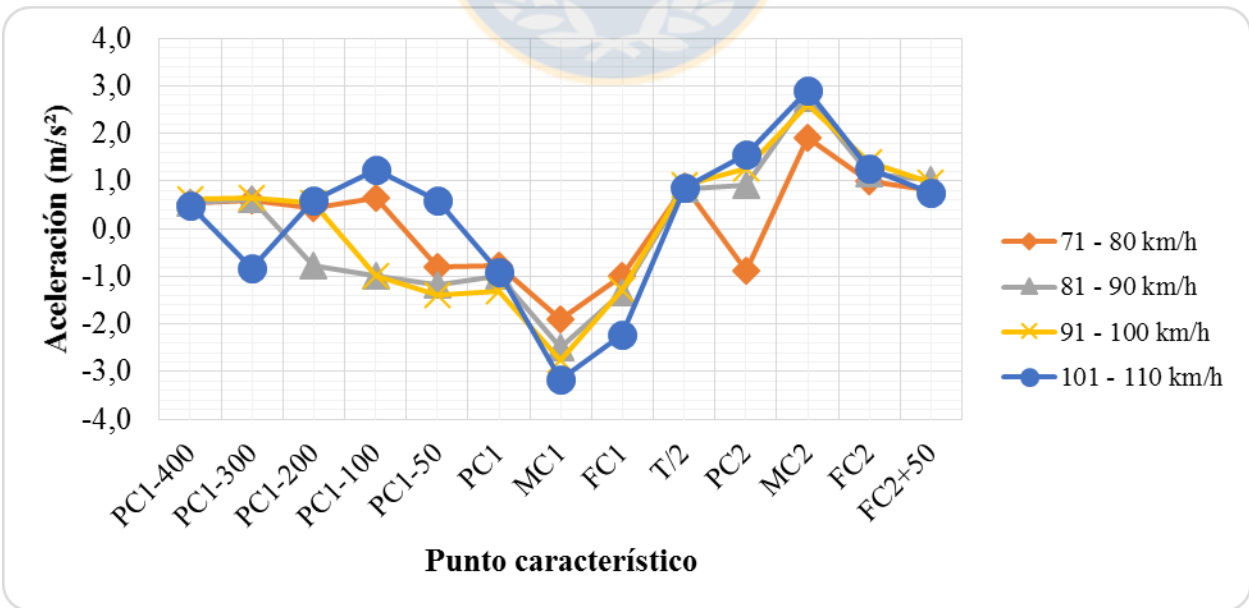


Figura A.5.37 Perfil de aceleraciones para radios de entrada y salida menores a 200 m y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m

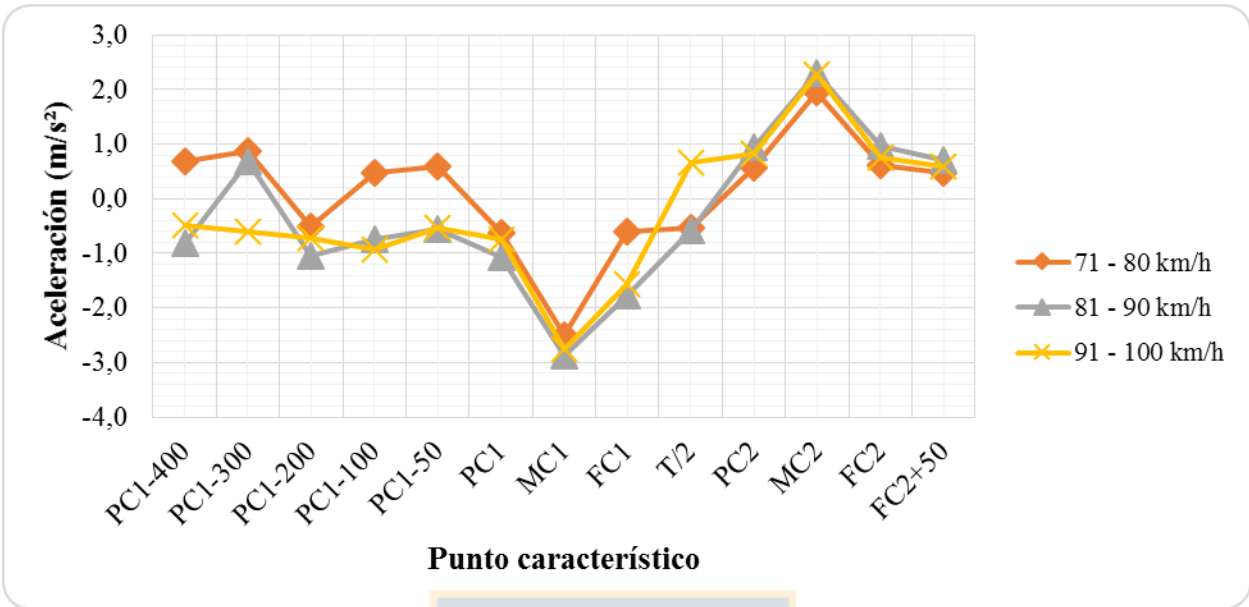


Figura A.5.38 Perfil de aceleraciones para radios de entrada menor a 200 m y longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m

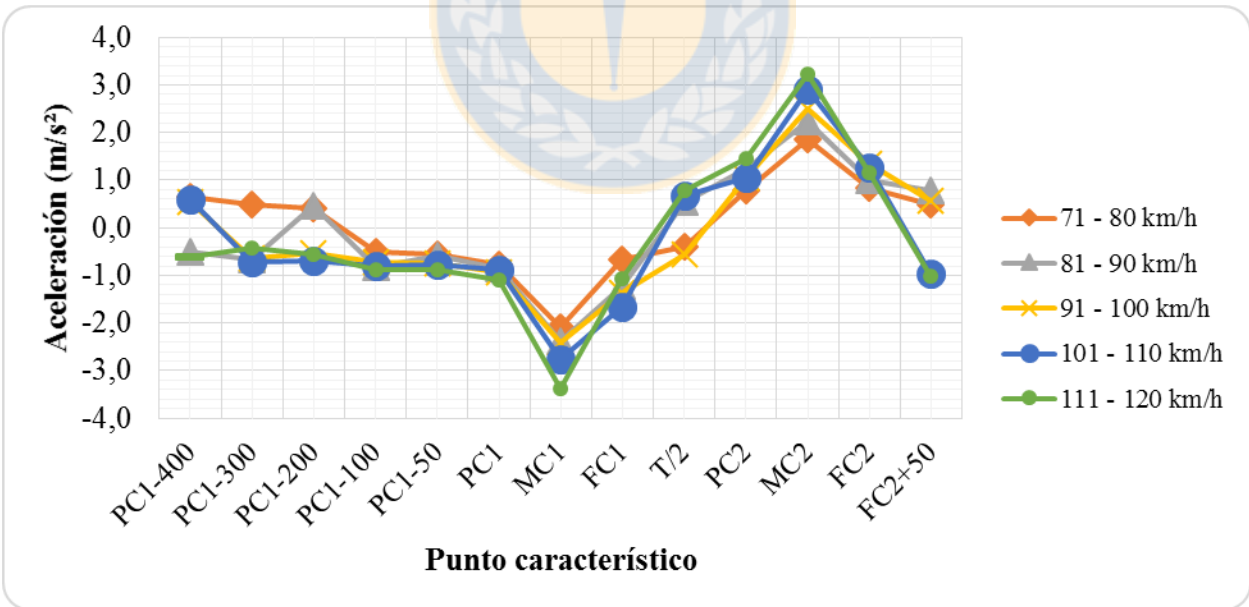


Figura A.5.39 Perfil de aceleraciones para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m y longitud de tangente intermedia menor a 200 m

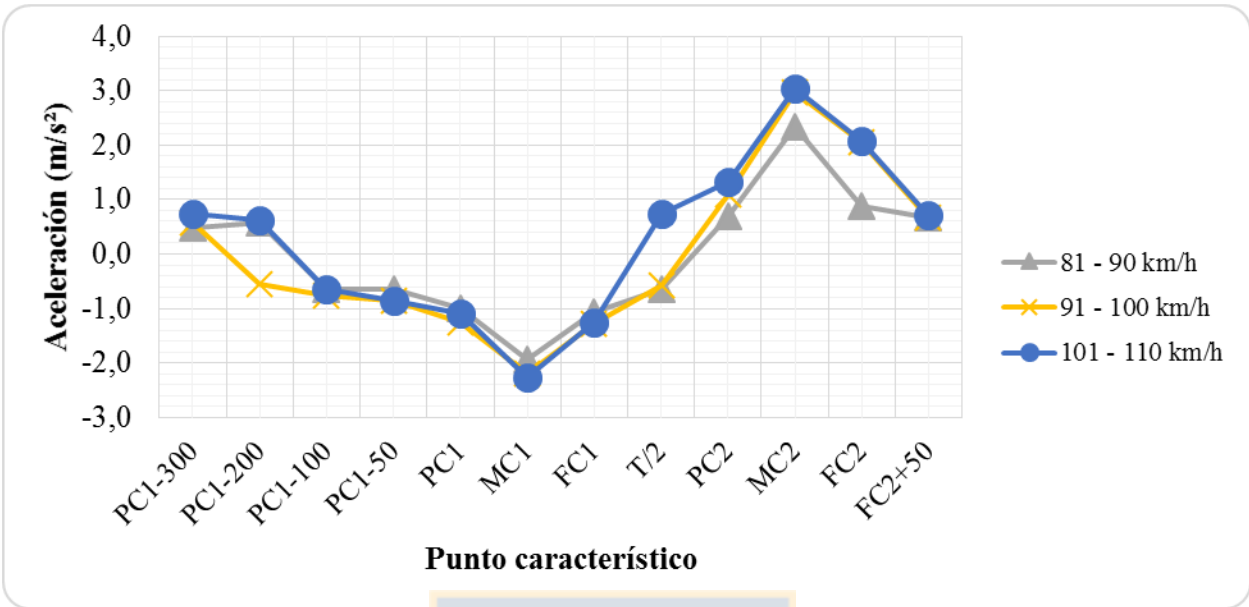


Figura A.5.40 Perfil de aceleraciones para radios de entrada y longitud de tangente intermedia entre 201 y 400 m y radios de salida menores a 200 m

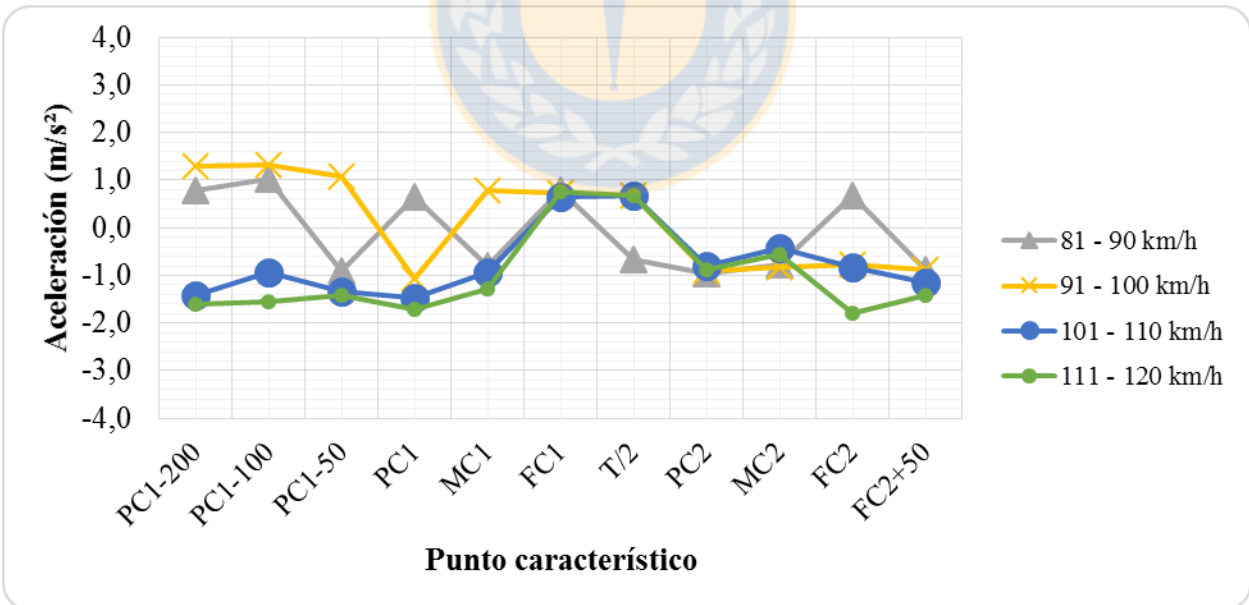


Figura A.5.41 Perfil de aceleraciones para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida entre 201 y 400 m

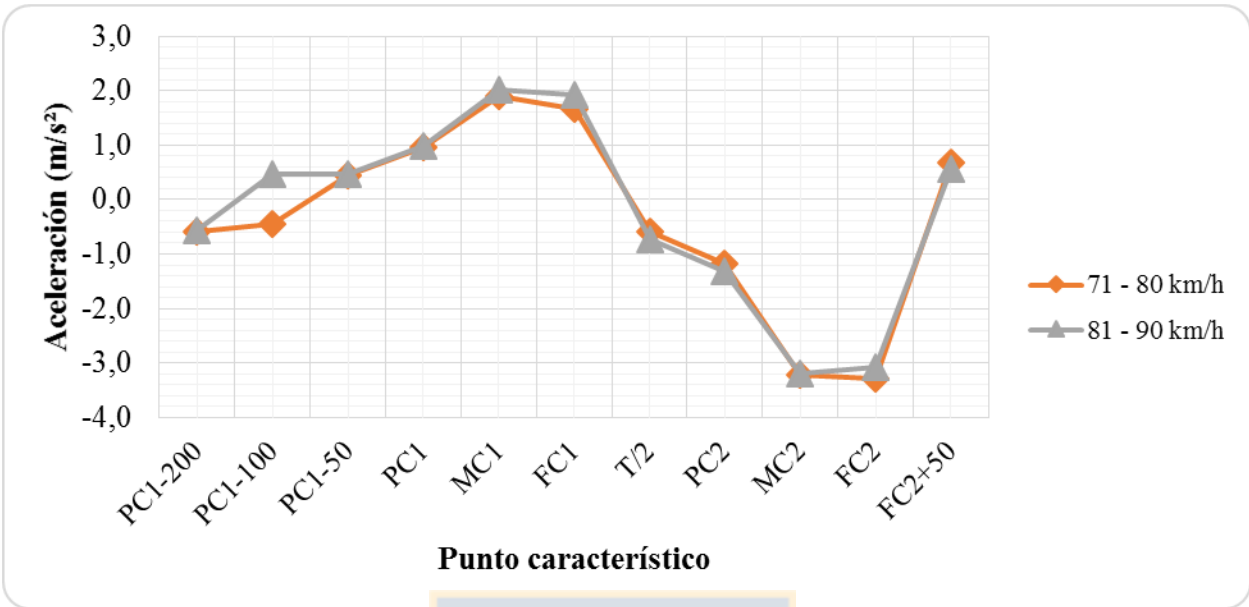


Figura A.5.42 Perfil de aceleraciones para radios de entrada entre 201 y 400 m, longitud de tangente intermedia mayor a 400 m y radios de salida menores a 200 m

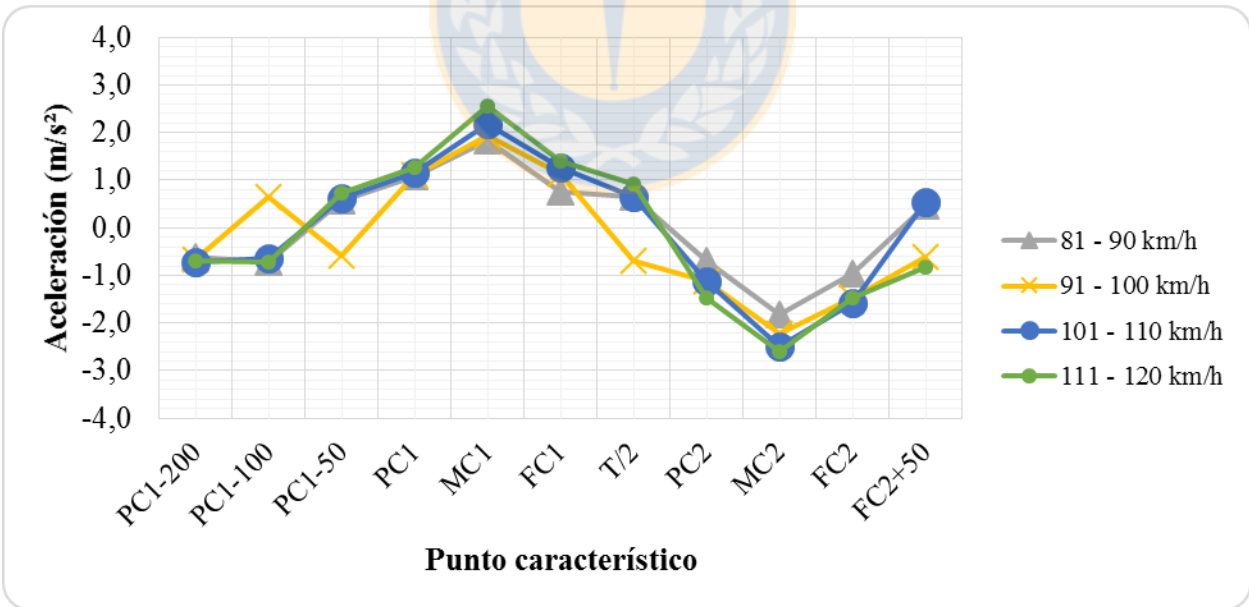


Figura A.5.43 Perfil de aceleraciones para radios de entrada y salida entre 201 y 400 m y longitud de tangente intermedia mayor a 400 m

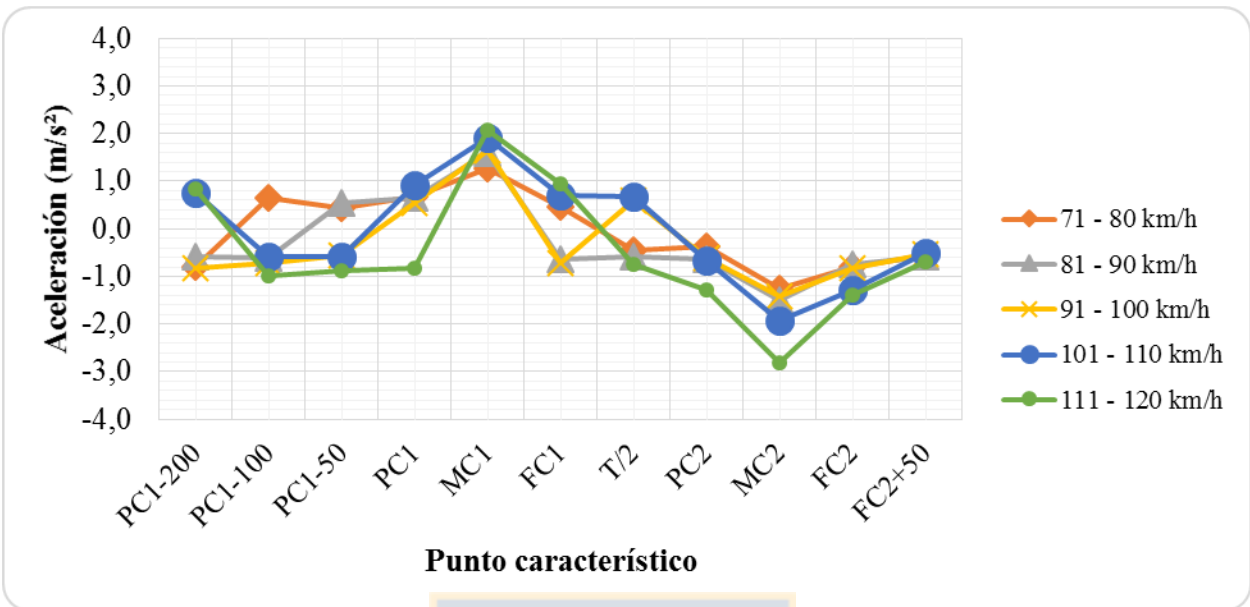


Figura A.5.44 Perfil de aceleraciones para radios de entrada, longitud de tangente intermedia y radios de salida mayores a 400 m

ANEXO 6.1 Modelos de aceleración y deceleración para curvas en S

En esta sección se muestran algunas de las formas funcionales analizadas para la modelación de aceleraciones y deceleraciones longitudinales en los puntos característicos de una curva se inflexión en S y su respectiva validación con el 20% de los datos. Cabe destacar que los modelos que aquí se presentan son aquellos que lograron un ajuste estadístico superior al 25% y en los cuales todas las variables independientes resultaron estadísticamente significativas con un 95% de confianza (test t mayor a 1,96 y valor p menor a 0,05).

La forma funcional genérica de los modelos obedece a la ecuación 6.3 y la nomenclatura utilizada se describe a continuación.

- V_{ap} : Velocidad de aproximación a la curva de entrada, en m/s
- R_1 : Radio de la curva de entrada, en m
- R_2 : Radio de la curva de salida, en m
- W_1 : Ángulo de deflexión de la curva de entrada, en grad
- W_2 : Ángulo de deflexión de la curva de salida, en grad
- D_1 : Desarrollo de la curva de entrada, en m
- D_2 : Desarrollo de la curva de salida, en m
- LT_i : Longitud de la tangente intermedia, en m
- a_j : Aceleración predicha en el punto j del alineamiento, en m/s^2
- d_k : Deceleración predicha en el punto k del alineamiento, en m/s^2
- V_s : Velocidad de operación en el punto s del alineamiento, en m/s
- β_0 : Término constante del modelo calibrado

El índice “i” representa los puntos característicos de la curva en S. PC1, MC1 y FC1 son el principio, mitad y final de la curva de entrada, respectivamente, MTi es el punto medio de la tangente intermedia y PC2, MC2 y FC2 representan al principio, mitad y final de la curva de salida, respectivamente.

Los mejores modelos obtenidos como resultado de este trabajo y presentados en el cuerpo principal de esta tesis, se destacan en color verde.

6.1.1 Modelos de aceleración para el principio de la curva de entrada

i. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

ii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 399 m

No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

iii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 400 y 700 m

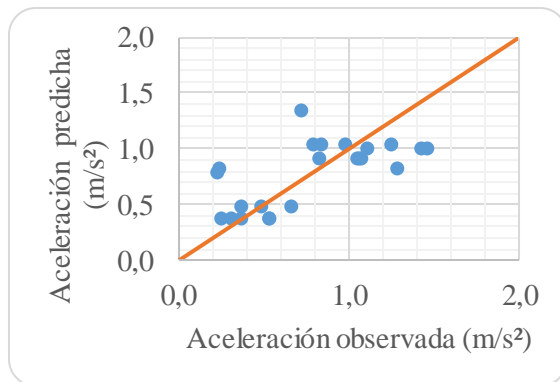
Tabla A.6.1 Modelos de aceleración para el principio de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₁	R ₁ ⁻¹	√R ₁	D ₁	W ₁	LT _i	V _{ap}	β ₀		
A.1	$1 - \frac{a_{PC1}^{-0,04375} - 1}{0,06174}$	-0,00323							2,50800	77,8	77,6
	Test t	-17,17						24,29			
	Valor p	0,0000						0,0000			
A.2	$1 + \frac{a_{PC1}^{-0,10653} - 1}{0,14599}$		924,01900						-0,99127	75,6	75,4
	Test t		16,15					-9,05			
	Valor p		0,0000					0,0000			

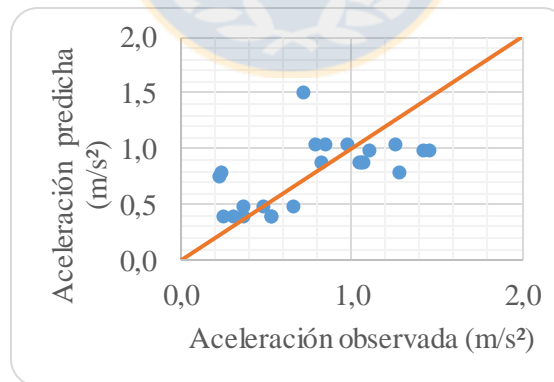
Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²	
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{ap}	β_0			
A.3	$1 + \frac{a_{PCI}^{0,0531904} - 1}{0,073792}$			-0,14853						4,20842	79,7	79,5
	Test t			-17,84						21,68		
	Valor p			0,0000						0,0000		

Tabla A.6.2 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.1

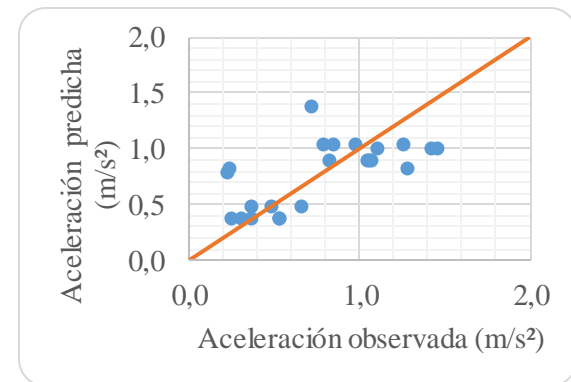
Indicadores	Modelo		
	A.1	A.2	A.3
N° de registros	23	23	23
MSE (m/s ²)	0,09	0,10	0,09
MAE (m/s ²)	0,23	0,24	0,23
MAPE (%)	29,14	30,30	29,35
χ^2 calculado	2,27	2,45	2,30
χ^2 crítico (5%)	30,81	30,81	30,81



Modelo A.1



Modelo A.2



Modelo A.3

Figura A.6.1 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.1

6.1.2 Modelos de deceleración para el principio de la curva de entrada

i. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

Tabla A.6.3 Modelos de deceleración para el principio de la curva de entrada

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes							R ²	R _a ²	
		R ₁	R ₁ ⁻¹	√R ₁	D ₁	LT _i	V _{ap}	β ₀			
D.1	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{3,90744} - 1}{98,89594}$	0,00183			0,00068			-0,00747	1,81547	50,0	48,8
	Test t	12,85			2,96			-4,62	12,60		
	Valor p	0,0000			0,0034			0,0000	0,0000		
D.2	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{3,34736} - 1}{45,70986}$		-189,74200		0,00058			-0,00698	3,17223	47,7	47,0
	Test t		-11,95		2,48			-4,30	17,01		
	Valor p		0,0000		0,0139			0,0000	0,0000		
D.3	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{4,08145} - 1}{126,35385}$			0,07485	0,00055			-0,00603	0,96094	56,7	56,1
	Test t			14,63	2,58			-3,99	6,88		
	Valor p			0,0000	0,0106			0,0001	0,0000		
D.4	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{4,42555} - 1}{202,89702}$	0,00190							1,16790	54,8	54,6
	Test t	16,02							27,84		
	Valor p	0,0000							0,0000		
D.5	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{3,39165} - 1}{49,48423}$		-190,62700						2,64743	47,1	46,9
	Test t		-13,96						50,69		
	Valor p		0,0000						0,0000		

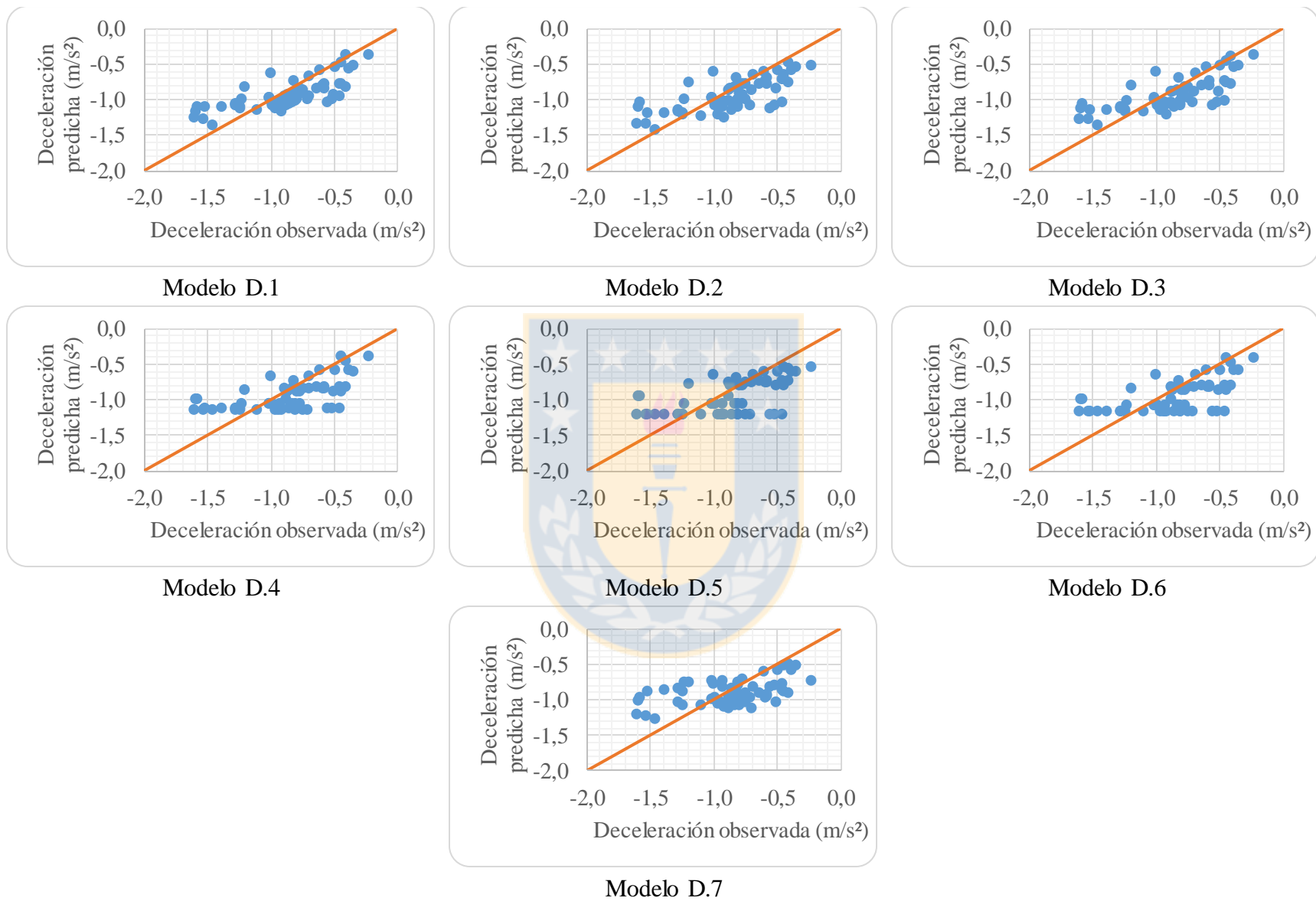


Figura A.6.2 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.3

ii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 399 m

Tabla A.6.5 Modelos de deceleración para el principio de la curva de entrada con radios entre 190 y 399 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{ap}	β ₀		
D.8	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{2,56473} - 1}{14,549762}$	0,00408				0,00696		-0,00665	1,34742	77,9	77,2
	Test t	18,95				11,39		-5,81	11,64		
	Valor p	0,0000				0,0000		0,0000	0,0000		
D.9	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{2,51525} - 1}{13,46879}$		-192,52000			0,00513		-0,00820	3,46790	38,8	37,6
	Test t		-9,55			5,72		-5,03	18,60		
	Valor p		0,0000			0,0000		0,0000	0,0000		
D.10	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{3,19940} - 1}{36,25212}$			0,12027		0,00542		-0,01141	0,83793	52,7	51,8
	Test t			12,21		6,58		-7,44	4,41		
	Valor p			0,0000		0,0000		0,0000	0,0000		
D.11	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{3,77493} - 1}{78,71487}$	0,00323						-0,00955	1,91256	42,8	42,1
	Test t	10,31						-5,70	12,40		
	Valor p	0,0000						0,0000	0,0000		
D.12	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{4,14883} - 1}{129,284552}$		-205,60300					-0,01155	3,71219	47,7	46,9
	Test t		-10,71					-7,26	19,65		
	Valor p		0,0000					0,0000	0,0000		
D.13	$1 + \frac{(d_{PCI} + 4)^{3,77043} - 1}{78,94547}$			0,10395				-0,01000	1,12404	45,6	44,9
	Test t			10,70				-6,19	6,23		
	Valor p			0,0000				0,0000	0,0000		

Tabla A.6.6 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.5

Indicadores	Modelo					
	D.8	D.9	D.10	D.11	D.12	D.13
N° de registros	43	43	43	43	43	43
MSE (m/s ²)	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06
MAE (m/s ²)	0,20	0,21	0,19	0,21	0,20	0,20
MAPE (%)	21,91	23,03	20,83	21,40	21,32	21,28
χ^2 calculado	-3,20	-3,23	-2,88	-2,57	-2,57	-2,56
χ^2 crítico (5%)	58,12	58,12	58,12	58,12	58,12	58,12

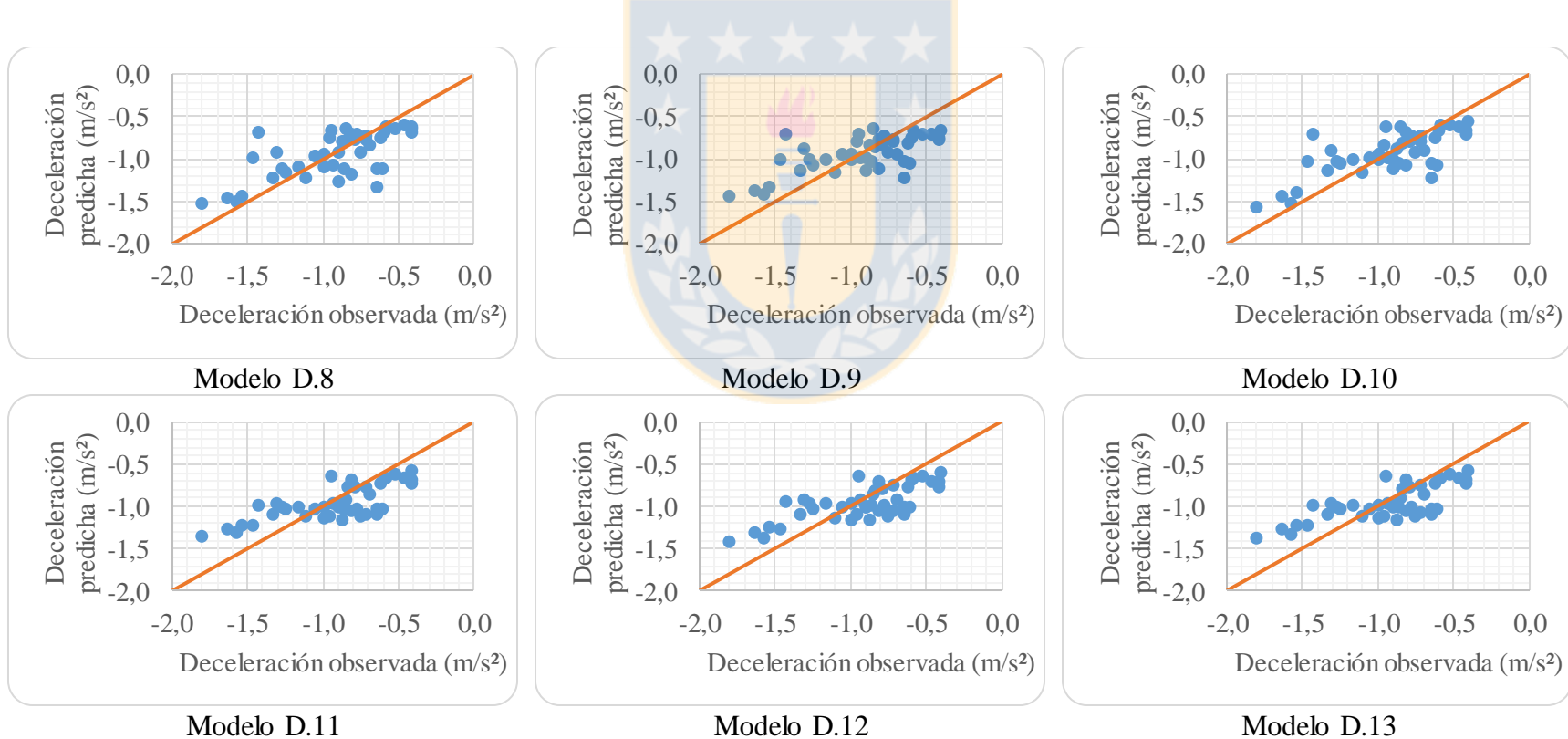


Figura A.6.3 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.5

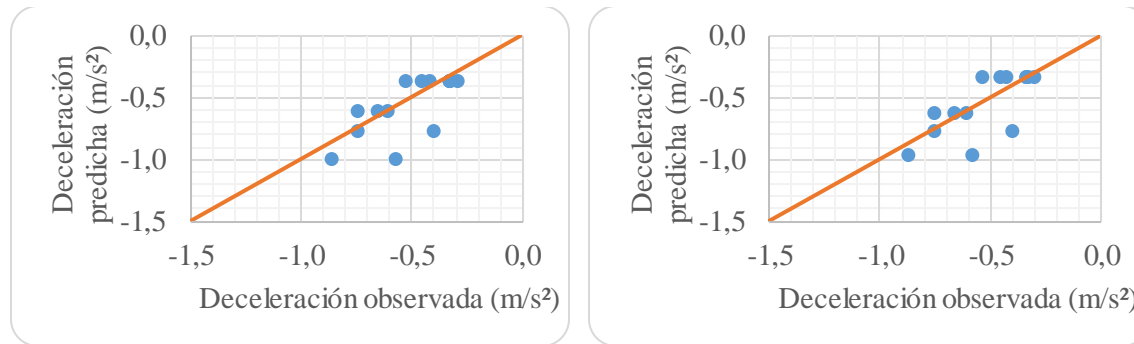
iii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 400 y 700 m

Tabla A.6.7 Modelos de deceleración para el principio de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{ap}	β_0		
D.14	$1 + \frac{(d_{PC1} + 4)^{5,17624} - 1}{667,17943}$		-714,24000						3,20852	39,9	38,9
	Test t		-6,41						13,87		
	Valor p		0,0000						0,0000		
D.15	$1 + \frac{(d_{PC1} + 4)^{5,31208} - 1}{798,35217}$			0,12737					-1,10160	41,7	40,7
	Test t			6,60					-2,56		
	Valor p			0,0000					0,0130		

Tabla A.6.8 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.7

Indicadores	Modelo	
	D.14	D.15
N° de registros	14	14
MSE (m/s ²)	0,06	0,06
MAE (m/s ²)	0,16	0,15
MAPE (%)	23,88	23,44
χ^2 calculado	-1,16	-1,16
χ^2 crítico (5%)	22,36	22,36



D.14

D.15

Figura A.6.4 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.7

6.1.3 Modelos de aceleración para la mitad de la curva de entrada

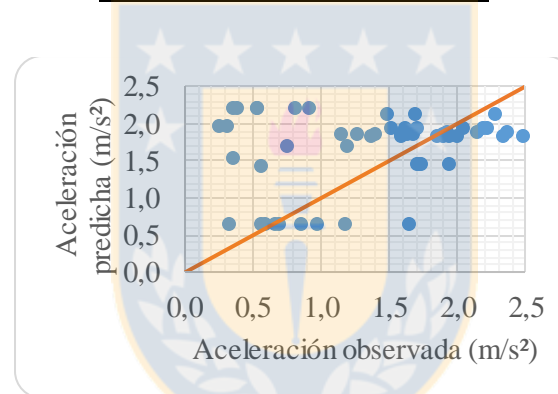
- i. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

Tabla A.6.9 Modelos de aceleración para la mitad de la curva de entrada

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes							R ²	R _a ²	
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{PC1}			β ₀
A.4	$1 + \frac{a_{MC1}^{-0,50094} - 1}{0,43647}$		-414,14300						2,71838	69,2	69,0
	Test t		-18,95						36,75		
	Valor p		0,0000						0,0000		

Tabla A.6.10 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.9

Indicadores	Modelo
	A.4
N° de registros	37
MSE (m/s ²)	0,59
MAE (m/s ²)	0,55
MAPE (%)	33,63
χ^2 calculado	16,70
χ^2 crítico (5%)	51,00



Modelo A.4

Figura A.6.5 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.9

ii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 399 m

Tabla A.6.11 Modelos de aceleración para la mitad de la curva de entrada con radios entre 190 y 399 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{PC1}	β_0		
A.5	$1 - \frac{a_{MCI}^{-0,02188} - 1}{0,02278}$					-0,01926		-0,03438	4,96248	77,8	77,0
	Test t					-12,45		-8,24	13,24		
	Valor p					0,0000		0,0000	0,0000		
A.6	$1 + \frac{a_{MCI}^{2,01002} - 1}{1,61054}$	0,01168							-1,54623	94,2	94,1
	Test t	28,59							-16,60		
	Valor p	0,0000							0,0000		
A.7	$1 + \frac{a_{MCI}^{1,95749} - 1}{1,61674}$		-715,00600						4,42949	94,1	94,0
	Test t		-28,16						36,33		
	Valor p		0,0000						0,0000		
A.8	$1 + \frac{a_{MCI}^{1,96086} - 1}{1,61255}$			0,36434					-4,34753	94,3	94,2
	Test t			28,97					-23,15		
	Valor p			0,0000					0,0000		

Tabla A.6.12 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.11

Indicadores	Modelo			
	A.5	A.6	A.7	A.8
N° de registros	16	18	18	18
MSE (m/s ²)	0,11	0,05	0,06	0,05
MAE (m/s ²)	0,26	0,19	0,21	0,20
MAPE (%)	38,97	20,41	20,91	20,48
χ^2 calculado	2,98	0,94	1,06	0,97
χ^2 crítico (5%)	25,00	27,59	27,59	57,59

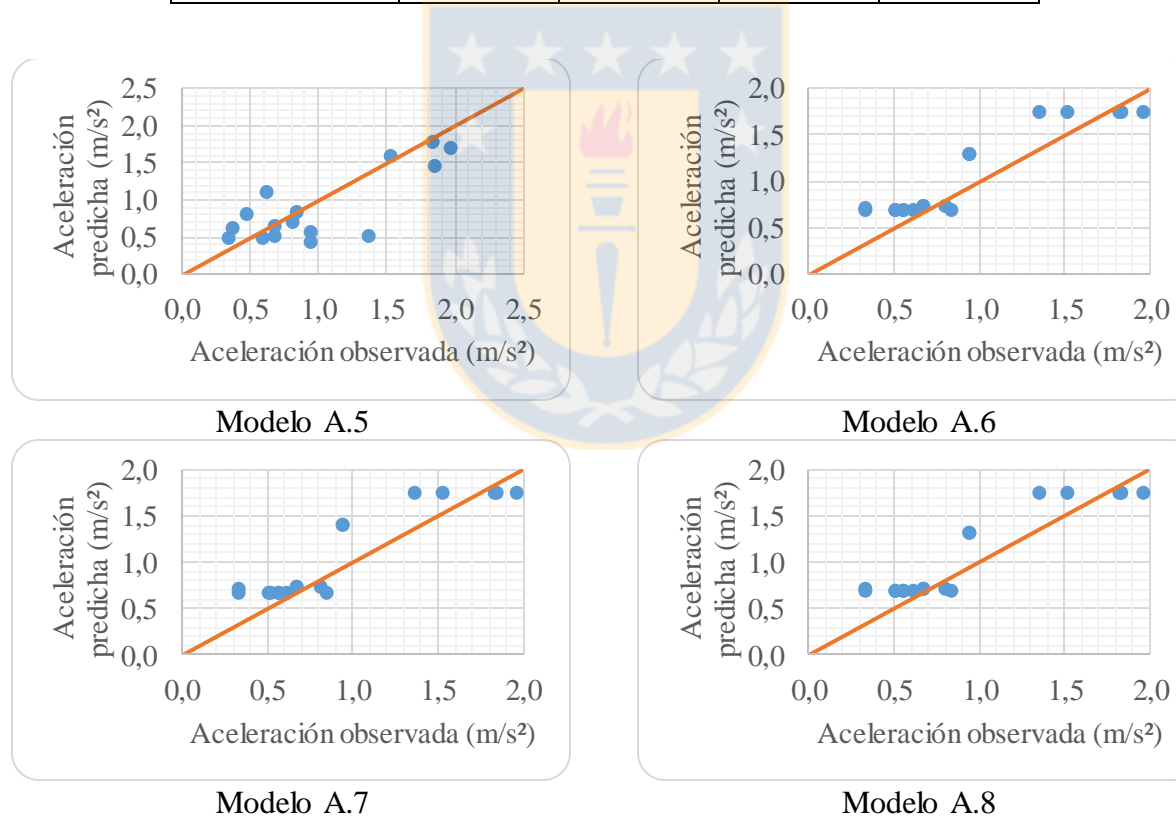


Figura A.6.6 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.11

iii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 400 y 700 m

Tabla A.6.13 Modelos de aceleración para la mitad de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{PC1}	β_0		
A.9	$1 + \frac{a_{MC1}^{0,72752} - 1}{0,66530}$	-0,00600						0,02204	2,64443	73,8	73,3
	Test t	-15,30						3,86	4,23		
	Valor p	0,0000						0,0002	0,0001		
A.10	$1 + \frac{a_{MC1}^{0,09492} - 1}{0,09310}$		1484,51000					0,03631	-4,73881	63,0	62,2
	Test t		10,61					6,11	-7,80		
	Valor p		0,0000					0,0000	0,0000		
A.11	$1 + \frac{a_{MC1}^{0,86680} - 1}{0,82817}$			-0,25901				0,03027	4,63688	69,1	68,5
	Test t			-13,27				5,25	6,09		
	Valor p			0,0000				0,0000	0,0000		
A.12	$1 + \frac{a_{MC1}^{1,21154} - 1}{1,30641}$					0,02715		0,03536	-2,73080	49,9	48,9
	Test t					8,06		5,70	-4,51		
	Valor p					0,0000		0,0000	0,0000		
A.13	$1 + \frac{a_{MC1}^{0,57863} - 1}{0,51278}$	-0,00635							4,92428	69,6	69,3
	Test t	-15,80							22,25		
	Valor p	0,0000							0,0000		
A.14	$1 + \frac{a_{MC1}^{0,67208} - 1}{0,61195}$		1923,02000						-2,14916	66,8	66,5
	Test t		14,66						-8,55		
	Valor p		0,0000						0,0000		

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{PC1}	β_0		
A.15	$1 + \frac{a_{MCI}^{0,61287} - 1}{0,54690}$			-0,30449					8,56950	71,0	70,7
	Test t			-16,17				19,52			
	Valor p			0,0000				0,0000			
A.16	$1 + \frac{a_{MCI}^{0,36948} - 1}{0,30872}$					0,05632			-0,60071	74,4	74,1
	Test t					16,43		4,56			
	Valor p					0,0000		0,0000			

Tabla A.6.14 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.13

Indicadores	Modelo							
	A.9	A.10	A.11	A.12	A.13	A.14	A.15	A.16
N° de registros	31	30	30	28	27	27	27	30
MSE (m/s ²)	0,12	0,13	0,14	0,12	0,10	0,11	0,11	0,22
MAE (m/s ²)	0,29	0,30	0,31	0,29	0,26	0,28	0,27	0,40
MAPE (%)	27,89	30,50	31,15	22,54	22,44	23,88	22,87	27,97
χ^2 calculado	3,44	4,00	4,28	2,66	2,06	2,29	2,15	3,89
χ^2 crítico (5%)	43,77	42,56	42,56	40,11	38,89	38,89	38,89	42,56

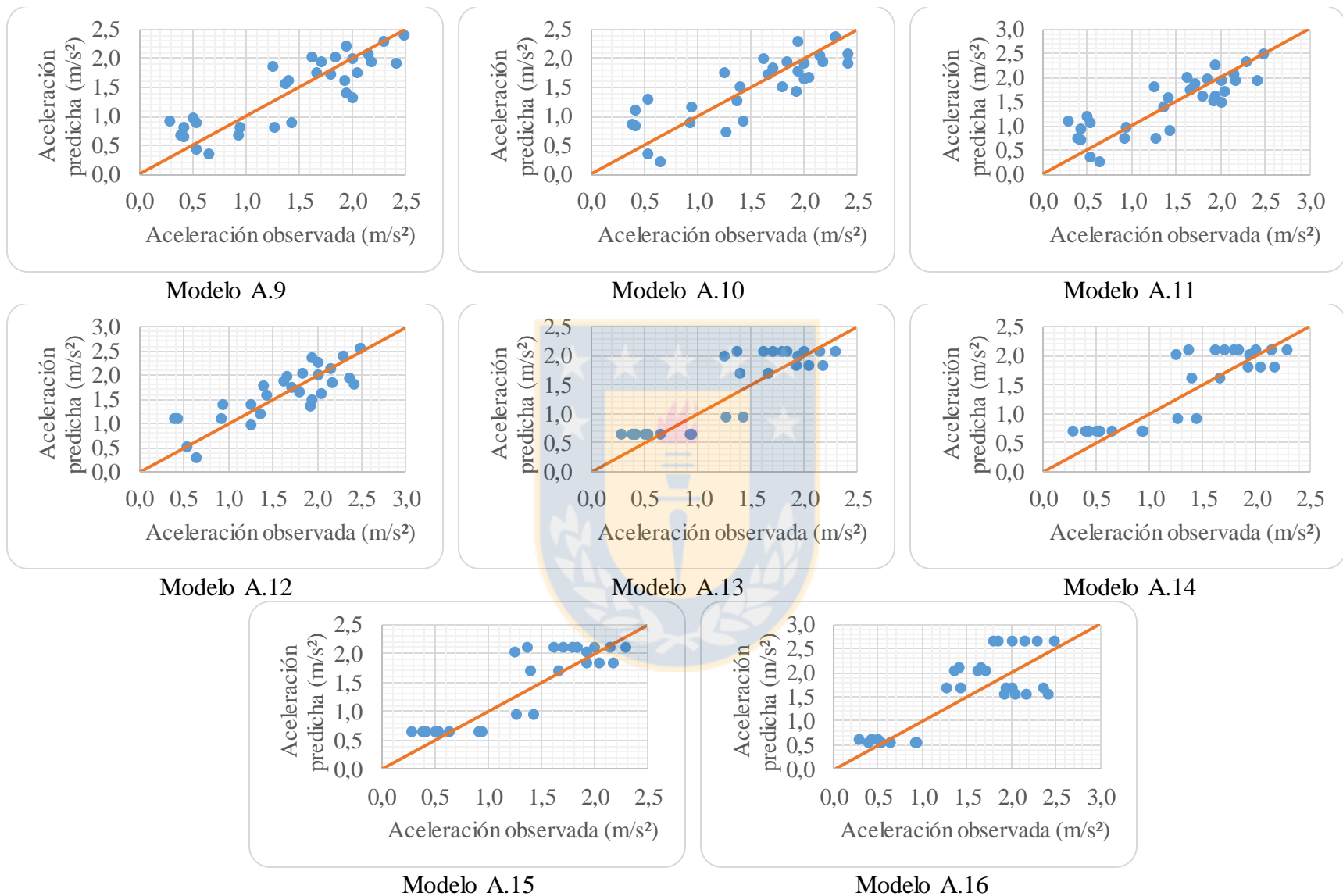


Figura A.6.7 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.13

6.1.4 Modelos de deceleración para la mitad de la curva de entrada

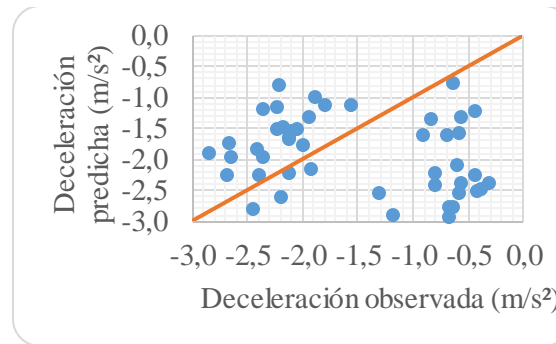
- i. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

Tabla A.6.15 Modelos de deceleración para la mitad de la curva de entrada

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes							R ²	R _a ²	
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{PC1}			β ₀
D.16	$1 + \frac{(d_{MCI} + 4)^{0,47323} - 1}{0,32625}$	0,00518						-0,06653	6,42612	42,0	41,3
	Test t	10,24						-9,10	11,47		
	Valor p	0,0000						0,0000	0,0000		

Tabla A.6.16 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.15

Indicadores	Modelo
	D.16
N° de registros	48
MSE (m/s ²)	1,41
MAE (m/s ²)	1,00
MAPE (%)	323,08
χ ² calculado	163,76
χ ² crítico (5%)	64,00



Modelo D.16

Figura A.6.8 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.15

ii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 399 m

No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

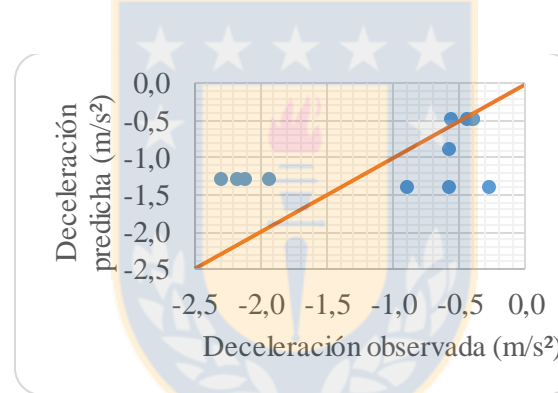
iii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 400 y 700 m

Tabla A.6.17 Modelos de deceleración para la mitad de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₁	R ₁ ⁻¹	√R ₁	D ₁	W ₁	LT _i	V _{PC1}	β ₀		
D.17	$1 + \frac{(d_{MCI} + 4)^{2,66924} - 1}{14,75269}$				0,00569				0,72383	36,0	34,5
	Test t				4,97				0,03		
	Valor p				0,0000				0,0000		

Tabla A.6.18 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.17

Indicadores	Modelo
	D.17
N° de registros	12
MSE (m/s ²)	0,43
MAE (m/s ²)	0,53
MAPE (%)	44,21
χ^2 calculado	-3,97
χ^2 crítico (5%)	19,68



Modelo D.17

Figura A.6.9 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.17

6.1.5 Modelos de aceleración para el final de la curva de entrada

i. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

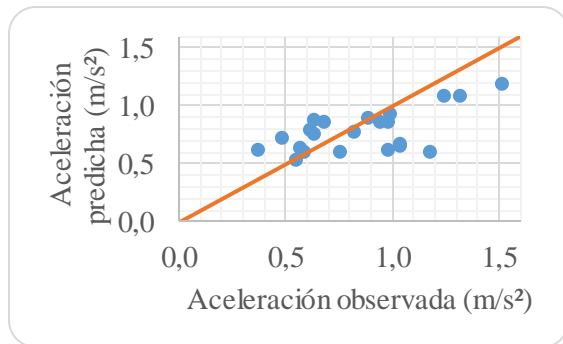
ii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 399 m

Tabla A.6.19 Modelos de aceleración para el final de la curva de entrada con radios entre 190 y 399 m

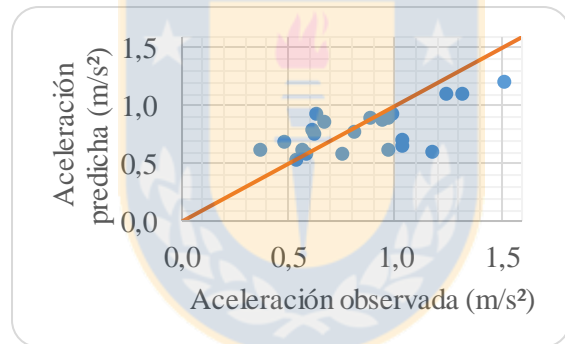
Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{MC1}	β ₀		
A.17	$1 - \frac{a_{FC1}^{-0,43125} - 1}{0,55624}$	0,00283						-0,01593	1,38155	33,0	31,4
	Test t	5,47						-5,39	6,44		
	Valor p	0,0000						0,0000	0,0000		
A.18	$1 - \frac{a_{FC1}^{-0,41875} - 1}{0,53776}$		-185,44400					-0,01637	2,91595	32,9	31,3
	Test t		-5,46					-5,45	8,66		
	Valor p		0,0000					0,0000	0,0000		
A.19	$1 + \frac{a_{FC1}^{0,63007} - 1}{0,72633}$						0,00124	-0,01330	1,44417	75,6	74,9
	Test t						13,23	-8,86	11,92		
	Valor p						0,0000	0,0000	0,0000		

Tabla A.6.20 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.19

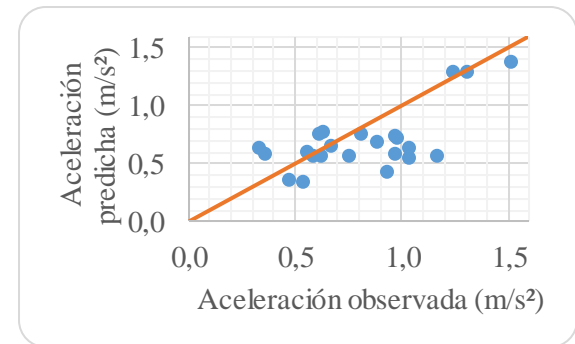
Indicadores	Modelo		
	A.17	A.18	A.19
N° de registros	22	22	23
MSE (m/s ²)	0,05	0,05	0,07
MAE (m/s ²)	0,19	0,18	0,20
MAPE (%)	25,10	24,43	34,52
χ^2 calculado	1,66	1,63	2,75
χ^2 crítico (5%)	32,6706	32,6706	33,92



Modelo A.17



Modelo A.18



Modelo A.19

Figura A.6.10 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.19

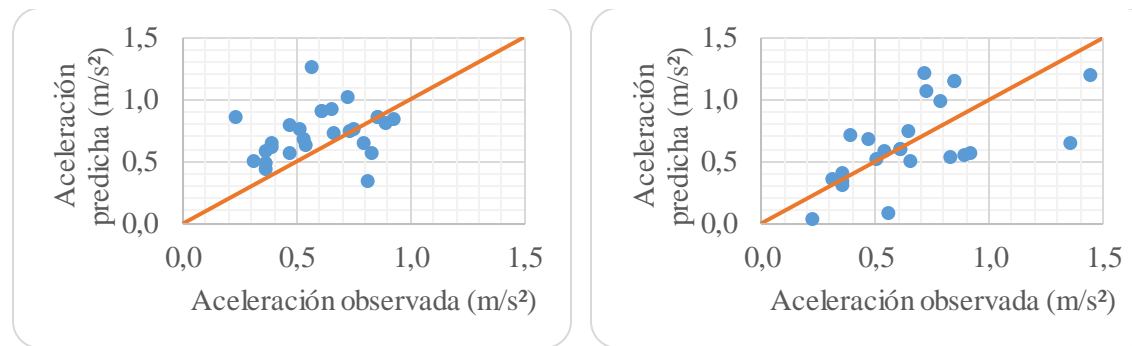
iii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 400 y 700 m

Tabla A.6.21 Modelos de aceleración para el final de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{MC1}	β_0		
A.20	$1 + \frac{a_{FC1}^{0,13061} - 1}{0,16077}$		578,27000					0,02383	-2,59549	39,5	38,2
	Test t		5,45					6,94	-5,85		
	Valor p		0,0000					0,0000	0,0000		
A.21	$1 + \frac{a_{FC1}^{0,56988} - 1}{0,64160}$						0,00169	0,01466	-1,92542	64,1	63,1
	Test t						9,02	4,25	-6,00		
	Valor p						0,0000	0,0001	0,0000		

Tabla A.6.22 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.21

Indicadores	Modelo	
	A.20	A.21
N° de registros	27	24
MSE (m/s ²)	0,07	0,08
MAE (m/s ²)	0,20	0,22
MAPE (%)	29,92	89,03
χ^2 calculado	2,66	6,90
χ^2 crítico (5%)	38,8851	35,17



Modelo A.20

Modelo A.21

Figura A.6.11 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.21

6.1.6 Modelos de deceleración para el final de la curva de entrada

- i. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

- ii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 190 y 399 m

No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

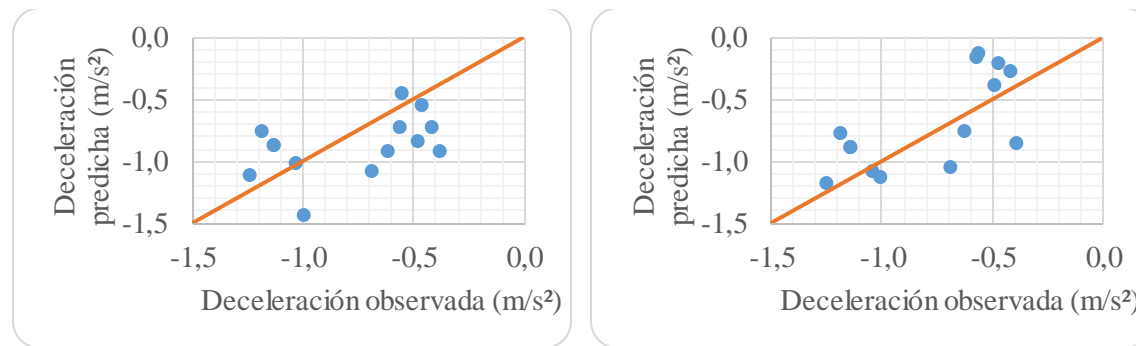
iii. Modelos para radios de la curva de entrada entre 400 y 700 m

Tabla A.6.23 Modelos de deceleración para el final de la curva de entrada con radios entre 400 y 700 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₁	R ₁ ⁻¹	$\sqrt{R_1}$	D ₁	W ₁	LT _i	V _{MC1}	β ₀		
D.18	$1 + \frac{(d_{FCI} + 4)^{4,27607} - 1}{166,55337}$				0,00617			0,02836	-2,25170	72,5	71,0
	Test t				9,39			6,07	-4,39		
	Valor p				0,0000			0,0000	0,0001		
D.19	$1 + \frac{(d_{FCI} + 4)^{3,67401} - 1}{72,49684}$					0,01734		0,03268	-1,69356	53,7	51,3
	Test t					3,90		6,10	-3,06		
	Valor p					0,0004		0,0000	0,0041		

Tabla A.6.24 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.23

Indicadores	Modelo	
	D.18	D.19
N° de registros	14	14
MSE (m/s ²)	0,10	0,08
MAE (m/s ²)	0,27	0,25
MAPE (%)	30,57	69,82
χ ² calculado	-1,44	-3,42
χ ² crítico (5%)	22,36	22,36



Modelo D.18

Modelo D.19

Figura A.6.12 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.23

6.1.7 Modelos de aceleración para el punto medio de tangente intermedia

No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

6.1.8 Modelos de deceleración para el punto medio de tangente intermedia

No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

6.1.9 Modelos de aceleración para el principio de la curva de salida

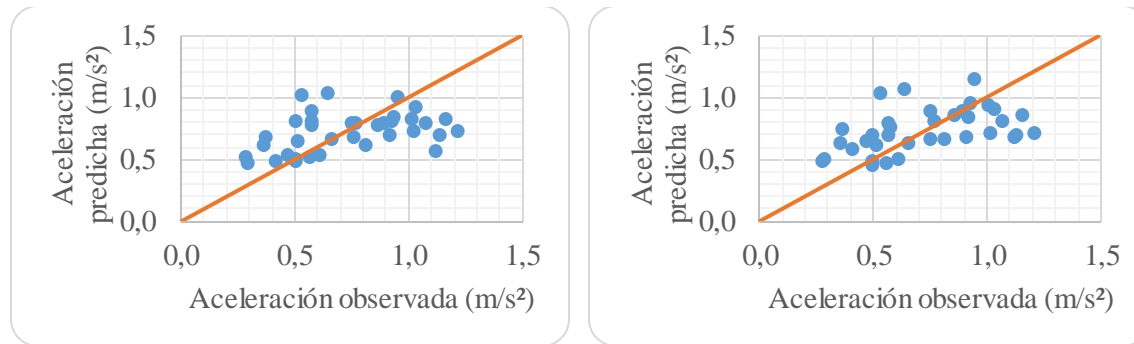
i. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

Tabla A.6.25 Modelos de aceleración para el principio de la curva de salida

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²	
		R ₂	R ₂ ⁻¹	√R ₂	D ₂	W ₂	LT _i	V _{MTi}	β ₀			
A.22	$1 - \frac{a_{PC2}^{-0,07188} - 1}{0,10046}$	-0,00100			-0,00090				0,00622	0,76607	27,4	25,8
	Test t	-6,37			-2,16				3,38	3,87		
	Valor p	0,0000			0,0324				0,0009	0,0002		
A.23	$1 - \frac{a_{PC2}^{-0,36875} - 1}{0,52421}$	-0,00130							0,00828	0,50072	35,1	34,2
	Test t	-8,21							4,53	3,12		
	Valor p	0,0000							0,0000	0,0022		

Tabla A.6.26 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.25

Indicadores	Modelo	
	A.22	A.23
N° de registros	36	36
MSE (m/s ²)	0,06	0,06
MAE (m/s ²)	0,20	0,19
MAPE (%)	27,57	26,75
χ ² calculado	3,04	2,73
χ ² crítico (5%)	49,80	49,80



Modelo A.22

Modelo A.23

Figura A.6.13 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.25

ii. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 399 m

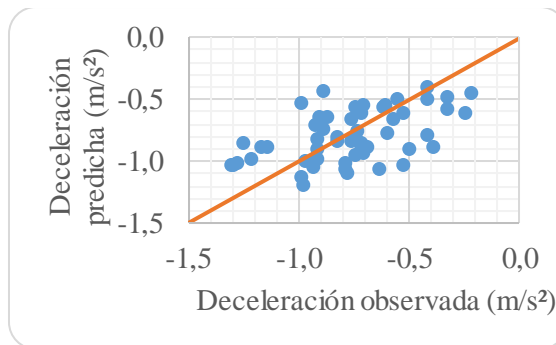
No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

iii. Modelos para radios de la curva de salida entre 400 y 700 m

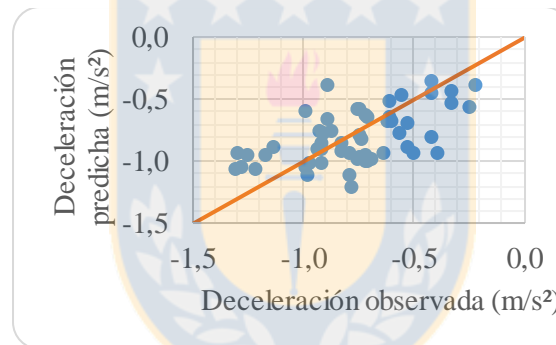
No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

Tabla A.6.28 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.27

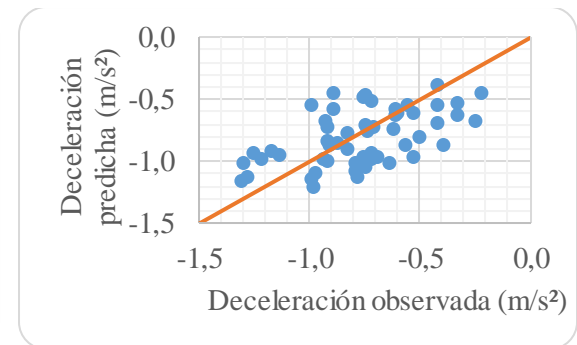
Indicadores	Modelo				
	D.20	D.21	D.22	D.23	D.24
N° de registros	55	55	55	55	55
MSE (m/s ²)	0,06	0,05	0,06	0,05	0,06
MAE (m/s ²)	0,19	0,19	0,20	0,19	0,21
MAPE (%)	25,83	25,39	26,70	25,63	29,63
χ^2 calculado	-4,06	-3,91	-4,26	-3,97	-4,83
χ^2 crítico (5%)	72,15	72,15	72,15	72,15	72,15



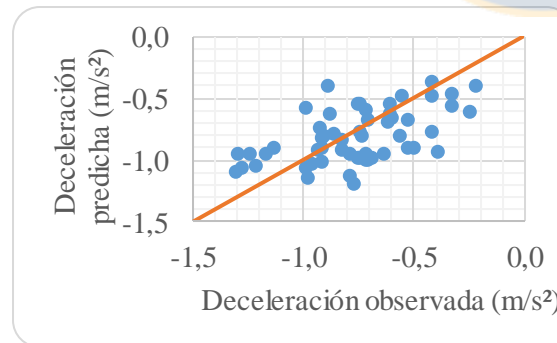
Modelo D.20



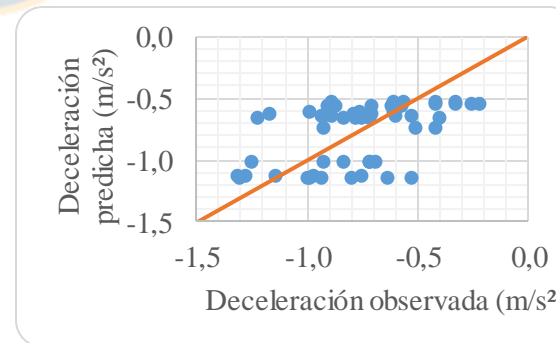
Modelo D.21



Modelo D.22



Modelo D.23



Modelo D.24

Figura A.6.14 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.27

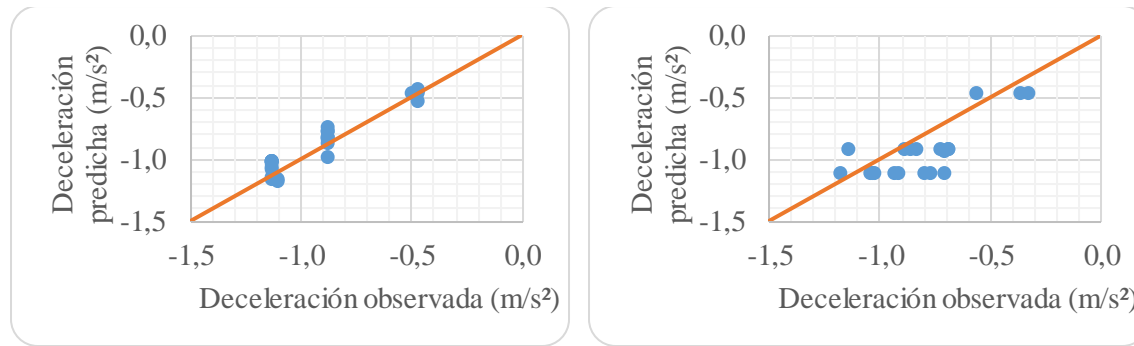
ii. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 399 m

Tabla A.6.29 Modelos de deceleración para el principio de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	$\sqrt{R_2}$	D ₂	W ₂	LT _i	V _{MTi}	β_0		
D.25	$1 + \frac{(d_{PC2} + 4)^{4,22688} - 1}{3480,6829}$		-346,64800						3,42352	54,7	54,1
	Test t		-9,82						20,32		
	Valor p		0,0000						0,0000		
D.26	$1 + \frac{(d_{PC2} + 4)^{4,48403} - 1}{7884,0621}$			0,17935					-0,87693	51,3	50,8
	Test t			9,41					-3,13		
	Valor p			0,0000					0,0024		

Tabla A.6.30 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.29

Indicadores	Modelo	
	D.25	D.26
N° de registros	25	20
MSE (m/s ²)	0,01	0,04
MAE (m/s ²)	0,07	0,17
MAPE (%)	7,79	18,84
χ^2 calculado	-0,16	-0,83
χ^2 crítico (5%)	36,42	30,14



Modelo D.25

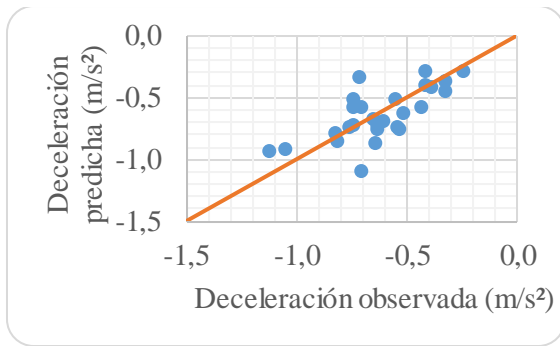
Modelo D.26

Figura A.6.15 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.29

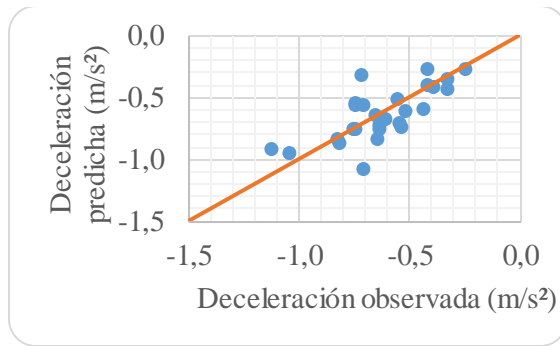
iii. Modelos para radios de la curva de salida entre 400 y 700 m

Tabla A.6.31 Modelos de deceleración para el principio de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m

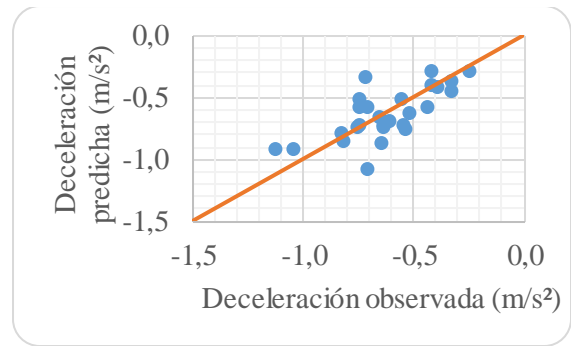
Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	√R ₂	D ₂	W ₂	LT _i	V _{MTi}	β ₀		
D.27	$1 + \frac{(d_{PC2} + 4)^{4,76395} - 1}{390,911136}$	0,00207					-0,00034	-0,01033	1,89794	64,5	61,6
	Test t	10,60					-4,73	-6,58	9,68		
	Valor p	0,0000					0,0000	0,0000	0,0000		
D.28	$1 + \frac{(d_{PC2} + 4)^{4,91381} - 1}{476,150533}$		-709,97500				-0,00035	-0,01049	4,37758	68,0	67,2
	Test t		-12,13				-5,10	-7,07	25,16		
	Valor p		0,0000				0,0000	0,0000	0,0000		



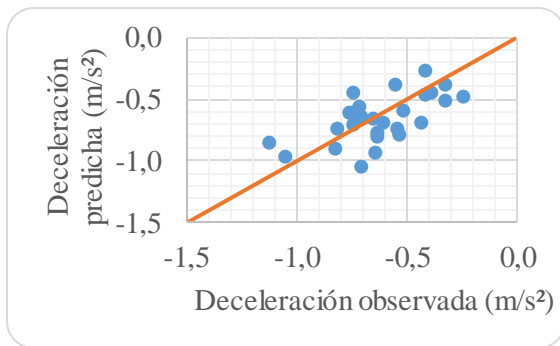
Modelo D.27



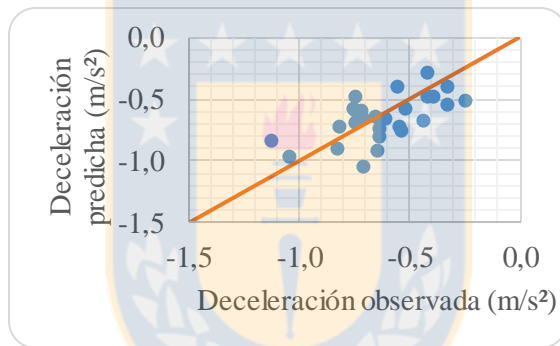
Modelo D.38



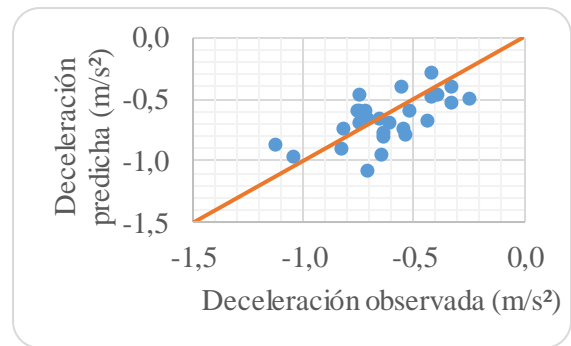
Modelo D.29



Modelo D.30



Modelo D.31



Modelo D.32

Figura A.6.16 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.31

6.1.11 Modelos de aceleración para la mitad de la curva de salida

i. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

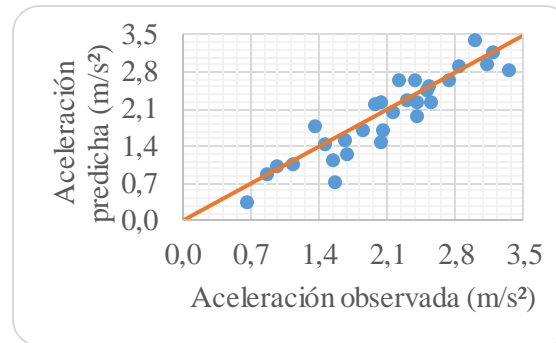
ii. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 399 m

Tabla A.6.33 Modelos de aceleración para la mitad de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	$\sqrt{R_2}$	D ₂	W ₂	LT _i	V _{PC2}	β ₀		
A.24	$1 + \frac{1,35122 a_{MC2} - 1}{1,67428}$					0,01576		0,06034	-3,64794	72,3	71,8
	Test t					6,78		15,35	-10,51		
	Valor p					0,0000		0,0000	0,0000		

Tabla A.6.34 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.33

Indicadores	Modelo
	A.24
N° de registros	30
MSE (m/s ²)	0,10
MAE (m/s ²)	0,25
MAPE (%)	18,43
χ ² calculado	2,56
χ ² crítico (5%)	42,56



Modelo A.24

Figura A.6.17 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.33

iii. Modelos para radios de la curva de salida entre 400 y 700 m

Tabla A.6.35 Modelos de aceleración para la mitad de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	$\sqrt{R_2}$	D ₂	W ₂	LT _i	V _{PC2}	β_0		
A.25	$1 + \frac{0,61307 a_{MC2} - 1}{0,67676}$	0,00627							4,78934	90,5	90,3
	Test t	-21,87						26,81			
	Valor p	0,0000						0,0000			
A.26	$1 + \frac{0,61356 a_{MC2} - 1}{0,67722}$		1954,56000						-2,35852	90,5	90,3
	Test t		21,76						-15,25		
	Valor p		0,0000						0,0000		

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	$\sqrt{R_2}$	D ₂	W ₂	LT _i	V _{PC2}	β_0		
A.27	$1 + \frac{a_{MC2}^{0,62632} - 1}{0,68597}$			-0,30024					8,35353	90,5	90,3
	Test t			-21,63				24,32			
	Valor p			0,0000				0,0000			
A.28	$1 + \frac{a_{MC2}^{0,51980} - 1}{0,58794}$					0,13353			-2,01416	92,3	92,2
	Test t					23,77			-15,91		
	Valor p					0,0000			0,0000		

Tabla A.6.36 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.35

Indicadores	Modelo			
	A.25	A.26	A.27	A.28
Nº de registros	13	13	13	13
MSE (m/s ²)	0,05	0,06	0,06	0,05
MAE (m/s ²)	0,20	0,20	0,20	0,18
MAPE (%)	28,34	28,47	28,19	29,70
χ^2 calculado	1,05	1,06	1,05	1,18
χ^2 crítico (5%)	21,03	21,03	21,03	21,03

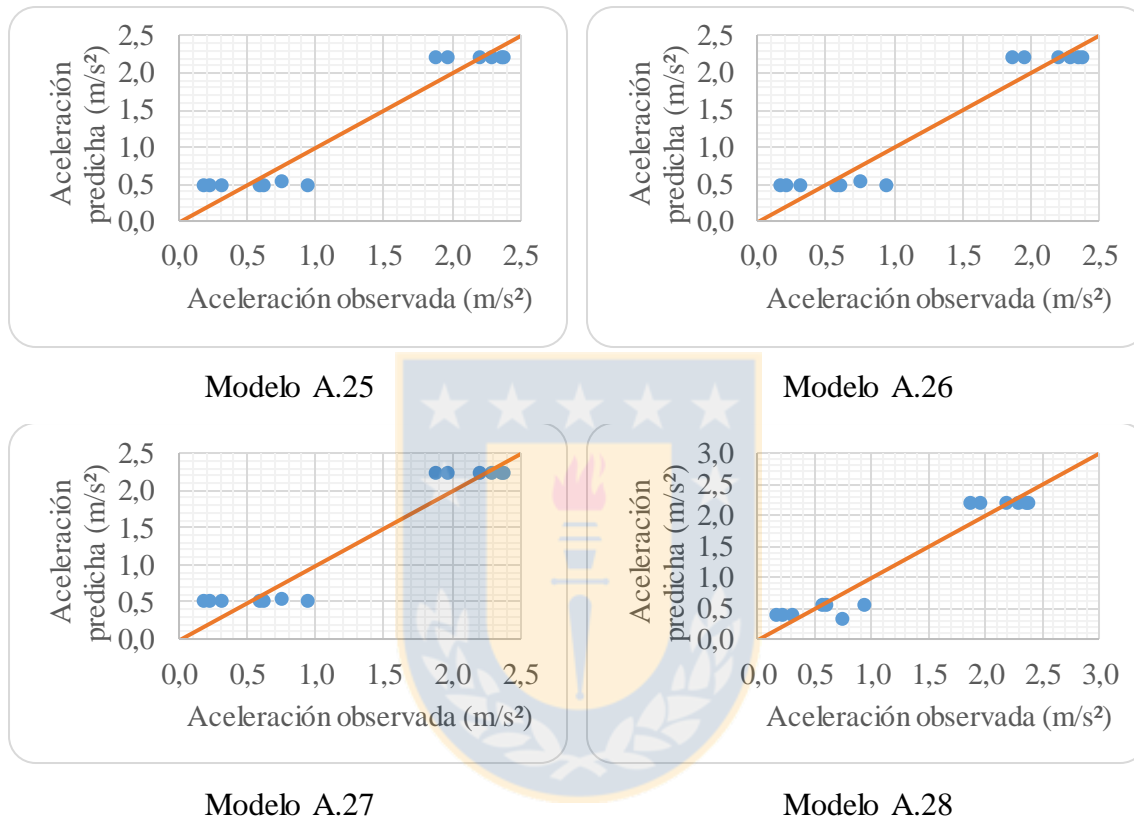


Figura A.6.18 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.35

6.1.12 Modelos de deceleración para la mitad de la curva de salida

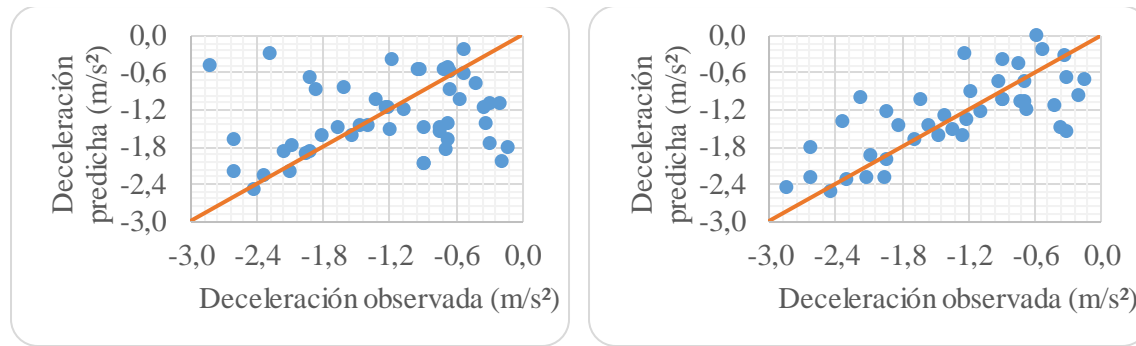
i. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

Tabla A.6.37 Modelos de deceleración para la mitad de la curva de salida

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	$\sqrt{R_2}$	D ₂	W ₂	LT _i	V _{PC2}	β ₀		
D.33	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{0,91156}-1}{0,83943}$	-0,00102						-0,03809	6,63224	48,7	47,9
	Test t	-2,63						-8,31	17,80		
	Valor p	0,0097						0,0000	0,0000		
D.34	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{0,78651}-1}{0,65733}$					-0,03486		-0,03505	7,35419	56,6	56,1
	Test t					-14,60		-8,00	16,18		
	Valor p					0,0000		0,0000	0,0000		

Tabla A.6.38 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.37

Indicadores	Modelo	
	D.33	D.34
N° de registros	50	45
MSE (m/s ²)	0,69	0,41
MAE (m/s ²)	0,61	0,46
MAPE (%)	68,25	256,45
χ ² calculado	-43,61	-49,54
χ ² crítico (5%)	66,34	60,49



Modelo D.33

Modelo D.34

Figura A.6.19 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.37

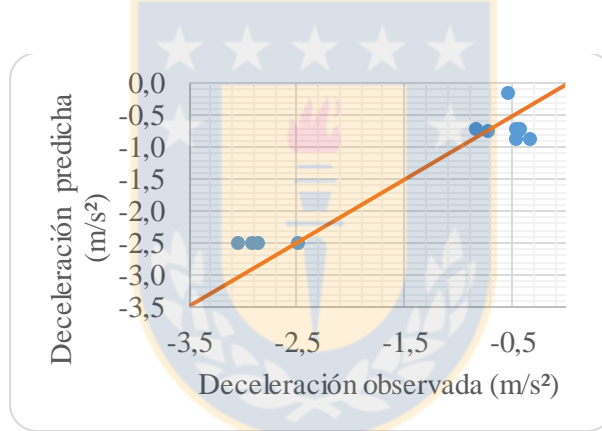
ii. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 399 m

Tabla A.6.39 Modelos de deceleración para la mitad de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	√R ₂	D ₂	W ₂	LT _i	V _{PC2}	β ₀		
D.35	$1 + \frac{(d_{MC2} + 4)^{1,14888} - 1}{1,28592}$					-0,04219			5,23529	60,7	60,1
	Test t					-9,87			17,75		
	Valor p					0,0000			0,0000		

Tabla A.6.40 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.39

Indicadores	Modelo
	D.35
N° de registros	12
MSE (m/s ²)	0,12
MAE (m/s ²)	0,30
MAPE (%)	44,20
χ^2 calculado	-1,98
χ^2 crítico (5%)	19,68



Modelo D.35

Figura A.6.20 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.39

iii. Modelos para radios de la curva de salida entre 400 y 700 m

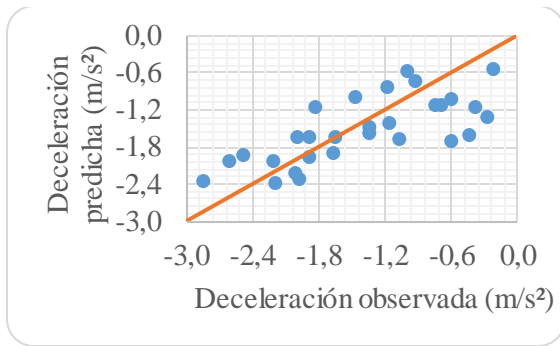
Tabla A.6.41 Modelos de deceleración para la mitad de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²	
		R ₂	R ₂ ⁻¹	$\sqrt{R_2}$	D ₂	W ₂	LT _i	V _{PC2}	β_0			
D.36	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{0,84556}-1}{0,74285}$	0,00398							-0,03536	3,70792	75,7	75,2
	Test t	10,62							-11,63	9,70		
	Valor p	0,0000							0,0000	0,0000		
D.37	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{0,64887}-1}{0,47536}$							-0,02370	-0,03691	7,08410	56,7	55,9
	Test t							-6,64	-8,31	17,10		
	Valor p							0,0000	0,0000	0,0000		
D.38	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{1,40321}-1}{1,98324}$							-0,00565	-0,03433	7,42203	57,9	57,2
	Test t							-8,50	-7,28	15,94		
	Valor p							0,0000	0,0000	0,0000		
D.39	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{1,69241}-1}{3,01245}$	0,00646								-1,23682	60,1	59,7
	Test t	12,92								-4,54		
	Valor p	0,0000								0,0000		
D.40	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{1,54271}-1}{2,43209}$		-1872,28000							5,86247	52,0	51,5
	Test t		-11,05							17,87		
	Valor p		0,0000							0,0000		
D.41	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{1,57139}-1}{2,54361}$			0,30043						-4,68309	60,9	60,6
	Test t			13,04						-8,76		
	Valor p			0,0000						0,0000		

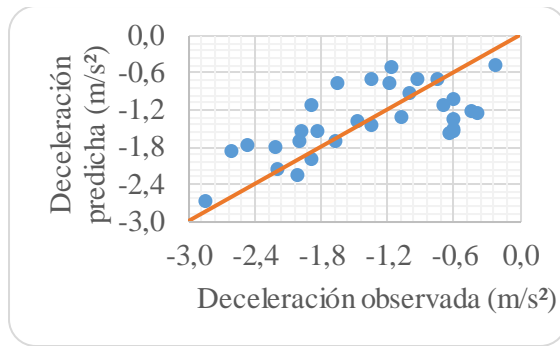
Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	$\sqrt{R_2}$	D ₂	W ₂	LT _i	V _{PC2}	β_0		
D.42	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{1,74498}-1}{3,33689}$				-0,00697				4,45389	42,3	41,8
	Test t				-9,25			18,64			
	Valor p				0,0000			0,0000			
D.43	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{0,73617}-1}{0,59023}$		-1164,06000					-0,03613	8,18580	73,5	73,0
	Test t		-9,70					-11,51	23,72		
	Valor p		0,0000					0,0000	0,0000		
D.44	$1 + \frac{(d_{MC2}+4)^{0,81472}-1}{0,69762}$			0,18588				-0,03551	1,57764	75,2	74,7
	Test t			10,42				-11,66	2,89		
	Valor p			0,0000				0,0000	0,0047		

Tabla A.6.42 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.41

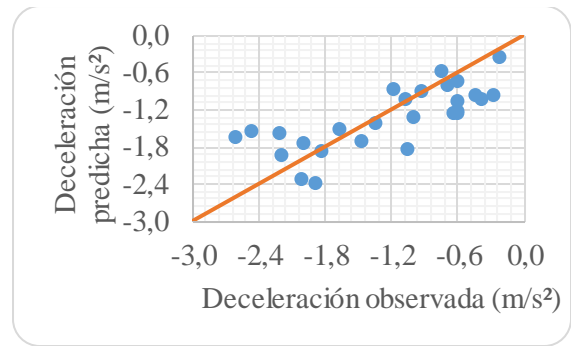
Indicadores	Modelo								
	D.36	D.37	D.38	D.39	D.40	D.41	D.42	D.43	D.44
N° de registros	29	31	27	26	26	27	27	26	29
MSE (m/s ²)	0,26	0,30	0,23	0,33	0,34	0,39	0,35	0,17	0,27
MAE (m/s ²)	0,43	0,45	0,40	0,49	0,51	0,53	0,51	0,36	0,43
MAPE (%)	32,25	39,22	31,35	34,08	36,18	35,57	52,39	29,40	32,67
χ^2 calculado	-5,55	-7,87	-4,67	-5,70	-6,13	-6,70	-10,28	-3,54	-5,67
χ^2 crítico (5%)	41,34	43,77	38,89	37,65	37,65	38,89	38,89	37,65	41,34



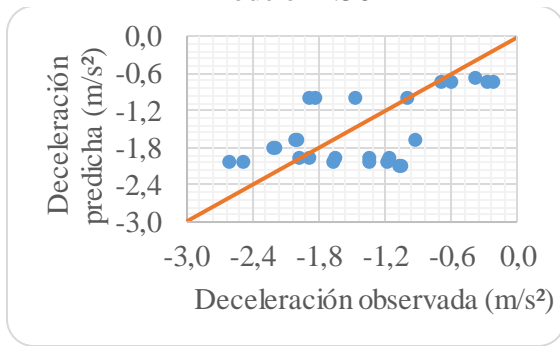
Modelo D.36



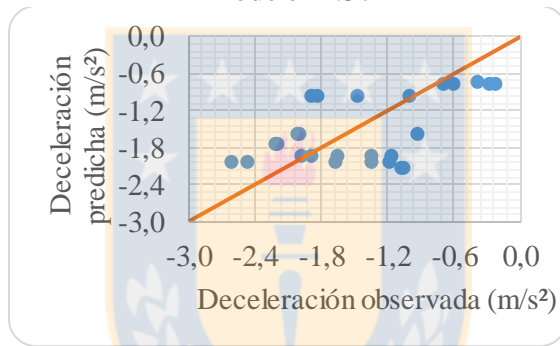
Modelo D.37



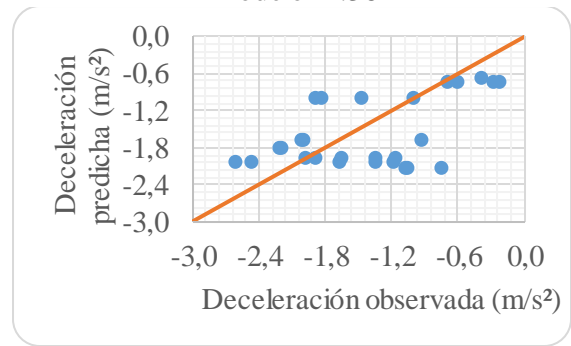
Modelo D.38



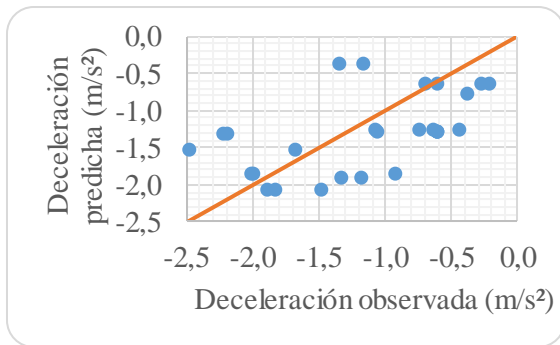
Modelo D.39



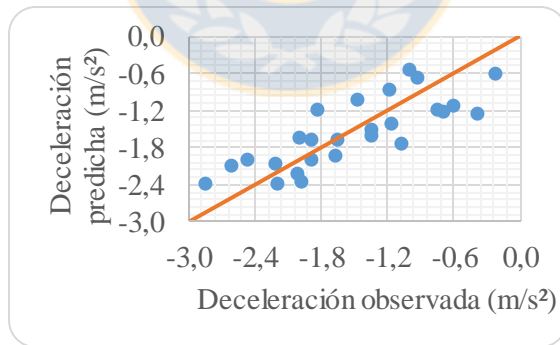
Modelo D.40



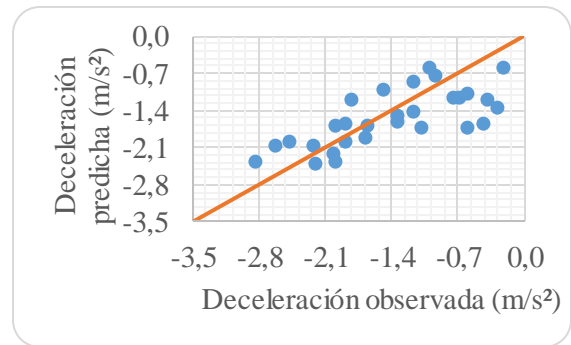
Modelo D.41



Modelo D.42



Modelo D.43



Modelo D.44

Figura A.6.21 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.41

6.1.13 Modelos de aceleración para el final de la curva de salida

i. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

No fue posible formular modelos estadísticamente significativos en esta categoría.

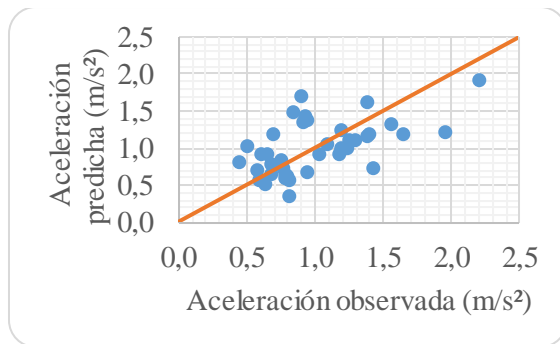
ii. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 399 m

Tabla A.6.43 Modelos de aceleración para el final de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m

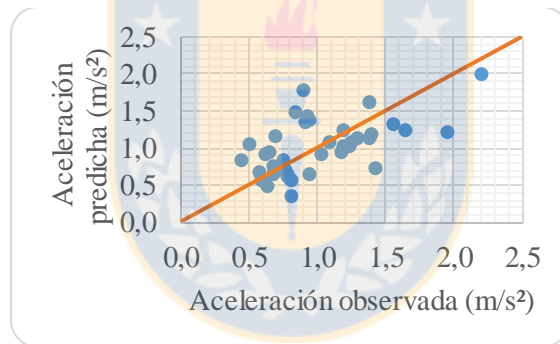
Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	$\sqrt{R_2}$	D ₂	W ₂	LT _i	V _{MC2}	β ₀		
A.29	$1 - \frac{a_{FC2}^{-0,26250} - 1}{0,24280}$	-0,00229						0,03560	-1,23470	39,9	39,0
	Test t	-4,74						9,24	-4,32		
	Valor p	0,0000						0,0000	0,0000		
A.30	$1 - \frac{a_{FC2}^{-0,35313} - 1}{0,32140}$		180,63600					0,03825	-2,78413	44,8	43,9
	Test t		5,87					10,02	-7,30		
	Valor p		0,0000					0,0000	0,0000		
A.31	$1 - \frac{a_{FC2}^{-0,24688} - 1}{0,22992}$			-0,08132				0,03700	-0,64308	41,7	40,8
	Test t			-5,30				9,55	-2,08		
	Valor p			0,0000				0,0000	0,0392		

Tabla A.6.44 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.43

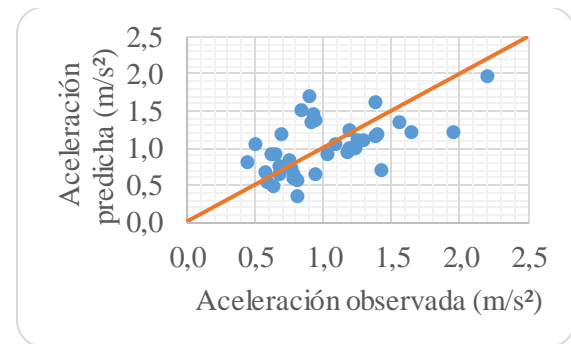
Indicadores	Modelo		
	A.29	A.30	A.31
N° de registros	40	40	40
MSE (m/s ²)	0,12	0,12	0,12
MAE (m/s ²)	0,29	0,28	0,29
MAPE (%)	30,57	30,15	31,34
χ^2 calculado	4,86	4,84	5,02
χ^2 crítico (5%)	55,76	55,76	55,76



Modelo A.29



Modelo A.30

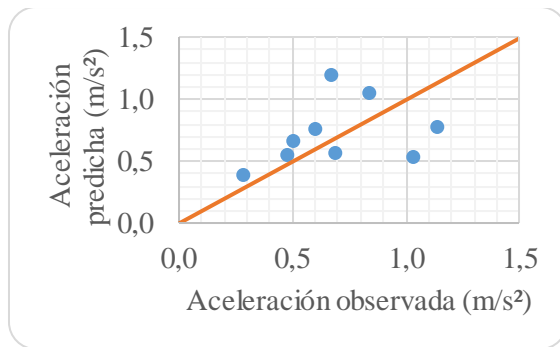


Modelo A.31

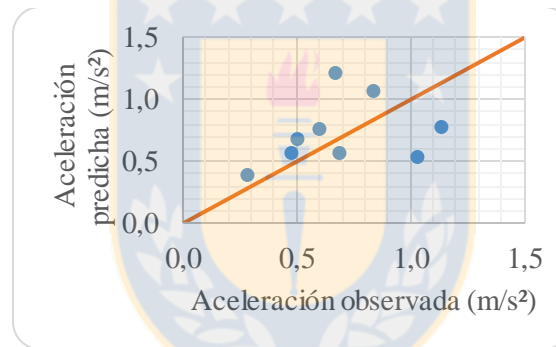
Figura A.6.22 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.43

Tabla A.6.46 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.45

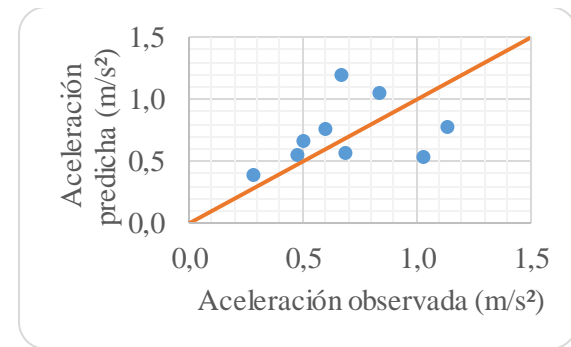
Indicadores	Modelo			
	A.32	A.33	A.34	A.35
N° de registros	9	9	9	9
MSE (m/s ²)	0,09	0,09	0,09	0,04
MAE (m/s ²)	0,25	0,25	0,25	0,18
MAPE (%)	35,00	35,35	35,07	25,09
χ^2 calculado	1,05	1,08	1,06	0,49
χ^2 crítico (5%)	15,51	15,51	15,51	15,51



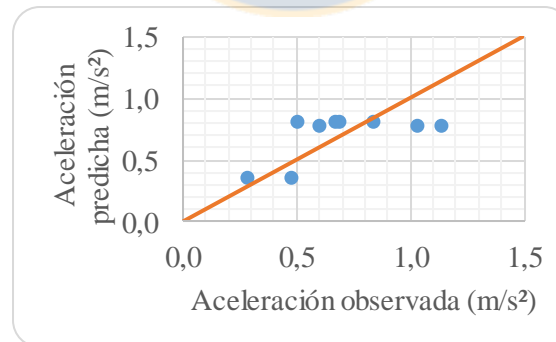
Modelo A.32



Modelo A.33



Modelo A.34



Modelo A.35

Figura A.6.23 Gráficas de aceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.45

6.1.14 Modelos de deceleración para el final de la curva de salida

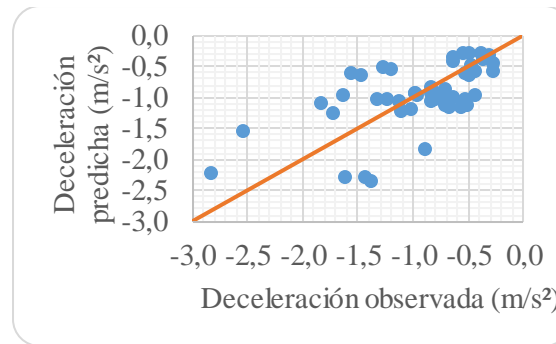
i. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 700 m (Base de datos completa)

Tabla A.6.47 Modelos de deceleración para el final de la curva de salida

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes							R ²	R _a ²	
		R ₂	R ₂ ⁻¹	$\sqrt{R_2}$	D ₂	W ₂	LT _i	V _{MC2}			β_0
D.45	$1 + \frac{(d_{FC2} + 4)^{2,16258} - 1}{7,02104}$					-0,02571		-0,01426	4,76372	62,1	61,7
	Test t					-16,83		-5,65	18,71		
	Valor p					0,0000		0,0000	0,0000		

Tabla A.6.48 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.47

Indicadores	Modelo
	D.45
N° de registros	49
MSE (m/s ²)	0,23
MAE (m/s ²)	0,37
MAPE (%)	41,43
χ^2 calculado	-11,10
χ^2 crítico (5%)	65,17



Modelo D.45

Figura A.6.24 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.47

ii. Modelos para radios de la curva de salida entre 190 y 399 m

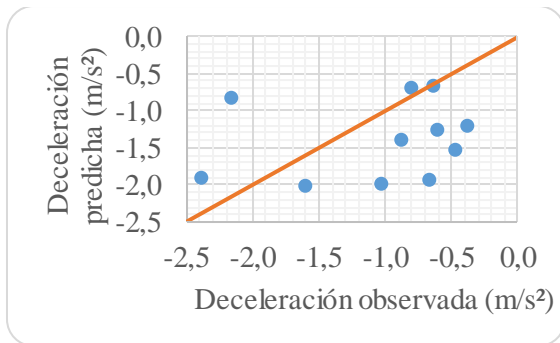
Tabla A.6.49 Modelos de deceleración para el final de la curva de salida con radios entre 190 y 399 m

Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²	
		R ₂	R ₂ ⁻¹	√R ₂	D ₂	W ₂	LT _i	V _{MC2}	β ₀			
D.46	$1 + \frac{(d_{FC2}+4)^{1,73774}-1}{3,06764}$	0,00840							-0,05192	4,40071	49,2	47,3
	Test t	6,47							-4,45	5,00		
	Valor p	0,0000							0,0000	0,0000		
D.47	$1 + \frac{(d_{FC2}+4)^{1,72126}-1}{2,98293}$		-593,05400						-0,05233	9,07952	52,4	50,5
	Test t		-6,85						-4,60	8,82		
	Valor p		0,0000						0,0000	0,0000		
D.48	$1 + \frac{(d_{FC2}+4)^{1,73610}-1}{3,06087}$			0,27418					-0,05165	2,18987	49,2	47,3
	Test t			6,47					-4,44	2,23		
	Valor p			0,0000					0,0000	0,0300		

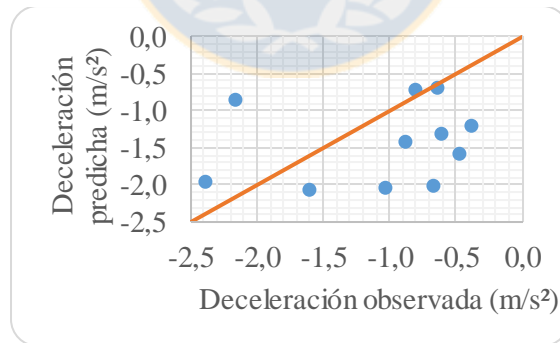
Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	$\sqrt{R_2}$	D ₂	W ₂	LT _i	V _{MC2}	β_0		
D.49	$1 + \frac{(d_{FC2} + 4)^{1,64255} - 1}{2,61294}$					-0,03759			4,90524	67,4	66,7
	Test t					-9,86			19,26		
	Valor p					0,0000			0,0000		

Tabla A.6.50 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.49

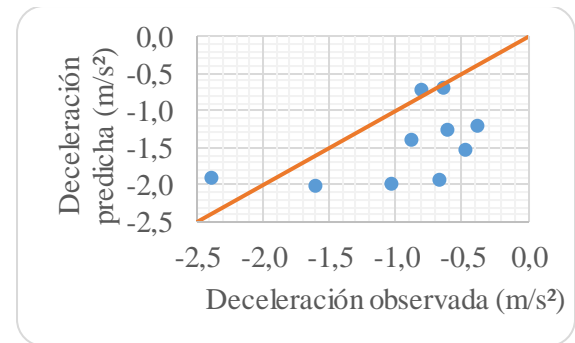
Indicadores	Modelo			
	D.46	D.47	D.48	D.49
N° de registros	11	11	10	9
MSE (m/s ²)	0,65	0,70	0,54	0,45
MAE (m/s ²)	0,69	0,72	0,63	0,49
MAPE (%)	51,27	51,13	40,53	39,61
χ^2 calculado	-5,42	-5,53	-3,32	-3,12
χ^2 crítico (5%)	18,31	18,31	16,92	15,51



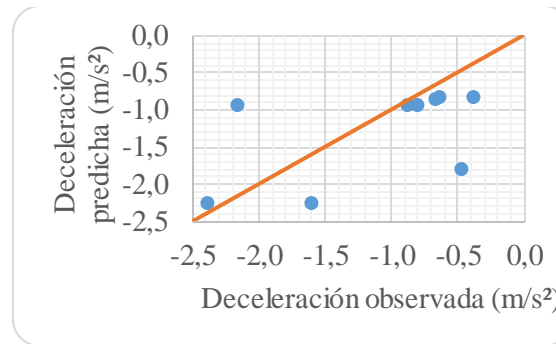
Modelo D.46



Modelo D.47



Modelo D.48



Modelo D.49

Figura A.6.25 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.49

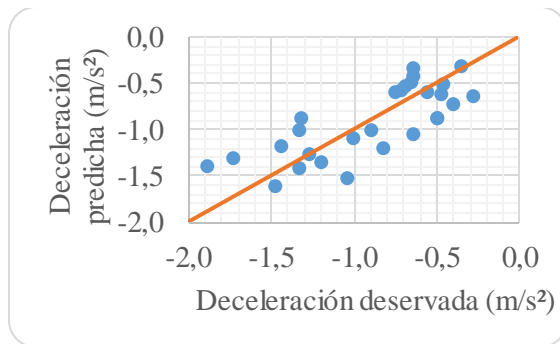
iii. Modelos para radios de la curva de salida entre 400 y 700 m

Tabla A.6.51 Modelos de deceleración para el final de la curva de salida con radios entre 400 y 700 m

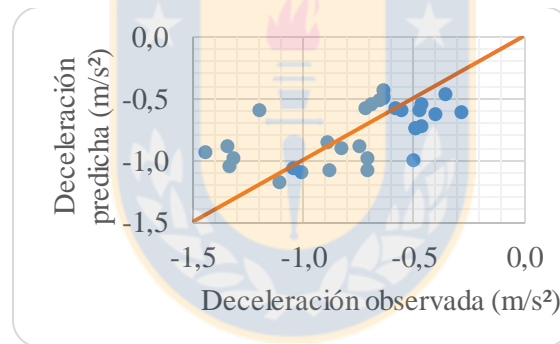
Modelo	Variable dependiente (Y)	Variables independientes								R ²	R _a ²
		R ₂	R ₂ ⁻¹	√R ₂	D ₂	W ₂	LT _i	V _{MC2}	β ₀		
D.50	$1 + \frac{(d_{FC2} + 4)^{2,80522} - 1}{19,51264}$	0,00354						-0,02354	2,36504	61,5	60,8
	Test t	11,82						-8,50	8,14		
	Valor p	0,0000						0,0000	0,0000		
D.51	$1 + \frac{(d_{FC2} + 4)^{3,23973} - 1}{35,87821}$					-0,02044		-0,01156	3,84987	44,1	43,2
	Test t					-8,19		-3,57	13,06		
	Valor p					0,0000		0,0005	0,0000		
D.52	$1 + \frac{(d_{FC2} + 4)^{3,39615} - 1}{47,84102}$				-0,00334			-0,01234	4,16564	49,2	48,4
	Test t				-8,65			-4,05	14,86		
	Valor p				0,0000			0,0001	0,0000		

Tabla A.6.52 Indicadores de validación de los modelos de la Tabla A.6.51

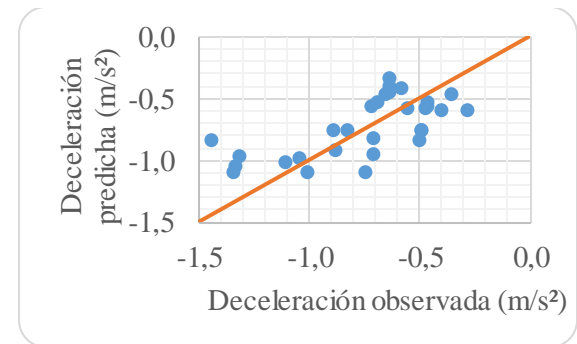
Indicadores	Modelo		
	D.50	D.51	D.52
N° de registros	28	31	30
MSE (m/s ²)	0,08	0,07	0,05
MAE (m/s ²)	0,24	0,21	0,19
MAPE (%)	28,67	28,52	28,95
χ^2 calculado	-2,43	-2,71	-2,23
χ^2 crítico (5%)	40,11	43,77	42,56



Modelo D.50



Modelo D.51



Modelo D.52

Figura A.6.26 Gráficas de deceleración observada v/s predicha por los modelos de la Tabla A.6.51

