Máster en **I**ngeniería de **S**istemas y de **C**ontrol

IDENTIFICACIÓN DE CARRETERAS Y CÁLCULO DE VELOCIDAD RECOMENDADA MEDIANTE TÉCNICAS DE SOFT COMPUTING

Septiembre 2019

AUTOR: Felipe A. Barreno Herrera
DIRECTORES: Matilde Santos Peñas, Manuel Romana García

Máster en **I**ngeniería de **S**istemas y de **C**ontrol

IDENTIFICACIÓN DE CARRETERAS Y CÁLCULO DE VELOCIDAD RECOMENDADA MEDIANTE TÉCNICAS DE SOFT COMPUTING

TRABAJO TIPO A: PROPUESTO POR EL PROFESOR

AUTOR: Felipe A. Barreno Herrera
DIRECTORES: Matilde Santos Peñas, Manuel Romana García

Autorización

Autorizamos a la Universidad Complutense y a la UNED a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de esta Tesis de Máster, como el código y/o la documentación.

Firmado: Felipe A. Barreno Herrera.

"La verdadera
señal de inteligencia
no es el conocimiento
sino la imaginación."

Albert Einstein.

Agradecimientos

Me gustaría expresar mi más profundo y sincero agradecimiento a aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización de este TFM, en especial a la Dra. Matilde Santos y al Dr. Manuel Romana, directores de este trabajo, por la orientación, el seguimiento y la supervisión del mismo, así como por la confianza prestada.

Un agradecimiento muy especial merece la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos por mi pareja, Esther.

A todos, muchas gracias.

Resumen

En este trabajo se presenta un sistema de identificación basado en técnicas de la Inteligencia Artificial, y más en particular, del Soft Computing para clasificación de carreteras convencionales. Concretamente se han usado principalmente la lógica borrosa y las redes neuronales. La variabilidad de la información de entrada y la incertidumbre generada por el solapamiento de esta información hacen que el uso de la lógica borrosa sea una técnica muy adecuada para abordar este problema.

Se ha partido de datos registrados con un sistema instrumental incorporado en un vehículo, de varias carreteras convencionales situadas en la Comunidad de Madrid. Se usan como variables de entrada a los sistemas borrosos y neuro-borrosos las dimensiones del ancho de la plataforma de la vía: ancho de arcenes y ancho de calzada, así como información complementaria de la geometría de las vías. Previamente se realiza un análisis de la variabilidad de las distintas entradas. Los sistemas inteligentes de identificación diseñados son: un sistema basado en reglas borrosas, un sistema neuro-difuso, y un sistema basado en clustering borroso.

Esta clasificación está motivada por el objetivo de desarrollar un sistema inteligente recomendador de la velocidad durante el desplazamiento de un vehículo por una carretera convencional, teniendo en cuenta el estado real de la misma, que puede no coincidir con la categoría asignada de forma teórica. Usando las características geométricas de una carretera, mediante un modelo borroso de evaluación de las mismas e inspirado en el sistema de identificación, se diseña un recomendador de velocidad. En este caso se usan como variables de entrada el radio de curvatura, el peralte, la pendiente y la anchura de arcenes y calzada de la carretera para ajustar la velocidad de un vehículo a las características reales de la geometría de vía. De esta forma esta velocidad así calculada permite mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para los conductores.

PALABRAS CLAVE.
Identificación, Carretera convencional, Geometría vial, Velocidad, Soft computing, Lógica borrosa, Redes neuronales.

Abstract

This paper presents an identification system based on Artificial Intelligence techniques, and more particularly, Soft Computing techniques for classification of conventional roads. Specifically, fuzzy logic and neural networks have been mainly used. The variability of the input information and the uncertainty generated by the overlapping of this information make the use of fuzzy logic a very appropriate technique to address this problem.

It has been based on real data recorded with a sensor system incorporated in a vehicle, in several conventional roads located in the Community of Madrid. The width of the roadsides and roadway are used as input variables to the fuzzy and neuro-fuzzy systems, as well as complementary information. Previously, an analysis of the variability of the different variables is carried out. The intelligent identification systems designed are: a system based on fuzzy rules, a neuro-fuzzy system, and a system based on fuzzy clustering.

This classification is motivated by the objective of developing an intelligent speed-recommending system during the traveling of a vehicle on a conventional road, taking into account its actual state, which may not coincide with the theoretically assigned category. Taking into account this and the real features of a road, by means of an evaluation fuzzy model of them and inspired by the intelligent identification system, this intelligent speed-recommending system is designed. In this case, the radius of curvature, the cant, the slope and the width of shoulders and roadway are used as input variables to adjust the speed of a vehicle to the actual characteristics of the road geometry. Thus, this speed so calculated allows to improve the safety and comfort conditions for drivers.

KEY WORDS.
System identification, Conventional road, Road geometry, Speed, Soft computing, Fuzzy logic, Neural networks.

Índice

1. INTRODUCCIÓN 1
   - 1.1. Motivación 1
   - 1.2. Velocidad asignada a una carretera 2
   - 1.3. Objetivos 6
   - 1.4. Estructura del trabajo. 6
2. ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTOS 7
   - 2.1. Soft Computing 7
     - 2.1.1. Sistema de lógica fuzzy 7
     - 2.1.2. Sistema neuro-borroso 9
     - 2.1.3. Clustering difuso 10
   - 2.2. Extracción de información de carreteras 12
3. DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRIA DE LA CARRETERA 15
   - 3.1. Conceptos generales y grupos de carreteras 15
   - 3.2. Velocidad de operación 17
   - 3.3. Especificaciones de una carretera 18
   - 3.4. Parámetros geométricos de una carretera 19
   - 3.5. Tramos de una carretera 22
4. IDENTIFICACIÓN DE CARRETERAS CONVENCIONALES 23
   - 4.1. Carreteras convencionales y tramos 23
   - 4.2. Variables del modelo 24
   - 4.3. Análisis de las variables de entrada. 27
   - 4.4. Sistema borroso Mamdani de identificación 29
     - 4.4.1. Variables borrosas de entrada y salida 30
     - 4.4.2. Definición de las reglas 31
     - 4.4.3. Inferencia Mamdani 32
     - 4.4.4. Resultados de la clasificación con el sistema borroso 33
   - 4.5. Sistema de clustering difuso. 38
     - 4.5.1. Preparación de datos y generación del modelo. 41
     - 4.5.2. Resultados: Matrices de confusión y validación del modelo. 42
   - 4.6. Sistema neuro-fuzzy 44
     - 4.6.1. Resultados obtenidos con el sistema neuro-fuzzy. 49
   - 4.7. Comparativa de los sistemas de identificación. 51

5. SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD 53
5.1. Sistema de cálculo de velocidad 53
5.2. Subsistema de cálculo de velocidad específica. 54
5.3. Subsistema de evaluación de velocidad según geometría. 56
5.4. Subsistema fuzzy de regulación de velocidad 59
5.5. Subsistema fuzzy de evaluación de condiciones externas. 62
5.6. Subsistema de ajuste final de velocidad 66
6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS 73
6.1. Trabajos futuros. 73
BIBLIOGRAFÍA 75
ANEXO I 79
RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS EXPERIMENTOS SIMULADOS CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD. 79

Índice de ilustraciones

FIGURA 1: DISTINTOS TRAMOS DE CARRETERA REALES ASOCIADOS A SUS CORRESPONDIENTES TIPOS. 2

FIGURA 2: TIPOS DE CARRETERA ASOCIADOS A LOS ACCESOS POR KM CORRESPONDIENTES EN UN TRAMO. 5

FIGURA 3: ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE LÓGICA BORROSA. 8

FIGURA 4: ARQUITECTURA DE UNA RED ANFIS CON DOS ENTRADAS. 10

FIGURA 5. CARRETERA DE ACCESIBILIDAD Y PERIURBANA M-852 (DOS TIPOS DE TRAMOS DISTINTOS). 16

FIGURA 6. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA CARRETERA M-519. 20

FIGURA 7. PARTES DE UN CARRETERA (WWW.VIALTEST.COM). 22

FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS PARA EL ANCHO DE LOS ARCENES DERECHO E IZQUIERDO PARA LOS TIPOS 1, 2 Y 3 DE LAS CARRETERAS ANALIZADAS. 27

FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS PARA EL ANCHO DE LA CALZADA Y DE PLATAFORMA PARA LOS TIPOS 1, 2 Y 3 DE LAS CARRETERAS ANALIZADAS. 28

FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN DE LOS AGRUPAMIENTOS FORMADOS A PARTIR DE LOS DATOS SEGÚN TIPO 1, 2 Y 3 DE LAS CARRETERAS ANALIZADAS. 28

FIGURA 11: CLASIFICACIÓN DE CARRETERAS CONVENCIONALES MEDIANTE UN SISTEMA BORROS 29

FIGURA 12: FUNCIONES PERTENENCIA DISEÑADAS PARA EL SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DIFUSO. 30

FIGURA 13: REPRESENTACIÓN DE LOS TIPOS DE TRAMOS ENCONTRADOS PARA LA CARRETERA M-607. 35

FIGURA 14: REPRESENTACIÓN DE LOS TIPOS DE TRAMOS ENCONTRADOS PARA LA CARRETERA M-618. 35

FIGURA 15: REPRESENTACIÓN DE LOS TIPOS DE TRAMOS ENCONTRADOS PARA LA CARRETERA M-601. 36

FIGURA 16: REPRESENTACIÓN DE LOS TIPOS DE TRAMOS ENCONTRADOS PARA LA CARRETERA M-852. 36

FIGURA 17: REPRESENTACIÓN DE LOS TIPOS DE TRAMOS ENCONTRADOS PARA LA CARRETERA M-305. 37

FIGURA 18: REPRESENTACIÓN DE LOS TIPOS DE TRAMOS ENCONTRADOS PARA LA CARRETERA M-509. 37

FIGURA 19: REPRESENTACIÓN DE LOS TIPOS DE TRAMOS ENCONTRADOS PARA LA CARRETERA M-519. 38

FIGURA 20: REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA DE CADA TRAMO DE CARRETERA A PARTIR DE LA CALZADA Y ARCENES DERECHO E IZQUIERDO 39

FIGURA 21: REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA DE CADA TRAMO DE CARRETERA A PARTIR DE LA CALZADA Y ARCENES DERECHO E IZQUIERDO 39

FIGURA 22: REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA DE CADA TRAMO DE CARRETERA A PARTIR DE LA CALZADA Y ARCENES DERECHO E IZQUIERDO 40

FIGURA 23: REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA DE CADA TRAMO DE CARRETERA A PARTIR DE LA CALZADA Y ARCENES DERECHO E IZQUIERDO 40

FIGURA 24: ESQUEMA DEL SISTEMA DE CLUSTERING DIFUSO DE CARRETERAS. 41

FIGURA 25: AGRUPACIONES GENERADAS CON EL SISTEMA DE CLUSTERING DIFUSO. 44

FIGURA 26: ESTRUCTURA RED ANFIS 44

FIGURA 27: ESQUEMA DEL SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN DE CARRETERAS EMPLEANDO ANFIS 45

FIGURA 28: FUNCIONES DE PERTENENCIA DEL SISTEMA NEURO-FUZZY. 46

FIGURA 29: ESQUEMA PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DE VELOCIDAD RECOMENDADA. 53

FIGURA 30: ESQUEMA PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DE VELOCIDAD ESPECÍFICA. 55

FIGURA 31: FUNCIONES DE PERTENENCIA DE ENTRADA DISEÑADAS PARA EL SUBSISTEMA DE EVALUACIÓN DE VELOCIDAD SEGÚN GEOMETRÍA. 57

FIGURA 32: FUNCIONES DE PERTENENCIA DE SALIDA DISEÑADAS PARA EL SUBSISTEMA DE EVALUACIÓN DE VELOCIDAD SEGÚN GEOMETRÍA. 57

FIGURA 33: FUNCIONES DE PERTENENCIA DE ENTRADAS DEL SUBSISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD. 60

FIGURA 34: FUNCIONES DE PERTENENCIA DE LA SALIDA DEL SUBSISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD 60

FIGURA 35: FUNCIONES DE PERTENENCIA ENTRADAS DEL SUBSISTEMA DE EVALUACIÓN DE CONDICIONES EXTERNAS 64

FIGURA 36: FUNCIONES DE PERTENENCIA DE SALIDA DEL SUBSISTEMA DE EVALUACIÓN DE CONDICIONES EXTERNAS 64

FIGURA 37: ASIGNACIÓN DE LA VELOCIDAD FINAL AJUSTADA A SU VELOCIDAD RECOMENDADA. 67

FIGURA 38. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS 69

FIGURA 39. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS 69

FIGURA 40. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN RELAJADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 70

FIGURA 41. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN RELAJADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 70

FIGURA 42. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y LLUVIA. 71

FIGURA 43. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y LLUVIA. 71

FIGURA 44. SISTEMA DE RECOMENDACIÓN O SUPERVISIÓN DE VELOCIDAD PARA UN VEHÍCULO. 74

FIGURA 45. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS 79

FIGURA 46. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-618 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....80

FIGURA 47. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-601 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....80

FIGURA 48. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-852 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....81

FIGURA 49. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....81

FIGURA 50. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-509 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....82

FIGURA 51. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-519 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....82

FIGURA 52. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENTE, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 83

FIGURA 53. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-618 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENTE, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 83

FIGURA 54. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-601 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENTE, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 84

FIGURA 55. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-852 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENTE, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 84

FIGURA 56. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENTE, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 85

FIGURA 57. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-509 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENTE, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 85

FIGURA 58. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-519 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENTE, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 86

FIGURA 59. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA PROPIA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 86

FIGURA 60. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-618 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA PROPIA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 87

FIGURA 61. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-601 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA PROPIA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 87

FIGURA 62. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-852 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA PROPIA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 88

FIGURA 63. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA PROPIA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 88

FIGURA 64. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-509 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA PROPIA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 89

FIGURA 65. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-519 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA PROPIA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 89

FIGURA 66. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA DECLARADA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 90

FIGURA 67. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-618 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA DECLARADA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 90

FIGURA 68. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-601 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA DECLARADA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 91

FIGURA 69. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-852 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA DECLARADA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 91

FIGURA 70. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA DECLARADA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 92

FIGURA 71. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-509 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA DECLARADA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 92

FIGURA 72. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-519 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN URGENCIA DECLARADA, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 93

FIGURA 73. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN CALMADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 93

FIGURA 74. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-618 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN CALMADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 94

FIGURA 75. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-601 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN CALMADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 94

FIGURA 76. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-852 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN CALMADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 95

FIGURA 77. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN CALMADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 95

FIGURA 78. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-509 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN CALMADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 96

FIGURA 79. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-519 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN CALMADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 96

FIGURA 80. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN RELAJADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 97

FIGURA 81. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-618 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN RELAJADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 97

FIGURA 82. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-601 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN RELAJADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 98

FIGURA 83. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-852 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN RELAJADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 98

FIGURA 84. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN RELAJADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 99

FIGURA 85. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-509 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN RELAJADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 99

FIGURA 86. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-519 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN RELAJADO, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y BUENAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS. 100

FIGURA 87. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, ESTADO DEL PAVIMENTO REGULAR Y LLUVIA. 100

FIGURA 88. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-618 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, ESTADO DEL PAVIMENTO REGULAR Y LLUVIA. 101

FIGURA 89. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-601 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, ESTADO DEL PAVIMENTO REGULAR Y LLUVIA. 101

FIGURA 90. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-852 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, ESTADO DEL PAVIMENTO REGULAR Y LLUVIA. 102

FIGURA 91. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, ESTADO DEL PAVIMENTO REGULAR Y LLUVIA. 102

FIGURA 92. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-509 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, ESTADO DEL PAVIMENTO REGULAR Y LLUVIA. 103

FIGURA 93. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-519 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, ESTADO DEL PAVIMENTO REGULAR Y LLUVIA. 103

FIGURA 94. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-607 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y LLUVIA. 104

FIGURA 95. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-618 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y LLUVIA. 104

FIGURA 96. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-601 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y LLUVIA. 105

FIGURA 97. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-852 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y LLUVIA. 105

FIGURA 98. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-305 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y LLUVIA. 106

FIGURA 99. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-509 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y LLUVIA. 106

FIGURA 100. VELOCIDAD OBTENIDA CON EL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD PARA EL TRAMO DE CARRETERAS CONVENCIONALES M-519 CON UN NIVEL DE CONDUCCIÓN NORMAL, BUEN ESTADO DEL PAVIMENTO Y LLUVIA. 107

Índice de tablas

TABLA 1. CLASES DE CARRETERAS. 15

TABLA 2. TIPOS DE CARRETERAS Y SU CORRESPONDENCIA CON CARRETERAS CONVENCIONALES. 16

TABLA 3. TIPO DE RELIEVE DEL TERRENO NATURAL 18

TABLA 4. PERALTES PARA CARRETERAS AUTOPISTAS, AUTOVÍAS, VÍAS RÁPIDAS Y CARRETERAS C-100. 21

TABLA 5. PERALTES PARA CARRETERAS C-80, C-60 Y C-40. 21

TABLA 6. TIPOS DE TRAMO ASOCIADOS A CADA TRAMO DE CARRETERA ANALIZADO. 23

TABLA 7. EJEMPLO TABLA DE DATOS DE ENTRADA. 24

TABLA 8. MÉTRICAS BÁSICAS DE LOS DATOS DE LA GEOMETRÍA DE LOS TRAMOS ANALIZADOS. 25

TABLA 9. RANGO DE VARIABILIDAD PARA LA CALZADA Y ARCENES. 25

TABLA 10. RADIO MÍNIMO SEGÚN VELOCIDAD DE PROYECTO EN CARRETERAS CONVENCIONALES 26

TABLA 11. PENDIENTE MÁXIMA SEGÚN VELOCIDAD DE PROYECTO EN CARRETERAS CONVENCIONALES. 26

TABLA 12. TIPOS ASOCIADOS A CARRETERAS CONVENCIONALES. 27

TABLA 13. ENTRADAS Y SALIDA CON SUS ETIQUETAS LINGÜÍSTICAS Y SUS VALORES NUMÉRICOS ASOCIADOS. 30

TABLA 14. REGLAS DEL SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN BORROSO. 31

TABLA 15. REPRESENTACIÓN DE REGLAS EN RELACIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA 32

TABLA 16. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FUZZY BASADO EN REGLAS. 32

TABLA 17. MATRICES DE CONFUSIÓN PARA CADA TRAMO DE CARRETERA EVALUADO. LAS FILAS INDICAN EL VALOR REAL Y LAS COLUMNAS LAS PREDICCIONES. 33

TABLA 18. RESULTADOS OBTENIDOS EN % CON EL SISTEMA DE IDENTIFICACIÓN BORROSO. 34

TABLA 19. TIPOS DE TRAMO IDENTIFICADOS EN CADA TRAMO DE CARRETERA ANALIZADO Y EL TEÓRICO. EN VERDE CORRECTO Y EN ROJO INCORRECTO. 34

TABLA 20. ACIERTOS Y FALLOS EN LA ASIGNACIÓN A CLASE 42

TABLA 21. MATRICES DE CONFUSIÓN OBTENIDOS EN UN EXPERIMENTO PARA CADA TRAMO DE CARRETERA EVALUADA 42

TABLA 22. RESULTADOS OBTENIDOS EN % CON EL CLUSTERING DIFUSO. 43

TABLA 23. RESULTADOS OBTENIDOS EN % CON EL SISTEMA DE CLUSTERING DIFUSO EN UN EXPERIMENTO DADO. EN VERDE CORRECTO Y EN ROJO INCORRECTO. 43

TABLA 24. ERROR DE ENTRENAMIENTO POR CADA ÉPOCA. 46

TABLA 25. ERROR DE ENTRENAMIENTO POR CADA ÉPOCA. 47

TABLA 26. ERROR DE ENTRENAMIENTO POR CADA EPOCH. 47

TABLA 27. MATRICES DE CONFUSIÓN PARA CADA TRAMO DE CARRETERA. 48

TABLA 28. MATRICES DE CONFUSIÓN PARA CADA TRAMO DE CARRETERA. 48

TABLA 29. MATRICES DE CONFUSIÓN PARA CADA TRAMA DE CARRETERA EVALUADA. 49

TABLA 30. RESULTADOS OBTENIDOS EN % CON EL SISTEMA ANFIS. 49

TABLA 31. RESULTADOS OBTENIDOS EN % CON ANFIS. EN VERDE CORRECTO Y EN ROJO INCORRECTO. 50

TABLA 32. RESULTADOS OBTENIDOS EN % CON EL SISTEMA ANFIS. 50

TABLA 33. RESULTADOS OBTENIDOS EN % CON EL SISTEMA ANFIS. EN VERDE CORRECTO Y EN ROJO INCORRECTO. 50

TABLA 34. RESULTADOS OBTENIDOS EN % CON EL SISTEMA ANFIS Y K-FOLD. 51

TABLA 35. RESULTADOS OBTENIDOS EN % CON ANFIS K-FOLD. EN VERDE CORRECTO Y EN ROJO INCORRECTO. 51

TABLA 36. RELACIÓN DE VELOCIDAD DE PROYECTO, RADIO MÍNIMO Y PERALTE MÁXIMO [1]. 54

TABLA 37. MÁXIMO ROZAMIENTO TRANSVERAL MOVILIZADO EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD ESPECÍFICA, EN CONDICIONES FIRME HÚMEDO [1]. 55

TABLA 38. REGLAS DEL SUBSISTEMA DE EVALUACIÓN DE VELOCIDAD SEGÚN GEOMETRÍA. 58

TABLA 39. REPRESENTACIÓN DE REGLAS EN RELACIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA. 58

TABLA 40. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FUZZY BASADO EN REGLAS. 59

TABLA 41. REGLAS DEL SUBSISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD. 61

TABLA 42. REPRESENTACIÓN DE LAS REGLAS DEL SUBSISTEMA DE EVALUACIÓN DE VELOCIDAD SEGÚN GEOMETRÍA. 62

TABLA 43. REPRESENTACIÓN DE LAS REGLAS DEL SUBSISTEMA DE VELOCIDAD POR GEOMETRÍA. 62

TABLA 44. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FUZZY BASADO EN REGLAS. 62

TABLA 45. NIVEL DE URGENCIA ESPECIFICADO. 63

TABLA 46. REGLAS DEL SUBSISTEMA DE EVALUACIÓN DE CONDICIONES EXTERNAS. 65

TABLA 47. REPRESENTACIÓN DE LAS REGLAS DEL SUBSISTEMA DE EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES EXTERNAS PARA LOS CASOS DE NIVEL ESPECIFICADO COMO CALMADO Y RELAJADO. 65

TABLA 48. REPRESENTACIÓN DE LAS REGLAS DEL SUBSISTEMA DE EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES EXTERNAS PARA LOS CASOS DE NIVEL ESPECIFICADO COMO NORMAL Y URGENCIA. 66

TABLA 49. REPRESENTACIÓN DE LAS REGLAS DEL SUBSISTEMA DE EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES EXTERNAS PARA LOS CASOS DE NIVEL ESPECIFICADO COMO URGENCIA PROPIA Y DECLARADA. 66

TABLA 50. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA FUZZY BASADO EN REGLAS. 66

TABLA 51. REDUCCIÓN DE VELOCIDAD SEGÚN CONDICIONES EXTERNAS. 67

TABLA 52. VELOCIDAD MÁXIMA PARA CADA TIPO DE CARRETERA. 68

TABLA 53. EJEMPLO DEL SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD. 68

LISTADO DE SIGLAS, ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

ANFIS: Redes Adaptativas Neuro Borrosas (Adaptive neuro fuzzy inference system)

BISC: Berkeley Initiative in Soft Computing

FIS: Sistema de Inferencia Borroso (Fuzzy Inference System)

FCM: Fuzzy c-Means

FCM: Mapas cognitivos borrosos (Fuzzy Cognitive Maps)

FL: Lógica borrosa (Fuzzy Logic)

FLC: Control de Lógica Borrosa (Fuzzy Logic Control)

MF: Función de Pertenencia (Membership Function)

SC: Soft Computing

SIG: Sistemas de información geográfica

T-S-K: Takagi-Sugeno-Kang

Ve: Velocidad específica de una curva circular

Vp: Velocidad de proyecto de un tramo

Vr: Velocidad de recorrido de un tramo

Vl: Velocidad libre

V85: Velocidad operativa característica de un elemento

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se realiza una investigación sobre cómo identificar carreteras convencionales mediante técnicas de Soft Computing, con el objetivo de desarrollar un sistema recomendador de velocidad según el estado de las mismas atendiendo a su geometría.

1.1. Motivación

El presente trabajo plantea obtener un sistema interpretable, mediante el uso de conceptos principalmente tomados de la lógica borrosa o difusa (fuzzy), haciendo uso de distintas variables seleccionadas de información del estado real de carreteras convencionales, que sea capaz de analizar la geometría de la vía desde un sistema de percepción que mide algunas características básicas de la geometría de una carretera convencional.

La motivación principal del trabajo es buscar, a partir del conocimiento intuitivo de la percepción humana, la forma de distinguir diferentes tipos de carretera, y así conseguir una clasificación adecuada y automática de cada una. A su vez, busca la manera de decidir la velocidad de circulación de un vehículo por esa carretera convencional evaluando las características de la geometría reales de la misma. Esto permitirá adoptar las medidas oportunas para asegurar la seguridad y el confort de la conducción.

Para ello se implementará un sistema de identificación con técnicas de Soft Computing que pueda distinguir de forma automática cada carretera analizada mediante algunos datos de la geometría de la vía.

Las características de la carretera se ven modificadas por reducción de arcenes o de la calzada debido a construcción, degradación, o también por ampliación, expropiación, etc. Esto hace que el tipo de carretera asignado de forma ideal pueda cambiar a otro distinto. Por este motivo, es importante detectar el estado actual de las carreteras desde el punto de vista de la geometría y adecuar mejor la velocidad a las características reales de la vía para mejorar el confort y la seguridad en la conducción.

Las carreteras son largas y se pueden dividir por tramos. Estos tramos pueden ser de distintos tipos al que inicialmente esté asignado teóricamente a cada una. Esto es importante por las reglas de circulación que son distintas según el tipo de carretera por la que se circule. Para una carretera determinada, se han de detectar tramos dentro de la misma que tengan las mismas características.

Las carreteras convencionales (diferentes a autopistas o autovías, [1]) son las que tienen una infraestructura más variada. En general se distinguen cuatro tipos:

-Tipo 1: Movilidad, interurbanas. Altas velocidades y prestaciones con buen trazado.

-Tipo 2: Accesibilidad. Bajas velocidades.

-Tipo 3: Periurbanas. Carreteras en áreas urbanizadas con pocos accesos.

-Tipo 4: Calles.

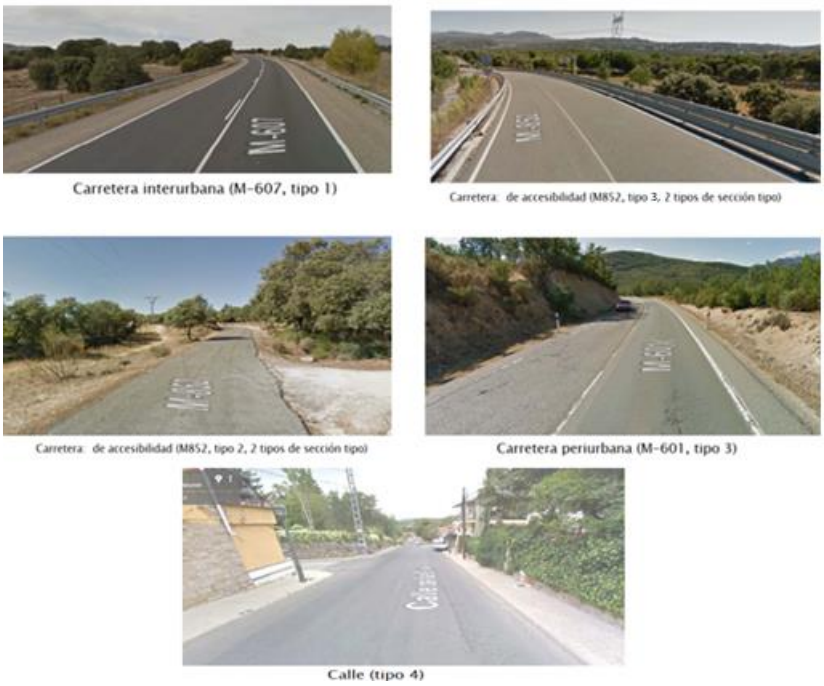


Figura 1: Distintos tramos de carretera reales asociados a sus correspondientes tipos.

En la Figura 1 se muestran cinco imágenes de carreteras convencionales. La imagen superior izquierda muestra un tramo de la carretera M-607 que corresponde con un tipo 1. Las imágenes superior derecha y media izquierda corresponden a dos puntos distintos de la carretera M-852. La primera muestra un tramo asociado a un tipo 3 y la segunda un tramo asociado a un tipo 2. La imagen inferior muestra una calle que está asociada a un tipo 4. Como se puede observar en la Figura 1, no siempre es fácil asignar un único tipo de carretera a cada una de ellas. A lo largo del tiempo algunas de sus características se modifican, bien de forma artificial (construcción, otros) o de forma natural (desgaste, invasión de plantas) por lo que la clasificación debe ser dinámica y automática.

Para abordar este problema se propone un sistema inteligente que, según las características actuales de las vías, es capaz de evaluar como es la geometría de cada tramo y a partir de esta información calcular una velocidad recomendada para ese tipo determinado de tramo de carretera.

Este trabajo plantea el uso de técnicas inteligentes dado el tipo de información con la que se trabaja, que tiene cierta variabilidad e incertidumbre. Además hace falta conocimiento experto para delimitar algunos casos. Por ello se ha optado por aplicar estas técnicas para la identificación y clasificación.

Además se ha diseñado un sistema recomendador de velocidad, con técnicas de Soft Computing, basado en información de las características geométricas actuales de la red de carreteras de España.

1.2. Velocidad asignada a una carretera

Para decidir la velocidad a la que se quiere circular se tienen en cuenta una serie de factores relativamente larga, y en todo caso compleja ya que algunos son objetivos pero otros pueden ser subjetivos. Algunos de los factores dependen de quién conduce: la edad, la percepción del riesgo, la prisa, el estado del coche, real o más bien percibido. Otros dependen de las circunstancias ambientales: la climatología, si el viaje es de día o de noche, si hay deslumbramiento a la hora del viaje. Finalmente,

otros dependen de la carretera en sí misma: la geometría de la planta, del alzado, el estado del firme, la anchura del carril, la existencia de arcenes y su anchura, o la señalización.

Por otro lado, existen sistemas de control de velocidad para vehículos, concretamente sistemas de control de crucero, que no poseen un criterio basado en conocimiento para calcular de manera dinámica la velocidad a la que debe circular el vehículo de forma adaptativa y automática. Los sistemas actuales mantienen la velocidad introducida por el usuario y pueden contar con características como anticolisión o aviso de cambio de carril.

La geometría de la carretera se compone de una serie de elementos que pueden presentar una curvatura fija (rectas y curvas circulares) o variable dentro de unos límites, como es el caso de las transiciones entre las dos citadas anteriormente. La curvatura de las rectas es infinita, y la de las curvas circulares finita y constante. Para una curvatura dada, en cada vehículo hay una posición fija del volante para trazarla. Si se dispusieran dos alineaciones con curvatura fija una a continuación de la otra, sean recta y curva circular, o dos curvas circulares consecutivas, ocurriría que el conductor tendría que cambiar en un solo punto, en un instante, la posición del volante para pasar de una a otra. Esto tiene dos dificultades: primero, quien conduce debería saber la curvatura de las dos alineaciones, la presente y la futura, y su diferencia; segundo, tendría que percibir en qué instante se pasa de una a otra, o tendería a salirse de la curva por dentro (si gira demasiado el volante), o por fuera (si lo gira demasiado poco). Para evitar esto se emplean curvas de transición, espirales especiales denominadas clotoides, que son la trayectoria que describe un vehículo que viaja a velocidad constante cuando se gira el volante a velocidad angular constante. Así, las personas que conducen tienen un tiempo y una variación gradual para poder hacer de forma natural el movimiento del volante, coordinándolo con la velocidad.

En las curvas circulares, los vehículos y sus ocupantes experimentan una fuerza y una aceleración centrípetas, lo que, si se supera un cierto umbral, hace que los ocupantes del vehículo experimenten una incomodidad que preferirían evitar. Se llama *velocidad específica* de un elemento de trazado (*Ve*), a la máxima velocidad que puede mantenerse en este elemento, en condiciones de comodidad, y por supuesto de seguridad, con pavimento húmedo y neumáticos en buen estado, sin considerar restricciones por otras condiciones meteorológicas, del tráfico o legales.

Se define *velocidad de proyecto de un tramo de carretera* (*Vp*) como la velocidad específica mínima de los elementos que constituyen dicho tramo, entendiendo éste como cada una de las partes en que se divide una carretera. Otro concepto útil en el trazado geométrico es la *velocidad de planeamiento de un tramo (V)*, que es la media armónica de las velocidades específicas de los elementos de tramos homogéneos de longitud superior a 2 Km.

En la instrucción actual de trazado [1] (norma 3.1 IC), la velocidad de proyecto la determina, en el proyecto de la carretera, los siguientes aspectos:

- El tipo de carretera.
- La distancia de parada mínima, la distancia de cruce mínima, la distancia de adelantamiento.
- Las longitudes máximas y mínimas de las rectas.
- Los radios y peraltes de las curvas circulares.
- Las longitudes mínima y máxima de las curvas de transición.
- La anchura mínima de los arcenes y las inclinaciones máximas de las rasantes.
- Los parámetros mínimos y deseables de los acuerdos verticales.

- El nivel de servicio en la hora de proyecto del año horizonte.
- La longitud de los carriles adicionales y las cuñas de transición.
- La longitud de los carriles centrales de espera.

La normativa del Ministerio de Fomento se refiere únicamente a las carreteras interurbanas, y la [1] a carreteras de nuevo trazado. En carreteras ya existentes las normas no tienen por qué cumplirse, pero, en caso de intervención en un determinado aspecto, es obligatorio seguir la norma, o justificar adecuadamente el no seguimiento de sus dictados.

Las carreteras convencionales, las que no son autopistas y no tienen calzadas separadas, pueden agruparse en varios tipos. El Manual de Capacidad de Carreteras (Highway Capacity Manual, en inglés) es el documento más seguido en el mundo para evaluar la capacidad y nivel de servicio de carreteras. Hay adaptaciones y versiones locales en varios países, pero se siguen las definiciones y esquema de análisis en todos ellos. El manual, en primer lugar, divide las carreteras en vías con circulación ininterrumpida (sin semáforos) y vías con circulación interrumpida (con semáforos), lo que, trasladando el análisis a las vías españolas, pasa a ser vías interurbanas o periurbanas, y vías urbanas. Las carreteras convencionales, en el Manual de Capacidad, se clasifican en las siguientes tres clases:

> *The three classes of two-lane highways are defined as follows:*
>
> - *Class I two-lane highways are highways where motorists expect to travel at relatively high speeds. Two-lane highways that are major intercity routes, primary connectors of major traffic generators, daily commuter routes, or major links in state or national highway networks are generally assigned to Class I. These facilities serve mostly long-distance trips or provide the connections between facilities that serve long-distance trips.*
> - *Class II two-lane highways are highways where motorists do not necessarily expect to travel at high speeds. Two-lane highways that are access routes to Class I facilities, that serve as scenic or recreational routes (and not as primary arterials), or that pass through rugged terrain (where high-speed operation would be impossible) are assigned to Class II. These facilities most often serve relatively short trips, the beginning or ending portions of longer trips, or trips for which sightseeing plays a significant role.*
> - *Class III two-lane highways are highways serving moderately developed areas. They may be portions of a Class I or Class II highway that pass through small towns or developed recreational areas. Local traffic often mixes with through traffic on these segments, and the number of unsignalized driveways and cross-streets is noticeably higher than in a purely rural area. Class III highways can also include longer roadway segments passing through more spread-out recreational areas, also with increased roadside densities. Such segments are often accompanied by reduced speed limits that reflect the higher activity level.*
>
> (Highway Capacity Manual, 6th edition, 2018, Chapter 15: Two-Lane Highways, pág 15-4.)

Como se ve, en la definición se incluyen percepciones subjetivas, difíciles de evaluar de forma analítica. Por tanto, se pueden considerar estas tres clases de vía (interurbanas) y una cuarta que agruparía a las vías urbanas.

Es posible representar las cuatro clases en un gráfico, disponiendo en el eje de abscisas el número de accesos a la carretera por kilómetro, entendiendo como acceso una vía de menor jerarquía, o un acceso a una zona urbanizada o finca con un tráfico diario apreciable, más allá del acceso de un propietario a

su finca. La Figura 2 representa estas clases, con los límites de velocidad legales vigentes en España en la actualidad.

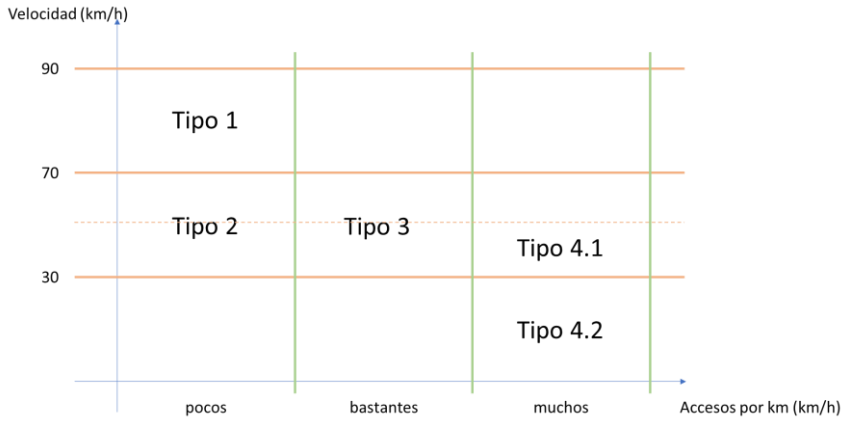


Figura 2: Tipos de carretera asociados a los accesos por km correspondientes en un tramo.

¿Qué sabe el usuario de todo esto, qué percibe? En realidad, puede percibir cuatro aspectos:

- La jerarquía de la carretera, esto es, la importancia que da a la carretera la administración.
- La sección transversal de la carretera, cómo de completa es, o cómo está de cuidada y conservada. Esto claramente correlaciona con la relevancia de la vía para la sociedad, ya que se tiende a actuar más en vías de mayor importancia.
- La velocidad máxima señalizada.
- La intensidad de la señalización, la existencia de barreras y otras superestructuras.

Los métodos tradicionales para el cálculo de la velocidad máxima recomendable a la que debe circular un vehículo mientras se desplaza por una vía interurbana están basados en la interacción de la dinámica vehicular con la propia geometría de la carretera. La velocidad puede determinarse en función de tres factores: primero, la geometría de la carretera, esto es, el radio de curvatura, con peralte o sin peralte; segundo, la comodidad deseada por el conductor y los viajeros; y, tercero, el nivel de seguridad con el que se circula. Los modelos tradicionales de cálculo de velocidad de operación (concepto de velocidad con la que circulan los conductores) en carretera están basados modelos continuos o discretos a partir del trazado de la misma. Estos modelos se generan con cálculos de velocidad en secciones definidas como curvas horizontales, rectas, etc.

Identificar el tipo de carretera permitiría calcular la velocidad adecuada para cada tramo, lo que redundaría en una mayor seguridad vial. En [2], los autores, a partir de modelos tradicionales de cálculo de velocidad y mediante medidas obtenidas de la característica de la vía, generan mapas de velocidad segura para circulación de vehículos para aviso o alerta al conductor.

En la literatura científica no se encuentra un sistema basado en técnicas de inteligencia artificial que determine la velocidad de circulación para un vehículo a partir de la geometría de la carretera sin aplicar información secundaria (GPS, señalización lateral de carretera).

1.3. Objetivos

El objetivo de este trabajo consiste en encontrar un algoritmo para el cálculo de la velocidad recomendada a la que debe circular un vehículo según el tipo estimado de carretera. El trabajo está enfocado desde el punto de vista de la geometría de la vía, de cómo percibimos las dimensiones de la calzada y arcenes de una carretera convencional (distinta a las carreteras del entorno urbano, autopistas o autovías). El uso de técnicas de Soft Computing y, concretamente, de la Lógica Borrosa queda justificado porque la información de entrada se encuentra solapada para diferentes tipos de carreteras. Además esta técnica proporciona un medio eficaz para representar incertidumbre y ambigüedad. Los objetivos específicos de este trabajo son:

1. Identificar las características que contengan información más relevante de la geometría de la carretera.
2. Desarrollar sistemas de identificación para tipos de carreteras basados en técnicas de lógica difusa.
3. Clasificar tipos de carretera convencionales (Tipo 1, Tipo 2 y Tipo 3) y evaluar el funcionamiento de los diferentes algoritmos para la clasificación.
4. Desarrollar y aplicar el sistema recomendador de velocidad teniendo en cuenta las características de la geometría de una carretera.

La aplicación de técnicas de inteligencia artificial para identificación en este ámbito de carreteras es algo novedoso que no se encuentra en la literatura científica. También se genera a partir de ellas una velocidad de referencia para recomendar al conductor de un vehículo durante la circulación por carreteras convencionales.

1.4. Estructura del trabajo.

Este trabajo se divide en seis capítulos, comenzando con esta introducción como capítulo primero.

En el capítulo 2 se hace un estudio del estado de arte de las diferentes técnicas de identificación de Soft Computing en general y de la lógica borrosa en particular.

En el capítulo 3 se estudian las características básicas de la geometría de una carretera.

En el capítulo 4 se propone un sistema de identificación para carreteras convencionales y se implementa con distintas aproximaciones basadas en la lógica difusa y redes neuronales. Se analizan los resultados obtenidos.

En el capítulo 5 se propone un sistema de recomendación de velocidad para carreteras convencionales y se implementa con lógica difusa. Se muestran los resultados obtenidos.

Finalmente en el capítulo 6 se exponen las conclusiones obtenidas y posibles trabajos futuros.

2. ESTADO DEL ARTE Y FUNDAMENTOS

En este capítulo se da brevemente una visión general sobre las técnicas de Soft Computing que van a ser aplicadas a carreteras y sobre los diferentes métodos de extracción de información de las características de las mismas.

2.1. Soft Computing

El término Soft Computing (SC) se acuñó en el BISC, California, (Berkeley Initiative in Soft Computing) durante los principios de los años ochenta. Corresponde a un conjunto de metodologías que proporcionan los fundamentos para el diseño, desarrollo y uso de sistemas inteligentes. Las principales técnicas que forman este conjunto son la Lógica Difusa, la Computación Evolutiva y las Redes Neuronales. Este conjunto de estrategias permiten modelar problemas complejos y obtienen soluciones más sencillas de aplicar en el mundo real que con técnicas convencionales. El SC permite trabajar con información aproximada, con incertidumbre, y en algunos casos poco precisa, imitando el razonamiento impreciso humano.

Estas técnicas son complementarias entre sí, de manera que una combinación de varias de ellas permite resolver problemas de forma más eficaz y con más flexibilidad que usando éstas por separado.

2.1.1. Sistema de lógica fuzzy

La lógica borrosa (Fuzzy Logic, FL) es una técnica que permite incorporar un grado de incertidumbre o imprecisión a la información que se evalúa en un determinado problema, de manera semejante al razonamiento humano. La lógica borrosa la inició L.A. Zadeh [3] y trata de imitar el pensamiento impreciso humano. Está extendido el uso de la lógica difusa en los campos del modelado y control de sistemas dinámicos ya que estos suelen tener un comportamiento no lineal o un grado de incertidumbre alto. Un sistema modelado con técnicas borrosas combinado con otro tipo de técnicas de Soft Computing consigue desarrollos efectivos en resolución de problemas complejos.

La lógica difusa es una lógica multivaluada que extiende la lógica clásica. La lógica clásica asigna únicamente valores de falso o verdadero (binario) y el razonamiento humano utiliza valores de verdad que casi siempre son diferentes a los binarios. Los valores tienen una connotación de incertidumbre o ambigüedad. La lógica borrosa se basa en los conjuntos difusos. En un conjunto difuso a cada elemento del universo se le asocia un grado de pertenencia al conjunto, en el intervalo [0,1]. En esto difieren de los conjuntos clásicos ya que la función de pertenencia en estos sólo puede tener dos valores, 1 ó 0.

Un sistema difuso usa reglas lógicas “si *x* entonces *y*” para establecer relaciones cualitativas entre las variables del sistema. Los sistemas borrosos integran información de diferentes fuentes tales como sistemas empíricos o heurísticos [4]. Al enunciar reglas se permite el uso de información expresada tal y como se hace en lenguaje natural, lo que hace que los sistemas generados sean interpretables. Emplea un mapeo no lineal de un vector de datos de entrada con una salida escalar haciendo uso de datos numéricos y conceptos lingüísticos, simultáneamente. Un sistema borroso tiene una estructura matemática flexible que permite aproximar sistemas no lineales complejos con un alto grado de precisión.

Una aproximación muy interesante es la combinación de lógica borrosa con redes neuronales. La sinergia de ambas técnicas permite la construcción de sistemas borrosos a partir de datos numéricos.

Los modelos neuro-borrosos tienen como desventaja la pérdida de la interpretabilidad, comportándose como sistemas de caja negra, lo que no proporciona ayuda para la comprensión del proceso, pero son útiles y eficaces.

Una aplicación importante del razonamiento difuso se ha dado en el ámbito del control (FLC, Fuzzy Logic Control). Los sistemas de control basados en lógica difusa se han utilizado con éxito en un amplio espectro de problemas, como el control de temperatura, robots, intersecciones de tráfico, control de velocidad de vehículos, sistemas de energía, etc [5]. También se usan modelos borrosos para identificación de sistemas, estimando una función haciendo uso de las entradas y salidas del mismo. Los autores en [6] establecieron que una función continua no lineal puede aproximarse con un conjunto finito de variables, valores y reglas borrosas. Así de esta forma se pueden diseñar sistemas borrosos adaptados a sistemas no lineales. En la Figura 3 se muestra la estructura de un sistema basado en lógica borrosa.

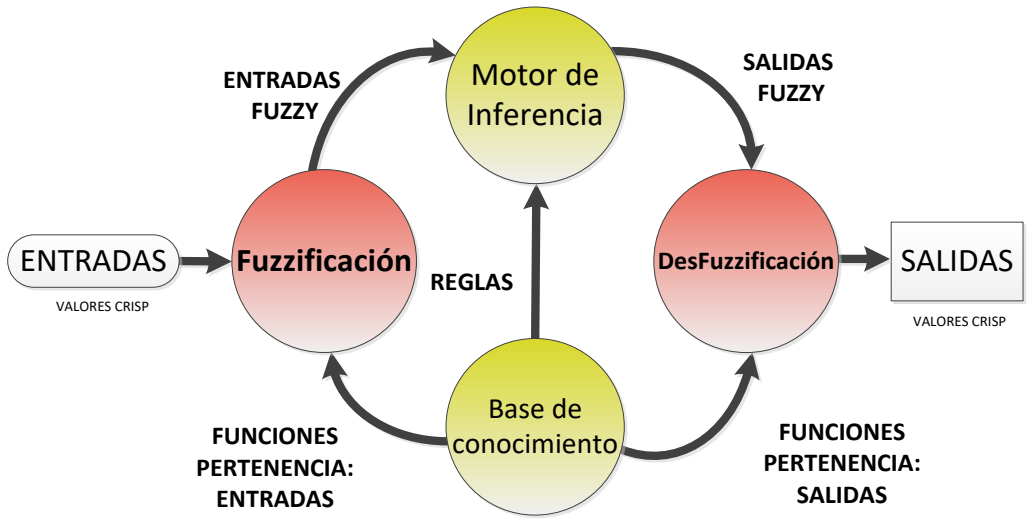


Figura 3: Estructura de un sistema de lógica borrosa.

Existen tres tipos de sistemas difusos que se diferencian básicamente por el consecuente de las reglas. El primero es el llamado tipo Mamdani. Los consecuentes de las reglas son conjuntos borrosos. La estructura de las reglas para este modelo es:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y}\ldots \text{ y } X_n \text{ es } A_n \text{ entonces U es } U_i$$

Mediante un operador de agregación se obtiene un conjunto difuso final que luego es transformado a un valor concreto mediante la defusificación.

El segundo es denominado tipo Tsukamoto, y se caracteriza porque los consecuentes de las reglas son funciones monótonamente crecientes o decrecientes que depende del nivel de activación de la regla. El conjunto difuso de salida es una función del valor de activación α de las reglas. La estructura de las reglas de este modelo es:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y}\ldots \text{ y } X_n \text{ es } A_n \text{ entonces U es } F(\alpha)$$

La salida final del tipo Tsukamoto se calcula como el promedio ponderado de la salida de cada regla.

El tercero es denominado Takagi-Sugeno-Kang (T-S-K), en el que el consecuente de cada regla es una combinación lineal de las variables de entrada más un término constante. La estructura de las reglas de este modelo es:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y} \ldots \text{ y } X_n \text{ es } A_n \text{ entonces U es } F(X_1, \ldots, X_n)$$

Los antecedentes de las reglas son conjuntos difusos y el consecuente de la regla es una función lineal de las entradas $F(X_1, \ldots, X_n) = a_0 + a_1 X_1 +, \ldots , +a_n X_n$, siendo F una función polinómica. Cuando F es una constante los consecuentes de las reglas son conjuntos difusos de tipo "singleton" y es equivalente al modelo Mamdani utilizando consecuentes no difusos. La salida final es el promedio ponderado de la salida de cada regla.

En este trabajo se utilizan sistema borrosos tipo Mamdani.

2.1.2. Sistema neuro-borroso

Un sistema de inferencia neuro-difuso adaptativo o sistema de inferencia difusa basado en red adaptativa (ANFIS) es un tipo de red neuronal artificial que se basa en el sistema de inferencia difusa Takagi-Sugeno. La técnica se desarrolló a principios de la década de 1990 [7], [8], [9]. Un sistema de este tipo integra redes neuronales y principios de lógica difusa, con potencial para explotar los beneficios de ambos. Su sistema de inferencia corresponde a un conjunto de reglas difusas IF – THEN que tienen capacidad de aprendizaje para aproximar funciones no lineales [9]. Por eso, ANFIS es considerado como un estimador universal [6]. ANFIS se caracteriza por incorporar en un mismo sistema el conocimiento de un experto formado a partir de reglas heurísticas y el conocimiento que está oculto en los datos que obtiene a través de un proceso de aprendizaje.

ANFIS ha sido ampliamente empleado por la comunidad de científicos de los sistemas difusos y los sistemas neuronales. El primer modelo de ANFIS [8] y otros modelos similares han sido usados para problemas relacionados con el control [11], [12], procesamiento de señal [13], [14], [15], para predicciones de mercado [16], etc. Un sistema ANFIS se puede utilizar de una manera eficiente si se optimizan algunos de sus parámetros mediante el uso de algoritmos genéticos [17], [18].

Las redes adaptativas tienen una estructura compuesta de varias capas de nodos conectados a través de enlaces, donde cada nodo es una unidad de procesamiento que desempeña una función sobre la entrada recibida para generar una salida [10].

Los parámetros de la red se determinan en base a los datos de entrada que son usados como datos de entrenamiento dentro del proceso de aprendizaje; de esta forma se obtiene una relación entre los datos de entrada y salida. Como en una red neuronal artificial, el sistema ANFIS adapta sus nodos y conexiones entre ellos automáticamente. ANFIS hace una partición del espacio de entrada a través de los conjuntos borrosos de cada variable. La regla básica de aprendizaje de las redes adaptivas se basa en un proceso de optimización generalmente del tipo de gradiente descendente y la regla de la cadena.

La Figura 4 representa una arquitectura ANFIS de dos entradas, cada una con dos funciones de pertenencia, formando un total de cuatro reglas difusas [19]. Una ventaja de usar las redes ANFIS radica en que se pueden construir sistemas a partir de pares de datos entrada/salida, reduciendo considerablemente el tiempo de modelado y los requisitos de los conocimientos de expertos. En el caso de dos entradas (x, y), ANFIS tiene predefinida la siguiente topología:

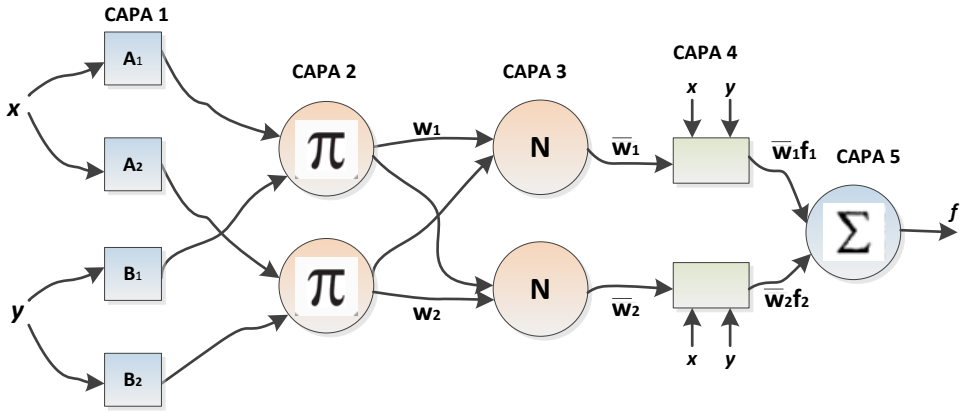


Figura 4: Arquitectura de una red ANFIS con dos entradas.

Es importante aclarar que, en el campo de las aplicaciones de los sistemas de redes neuronales, resulta importante la trasformación y manipulación, bien sea algebraica o estadística, de los datos de entrada. Este enfoque de pre-procesamiento de datos incluye la transformación y normalización con métodos tradicionales. En el caso de los sistemas de inferencia difusos esto es opcional ya que las características de las funciones de pertenencia permiten utilizar datos convencionales o concretos.

2.1.3. Clustering difuso

El agrupamiento difuso, Fuzzy c-means (FCM), es un método de agrupación en clústers que permite que cada dato pertenezca a múltiples agrupaciones con distintos grados de pertenencia. El FCM está basado en la minimización de la siguiente función objetivo [20]:

$$J_m = \sum_{j=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} u_{ij}^m \| x_i - c_j \|^2 \quad (1)$$

Donde:

- D es el número de puntos de datos.
- N es el número de grupos.
- *m* es el exponente de la matriz de partición difusa para controlar el grado de superposición difusa, con *m> 1*. La superposición difusa se refiere a la cantidad de puntos de datos que tienen una pertenencia significativa en más de una agrupación.
- x_i es el punto *i* de datos.
- c_j es el centro del grupo j_{th}.
- μ_{ij} es el grado de pertenencía de x_i al grupo j_{th}. Para un dato determinado, x_i, la suma de los valores de pertenencia para todos los grupos es uno.

Este algoritmo surge de la necesidad de resolver la deficiencia que supone considerar que cada elemento se puede agrupar de forma inequívoca en un sólo clúster y no es similar a ningún otro grupo. Esto también es denominado *hard clustering*. Tras la introducción de la lógica borrosa por Zadeh en 1965, surgió como alternativa el clustering difuso, caracterizando la similitud de cada elemento a cada uno de los grupos [20]. Esta idea se logra mediante la representación del grado de similitud de un elemento a un grupo por medio de una función de pertenencia. Esta función toma valores entre 0 y 1,

donde los más cercanos a cero indican menor similitud y los más cercanos a 1 mayor similitud. Los algoritmos de agrupamiento borroso se han utilizado ampliamente en diferentes áreas como el procesamiento de imágenes, etc.

Para llevar a cabo el algoritmo se realiza una partición caracterizada por la participación de cada muestra de entrada en todos los grupos utilizando una función de pertenencia. Para cada muestra la suma de las particiones en cada grupo es uno.

2.1.3.1 Algoritmo Fuzzy c-Means.

Dentro del clustering difuso, los algoritmos Fuzzy c-Means se utilizan para el agrupamiento difuso y se encuentran dentro del grupo de los que pertenecen a los algoritmos basados en funciones objetivo [21]. Estos definen un criterio de agrupamiento por medio de una función objetivo que depende de la partición difusa. Consiste en minimizar esta función hasta encontrar una partición difusa óptima.

2.1.3.2 Algoritmo Possibilistic c-Means.

Los algoritmos Possibilistic c-Means aparecen para resolver el comportamiento anómalo de los Fuzzy c-Means cuando se usan con mucho ruido [22]. Se caracterizan por interpretar los valores de la función de pertenencia u_{ij} como grados de compatibilidad. Para ello, sólo se exige la restricción de que exista una partición difusa con un grado de pertenencia positivo, al contrario que en el algoritmo Fuzzy c-Means, que exige que la suma de los grados de pertenencia de cada elemento hacia cada grupo sea uno.

Actualmente se trabaja para ampliar el alcance del algoritmo FCM en base a no hacer cambios en la función de pertenencia, el establecimiento de un número óptimo de clusters, etc.

En este trabajo, el algoritmo implementado es FCM. Para ello se utiliza la Fuzzy Logic Toolbox y Data Clustering de Matlab. Los pasos básicos del algoritmo FCM son los siguientes:

(1) Inicializar los valores de pertenencia al clúster**,** μ_{ij}**.**

(2) Calcular el centroide de los agrupamientos.

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^{N}(u_{ij}^m x_i)}{\sum_{i=1}^{N} u_{ij}^m}$$

(3) Actualizar la función pertenencia borrosa en base a la distancia entre el centro del agrupamiento y cada muestra.

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{C}\left(\frac{x_i - c_j}{x_i - c_k}\right)^{\frac{2}{m-1}}}$$

(4) Calcular la función objetivo J_m

$$J_m = \sum_{j=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} u_{ij}^m \| x_i - c_j \|^2$$

(5) Repetir los pasos 2-4 hasta que se alcance un criterio de parada:

- Nº máximo de iteraciones

- El valor de J_m esté por debajo de umbral mínimo especificado.

Una aplicación importante del algoritmo FCM es la segmentación de imágenes y extracción de características. La naturaleza dinámica del algoritmo FCM seguirá desempeñando un papel importante en distintos campos de investigación.

2.2. Extracción de información de carreteras

La extracción de información de carreteras es uno de los objetivos más importantes de la cartografía automática. Existen algunos trabajos que han sido publicados sobre este tema [23], [24].

En lo que respecta a la extracción de información a partir de imágenes de carreteras, se tienen dos tareas principales: identificación de las carreteras dentro de una imagen, lo que implica la interpretación de imágenes y clasificación de elementos, y el rastreo de los caminos para determinar con precisión su contorno o línea central. En [25] se presenta un algoritmo de extracción de carreteras mediante la comparación con plantillas. En [23], [24], [26], [27] se presentan algunos métodos automáticos utilizados para extracción de información a partir de imágenes de carreteras.

En los métodos de extracción de carreteras convencionales, las características de los vectores de entrada son cuantitativos (es decir, numéricos) por naturaleza. Los vectores que tienen especificación imprecisa o incompleta son generalmente ignorados o descartados, como suele ocurrir en la extracción de información a partir de una imagen.

Desde el punto de vista de técnicas de Soft Computing, en [28] se presenta una red neuronal perceptrón multicapa que utiliza varias características de una imagen aérea para la detección de carreteras.

En [23] los autores utilizan la teoría fuzzy para la identificación de las carreteras a partir de imágenes del satélite Ikonos, un satélite comercial dedicado a recoger imágenes con disponibilidad pública. En [29] se describe un algoritmo de detección de carreteras utilizando técnicas borrosas a partir de imágenes de satélite para sistemas de información geográfica. En [30] los autores utilizan redes neuronales, análisis de imágenes, clustering difuso y algoritmos genéticos para detección de carretera a partir de imágenes del satélite Ikonos.

En algunos casos, el coste de extraer un valor exacto de una característica puede ser alto o puede ser difícil decidir sobre las características más relevantes al ser extraída. Por estas razones, puede ser conveniente utilizar variables lingüísticas (por ejemplo, pequeño, medio, grande) con el fin de describir la información de la característica. Por lo tanto, es razonable representar la información de las características con incertidumbre mediante conjuntos difusos. Por estas razones, el método de este trabajo se han utilizado variables lingüísticas para describir algunas de las características de la geometría de la carretera.

En la literatura científica no existen sistemas o metodologías de extracción de información con técnicas inteligentes con el objeto de clasificar tipos de carretera en función de un uso concreto, es decir, clasificar carreteras desde el punto de vista de la velocidad a la que se circula por ellas y el uso a la que están destinadas (carreteras interurbanas, carreteras de accesibilidad, etc), como es el caso de las autopistas o carreteras convencionales. En este trabajo se pretende encontrar una forma de clasificación para carreteras convencionales (grupo 3, [1]) haciendo uso de técnicas inteligentes.

Tampoco existen trabajos con un enfoque para cálculo de velocidad segura de circulación para tramos particulares de carretera a partir de la identificación del tipo de carretera. No hay ninguna propuesta sobre el cálculo de esta velocidad para un vehículo o vehículo autónomo que genere una referencia y actúe sobre el propio sistema de control del vehículo (control de crucero, etc.). Actualmente se encuentran trabajos en los que la velocidad segura de circulación se obtiene mediante GPS o sistemas de visión artificial.

En [31], los autores describen un método de predicción de velocidad con un sistema de control predictivo basado métodos autorregresivos con GPS/GIS. En [32] se describe el uso de redes neuronales y en [33] métodos estadísticos y métodos basados en GPS/GIS. En [34] se utiliza un sistema para el reconocimiento de carril mediante láser (LIDAR).

Algunos trabajos sobre el control de velocidad de vehículos utilizan características geométricas de la carretera, en concreto, el radio de curvatura, el peralte y la pendiente. Por ejemplo, en [35] se realiza un estudio de las variables de la geometría de la carretera para control de crucero adaptativo. En este caso las características geométricas son el radio de curvatura y la pendiente. En [36] los autores registran una patente para control de velocidad basándose en un sistema GPS/MAP adaptando la velocidad del vehículo con su correspondencia a las señales de indicación. En [37] los autores usan características geométricas (radio y pendiente) e información vía GPS sobre límites de velocidad para aplicar a un control de crucero de velocidad adaptativo. Pero en estos artículos las variables no son fuzzy, y el objetivo es el control del vehículo.

3. DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRIA DE LA CARRETERA

En este capítulo se detallan de forma breve los conceptos más importantes relacionados con la geometría de una carretera. Estos conceptos son los establecidos en la normativa vigente hasta la fecha en España [1].

3.1. Conceptos generales y grupos de carreteras

Es muy deseable una homogeneidad de las características geométricas de las carreteras, tal que induzca al conductor a circular sin excesivas fluctuaciones de velocidad, en condiciones de comodidad y seguridad. Para ello se evitarán los puntos en que las características geométricas obliguen a disminuir bruscamente la velocidad y se facilitará la percepción de las variaciones necesarias de velocidad mediante cambios progresivos de los parámetros geométricos con la ayuda de la señalización.

Las carreteras o sus tramos se denominarán con una letra seguida de un número. La letra será A para las autopistas y autovías, y C para las carreteras convencionales y las carreteras multicarril. El valor numérico indica la velocidad de proyecto (*Vp*), expresada en kilómetros por hora (km/h), con independencia de la velocidad máxima permitida por la reglamentación [1]. Se considerarán las siguientes denominaciones:

A-140, A-130, A-120, A-110, A-100, A-90, A-80
C-100, C-90, C-80, C-70, C-60, C-50, C-40

Se establecen los siguientes Grupos:

- Grupo 1: Autopistas y autovías A-140 y A-130.
- Grupo 2: Autopistas y autovías A-120, A-110, A-100, A-90 y A-80 y carreteras C-100.
- Grupo 3: Carreteras C-90, C-80, C-70, C-60, C-50 y C-40.

Las definiciones de autopista, autovía, carretera multicarril y carretera convencional, se incluyen en el Glosario de términos y se resumen en la Tabla 1.

AUTOPISTA	AUTOVÍA	MULTICARRIL	CONVENCIONAL
-Cada sentido de circulación tiene como mínimo una calzada con dos carriles. -Cada calzada está separada entre sí por una franja no destinada a circulación. -Los cruces con cualquier otra vía será a distinto nivel. -Las propiedades colindantes y las vías de servicio no tienen acceso directo a la autopista. -Circulación exclusiva de automóviles.	-Cada sentido de circulación tiene como mínimo una calzada con dos carriles. -Cada calzada está separada entre sí por una franja no destinada a circulación. -Los cruces con cualquier otra vía serán a distinto nivel. -Acceso limitado. Las propiedades colindantes no tienen acceso directo a la autovía. -Circulación de vehículos a motor.	-Cada sentido de circulación tiene como mínimo una calzada con dos carriles. -Cada calzada está separada entre sí por una franja no destinada a circulación. -Los cruces con cualquier otra vía pueden ser al mismo nivel. -Acceso limitado. Las propiedades colindantes no tienen acceso directo a la autovía. -Circulación de vehículos a motor.	Este tipo de carretera no reúne las características de las anteriores

Tabla 1. Clases de carreteras.

La normativa que regula el trazado geométrico de este tipo de carreteras se puede consultar en [1].

En este trabajo, se van a estudiar carreteras del Grupo 3 y la C-100 del Grupo 2 ya que se considera carretera convencional. Según la clasificación de las carreteras convencionales su correspondiente asignación a tipos se muestra en la Tabla 2:

Tramo	Carretera	Grupo	Tipo
Interurbano	C-100	Grupo 2	Tipo 1
	C-90	Grupo 3	Tipo 1
Periurbano	C-80	Grupo 3	Tipo 3
	C-70	Grupo 3	Tipo 3
	C-60	Grupo 3	Tipo 3
Accesibilidad	C-50	Grupo 3	Tipo 2
	C-40	Grupo 3	Tipo 2
Urbano	C-50	Grupo 3	Tipo 4
	C-40	Grupo 3	Tipo 4

Tabla 2. Tipos de carreteras y su correspondencia con carreteras convencionales.

La Tabla 2 muestra la correspondencia entre los tipos de carretera tratados en este trabajo y las carreteras convencionales según la normativa vigente. La letra mayúscula C indica que se trata de carretera convencional y está acompañada por la velocidad de proyecto de un determinado tramo. Por ejemplo, C-90, carretera convencional con velocidad de proyecto a 90 km/h.



Figura 5. Carretera de accesibilidad y periurbana M-852 (dos tipos de tramos distintos).

Como la Tabla 2 indica, los tipos de carretera se muestran solapados entre todas las carreteras convencionales desde la C-100 a C-40. Se puede ver que una misma carretera, por ejemplo C-50, puede ser de dos tipos, 2 y 4. En la Figura 5, se muestra la carretera M-852 considerada de dos tipos, tipo 2 (accesibilidad) y 3 (periurbano) según el punto kilométrico. Debido a estos solapamientos se va a trabajar con tramos de carretera para identificar cada uno de los tipos.

3.2. Velocidad de operación

El trazado de una carretera define la relación de la velocidad estimada a la que los vehículos circularán en condiciones de comodidad y seguridad [1]. Se evalúa la distribución de velocidades en cada sección, considerando fijos los factores que inciden en la carretera que estén relacionados con la clase de carretera y con la limitación genérica de velocidad asociada a la misma, y con las características de las secciones adyacentes. Existen según la norma [1] los siguientes tipos:

- Velocidad específica de una curva circular (Ve): Velocidad que puede mantener un vehículo a lo largo de una curva circular considerada aisladamente, en condiciones de comodidad y seguridad, cuando se encuentra el pavimento húmedo y los neumáticos en buen estado, sin imposición de ninguna otra limitación derivada por una circunstancia particular.
- Velocidad de proyecto de un tramo (Vp): Velocidad para la que se definen las características geométricas del trazado de un tramo de carretera en condiciones de comodidad y seguridad.
- Velocidad de recorrido de un tramo (Vr): Media armónica ponderada de las velocidades de recorrido de sub-tramos homogéneos.

$$V_r = \frac{\sum l_k}{\sum (\frac{l_k}{V_{rk}})} \tag{5}$$

Siendo l_k la longitud del subtramo k, y V_{rk} la velocidad de recorrido de un subtramo k, que se calcula como el cociente entre su longitud y el tiempo medio de recorrido de todos los vehículos que circulan por dicho subtramo, incluyendo los tiempos de demora debidos a detenciones o paradas.

Considerando que en un subtramo homogéneo la velocidad se considera constante:

- Velocidad libre (Vl): Velocidad a la que puede circular un vehículo ligero sin más condicionantes que las características de la carretera y el límite establecido por la regulación legal vigente.
- Velocidad operativa característica de un elemento (V85), representada por el percentil ochenta y cinco de la distribución de velocidades libres temporales de vehículos ligeros observadas en servicio.

Las velocidades de proyecto y de recorrido están, en general, definidas en función de los siguientes factores:

- Condiciones topográficas y del entorno.
- Características ambientales.
- Consideración de la función de la vía dentro del sistema de transporte por carretera.
- Homogeneidad del itinerario.

- Condiciones económicas.
- Distancias entre conexiones o accesos y sus tipologías.

La clasificación anterior en grupos se basa en el concepto de velocidad de proyecto. Las definiciones de las diferentes velocidades que permiten caracterizar una carretera son las que se muestran en la Tabla 2. Las carreteras C-100 y C-90, que son de velocidades altas, quedan englobadas en el tipo 1, las carreteras C-50 y C-40, que son de velocidades bajas, son de tipo2. Por último, las carreteras C-80, C-70 y C-60, que son de velocidades intermedias entre los tipos 1 y 2, serán etiquetadas como tipo 3.

3.3. Especificaciones de una carretera

Se distinguen las siguientes clases de carreteras, determinadas por distintos puntos de vista: independencia de sus calzadas, grado de control de sus accesos, condiciones orográficas, entorno urbanístico, funcionalidad viaria, o carreteras con calzada única. A continuación se detalla de forma breve lo que indica la norma [1].

Independencia de sus calzadas:

- Carretera de calzadas separadas: Tiene calzadas diferenciadas para cada sentido de circulación, con una separación física entre ambas. Puede tener más de una calzada para cada sentido de circulación.
- Carretera de calzada única: Tiene una calzada para ambos sentidos de circulación, generalmente sin separación física. Puede tener, excepcionalmente, un sentido de circulación.

Grado de control de accesos:

- Sin accesos directos: Aquella carretera en la que las entradas o salidas se realizan exclusivamente a través de nudos.
- Con accesos directos limitados: Aquella carretera en la que las entradas o salidas se pueden establecer a través de nudos o a través de vías de servicio con conexiones específicas.
- Con accesos directos: Aquella carretera en la que no existen las limitaciones establecidas en los dos párrafos anteriores.

Condiciones orográficas:

Se tipificarán las carreteras según el tipo de relieve del terreno natural atravesado (Tabla 3), en función de la inclinación media (it) de la línea de máxima pendiente en valor absoluto, correspondiente a la franja original de dicho terreno interceptada por la explanación de la carretera.

TIPO DE RELIEVE	INCLINACIÓN MEDIA IT(%)
llano	$it \leq 5$
ondulado	$5 \leq it \leq 15$
accidentado	$15 \leq it \leq 25$
muy accidentado	$25 < it$

Tabla 3. Tipo de relieve del terreno natural.

Condiciones del entorno urbanístico:

- Carretera interurbana.
- Tramo periurbano de carretera (o carretera periurbana).
- Tramo urbano de carretera (o carretera urbana).

Funcionalidad del sistema viario:

- Carretera de calzadas separadas.
    - Autopista.
    - Autovía.
    - Carretera multicarril.
- Carretera de calzada única:
    - Carretera convencional.
    - Otros tipos:
        - Carretera de sentido único de circulación.
        - Vía colectora – distribuidora.
        - Vía lateral (también denominada calzada lateral).
        - Ramal.
        - Vía de giro.
        - Vía de servicio.

3.4.Parámetros geométricos de una carretera

Las carreteras están definidas por características geométricas que determinan que un vehículo pueda circular a distinta velocidad con un grado de comodidad y seguridad adecuado. El trazado de una carretera define cómo es la forma y el recorrido de la misma. Cuanto mayor sean las dimensiones de una carretera, más tráfico soportará y también más exigentes serán los parámetros para su trazado, es decir, el trazado se conformará con radios mayores para curvas, peralte más inclinado, etc. El eje de la vía está compuesto por formas geométricas entrelazadas denominadas alineaciones.

Entre las diferentes características de una carretera encontramos fundamentalmente alineaciones rectas, aleaciones curvas y curvas de transición. Estas están compuestas por tramos de carreteras rectos y otros circulares. Una alineación recta está caracterizada por la ausencia de curvas; en este caso se posibilita que en estos tramos un vehículo pueda desarrollar su máxima velocidad. Por otro lado, una alineación curva está constituida por curvas circulares, que tienen como misión enlazar tramos rectos evitando quiebros bruscos sobre el trazado de la vía. En este caso el vehículo está obligado a efectuar maniobras de giro. Por último, las curvas de transición tienen como función enlazar las dos alineaciones anteriores. Hacen que se produzca una variación gradual de una curva a lo largo de su longitud, que hace una transición más suave entre alineaciones. En el diseño geométrico de carreteras como curva de transición se emplea la clotoide o espiral de Cornu [1].

La clotoide es una curva tangente al eje de abscisas en el origen y cuyo radio de curvatura disminuye de manera inversamente proporcional a la distancia recorrida sobre ella. En el punto de origen de la curva el radio es infinitivo. La clotoide viene dada por la siguiente expresión:

$$\rho \times s = C^2 \tag{6}$$

Donde *p* es el radio de curvatura, *s* el arco, *C* la constante de la espiral. El clotoide que se emplea en el diseño de una carretera viene dado en función del tipo de carretera y del radio de entrada y salida de la clotoide.

Para neutralizar la fuerza centrífuga que aparece en los tramos de alineaciones curvos, se dota a la carretera de peralte, que es la inclinación transversal de la vía que hace que uno de los arcenes quede más alto que el otro. Se define **peralte** como la inclinación transversal de una vía en sus curvas. El peralte viene dado por la siguiente expresión:

$$V^2 = 127R(f_t + \frac{\rho}{100}) \tag{7}$$

Donde la *V* es la velocidad de proyecto en km/h, *R* el radio en metros, f_t el coeficiente de rozamiento y ρ la inclinación del peralte en %. Por seguridad, el peralte está limitado según la norma de aplicación de cada país. En España el peralte está limitado al 8% en autopistas y al 7% en carreteras con una calzada [1].

Por ejemplo, la Figura 6 representa los datos de geometría de la carretera convencional M-519 que es de tipo interurbana (velocidades altas). En la parte superior, el peralte (º). En la imagen del medio se muestra la pendiente (%), y en la inferior el radio de curvatura (dm).

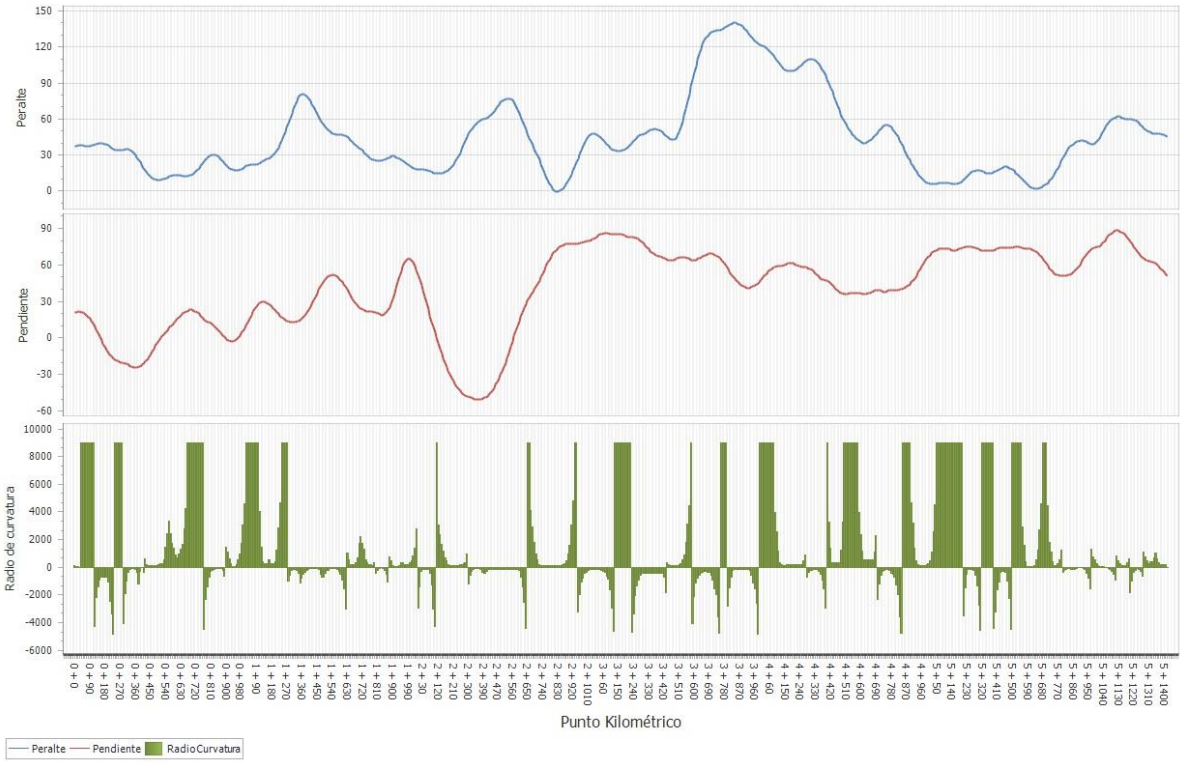


Figura 6. Algunas características geométricas de la carretera M-519.

En el Anexo I se muestra, a modo de ejemplo, los datos disponibles del informe de cartografía sobre una carretera junto a algunos de los resultados obtenidos en este trabajo.

Una curva se descompone en pequeños arcos de circunferencia. El radio de curvatura en cada punto es el radio de estos arcos. Los radios de curvatura aumentan o disminuyen gradualmente para hacer la transición a rectas y, a otras curvas más suave. El radio se relaciona con el peralte con el criterio que indica la norma [1] y se muestran en la Tabla 4 y la Tabla 5.

250 < R < 700	**P = 8**
700 < R < 5000	$p = 8 - 7{,}3(1-700/R)^{1,3}$
5000 < R < 7500	p = 2
7500 < R	Bombeo

Tabla 4. Peraltes para carreteras autopistas, autovías, vías rápidas y carreteras C-100.

50 < R < 350	**p = 7**
350 < R < 2500	$p = 7 - 6{,}08(1-350/R)^{1,3}$
2500 < R < 3500	p = 2
3500 < R	Bombeo

Tabla 5. Peraltes para carreteras C-80, C-60 y C-40.

Siendo *R* el radio de la curva circular (m) y *p* el peralte (%).

La pendiente de una carretera indica la inclinación de la superficie de una carretera con relación a la horizontal. El valor del ángulo que forma el plano de la carretera y la horizontal es la pendiente. La pendiente de un tramo de carretera se expresa con el valor en %, que indica el desnivel entre dos puntos cuya distancia medida horizontalmente es de 100 metros. Este valor se corresponde a la tangente trigonométrica del ángulo que forman el plano de la carretera con el plano horizontal.

Una carretera está compuesta desde el punto de vista constructivo de las siguientes partes: una calzada que está formada por uno o varios carriles (lugar por donde circula un vehículo) y los arcenes.

Se define el **ancho de plataforma** como la suma de las dimensiones (anchura) de los arcenes derecho e izquierdo y la calzada. La **calzada** es la parte de la carretera destinada a la circulación de vehículos y que se compone de cierto número de carriles. La zona exterior de la calzada se denomina **arcén** o acera (si la carretera está en entorno urbano). Los **arcenes** no pertenecen a la calzada y por ellos no pueden circular vehículos en condiciones normales. En las autopistas y autovías hay una o más calzadas que quedan separadas por medianas. La Figura 7 muestra las distintas características básicas de una carretera.



Figura 7. Partes de un carretera (www.vialtest.com).

3.5. Tramos de una carretera

Se denomina **tramo** a cualquier porción de una carretera comprendida entre dos secciones transversales cualesquiera, con determinadas características de trazado homogéneas. Se denomina **tramo de proyecto** a cada una de las partes en las que se divide un itinerario, a efectos de redacción de proyectos. En general, los extremos del tramo de proyecto coinciden o están próximos a puntos singulares, tales como intersecciones, enlaces, cambios en el medio atravesado, ya sean de carácter topográfico o de utilización del suelo. Un tramo de proyecto podrá incluir diversos tramos con diferentes velocidades de proyecto (*Vp*) en función de la clase de carretera o de las características del trazado.

Los tramos urbanos y periurbanos de cualquier clase de carretera están definidos de la siguiente forma:

- Tramo urbano de una carretera o carretera urbana es aquel cuya zona de dominio público es colindante, por ambas márgenes, con suelos clasificados como urbanizados (Real Decreto Legislativo 2/2008, de 20 de junio).
- Tramo periurbano de una carretera o carretera periurbana es aquel cuya zona de dominio público es colindante por una margen con suelos clasificados como urbanizados (Real Decreto Legislativo 2/2008, de 20 de junio). También se consideran como tramos periurbanos los tramos de cuatro kilómetros anteriores y posteriores a un tramo urbano de la misma carretera cuando éste tenga una longitud superior a un kilómetro.

En este trabajo se trata diseñar un sistema de identificación de carreteras desde el punto de vista urbanístico, es decir, se trata de clasificar las carreteras convencionales dejando fuera del objetivo del trabajo los tramos urbanos (calles). Las carreteras convencionales que se tratarán de identificar incluyen:

- Carreteras interurbanas, corresponden a un Tipo 1.
- Carreteras de accesibilidad, corresponden a un Tipo 2.
- Carreteras periurbanas, corresponden a un Tipo 3.

4. IDENTIFICACIÓN DE CARRETERAS CONVENCIONALES

En este capítulo se aborda el problema de identificación de carreteras convencionales mediante el diseño de sistemas basados en técnicas de lógica difusa y redes neuronales. A continuación se exponen tres aproximaciones: un sistema difuso basado en reglas, un sistema neuro-difuso y un sistema de clustering difuso. Por último, se mostrarán los resultados obtenidos para cada caso. Para ello se ha utilizado el software MatlabR2018b y la toolbox Fuzzy Logic.

4.1. Carreteras convencionales y tramos

El trabajo se va a llevar a cabo con registros de datos de la geometría de las siguientes carreteras: M-607, M-519, M-852, M-618, M-305, M-509 y M-601. Las carreteras están asociadas a un tipo de tramo determinado, pudiendo cada tramo contener más de un tipo. La carretera M-607 está compuesto de un tramo tipo 1. La carretera M-519 está compuesta de un tramo tipo 1 (dudoso). La M-852 está compuesta por dos tramos, tipo 2 y 3. La M-618 está compuesto por dos tramos tipo 1 y 3. La carretera M-305 está compuesta de un tramo 3. La carretera M-509 está compuesta de un tramo tipo 1. La Tabla 6 muestra los tipos de tramo asociados a cada tramo de carretera analizada. Estos tramos de carretera están asignados a su tipo correspondiente mediante conocimiento experto.

CARRETERA BAJO ESTUDIO	FUNCIÓN DE LA CARRETERA Y TIPO	CARRETERA CONVENCIONAL	TIPO DE TRAMO	GRUPO
M-607	Movilidad, Interurbana	C-100	Tramo inicial: 1 Tramo final: 1	Grupo 2
M-519	Movilidad, Interurbana	C-100	Tramo inicial: 1 Tramo final: 1	Grupo 2
M-852	Accesibilidad y periurbana	C-80 y C-50	Tramo inicial: 2 Tramo final: 3	Grupo 3
M-618	Interurbana y periurbana	C-100 y C-80	Tramo inicial: 1 Tramo final: 3	Grupo 3
M-305	Movilidad, Periurbana	C-80	Tramo inicial: 3 Tramo final: 3	Grupo 3
M-509	Movilidad, Interurbana	C-100	Tramo inicial: 1 Tramo final: 1	Grupo 3
M-601	Movilidad, Periurbana	C-80	Tramo inicial: 3 Tramo final: 3	Grupo 3

Tabla 6. Tipos de tramo asociados a cada tramo de carretera analizado.

Cada registro de datos de carretera está compuesto por una matriz en la que cada fila representa un dato en forma de vector obtenido de la medición de la geometría de la carretera cada 10 metros, y así a lo largo varios kilómetros. Cada columna tiene la siguiente información: punto km, incremento de cada muestra, nº de carriles, nº carriles adicionales, ancho de la plataforma, ancho del arcén izquierdo, de la calzada, del arcén derecho, radio de curvatura, peralte y pendiente. La Tabla 7 presenta un ejemplo de los datos de entrada utilizados en este trabajo.

Comunidad de Madrid

CENTRO DE COORDINACIÓN E INFORMACIÓN
Dirección General de Carreteras
CONSEJERÍA DE TRANSPORTES, VIVIENDA E INFRAESTRUCTURAS

INFORME CARTOGRAFÍA

Zona: 7-Oeste **Tramo:** Tronco - M510_1 **P.K. Inicio:** 00 + 0000

Carretera: M-510 **P.K. Fin:** 06 + 0000

Datos de geometría:

Tramo	P.K. Hito	P.K. Dist	Carriles	Carriles ad.	Arcén izquierdo	Calzada	Arcén derecho	Radio curvatura	Peralte	Pendiente
Tronco - M607	32	0	2	1	8	69	17	9000	-23	38
Tronco - M607	32	10	2	1	8	69	17	9000	-24	39
Tronco - M607	32	20	2	1	8	69	17	9000	-24	40
Tronco - M607	32	30	2	1	8	69	17	9000	-25	42
Tronco - M607	32	40	2	0	8	69	17	9000	-26	43
Tronco - M607	32	50	2	0	8	69	17	9000	-27	45
Tronco - M607	32	60	2	0	8	69	17	9000	-28	46
Tronco - M607	32	70	2	0	8	69	17	9000	-28	47
Tronco - M607	32	80	2	0	8	69	17	9000	-29	48

Tabla 7. Ejemplo tabla de datos de entrada.

4.2. Variables del modelo

Las posibles variables que representan la geometría de la carretera son las siguientes:

- Arcén derecho e izquierdo.
- Calzada.
- Ancho de la plataforma (es función de arcenes y calzada, luego no se considera como variable independiente).
- Radio
- Peralte (en función del radio).
- Pendiente.

La salida será el tipo (interurbanas, periurbanas, accesibilidad) asociado a ese tramo de carretera.

La selección de las variables de entrada se determina mediante un análisis previo. Hay variables de la geometría de la carretera que miden parámetros que pueden discriminar o restringir información para el sistema de identificación. Según esto se pueden distinguir dos grupos de variables: de información y de restricción. Las variables de información indican la variabilidad de la propia carretera; las restricciones indican valores máximos y mínimos que debe tener determinada configuraciones “tipo” de carretera. Estas últimas no permiten discriminar el tipo de carretera en todos los casos.

Las variables que indican la variabilidad son los arcenes derecho e izquierdo y la calzada. Estas variables dan las dimensiones de las mismas, concretamente el valor de su anchura. En la Tabla 8 se muestran las métricas básicas para cada uno de los tramos de carretera analizados. Los valores de media y mediana (valor que más se repite en la serie de datos) serán tenidos en cuenta para diseñar las funciones de pertenencia del modelo borroso del sistema de identificación.

Tramo	MÉTRICA	ARCÉN IZQUIERDO (dm)	CALZADA (dm)	ARCÉN DERECHO (dm)
M-607	media	19.23	69.13	17.19
	desviación	7.50	8.44	2.84
	mediana	24	70	18
M-519	media	4.23	68.58	5.44
	desviación	5.93	13.55	9.22
	mediana	4	62	4
M-852	media	4.41	50.80	4.753
	desviación	6.50	14.60	5.81
	mediana	0	47	0
M-618	media	8.06	65.11	8.18
	desviación	7.62	7.09	5.58
	mediana	9	65	10
M-305	media	14.72	93.07	11.82
	desviación	1.90	15.00	0.56
	mediana	15	103	12
M-509	media	10.87	73.95	10.55
	desviación	6.25	15.93	5.42
	mediana	12	70	12
M-601	media	9.98	63.85	12.10
	desviación	3.60	13.43	14.31
	mediana	10	60	10

Tabla 8. Métricas básicas de los datos de la geometría de los tramos analizados.

Los valores de la anchura de los arcenes y la calzada aumentan, se mantienen o disminuyen a lo largo de la vía. En estas variaciones de su geometría se basa este trabajo. En la Tabla 9 se muestran el rango de valores para las características de entrada en decímetros, teniendo en cuenta que existen carreteras con un carril, dos carriles, dos carriles más un carril adicional, y cuatro carriles o tramo de carretera de accesibilidad.

Variable	Rango (dm)
Arcén izquierdo	0-65
Calzada	30-165
Arcén derecho	0-65

Tabla 9. Rango de variabilidad para la calzada y arcenes.

Por otro lado las variables de restricción son el radio de curvatura, la pendiente y el peralte. Indican las restricciones que tiene la vía construida para que un vehículo circule con seguridad y confort. En la Tabla 10 se muestra el radio mínimo y el peralte asociado cada carretera convencional según la

velocidad de proyecto. En la Tabla 11 se muestra los valores de pendiente que puede tener una vía según la velocidad de proyecto de dicha carretera.

La anchura del arcén derecho e izquierdo y de la calzada permite saber la anchura de la plataforma y cómo varía en diferentes configuraciones de tipos de carreteras. Como se indica, el ancho de la plataforma es la suma de la anchura del arcén derecho e izquierdo con la calzada, por lo que esta variable proporciona información redundante ya que es una combinación de las anteriores.

CARRETERA CONVENCIONAL	Velocidad de proyecto (Vp)(km/h)	RADIO MÍNIMO (m)	PERALTE MÁXIMO (%)
C-100	100	450	8
C-90	90	350	7
C-80	80	265	7
C-70	70	190	7
C-60	60	130	7
C-50	50	85	7
C-40	40	50	7

Tabla 10. Radio mínimo según velocidad de proyecto en carreteras convencionales.

CARRETERA CONVENCIONAL	Velocidad de proyecto (Vp)(km/h)	INCLINACIÓN MÁXIMA (%)	INCLINACIÓN EXCEPCIONAL (%)
C-100	100	4	5
C-90	90	5	7
C-80	80	5	7
C-70	70	6	8
C-60	60	6	8
C-50	50	7	10
C-40	40	7	10

Tabla 11. Pendiente máxima según velocidad de proyecto en carreteras convencionales.

El radio de curvatura, el peralte o la inclinación de la carretera no se puede usar para distinguir clases de carreteras ya que la velocidad de proyecto engloba a unas clases con otras. Por ejemplo, una carretera convencional de baja velocidad como la C-50 está construida con unos valores de radio e inclinación adecuados para una velocidad de 50 km/h, pero también pueden ser valores de radio y pendiente apropiados para carreteras de alta velocidad. Así una carretera C-40 puede tener una inclinación del 2% y un radio de curvatura de 350m debido a la orografía del terreno, sin embargo son valores de características de carreteras convencionales de alta velocidad.

En este trabajo se utilizan tres variables geométricas como entrada al sistema de identificación difuso, teniendo en cuenta que las restricciones no permiten distinguir por clase. Las entradas serán el arcén derecho, el izquierdo y la calzada.

La salida del sistema de identificación de carreteras convencionales es el Tipo, que tiene tres posibles valores: Tipo 1, 2 o 3. La Tabla 12 muestra la relación entre los tipos de carreteras tratados en este trabajo y, los asociados con carreteras convencionales. Como se observa, el Tipo 1 está asociado a carreteras interurbanas que pueden ser C-100, C-90, C-80, es decir, altas velocidades de proyecto para desplazamiento entre poblaciones. El tipo 2, asociado a C-50 y C-40, para tramos de carretera de accesibilidad en la que se circula a bajas velocidades. Por último el tipo 3, asociado a tramos de carretera

periurbana, donde la velocidad de proyecto es menor que en las carreteras interurbanas, siendo éstas normalmente C-80, C-70, C-60, con velocidades adecuadas para la conexión con una carretera interurbana o autopista para la entrada o salida en una población, o bien, para carreteras perimetrales en una determinada población.

TIPO DE CARRETERA	CARRETERA CONVENCIONAL	TIPO DE TRAMO
Interurbana	C-100	1
Interurbana	C-90	1
Interurbana o periurbana	C-80	1 y 3
Interurbana o periurbana	C-70	1 y 3
Periurbana	C-60	3
Accesibilidad	C-50	2
Accesibilidad	C-40	2

Tabla 12. Tipos asociados a carreteras convencionales.

4.3. Análisis de las variables de entrada.

Se ha realizado un análisis para ver la distribución de la información de entrada y observar el posible solapamiento de la información en los datos de entrada.

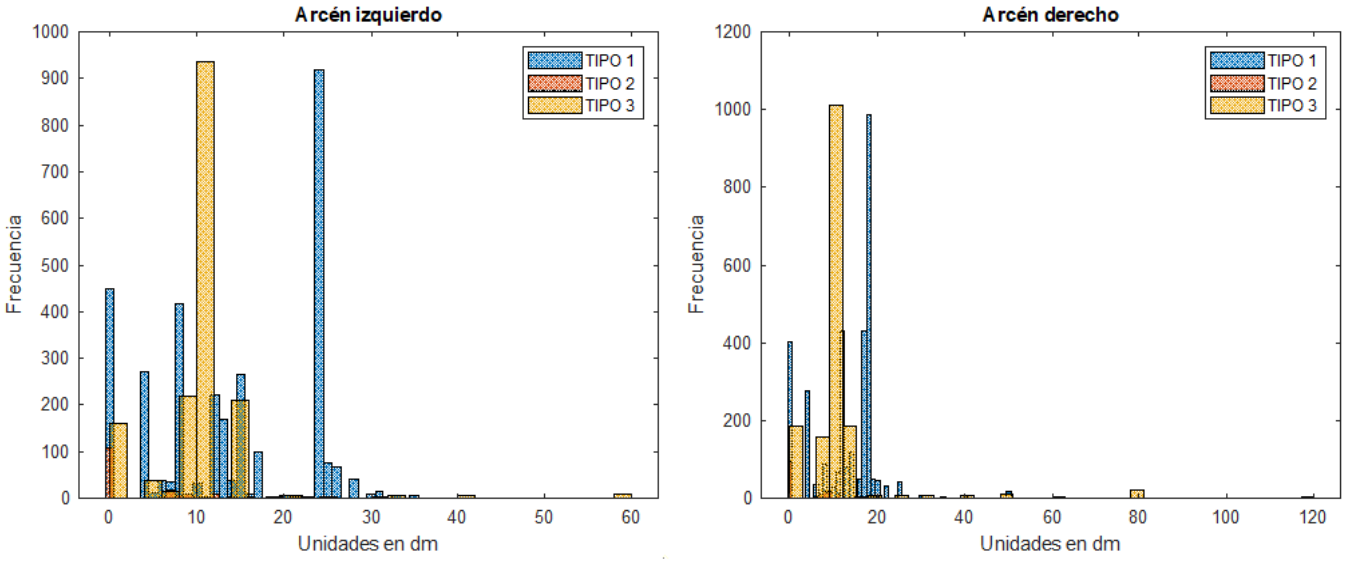


Figura 8. Distribución de los datos para el ancho de los arcenes derecho e izquierdo para los tipos 1, 2 y 3 de las carreteras analizadas.

La Figura 8 y la Figura 9 representan los histogramas con los datos de entrada respecto de las variables anchura de los arcenes derecho e izquierdo, la calzada y la plataforma, respectivamente, para los tramos de carretera analizados M-607, M-852, M-601, M-509, M618, M519 y M-305, según el tipo teórico para el que están clasificados. Como se muestra en las figuras, existe un importante solapamiento entre los datos. Esto indica que existe ambigüedad en la información, es decir, hay confusión entre clases porque hay muestras con características geométricas parecidas o iguales en diferentes tramos.

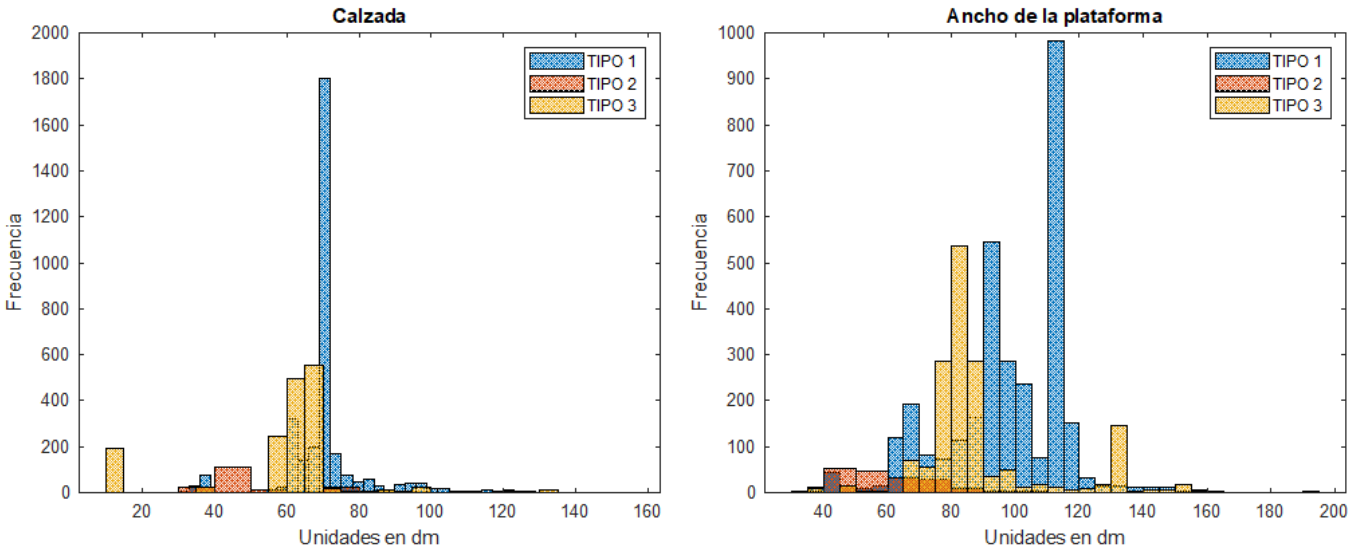


Figura 9. Distribución de los datos para el ancho de la calzada y de plataforma para los tipos 1, 2 y 3 de las carreteras analizadas.

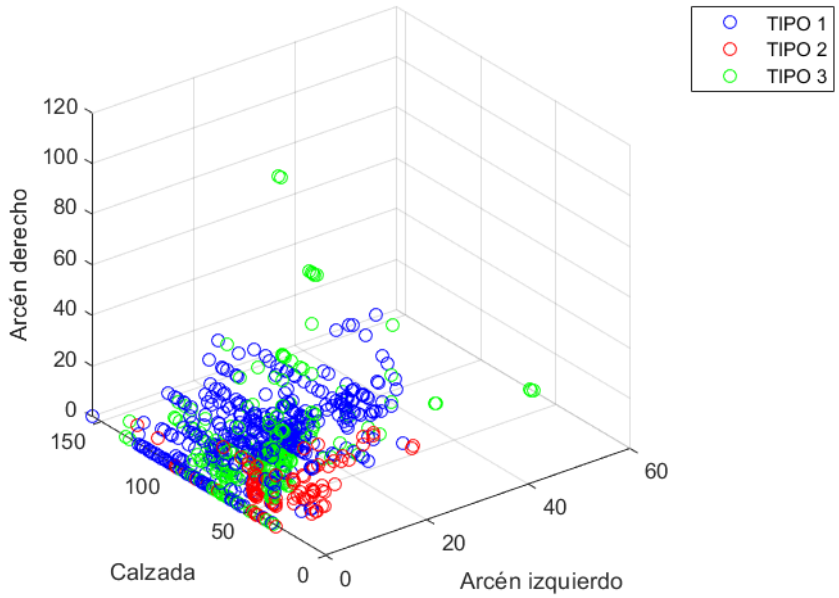


Figura 10. Distribución de los agrupamientos formados a partir de los datos según tipo 1, 2 y 3 de las carreteras analizadas.

La Figura 10 representa las agrupaciones formadas para varios tramos de carretera. Se observa una parte de las tres nubes de puntos generadas parcialmente solapadas. Los ejes de la figura son la calzada, arcén izquierdo y derecho, representando tridimensionalmente los datos obtenidos de las medidas. Los datos pertenecen a las carreteras M-607, M-852, M-601, M-509, M618, M519 y M-305. Las carreteras están etiquetadas según su tipo teórico, tramo a tramo, y después agrupados según su tipo para representar tres grupos o clases (1, 2 y 3) a partir de todos los datos de entrada. Los tramos carretera analizados para la M-852 tiene dos tipos de tramo distintos, tipo 2 y 3; la carretera M-618 tiene también

dos tipos de tramo asociados, tipo 1 y 3. La M-607, M-509 y M519 están agrupan como tipo 1 y las carreteras M-601 y M-305 como tipo 3.

Esta clasificación por tramos, que se puede obtener manualmente mediante el análisis de un experto, es lo que se va a implementar de forma automática.

4.4. Sistema borroso Mamdani de identificación

El sistema de identificación para carreteras convencionales consta básicamente de dos etapas: un sistema de identificación en el que se emplean técnicas de lógica difusa y una etapa en el que se procesa la salida del sistema borroso. El sistema borroso es de tipo Mandami. En la Figura 11 se representa el sistema.

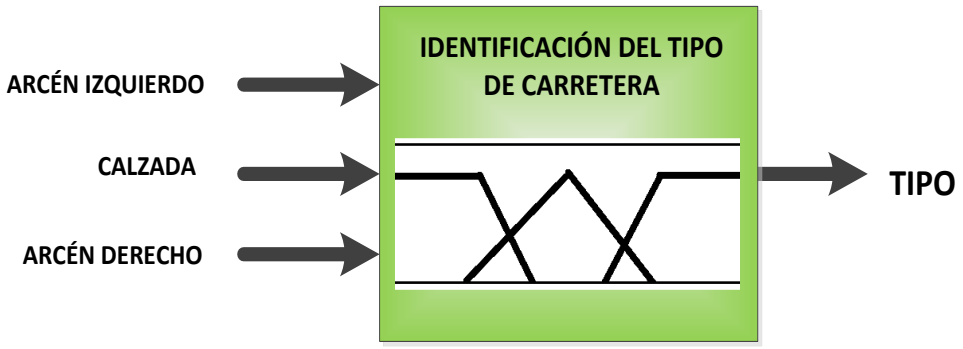


Figura 11: Clasificación de carreteras convencionales mediante un sistema borros

Como entradas para el sistema de inferencia borroso se van a utilizar las 3 variables seleccionadas anteriormente: el arcén derecho, el izquierdo y la calzada. Este sistema tendrá como salida el tipo de carretera asociado a las entradas.

Se introduce el valor de cada dato en la entrada, y mediante un sistema de inferencia difuso basado en reglas se decide qué tipo tiene mayor grado de pertinencia. La salida está definida como un valor {1, 2, 3}, que puede no ser un entero, por lo que se umbraliza para la asignación final de una determinada clase según su grado de pertenencia ya que puede pertenecer con cierto grado a dos de las clases, es decir, a dos tipos.

Se clasifica esta salida numérica del modelo mediante el criterio siguiente:

- Los valores de cada tipo están fijados como Tipo 1 con valor numérico de salida 1, Tipo 2 con valor de 2 y Tipo 3 con valor de 3.
- Cada valor numérico de salida se asignará al valor de clase más cercano, ya que indica que esta salida pertenece más a una clase que otra.

Por ejemplo, si el valor de salida del modelo fuzzy es 1.2, la etapa de clasificación lo asignará a la clase 1, es decir, a un Tipo 1 porque tiene mayor grado de pertenencia a esta clase. De este modo, se asigna cada valor a un tipo de tramo de carretera determinado para obtener la clasificación final.

4.4.1. Variables borrosas de entrada y salida

En la Tabla 13 se muestran las variables de entrada y salida del sistema, con las etiquetas lingüísticas asociadas y el rango de valores numéricos dentro de los que están comprendidas.

VARIABLE	TIPO	VALOR LINGÜÍSTICO	VALOR NUMÉRICO
ARCIZQ	Entrada	**E** (estrecho)	0-11
		M (medio)	9-30
		A (ancho)	25-65
CALZADA	Entrada	**E** (estrecho)	30-55
		M (medio)	52-90
		A (ancho)	80-165
ARCDER	Entrada	**E** (estrecho)	0-11
		M (medio)	9-30
		A (ancho)	25-65
TIPO	Salida	**Tipo_1**	1
		Tipo_2	2
		Tipo_3	3

Tabla 13. Entradas y salida con sus etiquetas lingüísticas y sus valores numéricos asociados.

Las funciones de pertenencia asignadas a las 3 variables de entrada se muestran en la Figura 12. Son tres (Estrecho, Medio, Ancho), de tipo trapezoidal para que los valores medios y los que más se repiten de cada característica queden bien representados con un grado de pertenencia máximo. La salida tiene asociada una función singleton por cada posible valor.

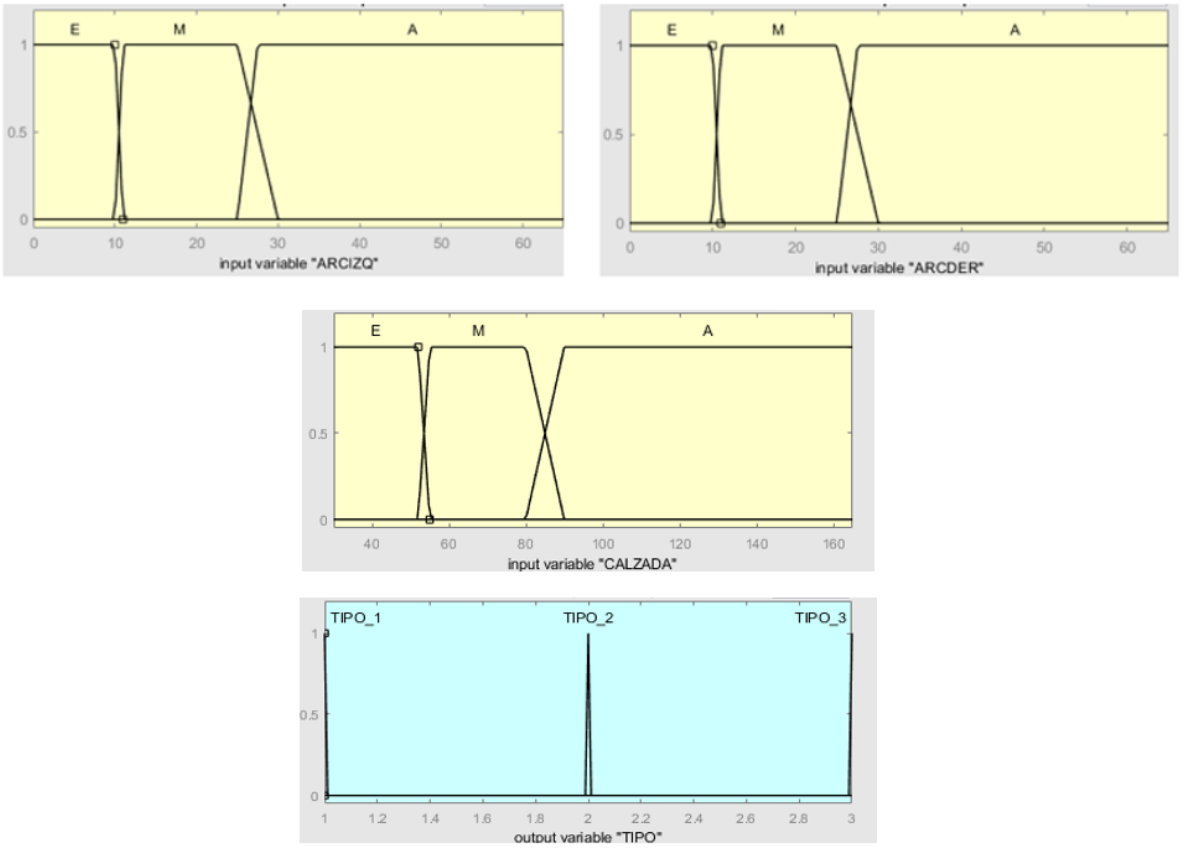


Figura 12: Funciones pertenencia diseñadas para el sistema de identificación difuso.

4.4.2. Definición de las reglas

La Tabla 14 muestra la relación de reglas diseñadas para el sistema de identificación. Se trata se seguir el siguiente criterio intuitivo:

- Tipo 1: Calzada y arcenes anchos, dos o más carriles, altas velocidades. Ejemplo: M-607.
- Tipo 2: Calzada y arcenes más estrechos que tipo 1 y tipo 3, incluso inexistentes, con uno o dos carriles. Bajas velocidades. Ejemplo: M-852.
- Tipo 3: Arcenes más reducidos y calzadas más estrechas que tipo 1 pero no que tipo 2. Dos o más carriles. Ejemplo: M-601.

REGLA	IF	IS	And IF	IS	And IF	IS	THEN	TIPO
1	ARCIZQ	E	CALZADA	E	ARCDER	E	Output1	2
2	ARCIZQ	E	CALZADA	E	ARCDER	M	Output1	2
3	ARCIZQ	E	CALZADA	E	ARCDER	A	Output1	3
4	ARCIZQ	E	CALZADA	M	ARCDER	E	Output1	3
5	ARCIZQ	E	CALZADA	M	ARCDER	M	Output1	1
6	ARCIZQ	E	CALZADA	M	ARCDER	A	Output1	1
7	ARCIZQ	E	CALZADA	A	ARCDER	E	Output1	1
8	ARCIZQ	E	CALZADA	A	ARCDER	M	Output1	1
9	ARCIZQ	E	CALZADA	A	ARCDER	A	Output1	1
10	ARCIZQ	M	CALZADA	E	ARCDER	E	Output1	2
11	ARCIZQ	M	CALZADA	E	ARCDER	M	Output1	3
12	ARCIZQ	M	CALZADA	E	ARCDER	A	Output1	3
13	ARCIZQ	M	CALZADA	M	ARCDER	E	Output1	1
14	ARCIZQ	M	CALZADA	M	ARCDER	M	Output1	1
15	ARCIZQ	M	CALZADA	M	ARCDER	A	Output1	1
16	ARCIZQ	M	CALZADA	A	ARCDER	E	Output1	1
17	ARCIZQ	M	CALZADA	A	ARCDER	M	Output1	1
18	ARCIZQ	M	CALZADA	A	ARCDER	A	Output1	1
19	ARCIZQ	A	CALZADA	E	ARCDER	E	Output1	3
20	ARCIZQ	A	CALZADA	E	ARCDER	M	Output1	3
21	ARCIZQ	A	CALZADA	E	ARCDER	A	Output1	3
22	ARCIZQ	A	CALZADA	M	ARCDER	E	Output1	1
23	ARCIZQ	A	CALZADA	M	ARCDER	M	Output1	1
24	ARCIZQ	A	CALZADA	M	ARCDER	A	Output1	1
25	ARCIZQ	A	CALZADA	A	ARCDER	E	Output1	1
26	ARCIZQ	A	CALZADA	A	ARCDER	M	Output1	1
27	ARCIZQ	A	CALZADA	A	ARCDER	A	Output1	1

Tabla 14. Reglas del sistema de identificación borroso.

La Tabla 15 representa la relación entre las variables de entrada y las reglas propuestas. Se puede observar como unas carreteras con calzada y arcenes más estrechos son de tipo 2, una calzada y arcenes más anchos pertenecen al tipo 1, y una calzada y arcenes con características intermedias a estos casos

anteriores pertenecen al tipo 3. El color rojo indica el tipo1 (número 1), el color azul el tipo 2 (2) y el color verde el tipo 3 con el número 3.

		ARCÉN IZQUIERDO					ARCÉN IZQUIERDO					ARCÉN IZQUIERDO		
ARCDER **E**		E	M	A	ARCDER **M**		E	M	A	ARCDER **A**		E	M	A
CALZADA	E	2	2	3	CALZADA	E	2	3	3	CALZADA	E	3	3	3
	M	3	1	1		M	1	1	1		M	1	1	1
	A	1	1	1		A	1	1	1		A	1	1	1
		ARCÉN IZQUIERDO					ARCÉN IZQUIERDO					ARCÉN IZQUIERDO		
CALZADA **E**		E	M	A	CALZADA **M**		E	M	A	CALZADA **A**		E	M	A
ARCÉN DERECHO	E	2	3	3	ARCÉN DERECHO	E	3	1	1	ARCÉN DERECHO	E	1	1	1
	M	2	3	3		M	3	1	1		M	1	1	1
	A	3	3	3		A	1	1	1		A	1	1	1
		ARCÉN DERECHO					ARCÉN DERECHO					ARCÉN DERECHO		
ARCIZQ **E**		E	M	A	ARCIZQ **M**		E	M	A	ARCIZQ **A**		E	M	A
CALZADA	E	2	2	3	CALZADA	E	2	3	3	CALZADA	E	3	3	3
	M	3	1	1		M	1	1	1		M	1	1	1
	A	1	1	1		A	1	1	1		A	1	1	1

Tabla 15. Representación de reglas en relación a las características de entrada.

4.4.3. Inferencia Mamdani

El mecanismo de inferencia borroso de este sistema tiene las siguientes características (Tabla 16):

Método AND	**prod**	Producto de los valores de entrada difusos
Método OR	**probor**	OR probabilístico de los conjuntos consecuentes
Implicación	**min**	Truncamiento de la función de pertenencia consecuente con el valor del antecedente
Agregación	**max**	Máximo de los conjuntos difusos
Defusificación	**centroid**	Centroide de los conjuntos difusos

Tabla 16. Características del sistema fuzzy basado en reglas.

4.4.4. Resultados de la clasificación con el sistema borroso

La Tabla 17 muestra las matrices de confusión obtenidas para cada tramo de carretera estudiada. Cada fila indica el tipo de clase en la que el dato ha sido clasificado y cada columna indica la clase a la que pertenecen. Por ejemplo, para la carretera M-519, el total de las muestras están etiquetadas como Tipo 1 (650 datos en total). En este caso se predicen 184 muestras del Tipo 1, 18 como Tipo 2 y 448 como Tipo3. Se han clasificado correctamente como Tipo 1 aunque el trazado para esta carretera es discutible. Esta información indica qué pueden existir otros tipos en cada tramo analizado por el sistema de identificación.

	M-607		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	1622	71	4
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-519		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	184	18	448
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-852		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	4	135	10
TIPO 3	7	2	19

	M-618		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	339	33	489
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	2	0	36

	M-305		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	193	0	17

	M-509		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	723	58	92
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-601		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	104	24	686

Tabla 17. Matrices de confusión para cada tramo de carretera evaluado. Las filas indican el valor real y las columnas las predicciones.

La Tabla 18 muestra los resultados obtenidos con el sistema de identificación borroso Mandami. Se indica el porcentaje de muestras clasificadas en cada tipo de tramo. Para ello se define una medida de estimación *P* como la proporción de muestras de una clase de carretera sobre el total de las mismas mediante la siguiente expresión:

$$P = (n^{o}\ muestras\ acertadas\ /\ \sum total\ muestras) \bullet 100 \qquad (8)$$

	ESTIMACIÓN %		
	TIPO 1	**TIPO 2**	**TIPO 3**
M-607	95.58	4.183	0.23
M-519	28.30	2.76	68.92
M-852	6.21	77.40	16.38
M-618	6.84	5.50	87.64
M-305	91.19	0	8.80
M-509	82.81	6.64	10.53
M-601	12.69	2.93	84.37

Tabla 18. Resultados obtenidos en % con el sistema de identificación borroso.

Se observa que para la carretera M-607 el sistema indica que la mayoría del trazado pertenece a un tramo TIPO 1. Para la M-519 indica que en el trazado existen dos tipos de tramo, TIPO 1 y otro tramo TIPO 2. El tramo correspondiente a la M-852 tiene un tramo tipo TIPO2 y otro tramo TIPO 3. La M-618, tiene un tramo TIPO 1 y otro tramo TIPO 3. La M-305 es identificada ampliamente con un tramo TIPO 1. El tramo de M-509 se identifica con un trazado de TIPO 1 y parte de TIPO 3. La M-601 se identifica con la mayoría del trazado como TIPO 3 y otra parte de TIPO 1.

Analizando los resultados obtenidos en la Tabla 18, la proporción mayor de datos clasificados se corresponde con el tipo teórico en 5 de los 7 tramos de carretera estudiados. Por lo tanto se distingue bien el tipo de carretera para M-607, M-852, M-618, M-509 y M-601. Para las carreteras M-519 y M-305 la proporción mayor es incorrecta respecto al tipo teórico.

La Tabla 19 indica el tipo de tramo teórico de cada carretera y el tipo de tramo identificado. El sistema de identificación difuso reconoce los tipos de tramo teóricos, pero en algunos casos también reconoce otros tipos en un mismo tramo de carretera, o se equivoca como ocurre en el tramo de la M-305 o M-519 (trazado discutible aunque teóricamente la M-519 es Tipo 1).

Tramo	**TIPO TEÓRICO**	**TIPO IDENTIFICADO**
M-607	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1
M-519	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3
M-852	Tramo tipo 2 y Tramo tipo 3	Tramo tipo 2 y Tramo tipo 3
M-618	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3
M-305	Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3
M-509	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3
M-601	Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3

Tabla 19. Tipos de tramo identificados en cada tramo de carretera analizado y el teórico. En verde correcto y en rojo incorrecto.

Los datos clasificados por el sistema de identificación indican que hay geometrías mezcladas en los diferentes tipos analizados en este trabajo (se corrobora con la información de las gráficas mostradas con la distribución de los datos en el apartado anterior), bien por la orografía del terreno o por otro motivo como, por ejemplo, el propio desgaste de la vía.

Por ejemplo, la carretera M-305 tiene tramos con dimensiones más parecidas a carreteras interurbanas que a periurbanas, ya que la proporción de datos clasificados muestra que tienen un grado pertenencia más alto de la clase tipo 1. De la misma forma ocurre con las carreteras M-519, M-601 o M-509, que

tienen al menos dos tipos de tramo en sus respectivos sectores analizados. Hay que tener en cuenta que las carreteras modifican su geometría de forma gradual, no cambia bruscamente en 10 metros. Por esta razón, los datos clasificados como clases de tipo 1 o tipo 3 de las carreteras M-519, M-601 o M-509, que además están clasificados forma consecutiva con cada incremento del punto km, indican que sistema de identificación propuesto en este trabajo es fiable sobre el tipo tramo de carretera identificado.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por el sistema de identificación en las Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 y Figura 19 para los tramos de carretera estudiados.

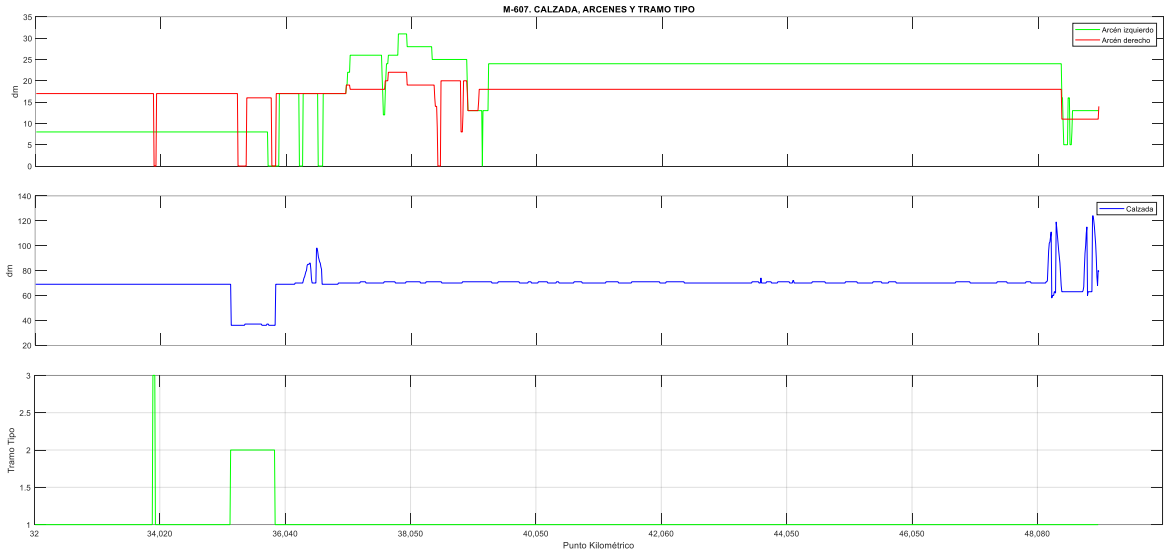


Figura 13: Representación de los tipos de tramos encontrados para la carretera M-607.

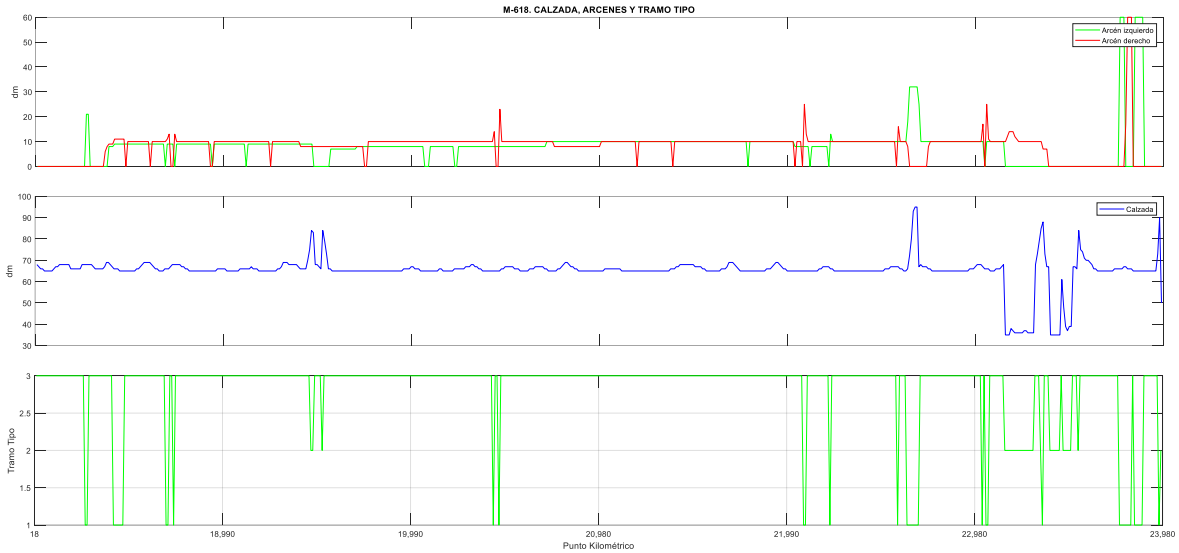


Figura 14: Representación de los tipos de tramos encontrados para la carretera M-618.

Por ejemplo, la Figura 13 muestra los tipos de carretera encontrados en la M-607. Como se observa, para la mayoría de los tramos considera que es tipo 1, pero también identifica un pequeño tramo como

tipo 2 y otro como tipo 3. Lo mismo ocurre para el tramo de carretera M-618 (Figura 14) y el tramo M-601 (Figura 15).

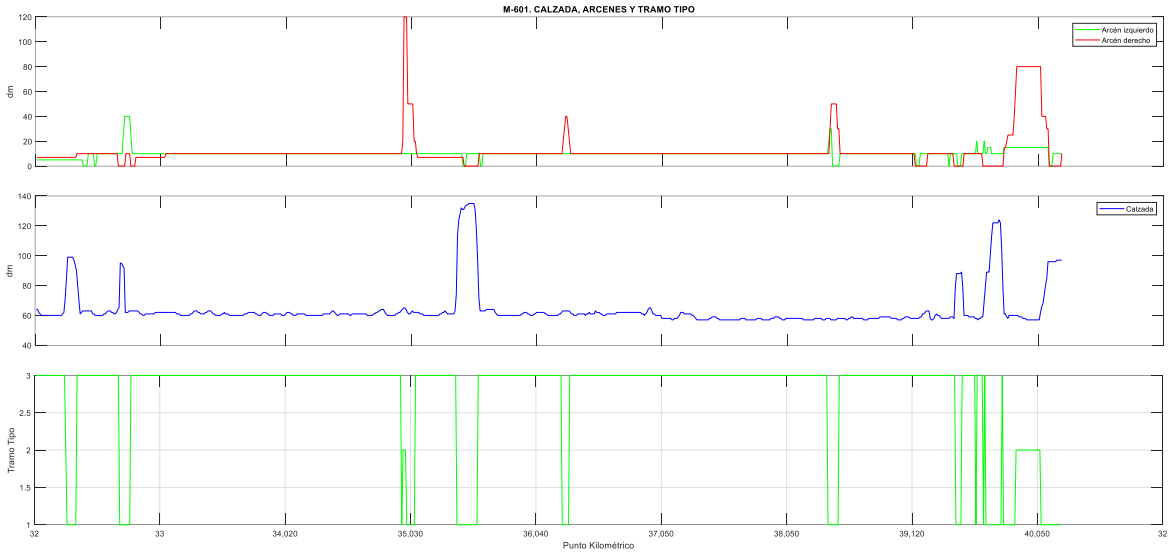


Figura 15: Representación de los tipos de tramos encontrados para la carretera M-601.

La situación para la carretera M-852 es más compleja (Figura 16). Como se observa en esta figura, hay tramos del tipo 2 pero también del tipo 3.

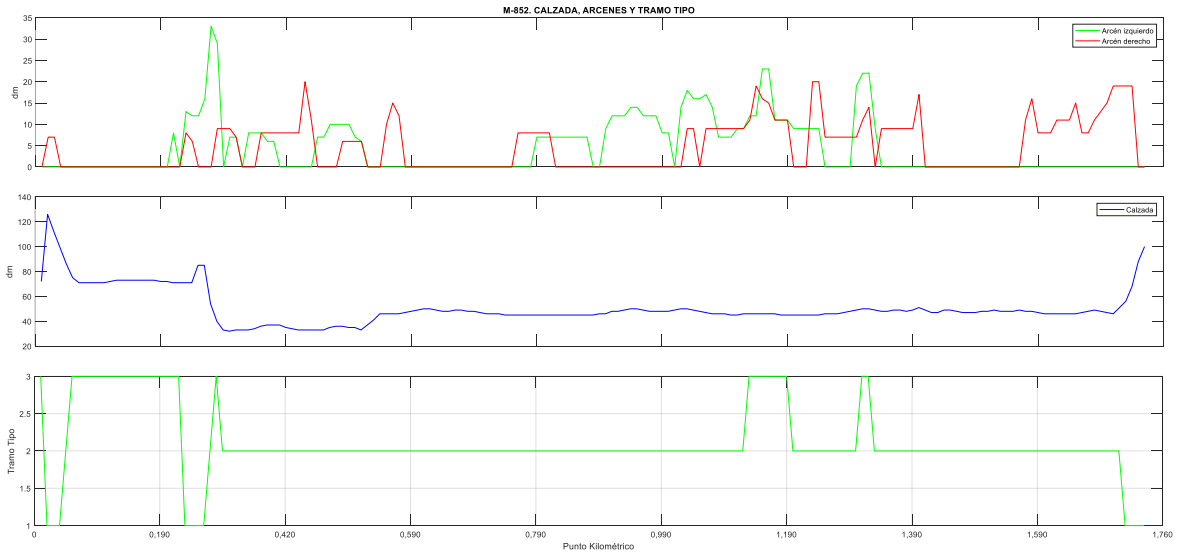


Figura 16: Representación de los tipos de tramos encontrados para la carretera M-852.

Como ejemplo de carretera mal clasificada se muestra la Figura 17, que ha sido considerada tipo 1, siendo tipo 3.

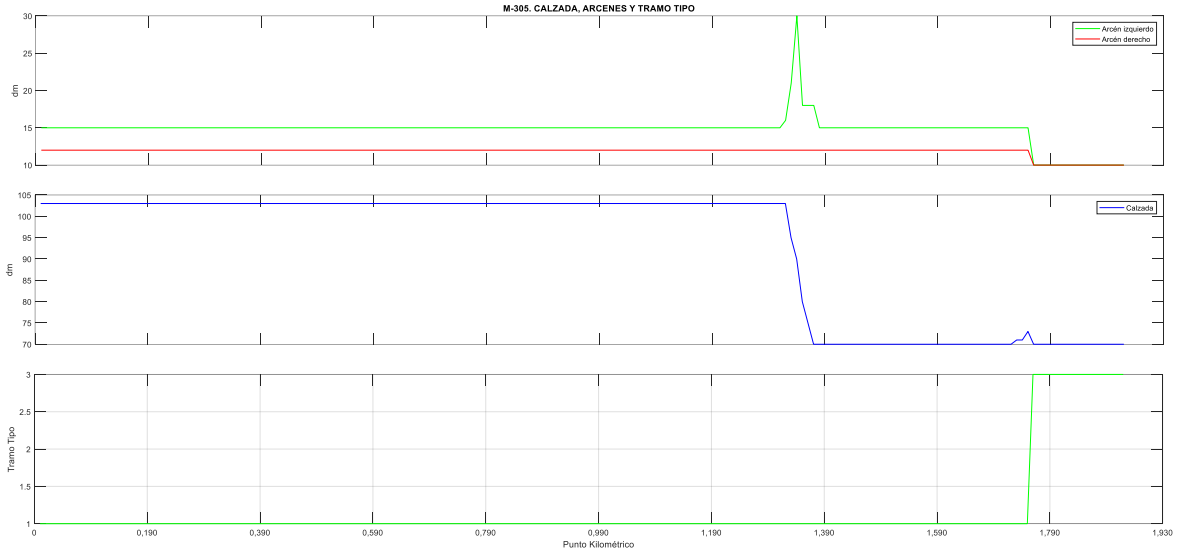


Figura 17: Representación de los tipos de tramos encontrados para la carretera M-305.

La Figura 18 y la Figura 19 representan los tipos de carretera encontrados en la M-509 y M-519 respectivamente. Como se observa, para la mayoría de los tramos de la M-509 considera que es tipo 1, pero también identifica un tramo como tipo 3 y otro pequeño tramo como tipo 2. En la carretera M-519 la mayoría de los tramos se consideran como tipo 3 y alguno con tipo 1.

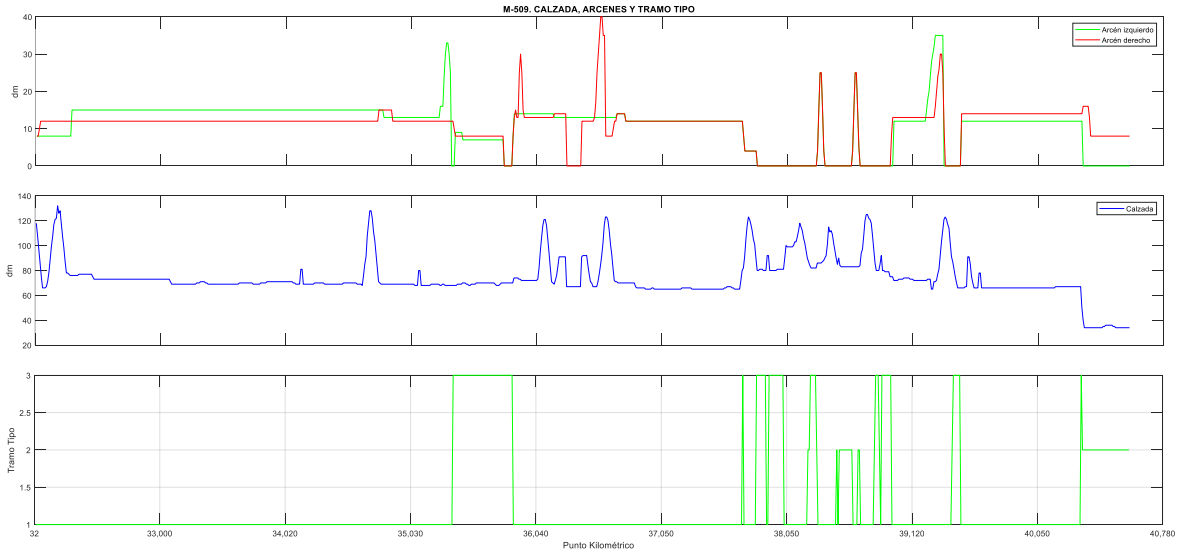


Figura 18: Representación de los tipos de tramos encontrados para la carretera M-509.

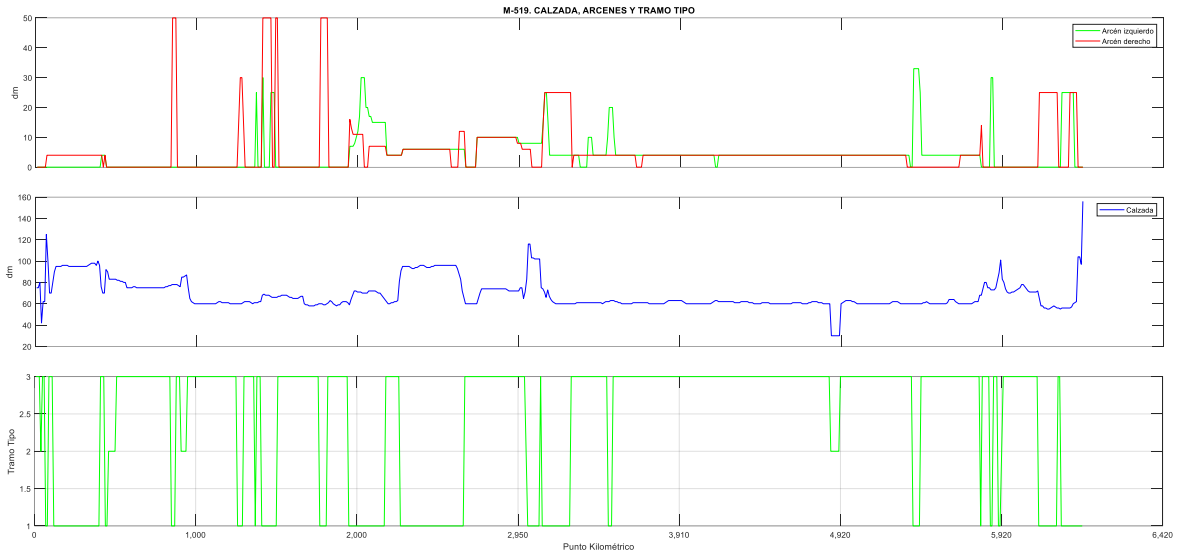


Figura 19: Representación de los tipos de tramos encontrados para la carretera M-519.

Se puede concluir que el sistema de identificación borroso reconoce la mayoría de las clases de carretera analizadas, si atendemos al tipo categorizado de forma teórica, pero también reconoce otros tipos de carretera subyacentes dentro de un mismo tramo de carretera. Como en el caso de la Figura 17, el tramo de carretera M-305 está considerado de forma teórica como tipo de carretera periurbana, pero es discutible que pertenezca a una única clase ya que su geometría tiene características de otra clase en la mayor parte del trazado analizado.

4.5. Sistema de clustering difuso.

El sistema de clustering difuso está diseñado para 3 clusters de salida, cada uno de ellos correspondiente a un tipo de carretera. Se construye un sistema en Matlab seleccionando un conjunto de datos a partir de la información de entrada. Para efectuar la validación del modelo, se selecciona otra parte del conjunto de datos disponibles.

Como se observa en las Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23, los tramos de carretera se encuentran bastante solapados en cuanto a las dimensiones de sus características geométricas. En las figuras se representa la anchura de la calzada y arcenes derecho e izquierdo a partir de la información real de entrada, para tener una idea intuitiva de la distribución de los datos y el solapamiento de los mismos. La Figura 20 muestra la disposición en tres dimensiones de las variables geométricas nombradas. La Figura 21, Figura 22 y Figura 23 representan las disposición de las variables en dos dimensiones, calzada y arcén izquierdo, calzada y arcén derecho, y arcén derecho e izquierdo respectivamente, para los tramos de carreteras analizados en este trabajo.

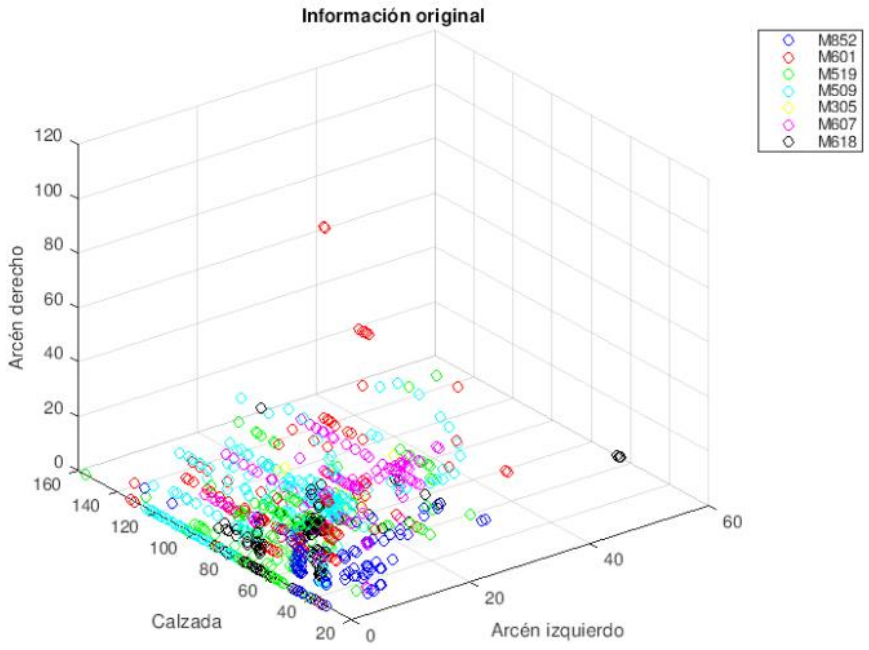


Figura 20: Representación de los datos de entrada de cada tramo de carretera a partir de la calzada y arcenes derecho e izquierdo.

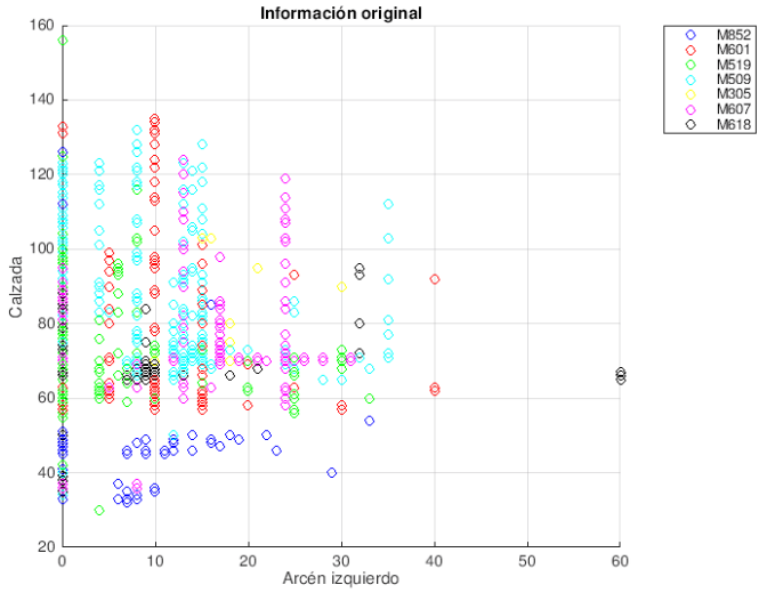


Figura 21: Representación de los datos de entrada de cada tramo de carretera a partir de la calzada y arcenes derecho e izquierdo.

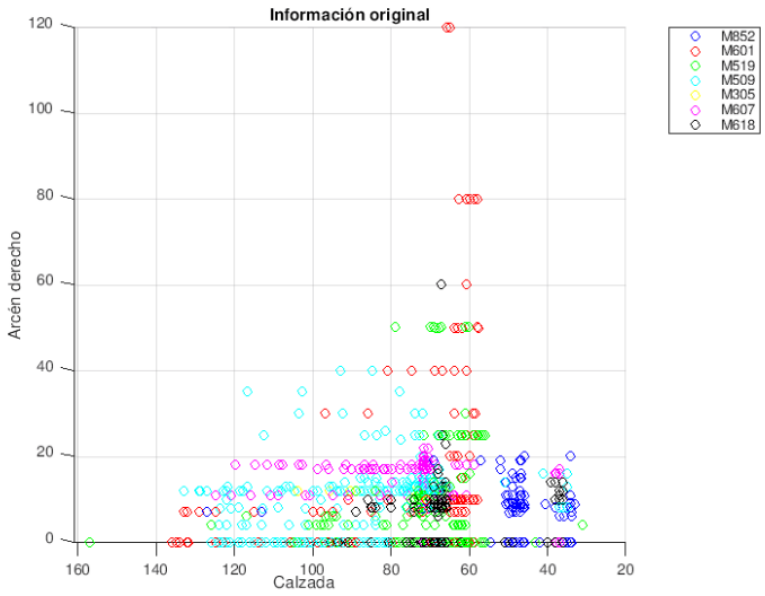


Figura 22: Representación de los datos de entrada de cada tramo de carretera a partir de la calzada y arcenes derecho e izquierdo.

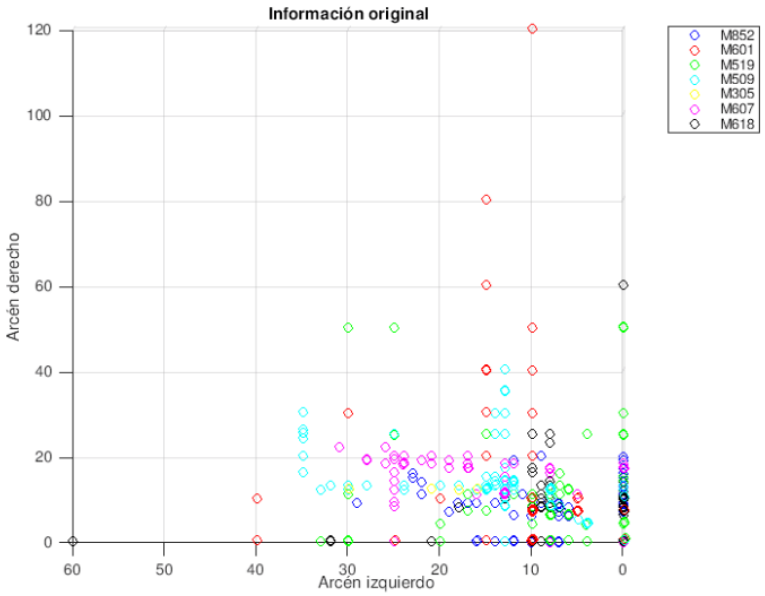


Figura 23: Representación de los datos de entrada de cada tramo de carretera a partir de la calzada y arcenes derecho e izquierdo.

El sistema de clustering difuso propuesto en este trabajo consta 4 etapas: preparación de los datos de entrada, selección de datos de entrenamiento, generación del modelo y la validación del mismo (Figura 24).

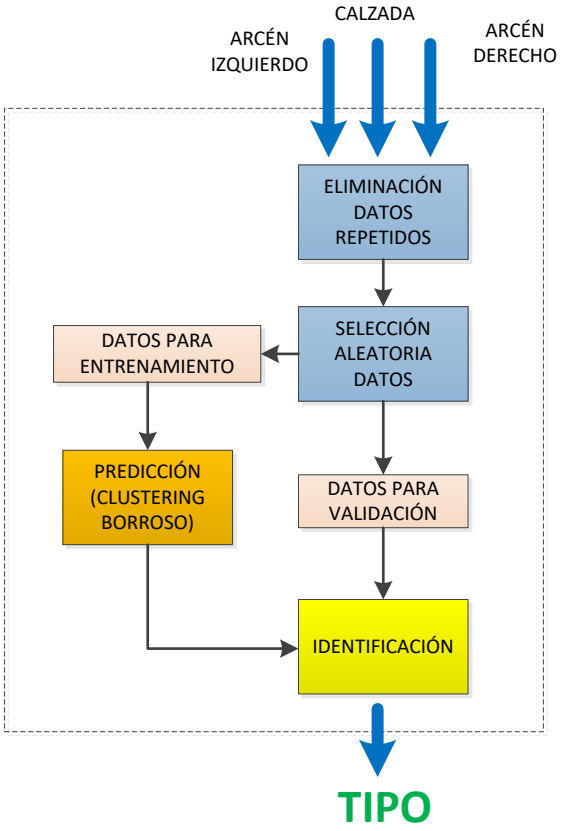


Figura 24: Esquema del sistema de clustering difuso de carreteras.

La primera etapa elimina los datos repetidos del conjunto de información de entrada ya que la información redundante genera un coste computacional adicional. La segunda etapa divide el conjunto de datos de entrada en dos, para construir el modelo y para la posterior etapa de validación. La tercera etapa genera el modelo con los datos de entrenamiento. La última etapa es la de validación e identificación de la clase.

4.5.1. Preparación de datos y generación del modelo.

Los datos se dividen según los tres tipos disponibles y se eliminan los datos repetidos, que de esta forma son más fáciles de identificar. Esto se ha realizado de forma manual.

A continuación se selecciona aleatoriamente un conjunto de datos para el entrenamiento y otro para validación. El 50 % de estos datos se usan para entrenar el sistema y el otro 50% para validarlo.

El modelo se genera a partir de la agrupación de los tramos de carretera por tipo de tramo teórico al que pertenecen, en tres conjuntos de datos (tipo 1, 2 y 3). Los datos de entrada al modelo (anchura de las variables calzada, arcén derecho e izquierdo) forman el conjunto de entrenamiento. Para asignar cada dato a un cluster se calcula la distancia Euclídea a cada centroide de cada uno los 3 clúster mediante la expresión:

$$d = \sqrt{(x_3 - c_3) + (x_2 - c_2) + (x_1 - c_1)} \tag{9}$$

Donde x_1, x_2 y x_3 son los elementos del vector del dato y c_1, c_2 y c_3 los elementos del vector del centroide.

Una vez calculada la distancia Euclídea a cada centroide, el dato se clasifica o pertenece al grupo cuya distancia a su centroide sea menor.

4.5.2. Resultados: Matrices de confusión y validación del modelo.

Para determinar la fiabilidad del modelo propuesto se efectúan varios experimentos diferentes, ya que la selección de los conjuntos de entrenamiento y validación es aleatoria. La Tabla 20 muestra para cinco experimentos distintos el porcentaje de datos bien y mal clasificados para todos los tramos de estudiados en este trabajo. Hay gran variabilidad entre los resultados obtenidos.

Experimento	Acierto %	Fallo %
1	75.07	24.93
2	73.52	26.47
3	72.89	27.10
4	71.34	28.66
5	70.71	29.29

Tabla 20. Aciertos y fallos en la asignación a clase.

La Tabla 21 muestra las matrices de confusión que se obtienen para un determinado experimento para el conjunto de los tramos de carretera estudiados, con un 70.71% de aciertos y un 29.29% de fallos en la asignación a clase sobre el total de los datos para validación que incluyen todos los tramos de carretera analizados.

	M-607		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	1597	71	29
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-519		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	339	223	88
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-852		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	1	146	2
TIPO 3	24	0	4

	M-618		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	525	29	7
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	38	0	0

	M-305		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	58	0	135

	M-509		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	705	39	129
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-601		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	556	199	59

Tabla 21. Matrices de confusión obtenidos en un experimento para cada tramo de carretera evaluada.

La Tabla 22 muestra los resultados obtenidos para cada tramo de carretera, indicando el porcentaje de muestras clasificadas en cada tipo de tramo para este experimento dado.

	ESTIMACIÓN %		
	TIPO 1	**TIPO 2**	**TIPO 3**
M-607	94.10	4.18	1.70
M-519	52.15	34.30	13.53
M-852	14.12	82.48	3.38
M-618	93.98	4.84	1.16
M-305	30.05	0	69.94
M-509	80.75	4.46	14.77
M-601	68.37	24.42	7.20

Tabla 22. Resultados obtenidos en % con el clustering difuso.

Se observa que para la carretera M-607 el sistema indica que la mayoría del trazado pertenece a un tramo TIPO 1. Para la M-519 indica que en el trazado existen tres tipos de tramo, TIPO 1, TIPO 2 y otro tramo TIPO 3. El tramo correspondiente a la M-852 tiene un tramo tipo TIPO 2 y otro tramo TIPO 1. La M-618, tiene un tramo TIPO 1 en la mayoría de su trazado. La M-305 es identificada con dos tramos TIPO 1 y TIPO 3. El tramo de M-509 se identifica con un trazado de TIPO 1 y parte de TIPO 3. La M-601 se identifica con la mayoría del trazado como TIPO 1 y TIPO 2.

Analizando los resultados obtenidos en la Tabla 22, la proporción mayor de datos clasificados se corresponde con el tipo teórico en 3 de los 7 tramos de carretera estudiados. Por lo tanto se distingue bien el tipo de carretera para M-607, M-305, M-509. Para las carreteras M-519, M-852, M-601 y M-305 la proporción mayor es incorrecta respecto al tipo teórico.

La Tabla 23 indica el tipo de tramo teórico de cada carretera y el tipo de tramo identificado. El sistema de identificación difuso reconoce alguno de los tipos de tramo teóricos y en otros casos también reconoce otros tipos en un mismo tramo de carretera, o se equivoca como ocurre en el tramo de la M-519, M-618, M-305, M-509 o M-601.

Tramo	**TIPO TEÓRICO**	**TIPO IDENTIFICADO**
M-607	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1
M-519	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1, Tramo tipo 2 y Tramo tipo 3
M-852	Tramo tipo 2 y Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-618	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-305	Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3
M-509	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3
M-601	Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2

Tabla 23. Resultados obtenidos en % con el sistema de clustering difuso en un experimento dado. En verde correcto y en rojo incorrecto.

La Figura 25 representa los grupos generados en este experimento.

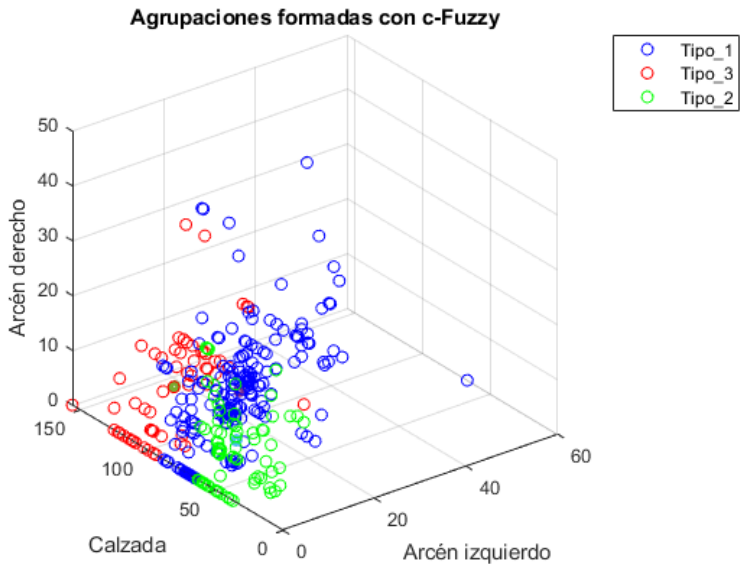


Figura 25: Agrupaciones generadas con el sistema de clustering difuso.

4.6. Sistema neuro-fuzzy.

El sistema ANFIS diseñado en este trabajo tiene 3 neuronas para la capa de entrada de la red neuronal, una para cada variable de entrada. Para llevar a cabo el entrenamiento y la validación del sistema se forman dos conjuntos de datos de forma aleatoria. La estructura de la red ANFIS se muestra en la Figura 26.

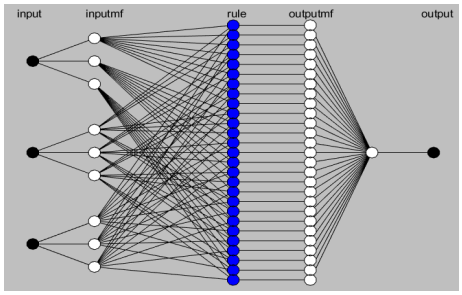


Figura 26: Estructura red ANFIS.

Cada una de las tres funciones de pertenencia de las entradas tiene forma gaussiana. La combinación de cada una de las neuronas genera 27 reglas. La red neuronal del sistema ajusta los pesos de las neuronas para obtener las salidas adecuadas. Este proceso es de aprendizaje supervisado y las muestras de entrada deben estar etiquetadas con el valor teórico real asociado a cada tipo de carretera.

El sistema de identificación neuro-fuzzy propuesto en este trabajo consta 4 etapas. La primera etapa elimina los datos repetidos del conjunto de entrada ya que la información redundante genera un coste computacional adicional. Además se eliminan los datos repetidos para evitar un sobreajuste en la red neuronal. La segunda etapa divide de forma aleatoria el conjunto de datos de entrada en dos, entrenamiento y test (50%). La tercera etapa genera el modelo. La última etapa es la de validación e identificación de clase haciendo uso del conjunto de datos para validación (Figura 27).

Los datos de entrada al modelo son: calzada, arcén derecho e izquierdo. Las salidas para cada dato están etiquetadas como un valor {1, 2, 3}, que puede no ser un entero, y se umbraliza para la asignación a una determinada clase según su grado de pertenencia, como en el caso anterior.

Una vez obtenidos los valores de la clasificación para todos los datos de entrada se procesa el tramo de carretera completo. Esta información indica qué secciones tipo existen en cada tramo analizado por el sistema de identificación. De este análisis se obtienen los ratios de clasificación para cada tramo de carretera y las matrices de confusión asociadas.

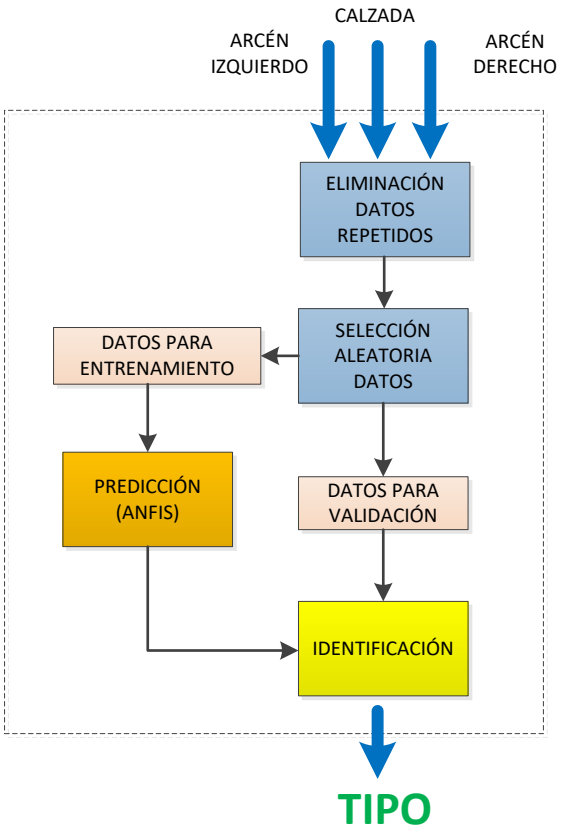


Figura 27: Esquema del sistema de identificación de carreteras empleando ANFIS.

El sistema neuro-difuso ha obtenido las funciones de pertenencia de entrada ligadas a las características de entrada: in1=arcén izquierdo, in2=calzada e int3=arcén derecho que se muestran en la Figura 28. Este sistema ha generado 27 reglas correspondientes a las tres funciones de pertenencia con tres valores lingüísticos cada una con una salida lineal.

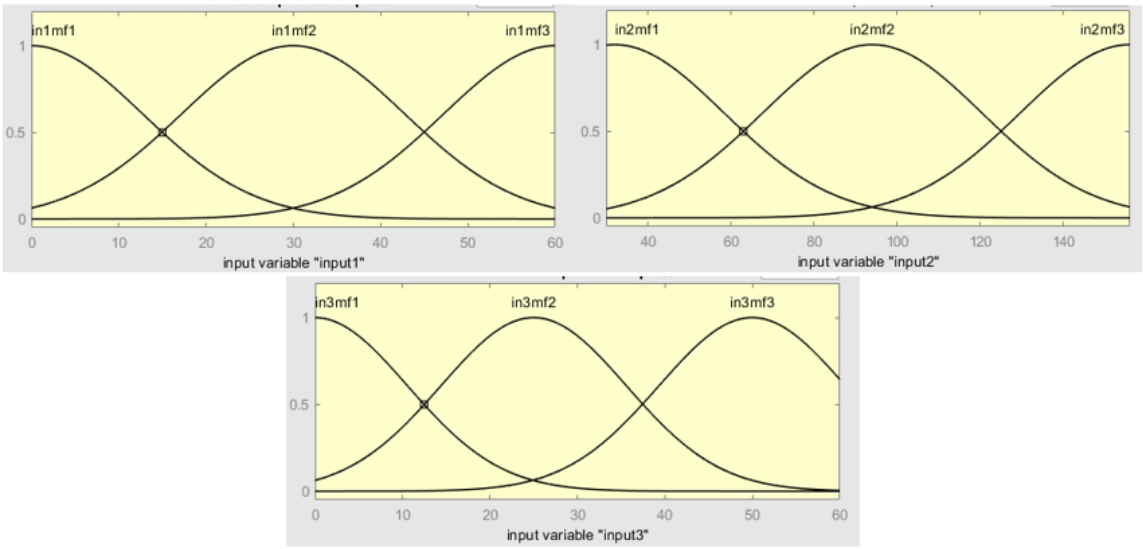


Figura 28: Funciones de pertenencia del sistema neuro-fuzzy.

El error obtenido en la validación se obtiene mediante el RMS, definido como:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} x_n^{\,2}} \tag{10}$$

Donde x es vector de longitud N.

Las Tabla 24, Tabla 25, Tabla 26 muestran los errores de entrenamiento y validación obtenidos con la red ANFIS para tres experimentos. La Tabla 24 muestra el error de entrenamiento de la red y el de validación durante 10 iteraciones para una configuración de red con 3 funciones de pertenencia por cada variable difusa con funciones gaussianas y una salida lineal y la Tabla 25 con una salida constante.

Epoch	Train Error %	Check Error %
1	30.891	68.70517
2	30.889	68.53063
3	30.888	68.35801
4	30.886	68.18729
5	30.884	68.01845
6	30.883	67.85149
7	30.881	67.66999
8	30.879	67.49069
9	30.877	67.31360
10	30.875	67.13869

Tabla 24. Error de entrenamiento por cada época.

Epoch	Train Error %	Check Error %
1	34.759	41.8824
2	34.757	41.8844
3	34.755	41.8864
4	34.754	41.8884

Epoch	Train Error %	Check Error %
5	34.752	41.8903
6	34.750	41.8923
7	34.748	41.8944
8	34.746	41.8966
9	34.744	41.8987
10	34.742	41.9009

Tabla 25. Error de entrenamiento por cada época.

La Tabla 26 muestra el error de entrenamiento de la red y el error de validación durante 10 iteraciones para una configuración de red con 4 funciones de pertenencia por cada variable difusa con funciones gaussianas y salida constante.

Epoch	Train Error %	Check Error %
1	35.251	55.9382
2	35.249	56.2052
3	35.247	56.4744
4	35.245	56.7458
5	35.243	57.0195
6	35.241	57.2952
7	35.239	57.6011
8	35.237	57.9095
9	35.234	58.2204
10	35.232	58.5339

Tabla 26. Error de entrenamiento por cada epoch.

La Tabla 27 muestra las matrices de confusión para cada carretera para un experimento con el sistema de identificación basado en ANFIS con tres funciones de pertenencia por cada variable difusa y salida constante.

	M-607		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	1683	0	14
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-519		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	485	159	6
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-852		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	25	119	5
TIPO 3	7	21	0

	M-618		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	496	62	3
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	3	35	0

M-305

M-509

	Clase TIPO 1	Clase TIPO 2	Clase TIPO 3
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	193	0	0

	Clase TIPO 1	Clase TIPO 2	Clase TIPO 3
TIPO 1	819	48	96
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-601		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	736	35	43

Tabla 27. Matrices de confusión para cada tramo de carretera.

La Tabla 28 muestra los resultados con ANFIS con cuatro funciones de pertenencia por cada variable difusa de entrada y con salida constante.

	M-607		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	1626	14	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-519		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	536	110	4
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-852		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	4	144	1
TIPO 3	27	0	1

	M-618		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	499	62	3
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	15	323	0

	M-305		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	193	0	0

	M-509		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	829	44	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-601		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	809	10	0

Tabla 28. Matrices de confusión para cada tramo de carretera.

La Tabla 29 muestra los resultados obtenidos para un experimento con el sistema ANFIS con cuatro funciones de pertenencia por cada variable de entrada difusa con salida lineal.

	M-607		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	1623	71	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-519		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	371	278	1
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-852		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	3	146	0
TIPO 3	28	0	0

	M-618		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	531	30	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	39	0	0

	M-305		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	193	0	0

	M-509		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	833	39	1
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	0	0	0

	M-601		
	Clase TIPO 1	**Clase TIPO 2**	**Clase TIPO 3**
TIPO 1	0	0	0
TIPO 2	0	0	0
TIPO 3	715	103	1

Tabla 29. Matrices de confusión para cada trama de carretera evaluada.

4.6.1. Resultados obtenidos con el sistema neuro-fuzzy.

La Tabla 30 muestra los resultados obtenidos con el sistema de identificación ANFIS con salida constante y tres funciones de pertenencia por cada variable difusa. Se indica el porcentaje de muestras clasificadas en cada tipo de tramo.

	ESTIMACIÓN %		
	TIPO 1	**TIPO 2**	**TIPO 3**
M-607	95.81	4.181	0
M-519	89.84	10.15	0
M-852	20.33	79.66	0
M-618	95.15	4.84	0
M-305	100	0	0
M-509	95.41	4.46	0.11
M-601	98.90	1.09	0

Tabla 30. Resultados obtenidos en % con el sistema ANFIS.

Tramo	TIPO TEÓRICO	TIPO IDENTIFICADO
M-607	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1
M-519	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-852	Tramo tipo 2 y Tramo tipo 3	Tramo tipo 2 y Tramo tipo 1
M-618	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-305	Tramo tipo 3	Tramo tipo 1
M-509	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1
M-601	Tramo tipo 3	Tramo tipo 1

Tabla 31. Resultados obtenidos en % con ANFIS. En verde correcto y en rojo incorrecto.

Las Tabla 31, 34 y 35 indican el tipo de tramo teórico de cada tramo de carretera y el tipo de tramo identificado. El sistema de identificación difuso reconoce los tipos de tramo teóricos pero en algunos casos también reconoce otros tipos en un mismo tramo de carretera, o se equivoca como ocurre en el tramo de la M-618, M-305, M601 o M-519. El sistema de identificación neuro-difuso no es capaz de identificar un tramo de carretera tipo 3.

En resumen, el sistema de identificación neuro-borroso no es capaz de identificar tramos de carretera tipo 3 (equivocadamente los asigna a tipo 1). Identifica bien el tramo M-607, parte de la M-509 y de la M-852. Por lo tanto, no se distingue el tipo de carretera para los tramos analizados con este método de identificación.

	ESTIMACIÓN %		
	TIPO 1	TIPO 2	TIPO 3
M-607	99.17	0	0.82
M-519	74.61	24.46	0.9231
M-852	18.07	79.09	2.82
M-618	83.30	16.19	0.5
M-305	100	0	0
M-509	93.81	5.49	0.68
M-601	90.47	4.27	5.25

Tabla 32. Resultados obtenidos en % con el sistema ANFIS.

Tramo	TIPO TEÓRICO	TIPO IDENTIFICADO
M-607	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1
M-519	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-852	Tramo tipo 2 y Tramo tipo 3	Tramo tipo 2 y Tramo tipo 1
M-618	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-305	Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-509	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1
M-601	Tramo tipo 3	Tramo tipo 1

Tabla 33. Resultados obtenidos en % con el sistema ANFIS. En verde correcto y en rojo incorrecto.

Para ver si mejoraban los resultados, se ha usado un esquema de validación cruzada k-fold con k = 5. La Tabla 34 muestra los resultados obtenidos con el sistema de identificación ANFIS con salida constante y tres funciones de pertenencia por cada variable difusa. Se indica el porcentaje de muestras clasificadas en cada tipo de tramo.

	ESTIMACIÓN %		
	TIPO 1	**TIPO 2**	**TIPO 3**
M-607	94.31	5.69	0
M-519	36.64	63.16	0.8
M-852	9.71	88.70	1.58
M-618	80.30	19.69	0
M-305	85.38	14.09	0.51
M-509	90.79	9.16	0.04
M-601	6.22	85.12	8.64

Tabla 34. Resultados obtenidos en % con el sistema ANFIS y k-fold.

Tramo	**TIPO TEÓRICO**	**TIPO IDENTIFICADO**
M-607	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1
M-519	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-852	Tramo tipo 2 y Tramo tipo 3	Tramo tipo 2 y Tramo tipo 1
M-618	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-305	Tramo tipo 3	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-509	Tramo tipo 1	Tramo tipo 1 y Tramo tipo 2
M-601	Tramo tipo 3	Tramo tipo 2 y Tramo tipo 3

Tabla 35. Resultados obtenidos en % con ANFIS k-fold. En verde correcto y en rojo incorrecto.

La Tabla 35 indica el tipo teórico de cada tramo de carretera y el tipo de tramo identificado. El sistema de identificación difuso no reconoce los tipos de tramo teóricos en la mayoría de los casos. En algunos casos reconoce el tipo en un mismo tramo de carretera, o se equivoca como ocurre en el tramo de la M-618, M-305, M601 o M-519. El sistema de identificación neuro-difuso no es capaz de identificar un tramo de carretera tipo 3.

4.7. Comparativa de los sistemas de identificación.

Los resultados obtenidos con el modelo de identificación difuso basado en reglas son buenos para los tramos de carretera M-607, M-509, M-618, M-852 y M-601 porque se han identificado las secciones tipo a las que teóricamente pertenecen, pero no así para los tramos M-305 y M-509. Este sistema reconoce la mayoría de las clases de carretera analizadas, si atendemos al tipo categorizado de forma teórica, pero también reconoce otros tipos de carretera subyacentes dentro de un mismo tramo de carretera. Es discutible que cada tramo pertenezca a una única clase de carretera ya que la geometría de los mismos muestra poseer características de otras clases.

El modelo de identificación difuso basado en clustering obtiene resultados buenos en 3 de los 7 tramos de carretera estudiados. Por lo tanto se distingue bien el tipo de carretera para M-607, M-305 y M-509 pero no para las carreteras M-519, M-852, M-601 y M-305, la proporción mayor es incorrecta respecto al tipo teórico.

El modelo de identificación neuro-difuso no es capaz de identificar un tramo tipo 3, se equivoca e identifica un tipo 1. Identifica los tramos M-607, M-519, M-509 y parte de la M852. Los tramos M-305, M-618 y M-601 no se identifican correctamente.

De estos tres métodos sólo se obtiene un buen funcionamiento con el sistema borroso basado en reglas.

5. SISTEMA DE RECOMENDACIÓN DE VELOCIDAD

En este capítulo, a partir de la salida obtenida por el sistema de identificación, se diseña un sistema de recomendación de velocidad que la calcula mediante la lógica borrosa teniendo en cuenta la geometría de la carretera.

5.1. Sistema de cálculo de velocidad

El sistema de recomendación de velocidad para un vehículo que circula por carreteras convencionales está diseñado mediante un conjunto de subsistemas: un módulo de cálculo de la velocidad específica de circulación; un sistema borroso para decidir la velocidad por esa carretera teniendo en cuenta la geometría de la carretera; un sistema borroso que evalúa el nivel de urgencia durante el desplazamiento especificado por el conductor integrado con la meteorología y el estado del firme; un sistema borroso de regulación de la velocidad que combina algunas de las salidas anterior y la pendiente, y un módulo de salida que da finalmente la velocidad recomendada (Figura 29). Es decir, el sistema de recomendación completo consta de 5 subsistemas, 3 de ellos difusos.

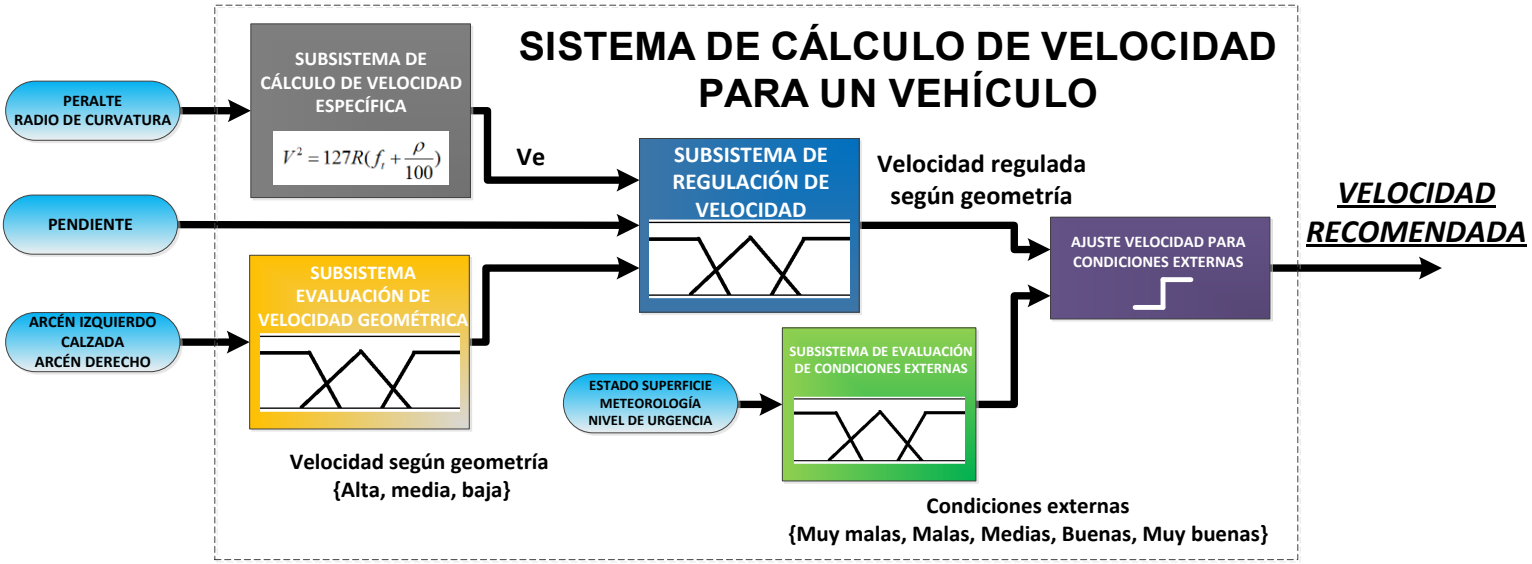


Figura 29: Esquema propuesto para el cálculo de velocidad recomendada.

Como entradas para el sistema de cálculo de velocidad se van a utilizar las 6 entradas que son características de la geometría de una carretera: el radio de curvatura, el peralte, la pendiente de la carretera y la anchura de arcenes izquierdo, derecho y calzada. También se utilizarán como entradas externas las condiciones meteorológicas, estado del firme y el nivel de urgencia. La salida del modelo obtiene una velocidad según los elementos de una carretera (por su geometría), una velocidad debida a agentes externos, y la velocidad final que combina ambas.

A continuación se describe cada módulo.

5.2. Subsistema de cálculo de velocidad específica.

Este sistema calcula la velocidad específica real de cada elemento del trazado mediante la expresión (11) según la normativa descrita en [1]. Se calcula esta velocidad a partir de los datos reales medidos de radio de curvatura y peralte.

Cuando un vehículo se desplaza por una curva circular, aparece una aceleración centrífuga sobre la carretera y sobre los objetos o personas situadas en el interior del vehículo. Esta aceleración centrífuga se mantiene a lo largo de toda la curva circular pudiendo tener incidencia sobre las condiciones de circulación y comodidad del viajero. Además esto puede comprometer la seguridad de los vehículos. La fuerza centrífuga tiende a desplazar el vehículo en sentido radial hacia el exterior de la curva y aparece como reacción a la aceleración centrípeta, producida por el cambio de dirección del vector velocidad.

Para compensar el efecto inestabilizador de la fuerza centrífuga, se proporciona a los tramos curvos de un peralte mediante la elevación gradual del carril exterior sobre el interior.

En la Tabla 36 se muestra la relación de velocidad de proyecto, radio mínimo y peralte máximo.

Velocidad de proyecto (km/h)	C-100	C-90. C-80, C-70, C-60, C-50, C-40
	Radio mínimo (m)	Peralte máximo (m)
100	450	8
90	350	7
80	265	7
70	190	7
60	130	7
50	85	7
40	50	7

Tabla 36. Relación de velocidad de proyecto, radio mínimo y peralte máximo [1].

Para describir el comportamiento de un vehículo que circula por una curva circular se considera un modelo consistente en establecer su equilibrio transversal como sólido rígido, que recorre dicha curva circular en planta a velocidad constante, prescindiendo del efecto del sistema de suspensión [1].

Según este modelo, la velocidad de la curva circular, el radio, el coeficiente de rozamiento transversal movilizado y el peralte se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$V = \sqrt{127R(f_t + \frac{\rho}{100})} \qquad (11)$$

Siendo:

V_E la velocidad específica en km/h, R el radio de curvatura en metros, peralte en % y f_t el máximo rozamiento transversal movilizado. Este radio R indica el mínimo admisible en el diseño de una curva circular.

El máximo rozamiento transversal movilizado es el coeficiente de rozamiento entre dado cuando un vehículo circula a velocidad máxima en una curva que está limitada por la resistencia del propio vehículo al deslizamiento. En este subsistema es asignado como se muestra en la Figura 30.

En la Tabla 36 se muestra la relación de la velocidad específica y máximo rozamiento transveral movilizado. Para toda curva circular con el peralte máximo correspondiente se cumplirá que, recorrida la curva circular a la velocidad específica (*Ve*), no se sobrepasarán los valores del coeficiente transversal máximo movilizado (f_{tmax}) [1].

V_E(km/h)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
f_{tmax}	0.180	0.166	0.151	0.137	0.122	0.113	0.104	0.096	0.087	0.078	0.069

Tabla 37. Máximo rozamiento transveral movilizado en función de la velocidad específica, en condiciones firme húmedo [1].

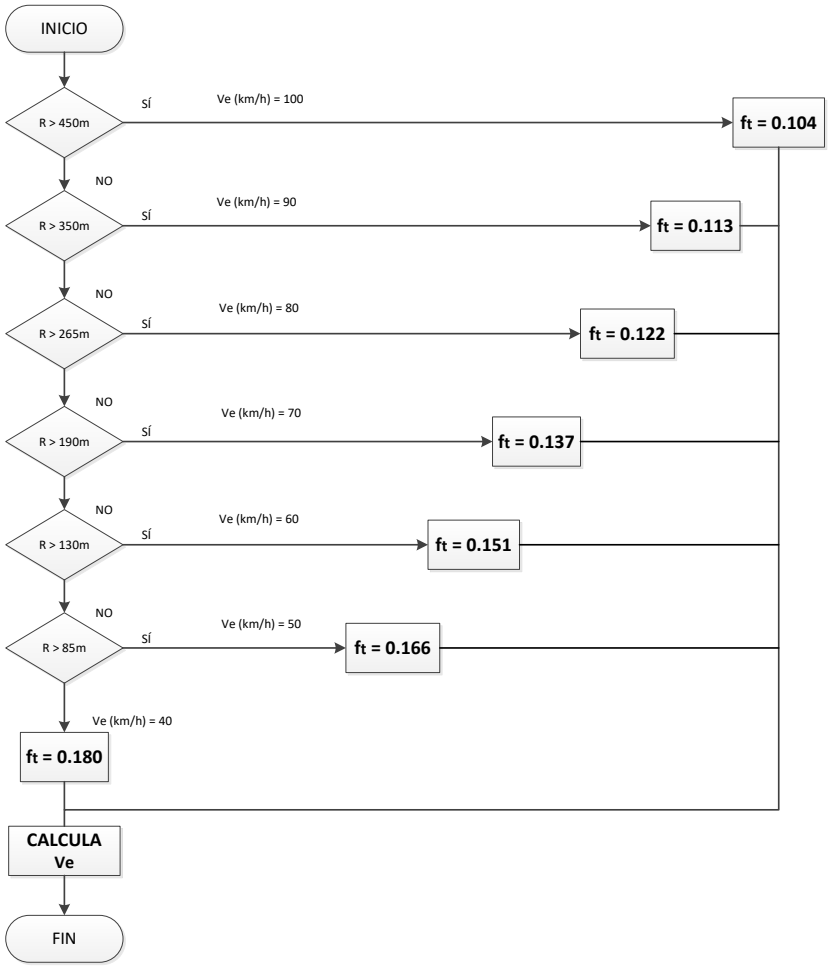


Figura 30: Esquema propuesto para el cálculo de velocidad específica.

Como se indica en la Figura 30, el radio de curvatura de cada dato de entrada es evalúado para determinar en qué intervalo de la Tabla 36 se encuentra como el radio mínimo necesario para una velocidad de proyecto determinada.

Una vez determinada esta velocidad por el intervalo en el qué se encuentra el radio de curvatura de entrada, se asigna un coeficiente de máximo rozamiento transversal teniendo en cuenta lo que indica la Tabla 37. Por ejemplo si el radio de entrada es de 160 metros, según la Tabla 36 la velocidad de proyecto es de 60 km/h y haciendo uso de la Tabla 37 se asignará un f_t igual 0.151.

5.3. Subsistema de evaluación de velocidad según geometría.

Este modelo borroso calcula cómo debe ser la velocidad de un tramo de carretera teniendo en cuenta las características geométricas de la anchura de la calzada y arcenes derecho e izquierdo. Estas variables están representadas como variables lingüísticas según la siguiente tabla:

VARIABLE	TIPO	VALOR LINGÜÍSTICO	VALOR NUMÉRICO
ARCIZQ	Entrada	**E** (estrecho)	0-11
		M (medio)	9-30
		A (ancho)	25-65
CALZADA	Entrada	**E** (estrecho)	30-55
		M (medio)	52-90
		A (ancho)	80-140
ARCDER	Entrada	**E** (estrecho)	0-11
		M (medio)	9-30
		A (ancho)	25-65

La salida puede ser: velocidad baja, media o alta quedando representadas en un rango de valores entre 1 y 10.

VARIABLE	TIPO	VALOR LINGÜÍSTICO	VALOR NUMÉRICO
Velocidad según geometría	Salida	Velocidades **bajas**	0
		Velocidades **medias**	5
		Velocidades **altas**	10

Las cuatro funciones de pertenencia de las 3 variables de entrada y la variable de salida se muestran en la Figura 31 y Figura 32. Las funciones pertenencia elegidas son de tipo trapezoidal para que los valores medios y los que más se repiten de cada característica queden bien representados con un grado de pertenencia máximo.

El valor para la función de pertenencia de salida, {velocidades bajas, velocidades medias y velocidades altas} queda representado en un rango de valores [0-10] para indicar el tipo de velocidad que puede tener ese tramo de carretera.

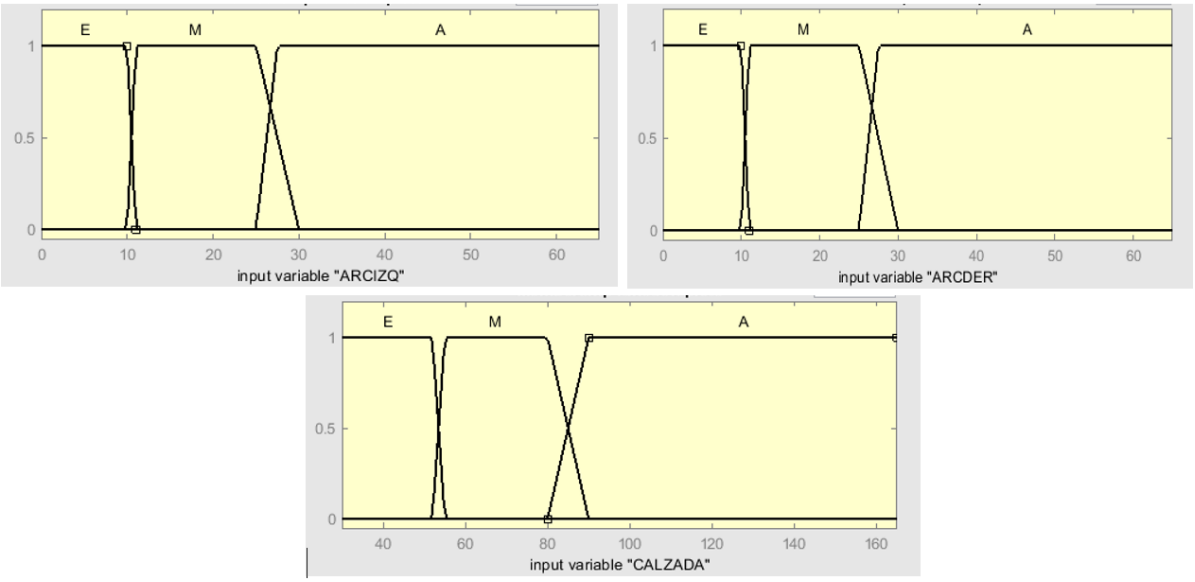


Figura 31: Funciones de pertenencia de entrada diseñadas para el subsistema de evaluación de velocidad según geometría.

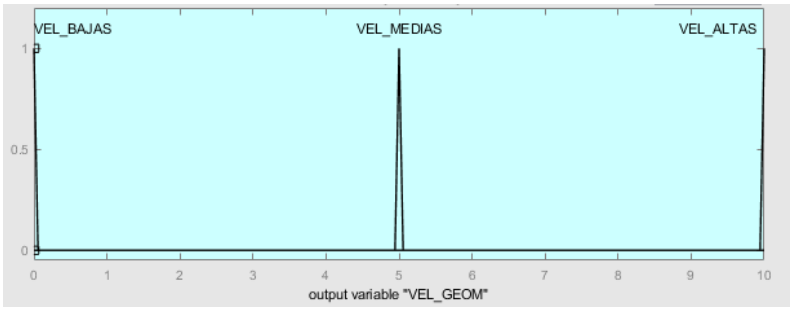


Figura 32: Funciones de pertenencia de salida diseñadas para el subsistema de evaluación de velocidad según geometría.

La Tabla 38 muestra la relación de reglas diseñadas para este sistema según el criterio:

- Velocidades altas: Calzada y arcenes anchos.
- Velocidades medias: Arcenes y calzadas ni muy anchos ni muy estrechos.
- Velocidades bajas: Calzada y arcenes estrechos incluso inexistentes.

REGLA	IF	IS	And IF	IS	And IF	IS	THEN	VEL_GEO
1	ARCIZQ	E	CALZADA	E	ARCDER	E	Output	B
2	ARCIZQ	E	CALZADA	E	ARCDER	M	Output	B
3	ARCIZQ	E	CALZADA	E	ARCDER	A	Output	B
4	ARCIZQ	E	CALZADA	M	ARCDER	E	Output	M
5	ARCIZQ	E	CALZADA	M	ARCDER	M	Output	A
6	ARCIZQ	E	CALZADA	M	ARCDER	A	Output	A
7	ARCIZQ	E	CALZADA	A	ARCDER	E	Output	M
8	ARCIZQ	E	CALZADA	A	ARCDER	M	Output	A
9	ARCIZQ	E	CALZADA	A	ARCDER	A	Output	A

REGLA	IF	IS	And IF	IS	And IF	IS	THEN	VEL_GEO
10	ARCIZQ	M	CALZADA	E	ARCDER	E	Output	B
11	ARCIZQ	M	CALZADA	E	ARCDER	M	Output	M
12	ARCIZQ	M	CALZADA	E	ARCDER	A	Output	M
13	ARCIZQ	M	CALZADA	M	ARCDER	E	Output	A
14	ARCIZQ	M	CALZADA	M	ARCDER	M	Output	A
15	ARCIZQ	M	CALZADA	M	ARCDER	A	Output	A
16	ARCIZQ	M	CALZADA	A	ARCDER	E	Output	A
17	ARCIZQ	M	CALZADA	A	ARCDER	M	Output	A
18	ARCIZQ	M	CALZADA	A	ARCDER	A	Output	A
19	ARCIZQ	A	CALZADA	E	ARCDER	E	Output	B
20	ARCIZQ	A	CALZADA	E	ARCDER	M	Output	M
21	ARCIZQ	A	CALZADA	E	ARCDER	A	Output	M
22	ARCIZQ	A	CALZADA	M	ARCDER	E	Output	A
23	ARCIZQ	A	CALZADA	M	ARCDER	M	Output	A
24	ARCIZQ	A	CALZADA	M	ARCDER	A	Output	A
25	ARCIZQ	A	CALZADA	A	ARCDER	E	Output	A
26	ARCIZQ	A	CALZADA	A	ARCDER	M	Output	A
27	ARCIZQ	A	CALZADA	A	ARCDER	A	Output	A

Tabla 38. Reglas del subsistema de evaluación de velocidad según geometría.

		ARCÉN IZQUIERDO					ARCÉN IZQUIERDO					ARCÉN IZQUIERDO		
ARCDER **E**		**E**	**M**	**A**	ARCDER **M**		**E**	**M**	**A**	ARCDER **A**		**E**	**M**	**A**
CALZADA	**E**	B	B	B	CALZADA	**E**	B	M	M	CALZADA	**E**	B	M	M
	M	M	M	A		**M**	A	A	A		**M**	A	A	A
	A	M	M	A		**A**	A	A	A		**A**	A	A	A
		ARCÉN IZQUIERDO					ARCÉN IZQUIERDO					ARCÉN IZQUIERDO		
CALZADA **E**		E	M	A	CALZADA **M**		E	M	A	CALZADA **A**		E	M	A
ARCÉN DERECHO	**E**	B	B	B	ARCÉN DERECHO	**E**	M	A	A	ARCÉN DERECHO	**E**	M	A	A
	M	B	M	M		**M**	M	A	A		**M**	A	A	A
	A	B	M	M		**A**	A	A	A		**A**	A	A	A
		ARCÉN DERECHO					ARCÉN DERECHO					ARCÉN DERECHO		
ARCIZQ **E**		**E**	**M**	**A**	ARCIZQ **M**		**E**	**M**	**A**	ARCIZQ **A**		**E**	**M**	**A**
CALZADA	**E**	B	B	B	CALZADA	**E**	B	M	M	CALZADA	**E**	B	M	M
	M	M	M	A		**M**	A	A	A		**M**	A	A	A
	A	M	M	A		**A**	A	A	A		**A**	A	A	A

Tabla 39. Representación de reglas en relación a las características de entrada.

El mecanismo de inferencias de este sistema tiene las siguientes características (Tabla 40):

Método AND	**prod**	Producto de los valores de entrada difusos
Método OR	**probor**	OR probabilístico de los conjuntos consecuentes
Implicación	**min**	Truncamiento de la función de pertenencia consecuente con el valor del antecedente
Agregación	**max**	Máximo de los conjuntos difusos
Defusificación	**centroid**	Centroide de los conjuntos difusos

Tabla 40. Características del sistema fuzzy basado en reglas.

5.4. Subsistema fuzzy de regulación de velocidad

El subsistema de regulación de velocidad tiene como entradas la pendiente y las salidas de los dos módulos descritos anteriormente, la velocidad específica, y la velocidad según geometría.

VARIABLE	TIPO	VALOR LINGÜÍSTICO	VALOR NUMÉRICO
PENDIENTE	Entrada	**N** (negativa)	-300, -20
		M (media)	-125, 125
		P (positiva)	20, 300
V_E	Entrada	**B** (baja)	0, 75
		M (media)	50, 100
		A (alta)	75, 1100
V_{geom}	Entrada	**B** (baja)	-5,5
		M (media)	0,10
		A (alta)	5,15

La salida es llamada velocidad regulada.

V_{reg}	**B** (baja)	30,60
	M (media)	50,90
	A (alta)	80,100

Las cuatro funciones de pertenencia diseñadas para cada una de las variables de entrada y la salida de este sistema están representadas en la Figura 33 y en la Figura 34. Las funciones pertenencia elegidas son de tipo trapezoidal y triangular para representar las diferentes situaciones que se pueden dar circulando por una carretera. Las funciones muestran la velocidad específica calculada, la pendiente y la velocidad "tipo" según la geometría de la carretera. Para la salida se muestra la función de la velocidad.

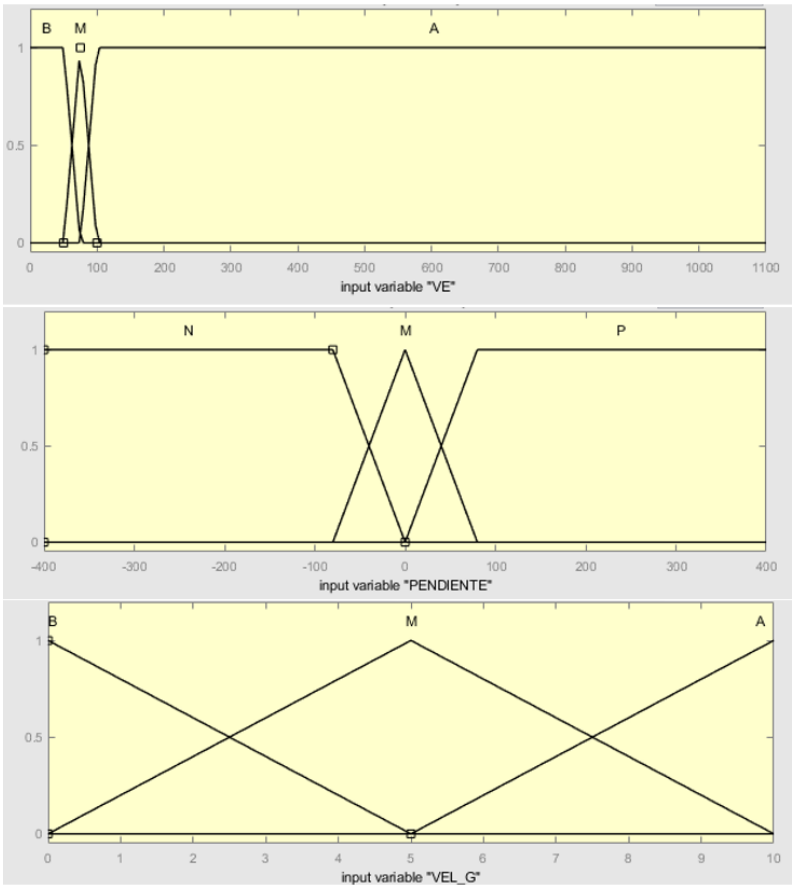


Figura 33: Funciones de pertenencia de entradas del subsistema de regulación de velocidad.

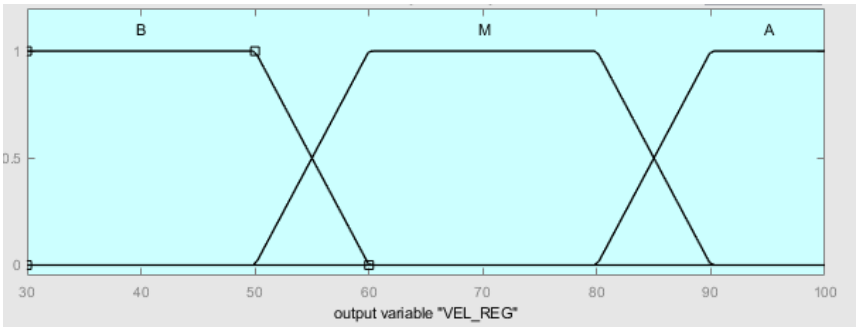


Figura 34: Funciones de pertenencia de la salida del subsistema de regulación de velocidad.

La Tabla 41 muestra la relación de reglas diseñadas para este módulo con el siguiente criterio intuitivo:

- Si la velocidad específica es grande la velocidad puede ser alta, media o baja.
- Si la velocidad específica es media la velocidad puede ser media o baja.
- Si la velocidad específica es baja la velocidad puede ser baja.
- Si la pendiente es negativa (circulando cuesta abajo) la velocidad se debe reducir.
- Si la pendiente es moderada o positiva la velocidad se puede mantener.
- Si la velocidad tipo según geometría es grande la velocidad puede ser alta, media o baja.

- Si la velocidad tipo según geometría es media la velocidad puede ser media o baja.
- Si la velocidad tipo según geometría es baja la velocidad puede ser baja.
- La velocidad regulada puede ser igual o menor que la velocidad específica.

REGLA	IF	IS	And IF	IS	And IF	IS	THEN	VEL_REG
1	VE	B	PENDIENTE	N	VEL_G	B	Output	B
2	VE	B	PENDIENTE	N	VEL_G	M	Output	B
3	VE	B	PENDIENTE	N	VEL_G	A	Output	B
4	VE	B	PENDIENTE	M	VEL_G	B	Output	B
5	VE	B	PENDIENTE	M	VEL_G	M	Output	B
6	VE	B	PENDIENTE	M	VEL_G	A	Output	B
7	VE	B	PENDIENTE	P	VEL_G	B	Output	B
8	VE	B	PENDIENTE	P	VEL_G	M	Output	B
9	VE	B	PENDIENTE	P	VEL_G	A	Output	B
10	VE	M	PENDIENTE	N	VEL_G	B	Output	B
11	VE	M	PENDIENTE	N	VEL_G	M	Output	B
12	VE	M	PENDIENTE	N	VEL_G	A	Output	B
13	VE	M	PENDIENTE	M	VEL_G	B	Output	B
14	VE	M	PENDIENTE	M	VEL_G	M	Output	M
15	VE	M	PENDIENTE	M	VEL_G	A	Output	M
16	VE	M	PENDIENTE	P	VEL_G	B	Output	B
17	VE	M	PENDIENTE	P	VEL_G	M	Output	M
18	VE	M	PENDIENTE	P	VEL_G	A	Output	M
19	VE	A	PENDIENTE	N	VEL_G	B	Output	B
20	VE	A	PENDIENTE	N	VEL_G	M	Output	B
21	VE	A	PENDIENTE	N	VEL_G	A	Output	M
22	VE	A	PENDIENTE	M	VEL_G	B	Output	B
23	VE	A	PENDIENTE	M	VEL_G	M	Output	M
24	VE	A	PENDIENTE	M	VEL_G	A	Output	A
25	VE	A	PENDIENTE	P	VEL_G	B	Output	B
26	VE	A	PENDIENTE	P	VEL_G	M	Output	M
27	VE	A	PENDIENTE	P	VEL_G	A	Output	A

Tabla 41. Reglas del subsistema de regulación de velocidad.

La Tabla 42 representa la relación entre las variables de entrada con las reglas diseñadas. Se puede observar que con pendientes negativas (circulando cuesta abajo), la velocidad de salida se reduce. En caso contrario, con una pendiente moderada (prácticamente inexistente) o positiva la salida puede ser una velocidad alta.

PENDIENTE NEGATIVA		VEL. GEOMETRÍA		
		B	**M**	**A**
V_E	**B**	B	B	B
	M	B	B	B
	A	B	B	M

PENDIENTE POSITIVA		VEL. GEOMETRÍA		
		B	**M**	**A**
V_E	**B**	B	B	B
	M	B	M	M
	A	B	M	A

Tabla 42. Representación de las reglas del subsistema de evaluación de velocidad según geometría.

PENDIENTE MEDIA		VEL. GEOMETRÍA		
		B	**M**	**A**
V_E	**B**	B	B	B
	M	B	M	M
	A	B	M	A

Tabla 43. Representación de las reglas del subsistema de velocidad por geometría.

El mecanismo de inferencias de este sistema tiene las siguientes características (Tabla 44):

Método AND	**prod**	Producto de los valores de entrada difusos
Método OR	**probor**	OR probabilístico de los conjuntos consecuentes
Implicación	**min**	Truncamiento de la función de pertenencia consecuente con el valor del antecedente
Agregación	**max**	Máximo de los conjuntos difusos
Defusificación	**centroid**	Centroide de los conjuntos difusos

Tabla 44. Características del sistema fuzzy basado en reglas.

5.5. Subsistema fuzzy de evaluación de condiciones externas.

El sistema de evaluación de condiciones externas se trata de un modelo borroso que tiene en cuenta factores externos que afectan a un vehículo durante su desplazamiento por una carretera como es el estado del pavimento y las condiciones meteorológicas. También tiene en cuenta el modo de desplazamiento que el propio conductor desea durante un viaje, es decir si desea viajar de forma más relajada o con mayor urgencia [38]. Estas variables son:

-Estado de la superficie.

-Meteorología (ambiente lluvioso o seco).

-Nivel de urgencia.

El nivel de urgencia especificado (tiene en cuenta la aceleración lineal y transversal del vehículo) es un conjunto dividido en subniveles que indican la forma de conducción para un vehículo sin disminuir la seguridad y el confort del conductor. Cada uno de estos niveles indica cómo de urgente es el desplazamiento con el vehículo de un lugar a otro. La Tabla 45 muestra los distintos niveles de urgencia especificado [38].

Nivel	Descripción
1	Calmado
2	Relajado
3	Normal
4	Urgencia
5	Emergencia propia
6	Emergencia declarada

Tabla 45. Nivel de urgencia especificado.

Las cuatro tres de pertenencia diseñadas para cada una de las variables de entrada y la salida del sistema de regulación están representadas en la Figura 35 y en la Figura 36. Las funciones pertenencia elegidas son de tipo trapezoidal y triangular para representar con más certeza las diferentes situaciones que se pueden dar circulando por una carretera. Las funciones muestran la velocidad específica calculada, la pendiente y la velocidad "tipo" según la geometría de la carretera. Para la salida se muestra la función de la velocidad.

VARIABLE	TIPO	VALOR LINGÜÍSTICO	VALOR NUMÉRICO
METEOROLOGÍA	Entrada	**S** (Seco)	0,7
		LL (Húmedo)	3,10
ESTADO PAVIMENTO	Entrada	**M** (Malo)	-5,5
		R (Regular)	0,10
		B (Bueno)	5,15
NIVEL DE URGENCIA	Entrada	**Calmado**	-2,2
		Relajado	0,4
		Normal	2,6
		Urgencia	4,8
		URG_PR (Urgencia propia)	6,10
		URG_DEC (Urgencia declarada)	8,12

La salida define cómo de malas o buenas son esas circunstancias para la velocidad. Los valores que puede tomar esta salida son condiciones muy malas, malas, regulares, buenas o muy buenas.

VARIABLE	TIPO	VALOR LINGÜÍSTICO	VALOR NUMÉRICO
Condiciones externas	Salida	**MN** (Muy negativas)	-2.5, 2.5
		N (Muy negativas)	0,5
		M (Medias)	2.5, 7.5
		P (Positivas)	5, 10
		MP (Muy positivas)	7.5, 12.5

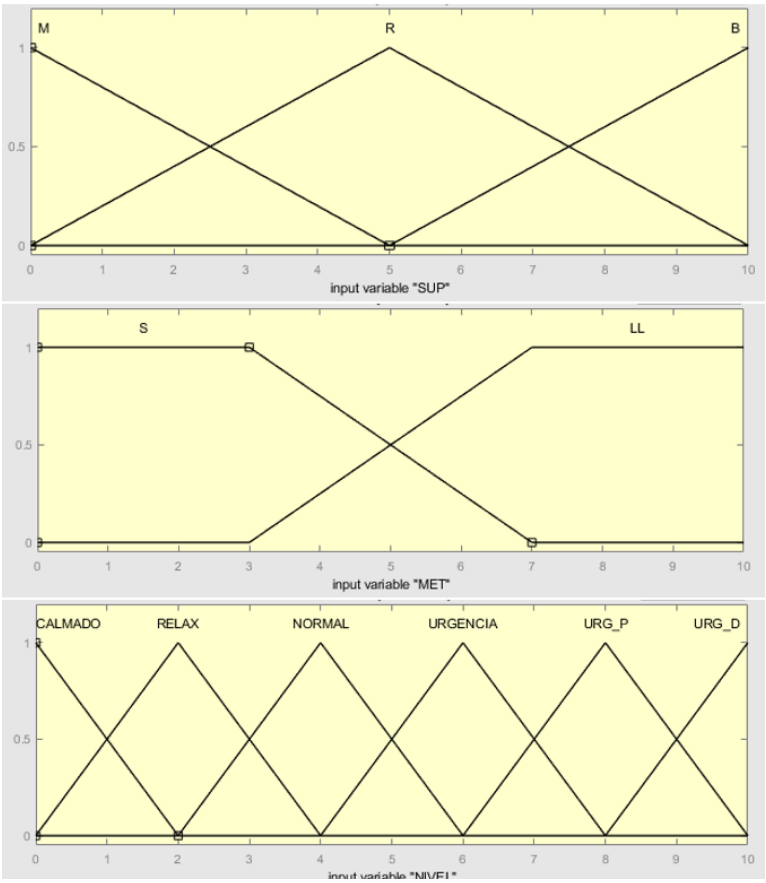


Figura 35: Funciones de pertenencia entradas del subsistema de evaluación de condiciones externas.

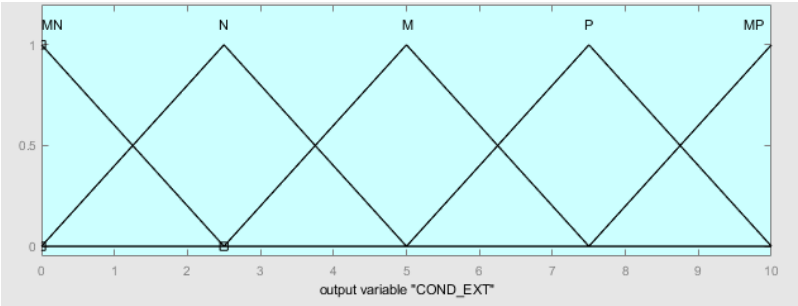


Figura 36: Funciones de pertenencia de salida del subsistema de evaluación de condiciones externas.

La Tabla 46 muestra la relación de reglas diseñadas para el sistema de recomendación.

REGLA	IF	IS	And IF	IS	And IF	IS	THEN	COND_EXT
1	SUP	M	MET	S	NIVEL	CALMADO	Output	MN
2	SUP	R	MET	S	NIVEL	CALMADO	Output	N
3	SUP	B	MET	S	NIVEL	CALMADO	Output	N
4	SUP	M	MET	LL	NIVEL	CALMADO	Output	MN
5	SUP	R	MET	LL	NIVEL	CALMADO	Output	N
6	SUP	B	MET	LL	NIVEL	CALMADO	Output	N
7	SUP	M	MET	S	NIVEL	RELAJADO	Output	MN
8	SUP	R	MET	S	NIVEL	RELAJADO	Output	N

REGLA	IF	IS	And IF	IS	And IF	IS	THEN	COND_EXT
9	SUP	B	MET	S	NIVEL	RELAJADO	Output	N
10	SUP	M	MET	LL	NIVEL	RELAJADO	Output	MN
11	SUP	R	MET	LL	NIVEL	RELAJADO	Output	N
12	SUP	B	MET	LL	NIVEL	RELAJADO	Output	N
13	SUP	M	MET	S	NIVEL	NORMAL	Output	N
14	SUP	R	MET	S	NIVEL	NORMAL	Output	M
15	SUP	B	MET	S	NIVEL	NORMAL	Output	P
16	SUP	M	MET	LL	NIVEL	NORMAL	Output	MN
17	SUP	R	MET	LL	NIVEL	NORMAL	Output	N
18	SUP	B	MET	LL	NIVEL	NORMAL	Output	M
19	SUP	M	MET	S	NIVEL	URGENCIA	Output	M
20	SUP	R	MET	S	NIVEL	URGENCIA	Output	P
21	SUP	B	MET	S	NIVEL	URGENCIA	Output	MP
22	SUP	M	MET	LL	NIVEL	URGENCIA	Output	N
23	SUP	R	MET	LL	NIVEL	URGENCIA	Output	M
24	SUP	B	MET	LL	NIVEL	URGENCIA	Output	P
25	SUP	M	MET	S	NIVEL	URG_PR	Output	M
26	SUP	R	MET	S	NIVEL	URG_PR	Output	P
27	SUP	B	MET	S	NIVEL	URG_PR	Output	MP
28	SUP	M	MET	LL	NIVEL	URG_PR	Output	N
29	SUP	R	MET	LL	NIVEL	URG_PR	Output	M
30	SUP	B	MET	LL	NIVEL	URG_PR	Output	P
31	SUP	M	MET	S	NIVEL	URG_DEC	Output	M
32	SUP	R	MET	S	NIVEL	URG_DEC	Output	P
33	SUP	B	MET	S	NIVEL	URG_DEC	Output	MP
34	SUP	M	MET	LL	NIVEL	URG_DEC	Output	N
35	SUP	R	MET	LL	NIVEL	URG_DEC	Output	M
36	SUP	B	MET	LL	NIVEL	URG_DEC	Output	P

Tabla 46. Reglas del subsistema de evaluación de condiciones externas.

La Tabla 47, la Tabla 48 y la Tabla 49 representan la relación entre las variables de entrada y las reglas diseñadas.

CALMADO		METEOROLOGÍA	
		S	**LL**
ESTADO SUPERFICE	**M**	MN	MN
	R	N	N
	B	N	N

RELAJADO		METEOROLOGÍA	
		S	**LL**
ESTADO SUPERFICE	**M**	MN	MN
	R	N	N
	B	N	N

Tabla 47. Representación de las reglas del subsistema de evaluación de las condiciones externas para los casos de nivel especificado como calmado y relajado.

NORMAL		METEOROLOGÍA	
		S	**LL**
ESTADO SUPERFICE	**M**	N	MN
	R	M	N
	B	P	M

URGENCIA		METEOROLOGÍA	
		S	**LL**
ESTADO SUPERFICE	**M**	N	N
	R	P	M
	B	MP	P

Tabla 48. Representación de las reglas del subsistema de evaluación de las condiciones externas para los casos de nivel especificado como normal y urgencia.

URGENCIA PROPIA		METEOROLOGÍA	
		S	**LL**
ESTADO SUPERFICE	**M**	N	N
	R	P	M
	B	MP	P

URGENCIA DECLARADA		METEOROLOGÍA	
		S	**LL**
ESTADO SUPERFICE	**M**	M	N
	R	P	M
	B	MP	P

Tabla 49. Representación de las reglas del subsistema de evaluación de las condiciones externas para los casos de nivel especificado como urgencia propia y declarada.

El mecanismo de inferencias de este sistema tiene las siguientes características (Tabla 50):

Método AND	**prod**	Producto de los valores de entrada difusos
Método OR	**probor**	OR probabilístico de los conjuntos consecuentes
Implicación	**min**	Truncamiento de la función de pertenencia consecuente con el valor del antecedente
Agregación	**max**	Máximo de los conjuntos difusos
Defusificación	**lom**	Mayor de los máximos

Tabla 50. Características del sistema fuzzy basado en reglas.

5.6. Subsistema de ajuste final de velocidad

Finalmente, la velocidad regulada por la geometría se ajusta a las condiciones externas reduciendo o manteniendo esta según la adversidad de las condiciones.

La salida del modelo recomendador de velocidad es la *velocidad recomendada* a la que se debe circular un vehículo por una carretera con determinada geometría en condiciones adecuadas de seguridad y confort.

VARIABLE	TIPO	VALOR LINGÜÍSTICO	VALOR NUMÉRICO
Velocidad regulación	Salida	**B** (baja)	0, 60
		M (media)	50, 90
		A (alta)	80, 100

El sistema de ajuste de velocidad hace uso de una escala de valores con un rango entre [0-10] donde quedan representadas las condiciones externas de muy negativas (valor 0) a condiciones muy positivas valor 10) de forma proporcional se muestra en la Tabla 51.

Condiciones	Escala	Reducción de velocidad
Muy negativas	0	20%
Negativas	2.5	15%
Medias	5	10%
Positivas	7.5	5%
Muy positivas	10	0%

Tabla 51. Reducción de velocidad según condiciones externas.

La reducción de velocidad se hace de forma porcentual respecto de la velocidad calculada por el sistema de regulación. La forma de cálculo del valor exacto para efectuar la reducción se muestra en la siguiente expresión:

$$vreg = vreg - [2 \times vreg \times (10 - factor) / 100] \quad (12)$$

Por ejemplo, si el factor de reducción es 8.75 se aplicará una reducción de 2.5% sobre la velocidad de salida del sistema de regulación.

Posteriormente esta velocidad ajustada se asigna a su clase de velocidades recomendadas en incrementos de 10 km/h. Estas velocidades recomendadas son 30 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 60 km/h, 70 km/h, 80 km/h, y 90 km/h. Esto se muestra en la Figura 37.

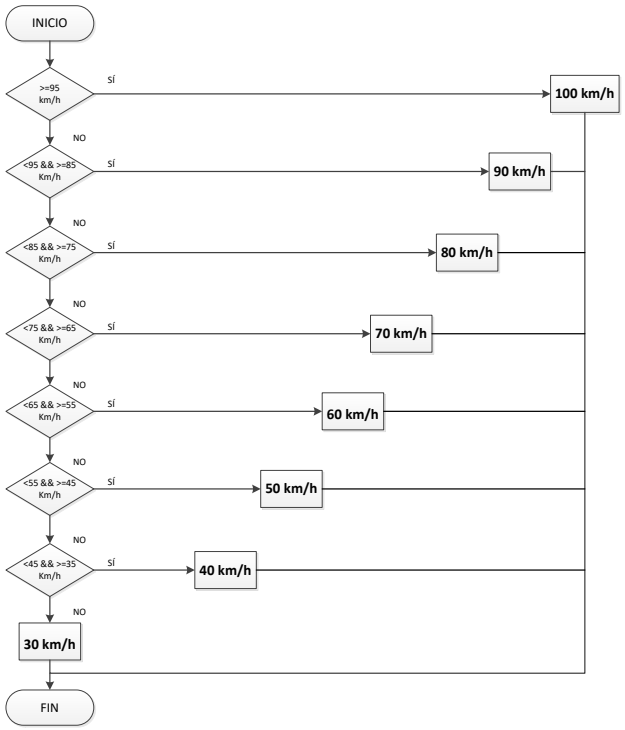


Figura 37: Asignación de la velocidad final ajustada a su velocidad recomendada.

Posteriormente y una vez obtenida la velocidad final de recomendación, es representada de tres formas diferentes:

1. Velocidad recomendada para cada elemento del trazado. Es la velocidad final.

2. Velocidad suavizada mediante la media geométrica de los últimos 50 metros. La media geométrica es calculada mediante la siguiente expresión:

$$\bar{X} = \sqrt[n]{x_1 \times x_2 \times x_3 \ldots x_n} \tag{13}$$

3. Velocidad suavizada por tramos homogéneos de 200 metros. La velocidad recomendada para cada tramo es la mínima de las velocidades recomendadas por cada elemento en dicho tramo.

El sistema de recomendación de velocidad calcula la velocidad adecuada teniendo en cuenta toda la geometría de la vía por la que un vehículo circula sin superar el límite máximo legal (Tabla 52).

CARRETERA CONVENCIONAL	VELOCIDAD MÁXIMA (km/h)
INTERBANA	90
ACCESIBILIDAD	50
PERIURBANA	80

Tabla 52. Velocidad máxima para cada tipo de carretera.

La Tabla 53 muestra un ejemplo del resultado del sistema inteligente de cálculo de velocidad para un tramo de la carretera.

Punto km	Incremento punto km	Arcén izq.	Calzada	Arcén der.	Radio	Inclinación	Ve	Vregulada	Vajustada	Vrecomendada	Vsuavizada	Velocidad por tramos
37	130	26	70	18	9000	0	376.47	92.40	87.78	90	80.68	90
37	140	26	70	18	9000	1	374.95	92.37	87.75	90	81.56	90
37	150	26	70	18	9000	2	374.95	92.35	87.73	90	82.17	90
37	160	26	70	18	9000	3	374.95	92.32	87.71	90	82.78	90
37	170	26	70	18	9000	3	376.47	92.32	87.71	90	83.37	90
37	180	26	70	18	9000	4	376.47	92.30	87.69	90	83.92	90
37	190	26	70	18	9000	4	377.98	92.30	87.69	90	84.40	90
37	200	26	70	18	4380	4	264.74	92.30	87.69	90	84.86	90
37	210	26	70	18	3070	4	223.39	92.30	87.69	90	85.28	90
37	220	26	70	18	2100	4	185.48	92.30	87.69	90	85.66	90
37	230	26	70	18	1410	4	377.98	92.30	87.69	90	86.02	90
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 53. Ejemplo del sistema de recomendación de velocidad.

En los anexos de este trabajo se recogen las figuras obtenidas para las carreteras estudiadas con la relación de sus características geométricas y las salidas obtenidas por el sistema de recomendación de velocidad para múltiples experimentos variando la meteorología, el nivel de urgencia del conductor en el desplazamiento y el estado del pavimento. A continuación, se muestran las figuras para algunos de los resultados obtenidos con el sistema de recomendación de velocidad.

La parte superior y central de cada figura muestra las dimensiones de los arcenes derecho e izquierdo y la calzada en decímetros respectivamente. La parte inferior de cada figura muestra la velocidad ins-

tantánea recomendada por el sistema (km/h, en azul), la velocidad suavizada mediante la media geometría con los 50 metros anteriores (km/h, en verde) y la velocidad recomendada suavizada por tramos de 200m (km/h, en rojo).

Las Figura 38 y Figura 39 muestran los resultados obtenidos por el sistema de cálculo para unas condiciones externas con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas para la geometría de los tramo de carretera M-607 y M-305.

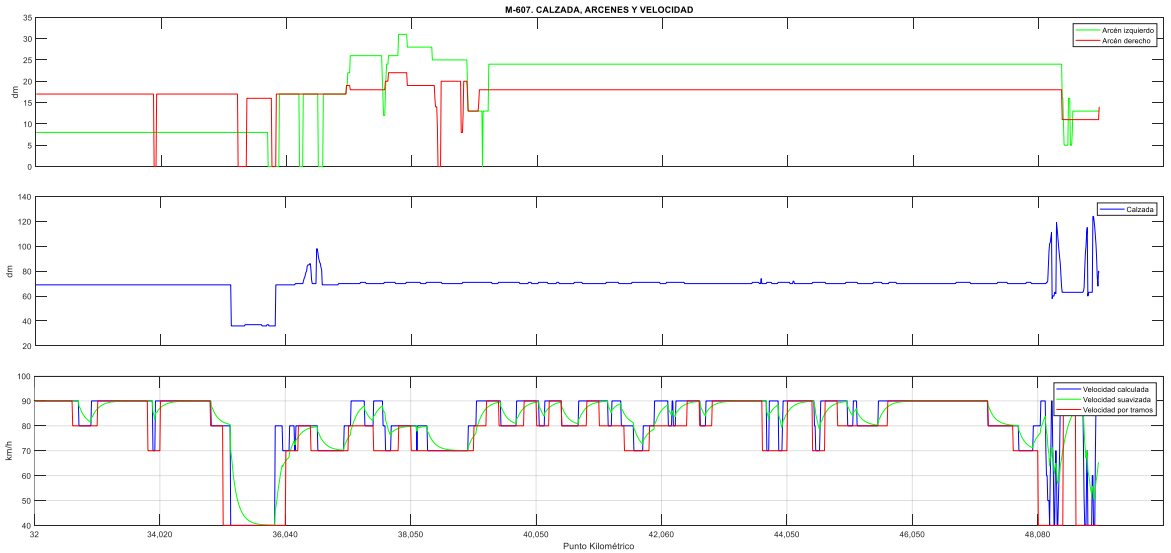


Figura 38. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

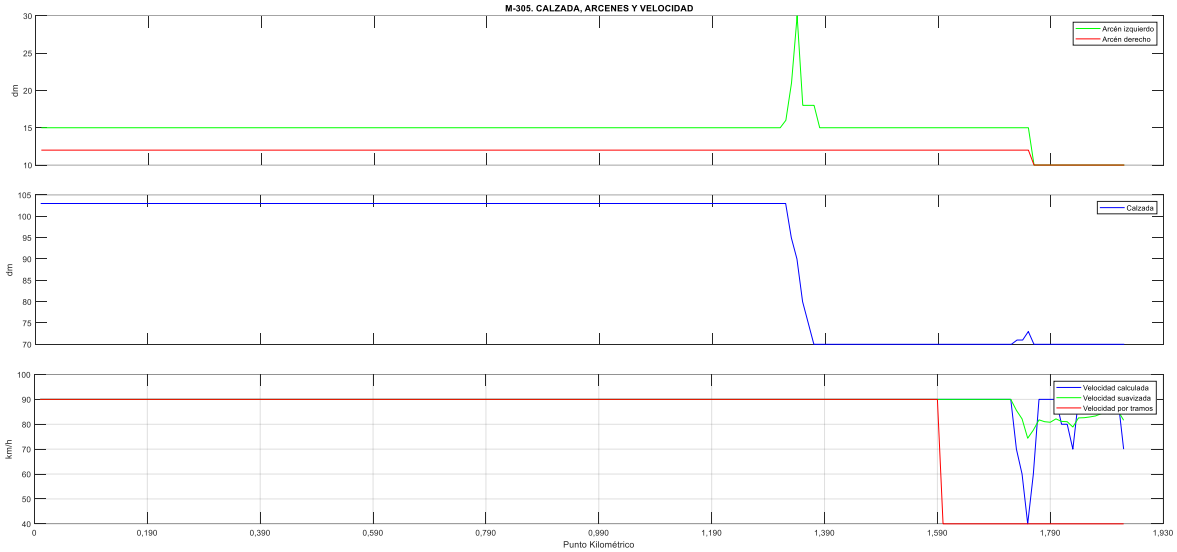


Figura 39. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

La variación de la velocidad está asociada en primer lugar a las variaciones de su radio de curvatura y peralte, si el radio de curvatura es muy grande la carretera es prácticamente recta y la velocidad puede ser máxima. En menor medida a los cambios en la pendiente. Como se observa en las figuras anteriores, las variaciones de velocidad también se ven afectadas en gran medida a la geometría de los arcenes y de la calzada.

La Figura 40 y la Figura 41 representan la velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramos de carretera estudiado en este trabajo con un nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

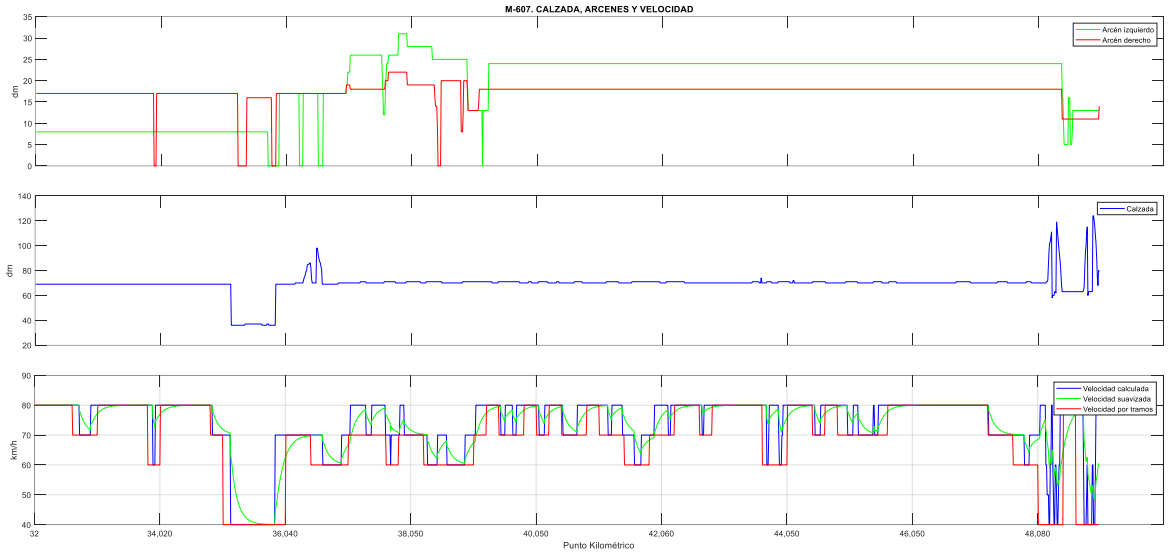


Figura 40. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

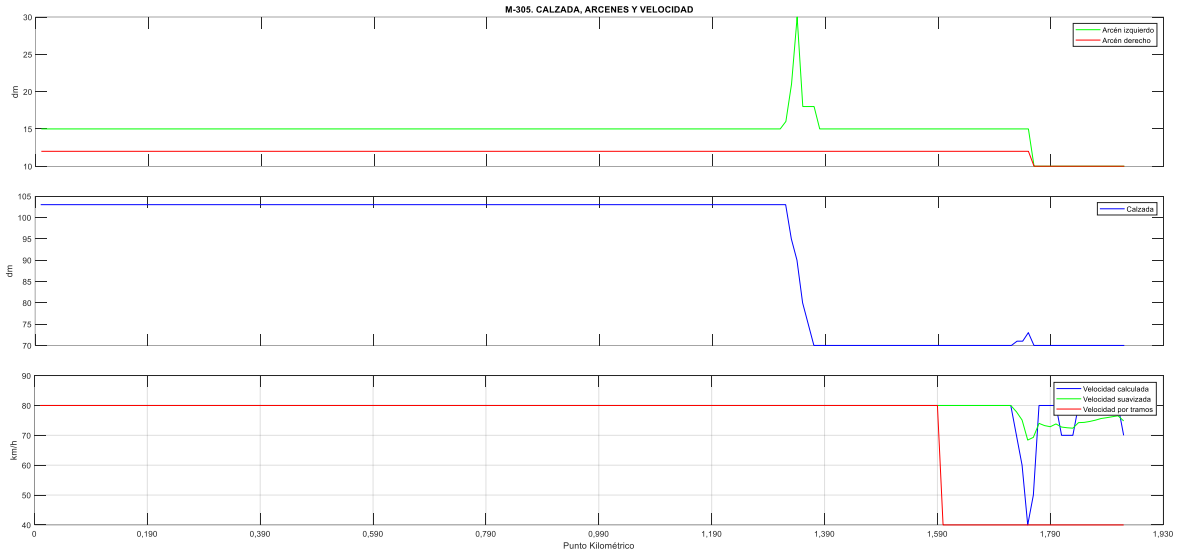


Figura 41. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

Como se observa en las figuras anteriores, variaciones de velocidad se ven afectadas en gran medida a la geometría de los arcenes y de la calzada y además la velocidad se muestra reducida por el nivel de conducción relajado respecto, por ejemplo, a las Figura 38 y Figura 39, que tienen idénticas condiciones meteorológicas y buen estado del pavimento pero en este caso el nivel de urgencia en el desplazamiento es normal.

Las Figura 42 y Figura 43 representan la velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para los tramos de carretera estudiados en este trabajo con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.

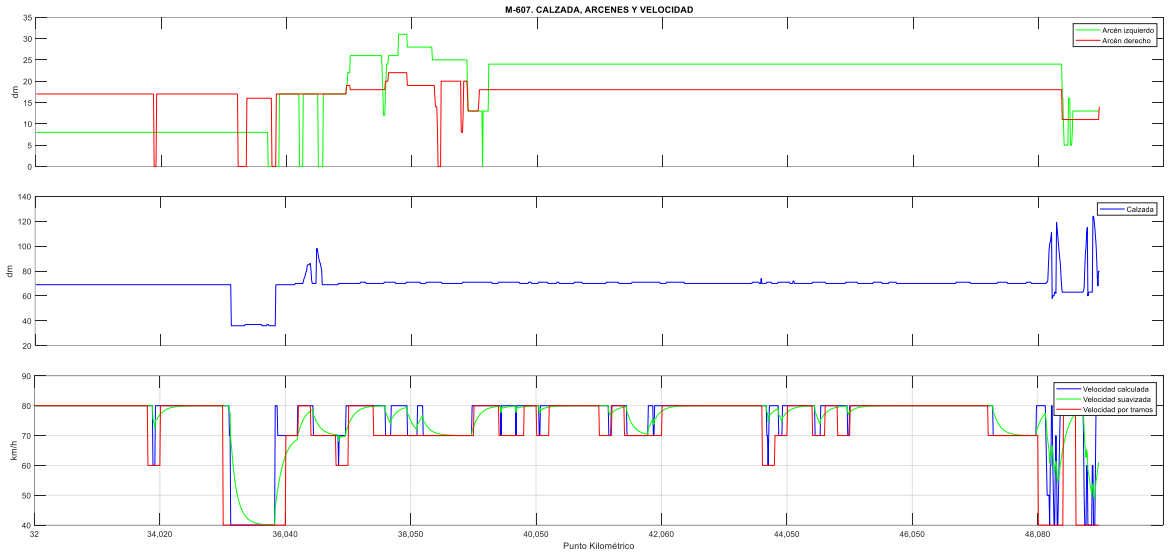


Figura 42. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.

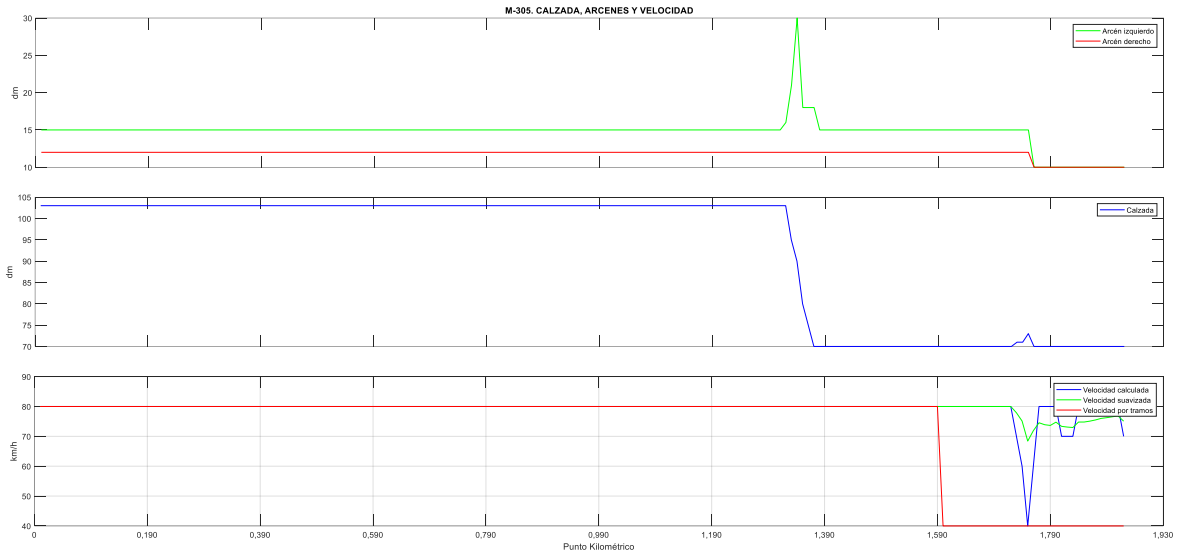


Figura 43. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.

Como se observa en las figuras anteriores, las variaciones de velocidad se ven afectadas en gran medida a la geometría de los arcenes y de la calzada. Además, comparando con las Figura 38 y Figura 39, que poseen condiciones meteorológicas de seco y buen estado del pavimento con un nivel de urgencia en el desplazamiento normal, la velocidad se muestra reducida por las condiciones meteorológicas, en este caso de lluvia.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se ha presentado un sistema de identificación de carreteras convencionales basado en técnicas inteligentes capaz de clasificar si son interurbanas, periurbanas o de accesibilidad a partir información sobre la geometría de las mismas, obtenida a partir del inventario cartográfico de la Comunidad de Madrid. La lógica difusa permite manejar de manera adecuada la incertidumbre y ambigüedad de las variables relativas al dominio de este problema.

Por otro lado, también se presenta un sistema de recomendación de velocidad que adapta la velocidad a las características de la geometría de la propia carretera y a otras variables externas.

Se han propuesto tres sistemas basados en lógica borrosa: un sistema borroso basado en reglas, un sistema neuro-borroso adaptativo empleando ANFIS y, por último, un sistema basado en clustering difuso. Estos métodos hacen uso de las dimensiones del ancho de arcenes y la anchura de la calzada. De estos tres métodos se obtiene un mejor funcionamiento con el sistema borroso basado en reglas.

Los valores registrados en las tablas de *ratio* en el capítulo de *Resultados* indican que se han clasificado muestras de otros tipos de tramo a los que la geometría real de la carretera corresponde, ya que un tramo de carretera está clasificado teóricamente como un solo tipo específico, pero también reconoce distintos tipos subyacentes en un mismo tramo de carretera que pueden deberse a diferentes motivos como desgaste, mal mantenimiento, etc. Quizá esto pueda justificar zonas de riesgo en determinados tramos de carreteras definidos comúnmente como puntos negros y en los que ocurren accidentes de forma reiterada.

Los resultados obtenidos son buenos e interesantes con el sistema de identificación basado en reglas borrosas ya que se establece la correspondencia bastante bien entre los tramos bajo estudio. Los casos mal clasificados, como muestran las tablas de *Estimación* en el capítulo 4, indican que parte de la información está solapada, cómo se intuye en las representaciones de las distribuciones de las variables de entrada, ya que existen medidas de la geometría de la carretera muy parecida para diferentes tramos analizados. No obstante, este método para distinguir de forma correcta carreteras no es completamente efectivo porque existen tramos con características iguales, pero sí es capaz de distinguir tramos con características para velocidades altas, medias o bajas.

Esto puede servir de punto de partida o inspiración para diseñar un sistema de cálculo de velocidad para este tipo de carreteras en condiciones de seguridad y comodidad. Por eso se ha desarrollado un sistema de recomendación de velocidad que adecúa la velocidad a la propia geometría de la carretera sin rebasar el límite máximo para dicha vía. Este sistema calcula la velocidad recomendada regulando la velocidad específica calculada según la normativa establecida por los expertos, pero teniendo en cuenta además las dimensiones de la plataforma, la pendiente, y algunas condiciones externas como el nivel de urgencia durante el desplazamiento, el estado del pavimento de la carretera o las condiciones meteorológicas.

6.1. Trabajos futuros.

Un posible trabajo futuro a partir del sistema de cálculo de velocidad recomendada de carreteras propuesto sería diseñar y desarrollar una herramienta software que, a partir de datos previamente recogidos y en modo offline, genere mapas de velocidad de forma automática para un determinado tramo de

carretera. Este tramo de carretera puede ser de nueva construcción o para re-etiquetar un tramo concreto con su velocidad segura de circulación.

Esta herramienta permitirá un chequeo sobre la velocidad asignada a un determinado tramo a través de la identificación previa de las características que tiene dicho tramo, y así verificar la velocidad segura de circulación actual. Esto ofrece la posibilidad de llevar a cabo un análisis sobre un determinado tramo en el cual ocurran accidentes de forma reiterada.

También permitiría generar mapas de velocidad que, instalados en un vehículo inteligente podría ofrecer al conductor un indicador de aviso o alerta para una conducción más segura.

Por otro lado, al determinar la velocidad de recomendación para el conductor, se puede mostrar con indicación visual y/o sonora al conductor si el vehículo supera la misma. El valor determinado puede emplearse también como velocidad de supervisión para el propio vehículo. Por ejemplo, haciendo uso de un sistema odométrico que mida la velocidad con la que circula el vehículo que es comparada con la velocidad calculada por el sistema, pudiendo tener algún efecto sobre el sistema de control de crucero de velocidad del vehículo para reducir la velocidad del vehículo si fuera superior a la calculada por el sistema de cálculo/decisión inteligente (Figura 44).

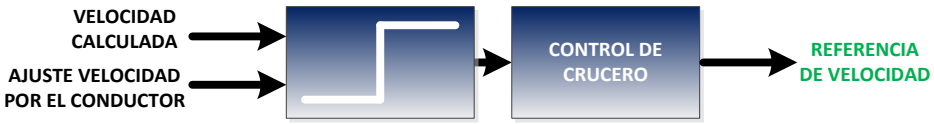


Figura 44. Sistema de recomendación o supervisión de velocidad para un vehículo.

Con otro enfoque, esta velocidad calculada como referencia para el sistema de control puede introducirse en el sistema de control de velocidad de crucero. En este caso no sería necesario visualizar las señales laterales de indicación de velocidad que están situadas a lo largo de la vía; el sistema aplica la velocidad calculada a partir del sistema de medida de la geometría de la carretera o vía no convencional incorporado en el vehículo, respetando en todo momento las señales.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Ministerio de Fomento. Orden FOM/273/2016, de 19 de febrero, por la que se aprueba la Norma 3.1- IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras.

[2] Jiménez Alonso, Felipe; Aparicio Izquierdo, Francisco. Cálculo de la velocidad segura de circulación de los vehículos automóviles en función de la geometría de la carretera. Comparación de modelos. INSIA-UPM.

[3] Zadeh, Lotfi, "Fuzzy Sets" Information and Control 8:338-353, 1965.

[4] Moreno, S., Romana, M.G., Santos, M. Fuzzy model of vehicle delay to determine the level of service of two-lane roads. Expert Systems with Applications 54, 48-60, 2016.

[5] Santos, M., Un enfoque aplicado del control inteligente, Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 8, 283-296, 2011.

[6] Wang, L.X. Fuzzy systems are universal approximators, Proceedings of the international Conference on Fuzzy Systems (San Diego. USA). 1992

[7] Jang, Jyh-Shing R. Fuzzy Modeling Using Generalized Neural Networks and Kalman Filter Algorithm. Proceedings of the 9th National References Conference on Artificial Intelligence, Anaheim, CA, USA, July 14–19. 2. pp. 762–767. 1991

[8] Jang, J.-S. R., 'Anfis: Adaptive-network based fuzzy inference system', IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics 23, 665–684.1993

[9] Abraham, A. , "Adaptation of Fuzzy Inference System Using Neural Learning", in Nedjah, Nadia; de Macedo Mourelle, Luiza, Fuzzy Systems Engineering: Theory and Practice, Studies in Fuzziness and Soft Computing, 181, Germany: Springer Verlag, pp. 53–83. 2005.

[10] Jang, J-SR, C.-T. Sun, and E. Mizutani. Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence, 1996. Prentice Hall.

[11] Jang, J-SR. Self-learning fuzzy controllers based on temporal backpropagation. Neural Networks, IEEE Transactions on, 3(5), 714–723. 1992.

[12] Jang, J-SR, & Sun, Chuen-Tsai. Neuro-fuzzy modeling and control. Proceedings of the IEEE, 83(3), 378–406. 1995.

[13] Lewis, Frank L, Campos, Javier, & Selmic, Rastko. Neuro-fuzzy control of industrial systems with actuator nonlinearities. Vol. 24. Siam. 200.

[14] Güler, Inan, & Ubeyli, Elif Derya.. Adaptive neuro-fuzzy inference system for classification of EEG signals using wavelet coefficients. Journal of neuroscience methods, 148(2), 113–121. 2005.

[15] Suri, Jasjit S, Spaan, Jos AE, et al. Advances in cardiac signal processing. Springer. 2007.

[16] Bollen, Johan, Mao, Huina, & Zeng, Xiaojun. Twitter mood predicts the stock market. Journal of Computational Science, 2(1), 1–8. 2011.

[17] Tahmasebi, P. "A hybrid neural networks-fuzzy logic-genetic algorithm for grade estimation". Computers & Geosciences. 42: 18–27. 2012.

[18] Tahmasebi, P. "Comparison of optimized neural network with fuzzy logic for ore grade estimation". Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 4: 764–772. 2010.

[19] Jyh-Shing Roger Jang. Input Selection for ANFIS Learning. Department of Computer Science, National Tsi Hua University Hsinchu, Taiwan.

[20] Bezdek, James C.; Ehrlich, Robert; Full, William (1984). «FCM: The Fuzzy c-Means Clustering Algorithm». Computers & Geosciences 10 (2-3): 191-203. 1984.

[21] Yang, M. S. «A Survey of Fuzzy Clustering». Mathl. Comput. Modelling 18 (11): 1-16. 1993.

[22] Krishnapuram, Raghu; Keller, James M. «A Possibilistic Approach to Clustering». IEEE Transactions on Fuzzy Systems 1 (2). 1993.

[23] Amini, J. Saradjian M.R., Blais, J.A.R., Lucas, C., and Azizi, A., Automatic road-side extraction from large scale image maps, International journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4, pp. 95-107. 2002.

[24] Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W. and EBNER, H., Automatic road extraction based on multi scale grouping and content. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 657, 777-785. 1999.

[25] Park S. R.,T. Kim, Semi-Automatic road extraction algorithm from IKONOS images using template matching. 2001.

[26] Gruen, A., Agouris, P., Li, H., Linear feature extraction with dynamic programming and globally enforced least squares matching, Automatic Extraction of Man-made Objects from Aerial and Space Images, pp: 83-94. 1995.

[27] Barzohar, M .D. B. Cooper, Automatic finding of main roads in aerial images by using Geometric Stochastic models and estimation, IEEE trans. PAMI, Vol.18, No.7, pp. 707-721. 1996.

[28] Kim, T., Devarajan V., and Manry M., Road extraction from aerial images using neural networks. 1997.

[29] Onur Tuncer, Member, IEEE. Fully Automatic Road Network Extraction from Satellite Images. 2007.

[30] Mokhtarzade, M., Valadan, Zoej, M. J., Ebadi, H. Automatic road extraction from high resolution satellite images using neural networks, texture analysis, fuzzy clustering and genetic algorithms. Dept. of Geomatics Engineering, K.N. Toosi University, Tehran. 2008.

[31] Rizei, Amir; Burl, Jeffrey B. Prediction of Vehicle Velocity for Model Predictive Control. ESELVIER. IFAC-PapersOnLine 48-15 (2015) 257–262. 2015.

[32] Fotouhi,A., Montazeri-Gh, M., and Jannatipour, M. Vehicle's velocity time series prediction using neural network. International Journal of Automotive Engineering,1(1),8. 2011.

[33] Keulen, T.v., Naus, G., Jager, B.d., Molengraft, R.v.d., Steinbuch, M., and Aneke, E. Predictive cruise control in hybrid electric vehicles. World Electric Vehicle Journal, 3. 2009.

[34] Takashi Ogawa, Kiyokazu Takagi. Lane recognition using on-vehicle LIDAR. Conference Paper - January 2006 DOI: 10.1109/IVS.2006.1689684 - IEEE Xplore. 2006.

[35] Xinping Yan, Rui Zhang, JieMa and Yulin Ma. Considering Variable Road Geometry in Adaptive Vehicle Speed Control. Intelligent Transport Systems Research Center, Engineering Research Center for Transportation Safety (Ministry of Education), Wuhan University of Technology, China. Department of Automobile Engineering, Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China. Accepted 4 November 2013.

[36] David Vaugh. Vehicle speed control based on gps/map matching of posted speeds. Patent Number: 5.485.1261. Date of Patent: Jan. 16, 1996. United States Patent. 1996.

[37] Tim Schwickart1, Holger Voos, Jean-Régis Hadji-Minaglou and Mohamed Darouach. A Novel Model-Predictive Cruise Controller for Electric Vehicles and Energy-Efficient Driving. 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2014.

[38] Yu Zhang, Huiyan Chen, Steven L. Waslander, Tian Yang, Sheng Zhang, Guangming Xiong and Kai Liu.. Toward a More Complete, Flexible, and Safer Speed Planning for Autonomous Driving via Convex Optimization. Sensors 2018, 18(7), 2185. 2018.

ANEXO I

Resultados obtenidos de los experimentos simulados con el sistema de recomendación de velocidad.

A continuación se representan las figuras obtenidas con el sistema de recomendación de velocidad para distintos experimentos variando las condiciones externas para tramos estudiados en este trabajo junto a los datos disponibles del informe de cartografía para cada carretera analizada.

1.1 ***EXPERIMENTO:*** *Nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones geométricas.*

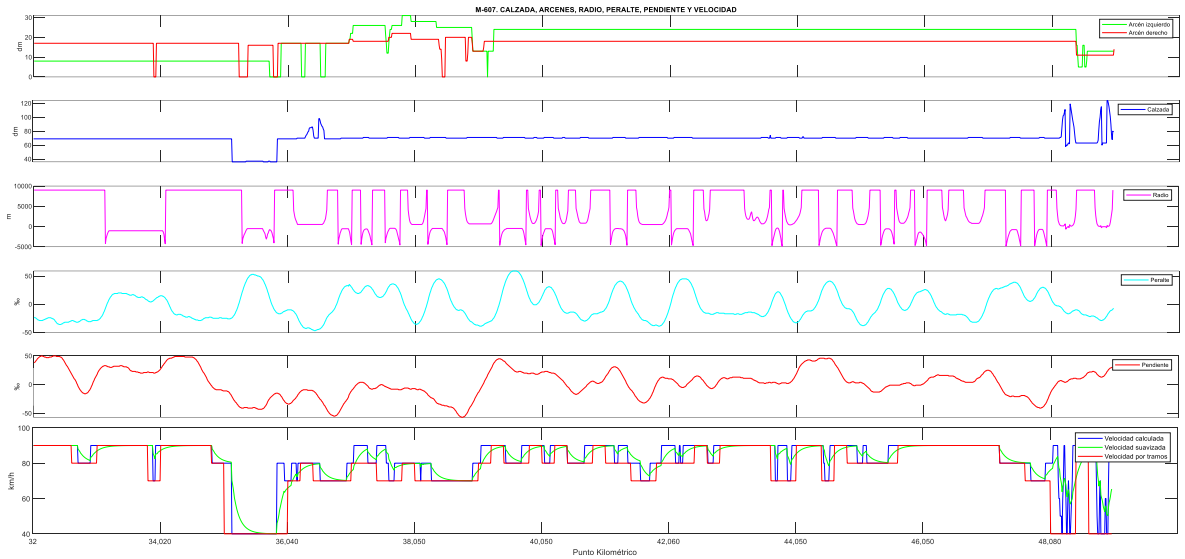


Figura 45. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

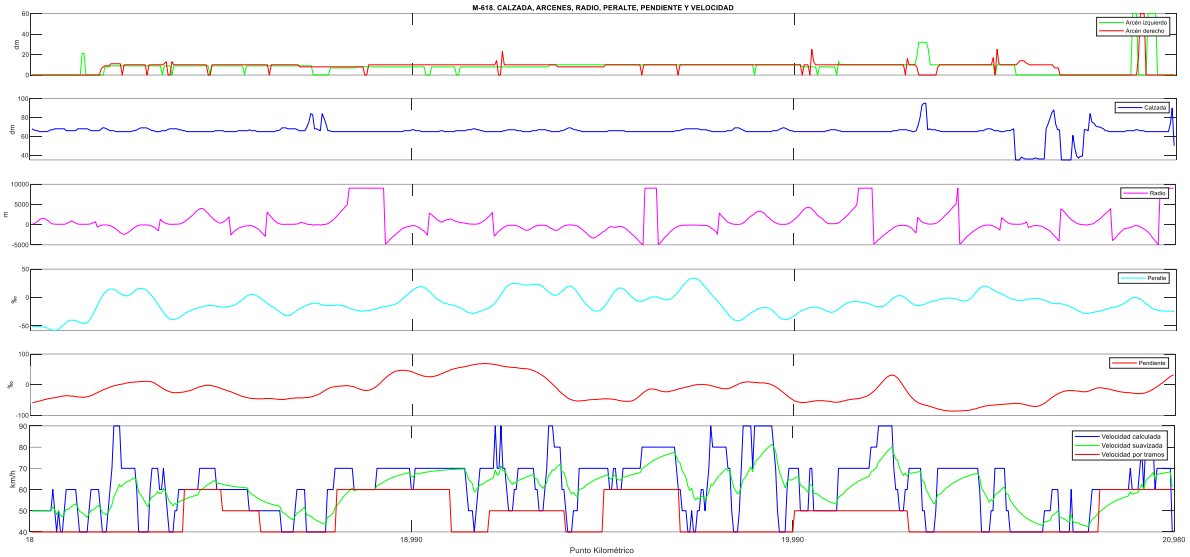


Figura 46. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-618 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

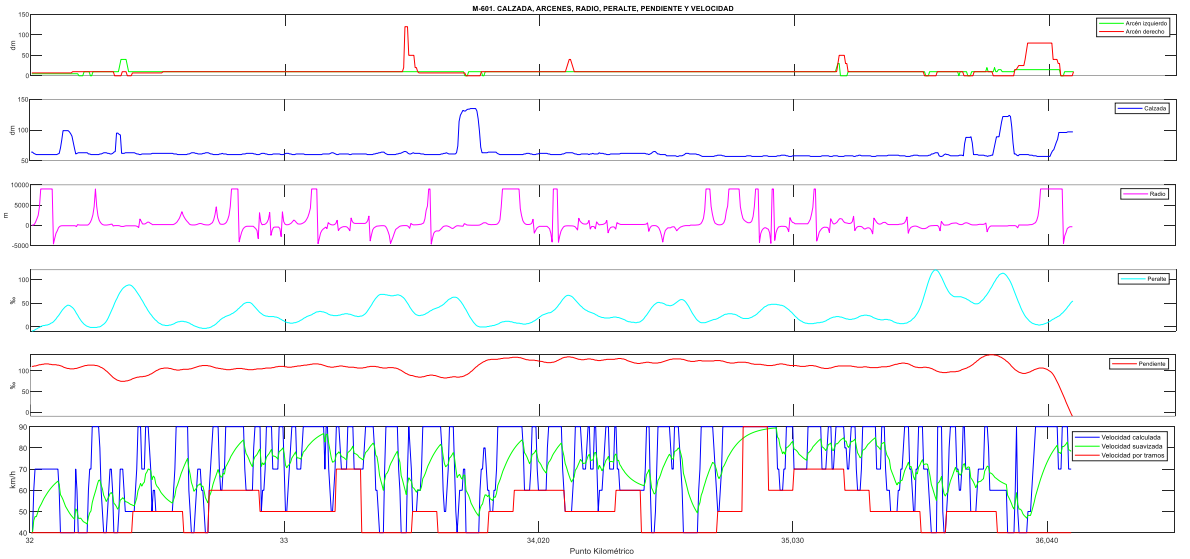


Figura 47. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-601 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

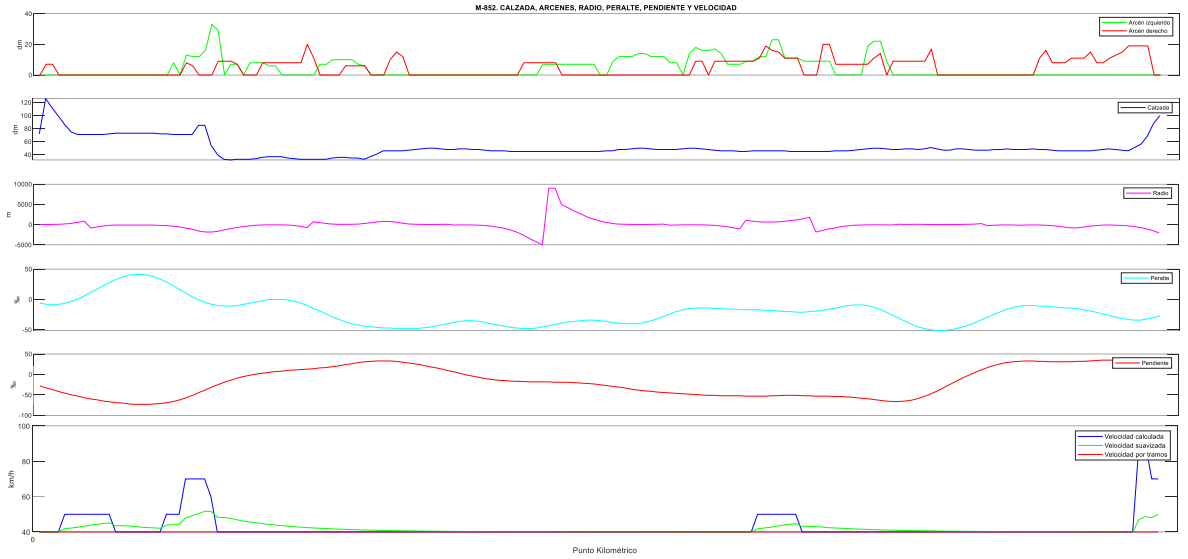


Figura 48. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-852 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

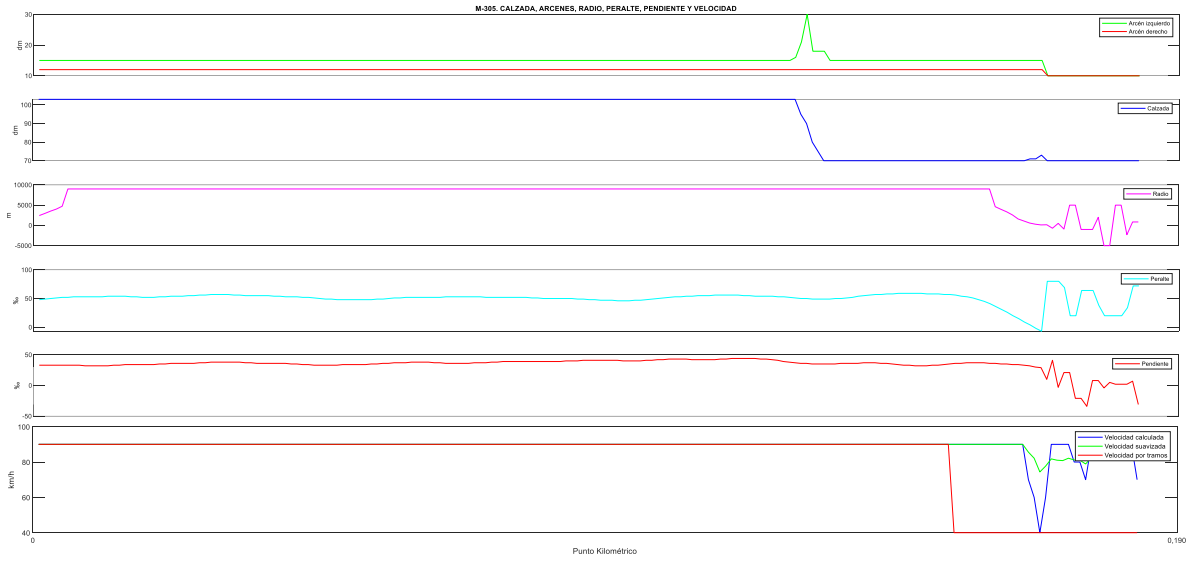


Figura 49. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

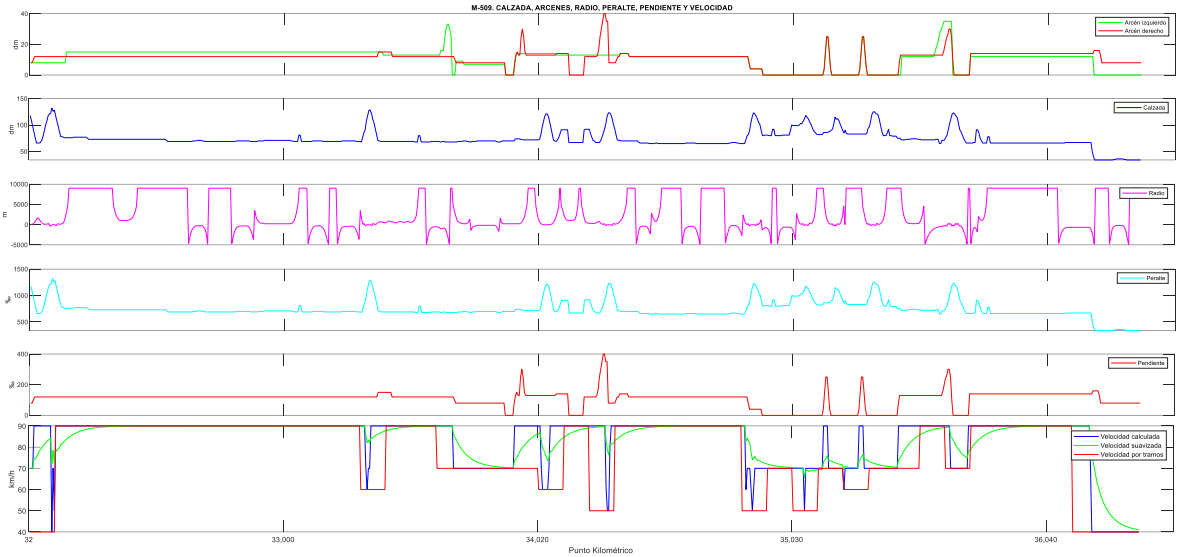


Figura 50. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-509 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

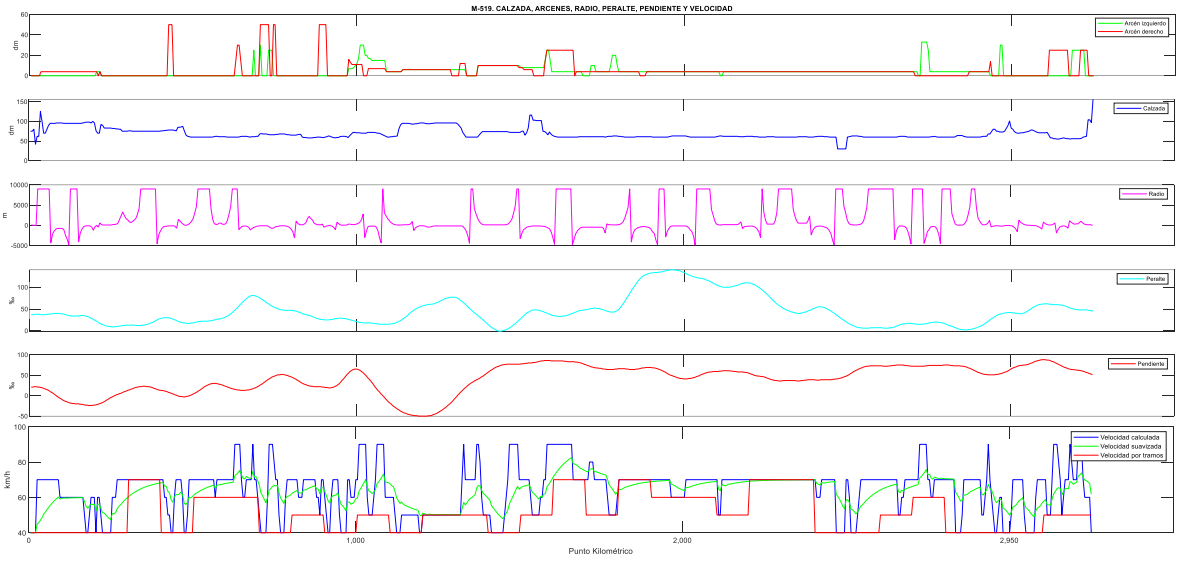


Figura 51. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-519 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

1.2 ***EXPERIMENTO:*** *Nivel de conducción urgente, buen estado del pavimento y buenas condiciones geométricas.*

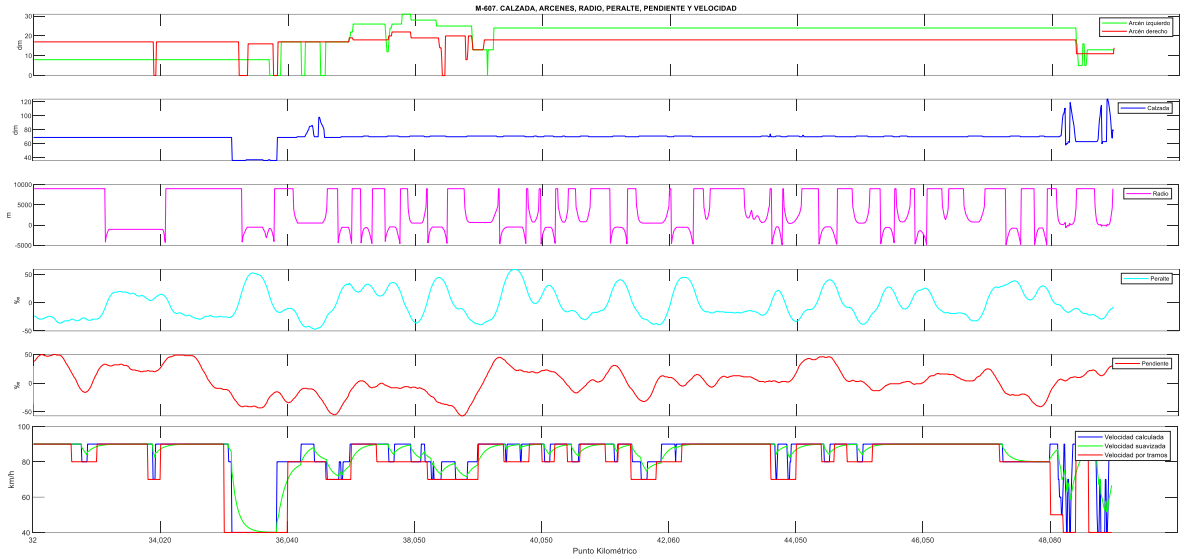


Figura 52. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción urgente, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

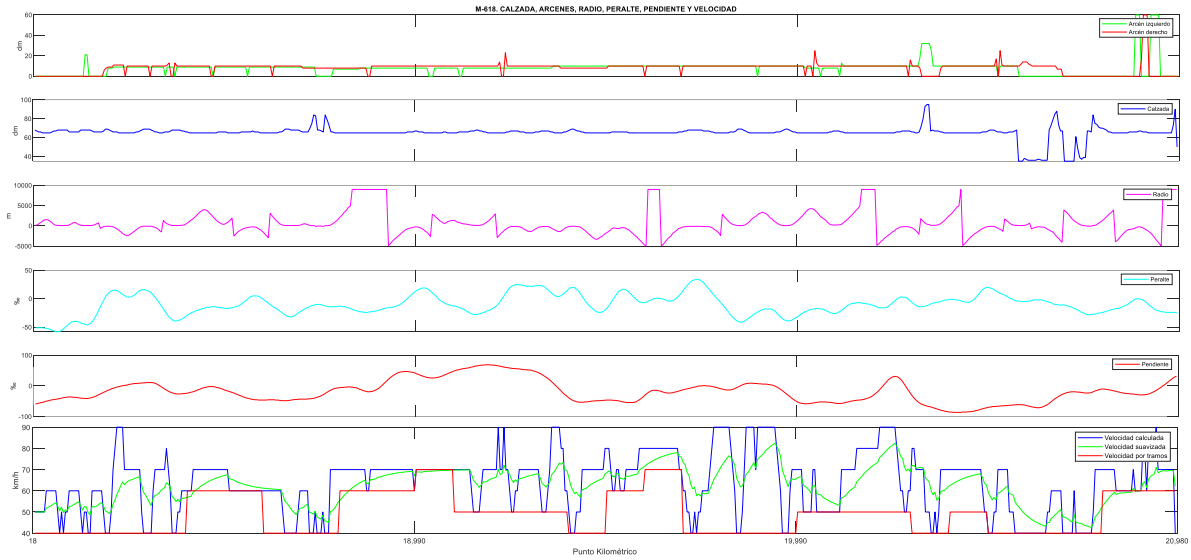


Figura 53. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-618 con un nivel de conducción urgente, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

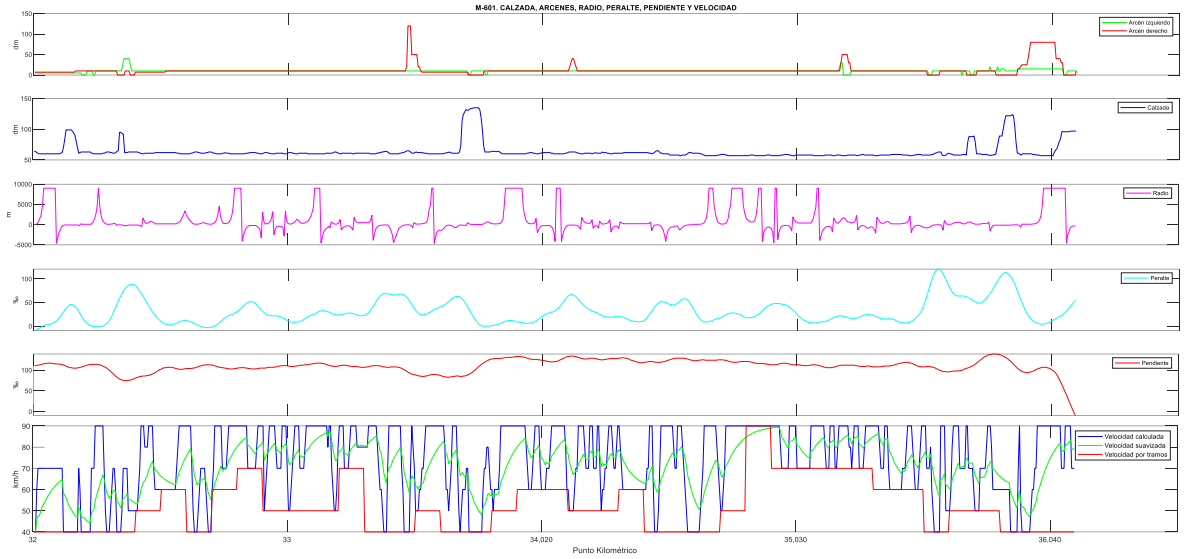


Figura 54. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-601 con un nivel de conducción urgente, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

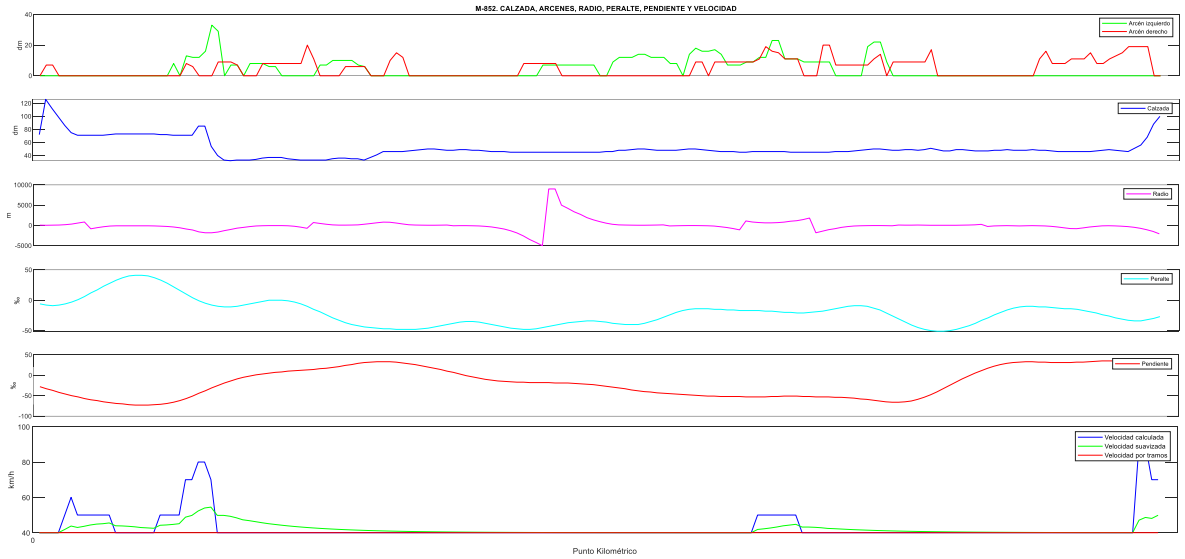


Figura 55. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-852 con un nivel de conducción urgente, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

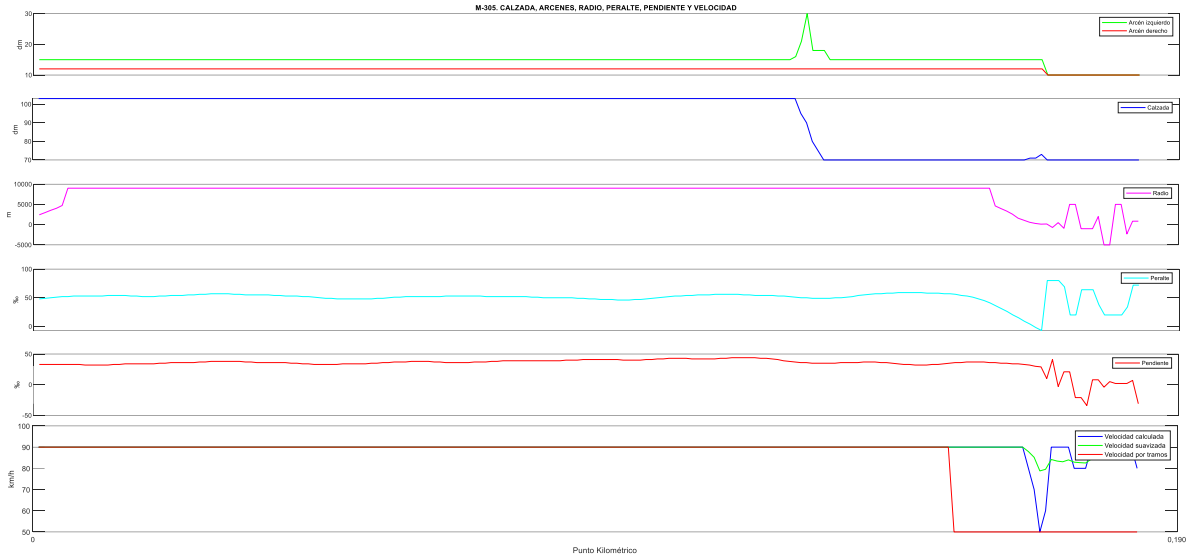


Figura 56. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción urgente, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

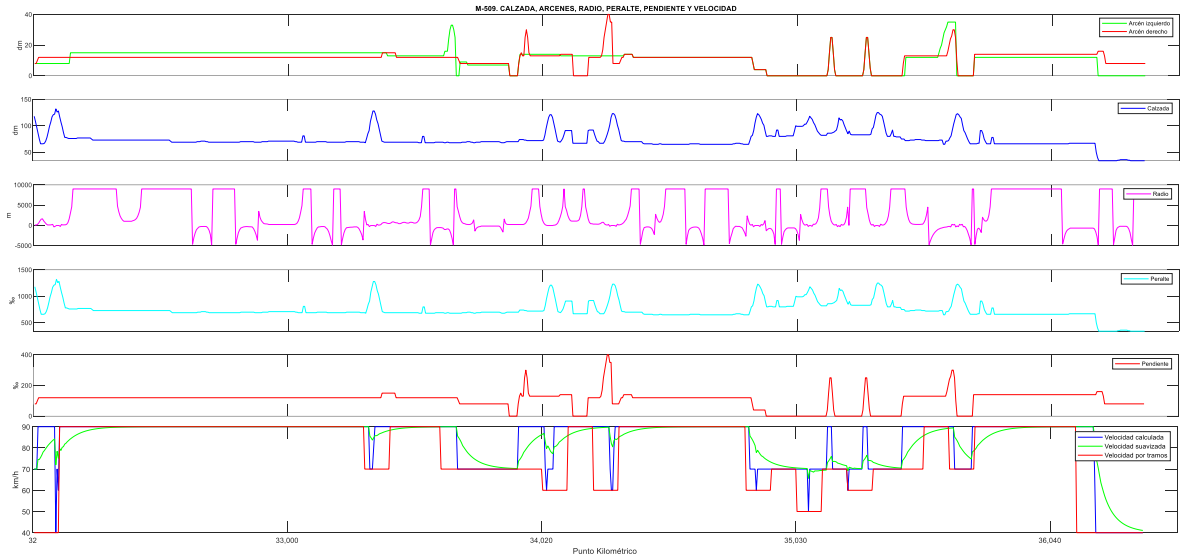


Figura 57. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-509 con un nivel de conducción urgente, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

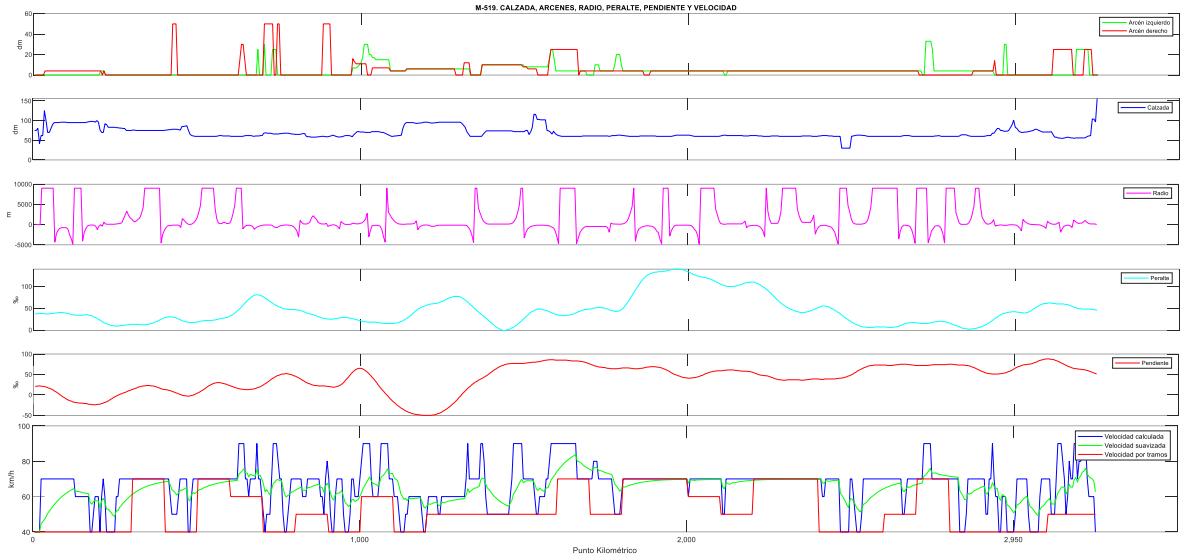


Figura 58. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-519 con un nivel de conducción urgente, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

1.3 ***EXPERIMENTO:*** *Nivel de conducción urgencia propia, buen estado del pavimento y buenas condiciones geométricas.*

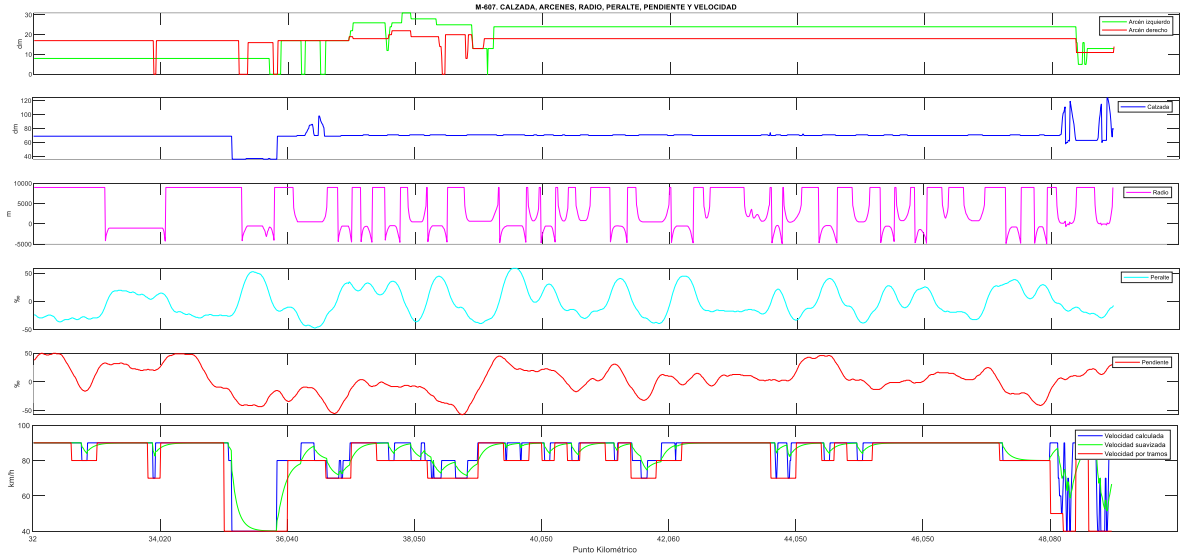


Figura 59. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción urgencia propia, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

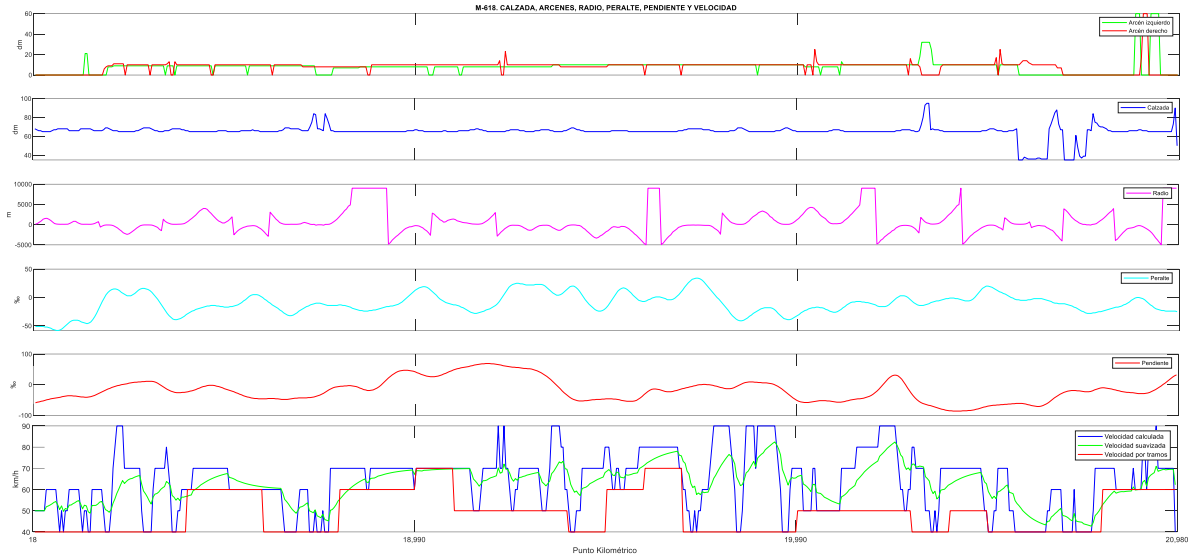


Figura 60. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-618 con un nivel de conducción urgencia propia, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

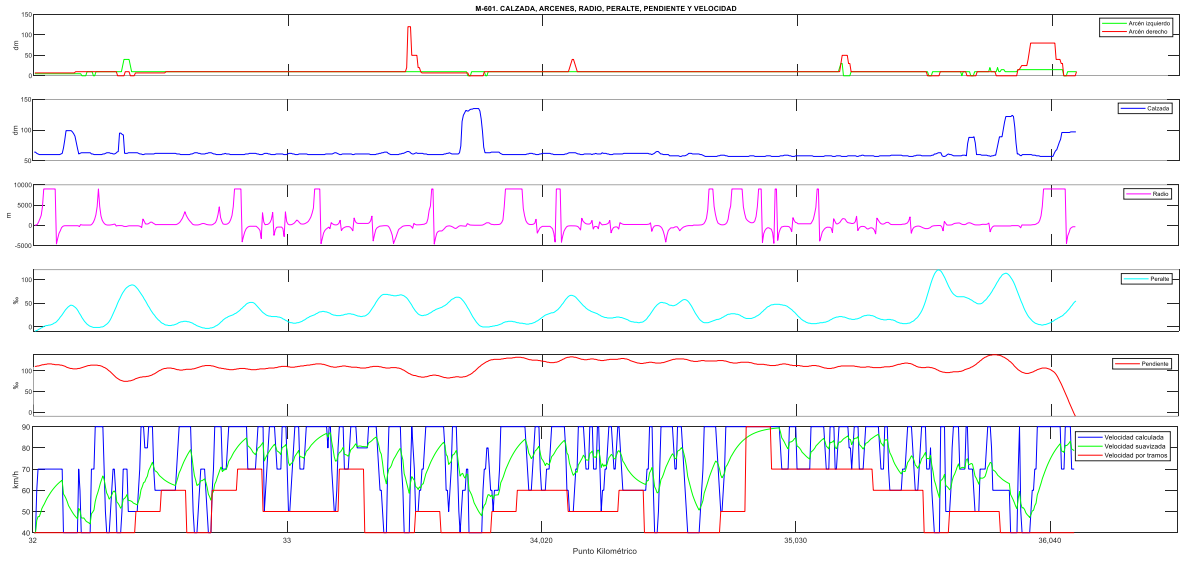


Figura 61. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-601 con un nivel de conducción urgencia propia, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

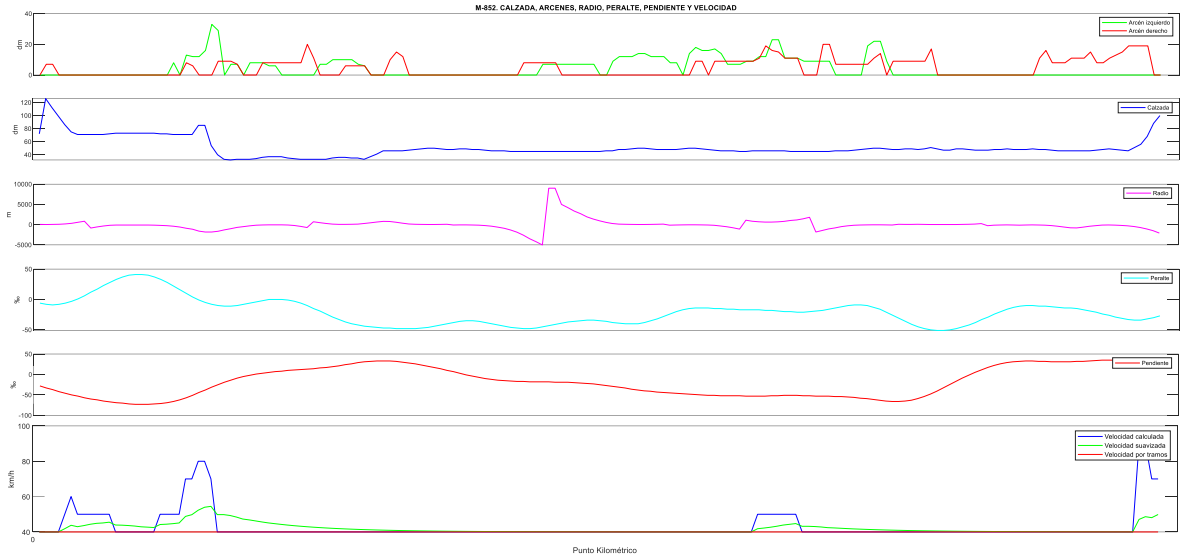


Figura 62. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-852 con un nivel de conducción urgencia propia, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

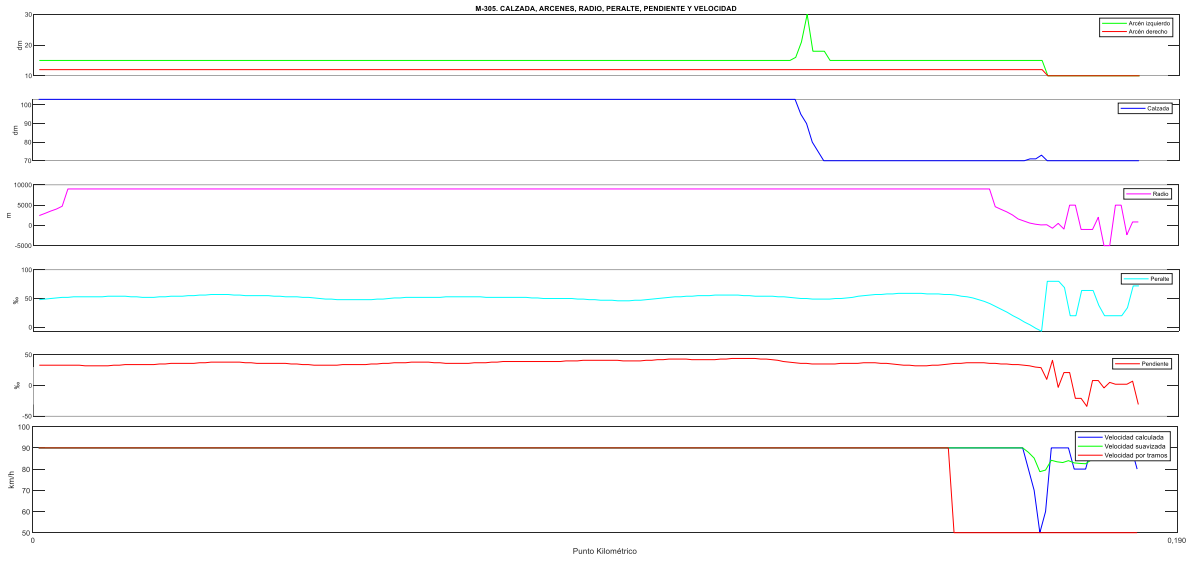


Figura 63. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción urgencia propia, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

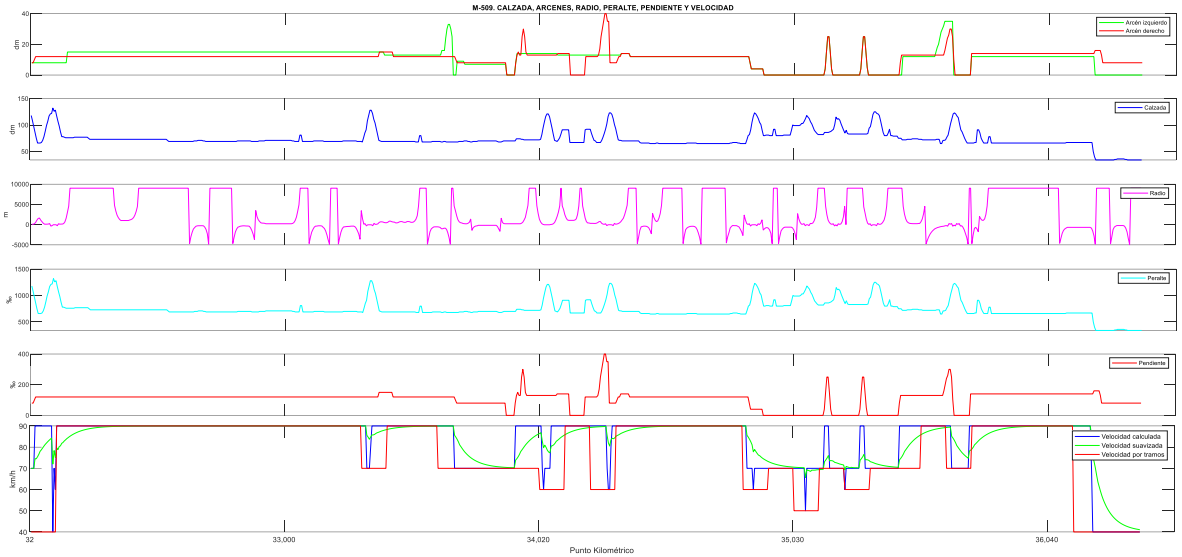


Figura 64. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-509 con un nivel de conducción urgencia propia, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

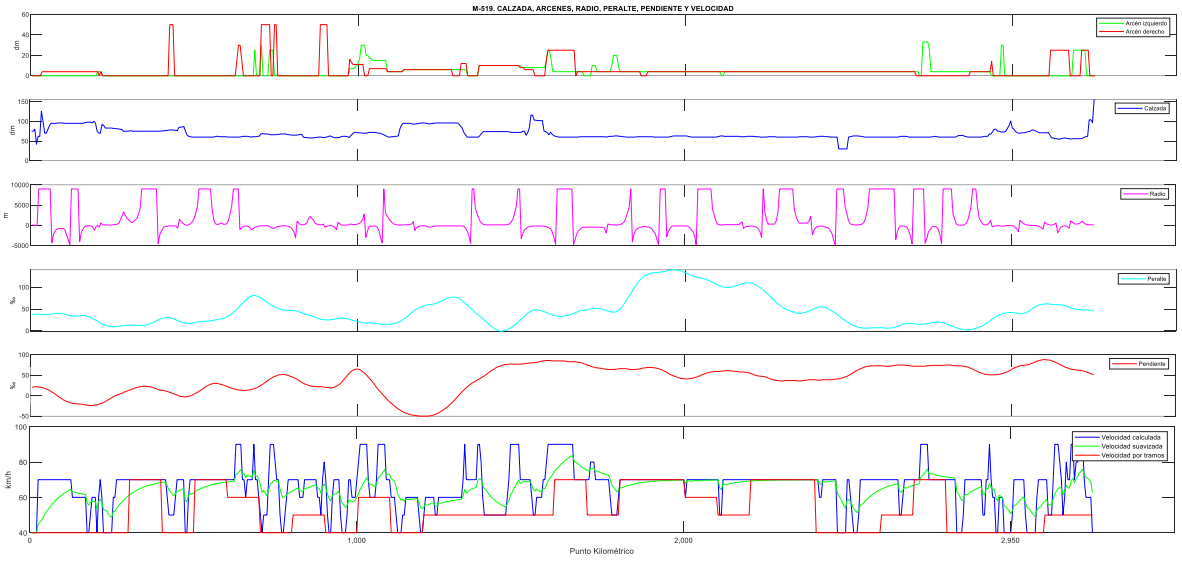


Figura 65. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-519 con un nivel de conducción urgencia propia, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

1.4 ***EXPERIMENTO:*** *Nivel de conducción urgencia declarada, buen estado del pavimento y buenas condiciones geométricas.*

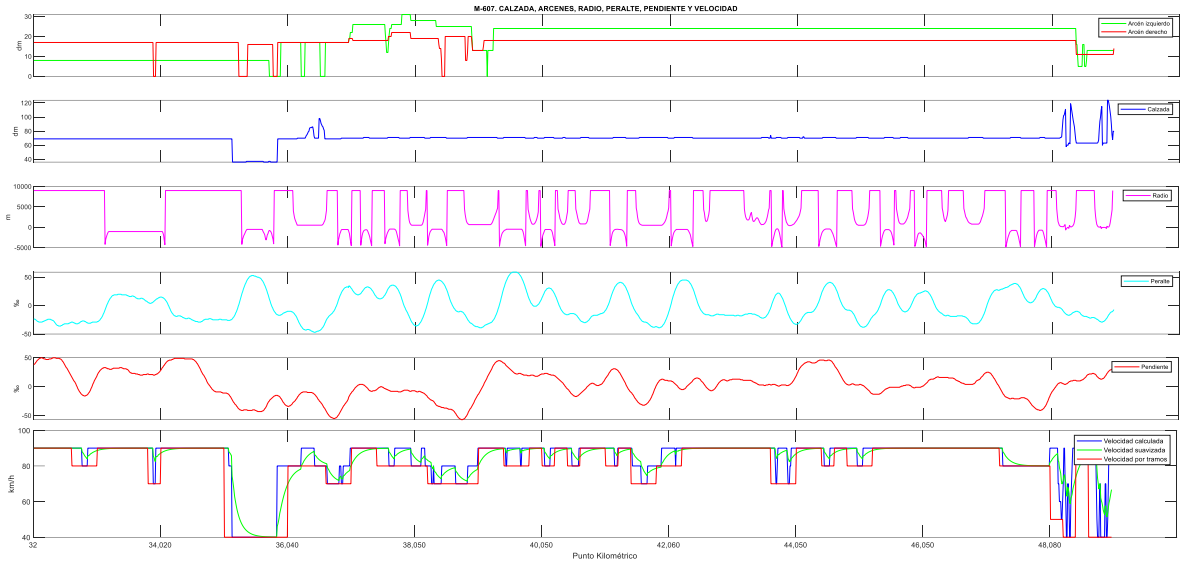


Figura 66. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción urgencia declarada, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

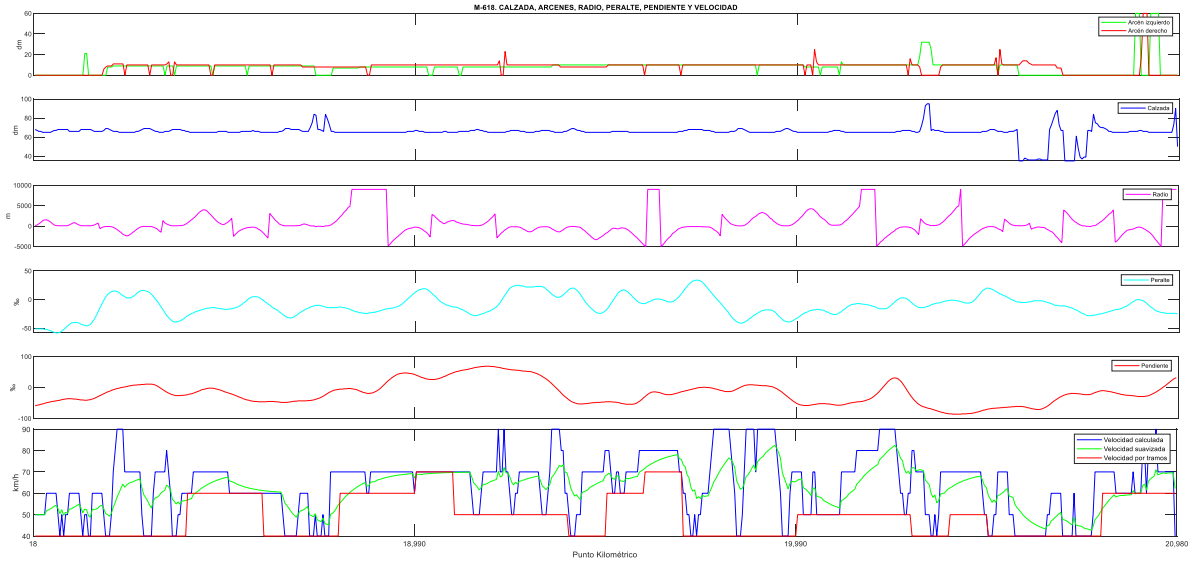


Figura 67. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-618 con un nivel de conducción urgencia declarada, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

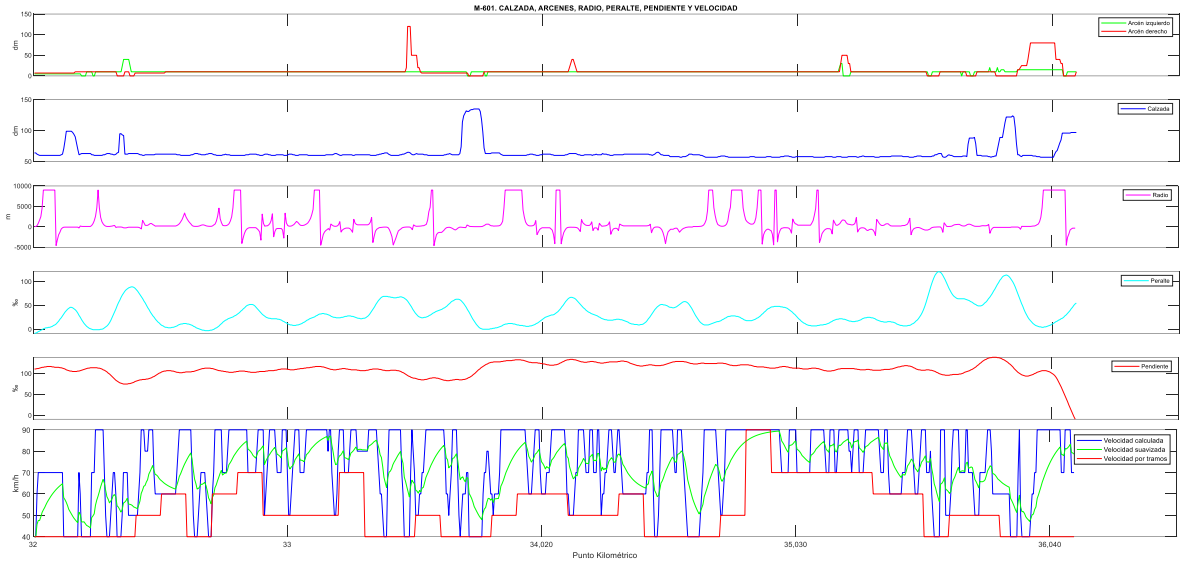


Figura 68. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-601 con un nivel de conducción urgencia declarada, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

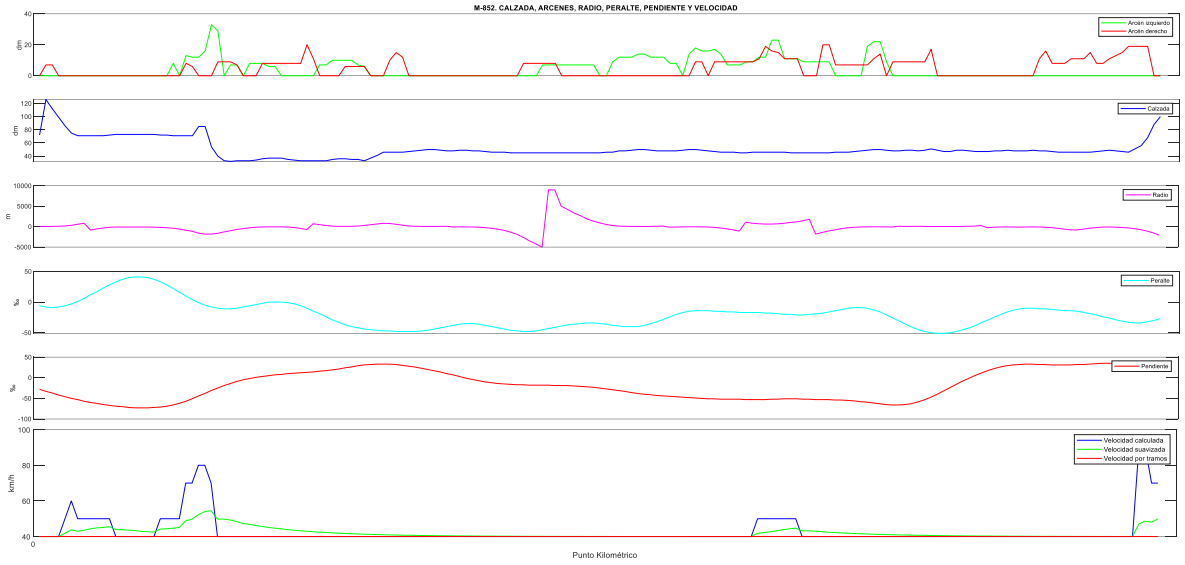


Figura 69. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-852 con un nivel de conducción urgencia declarada, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

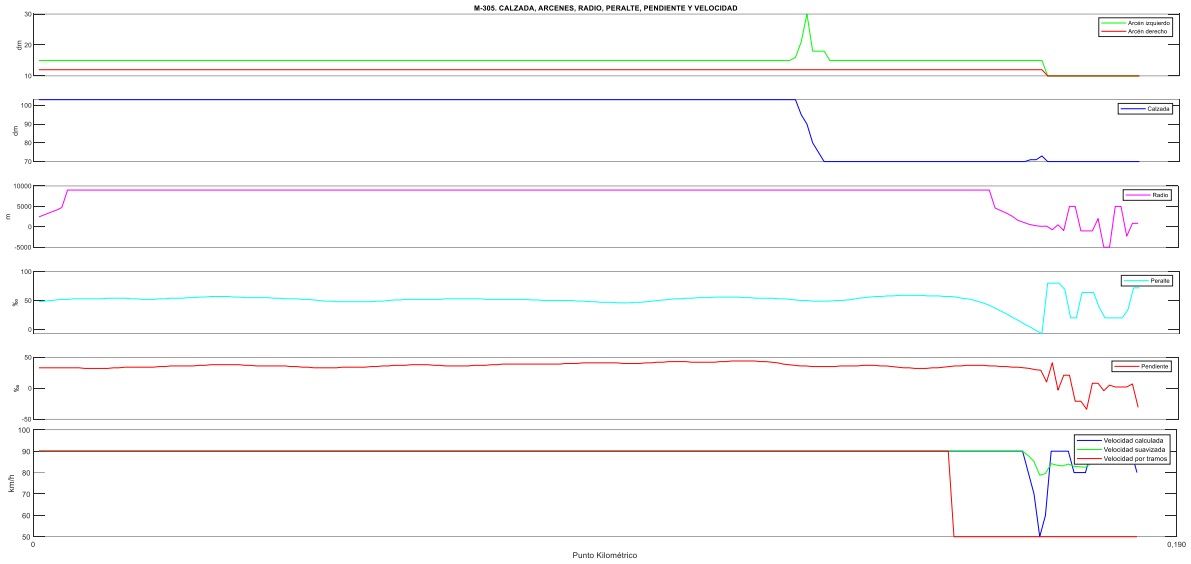


Figura 70. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción urgencia declarada, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

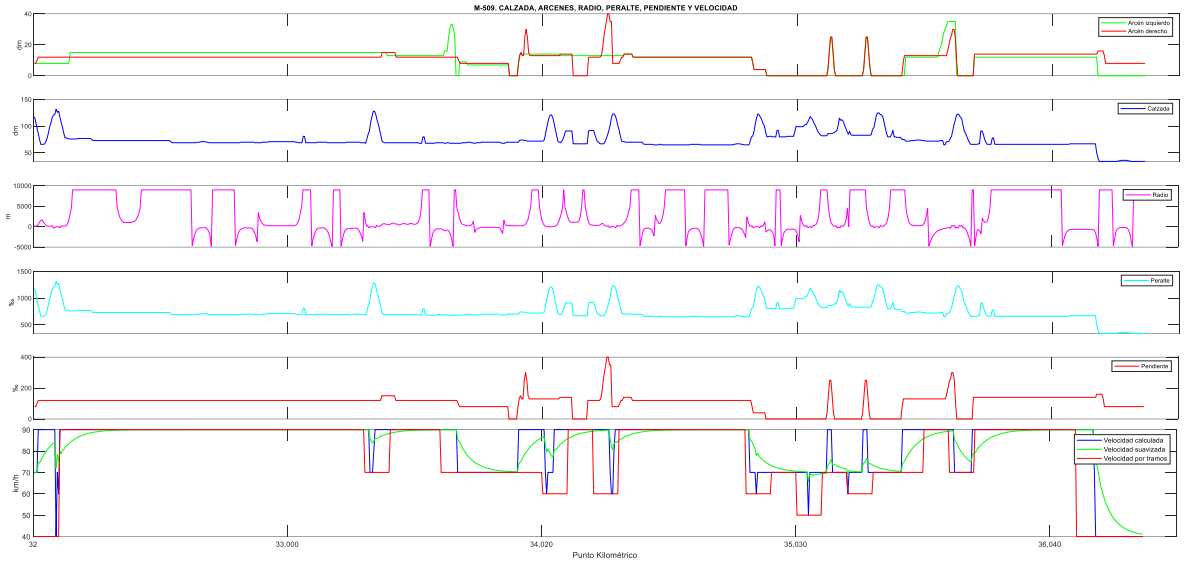


Figura 71. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-509 con un nivel de conducción urgencia declarada, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

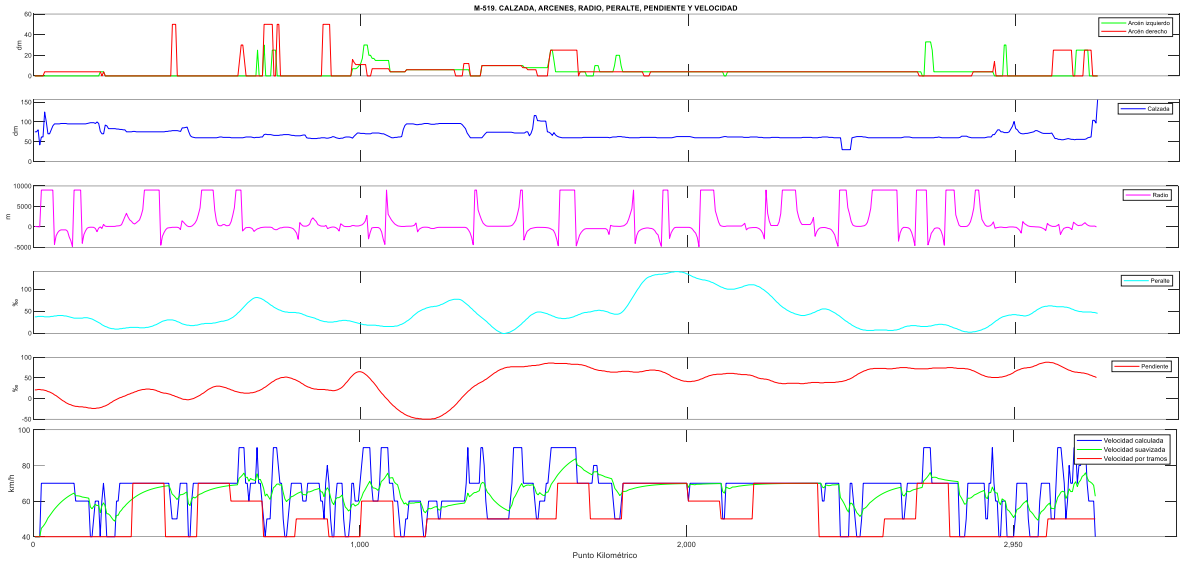


Figura 72. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-519 con un nivel de conducción urgencia declarada, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

1.5 ***EXPERIMENTO:*** *Nivel de conducción calmado, buen estado del pavimento y buenas condiciones geométricas.*

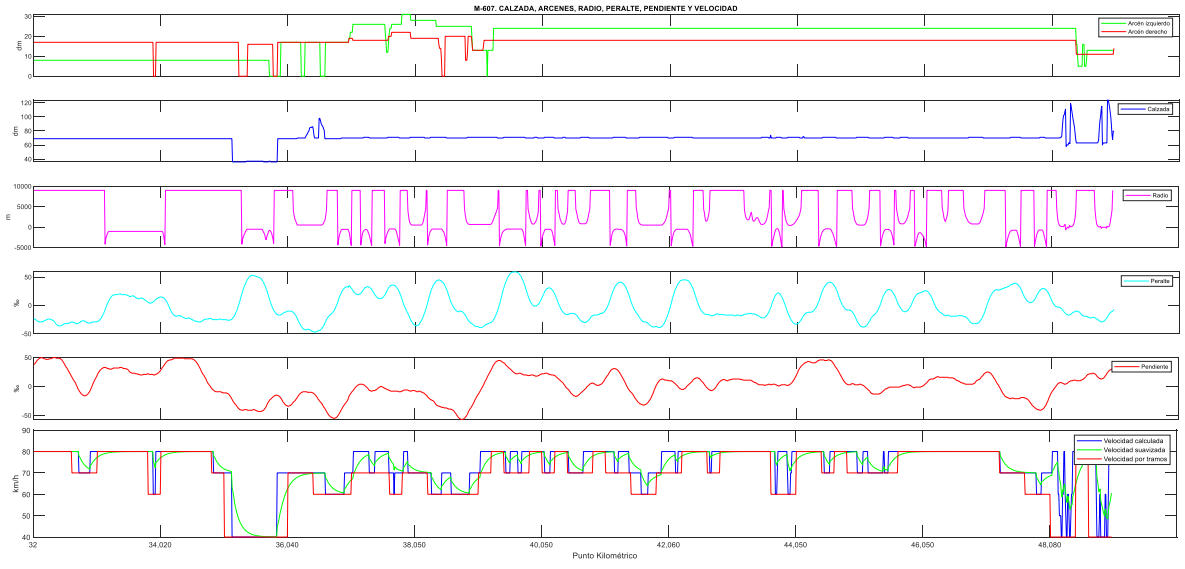


Figura 73. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción calmado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

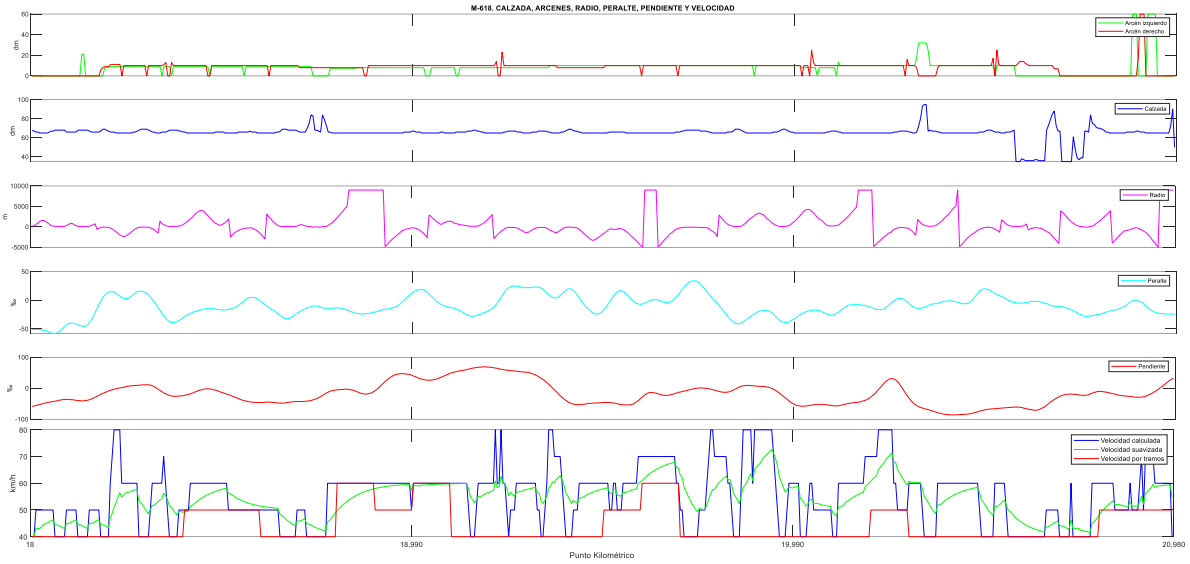


Figura 74. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-618 con un nivel de conducción calmado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

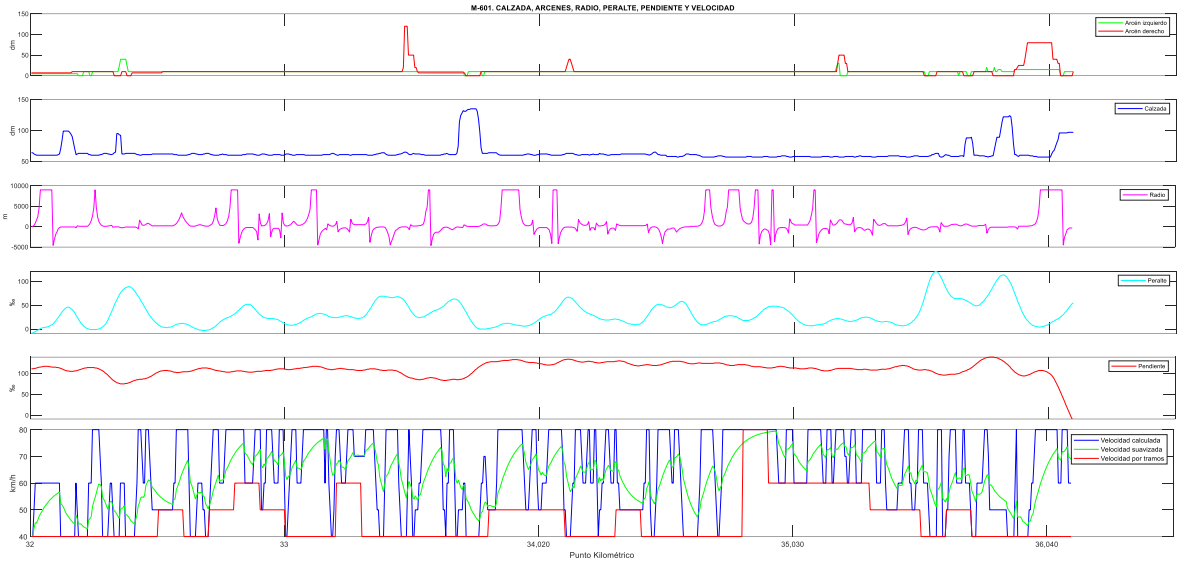


Figura 75. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-601 con un nivel de conducción calmado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

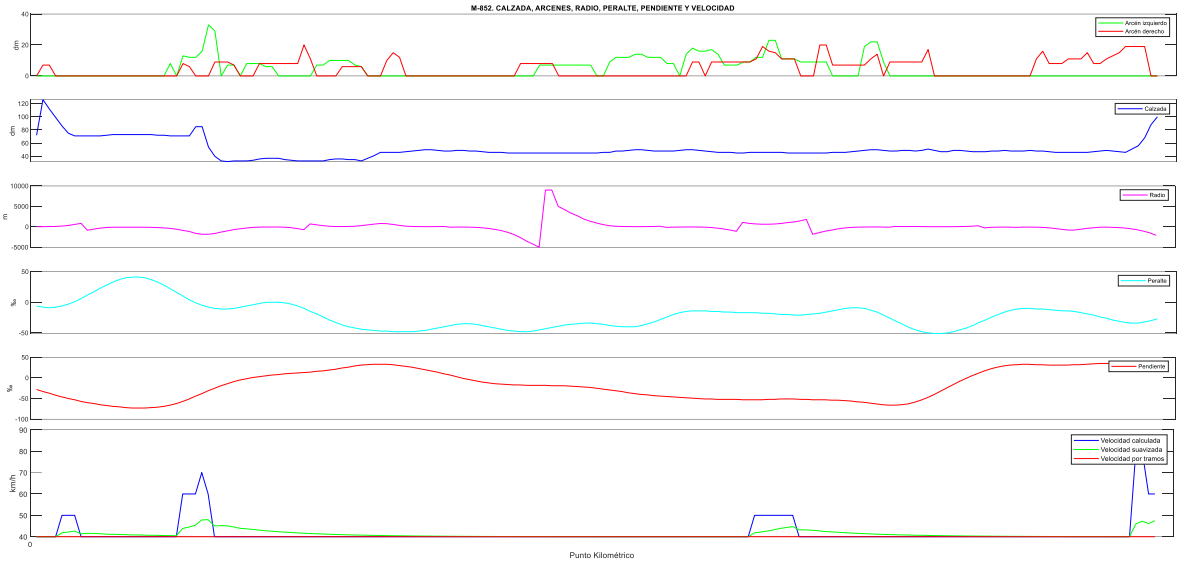


Figura 76. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-852 con un nivel de conducción calmado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

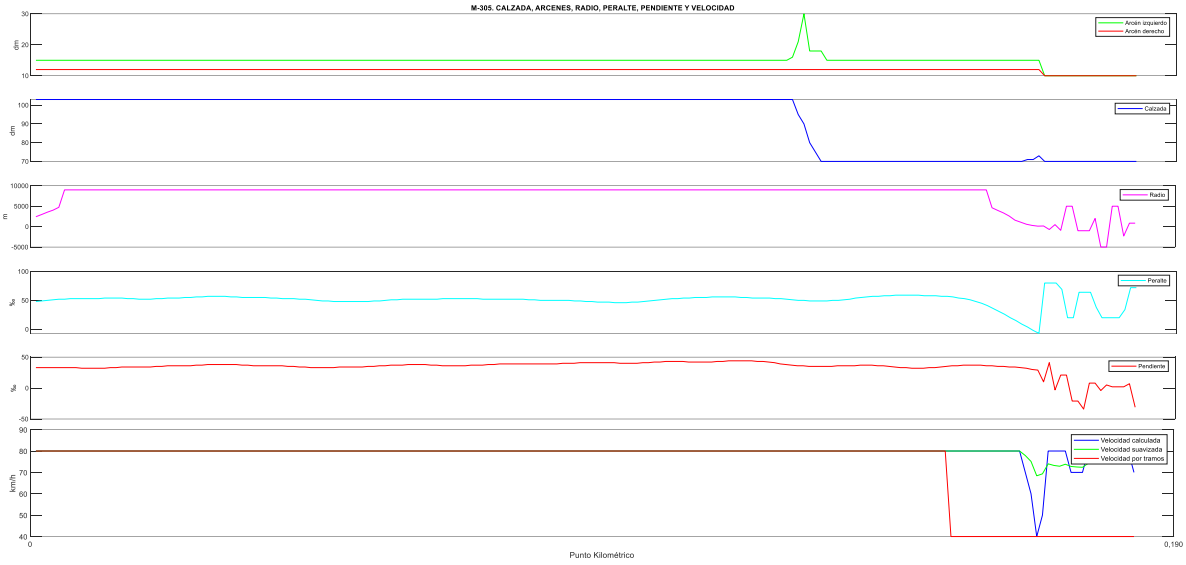


Figura 77. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción calmado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

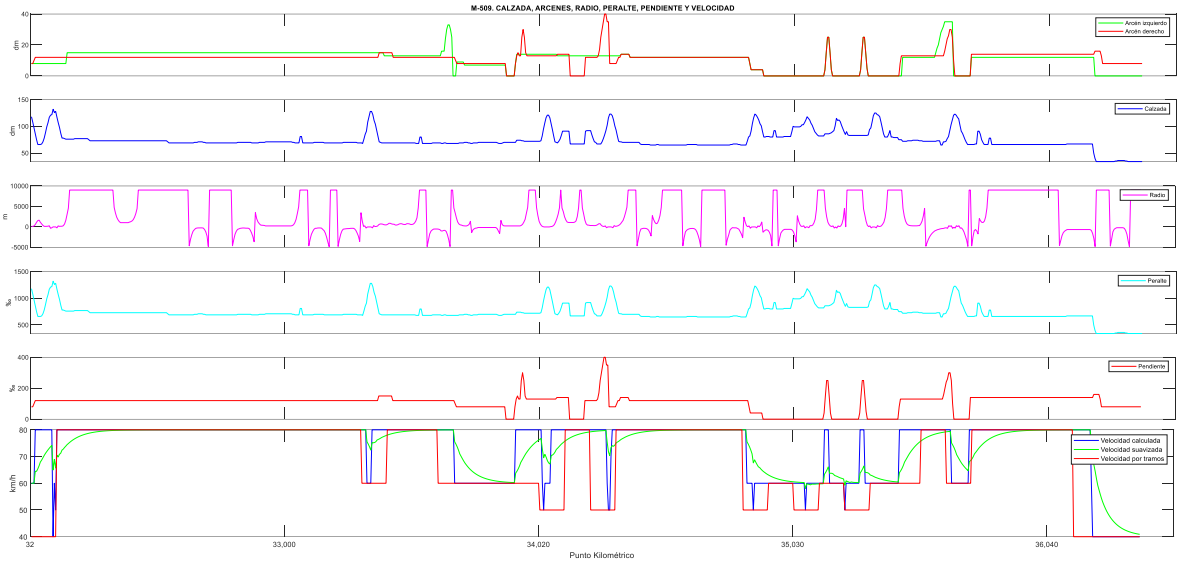


Figura 78. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-509 con un nivel de conducción calmado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

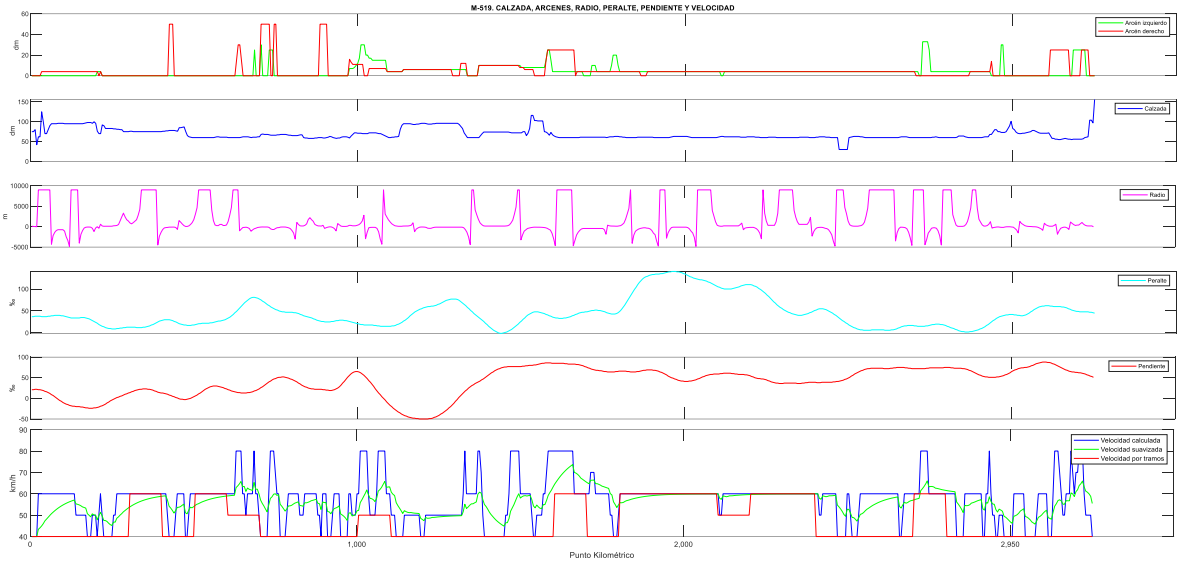


Figura 79. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-519 con un nivel de conducción calmado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

1.6 ***EXPERIMENTO:*** *Nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones geométricas.*

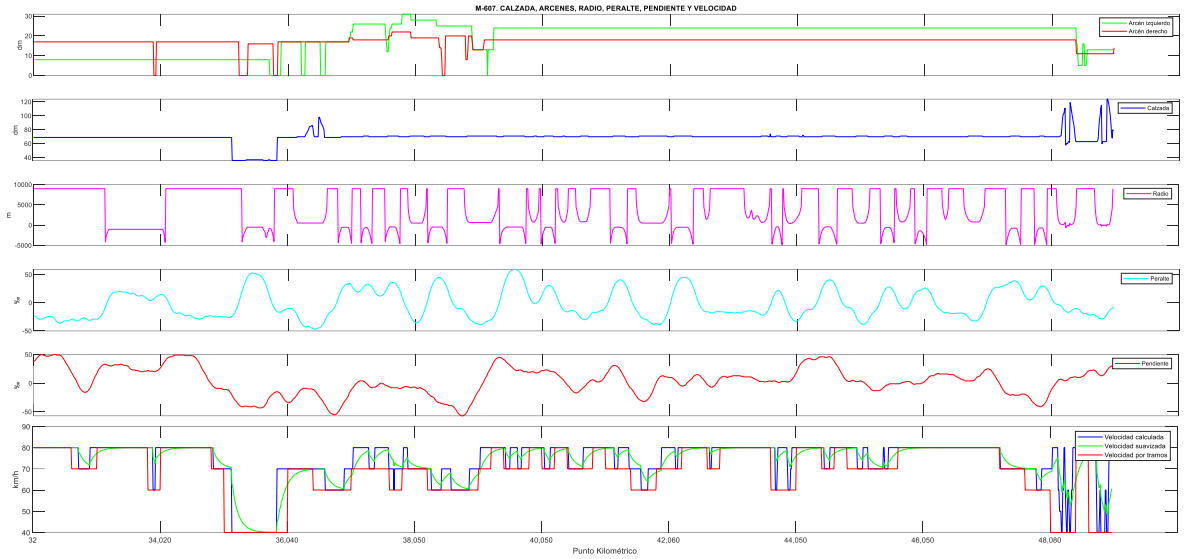


Figura 80. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

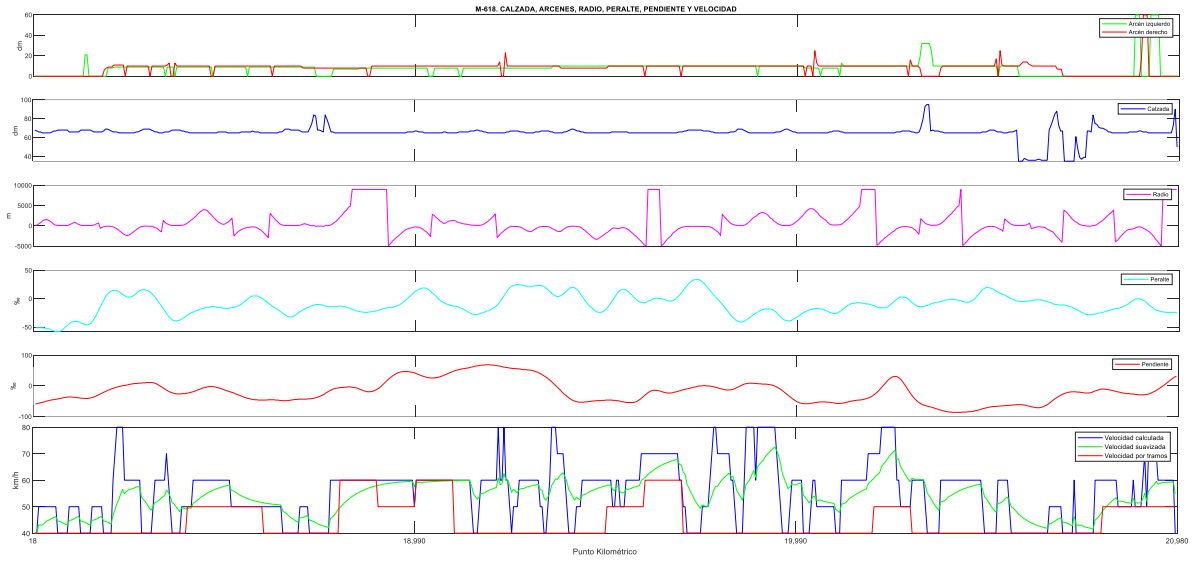


Figura 81. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-618 con un nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

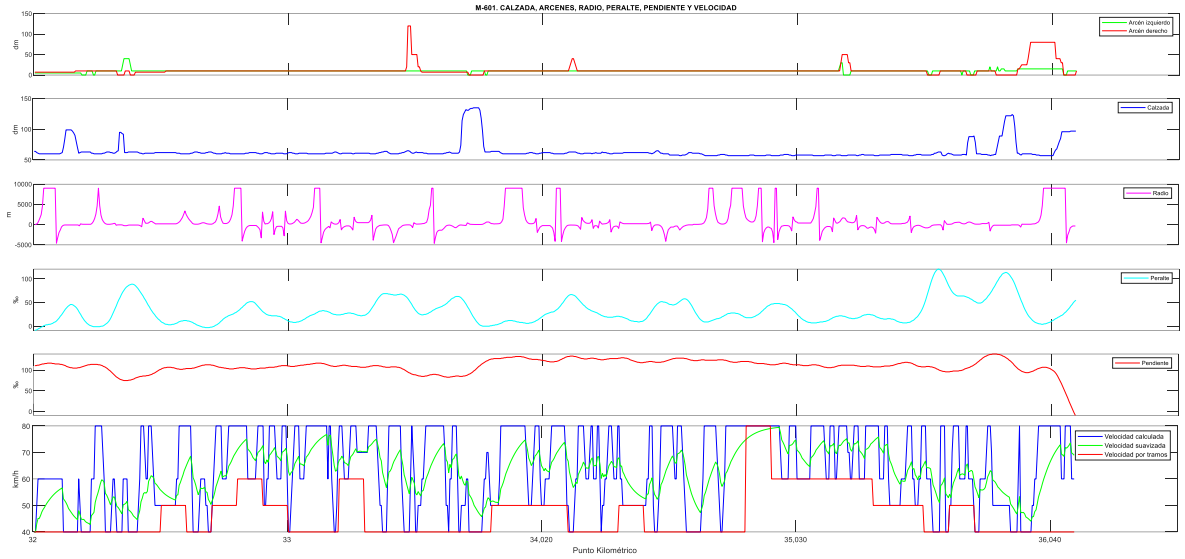


Figura 82. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-601 con un nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

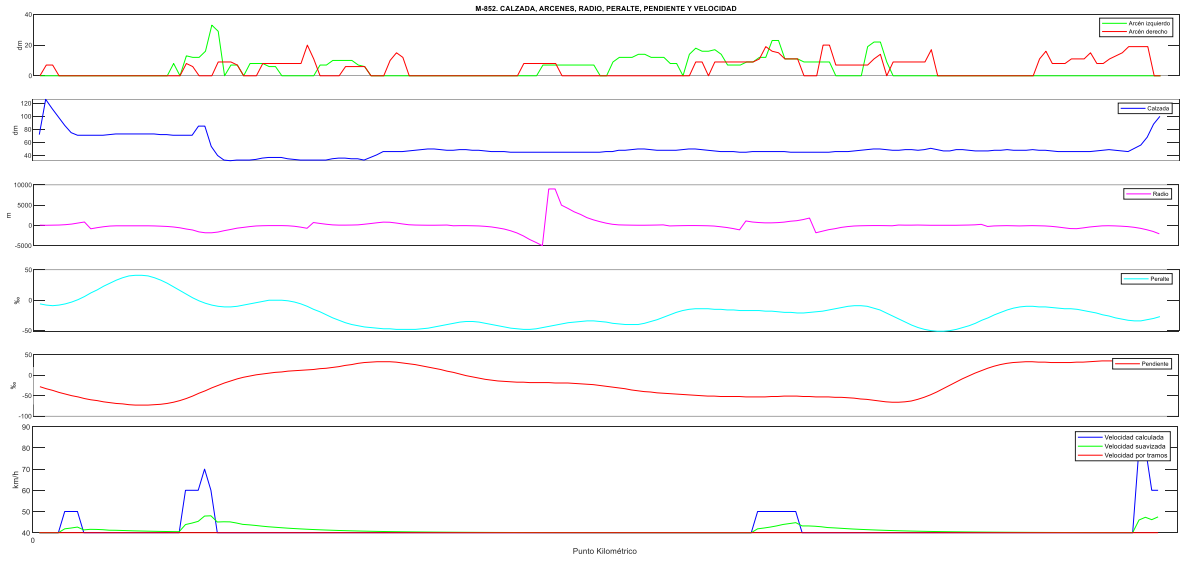


Figura 83. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-852 con un nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

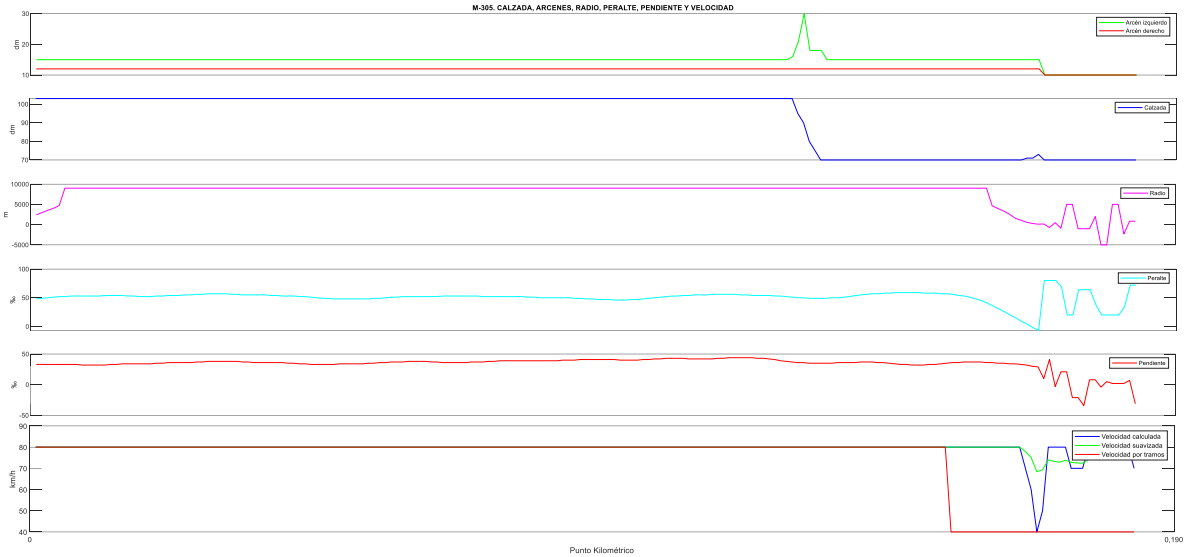


Figura 84. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

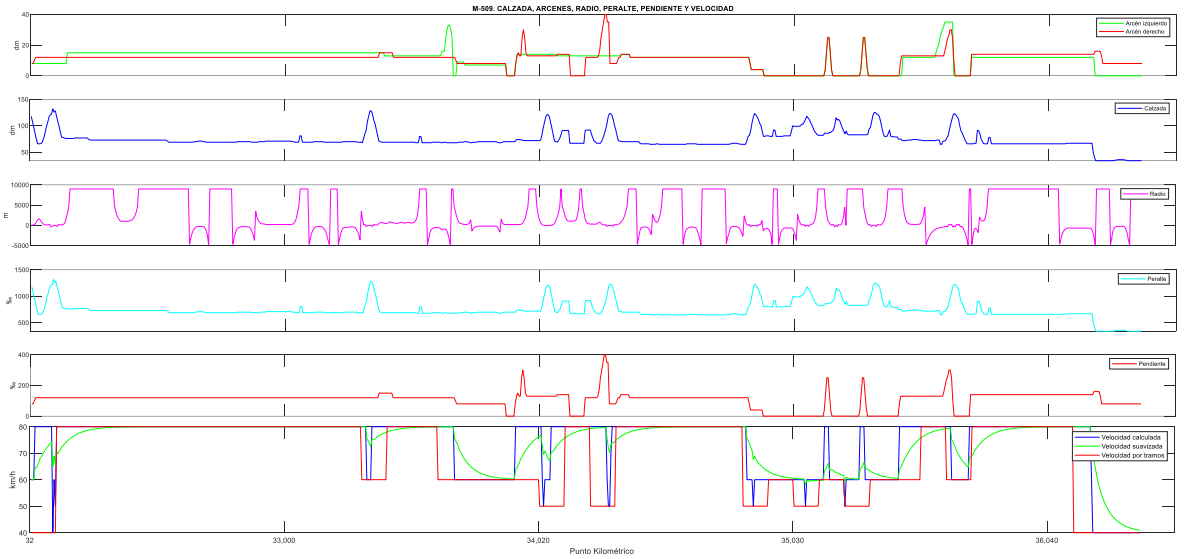


Figura 85. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-509 con un nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

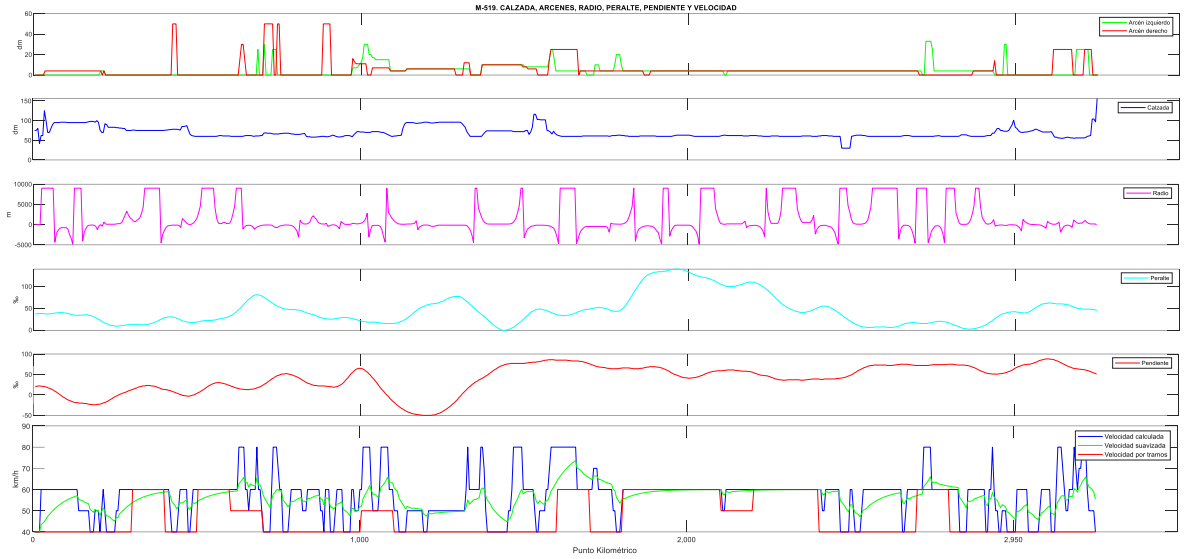


Figura 86. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-519 con un nivel de conducción relajado, buen estado del pavimento y buenas condiciones meteorológicas.

1.7 ***EXPERIMENTO:*** *Nivel de conducción normal, estado del pavimento regular y lluvia.*

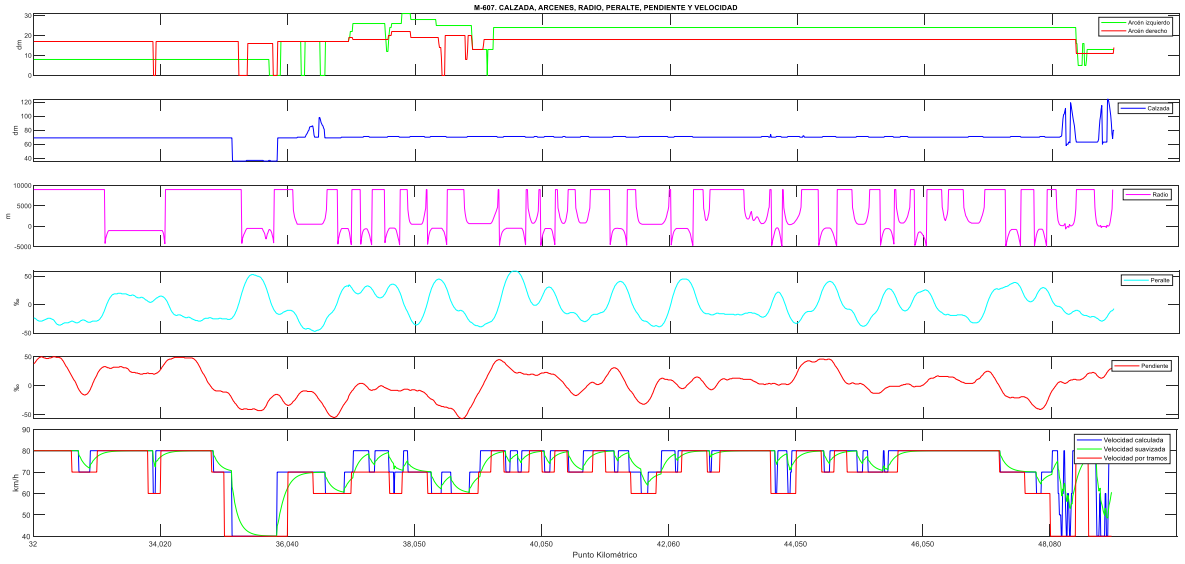


Figura 87. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción normal, estado del pavimento regular y lluvia.

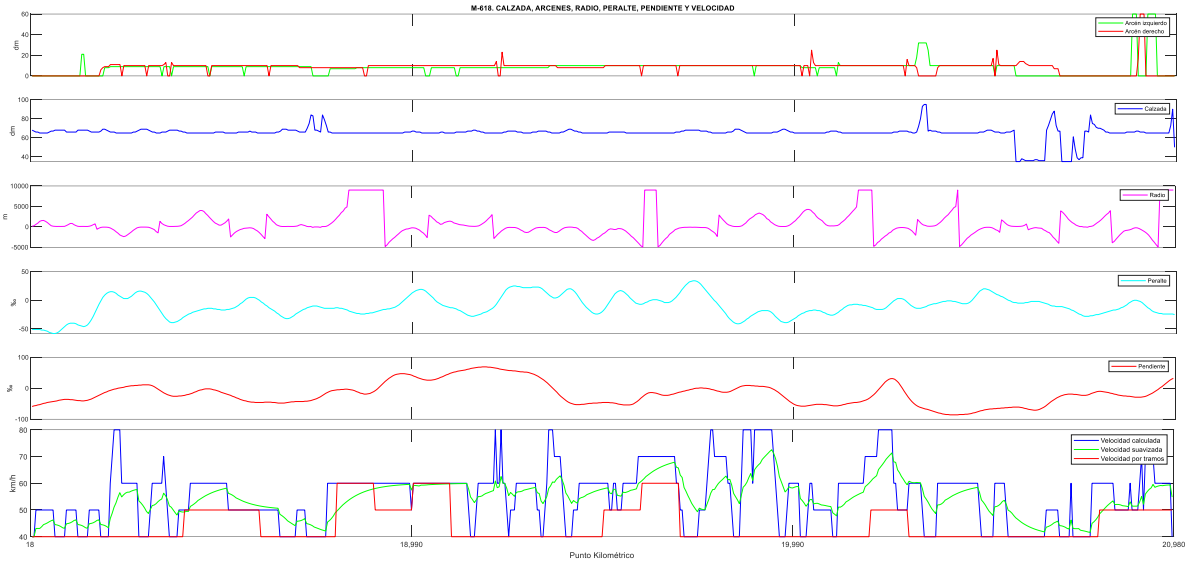


Figura 88. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-618 con un nivel de conducción normal, estado del pavimento regular y lluvia.

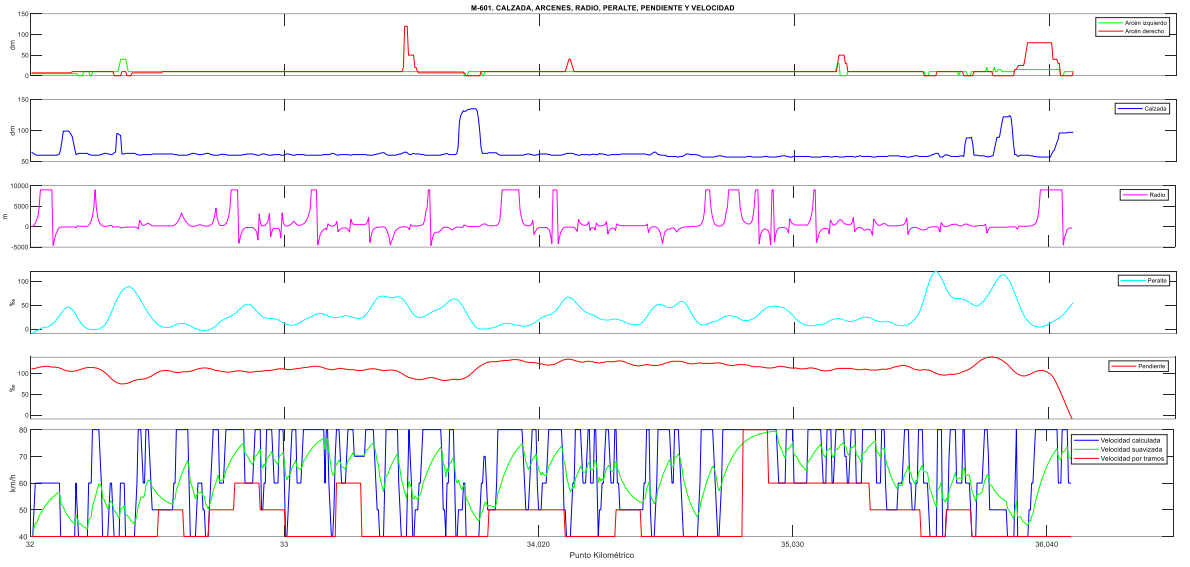


Figura 89. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-601 con un nivel de conducción normal, estado del pavimento regular y lluvia.

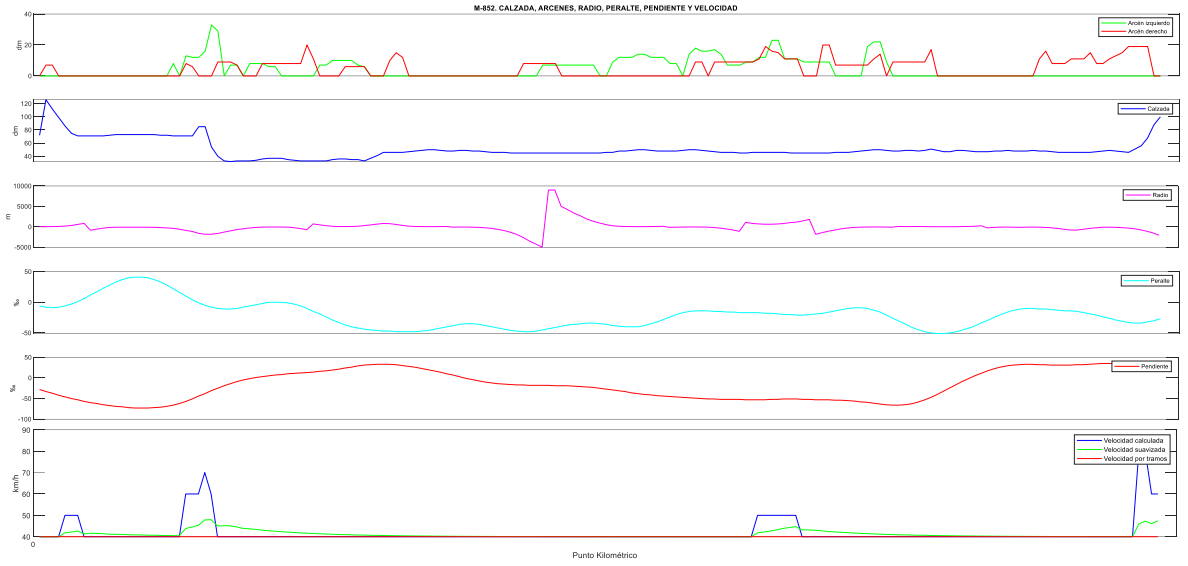


Figura 90. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-852 con un nivel de conducción normal, estado del pavimento regular y lluvia.

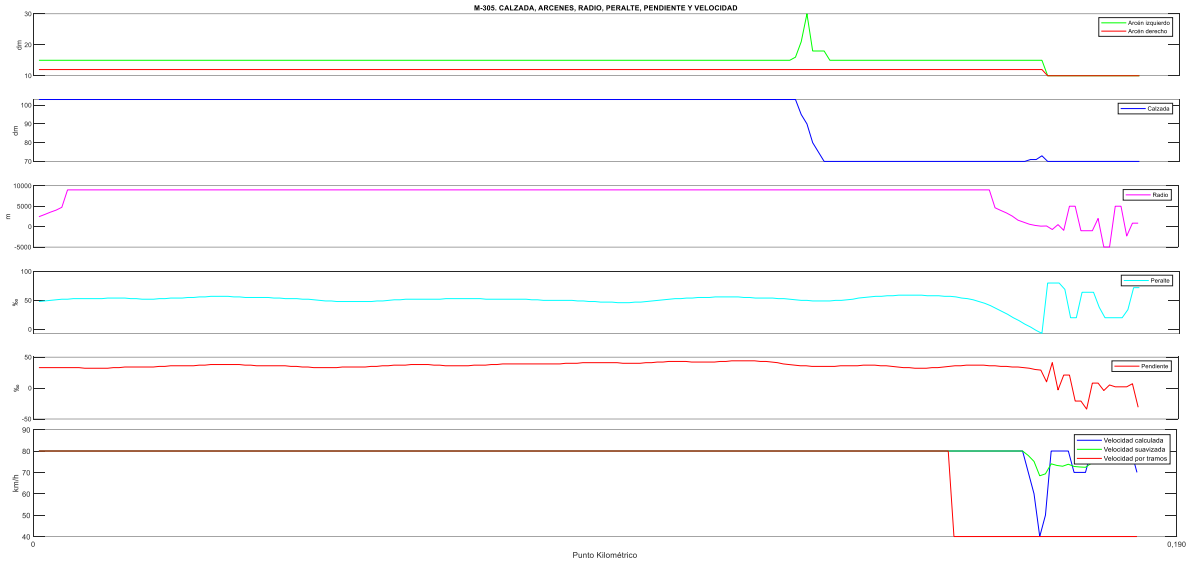


Figura 91. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción normal, estado del pavimento regular y lluvia.

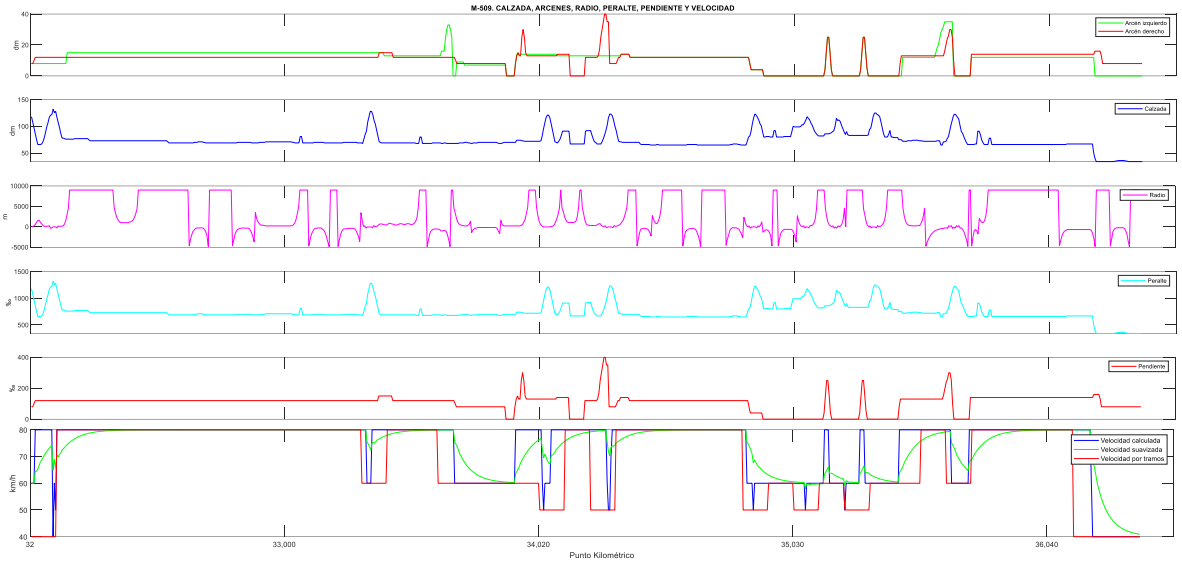


Figura 92. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-509 con un nivel de conducción normal, estado del pavimento regular y lluvia.

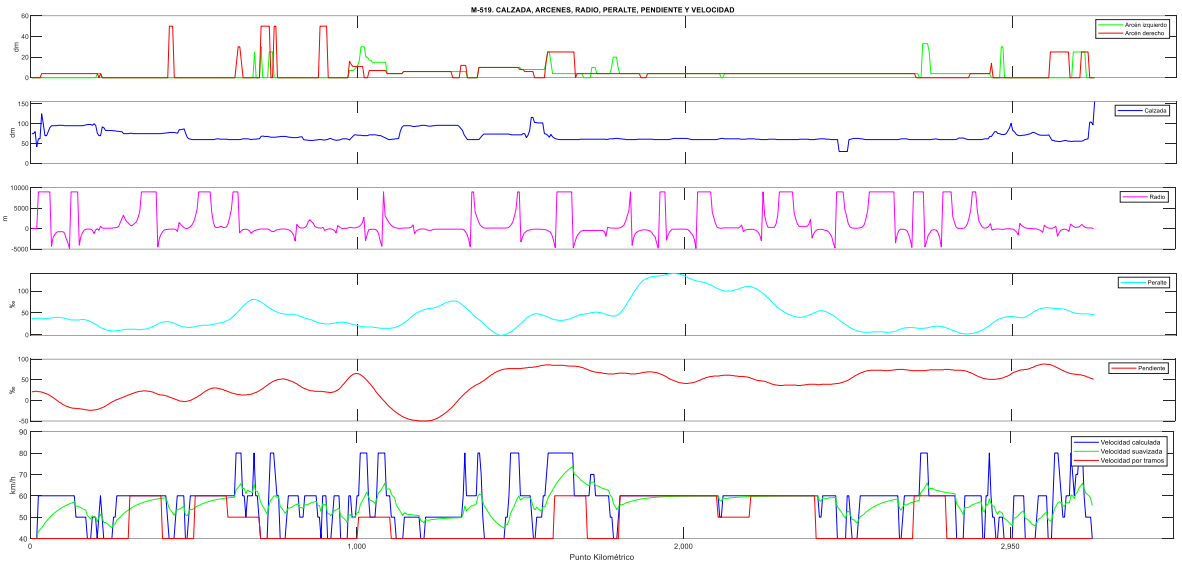


Figura 93. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-519 con un nivel de conducción normal, estado del pavimento regular y lluvia.

1.8 ***EXPERIMENTO:*** *Nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.*

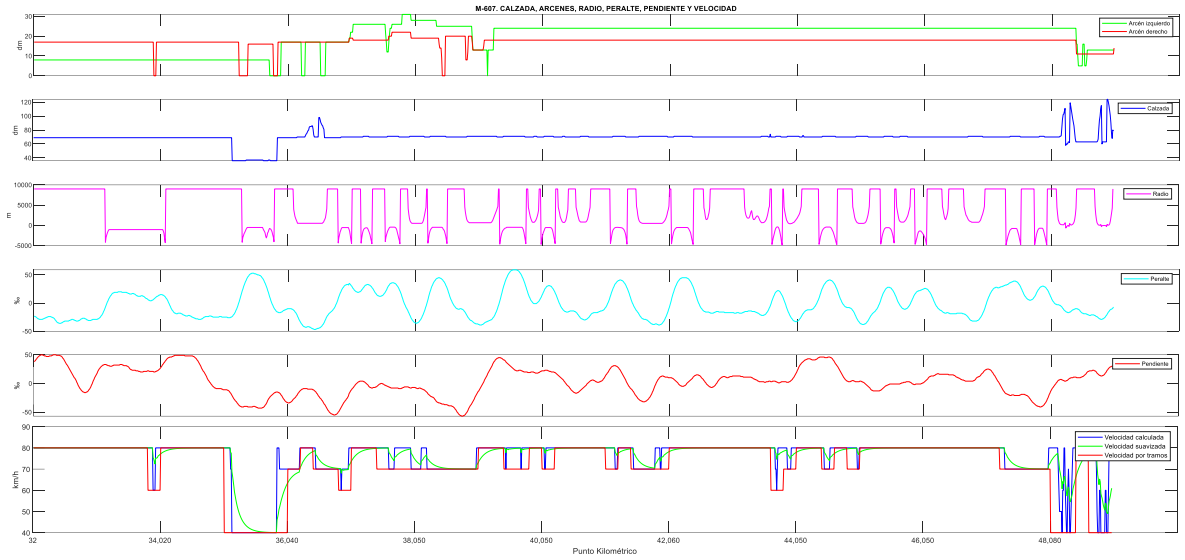


Figura 94. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-607 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.

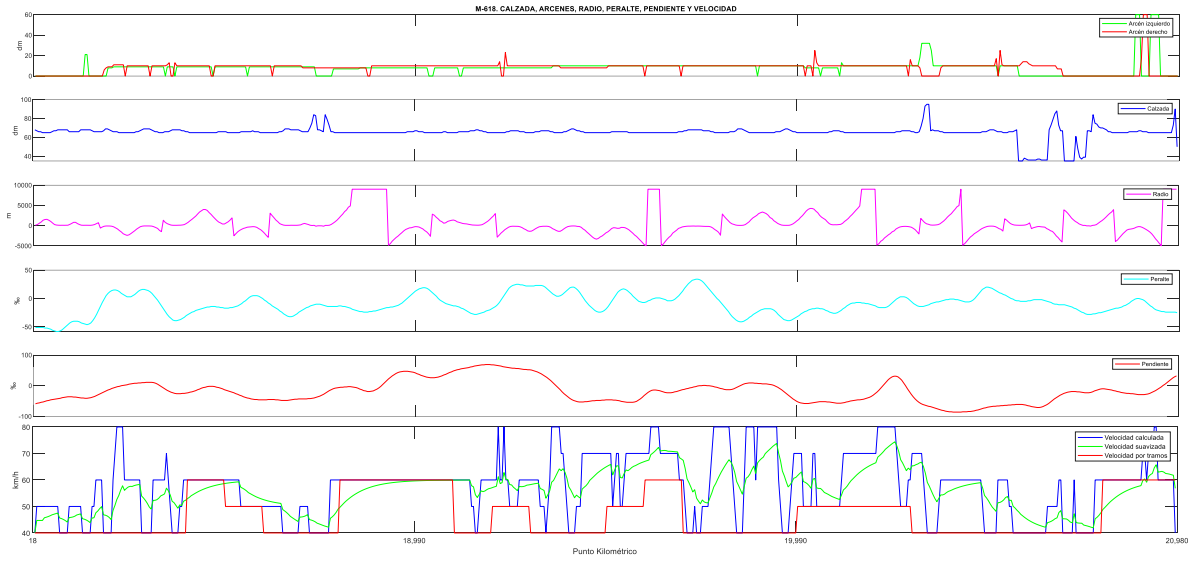


Figura 95. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-618 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.

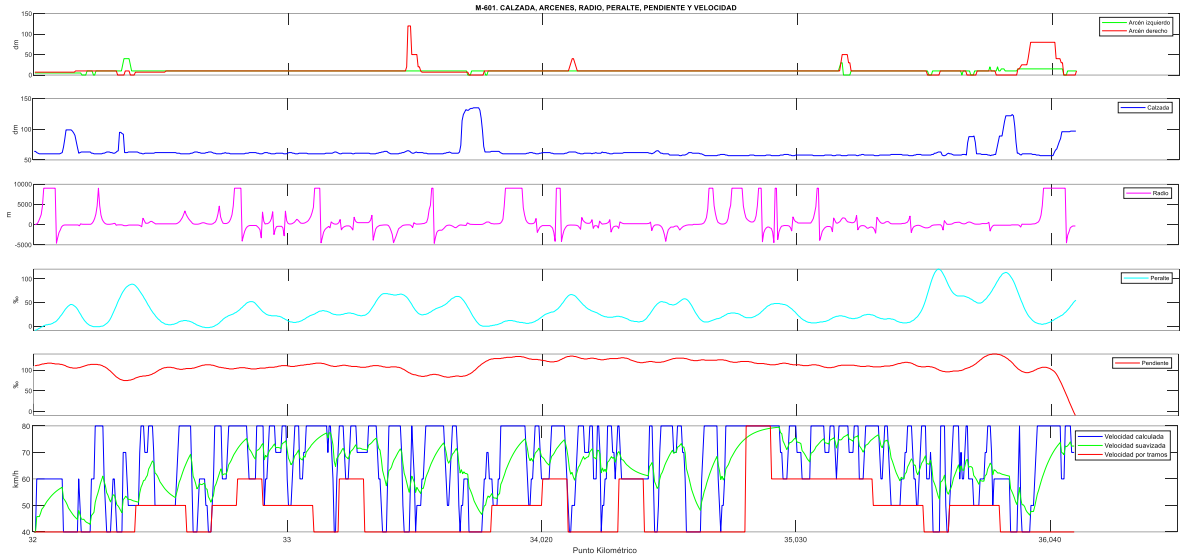


Figura 96. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-601 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.

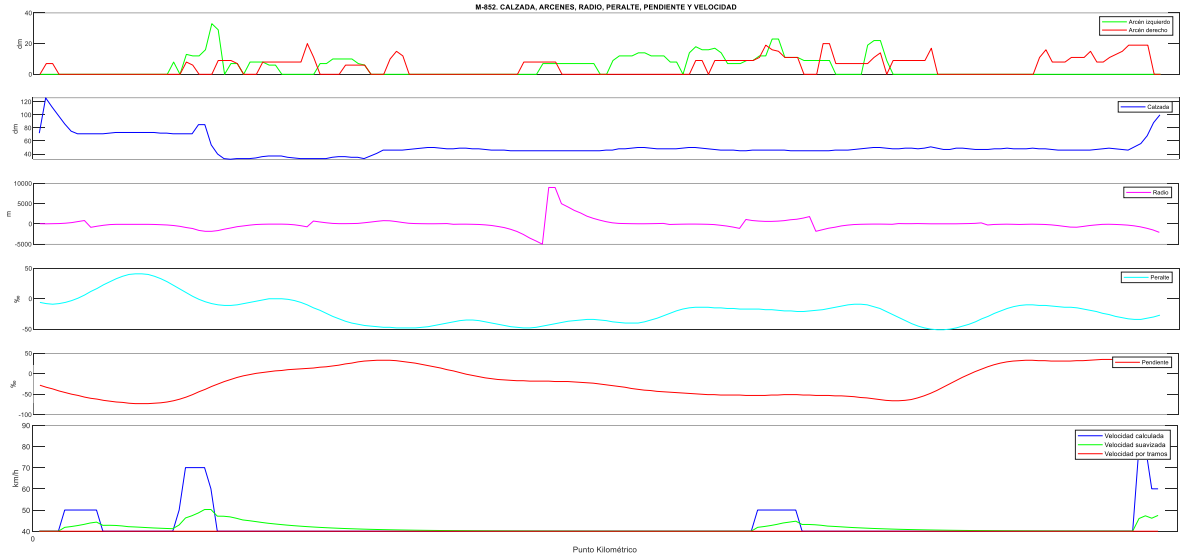


Figura 97. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-852 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.

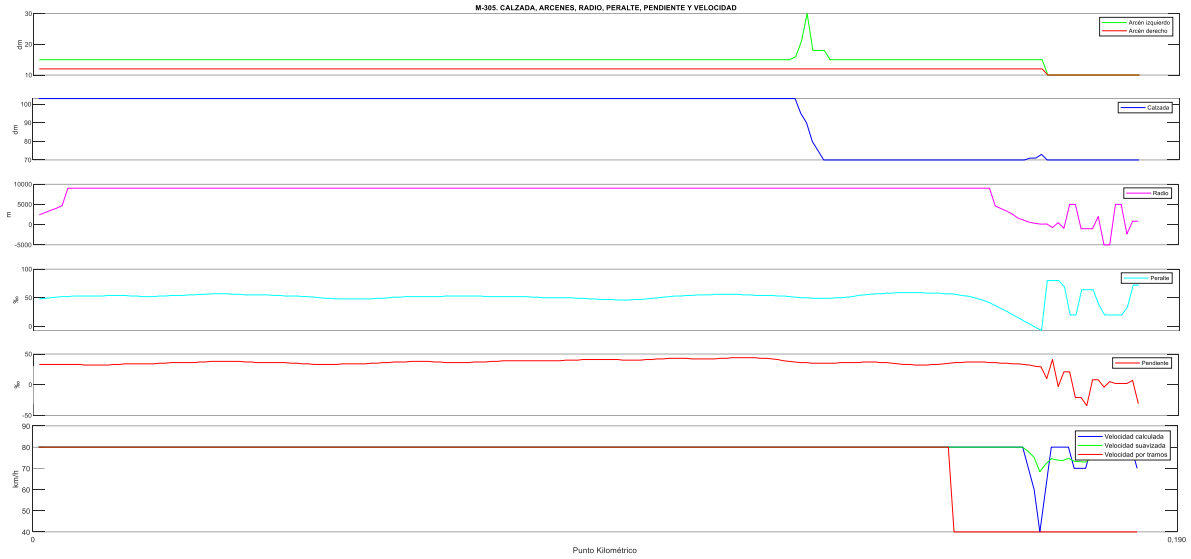


Figura 98. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-305 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.

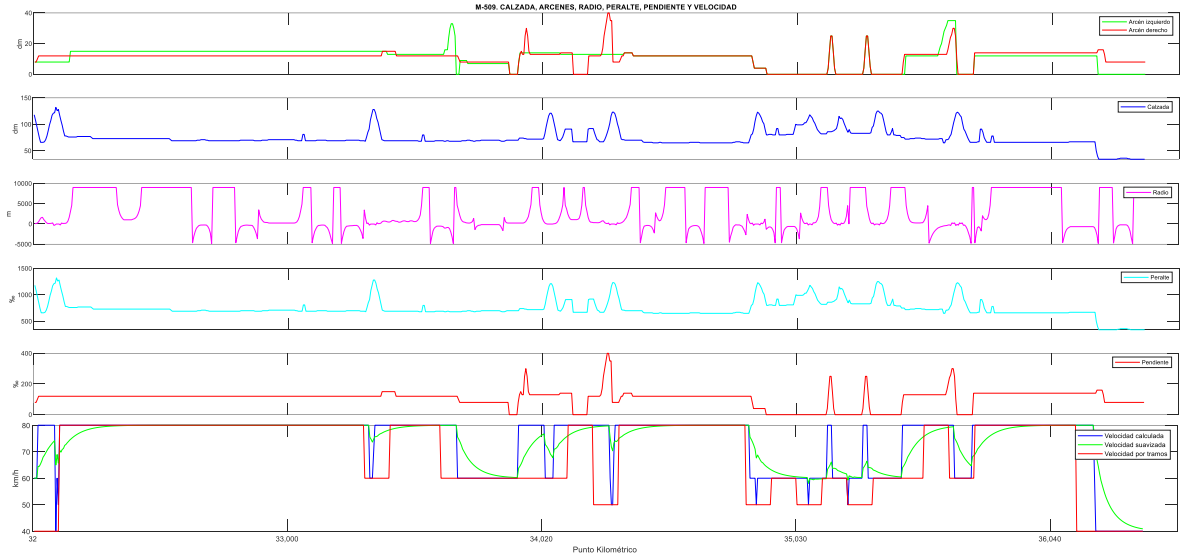


Figura 99. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-509 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.

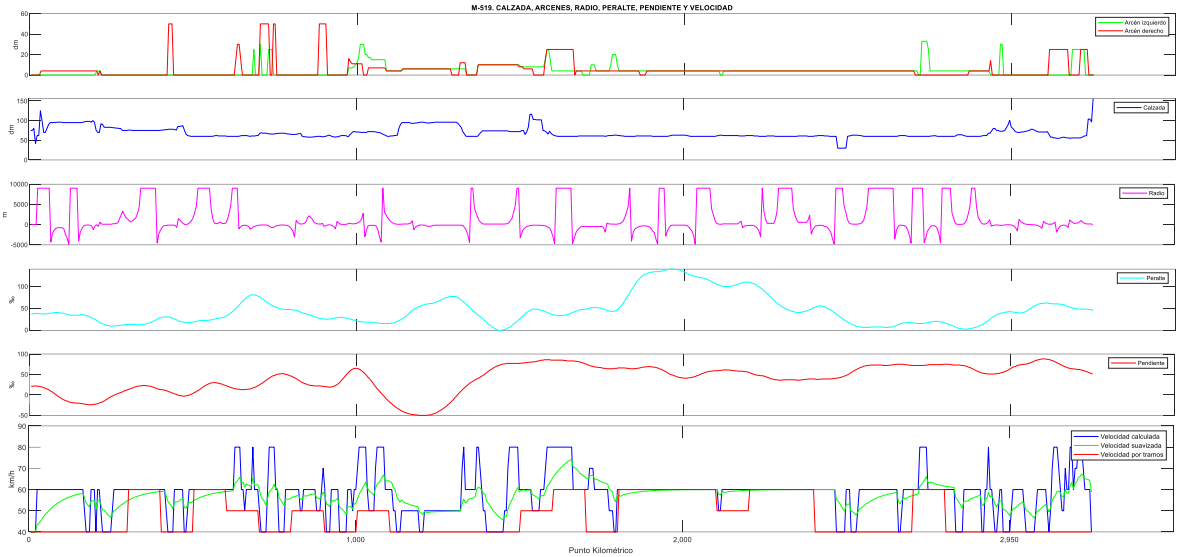


Figura 100. Velocidad obtenida con el sistema de recomendación de velocidad para el tramo de carreteras convencionales M-519 con un nivel de conducción normal, buen estado del pavimento y lluvia.