



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Estudio y mejora de la iluminación en pasos peatonales
inteligentes. Aplicación a los pasos peatonales en la ciudad
de Bolonia (Italia)

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Obras Públicas

AUTOR/A: Blanco Del Pozo, José Manuel

Tutor/a: Villalba Sanchis, Ignacio

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	9
1.2	ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN PREVIA EN LA CIUDAD DE BOLOGNA.....	13
2.	OBJETIVOS.....	17
3.	ESTADO DEL ARTE.....	18
3.1	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS PASOS PEATONALES.....	19
3.2	TECNOLOGÍA AICROSS.....	20
3.3	MANUAL DEL PEATÓN.....	22
3.4	RELACIÓN ENTRE HUSO HORARIO, LUMINOSIDAD Y ACCIDENTALIDAD EN LAS HORAS DE SALIDA Y PUESTA DEL SOL.....	23
4.	MÉTODO DE ANÁLISIS.....	26
4.1	INTRODUCCIÓN.....	26
4.2	SISTEMA DE ILUMINACIÓN.....	26
4.2.1	SISTEMA LOOKATME.....	28
4.2.2	SISTEMA SICURLUX.....	31
4.2.3	SISTEMA SICURLED.....	33
4.3	SISTEMA DE CÁMARAS.....	35
4.3.1	POSICIONAMIENTO DE LAS CÁMARAS.....	35
5.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	40
5.1	INTRODUCCIÓN.....	40
5.2	MÉTODO DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	40
5.3	SOFTWARE DE VISUALIZACIÓN DE LOS ARCHIVOS.....	41
5.4	ESTUDIO DE EFECTIVIDAD DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.....	45
5.4.1	ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	48
5.4.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	49
5.5	ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD.....	51
5.6	PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS GRÁFICOS A PARTIR DE LAS GRABACIONES.....	63
5.6.1	PROCESO DE VISUALIZACIÓN DE VÍDEOS Y APUNTE DE LOS DATOS.....	64
5.6.2	TRASPASO DE LOS DATOS DE LAS TABLAS A LAS GRÁFICAS DE EXCEL.....	68
5.6	ANÁLISIS DE LAS GRABACIONES.....	70
5.6.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PARÁMETROS DE ESTUDIO.....	72
5.6.2	ANÁLISIS DE VÍDEO EN JULIO Y AGOSTO 2021.....	79
5.6.2.1	ANÁLISIS DE LOS USUARIOS Y SUS COMPORTAMIENTOS.....	79
5.6.2.3	ANÁLISIS DE LOS VEHÍCULOS Y SUS COMPORTAMIENTOS.....	87

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA
CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

5.6.2.4 ANÁLISIS DE LOS CRUCES PEATONALES	92
5.7 RESULTADOS FINALES	100
6. CONCLUSIONES	105
7. FUTURAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN	108
8. BIBLIOGRAFÍA	109

ÍNDICE TABLAS

TABLA 1: TABLA DE LOS ÍCONOS DEL PROGRAMA SMARTVIEW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	43
TABLA 2: TABLA DE ÍCONOS DEL PROGRAMA SMARTVIEW. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	43
TABLA 3: DISTRIBUCIÓN DE LAS VELOCIDADES DE CRUCE DE LOS VEHÍCULOS EN LAS DIRECCIONES NORTE Y SUR. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA.....	48
TABLA 4: PORCENTAJE DE CONDUCTORES QUE CEDEN EL PASO AL PEATÓN EN CADA UNA DE LAS SIETE CONDICIONES EXPERIMENTALES. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	50
TABLA 5: LONGITUDES MÍNIMAS EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE PROYECTO DE LA VÍA. FUENTE: DECRETO MINISTERIALE 6792/2001	55
TABLA 6: TABLA PARA EVALUAR RADIOS DE CURVATURA EN DOS CURVAS CONSECUTIVAS. FUENTE: DECRETO MINISTERIALE 6792/2001	57
TABLA 7: TABLA DEL LÍMITE DEL COEFICIENTE DE ADHESIÓN VINCULANTE LONGITUDINALMENTE PROPUESTO POR EL DECRETO MINISTERIALE 6792/2001. FUENTE: DECRETO MINISTERIALE 6792/2001.	59
TABLA 8: DIAGRAMA DE DISTANCIA DE PARADA PARA DIFERENTES VELOCIDADES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	63
TABLA 9: TABLA PARA EL ANÁLISIS DE LOS CRUCES PEATONALES EN EL PASO DE CEBRA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	64
TABLA 10: FECHA, NÚMERO ID Y HORA EXACTA DEL CRUCE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	65
TABLA 11: TIPOLOGÍA DEL USUARIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	66
TABLA 12: ERROR DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	67
TABLA 13: PRESENCIA DE VEHÍCULO Y VELOCIDAD DEL VEHÍCULO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	68
TABLA 14: TABLA DE EXCEL DE EJEMPLO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	69
TABLA 15: TIPOLOGÍA DE LOS USUARIOS QUE HACEN USO DEL PASO PEATONAL EN AMBAS DIRECCIONES EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
TABLA 16: TIPOLOGÍA DE LOS USUARIOS QUE HACEN USO DEL PASO PEATONAL EN AMBAS DIRECCIONES EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
TABLA 17: TIPOLOGÍA DE LOS USUARIOS QUE HACEN USO DEL PASO PEATONAL, EN LA DIRECCIÓN DEL PARKING AL ESTADIO, EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	80
TABLA 18: TIPOLOGÍA DE LOS USUARIOS QUE HACEN USO DEL PASO PEATONAL, EN LA DIRECCIÓN DEL PARKING AL ESTADIO, EN VALORES PORCENTUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	80
TABLA 19: TIPOLOGÍA DE LOS USUARIOS QUE HACEN USO DEL PASO PEATONAL EN LA DIRECCIÓN DEL ESTADIO AL PARKING EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	81
TABLA 20: TIPOLOGÍA DE LOS USUARIOS QUE HACEN USO DEL PASO PEATONAL EN LA DIRECCIÓN DEL ESTADIO AL PARKING EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	81
TABLA 21: ERRORES DE ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	82
TABLA 22: ERRORES DE ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN, EN VALORES PORCENTUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	82
TABLA 23: CAUSA DE LOS FALLOS EN LA ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN, EN AMBAS DIRECCIONES, EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	83
TABLA 24: CAUSA DE LOS FALLOS EN LA ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN, EN AMBAS DIRECCIONES, EN VALORES PORCENTUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	83
TABLA 25: CAUSA DE LOS FALLOS EN LA ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN, EN LA DIRECCIÓN DEL ESTADIO AL PARKING, EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	85
TABLA 26: CAUSA DE LOS FALLOS EN LA ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN, EN LA DIRECCIÓN DEL ESTADIO AL PARKING, EN VALORES PORCENTUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	85
TABLA 27: CAUSA DE LOS FALLOS EN LA ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN, EN LA DIRECCIÓN DEL PARKING AL ESTADIO, EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	86
TABLA 28: CAUSA DE LOS FALLOS EN LA ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN, EN LA DIRECCIÓN DEL PARKING AL ESTADIO, EN VALORES PORCENTUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	86

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

TABLA 29: TIPOLOGÍA DEL CRUCE EN FUNCIÓN DE LA PRESENCIA DE VEHÍCULOS, EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	87
TABLA 30: TIPOLOGÍA DEL CRUCE EN FUNCIÓN DE LA PRESENCIA DE VEHÍCULOS, EN VALORES PORCENTUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	87
TABLA 31: TIPOLOGÍA DE LOS VEHÍCULOS QUE CRUZAN EL PASO PEATONAL, EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	88
TABLA 32: TIPOLOGÍA DE LOS VEHÍCULOS QUE CRUZAN EL PASO PEATONAL, EN VALORES PORCENTUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	88
TABLA 33: INTERACCIÓN VEHÍCULO-PEATÓN EN FUNCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS VEHÍCULOS, EN AMBAS DIRECCIONES, EN AMBAS DIRECCIONES, EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	89
TABLA 34: INTERACCIÓN VEHÍCULO-PEATÓN EN FUNCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS VEHÍCULOS, EN AMBAS DIRECCIONES, EN AMBAS DIRECCIONES, EN VALORES NUMÉRICOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	90
TABLA 35: INTERACCIÓN VEHÍCULO-PEATÓN EN FUNCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS VEHÍCULOS, EN LA DIRECCIÓN A LAS CALLES DE CIRCUNVALACIÓN, EN VALORES PORCENTUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	91
TABLA 36: INTERACCIÓN VEHÍCULO-PEATÓN EN FUNCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS VEHÍCULOS, EN LA DIRECCIÓN A CASALECCHIO DI RENO, EN PORCENTUALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	91
TABLA 37: NUMERO DE CRUCES PEATONALES DIARIOS EN LOS MESES DE JULIO Y AGOSTO, EN AMBAS DIRECCIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	92
TABLA 38: NUMERO DE CRUCES PEATONALES DIARIOS EN LOS MESES DE JULIO Y AGOSTO, EN LA DIRECCIÓN DEL PARKING AL ESTADIO Y EN LA DIRECCIÓN DEL ESTADIO AL PARKING. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	93
TABLA 39:NUMERO DE CRUCES PEATONALES DIARIOS EN EL MES DE JULIO, EN AMBAS DIRECCIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	93
TABLA 40: NUMERO DE CRUCES PEATONALES DIARIOS EN EL MES DE JULIO, EN LA DIRECCIÓN DEL PARKING AL ESTADIO Y EN LA DIRECCIÓN DEL ESTADIO AL PARKING. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	94
TABLA 41: NUMERO DE CRUCES PEATONALES DIARIOS EN EL MES DE AGOSTO, EN AMBAS DIRECCIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	95
TABLA 42: NÚMERO DE CRUCES PEATONALES DIARIOS EN EL MES DE AGOSTO, EN LA DIRECCIÓN DEL PARKING AL ESTADIO Y DEL ESTADIO AL PARKING. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	96
TABLA 43: DISTRIBUCIÓN EN FRANJAS HORARIAS DE LOS CRUCES DIARIOS EN LOS MESES DE JULIO Y AGOSTO, EN AMBAS DIRECCIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	97
TABLA 44: DISTRIBUCIÓN EN FRANJAS HORARIAS DE LOS CRUCES DIARIOS EN LOS MESES DE JULIO Y AGOSTO, EN LA DIRECCIÓN DEL PARKING AL ESTADIO Y DEL ESTADIO AL PARKING. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	97
TABLA 45: DISTRIBUCIÓN EN FRANJAS HORARIAS DE LOS CRUCES DIARIOS EN EL MES DE JULIO, EN AMBAS DIRECCIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	98
TABLA 46: DISTRIBUCIÓN EN FRANJAS HORARIAS DE LOS CRUCES DIARIOS EN EL MES DE JULIO, EN LA DIRECCIÓN DEL PARKING AL ESTADIO Y DEL ESTADIO AL PARKING. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	98
TABLA 47: DISTRIBUCIÓN EN FRANJAS HORARIAS DE LOS CRUCES DIARIOS EN EL MES DE AGOSTO, EN AMBAS DIRECCIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	99
TABLA 48: DISTRIBUCIÓN EN FRANJAS HORARIAS DE LOS CRUCES DIARIOS EN EL MES DE AGOSTO, EN LA DIRECCIÓN DEL PARKING AL ESTADIO Y DEL ESTADIO AL PARKING. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	99
TABLA 49 VELOCIDAD DE APROXIMACIÓN AL PASO PEATONAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	100
TABLA 50 INTERACCIÓN GLOBAL VEHÍCULO-PEATÓN PARA LAS TRES CATEGORÍAS DE VEHÍCULOS Y SIN DISTINCIÓN DE SENTIDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	101

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

TABLA 51 INTERACCIÓN GLOBAL VEHÍCULO-PEATÓN PARA LAS TRES CATEGORÍAS DE VEHÍCULOS EN DIRECCIÓN A LA CIRCUNVALACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....102

TABLA 52: INTERACCIÓN GENERAL ENTRE VEHÍCULOS Y PEATONES PARA LAS TRES CATEGORÍAS DE VEHÍCULOS QUE SE DIRIGEN HACIA CASALECCHIO DI RENO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA104

TABLA 53 TASA DE EFICIENCIA DE LA MEJORA DE ILUMINACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.105

ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1: OBJETIVOS DE REDUCCIÓN DE ACCIDENTES EN ITALIA PARA EL AÑO 2030. FUENTE: ISTAT ...	11
FIGURA 2: EVOLUCIÓN DE LOS FALLECIDOS EN LA CARRETERA EN LOS ÚLTIMOS 20 AÑOS EN LOS PRINCIPALES PAÍSES EUROPEOS. FUENTE:ETSC	12
FIGURA 3: EVOLUCIÓN DE LOS ACCIDENTES VIALES CON LAS VÍCTIMAS MORTALES Y LOS HERIDOS EN ITALIA. FUENTE: ISTAT	13
FIGURA 4: FORTIFICACIONES HISTÓRICAS DE LA CIUDAD DE BOLOGNA. FUENTE: COMUNE DI BOLOGNA	14
FIGURA 5: ORGANIZACIÓN DE LA CIRCUNVALACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA Y UBICACIÓN DE LA CALLE ANDREA COSTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	15
FIGURA 6: DETALLE DEL MAPA DE LA CIUDAD DE BOLOGNA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	15
FIGURA 7: VISTA CENTRAL DEL PASO DE PEATONES OBJETO DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	16
FIGURA 8: FOTOGRAFÍA DEL PASO DE PEATONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	16
FIGURA 9: PASO DE PEATONES ILUMINADO. FUENTE: NUEVOSVECINOS.COM	18
FIGURA 10: PASO DE CEBRA ELEVADO. FUENTE: LAVOZDEGALICIA.ES.....	18
FIGURA 11: PASO DE PEATONES EN POMPEYA. FUENTE: VAVEL.MEDIA.ES	19
FIGURA 12: PASO DE PEATONES EN POMPEYA. FUENTE: FUNDACIONGESTRAFIK.COM.....	20
FIGURA 13: PLACAS VIBRATORIAS DE LA TECNOLOGÍA AICROSS. FUENTE: AICROSS.ES	21
FIGURA 14: ANDÉN METRO. FUENTE: AICROSS.ES.....	21
FIGURA 15: RELACIÓN VELOCIDAD-MORTALIDAD. FUENTE: PROPUBLICA.....	22
FIGURA 16: AURORA CIVIL Y CREPÚSCULO CIVIL EN LA CIUDAD DE SANTIAGO. FUENTE: IMPACTO DE LA LUMINOSIDAD SOBRE LOS ACCIDENTES DE TRÁNSITO Y LOS FLUJOS VEHICULARES EN CHILE	24
FIGURA 17: CAMBIO EN LA TASA DE ACCIDENTALIDAD POR UNIDAD DE FLUJO VEHICULAR. FUENTE: IMPACTO DE LA LUMINOSIDAD SOBRE LOS ACCIDENTES DE TRÁNSITO Y LOS FLUJOS VEHICULARES EN CHILE	24
FIGURA 18: IMPACTO GLOBAL. FUENTE: IMPACTO DE LA LUMINOSIDAD SOBRE LOS ACCIDENTES DE TRÁNSITO Y LOS FLUJOS VEHICULARES EN CHILE.....	25
FIGURA 19: EJEMPLO DE SISTEMAS SICURLED Y SICURLUX EN UNA ROTONDA SITUADA EN ALFONSINE FUENTE: HTTP://WWW.ZAMAIMPIANTI.IT/	26
FIGURA 20: SECCIÓN DEL PASO DE PEATONES DE LA VIA ANDREA COSTA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	27
FIGURA 21: BORDILLO DE HORMIGÓN CON EL SISTEMA LOOKATME EN EL CRUCE PEATONAL DE VIA ANDREA COSTA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	28
FIGURA 22: DISTRIBUCIÓN DE LAS TIRAS DE LUCES LED DEL SISTEMA LOOKATME. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	28
FIGURA 23: SISTEMA DE ILUMINACIÓN DEL BORDILLO ENCENDIDO. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	29
FIGURA 24: SISTEMA LOOKATME EN ESTADO DE PRUEBA EN BOLGONA. FUENTE: HTTP://WWW.ZAMAIMPIANTI.IT/	30
FIGURA 25: SISTEMA LOOKATME EN ESTADO DE PRUEBA EN BOLOGNA. FUENTE: HTTP://WWW.ZAMAIMPIANTI.IT/	30
FIGURA 26: SISTEMA LOOKATME EN ESTADO DE PRUEBA EN BOLOGNA. FUENTE: HTTP://WWW.ZAMAIMPIANTI.IT/	31
FIGURA 27: ESCALA DE LA TEMPERATURA DE COLOR. FUENTE: ILUTOP.COM.....	32
FIGURA 28: SITEMA SICURLED Y SICURLUX. FUENTE: HTTP://WWW.ZAMAIMPIANTI.IT/	32
FIGURA 29: SISTEMA SICURLED. FUENTE: HTTP://WWW.ZAMAIMPIANTI.IT/	33
FIGURA 30: CAJA DE CONTROL DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	34
FIGURA 31: CRUCE VIA ANDREA COSTA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA.....	34

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

FIGURA 32: CRUCE VIA ANDREA COSTA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA.....	35
FIGURA 33: CRUCE EN VIA ANDREA COSTA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA.....	36
FIGURA 34: VISTA EN PLANTA DEL CRUCE EN VIA ANDREA COSTA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	36
FIGURA 35: CRUCE EN VIA ANDREA COSTA CON DOS CÁMARAS CON ÁNGULO DE VISIÓN DE 70°. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	37
FIGURA 36: CRUCE EN VIA ANDREA COSTA CON UNA CÁMARA DE 180° DE VISIÓN CON UN ÁNGULO DE 26° RESPECTO AL EJE VERTICAL. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	38
FIGURA 37: CRUCE EN VIA ANDREA COSTA CON UNA CÁMARA DE 180° DE VISIÓN CON UN ÁNGULO DE 90° RESPECTO AL EJE VERTICAL. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	39
FIGURA 38: CAJA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA.....	40
FIGURA 39: CAPTURA DE PANTALLA DE LA PÁGINA WEB DE DAHUA, EN LA QUE SE PUEDE DESCARGAR EL PROGRAMA DEL QUE SE HACE USO PARA ANALIZAR LOS VÍDEOS DE LAS CÁMARAS DE SEGURIDAD. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	41
FIGURA 40: VENTANA PRINCIPAL DE TOOLBOX. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	42
FIGURA 41: PANTALLA PRINCIPAL DE SMART PLAYER. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	42
FIGURA 42: COMANDOS PARA LA VISUALIZACIÓN DE VÍDEOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	43
FIGURA 43: FUNCIONES CLIC DERECHO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	44
FIGURA 44:COMANDOS PARA EL CONTROL DE LA REPRODUCCIÓN DE VÍDEO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	44
FIGURA 45: VENTANA PARA HACER CORTES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	44
FIGURA 46: TABLA CON LAS DISTINTAS 7 SITUACIONES POSIBLES. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	45
FIGURA 47: PUNTO DE VISTA DE UN CONDUCTOR EN LA CONDICIÓN 2, CON EL SISTEMA DE ILUMINACIÓN DEDICADA ENCENDIDO. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA.....	46
FIGURA 48: PUNTO DE VISTA DEL CONDUCTOR CON EL SISTEMA DE ILUMINACIÓN DEDICADA ENCENDIDO Y LAS LUCES LED EN LA ACERA ENCENDIDAS. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	47
FIGURA 49: PLANO DE LA TÉCNICA UTILIZADA PARA ANALIZAR LA VELOCIDAD. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	51
FIGURA 50: IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO DE ENTRADA AL TRAMO DE REFERENCIA EN EL CARRIL HACIA CASALECCHIO DI RENO. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	52
FIGURA 51: IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO DE ENTRADA AL TRAMO DE REFERENCIA EN DIRECCIÓN A LA CIRCUNVALACIÓN. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA.....	52
FIGURA 52: TÉCNICA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD: PUNTO DE ENTRADA A LA SECCIÓN DE REFERENCIA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	53
FIGURA 53: TÉCNICA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD: PUNTO DE SALIDA DE LA SECCIÓN DE REFERENCIA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	53
FIGURA 54: VISTA SATÉLITE GENERAL DEL TRAMO DE CARRETERA CERCANO AL PASO PEATONAL. FUENTE: FACOLTÀ D'INGEGNERIA DELL'UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	55
FIGURA 55: EXTRACTO PLANIMÉTRICO CON INDICACIONES DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD MÍNIMAS PARA PARADA SEGÚN EL DECRETO MINISTERIALE 6792/2001. FUENTE: DECRETO MINISTERIALE 6792/2001.	59
FIGURA 56: CURVA DE DECELERACIÓN. TIEMPO DE FRENADA DE EMERGENCIA DE UN VEHÍCULO EQUIPADO CON UN SISTEMA ABS. FUENTE: DECRETO MINISTERIALE 6792/2001	61
FIGURA 57: DIAGRAMA DE FASES DE FRENADO DE EMERGENCIA. FUENTE: DECRETO MINISTERIALE 6792/2001	61

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

FIGURA 58: FÓRMULA DE EXCEL 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	69
FIGURA 59: FÓRMULA DE EXCEL 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	69
FIGURA 60: FÓRMULA DE EXCEL 3. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	69
FIGURA 61: COLOCACIÓN Y ÁNGULO DE VISIÓN DE LA PRIMERA CÁMARA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA	70
FIGURA 62: EJEMPLO DE GRABACIÓN DE LA CÁMARA 1. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA	70
FIGURA 63: COLOCACIÓN Y ÁNGULO DE VISIÓN DE LA CÁMARA 2. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA.....	71
FIGURA 64: EJEMPLO DE GRABACIÓN DE LA CÁMARA 2. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA	71
FIGURA 65: TIPO DE USUARIO PEATÓN CON CARRITO DE BEBÉS. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA.....	73
FIGURA 66: FALTA DE ACTIVACIÓN DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN POR FALLO DEL SENSOR DE MOVIMIENTO. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA	74
FIGURA 67: FALTA DE ACTIVACIÓN DEL SISTEMA POR COMPORTAMIENTO INCORRECTO DEL USUARIO DEL CRUCE PEATONAL. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA.....	74
FIGURA 68: FALLO DE ACTIVACIÓN DEL SISTEMA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA	75
FIGURA 69: FALLO DE ACTIVACIÓN DEL SISTEMA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA.....	75
FIGURA 70: COMPORTAMIENTO ANÓMALO DEL VEHÍCULO: APROXIMACIÓN CON DISTANCIA Y TIEMPO PARA REALIZAR LA DETENCIÓN DEL VEHÍCULO. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA	76
FIGURA 71: COMPORTAMIENTO ANÓMALO DEL VEHÍCULO: INVASIÓN DEL PASO PEATONAL POR PARTE DEL VEHÍCULO. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA	77
FIGURA 72: EJEMPLO DE COMPORTAMIENTO ANÓMALO, CAMBIO DE CARRIL CRUZANDO UNA DOBLE LÍNEA CONTINUA. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA.....	77
FIGURA 73: EJEMPLO DE COMPORTAMIENTO ANÓMALO: INVASIÓN DEL PASO DE PEATONES. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA	78
FIGURA 74: DOS PEATONES ACORTANDO EL PASO POR EL CRUCE PEATONAL. FUENTE: FACOLTÀ D'INGENIERIA DI BOLOGNA	84
FIGURA 75: VALLAS PARA EVITAR CRUCES INDEBIDOS DE LOS PEATONES. FUENTE: ELDIARIO.ES	84
FIGURA 76 NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS POR CATEGORÍA DE VELOCIDAD, SIN DISTINGUIR SENTIDO DE MARCHA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	101
FIGURA 77 NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS POR CATEGORÍA DE VELOCIDAD, SENTIDO DE MARCHA, CARRETERAS DE CIRCUNVALACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	102
FIGURA 78 NÚMERO TOTAL DE VEHÍCULOS POR CATEGORÍA DE VELOCIDAD DIRECCIÓN DE VIAJE CASALECCHIO DI RENO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	103
FIGURA 79: VISTA SATÉLITE DEL PASO DE PEATONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	106

1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Hoy en día, debido al aumento de vehículos en la ciudad y al aumento de la densidad poblacional en las grandes ciudades, los accidentes de tráfico, y en especial, las colisiones entre coches y usuarios vulnerables de la vía (peatones, ciclistas, motoristas), suponen uno de los principales problemas que existen en las ciudades. Según la Organización Mundial de la Salud 1.3 millones de personas mueren todos los años en las carreteras y predicen que en menos de 10 años los accidentes de tráfico serán la quinta causa de muerte en el mundo. En términos económicos destacan que los accidentes de tráfico suponen un 3% del producto interior bruto de los países.

En la Unión Europea, las muertes de peatones representan un 21,2% de todas las muertes en accidentes de tráfico (Observatorio Europeo de Seguridad Vial, 2018). Además, los peatones de avanzada edad son significativamente más vulnerables ya que en la UE, el 47% del total de muertes de peatones corresponde a personas mayores de 64 años (Observatorio Europeo de Seguridad Vial, 2018). Por lo tanto, uno de los factores principales a tener en cuenta será la edad de los peatones como se ha podido ver, pero obviamente no será el único. Otro factor de suma importancia es la iluminación y la visibilidad en las calles, ya que el 50% de las muertes ocurren entre las 4 pm y la medianoche y el 7% entre la medianoche y las 4 am. No siendo eso suficiente, las muertes en los periodos de invierno, en los que las horas de luz diarias son significativamente menores, son mayores que en el resto de los periodos. En el intervalo de octubre a diciembre (periodo con menos horas de luz) las muertes de peatones representan un 35% del total de las muertes de todo el año, mientras que en periodos como el de enero a marzo esta cifra cae hasta el 25%, el periodo de abril a junio representa la cifra más baja con solo un 18% y el intervalo restante, de enero a marzo, el porcentaje es del 25%. Es algo más que obvio y razonable, pensar que estas diferencias en los porcentajes no es solo una cuestión de azar, si no que los factores iluminación y visibilidad juegan un papel importante. De hecho, las muertes de peatones tienen un carácter estacional mucho más fuerte que las muertes en carretera (Estrategias de seguridad vial y movilidad del próximo decenio, 2019) (Plainis & Murray, 2002).

Según la OMS existen los siguientes factores que riesgo que son los que pueden ser causa de un accidente de tráfico o empeorar las consecuencias: exceso de velocidad, conducción bajo los efectos de alcohol u otras sustancias, el no uso de los elementos de protección personal como cascos de moto o cinturones, conducir distraído, una infraestructura que no sea lo suficientemente segura, vehículos que no sean lo suficientemente seguros, una atención después del accidente inadecuada o leyes de tráfico inadecuadas. Está claro que muchos de estos factores son responsabilidad de otras partes de la sociedad y los ingenieros de tráfico no podemos hacer nada para mejorar estos aspectos, pero ni que decir tiene, que en la gran mayoría de los aspectos tenemos la total responsabilidad o al menos una gran carga de ella. Este trabajo poco podrá hacer en lo respectivo al uso de elementos de protección individual, o contra los conductores que usan los vehículos bajo los efectos de alguna sustancia. Por ello en este trabajo se quieren corregir algunos de estos aspectos en las carreteras y este cambio se quiere conseguir a través de la mejora de la infraestructura, en este caso con la incorporación de elementos innovadores en los pasos de peatones de la ciudad de Bologna, estas mejoras se verán más adelante en el trabajo en mayor profundidad, pero el principal objetivo que se tiene en este trabajo es mejorar la visibilidad durante las horas de noche para disminuir las colisiones coche-peatón en los pasos de cebra.

Este trabajo se centra principalmente en el estudio de la mejora de la iluminación nocturna en cruces peatonales innovadores, pero no es el único factor que ayuda a reducir las muertes de

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

peatones en las carreteras, además de las distintas variaciones y mejoras que se van a introducir en los pasos de peatones existen otros condicionantes que se han estudiado que ayudan a disminuir las cifras de accidentes de tráfico, como por ejemplo la utilización de prendas reflectantes por parte de los peatones y el uso de luces largas por parte de los conductores de los vehículos.

Si se analizan los factores centrados en los peatones estos están dirigidos en aumentar la visión de estos y la visibilidad que tienen ante los conductores, como se ha dicho anteriormente, uno de las opciones para mejorar la visibilidad que tienen hacia los conductores de vehículos es el uso de ropa que contraste con el fondo visual, en estas condiciones la capacidad de los conductores para ver y responder a una mayor velocidad al cruce de peatones aumenta considerablemente (Allen, Hazlett, Tacker, & Graham, 1970) (Wood, Tyrrell, & Carberry, 2005). Además, a parte del color de las prendas, otro condicionante que puede jugar bastante a favor para reducir los accidentes es el uso de tiras autorreflectantes para el mejor reconocimiento de peatones por parte de los conductores, además estas marcas son especialmente efectivas cuando se colocan sobre las extremidades de los peatones ya que así se moverán siguiendo un patrón específico, mientras que si se colocan, por ejemplo, en el torso del peatón no tendrán tanto movimiento como con la otra posibilidad y captarán menos atención visual (Owens et al., 2007). El efecto de estas marcas reflectantes no solo es positivo en el caso de los peatones, también está demostrado que mejoran la visibilidad por la noche si son utilizadas por los ciclistas en el cuadro de la bicicleta, de hecho, en muchos países es obligatorio utilizar luces traseras. (Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial, 2015)

La distancia a la que los conductores tienen capacidad de tener una respuesta adecuada también se ve influida por el uso de las luces largas. Cuando estas no se utilizan y solo se hace uso de las luces cortas, los conductores tienen a responder a la presencia de peatones a una distancia media de 60 m, mientras que con el uso de las luces largas esta distancia media sube hasta los 90 m (Wood, Tyrrell, & Carberry, 2005). Pese a esta evidencia, el uso de las luces largas no está tan difundido entre los conductores como debería ser y estos suelen hacer uso de las luces cortas con mucha más frecuencia que las largas, incluso cuando se encuentran en condiciones favorables para la utilización de estas.

Los estudios también mostraron que una inmensa mayoría de los peatones (un 95%) sobrestimaban su capacidad de visibilidad propia, siendo sus estimaciones hasta tres veces mayores que las distancias de visibilidad que realmente tenían. (Sinar, 1984)

Centrándose en el diseño de cruces peatonales, estudios previos han investigado el efecto positivo de la introducción de balizas intermitentes en la señal vertical "Ceda el paso al peatón". (Shurbutt, Van Houten, Turner, & Huitema, 2009) Examinaron los efectos de las balizas amarillas de destello rápido angular LED en cruces peatonales marcados no controlados. Las balizas rectangulares tenían 15 x 6 cm y se colocaron horizontalmente con una separación de 23 cm. Se iluminaron en una secuencia de oscilación y alternaron descargas lentas (124 ms encendidas y 76 ms apagadas por destello) y descargas rápidas (25 ms encendidas y 25 ms apagadas por destello). El sistema se activaba al pulsar el botón de llamada peatonal. Este patrón de parpadeo violó las expectativas del conductor y los resultados mostraron un marcado aumento en el comportamiento de ceder el paso del automovilista cuando las balizas LED amarillas rectangulares de parpadeo rápido estaban activas. Los mismos autores encontraron que un equipo de baliza superior estándar no produjo una diferencia significativa con una condición de referencia, presentando un resumen del rendimiento de los automovilistas en tratamientos innovadores de cruce de peatones, informaron un rendimiento promedio del 52% con la baliza

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

intermitente superior, activada por el peatón presionando un botón, con una alta variabilidad entre estudios (13-91%).

En los últimos años en Italia se había propuesto bajar la cifra de accidentes de tráfico y muertos en las carreteras, pero no se han logrado los objetivos esperados en un primer momento. En el año 2010 se propusieron unas cifras de víctimas máximas por año que iban reduciéndose año a año hasta llegar al objetivo de 700 en el año 2020.

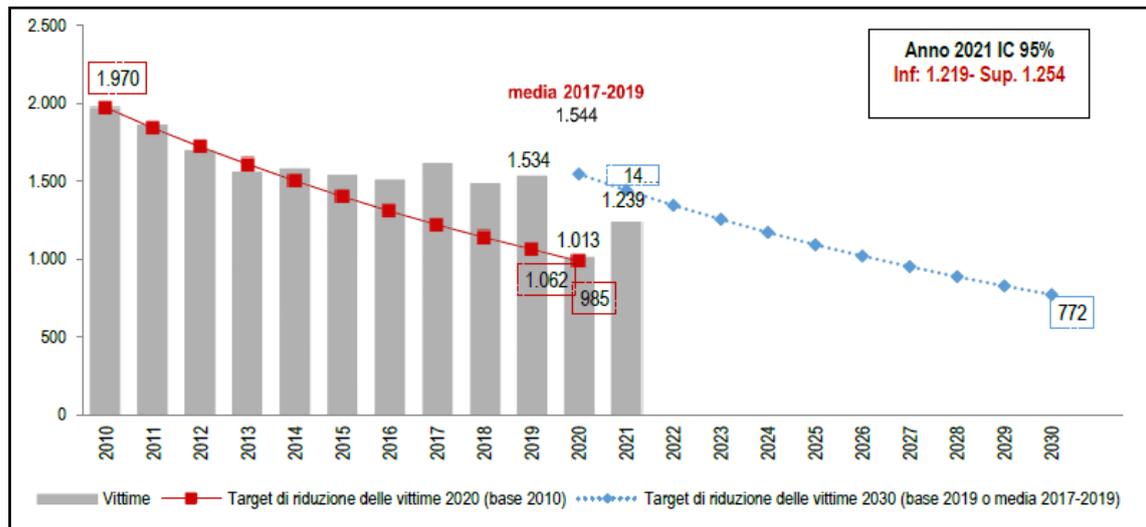


Figura 1: Objetivos de reducción de accidentes en Italia para el año 2030. Fuente: ISTAT

Como se puede ver en la gráfica la mejora hasta el año 2013 es muy significativa en todos los países, incluidos España e Italia, pero a partir de ese año se puede ver un estancamiento en las cifras que no es lo que se esperaba al marcar los objetivos de la Unión Europea. Por lo tanto, se puede llegar a la conclusión de que las medidas que se han tomado desde principios de siglos han sido muy efectivas y eficaces.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

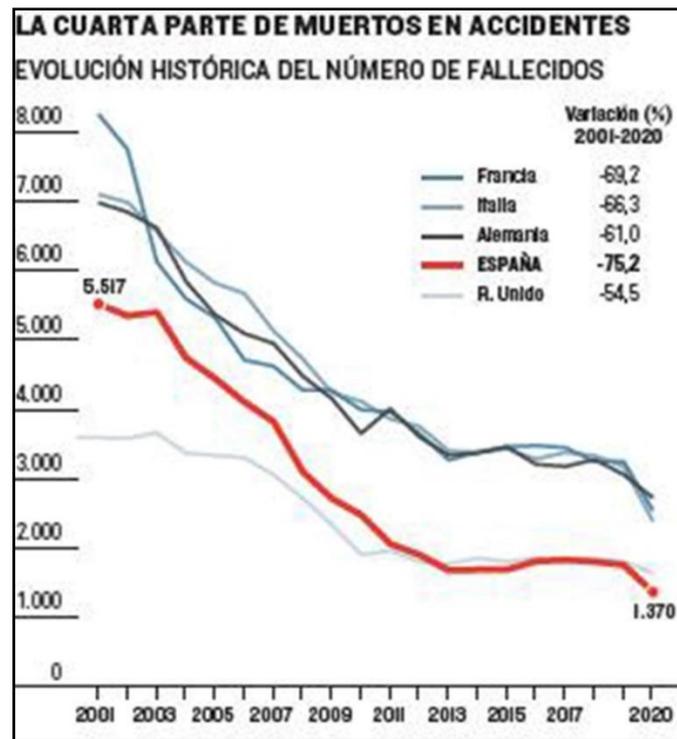


Figura 2: Evolución de los fallecidos en la carretera en los últimos 20 años en los principales países europeos. Fuente:ETSC

Estas medidas que nos llevaron a bajar tan drásticamente los accidentes en las carreteras son, entre otras, la introducción del carné por puntos y el cambio en el código penal que muchas infracciones en el tráfico pasaron a ser delito, como por ejemplo la tasa de alcoholemia y los excesos de velocidad, a esto habría que sumarle la concienciación de los conductores y la mejora del estado de las carreteras. Pero parece ser que esas medidas han llegado a su punto de efectividad máximo y que no van a bajar más los accidentes y el estancamiento va a seguir ahí, por eso se deben de tener en cuenta nuevas medidas que consigan que sigamos bajando los datos de muertos en la carretera como pasaba hace 10 años, algunas de estas medidas son, por ejemplo, la bajada de velocidad máxima en las ciudades, la supresión de los 20km/h en los que se podía superar la velocidad máxima de la vía para hacer un adelantamiento o, el caso que estudiamos en este trabajo, la introducción en nuestras calles de pasos de peatones inteligentes con el objetivo de bajar estas cifras a partir de la puesta del sol mejorando la visibilidad en los pasos de cebra.

Pero estos objetivos no se han conseguido en absoluto, de hecho, el único año que se consiguieron cifras parecidas a las esperadas es en 2019 debido a la cuarentena general que se impuso, en el año 2020 se redujo un 27,5% el kilometraje anual recorrido y el porcentaje de personas que hicieron al menos un viaje al día bajó del 85% al 32%, con estos datos, la justificación de esta bajada repentina está más que clara. Además, se puede ver en el gráfico en el año 2021 volvieron a subir las cifras a niveles más altos de los objetivos.

Por ello, en el año 2020 se volvieron a definir los objetivos de reducción de víctimas mortales para el año 2030.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 3: Evolución de los accidentes viales con las víctimas mortales y los heridos en Italia. Fuente: ISTAT

En el año 2019, que es el último año del que se tienen datos fiables debido a los cambios que produjo el coronavirus en nuestros desplazamientos, se registraron 241.384 heridos y 3.173 muertos en las carreteras italianas, esto significa que hubo 661 heridos y casi 9 muertos diarios, son unas cifras que, aunque hayan ido bajando tímidamente, se encuentran muy lejos de los objetivos que se marcaron años atrás, como se ha comentado anteriormente.

1.2 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN PREVIA EN LA CIUDAD DE BOLOGNA

En este contexto, el ayuntamiento de Bologna, junto con la Escuela de Arquitectura e Ingeniería de la Universidad de Bologna, ha dotado a algunas intersecciones con pasos de cebra con sistemas tecnológicos innovadores cuya finalidad es mejorar la interacción entre vehículos y peatones y, en consecuencia, aumentar la seguridad de todos los usuarios de la vía pública. Uno de estos es el situado en la via Andrea Costa, situado en los alrededores del estadio municipal de fútbol, el cual es el objeto de estudio de este proyecto

Antiguamente la ciudad de Bologna tenía varias líneas de fortificaciones, en el siglo III d.C se construyó la primera de las fortificaciones para defender la ciudad, la Cerchia di Selenite (círculo de selenita) en honor a la gran cantidad de bloques de selenita que se utilizaron para su construcción, esta primera fortificación se puede ver en el mapa en color rojo, la segunda fortificación (véase en amarillo en la ilustración) se llamaba Cerchia di mille(círculo de los mil) en honor a los años de su creación que fue del 1000 d.C al 1100 d.C. Por último se construyó la Circla(véase en morado en la ilustración), una fortificación aún mayor que las dos anteriores que fue construida en torno al año 1300d.C y que permaneció hasta el año 1902, cuando durante unas obras de 4 años se demolieron todas las murallas dejando únicamente algunas de las puertas de acceso por las calles principales de la ciudad. La demolición de estas murallas dio lugar a la disponibilidad de un amplio espacio que se podía destinar a la construcción de vías de circunvalación de la ciudad, y así fue, se construyeron vías de tres carriles en cada dirección que rodean el centro de la ciudad en forma de anillo.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

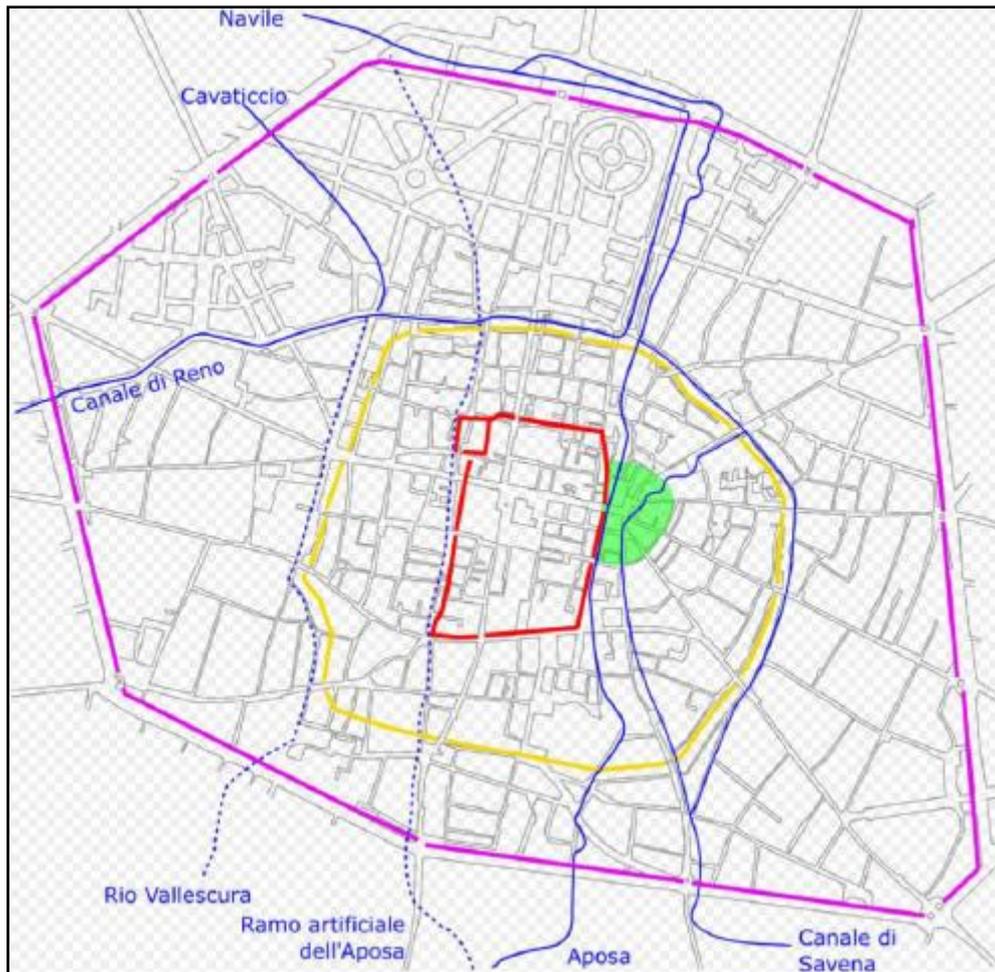


Figura 4: Fortificaciones históricas de la ciudad de Bologna. Fuente: Comune di Bologna

De esta manera se puede entender de manera más clara que la mayor parte del tráfico rodado en Bologna pasa por estas vías de circunvalación al centro de la ciudad y por las vías que cruzan hacia las diferentes zonas periféricas. Una de estas zonas periféricas que supone un centro de atracción de viajes es el estadio de fútbol Renato Dall'Ara y es fácil imaginar que un estadio de fútbol de un equipo de la primera división con espacio para más de 36000 espectadores es un centro de atracción de viajes bastante importante.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

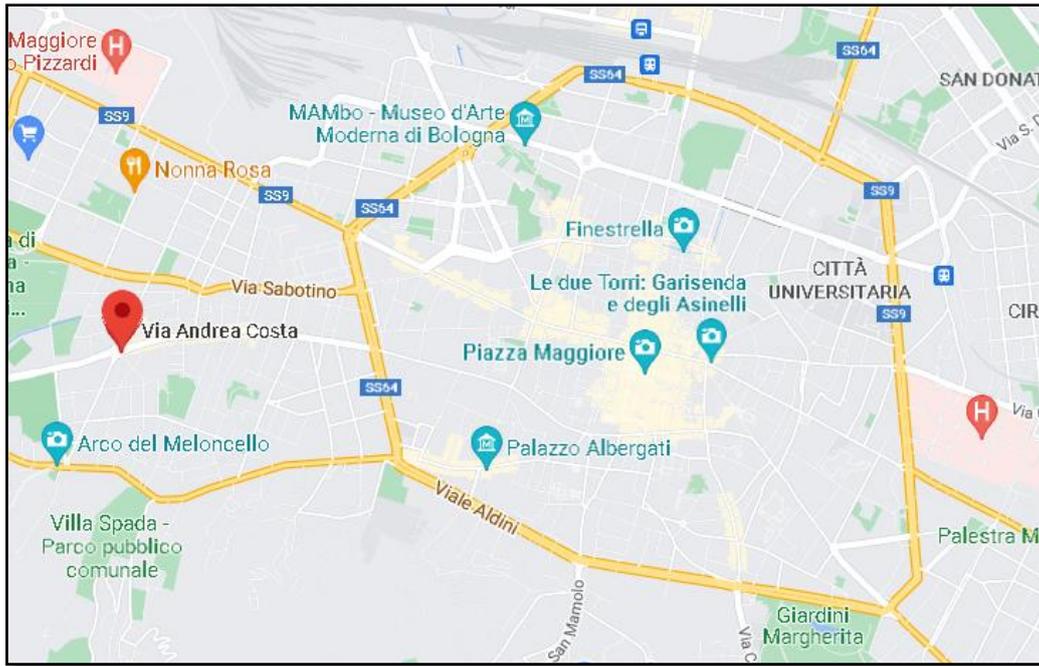


Figura 5: Organización de la circunvalación en la ciudad de Bologna y ubicación de la calle Andrea Costa. Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, debe existir una vía que canalice todo este flujo de viajes desde la circunvalación principal hasta el estadio Renato Dall'Ara, esta calle es la via Andrea Costa, la cual es la continuación de la via Sant'Isaia y de la via Saragozza.

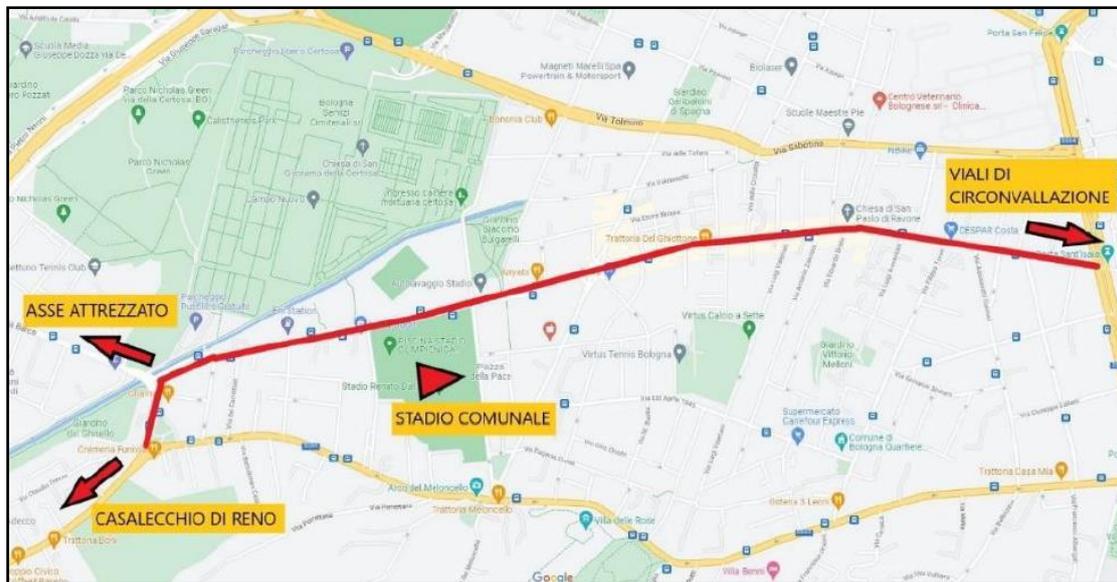


Figura 6: Detalle del mapa de la ciudad de Bologna. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

La via Andrea Costa es en la que se encuentra el paso de peatones que es objeto de estudio en este trabajo. Como se puede observar en la ilustración, en el lado izquierdo se encuentra el estadio del Bologna F.C y a la derecha de la imagen está la Porta Sant'Isaia, la calle que conecta estos dos lugares son las calles que se han comentado anteriormente, la via Sant'Isaia, que se avanza hasta el cruce con la via Irma Bandiera y la via Andrea Costa que va desde este cruce en adelante.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 7: Vista cenital del paso de peatones objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia



Figura 8: Fotografía del paso de peatones. Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la ilustración el paso de peatones está situado justo después de una entrada del aparcamiento Antistadium.

En Bologna, al igual que en muchos lugares, se utilizan una red de detectores electromagnéticos para calcular el volumen y dirección del tráfico. Justamente existe uno de estos detectores situada escasos metros del paso de peatones de la via Andrea Costa y se dispone de los datos del pasado año 2021.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal que se plantea en este trabajo es analizar la viabilidad y la eficacia de la implantación de pasos peatonales inteligentes, con la finalidad de hacer las ciudades más seguras y reducir las cifras de heridos y fallecidos en las vías urbanas.

Tras introducir este concepto innovador y al que no está muy acostumbrada la sociedad por lo general, se llevará a cabo un análisis en profundidad sobre la implantación de uno de estos sistemas en el cruce de la vía Andrea Costa, situado a las afueras de la ciudad de Bologna. Este análisis tratará tanto de las características del sistema utilizado, como de la metodología que se ha utilizado para analizar los resultados que se obtengan.

También se estudiará el comportamiento de los usuarios de la carretera al aproximarse a un paso de peatones de estas características, teniendo en cuenta las características geométricas de la vía antes y después del cruce.

Por último, se estudiará la influencia de una iluminación y señalización innovadora como la del paso de peatones objeto de este estudio.

3. ESTADO DEL ARTE

En un contexto como el que se ha estudiado en el segundo punto de este trabajo, el cual indica que los accidentes y las víctimas de tráfico son notablemente superiores a las que se han marcado como objetivo años atrás. Con esta realidad, los pasos de peatones se convierten en uno de los enclaves con mayor importancia para conseguir lograr las cifras propuestas.

Los pasos de peatones son zonas de intersección de la calzada habilitadas para que los peatones crucen y ante la que los vehículos que circulen por la calzada deben ceder el paso, hoy en día muchos de ellos tienen aplicados avances para mejorar la seguridad de los peatones como por ejemplo los pasos de cebra elevados mediante vadenes o los que cuentan con iluminación por la noche.



Figura 9: Paso de peatones iluminado. Fuente: nuevosvecinos.com



Figura 10: Paso de cebra elevado. Fuente: lavozdegalicia.es

3.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS PASOS PEATONALES

Pero no siempre la solución para lidiar con el cruce entre peatones y vehículos han sido de esta manera, teniendo en cuenta factores como la visibilidad, la iluminación, los materiales que se usan o el hecho de añadir los badenes para hacer a los vehículos disminuir la velocidad al aproximarse a la intersección. De hecho, los primeros pasos de peatones que se han encontrado fueron hallados en la antigua Pompeya, situada al sureste de Nápoles y tenían como objetivo hacer parar a los caballos que había en la época y que los peatones tuvieran una superficie para andar más segura y limpia que la que tenían los caballos.



Figura 11: Paso de peatones en Pompeya. Fuente: vavel.media.es

Además, estos adoquines estaban separados una cierta distancia, de manera que permitían el paso de los carros entre ellos y a su vez servían para el paso de los peatones de un lado al otro de la acera, haciendo así que evitaran tocar la superficie de menor altura, la cual estaba muy sucia.

También permitían controlar la velocidad de los carros, ya que estos al acercarse al paso de peatones debían aminorar la marcha para poder cuadrar las ruedas correctamente y así poder proseguir con la marcha. En caso contrario es probable que chocaran con los adoquines.

Ya se ha comentado anteriormente que una de las utilidades de estos pasos de peatones era proporcionar una superficie limpia para el paso de peatones, esto es debido a que en las ciudades antiguas no contaban con los medios para limpiar las calles y mantenerlas limpias como hoy en día y se solían tirar las basuras y todos los restos a la calle y esperar hasta que la lluvia las limpiase. Estos primeros pasos de cebría permitían solucionar este problema y permitían a los peatones proseguir la marcha sin el peligro de mancharse con las basuras y los barro acumulados.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 12: Paso de peatones en Pompeya. Fuente: fundaciongestrafic.com

De estos pasos de peatones que tenían en Pompeya a los nuestros hay mucha diferencia, pero obviamente no ha habido un cambio drástico entre una y otra imagen, si no que a lo largo de los últimos 70 años se han ido aplicando ciertas mejoras para conseguir mejores resultados. Los primeros datos que se tienen sobre pasos de peatones modernos datan del año 1949, cuando George H. Charlesworth puso solución al aumento de atropellos que había en las ciudades debido al crecimiento del número de coches en las grandes ciudades. Durante 2 años estuvo probando por todo el país un sistema de líneas azules y amarillas para que los automóviles se pararan al cruzar los peatones. El número de atropellos bajó drásticamente y se aprobó por ley la instalación en los lugares necesarios del país el 31 de octubre de 1951.

3.2 TECNOLOGÍA AICROSS

Teniendo claro este contexto y de donde viene la necesidad de solucionar el problema en las intersecciones peatón-coche se van a revisar varios avances previos a la redacción de este trabajo que han servido como ayuda para la investigación en la reducción de las víctimas en los pasos de cebra.

Un ejemplo de los pasos de peatones inteligente que se están llevando a cabo en los últimos años es la tecnología AiCross. Esta tecnología surge de un grupo de profesionales españoles de distintas disciplinas que empezaron este proyecto para crear un paso de peatones actualizado a los tiempos que vivimos hoy en día, donde se pasa gran parte del tiempo mirando la pantalla del móvil y en muchos casos con los auriculares puestos a la vez, lo que hace que no se vaya prestando atención a la carretera y podamos ocasionar accidentes. Este dispositivo es una plataforma vibratoria la cual se activa cuando coinciden estos tres factores:

- El semáforo está rojo para los peatones
- Hay un coche aproximándose al paso
- Hay un peatón (distráido normalmente) con intención de cruzar acercándose al paso de peatones

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Cuando estos tres factores se dan al mismo tiempo las placas de la ilustración vibran y activan sus señales acústicas y luminosas con la intención de advertir al peatón "zombi" de que se aproxima un coche al paso de peatones.



Figura 13: Placas vibratorias de la tecnología AiCross. Fuente: aicross.es

Las características de este sistema lo hacen perfecto para vías urbanas como por ejemplo hospitales, rutas escolares, zonas comerciales o cualquier zona con mucha afluencia de peatones.

Además, aunque este trabajo se centre en los pasos de peatones inteligentes, esta tecnología se puede utilizar en otros escenarios, como por ejemplo en los andenes de metros o tranvías, donde también es muy usual que los usuarios vayan despistados con sus teléfonos móviles y no presten atención a las vías cuando se aproxime el tren. Este es un buen escenario para su uso, pero donde más vidas y accidentes puede salvar este sistema es sin duda en pasos de peatones donde haya mucha afluencia de peatones.

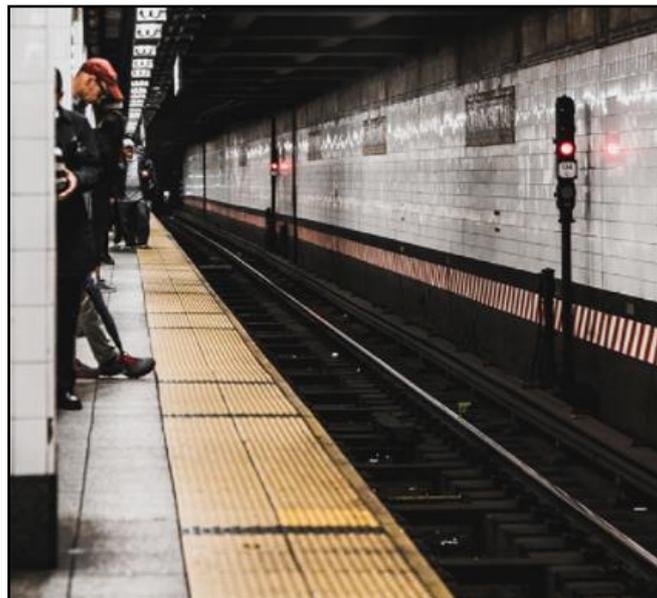


Figura 14: Andén metro. Fuente: aicross.es

3.3 MANUAL DEL PEATÓN

La dirección general de tráfico publicó en su boletín de noticias en el año 2016 un artículo sobre seguridad vial llamado *“El manual del peatón”* en el que cita de manera simple y clara para el lector unas normas básicas sobre la circulación de los peatones en la vía pública. Lo que más interesa de cara a la redacción de este trabajo son varios puntos que se citarán a continuación.

“Un peatón tiene menos del 20% de probabilidades de morir si es atropellado por un automóvil que circula a menos de 50 km/hora, pero casi un 60% de posibilidades si es atropellado a 80 km/hora. “

Con este dato que se puede ver claramente la importancia de la velocidad de los vehículos en la ciudad en lo respectivo a la reducción de las víctimas mortales en nuestras vías urbanas. Es fácil entender porque el Gobierno de España mediante el Real Decreto 970/2020 modificó el Reglamento General de Circulación para bajar la velocidad en las vías interurbanas de un carril de 50km/h a 30km/h. (García Sampere, 2016)

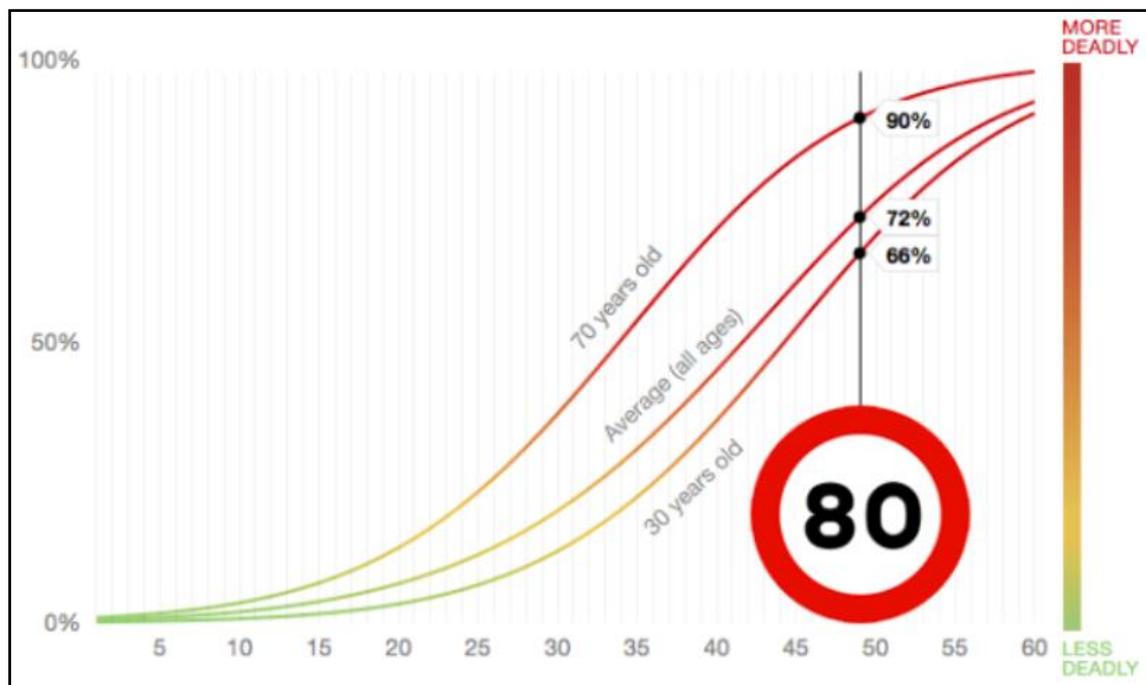


Figura 15: Relación velocidad-mortalidad. Fuente: ProPublica

Como se ve en la Ilustración, la relación entre la velocidad y la mortalidad es, obviamente, directamente proporcional, y además cuando se cumplen las medidas que se han comentado anteriormente del Real Decreto 970/2020 la mortalidad baja en picado desde los 50km/h hasta los 30km/h, teniendo en este punto una mortalidad casi nula para las personas que consideramos que están en su pico de salud. También se puede corroborar estos datos según el estudio que realizó en el año 2011 la fundación americana Foundation for Traffic Safety llamado *“Impact Speed and Pedestrian’s Risk of Severe Injury or Death”*, en este estudio se cita textualmente lo siguiente: *“ The average risk of death for a pedestrian reaches 10% at an impact speed of 23 mph, 25% at 32 mph, 50% at 42 mph, 75% at 50 mph, and 90% at 58 mph. Risks vary significantly by age. “*

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Teniendo en cuenta estos datos, es más que obvio que la velocidad a la que impacta un vehículo con un peatón es de vital importancia para que el accidente sea lo más leve posible. El objetivo que se debe afrontar en los pasos de cebra es que, tanto los conductores de los vehículos como los peatones, tengan el tiempo suficiente de reacción para detener el vehículo o que, en el peor de los casos, la velocidad de impacto sea la menor posible. Por ello se van a estudiar factores como una buena iluminación por la noche, una correcta visibilidad (tanto para los peatones como para los conductores) de día, como una correcta señalización ya que son detalles que pueden dar unas fracciones de segundo extra que en muchos casos pueden salvar vidas.

En la Orden Ministerial TMA/851/2021 que publicó el Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana en el Boletín Oficial del Estado el día 6 de agosto de 2021 se reforman varios aspectos relativos a la accesibilidad y no discriminación para el acceso y la utilización de los espacios públicos urbanizados. Entre estos espacios públicos urbanizados se puede encontrar a los pasos de peatones que en grandes ciudades suelen estar regulados por semáforos automáticos que tienen unos tiempos de verde/rojo predefinidos para las horas de día y de noche. Lo más destacable en materia de pasos de peatones y accesibilidad peatonal en esta Orden Ministerial es que redefine la velocidad mínima de los peatones al cruzar el paso de cebra, esta nueva velocidad se baja hasta los 0,5m/s, también redefine el tiempo de luz verde intermitente que habrá como mínimo en un semáforo y este deberá permitir que una persona, que circule a esta velocidad mínima que se ha comentado anteriormente, pueda terminar de cruzar la intersección antes de que el semáforo cambie de color.

“5.El tiempo de luz verde intermitente de los semáforos tendrá una duración que, como mínimo, permita a una persona situada en el centro de la calzada en el momento de su inicio alcanzar una acera o isleta de refugio antes de su final.

6.Los cálculos para establecer la duración mínima de la fase de paso para los peatones se realizarán desde el supuesto de una velocidad máxima de paso peatonal de 0,50 m/s.”

3.4 RELACIÓN ENTRE HUSO HORARIO, LUMINOSIDAD Y ACCIDENTALIDAD EN LAS HORAS DE SALIDA Y PUESTA DEL SOL

Ya se ha visto anteriormente que las horas de menor luminosidad son significativamente más peligrosas para todos los usuarios de la vía.

Por ello, pese a que los ingenieros tengan un papel muy importante a la hora de iluminar los pasos de peatones hay otros factores que entran en juego a la hora de reducir los accidentes. Las horas de salida y puesta de sol pueden jugar también un papel importante para disminuir las víctimas en la carretera, así lo demuestra un estudio de la Universidad Pontificia Católica de Chile que a finales del año 2015 hizo un estudio llamado “Impacto de la luminosidad sobre los accidentes de tránsito y los flujos vehiculares en Chile”.

Este estudio lo realizaron debido a que Chile cambió de huso horario en el año 2015 y comparó los datos de accidentalidad por horas comparando los del año 2014 con el huso horario antiguo y los del 2015 con el nuevo huso horario.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Tomando como referencia la ciudad de Santiago de Chile, esta es la diferencia en la hora de salida y puesta de sol en los años 2014 y 2015.

Fecha	Aurora Civil			Crepúsculo Civil		
	Mayo	Junio	Julio	Mayo	Junio	Julio
	Santiago					
Año 2015	8:05	8:19	8:15	19:14	19:10	19:23
Año 2014	7:05	7:19	7:15	18:14	18:10	18:23

Figura 16: Aurora Civil y Crepúsculo Civil en la ciudad de Santiago. Fuente: Impacto de la luminosidad sobre los accidentes de tránsito y los flujos vehiculares en Chile

Por lo tanto, observando la ilustración anterior, se puede observar un adelanto de una hora respecto al año anterior, esto implica que amanecerá y anochece antes. Se deberán de analizar los periodos de mañana y de tarde que han sufrido un empeoramiento y una mejora de la luminosidad natural respectivamente.

El periodo de mañana que comprendido entre las 7:15 y las 8:15 durante el año 2014 gozaba de una completa luminosidad y durante el año 2015 permanece totalmente oscuro.

El periodo de tarde que comprende de las 18:23 a las 19:23 durante el año 2014 se encontraba totalmente oscuro y durante el año 2015 goza de completa luminosidad ambiental.

Teniendo todo esto en cuenta, compararon las cifras de accidentes en la ciudad de Santiago durante el año 2014 y el 2015 y el resultado fue positivo, ya que, si bien es cierto que durante el periodo matutino aumentaron los accidentes, en el periodo de tarde mencionado anteriormente disminuyeron en mayor medida de lo que aumentó el matutino.

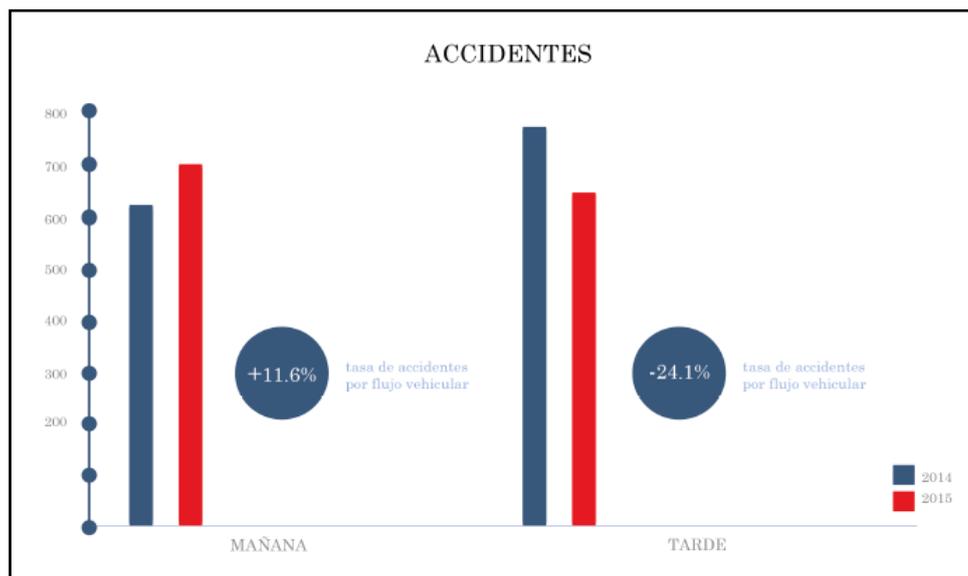


Figura 17: Cambio en la tasa de accidentalidad por unidad de flujo vehicular. Fuente: Impacto de la luminosidad sobre los accidentes de tránsito y los flujos vehiculares en Chile

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Es evidente, a raíz de los resultados, que existe un “intercambio” en las tasas de accidentalidad entre los dos periodos que son objeto de estudio y que este intercambio ha sido beneficioso en lo respectivo a accidentes.

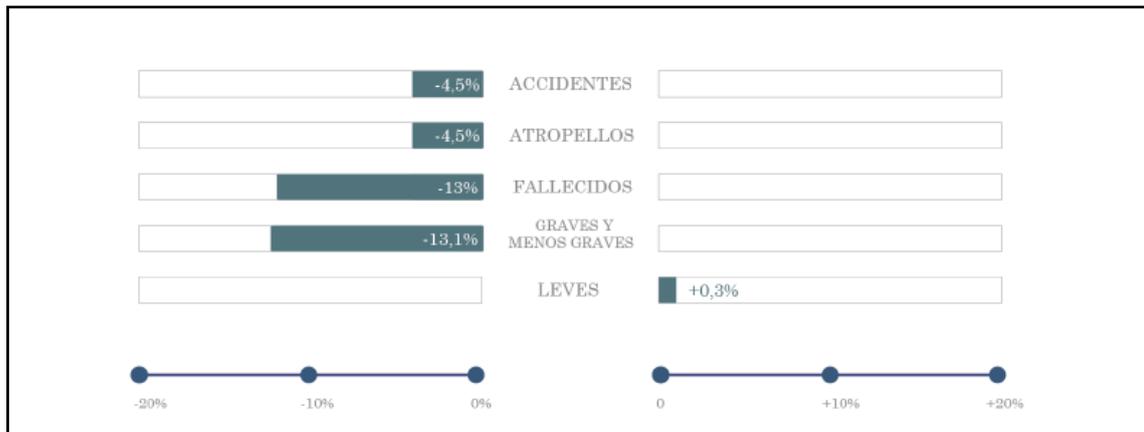


Figura 18: Impacto global. Fuente: Impacto de la luminosidad sobre los accidentes de tránsito y los flujos vehiculares en Chile

Como es de esperar, no solo los accidentes se han reducido, si no que también lo han hecho los atropellos, los fallecidos y los heridos graves y menos graves. Los heridos leves son los únicos que han subido un 0,3% únicamente.

La principal conclusión que se puede sacar de los resultados que arroja este estudio es la más que clara evidencia entre la luminosidad ambiental y las tasas de accidentes de tráfico, se puede ver claramente con el “intercambio” que se ha comentado anteriormente. También se puede observar la relación entre la luminosidad ambiental y cómo las personas adaptan su vida a ésta, los resultados muestran un incremento relativo del 2% en el flujo vehicular en los tramos horarios que tuvieron una mejora de la luminosidad ambiental, mientras que los tramos expuestos a una menor luminosidad sufrieron una disminución del 4% respecto al año anterior.

Por lo tanto, parece obvio que ajustando los husos horarios al ritmo de vida de las personas de los distintos países se pueden ajustar las horas de mejor luminosidad ambiental para conseguir bajar los accidentes de tráfico.

4. MÉTODO DE ANÁLISIS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo del trabajo se busca describir el modelo innovador de paso de peatones que está ya en funcionamiento en la via Andrea Costa en la ciudad de Bologna. En primer lugar, se describirá detalladamente el sistema de iluminación que hay instalado en el paso de peatones citado anteriormente, mostrando sus componentes principales y las características de estos más importantes. El principal objetivo que se busca es destacar sus características innovadoras que lo distinguen del resto de paso de peatones de la ciudad. Actualmente el proyecto se encuentra en fase experimental, por ello también será necesario explicar los métodos que se utilizan para supervisar el sistema y los resultados que este nos da, ya que el objetivo que se busca es evaluar la funcionalidad que tiene este sistema innovador mediante el estudio del comportamiento de peatones y vehículos.

Iluminación, cámaras, supervisión de las cámaras, método para descargar las imágenes y su interpretación,

4.2 SISTEMA DE ILUMINACIÓN

En primer lugar, se va a hablar sobre la iluminación que se ha instalado. Este aspecto es el de mayor importancia de todos los que componen el sistema, ya que es el pilar sobre el que trabajan el resto de los factores. La empresa encargada de la iluminación en el paso de peatones objeto de estudio en este trabajo es ZAMA Impianti Srl, empresa con sede en Forli, un municipio cercano a Bologna, esta empresa está especializada en la iluminación de cruces peatonales inteligentes y ha llevado a cabo decenas de trabajos de este tipo en toda la región de la Emilia Romagna.



Figura 19: Ejemplo de sistemas Sicurled y Sicurlux en una rotonda situada en Alfonsine Fuente: <http://www.zamaimpianti.it/>

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

En este paso de peatones se pueden combinar tres tipos distintos de señalización luminosa, estos son el sistema Lookatme, el sicurled y el sicurlux.

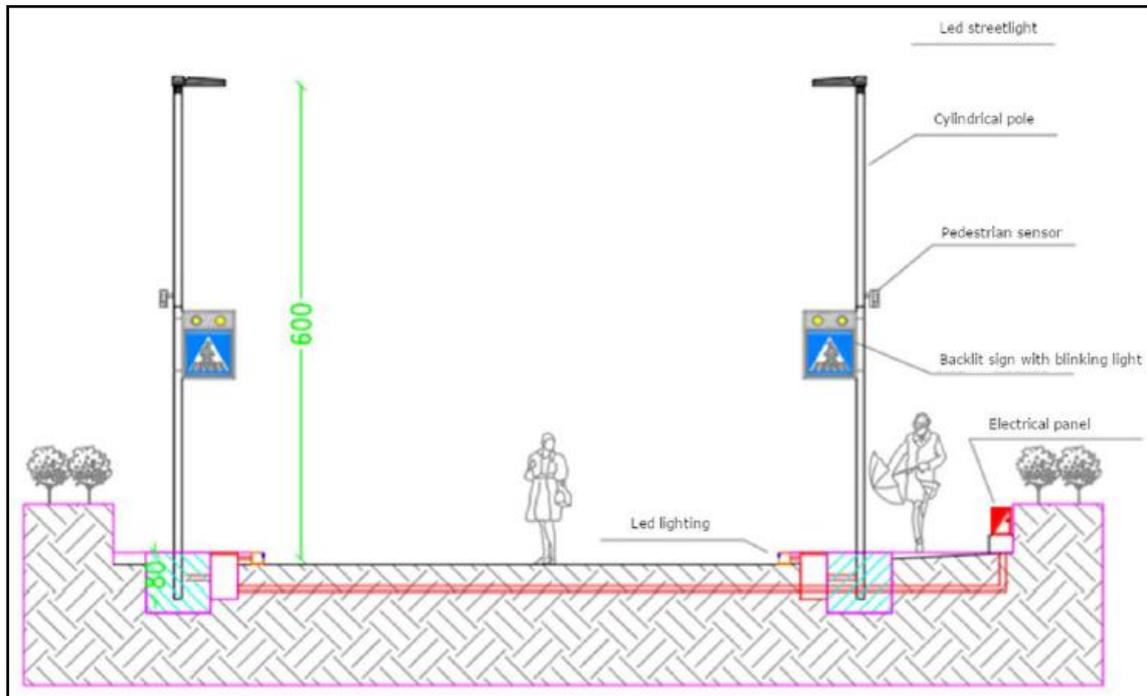


Figura 20: Sección del paso de peatones de la via Andrea Costa. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

En la ilustración se pueden ver los tres sistemas de iluminación mencionados anteriormente, en primer lugar el sistema Lookatme, que en la ilustración tiene el nombre de "Led lighting", el sistema SicurLed, que en la ilustración tiene el nombre de "Backlift sign with blinking light" y por último el sistema SicurLux que es lo que en la ilustración se llama "Led streetlight".

4.2.1 SISTEMA LOOKATME

El primero de ellos se llama sistema LookAtMe, y es básicamente una iluminación en forma de tira horizontal LED integrada en el bordillo, que busca que el paso de cebra y los peatones que lo utilicen sean notablemente más visibles para el tráfico rodado que con la iluminación que se pone normalmente que suelen ser farolas.



Figura 21: Bordillo de hormigón con el sistema Lookatme en el cruce peatonal de via Andrea Costa. Fuente: Elaboración propia

Como se ha dicho anteriormente este sistema se basa en luces LED, en concreto Flexi Led-Line que son moldeables, flexibles y resisten bien a la intemperie. El bordillo es de hormigón prefabricado con una altura aproximada de 12cm, anchura de 25cm y una longitud de 100cm.

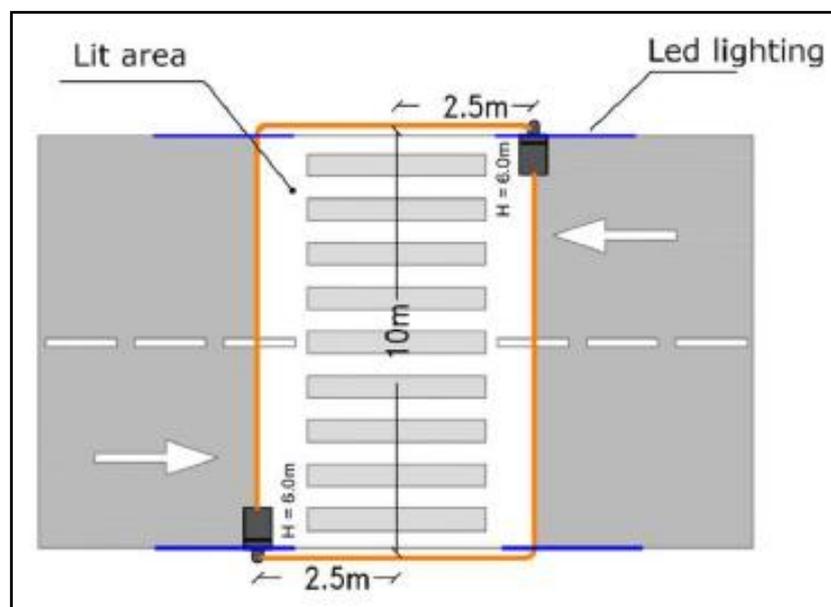


Figura 22: Distribución de las tiras de luces LED del sistema Lookatme. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Las luces son de color blanco frío (6000K), con un espaciamiento de 6 luces LED cada 5cm. Las tiras de LED se extienden durante 5m en total en cada acera, 2'5m a cada lado del paso de peatones.



Figura 23: Sistema de iluminación del bordillo encendido. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

En las figuras 21 y 23 y se puede ver el sistema exacto que se usa en la via Andrea Costa, un modelo correctamente integrado en el paso de peatones y que mejora notablemente la visibilidad del cruce peatonal, además en estas dos figuras se puede ver el sistema apagado y encendido para apreciar perfectamente la diferencia entre estos.

Al igual que el resto de los componentes del sistema de iluminación, funciona en conjunto con el detector de peatones y cuando este detecta la presencia de un peatón con intención de cruzar el paso peatonal se puede configurar para que funcione de una de las siguientes maneras:

- La primera es la más básica el sistema Lookatme se encenderá cuando el sensor detecte movimiento. Permanece encendido durante 15 segundos y si ningún otro peatón hace que se active el sensor se apagarán las luces.
- La segunda se basa en que las luces LED se mantienen encendidas como estado predeterminado y cuando el sensor se activa estas comienzan a parpadear. La tasa de parpadeo es de 1HZ con un ciclo de trabajo de 50% encendido y 50% apagado. El parpadeo se detiene en 15 segundos si el sensor no vuelve a detectar ningún movimiento.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

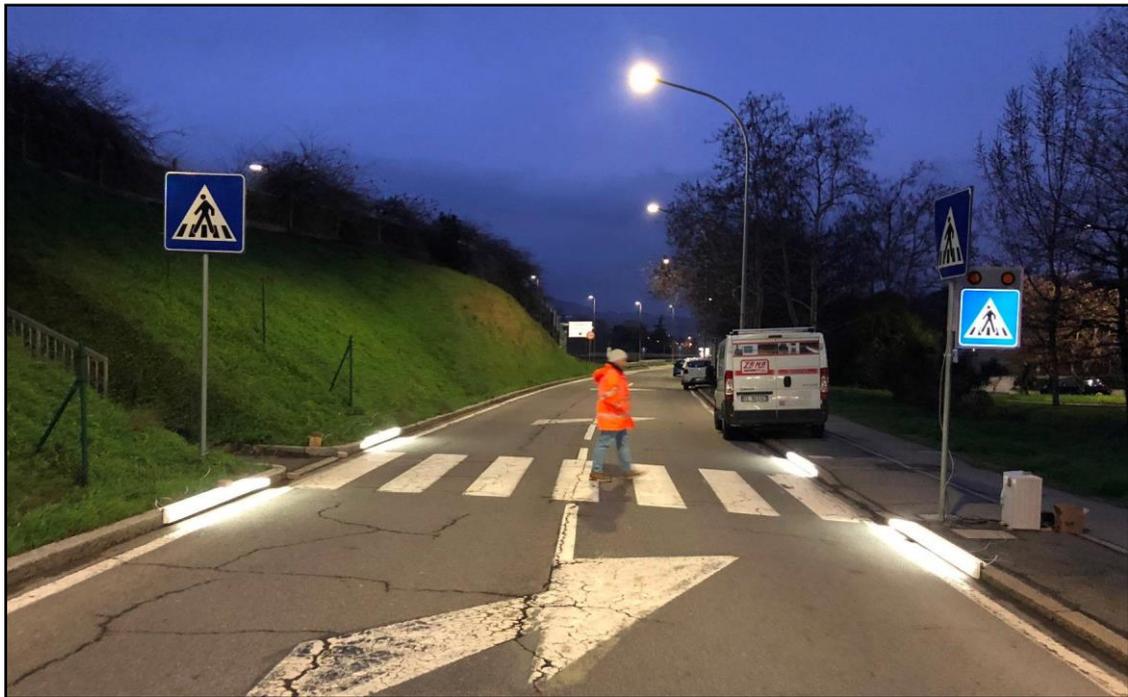


Figura 24: Sistema LookAtMe en estado de prueba en Bologna. Fuente: <http://www.zamaimpianti.it/>



Figura 25: Sistema LookAtMe en estado de prueba en Bologna. Fuente: <http://www.zamaimpianti.it/>



Figura 26: Sistema Lookatme en estado de prueba en Bologna. Fuente: <http://www.zamaimpianti.it/>

En las tres últimas figuras, la 24, 25 y 26 se ve al sistema Lookatme trabajando en solitario (sin los sistemas sicurlux y sicurlux). Cabe destacar que, aunque en las fotos no se pueda apreciar, este sistema puede funcionar tanto de manera intermitente como fija, como se ha hablado en el apartado de introducción, de manera intermitente es más efectivo ya que hace que los conductores presten más atención a los peatones que están utilizando el cruce, pero en el sistema de prueba que hicieron en el pequeño paso de peatones de las tres últimas figuras no lo llevaron a cabo de esta manera.

4.2.2 SISTEMA SICURLUX

El segundo sistema se llama SicurLux, y es una ligera mejora respecto a las típicas farolas que ha habido tradicionalmente iluminando nuestros pasos de peatones. Esta iluminación se encuentra siempre encendida por la noche trabajando en conjunto con los sensores de movimientos instalados en el paso de peatones (de los que se hablará más adelante), aumentando el nivel de iluminación de 70 lux a 120 lux medidos al nivel de la acera (iluminación horizontal medida en el centro del paso de peatones, con el sensor mirando hacia arriba) cuando estos sensores de movimiento detectan algún peatón con intención de cruzar el paso de peatones. Al igual que el sistema LookAtMe las luces utilizadas son LED, pero este se instala a una altura de 6m sobre la carretera. En este caso la temperatura del color es de 5700K.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Como antes se ha comentado que las luces del sistema Lookatme tenían una luz de 6000K y las del sistema Sicurlux son de 5700K, se adjunta una escala de la temperatura del color, la diferencia entre las dos luces es mínima, pero la de 5700K será levemente más cálida que la otra.

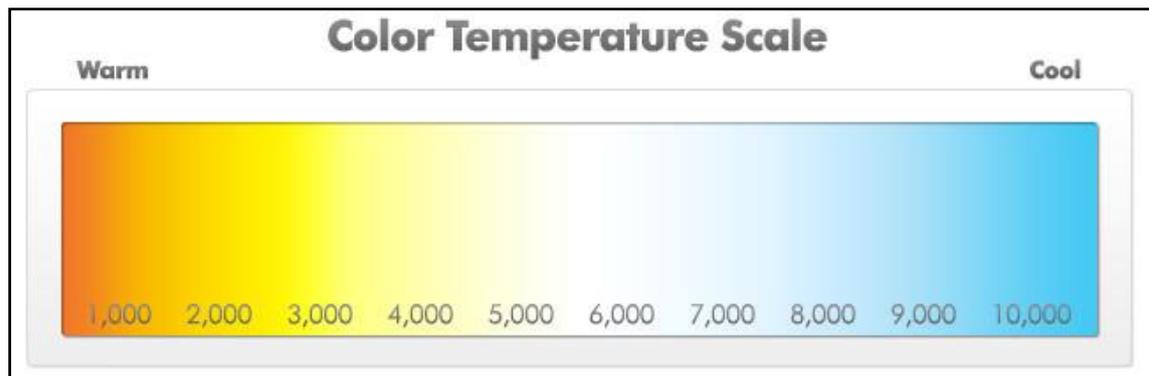


Figura 27: Escala de la temperatura de color. Fuente: ilutop.com



Figura 28: Sistema SicurLed y SicurLux. Fuente: <http://www.zamaimpanti.it/>

4.2.3 SISTEMA SICURLED

El último de los sistemas de iluminación es SicurLed, una señal peatonal con iluminación LED nuevamente retroiluminados con luces intermitentes conectadas también a los sistemas de captación de movimiento. Tienen un cuerpo de aluminio en forma cuadrada con unas dimensiones de 65*85cm y un grosor de 3cm, con una película refractiva a las luces nocturnas de los vehículos. Básicamente, es la típica señal de paso de peatones que estamos acostumbrados a ver en los pasos de peatones que requieren una mejor visibilidad nocturna, pero en este caso está dotada de unos sensores, al igual que el resto de los componentes del sistema, haciéndolo de esta manera un sistema más eficiente y más seguro para la interacción vehículo-peatón en condiciones de baja iluminación.



Figura 29: Sistema SicurLed. Fuente: <http://www.zamaimpianti.it/>

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Estos tres sistemas están sincronizados por una alimentación de 12V y un panel control VTR en el que está contenido todo el cableado electrónico, de control y de potencia.



Figura 30: Caja de control del sistema de iluminación. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

Una vez vistos los tres sistemas de iluminación que se están utilizando en el cruce de peatones de la via Andrea Costa es de utilidad fijarse en las figuras 31 y 32, para hacerse a la idea de una manera general de cómo funcionan estos tres sistemas a la vez.

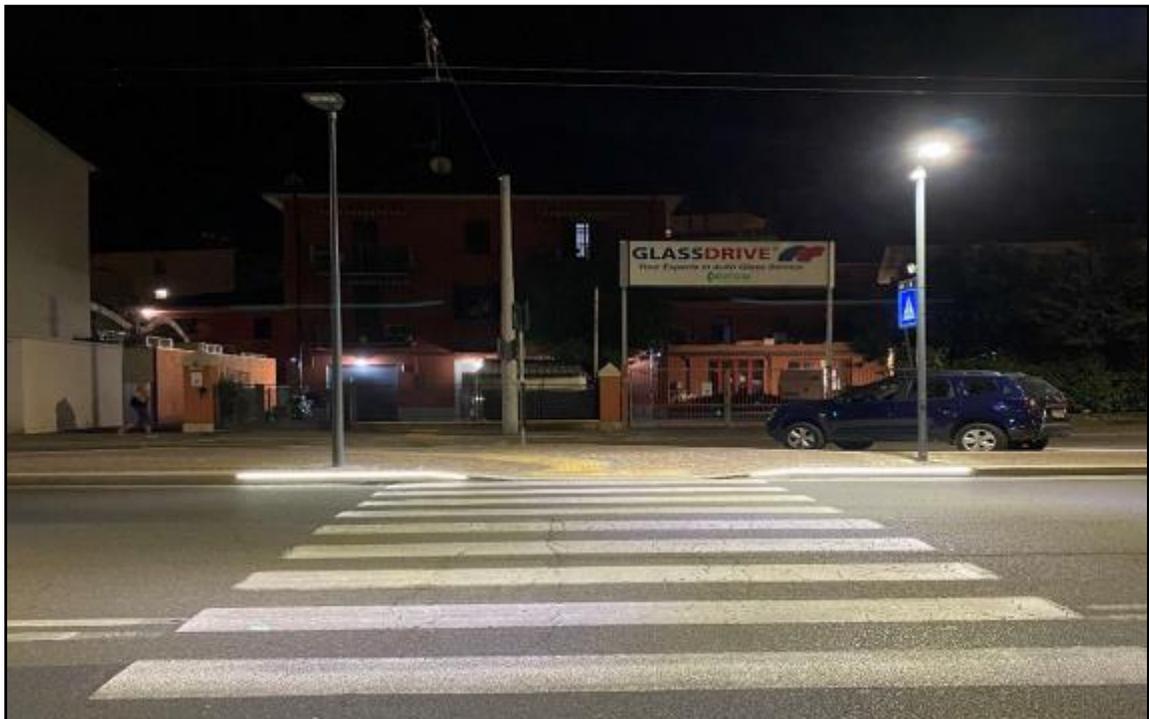


Figura 31: Cruce via Andrea Costa. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna



Figura 32: Cruce via Andrea Costa. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

4.3 SISTEMA DE CÁMARAS

La idea principal al instalar todo el sistema de iluminación explicado en el punto anterior es mejorar la visibilidad y, por lo tanto, la seguridad en el cruce que es objeto de estudio en este trabajo. Pero la manera más sencilla de comprobar que la instalación produce realmente una mejora en la seguridad es implantando un sistema de cámaras cerca del paso peatonal que supervise todos los acontecimientos que sucedan durante las horas nocturnas y el comportamiento que tienen tanto peatones como vehículos.

Anteriormente se ha hablado de que el sistema de iluminación está conectado a unos sensores de movimiento que hace que este solo se encienda cuando estos sensores detectan movimiento cerca del paso de cebra. Sin embargo, las cámaras y los equipos de grabación se mantienen encendidos durante todas las horas que no hay luz solar según el horario impuesto por el alumbrado público de la ciudad de Bologna. Lo que convierte a este sistema de cámaras en un sistema autónomo, que puede funcionar independientemente del resto de sistemas.

4.3.1 POSICIONAMIENTO DE LAS CÁMARAS

Tras conocer las principales características de las cámaras que se van a utilizar para grabar todos los acontecimientos que tengan lugar en el paso peatonal que se estudia en este trabajo, lo siguiente que se debe tener en cuenta es el posicionamiento y el ángulo de visión que van a tener las cámaras para optimizar los resultados que podemos obtener.

Sabiendo esto, hay que conocer en profundidad el paso de peatones, las características que este tiene y los elementos que lo rodean y pueden influenciar. Como se puede observar en las figuras 33 y 34 el cruce peatonal está situado en una carretera urbana de dos sentidos y tres carriles en total, con una anchura de 12,5m. En dirección este (hacia el centro de la ciudad) hay dos carriles separados por una isleta de tráfico en la que se encuentra una parada de autobús, en cambio en dirección oeste (saliendo del centro de la ciudad) existe únicamente un carril. Las cámaras están

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

situadas en los postes de alumbrado, en los que se encuentran los sistemas de alumbrado SicurLux y SicurLed, a una altura de 2,5m respecto al paso de cebra.



Figura 33: Cruce en via Andrea Costa. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna



Figura 34: Vista en planta del cruce en via Andrea Costa. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

El posicionamiento de las cámaras será, por lo tanto, en los postes de iluminación en los que se encuentran los sistemas de iluminación estudiados en el punto 2.2 de este trabajo. Pero lo que no es tan claro es el ángulo de visión que deberán de tener estas ya que no hay una solución clara.

- Una primera hipótesis es colocar una cámara en cada poste de iluminación, colocados cada uno en cada lado del paso de peatones, y que cada una de estas cámaras tenga un ángulo de visión de 70° .

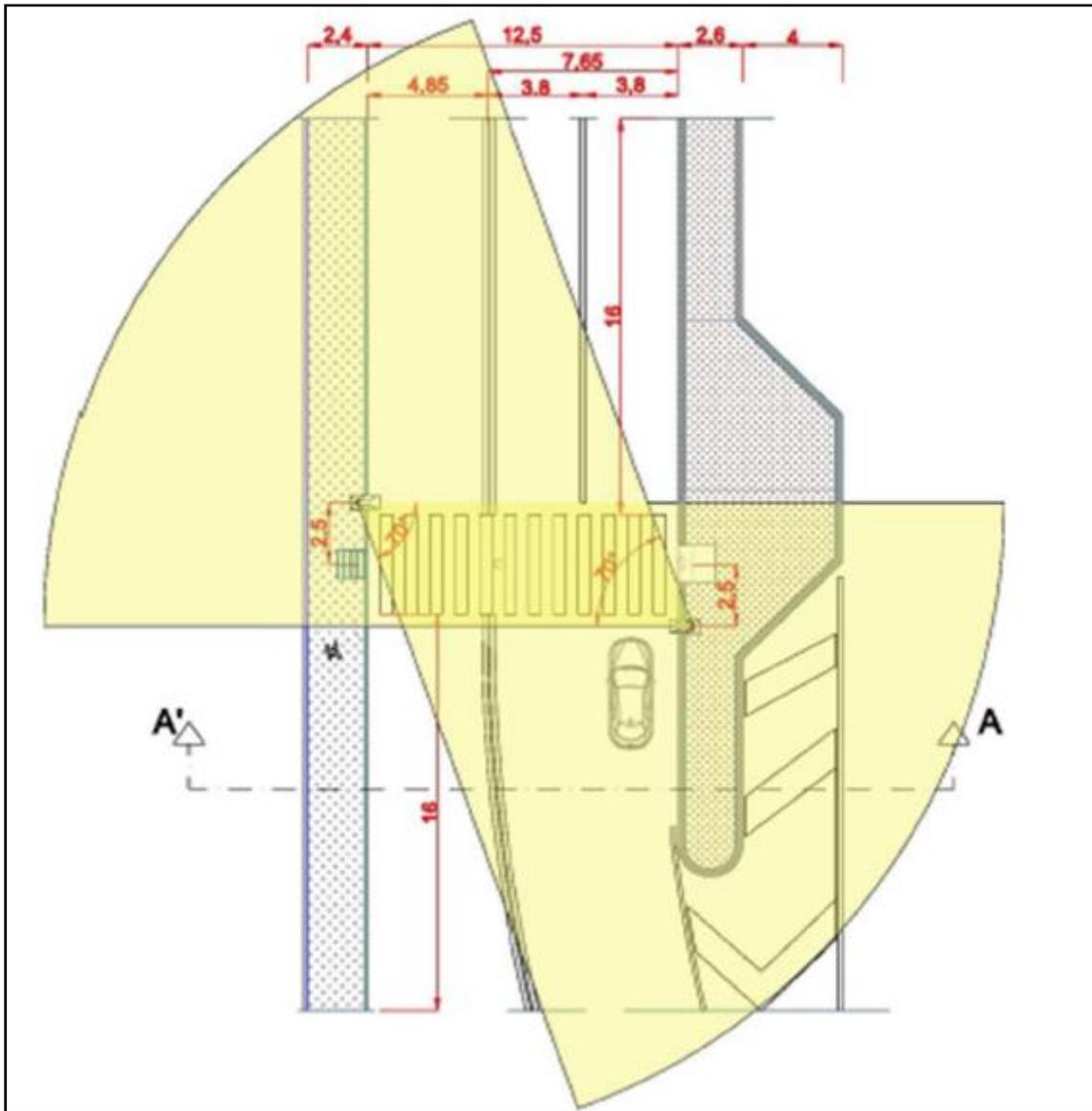


Figura 35: Cruce en via Andrea Costa con dos cámaras con ángulo de visión de 70° . Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

- La segunda hipótesis implica el uso de una sola cámara, pero esta tiene un ángulo de visión de 180°. En esta hipótesis se colocará la cámara girada con un ángulo de 26° con respecto al eje vertical paralelo a la carretera.

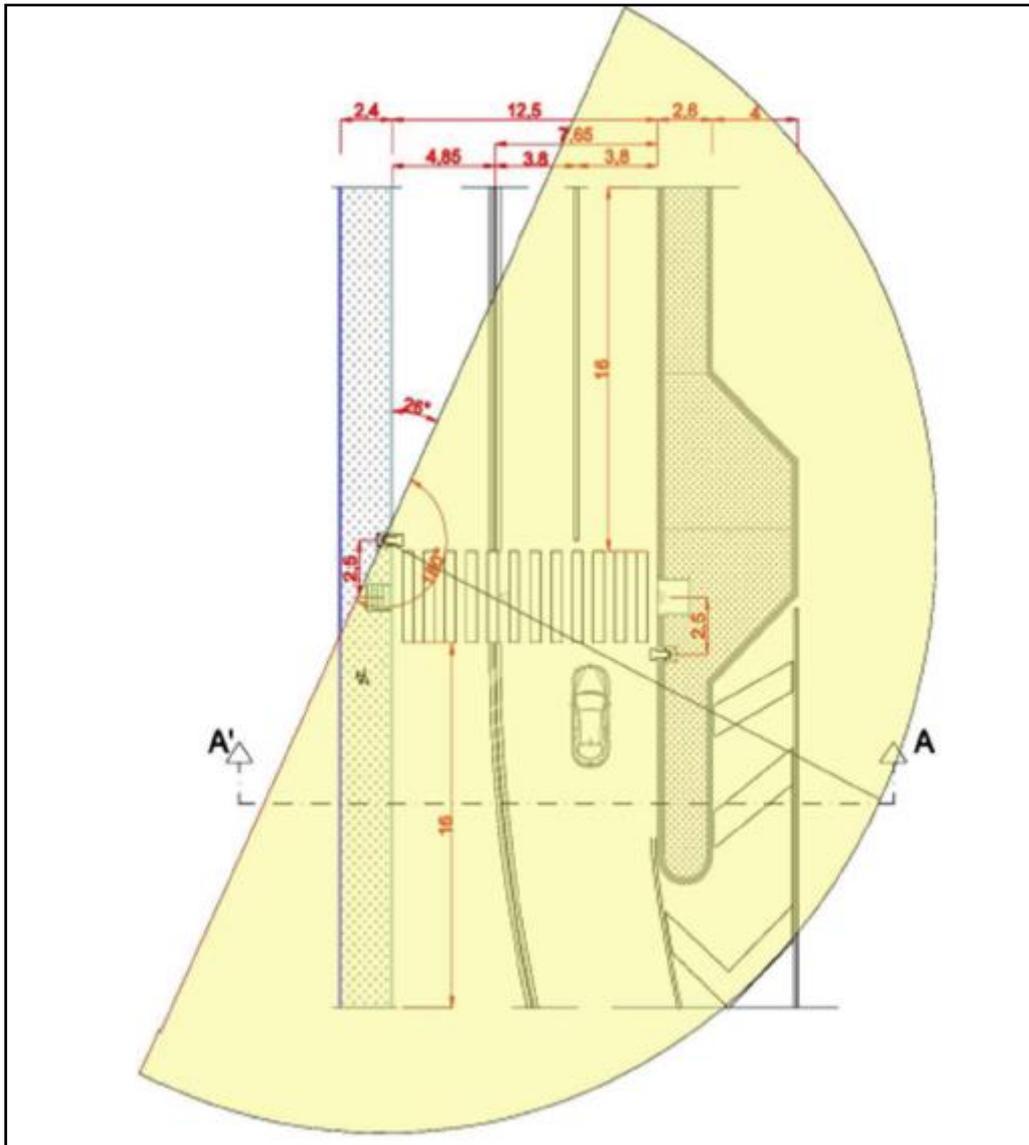


Figura 36: Cruce en via Andrea Costa con una cámara de 180° de visión con un ángulo de 26° respecto al eje vertical.
Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

- La tercera y última hipótesis usa, al igual que la segunda, una única cámara con 180° de visión, pero en este caso la cámara tendrá un ángulo de visión distinto a los 26° respecto al eje vertical de la carretera. Se optará por una solución en la que la cámara esté girada 90° respecto al eje vertical.

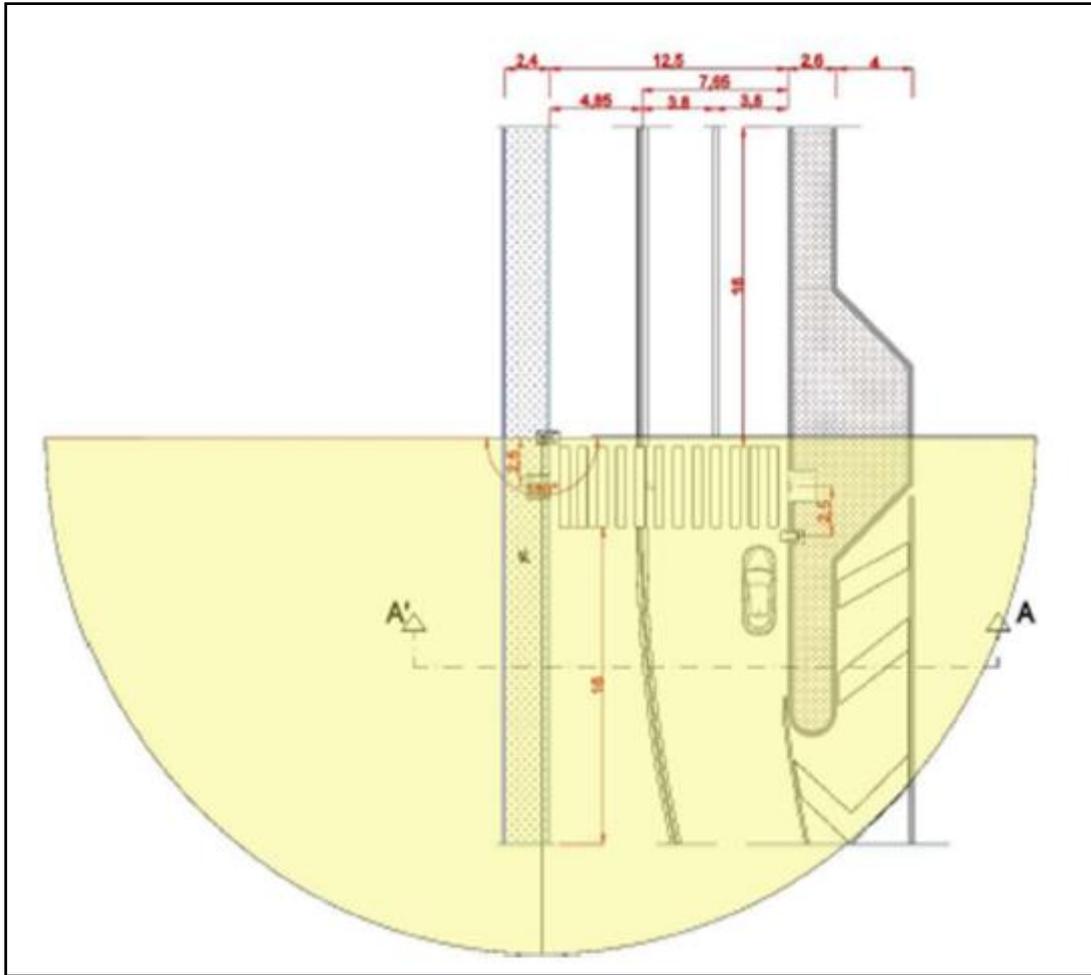


Figura 37: Cruce en via Andrea Costa con una cámara de 180° de visión con un ángulo de 90° respecto al eje vertical.
Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se van a presentar los métodos de análisis de los resultados que se van a obtener según los métodos del cuarto punto de este trabajo, una vez se conozcan estos se analizarán estos datos y se intentará obtener de ellos la mayor cantidad de información posible para que las conclusiones sean los más concisas y útiles posibles.

Teniendo en cuenta que los resultados que vamos a obtener van a ser vídeos, se deberá de trasladar esta información que se grabe a tablas y gráficos donde se puedan tratar estos datos de una manera más cómoda y práctica.

5.2 MÉTODO DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En primer lugar, hay que centrarse en cómo se van a descargar estas imágenes para posteriormente poder analizarlas. Anteriormente se ha hablado de una caja de control del sistema de iluminación, pues esta caja además de contener el sistema de control de toda la iluminación del paso de peatones tiene también algunos de los elementos de grabación y análisis de las cámaras instaladas. Por lo tanto, para descargar los datos habrá que ir al paso peatonal de via Andrea Costa, conectar el ordenador mediante un cable ethernet a los elementos de grabación que hay dentro de la caja de control y traspasar todos los archivos de vídeo al ordenador para poder manejarlo de manera más sencilla.



Figura 38: Caja de control de iluminación. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

Este proceso no es simple, pero no es de gran relevancia para este trabajo así que todos estos pasos no van a ser explicados en profundidad para poder dedicar más espacio a otros aspectos de mayor relevancia.

Por lo tanto, obviando todos los pasos hasta conseguir los vídeos de cada una de las noches que el sistema ha estado grabando las interacciones entre usuarios del paso de cebra y el tráfico rodado, se tendrán todos los vídeos listos para ser analizados y ver si las distintas medidas tomadas han tenido algún impacto en los accidentes o realmente hay que cambiarlas para el mes siguiente. Cabe destacar que la manera de operar que se ha llevado a cabo es la de probar una configuración de luces (colores, tiempos de encendido/apagado, intensidades...) durante un

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

mes entero y el mes siguiente probar una configuración distinta para, al final, compararlas todas y poder saber cuál de estas configuraciones es la óptima y segura para el paso de peatones que se está estudiando en este trabajo.

Una vez se tengan todos estos archivos listos para evaluarse, lo que se hará es analizar únicamente los momentos en los que alguna persona esté cruzando el paso de peatones y teniendo en cuenta que este trabajo evalúa solo los cruces que se realicen en las horas de noche y estos son significativamente menores en número a los que se hacen por día, se deberá poder acceder únicamente a los momentos en los que alguna persona esté usando el paso peatonal.

5.3 SOFTWARE DE VISUALIZACIÓN DE LOS ARCHIVOS

Los vídeos que capturan las cámaras de seguridad tienen un tipo de extensión particular llamado DAV. La extensión DAV es la que se suele utilizar para guardar las secuencias de las cámaras de seguridad.

En este caso se está utilizando un modelo DVR de la empresa Dahua. Estos archivos DAV contienen vídeo, audio y metadatos encriptados. Para poder visualizar estos archivos se pueden utilizar programas como Smart Player o DVR365. En este caso se usará el software Smart Player sugerido por el propio fabricante Dahua Technology, es un software especializado en reproducir vídeos de cámaras de vigilancia. Dispone de funciones de control de la reproducción, previsualización por partes y exportación de archivos, además soporta otros formatos como AVI, mp4, FLY, ASF, MOV y el propio DAV.



Figura 39: Captura de pantalla de la página web de Dahua, en la que se puede descargar el programa del que se hace uso para analizar los vídeos de las cámaras de seguridad. Fuente: elaboración propia

Es un programa que se puede descargar gratuitamente en la propia página web de la empresa Dahua, en el apartado de software (https://dahuawiki.com/Software/Dahua_Toolbox).

Tras descargar el programa, se deberá iniciar sesión con los credenciales y en la pantalla principal de Toolbox, en la sección "Todas las herramientas" se encuentra el programa de reproducción de vídeo Smart Player.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

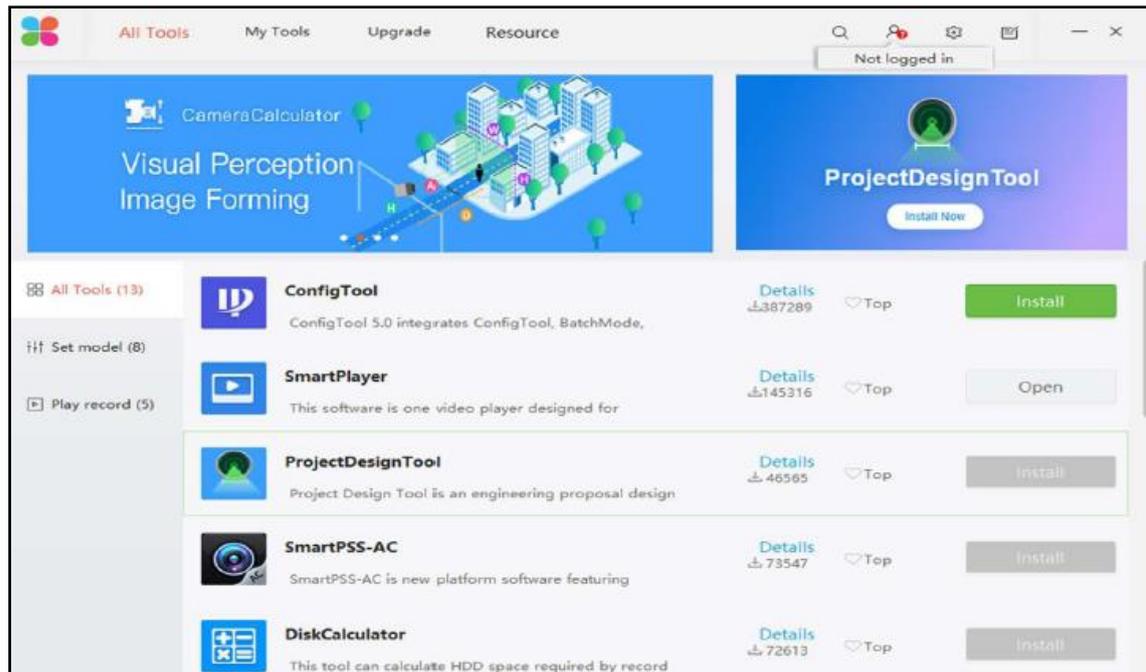


Figura 40: Ventana principal de Toolbox. Fuente: elaboración propia

Tras instalar la herramienta y estar logueado en Smart Player, se deberán añadir los videos que sean de interés. Como se muestra en la ilustración, en la esquina superior izquierda se encuentra el botón “+Add”, tras pulsar en este botón se abrirá un explorador de archivos y se deberán seleccionar los vídeos a analizar.

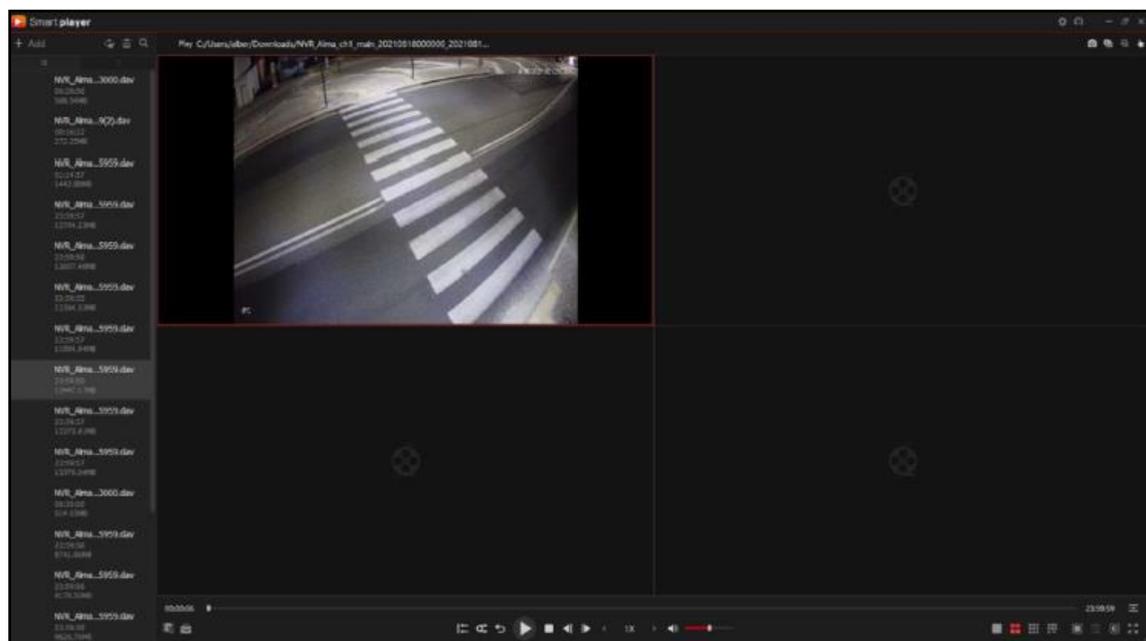


Figura 41: Pantalla principal de Smart Player. Fuente: elaboración propia

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

A su vez, se encuentran en la esquina superior izquierda, justo a la derecha del botón "+Add" tres botones que cumplen las siguientes funciones (de izquierda a derecha): el primero sirve para repetir el mismo vídeo o para reproducir los vídeos que hayamos añadido en orden alfabético, el segundo se utiliza para eliminar vídeos, y el último sirve para buscar algún vídeo en específico.

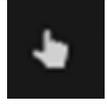
Icono de repetición: se utiliza para repetir el mismo vídeo o reproducir los vídeos en orden alfabético	
Icono de la papelera: se utiliza para eliminar todos los videos seleccionados	
Icono de la lupa: se utiliza para buscar un vídeo en específico	

Tabla 1: Tabla de los íconos del programa SmartView. Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en la parte superior derecha se encuentran el icono de configuración y un icono en el que si clicamos se puede encontrar información referente al consumo de CPU y RAM del programa. Debajo de estos se encuentran otros cuatro comandos que también son de interés.

Icono de la cámara: se utiliza para hacer una captura de pantalla	
Icono de varias cámaras: se utiliza para hacer varias capturas de pantalla	
Icono de la lupa: se utiliza para hacer zoom en alguna zona dela pantalla	
Icono de la mano: se utiliza para moder los vídeos a otros fotogramas	

Tabla 2: Tabla de íconos del programa SmartView. Fuente: Elaboración propia

Si nos fijamos en la ilustración X, la mayor parte de la pantalla principal de Smart View está ocupada por los distintos marcos que se utilizan para visualizar los vídeos. Utilizando los controles de la parte inferior derecha se pueden mostrar más o menos vídeos en la pantalla, el máximo de vídeos que se pueden mostrar a la vez es de 36.



Figura 42: Comandos para la visualización de vídeos. Fuente: elaboración propia

También es interesante apuntar que cuando se añade un vídeo a la lista de reproducción, este vídeo se abrirá automáticamente en la pantalla de visualización situada arriba a la izquierda, y si se hace doble clic en la pantalla la pantalla de reproducción se desplegará a pantalla completa, a su vez, si se vuelve a hacer doble clic esta pantalla volverá al tamaño que tenía anteriormente. Es posible también visualizar varios vídeos al mismo tiempo poniéndolos en pantallas de reproducción distintas.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Por último, aunque estas acciones se pueden hacer como se acaba de describir, también se pueden llevar a cabo haciendo clic con el botón derecho en la pantalla de reproducción del vídeo que se desee. Al hacer clic derecho se desplegará el menú que se muestra en la ilustración X y se podrán utilizar la función de visualización a pantalla completa, tomar una captura de pantalla u otras funciones.

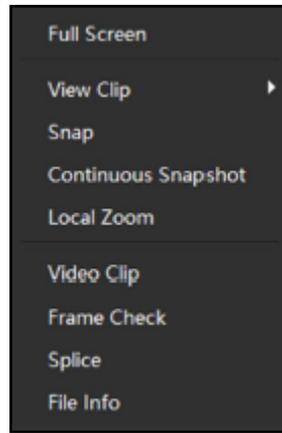


Figura 43: Funciones clic derecho. Fuente: elaboración propia

Siguiendo con el análisis de la pantalla principal del programa, en toda la parte inferior se encuentran los comandos para controlar la reproducción de los vídeos, como se puede ver en la ilustración X.



Figura 44: Comandos para el control de la reproducción de vídeo. Fuente: elaboración propia

Es de interés comentar la función del botón situado a la izquierda del todo de la barra, este botón con forma de tijera sirve para hacer cortes de un fragmento de la grabación que sean de interés. Al hacer clic en él, aparecerá una ventana como la de la ilustración X y el programa pedirá el momento de inicio y fin del clip que se quiere recortar indicado en "horas:min:seg" y la elección del formato del clip entre DAV o AVI.

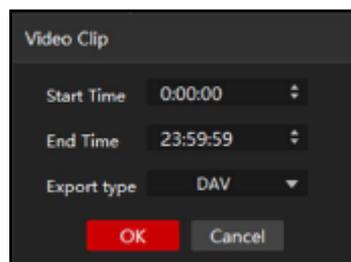


Figura 45: Ventana para hacer cortes. Fuente: elaboración propia

Siguiendo con la zona central de la barra de control de reproducción de vídeo, se encuentran los siguientes comandos empezando por la izquierda:

1. el botón para reproducir todos los vídeos a la vez desde el principio;
2. el botón de sincronización de vídeo;

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

3. el botón de retroceso, para ver el vídeo al revés;
4. el botón de reproducción, para reproducir y pausar el vídeo;
5. el botón de pausa;
6. el botón para ver el fotograma anterior;
7. el botón para ver el fotograma siguiente;
8. los botones en forma de flecha para elegir la velocidad de reproducción del vídeo, que va de 1/64x (cámara lenta) a 64x (cámara rápida);
9. la barra para ajustar el volumen del vídeo.

En la esquina inferior derecha, además de los botones para cambiar la disposición de reproducción de los vídeos, hay cuatro botones.

- El primero, que se llama "división interna" y se utiliza para dividir el cuadro en distintos subcuadros en los que se muestran partes específicas de la imagen ampliadas ligeramente, es posible elegir entre tres tipos de visualización.
- El botón de ojo de pez, es exclusivo para los vídeos que estén grabados con este tipo de objetivo (el ojo de pez se trata de un objetivo fotográfico ultra angular que abarca un campo de visión mayor que el convencional, de 180º)
- La pantalla de ajuste, que es útil para cambiar los colores con los que se muestran las imágenes, el brillo, el contraste, la saturación y el tono de estas.
- Por último, el botón "full frame", una vez que se pulse este botón el vídeo será visible en toda la pantalla de nuestro ordenador, incluso el cursor de desaparecerá de la pantalla, los controles volverán a ser visibles cuando se mueva el cursor.

5.4 ESTUDIO DE EFECTIVIDAD DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

Tras haber visto en detalle las tres partes del sistema de iluminación del paso de peatones de la vía Andrea Costa, se van a analizar la efectividad de cada uno de estos componentes llevando a cabo pruebas con las distintas combinaciones de encendido/apagado de los tres sistemas.

Para estudiar todos estos casos tenemos 4 componentes. El primero es la iluminación estándar vial que es de 16 lx al nivel de la acera, la iluminación mejorada (sistema Sicurlux), balizas intermitentes de color naranja en la señal de paso de peatones (sistema Sicurlid), iluminación LED en la acera (sistema Lookatme).

En todas estas combinaciones la iluminación estándar de la calle y la retroiluminación de las dos señales de paso de peatones permanecerán siempre encendidas.

On/off status of the pedestrian crossing components in the seven experimental conditions.					
Condition	Standard road lighting	Enhanced dedicated lighting	Orange flashing beacons	In-curb LED lighting	
1	On	Off	Off	Off	
2	On	On	Off	Off	
3	On	On	On	Off	
4	On	On	Off	On (steady)	
5	On	On	Off	On (flashing)	
6	On	On	On	On (steady)	
7	On	On	On	On (flashing)	

Figura 46: Tabla con las distintas 7 situaciones posibles. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

En la situación 1 todos los elementos permanecerán apagados menos la iluminación estándar vial que se ha mencionado anteriormente, estos elementos estarán encendidos en el resto de las situaciones también.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

En la situación 2 también se incluye el sistema de iluminación dedicada, que funciona a 70 lx cuando no se detecta ningún peatón y a 120 lx cuando el sensor detecta movimiento de algún peatón. En la ilustración X se puede observar el punto de vista del conductor en las condiciones de iluminación de la situación 2.

En la situación 3 entra en juego también las balizas de iluminación naranja intermitentes, estas balizas también funcionan junto a los sensores y se activan al detectar algún movimiento.

La situación 4 incluye lo mismo que la situación 2, pero añade también la iluminación LED situada en la acera, en este caso funcionando con una iluminación fija, sin parpadeo.

La situación 5 es igual que la anterior, pero en este caso la iluminación LED de la acera funciona de forma intermitente.

La situación 6 tiene las mismas características que la cuarta con la adición de las balizas intermitentes de color naranja del sistema Sicurled.

Por último, la situación es igual que la situación 5, pero con las balizas intermitentes naranjas funcionando.

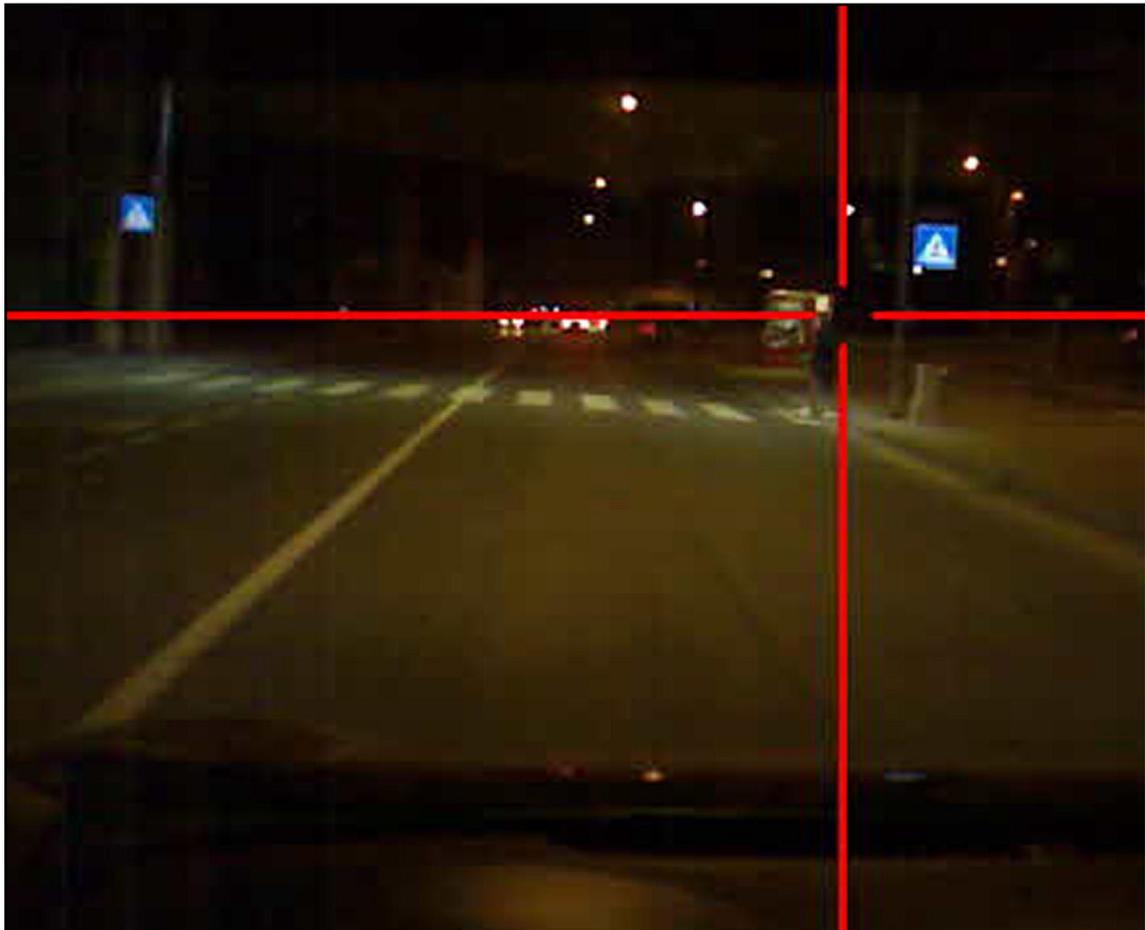


Figura 47: Punto de vista de un conductor en la condición 2, con el sistema de iluminación dedicada encendido. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

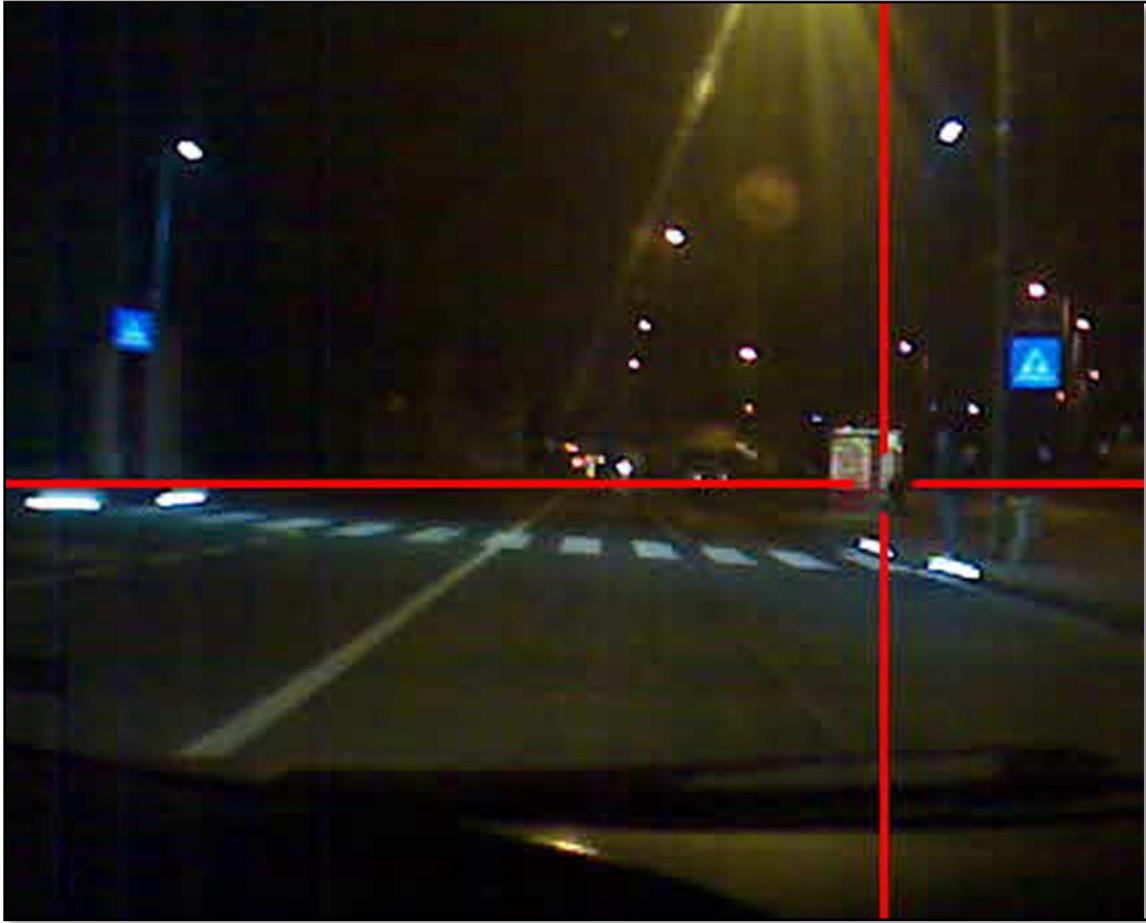


Figura 48: Punto de vista del conductor con el sistema de iluminación dedicada encendido y las luces LED en la acera encendidas. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

En las condiciones 6 y 7 todos los dispositivos estaban activados, con la única diferencia de que en la condición 7 la emisión de luces LED en la acera era intermitente, mientras que en la situación 6 la emisión era continua. El tiempo de parpadeo de las balizas de la señal de paso de peatones y las tiras de iluminación LED situadas en la acera es el mismo (1 Hz), sin embargo, los temporizadores de cada uno de los sistemas son distintos, por lo tanto, aunque en los primeros segundos estén en sincronía, al poco rato se desfasan progresivamente.

Para comparar todos los elementos del paso de peatones innovador y poder sacar conclusiones claras sobre la importancia y la efectividad de cada uno de ellos se realizaron 100 ensayos válidos en cada una de las 7 condiciones que se han expuesto anteriormente.

Para que los ensayos sean válidos, en cada uno de ellos el peatón que cruzaba el paso de peatones era una persona que era parte del estudio y tenía el mismo comportamiento siempre para así poder tener resultados más claros. Este peatón se colocaba inicialmente en la acera en una posición más retrasada, en la cual no activase el sensor de movimiento, una vez recibía el aviso de que se aproximaba un conductor a 60m el peatón cómplice activa el sensor de movimiento y se coloca en el borde de la acera, sin llegar a entrar al paso de peatones y mirando directamente al conductor del vehículo, manifestando así su intención de cruzar la calle.

En caso de que el conductor disminuya la velocidad cediendo el paso al peatón, este cruzaba la calle, en caso de que no cediera el conductor el paso el peatón retrocede hasta la posición inicial

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

donde no activa el sensor de movimiento y espera a que se le avise de un nuevo vehículo aproximándose.

El peatón cómplice iría vestido de oscuro (ropa de color marrón oscuro, azul marino, gris oscuro), se rotará entre 5 peatones cómplices, estos peatones conocían las condiciones del ensayo y estaban siempre bajo condiciones de completa seguridad. Todas las interacciones entre peatones y vehículos fueron grabadas por una cámara de vigilancia oculta de alta resolución para un análisis posterior más detallado.

Para que un ensayo se considerase valido debería cumplir las siguientes condiciones:

- Condiciones meteorológicas apropiadas: sin niebla, ni lluvia que afectasen la visibilidad del peatón y del conductor;
- Un solo peatón cruzando el paso peatonal;

-Distancia de una distancia adecuada entre el peatón y el vehículo cuando se active el sistema de iluminación para que el conductor goce de una visibilidad adecuada y el tiempo suficiente para detenerse;

- Baja densidad de tráfico en ambos sentidos y sin congestiones;
- Ningún autobús detenido en ninguna de las dos paradas de bus cercanas al paso de peatones;
- Que el vehículo que se aproxime no sea un ciclista.

5.4.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS

Varios investigadores examinaron todos los vídeos de los cruces para cada una de las siete condiciones. Para cada ensayo y condición, los investigadores evaluaron si el ensayo cumplía con las condiciones para ser considerado válido (es decir, si el comportamiento del peatón y el contexto eran los correctos) y si el conductor cedió el paso al peatón o si no.

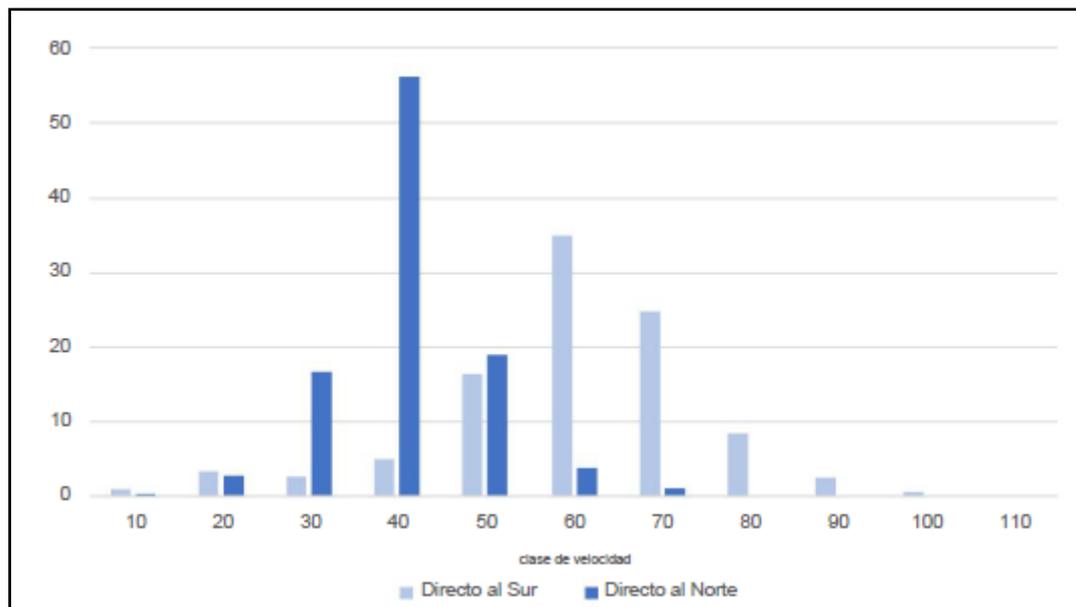


Tabla 3: Distribución de las velocidades de cruce de los vehículos en las direcciones norte y sur. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

La fiabilidad de los evaluadores (correlación de Spearman) era de $r=0,98$. Las diferencias de los porcentajes de cesión de paso a los peatones en cada una de las siete condiciones propuestas se mide con una prueba de chi-cuadrado. La misma prueba es la que se usó también para comprobar si el cumplimiento de la cesión de paso estaba influenciado por la dirección (conductores que viajan hacia el sur frente a conductores que viajan al norte), ya que, como se ve en la ilustración x la velocidad media de paso por el cruce peatonal es significativamente distinta entre los dos sentidos de circulación.

5.4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los porcentajes de cesión de paso a los peatones cómplices en las siete condiciones se muestran en la ilustración x. En la condición 1, con simplemente la iluminación vial estándar se puede apreciar que solo el 19% de los conductores cedieron el paso al peatón. Con la adición de la iluminación dedicada el porcentaje de cesión de paso por parte de los conductores aumentó hasta el 38,21 y la diferencia entre las dos primeras condiciones fue bastante significativa, demostrando así la eficacia del sistema de iluminación dedicada que se ha utilizado en estos pasos de cebra innovadores.

En la condición 3 se añade la utilización de balizas intermitentes de color naranja, pero esta adición no mejoró significativamente la frecuencia de rendimiento y el porcentaje de cesión de paso a los peatones es incluso menor que en la condición 2 (35,71%).

También la iluminación LED en la acera con una emisión constante (37,96% de porcentaje de cesión de paso al peatón) no aumentó significativamente el rendimiento en comparación con la condición 2.

En la condición 5 se tienen las mismas condiciones que en la cuarta, pero con la diferencia de que la iluminación LED en el suelo en este caso funciona de manera intermitente, lo que supone una mejora hasta el 43,9% de cesión de paso al peatón, que tampoco es una mejora significativa respecto a la frecuencia registrada en la condición 2 (iluminación dedicada mejorada). El combinado de la activación de las luces intermitente naranja y la iluminación LED en la acera con emisión constante resultó en un porcentaje de cesión de paso del 45,45% que tampoco fue significativamente superior a la registrada en la condición 2.

Mientras que la condición 7, que incluye la iluminación vial estándar, la iluminación dedicada mejorada, las balizas intermitentes naranjas y la iluminación LED en la acera funcionando de

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

manera intermitente tiene un porcentaje de cesión de paso del 63,55%. Este resultado es significativamente mayor que el resto de las condiciones, como se ve en la tabla 4.

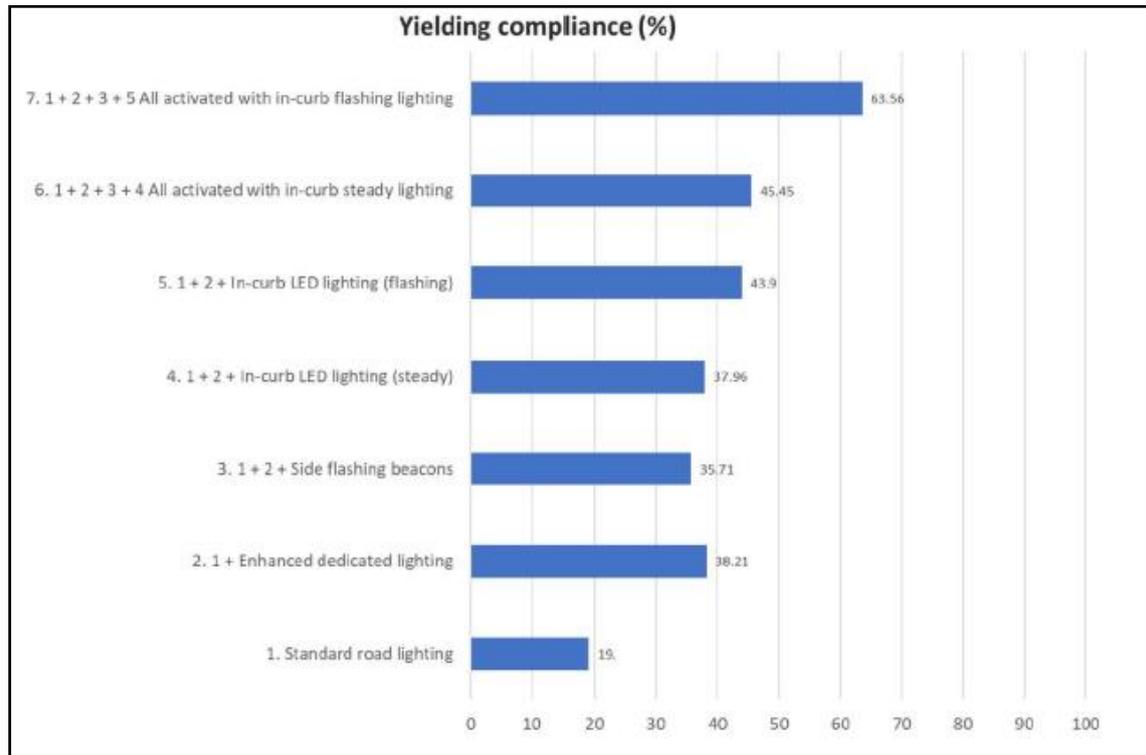


Tabla 4: Porcentaje de conductores que ceden el paso al peatón en cada una de las siete condiciones experimentales.
Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

5.5 ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD

Otro de los parámetros significativos que necesitan una descripción y un análisis específico es la estimación de la velocidad de los vehículos, medida a partir de unos indicadores de velocidad colocados en ambos sentidos de circulación.

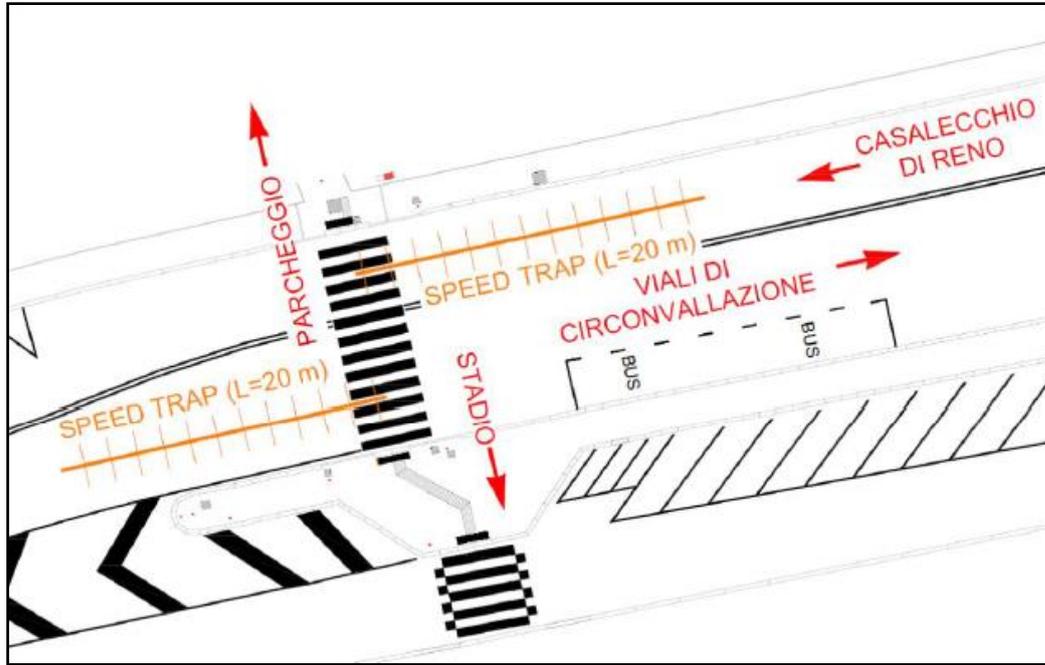


Figura 49: Plano de la técnica utilizada para analizar la velocidad. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

En la figura 50 se muestra la técnica que se ha utilizado para registrar la velocidad que llevan los vehículos al acercarse al cruce peatonal, al no disponer de sensores, radares de velocidad o cualquier otro dispositivo que permitiera medir la velocidad de manera más fácil y exacta se han dispuesto dos puntos en cada sentido y se va a medir el tiempo que el conductor tarda en atravesar este segmento. Conociendo el tiempo necesario para que el vehículo circule por él se puede conocer la velocidad fácilmente.

En la figura 50 se muestran los dos puntos situados a 20 metros de distancia del paso de peatones desde el punto de vista de las dos cámaras ubicadas en el paso de peatones.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 50: Identificación del punto de entrada al tramo de referencia en el carril hacia Casalecchio di Reno. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna



Figura 51: Identificación del punto de entrada al tramo de referencia en dirección a la circunvalación. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

Una vez identificado el tramo de carretera de referencia, todos los datos que se tienen en formato de vídeo servirán para medir la velocidad la velocidad de los vehículos. El programa utilizado (Smartplayer) funciona a 15 fotogramas por segundo, equivalente a un intervalo de tiempo de 0,0667 segundos por fotograma.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

A continuación, en las figura 53 y figura 54, se muestra un ejemplo de cuantos fotogramas le toma a un vehículo ir de la posición A a la posición B, con una distancia de 20 metros entre los dos puntos.

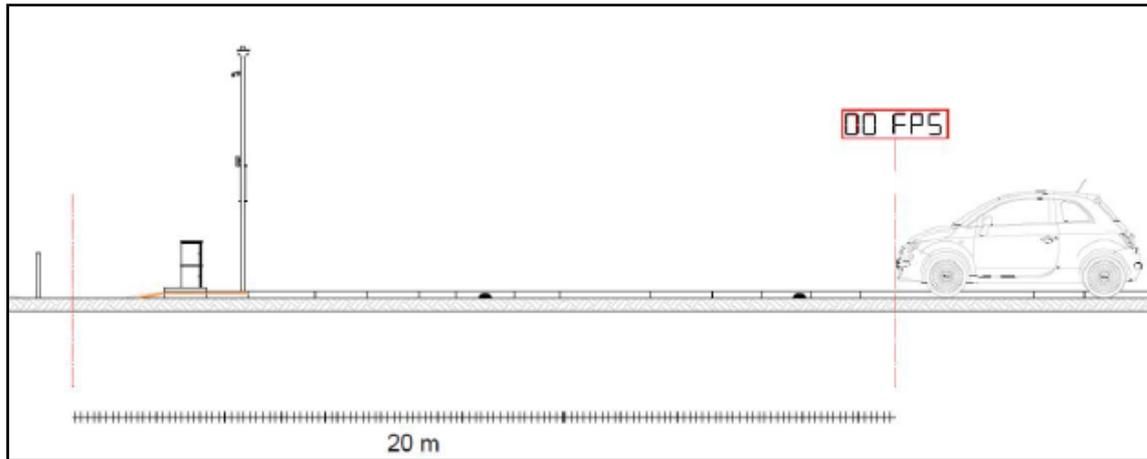


Figura 52: Técnica para la estimación de la velocidad: punto de entrada a la sección de referencia. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

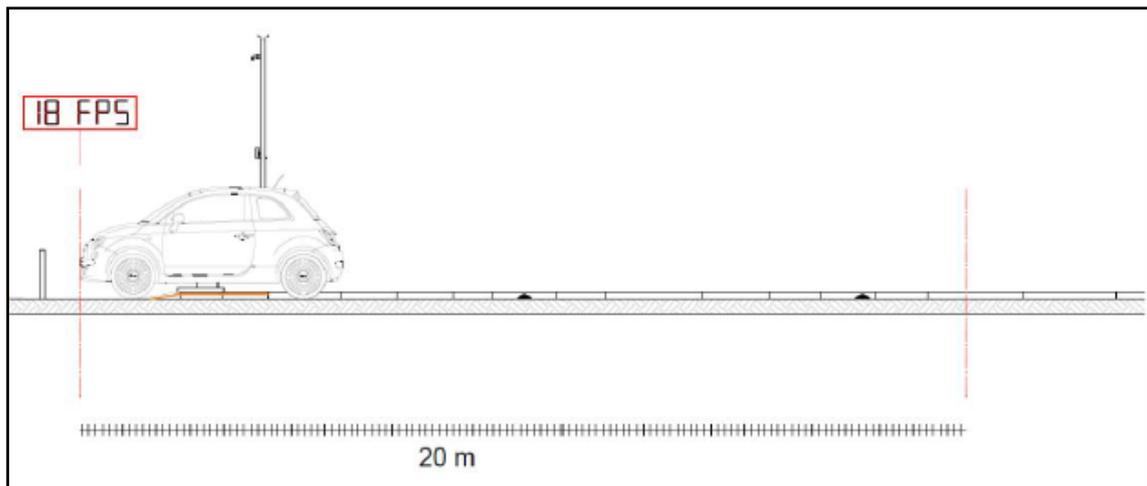


Figura 53: Técnica para la estimación de la velocidad: punto de salida de la sección de referencia. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

Para la estimación de la velocidad en el programa SmartPlayer se utiliza el siguiente método:

Teniendo el número de fotogramas (n), y que 1 s= 15 fotogramas. Para obtener el tiempo (t) se deberá multiplicar el número de fotogramas por el factor de conversión (f) de segundos a fotogramas (1/15=0.0667). Por lo tanto:

$$t = n * f;$$

$$f = 0.0667;$$

$$t = n * 0.0667.$$

Una vez se tenga el tiempo estimado que le toma al vehículo ir del punto A al punto B, se debe obtener la velocidad media del vehículo (v). Como se ha dicho anteriormente, la distancia (e) entre el punto A y el punto B es de 20 metros. Por lo tanto:

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

$$v = \frac{e}{t};$$

$$e = 20[m];$$

$$t = n * f;$$

$$v = \frac{20}{n * 0.0667}$$

Para obtener el equivalente en km/h se deberá multiplicar el resultado por el coeficiente 3.6.

De esta manera se podrá calcular la velocidad del vehículo a partir de los fotogramas que se obtengan a través de SmartPlayer.

Estos simples pasos matemáticos se han automatizado a través de la herramienta informática Excel para simplificar el proceso.

El *Decreto Ministeriale numero 6792 del 05/11/2001* define las medidas de los elementos de la plataforma vial para el tráfico de vehículos, como por ejemplo el ancho de los carriles o las alturas de los dispositivos de recepción, también define los requisitos mínimos necesarios para garantizar el uso de la infraestructura bajo unas condiciones de seguridad, como por ejemplo las distancias mínimas de detención de los vehículos o los criterios de composición del eje viario.

Sin embargo, se deberá tener en cuenta que la aplicación del *Decreto Ministeriale 6792/2001* está sujeta a limitaciones en contextos especiales, tales como *“camino de montaña ubicados en terrenos morfológicamente difíciles, por lo que generalmente no es posible respetar los criterios de diseños previstos a continuación”* o *“categorías particulares de caminos en áreas urbanas, como las ubicadas en áreas residenciales, que necesitan mobiliario particular, como los dispositivos para limitar la velocidad de los vehículos”* y, además, *“las intervenciones en las carreteras existentes deben realizarse adaptándose a las presentes normal, en la medida de lo posible, las características geométricas de las mismas, para satisfacer mejor las necesidades de circulación”*

El tramo de vía Andrea Costa, dentro del que se encuentra el paso de peatones objeto de estudio de este trabajo, aunque fue construido antes de la entrada en vigor del *Decreto Ministeriale 6792/2001*, fue objeto de una intervención para la modificación de la plataforma vial entre los años 2012 y 2014 y por ello, sí que se deberán realizar las verificaciones de acuerdo al *Decreto Ministeriales 6792/2001*.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 54: Vista satélite general del tramo de carretera cercano al paso peatonal. Fuente: Facoltà d'Ingegneria dell'Università di Bologna

Desde el punto de vista de la curvatura del tramo de carretera cercano al paso de peatones, éste está compuesto por dos extremos rectos conectados entre sí por dos curvas, obtenidas por señales horizontales, con radio de curvatura opuesto, y, por tanto, a efectos de las verificaciones de los elementos de la vía conforme al Decreto Ministeriale 6792/2001, se deberán de realizar tanto comprobaciones de longitudes de rectas comprobaciones de curvas circulares con diferentes radios de curvatura.

El Decreto Ministeriale 6792/2001 establece que las rectas deben tener una longitud máxima con el fin de "evitar exceder las velocidades permitidas, monotonía, dificultad de evaluación de la distancia" de acuerdo con la siguiente formula:

$$L_r = 22 * V_{p \max} [m], (E. 1);$$

donde: $V_{p \max}$ es el límite superior de la velocidad de diseño de la carretera en km/h.

A los efectos de la aplicación de la formula E.6, la via Andrea Costa se clasifica de acuerdo con el Decreto Ministeriale 6792/2001 como "Categoría E-Distrito Urbano" con valor $V_{p \max} = 60\text{km/h}$ y por tanto la fórmula E.1 quedaría así:

$$L_r = 22 * V_{p \max} = 22 * 60 \left[\frac{km}{h} \right] = 1.3200,00[m], (E. 2).$$

La condición de longitud máxima representada en la fórmula E.7 se deberá cumplir para ambas rectas del tramo. El Decreto Ministeriale 6792/2001 también limita la longitud mínima de las rectas "para ser percibida como tal por el usuario" en función de la velocidad de proyecto, mostrada en la tabla x.

Velocidad [km/h]	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Longitud mín. [m]	30	40	50	65	90	115	150	190	250	300	360

Tabla 5: Longitudes mínimas en función de la velocidad de proyecto de la vía. Fuente: Decreto Ministeriale 6792/2001

Para este caso el valor tomado de velocidad será de 50km/h teniendo en cuenta el tipo de carretera que es y los elementos que la conforman.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Sobre los criterios comentados anteriormente de longitud máxima y mínima de las rectas, ambos cumplen en las dos rectas del tramo estudiado, ya que en el lado de la carretera de circunvalación la longitud es de 42,2m, mientras que la recta del lado de Casalecchio di Reno tiene una longitud de 115m.

Curva lado Casalecchio di Reno -> longitud de la curva [m]/velocidad [m/s]=42,20 [m]/13,89 [m/s] =3,04 [s]

Curva lado circunvalación -> longitud de la curva [m]/velocidad [m/s] =30,22 [m]/ 13,89 [m/s]= 2,18 [s]

No se cumple la verificación para la curva del lado de la circunvalación. En el Decreto Ministeriale 6792/2001, dentro del párrafo relativo a las curvas circulares se encuentran dos requisitos adicionales:

-El primero es que el radio de curvatura debe de ser mayor que la longitud de la línea recta de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R \geq L_R \text{ para } L_R < 300m, (E. 3).$$

-El segundo requisito es que la relación entre los dos radios de curvatura de dos curvas consecutivas y conectadas directamente entre sí debe de estar comprendidas dentro del área definida en la figura x.

$$R \geq L_R \rightarrow 193[m] \geq 1320[m]$$

La verificación no se cumple.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

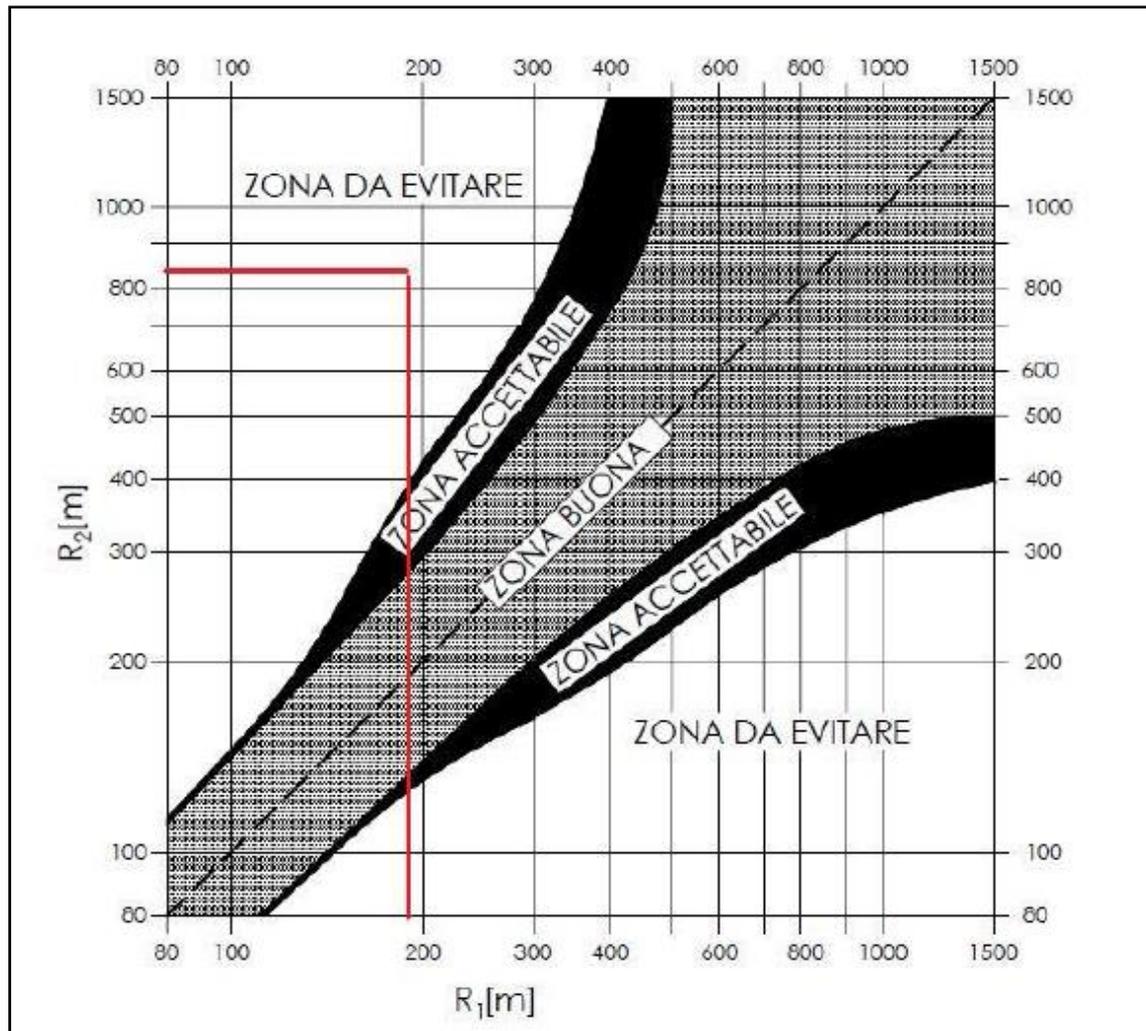


Tabla 6: Tabla para evaluar radios de curvatura en dos curvas consecutivas. Fuente: Decreto Ministeriale 6792/2001

Por lo tanto, el requisito relativo a la relación de los radios de curvatura no se cumple ya que se encuentra centro de la "zona a evitar".

Sin embargo, cabe destacar que la calle Andrea Costa no fue diseñada de acuerdo con las preinscripciones del Decreto Ministeriale 6792/2001 ya que su construcción es anterior a la entrada en vigor del decreto; además, las dos curvas en cuestión se crearon como resultado de una intervención para modificar el estado existente, utilizando señales horizontales construida dentro de una ampliación de la plataforma vial, caracterizada por la presencia de restricciones que no se pueden eliminar y que influyeron fuertemente en la intervención del mismo.

Por otra parte, los controles relativos a la visibilidad de la ruta, El Decreto Ministeriale 6792/2001 establece que la existencia de una adecuada visibilidad es una condición primaria y obligatoria de la seguridad vial y define tres tipos de distancias a utilizar en la fase de diseño:

- Distancia de visibilidad para detenerse: definida como el espacio mínimo requerido para que un conductor pueda detener el vehículo de forma segura frente a un obstáculo inesperado;
- Distancia de visibilidad para el adelantamiento: definida como la longitud del tramo de carretera necesario para completar una maniobra de adelantamiento completa bajo condiciones de seguridad.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

- c) Distancia visual para maniobra de cambo de carril: definida como la longitud del tramo de carretera necesario para cambiar de un carril al adyacente a él.

Para el caso de estudio objeto de este informe, es posible realizar solamente la verificación de la distancia visual para detenerse según la ecuación dada por los estándares:

$$D_A = D_1 + D_2 = \frac{V_0}{3,6} * T - \frac{1}{3.6^2} \int_{V_0}^{V_1} \frac{V}{g * \left[f_l(V) \pm \frac{i}{100} \right] + \frac{R_a(V)}{m} + r_0(V)} dV, (E. 4)$$

Siendo:

D_1 la distancia recorrida en el tiempo T;

D_2 la distancia de frenada;

V_0 la velocidad del vehículo al inicio de la maniobra de frenada;

I la pendiente de la carretera;

T el tiempo de reacción total (percepción, reflexión, reacción e implementación);

g la aceleración de la gravedad;

R_a la resistencia aerodinámica;

m la masa del vehículo;

f_l el valor límite del coeficiente de adherencia que se puede aplicar longitudinalmente para el frenado;

r_0 la resistencia a la rodadura, despreciable.

A efectos de aplicar la fórmula E.4 al contexto de la vía Andrea Costa si se considera un vehículo estándar con una masa igual a 1.250kg que viaja en la carretera objeto de estudio caracterizada por una pendiente longitudinal igual a 0 y una velocidad V_1 al inicio del frenado igual a la velocidad límite del tramo de carretera de 50km/h, y con una velocidad V_0 igual a 0 cuando el coche pare por completo.

$$R_A = \frac{1}{2 * 3.6^2} * \rho * C_x * S * V^2, (E. 5)$$

Siendo:

ρ la densidad del aire en condiciones estándar igual a 1,15kg/m³;

S la superficie resistente igual a 2,1 m²;

C_x el coeficiente aerodinámico igual a 0,35;

V la velocidad expresada en km/h.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Para el cálculo del coeficiente de adherencia de unión longitudinal f_i fue utilizado el valor sacado de la tabla propuesta por el Decreto Ministeriale 6792/2001 contenido en la tabla 7.

Velocidad [km/h]	25	40	60	80	100	120	140
f_i autopista	-	-	-	0.44	0.40	0.36	0.34
f_i otras carreteras	0.45	0.43	0.35	0.30	0.25	0.21	-

Tabla 7: Tabla del límite del coeficiente de adhesión vinculante longitudinalmente propuesto por el Decreto Ministeriale 6792/2001. Fuente: Decreto Ministeriale 6792/2001.

La fórmula se utilizó también para calcular el tiempo de reacción total

$$T = (2,8 - 0.01 * V), (E. 6)$$

donde:

V es la velocidad inicial expresada en km/h

Al introducir todos los parámetros calculados anteriormente, se obtiene el siguiente valor:

$$D_A = \frac{V_0}{3,6} * T - \frac{1}{3.6^2} \int_{v_0}^{v_1} \frac{V}{g * [f_i(V) \pm \frac{i}{100}] + \frac{Ra(V)}{m} r_0(V)} dV = 54,47 [m]$$

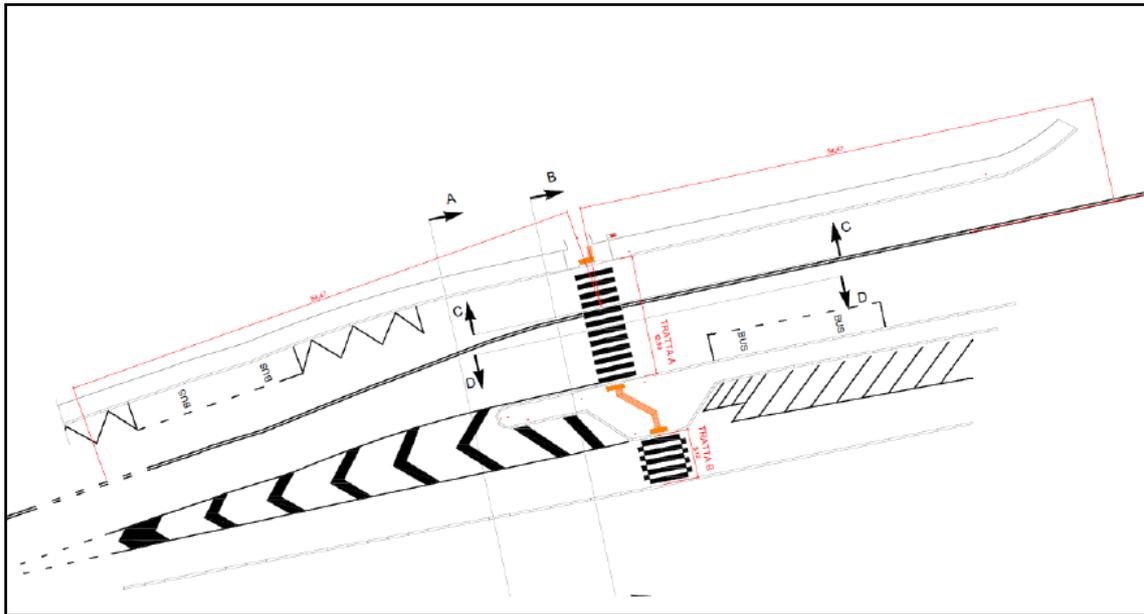


Figura 55: Extracto planimétrico con indicaciones de distancias de seguridad mínimas para parada según el Decreto Ministeriale 6792/2001. Fuente: Decreto Ministeriale 6792/2001.

Al insertar los valores obtenidos dentro de los planos, se tiene que, para ambos carriles de circulación, la verificación de la distancia de seguridad para la parada es satisfactorio y cumple.

Tras los controles pertinente según el Decreto Ministeriale 6792/2001 en el tramo de via Andrea Costa que interesa para el estudio del paso de peatones, se procederá a estudiar la dinámica de parada del vehículo en condiciones de emergencia, con el objetivo de evaluar cuáles son las

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

acciones que el conductor puede implementar después de alertar la presencia de un usuario en el paso de peatones.

El conductor del vehículo necesita tomarse cierto intervalo de tiempo mientras conduce, definido como tiempo de reacción t_r , para percibir el peligro, evaluar las acciones a tomar y actuar en consecuencia y ya que durante este intervalo el vehículo continúa su marcha a una velocidad imperturbable, la elección del tiempo de reacción se vuelve fundamental.

Se han realizado numerosos estudios encaminados a definir este parámetro, a partir de los cuales surgieron los factores de los cuales dependen el tiempo de reacción, tanto de forma positiva como negativa, se tienen cuatro factores que lo influyen:

- a) Edad: a medida que el conductor envejece, la capacidad del cerebro disminuye para recibir y enviar información, la sincronía de movimientos disminuye (alrededor de un 20-30%) y la capacidad de hacer grandes esfuerzos con las extremidades (hasta un 65%).
- b) Carga de información: el conductor recibe una serie de informaciones de distinta índole mientras conduce, como por ejemplo la que proporcionan los signos de carretera, que debe de ser tramitada y, por lo tanto, cuanto mayor sea la cantidad de información, mayor será la carga de trabajo que necesite el cerebro y por lo tanto se requiere mayor tiempo de reacción.
- c) Condiciones de estrés: en casos de flujo vehicular cercano al vehículo, el conductor está sometido a una carga de trabajo tan pesada que, en algunos casos, puede inducir condiciones de estrés psicológico tales que puedan alterar el estilo de conducción de manera que el conductor pueda tomar acciones de forma tardía o esté más propenso a aceptar situaciones de riesgo.
- d) Instrumentación a bordo del vehículo: Están presentes en el interior del vehículo numerosos equipos correspondientes a diversos servicios, cuya activación y/o gestión requiere la atención del conductor de forma parcial o completa, lo que puede hacer que el conductor quite la vista del camino para mirar dentro del vehículo en promedio durante un intervalo de tiempo de 0,6 y 1,6 segundos.

La influencia de estos factores conduce a una variabilidad del tiempo de reacción de aproximadamente 2 segundos, de hecho, todos los estudios coinciden en que el tiempo de reacción del conductor del vehículo puede variar entre 0,8 y 2,14 segundos.

A luz de estos resultados y en consideración con el contexto urbano en el que se construye el paso de peatones, se consideró un tiempo un tiempo de reacción del conductor igual a 2,00 segundos, de los cuales 0,50 segundos se ingresan para considerar que el conductor del vehículo puede distraerse por causas internas o externas al vehículo.

Transcurrido este tiempo, necesario para que el conductor del vehículo perciba el peligro, calcular la maniobra a realizar y efectuar la correspondiente acción sobre el pedal de freno, hay un intervalo de tiempo en el que los órganos y dispositivos del sistema de freno se activan y comienzan a reducir gradualmente la velocidad del vehículo, que generalmente es menos de 0,1 segundos para los sistemas de freno accionados hidráulicamente, mientras que en el caso de los sistemas accionados neumáticamente, utilizados por ejemplo en vehículos pesados, pueden tener tiempos de entre 0,2 y 1 segundos.

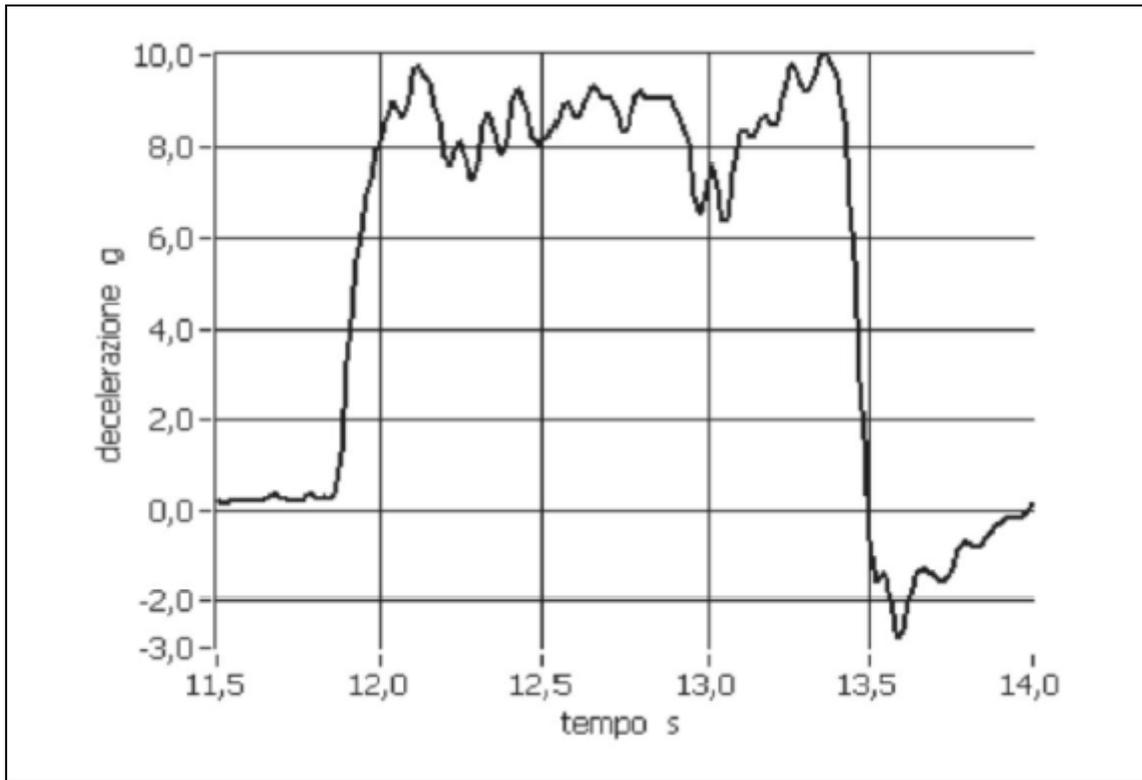


Figura 56: Curva de deceleración. tiempo de frenada de emergencia de un vehículo equipado con un sistema ABS. Fuente: Decreto Ministeriale 6792/2001

Con referencia a la figura 57 se observa cómo tras la activación del sistema de frenada hay un tramo inicial de la curva en el que el paso de cero al valor estabilizado se produce de forma sustancialmente lineal y en un intervalo de tiempo igual a 0,2 segundos, después del cual, en ausencia del sistema ABS, las ruedas del vehículo se detienen y comienzan a arrastrarse por la carretera, de lo contrario, en caso de presencia del sistema ABS, la fuerza de frenado se modula en torno al valor máximo permitido por las condiciones de adherencia rueda-carretera.

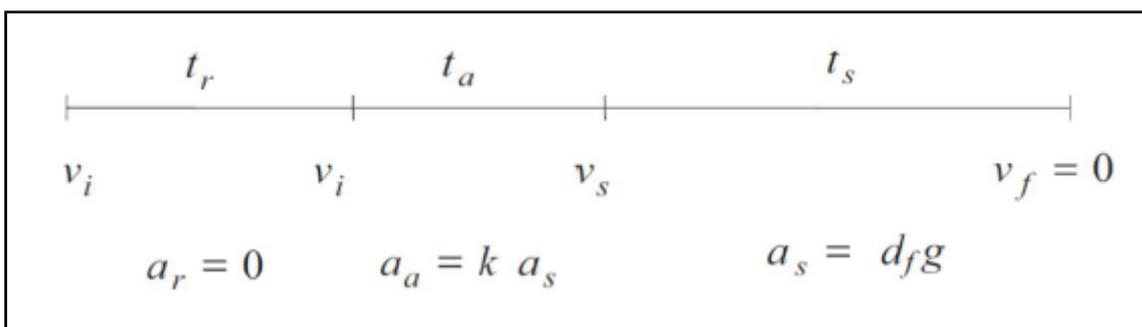


Figura 57: Diagrama de fases de frenado de emergencia. Fuente: Decreto Ministeriale 6792/2001

Por lo tanto, en referencia al diagrama de la figura 58, se ha identificado la distancia de frenado de un vehículo en condiciones de emergencia en las siguientes tres etapas:

- a) Fase de percepción, decisión y reacción: el vehículo mantiene la velocidad inicial v_i recorriendo un espacio igual a:

$$x_r = v_i * t_r, (E. 7)$$

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

donde:

v_i es la velocidad inicial;

t_r es el tiempo de reacción.

Nótese que dentro de esta fase también se considera el valor de 0,1 segundos necesario para que el sistema de frenado empiece a operar.

- b) Fase de frenado transitorio: el vehículo reduce su velocidad con una deceleración variable hasta alcanzar la fuerza de frenado estabilizada, cubriendo un espacio igual a:

$$x_a = v_i * t_a + \frac{1}{2} * k * -d_f * g * t_a^2 = v_i * t_a + \frac{1}{2} * a_a * t_a^2 \quad (E. 8)$$

donde:

v_i es la velocidad inicial;

t_a es el tiempo transitorio en función del tipo de sistema de frenado;

a_s es la aceleración negativa de la frenada en fase transitoria.

- c) Fase de frenado estabilizada: el vehículo ha alcanzado la fuerza de frenado estabilizada y reduce su velocidad con aceleración negativa constante, cubriendo un espacio igual a:

$$x_s = \frac{v_s^2}{2 * d_f * g} \quad (E. 9)$$

donde:

v_s es la velocidad alcanzada por el vehículo al final de la fase transitoria;

d_f es el coeficiente de frenada igual a 0,8;

g es la aceleración de la gravedad.

Por lo anterior, el vehículo con una velocidad inicial de viaje de v_i detiene su propia marcha, tras un evento de frenado de emergencia, después de conducir una distancia total igual a:

$$x = v_i * t_r + \left(v_t * t_a - \frac{k * d_f * g * t_a^2}{2} \right) + \frac{(v_i - k * d_f * g * t_a)^2}{2 * d_f * g} \quad (E. 10)$$

en el tiempo correspondiente a:

$$t = t_r + t_a * (1 - k) + \frac{v_i}{d_f * g} \quad (E. 11)$$

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

En la tabla 8 se muestran todas las distancias de frenado en condiciones de emergencia junto con el tiempo total utilizado para detener la marcha obtenido al utilizar en las ecuaciones E.10 y E.11 diferentes valores de velocidad.

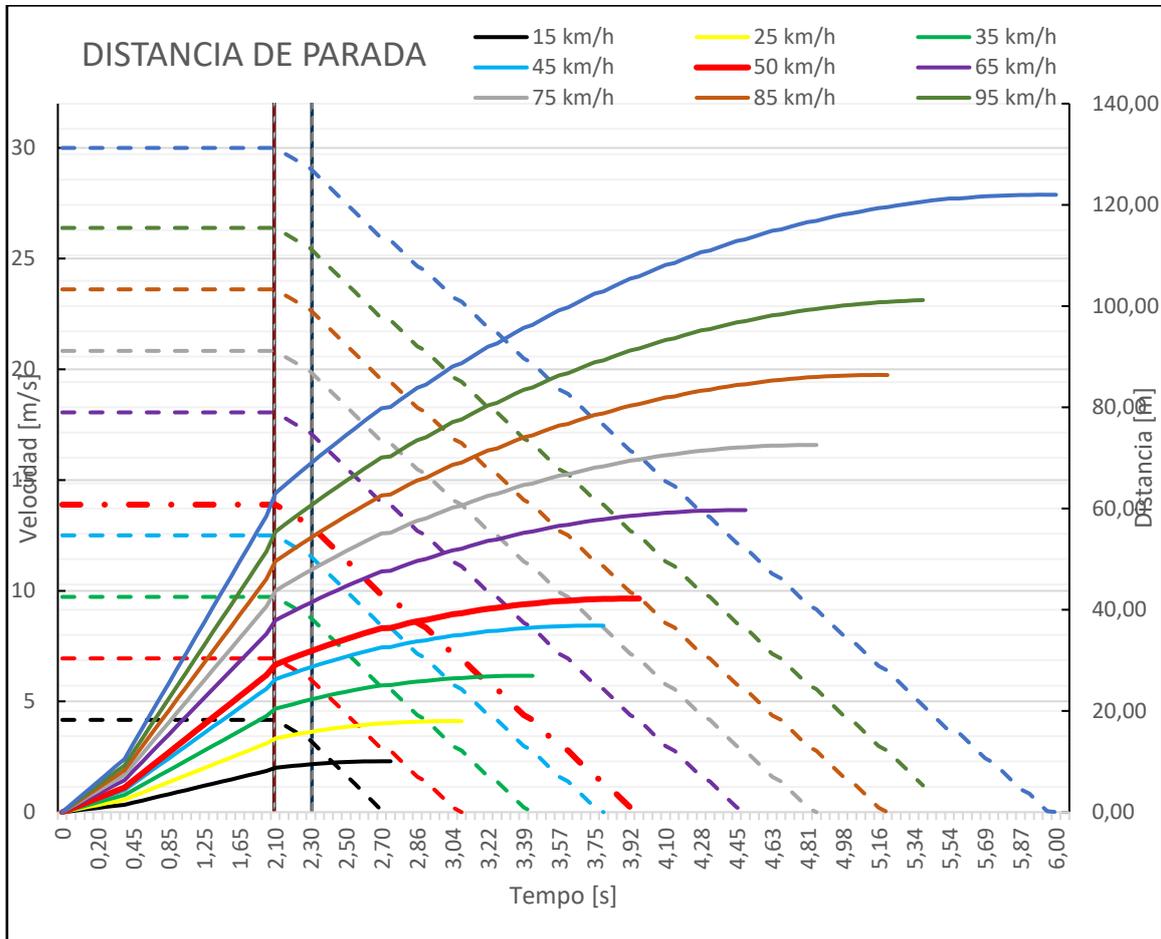


Tabla 8: Diagrama de distancia de parada para diferentes velocidades. Fuente: Elaboración propia.

De la observación de esta figura se puede ver que un vehículo que se dirige a una velocidad de 50 km/h, correspondiente al límite de velocidad para este tramo de vía, necesita una distancia de 42,72 m para dejar detenerse en condiciones de frenado de emergencia.

El DM 6792/2001, utilizado para el diseño de nuevas carreteras, exige que se respete la distancia de seguridad de frenada en todo el recorrido; en el caso bajo estudio, este valor es igual a 54,47 m y se cumple para ambos carriles.

Comparando los valores obtenidos según el DM 6792/2001 con los obtenidos por evaluaciones dinámicas en vehículos en condiciones de frenado de emergencia, se dispone de un espacio para el frenado extra igual a 11,75m, correspondiente al 21,57% más a la distancia calculada según las normas ministeriales.

5.6 PROCESO DE OBTENCIÓN DE LOS GRÁFICOS A PARTIR DE LAS GRABACIONES

En el siguiente punto al presente, el "6.7 ANÁLISIS DE LAS GRABACIONES", se van a analizar todos los gráficos que resumen la actividad en los periodos de baja luminosidad en los que el sistema de iluminación descrito anteriormente está activo, estos gráficos se han hecho con la herramienta Microsoft Excel.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

DATA	ID	ORARIO
[gg/mm/aaaa] a)	[n°]	[hh:mm:ss]
17/10/2021	373	18:00:10
17/10/2021	374	18:03:56
17/10/2021	375	18:07:28
17/10/2021	376	18:08:12
17/10/2021	377	18:12:07
17/10/2021	378	18:14:52
17/10/2021	379	18:16:01
17/10/2021	380	18:16:01

Tabla 10: Fecha, número ID y hora exacta del cruce. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 10 se puede ver con mayor detalle la parte izquierda de la tabla completa mostrada anteriormente, en esta parte hay tres columnas, la primera de ellas corresponde a la fecha del cruce en el formato (dd/mm/aaaa), la segunda es el número identificador del cruce dentro del estudio que se está realizando y la tercera de estas es la hora exacta en la que se produjo el cruce en el formato (hh:mm:ss).

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

TIPOLOGIA DI UTENZA											
da parcheggio a stadio						da stadio a parcheggio					
Peatón	Monopatín	Ciclista	Bambini	Passettino	Cani	Pedone	Monopattino	Ciclista	Bambini	Passettino	Cani
[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]
▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
1											
								1			
											1
1											
1											
								1			
											2
1											

Tabla 11: Tipología del usuario. Fuente: Elaboración propia

En la segunda parte del estudio de la tabla está la tipología del usuario que hace uso del cruce peatonal de la calle Andrea Costa, las posibles clases de peatón que se han definido son las siguientes: peatón, monopatín, ciclista, peatón con niños, peatón con carrito de bebés y peatón con perros. Por lo tanto, lo que se deberá hacer es observar detenidamente el clip correspondiente y apuntar el número de usuarios de cada categoría que han hecho uso del cruce peatonal en ese caso. Distingue también las dos direcciones posibles de cruce: del parking al estadio y del estadio al parking.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

MALFUNZIONAMENTO IMPIANTO DI SEGNALAMENTO		
Mancata attivazione	Approccio errato utente	Approccio corretto utente
[n°]	[n°]	[n°]
▼	▼	▼

Tabla 12: Error del sistema de iluminación. Fuente: Elaboración propia

En la tercera parte del análisis de la tabla, están los posibles errores del sistema de iluminación, en esta tabla se anotarán los posibles fallos de detección de presencia de los peatones. En las tres columnas que se observan están en primer lugar, la falta de activación, en la que se pondrá un 1 en caso de que en ese cruce haya no se haya activado la iluminación mejorada, y en las otras dos columnas están las posibles causas de la falta de activación: la aproximación incorrecta del usuario o la aproximación correcta del usuario, dependiendo de si el peatón se aproxima al paso de peatones de forma correcta o incorrecta, es decir, si entra por la zona de la acera que está destinada a que el peatón entre al cruce peatonal y así el sistema de detección de movimiento lo detecte de manera correcta.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

PRESENZA VEICOLI							VELOCITA					
Presenza	Direz. Stadio			Direz. Casalecchio			Direz. Stadio					
	Auto	Scooter	Bus	Auto	Scooter	Bus	Auto	Auto	Scooter	Scooter	Bus	Bus
	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[n°]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]	[km/h]
	1						9,82					
	2						10,49	10,49				
		1							15,43			
	1						9,82					
	1						11,13					
	1						28,42					
	1						13,17					
				1								

Tabla 13: Presencia de vehículo y velocidad del vehículo. Fuente: Elaboración propia.

En la cuarta y última parte del estudio de la tabla que se usa para analizar las grabaciones de las cámaras del cruce peatonal, está el apartado correspondiente a los vehículos que cruzan el paso peatonal e interaccionan con los usuarios del cruce peatonal.

En primer lugar, en la izquierda de la ilustración están los distintos tipos de vehículos que se han definido que son: coche, motocicleta o autobús. También distingue entre las dos direcciones de cruce posibles: dirección estadio y dirección Casalecchio di Reno.

Por último, en la parte de la derecha de la ilustración x está la velocidad de los vehículos que se han marcado su presencia en las partes antes comentadas. En la ilustración solo se puede ver la parte correspondiente a la dirección estadio, pero a la derecha de esta parte se encuentra la parte de la dirección Casalecchio di Reno.

5.6.2 TRASPASO DE LOS DATOS DE LAS TABLAS A LAS GRÁFICAS DE EXCEL

Por último, a través de la herramienta Microsoft Excel, se deberán pasar los datos correspondientes al apartado anterior a las gráficas con las que se va a analizar la efectividad del sistema de iluminación instalado.

Esto se hará a través del uso de distintas fórmulas para traspasar estos datos correctamente a las tablas que posteriormente se usarán y que facilitarán el estudio del paso de peatones en gran cantidad.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 58: Fórmula de Excel 1. Fuente: Elaboración propia



Figura 59: Fórmula de Excel 2. Fuente: Elaboración propia



Figura 60: Fórmula de Excel 3. Fuente: Elaboración propia

A través del uso de estas fórmulas que relacionan los datos de las tablas que se han visto en el apartado anterior con las gráficas que se estudiarán posteriormente que se encuentran en otras hojas del mismo documento de Excel.

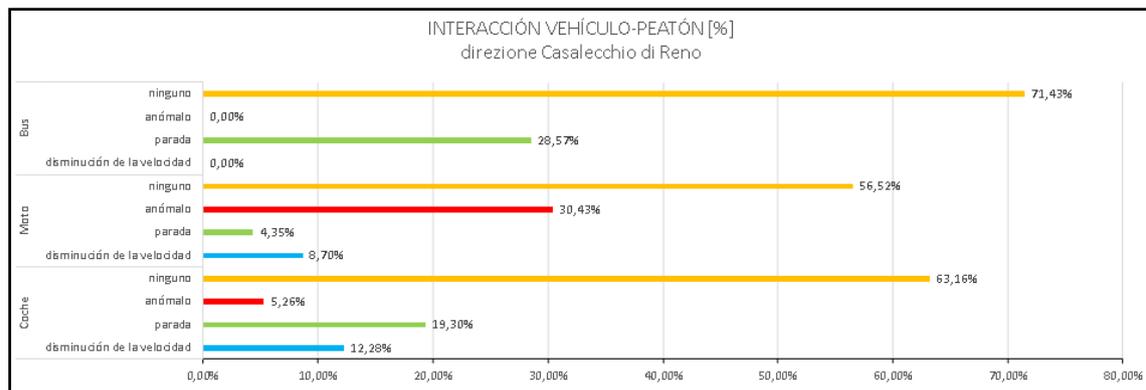


Tabla 14: Tabla de Excel de ejemplo. Fuente: Elaboración propia

Las tablas, tras usar las fórmulas anteriormente mencionadas, quedarán como la que se muestra en la ilustración x. El ejemplo que se muestra en la ilustración corresponde al tipo de interacción entre los vehículos y los peatones, en este caso en la dirección Casalecchio di Reno.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Como se puede observar en las dos últimas figuras, con las imágenes que ofrece la cámara 1 solo se puede observar al 100% la acera que da a la parte del estadio, mientras que la cámara número 2 muestra claramente solo la otra acera, la del parking.

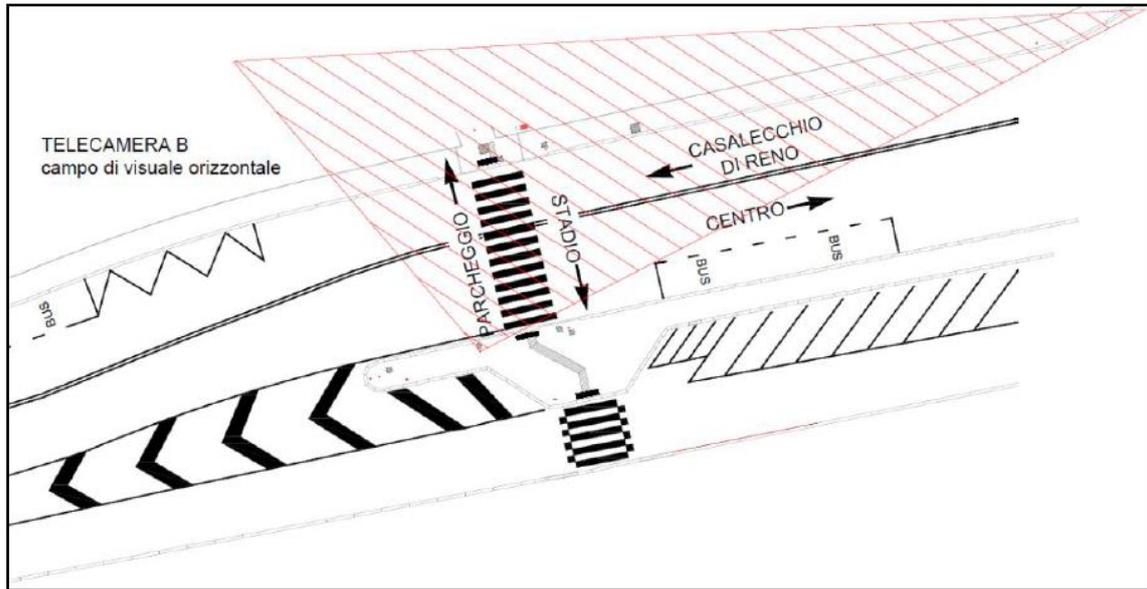


Figura 63: Colocación y ángulo de visión de la cámara 2. Fuente: Facoltà d'Ingegneria di Bologna



Figura 64: Ejemplo de grabación de la cámara 2. Fuente: Facoltà d'Ingegneria di Bologna

5.6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS PARÁMETROS DE ESTUDIO

Se han elaborado una lista de parámetros que detectar y clasificar en cada uno de los cruces que se registren, esta información se trasladará a una tabla de Excel donde será más fácil analizarlo y sacar unas conclusiones claras sobre ello.

Los parámetros son los siguientes:

- A. PARÁMETROS GENERALES
 - 1) Fecha del cruce;
 - 2) Hora del cruce;
 - 3) Número identificador único del cruce.

- B. PARÁMETROS DE USUARIO
 - 1) Dirección del cruce (del parking al estadio o del estadio al parking);
 - 2) Tipo de usuario (peatón adulto, usuario con patinete, ciclista, peatón niño, peatón con coche de bebés, peatones con perro).

- C. PARÁMETROS DEL SISTEMA
 - 1) Falta de activación del sistema;
 - 2) Aproximación correcta/ incorrecta del usuario al cruce.

- D. PARÁMETROS DEL VEHÍCULO
 - 1) Presencia de vehículos;
 - 2) Tipo de vehículos (coche, moto, autobús, bicicleta)
 - 3) Dirección de viaje (hacia el centro de la ciudad o hacia Casalecchio di Reno)
 - 4) Velocidad aproximada;
 - 5) Comportamiento del conductor hacia la presencia del peatón (ninguna reacción, reducción de la velocidad, detención total del vehículo, maniobra anormal)

A continuación, se muestran algunos fotogramas obtenidos a partir de los vídeos analizados con la finalidad de ver más claramente algunos de los parámetros.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 65: Tipo de usuario peatón con carrito de bebés. Fuente: Facoltà d'Ingenieria di Bologna

Por ejemplo, en la ilustración x se detectaron 1 peatón adulto, 2 peatones niño y un carrito de bebés.

También es un factor a considerar los posibles fallos de activación que puede tener el sistema de iluminación instalado en el cruce peatonal, analizando los vídeos se puede ver que hay situaciones de cruce de peatones en los que el sistema de iluminación no llegaba a encenderse, esto se atribuye a dos posibles causas:

- a) Mal funcionamiento del sensor de detección de peatones instalado en el sistema Sicurlux que no detecta a ningún usuario cruzando el paso peatonal.
- b) Comportamiento incorrecto del usuario del paso de peatones que accede al paso de cebras por una zona que no es la idónea haciendo así que el sensor de movimiento no lo detecte correctamente.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 66: Falta de activación del sistema de iluminación por fallo del sensor de movimiento. Fuente: Facoltà d'Ingenieria di Bologna



Figura 67: Falta de activación del sistema por comportamiento incorrecto del usuario del cruce peatonal. Fuente: Facoltà d'Ingenieria di Bologna

En las figuras 66 y 67 se pueden observar dos ejemplos de fotogramas en los que el sistema de iluminación no se activa debido a cualquiera de los dos motivos que se han explicado anteriormente.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

En la figura 66 el peatón usa correctamente el paso de peatones entrando a él por la zona correcta, pero aun así el sensor de movimiento no lo detecta haciendo así que el sistema de iluminación no se active.

En la figura 69 se puede observar cómo los dos peatones adultos que hacen uso del cruce peatonal acceden a él de manera incorrecta y de esta manera el sistema de iluminación no funciona correctamente tampoco.



Figura 68: Fallo de activación del sistema. Fuente: Facoltà d'Ingenieria di Bologna



Figura 69: Fallo de activación del sistema. Fuente: Facoltà d'Ingenieria di Bologna

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

En lo respectivo a detectar la presencia o ausencia de algún vehículo en el momento en el que los peatones hacen uso del cruce puede haber dos posibles casos que vienen representados en las dos últimas figuras. En la figura 70 se puede ver como el conductor tiene tiempo y espacio suficiente para detectar al peatón que se dispone a cruzar, mientras que en la figura 71 el vehículo entra al cruce peatonal a la vez que los dos peatones siendo así imposible que el conductor del vehículo pueda detectar a los peatones a tiempo y detenerse para ceder el paso.

En el segundo de los casos, cuando el vehículo se encuentra a cierta distancia a la que puede ver correctamente el paso de peatones, el sistema de iluminación aún no ha detectado la presencia de ningún usuario y no se ha podido activar aún, mientras que en el primero de los casos sí que puede ver el sistema funcionando y detectar de manera correcta la presencia del usuario que va a cruzar el paso peatonal.



Figura 70: Comportamiento anómalo del vehículo: aproximación con distancia y tiempo para realizar la detención del vehículo. Fuente: Facoltà d'Ingenieria di Bologna

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 71: Comportamiento anómalo del vehículo: invasión del paso peatonal por parte del vehículo. Fuente: Facoltà d'Ingenieria di Bologna

A continuación, se muestran dos ejemplos más de comportamientos anómalos que no se pueden clasificar en ningún otro tipo de comportamiento del conductor (disminuye la velocidad, detiene el vehículo y no hace nada).



Figura 72: Ejemplo de comportamiento anómalo, cambio de carril cruzando una doble línea continua. Fuente: Facoltà d'Ingenieria di Bologna

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 73: Ejemplo de comportamiento anómalo: invasión del paso de peatones. Fuente: Facoltà d'Ingegneria di Bologna

Finalmente, en lo respectivo a los parámetros del vehículo se va a mostrar únicamente el ejemplo de comportamiento anómalo por parte del conductor, ya que el resto de los parámetros son de una comprensión más simple.

Dentro del parámetro de comportamiento anómalo de los conductores se han incluido aquellas maniobras que, además de estar penadas por el código de circulación, implican una conducta peligrosa por parte del conductor del vehículo, como se observa en la ilustración x con el conductor invadiendo el paso de peatones cuando los usuarios aún están en medio del cruce, poniendo así causar un accidente.

5.6.2 ANÁLISIS DE VÍDEO EN JULIO Y AGOSTO 2021

5.6.2.1 ANÁLISIS DE LOS USUARIOS Y SUS COMPORTAMIENTOS

En lo respectivo a los usuarios que utilizan el paso peatonal, si se centra la atención en primer lugar a la tipología de los usuarios en ambas direcciones del cruce, la categoría más presente es la de los peatones (según las distinciones que se hicieron al describir los parámetros de estudio en puntos anteriores) que representa un valor porcentual del 87,20%, la segunda son los peatones con perros con un valor igual al 9.55%, la tercera son los ciclistas con un valor de 8.33%, la cuarta categoría está representada por los peatones acompañados por niños que tienen un valor de 4.07%, la quinta categoría son los peatones que van con un coche de bebés con un porcentaje del 1.63%, y finalmente los usuarios que conducen un monopatín representados con un 0,41%.

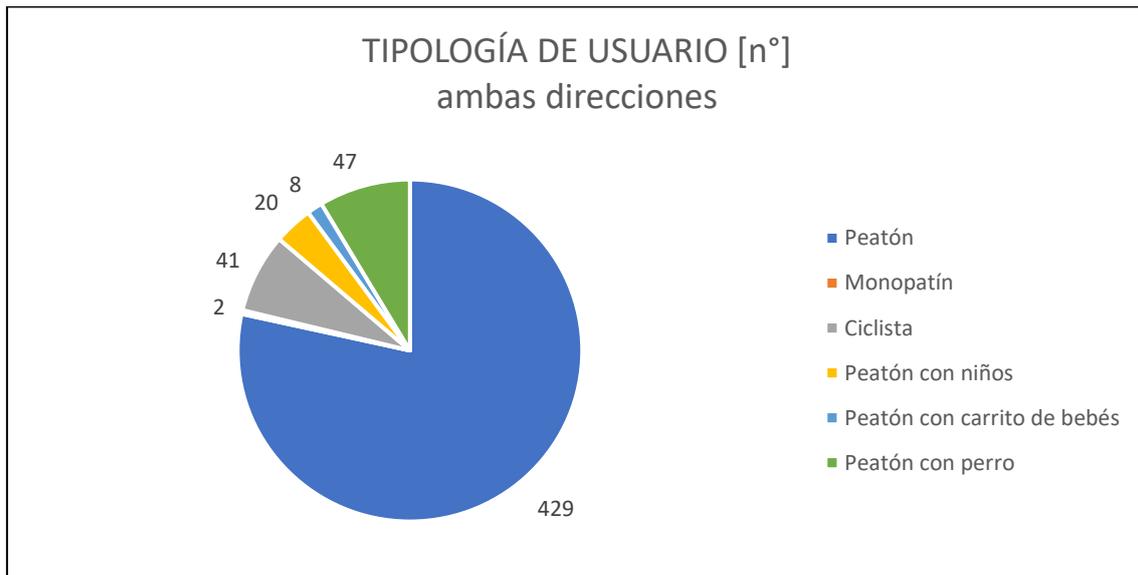


Tabla 15: Tipología de los usuarios que hacen uso del paso peatonal en ambas direcciones en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

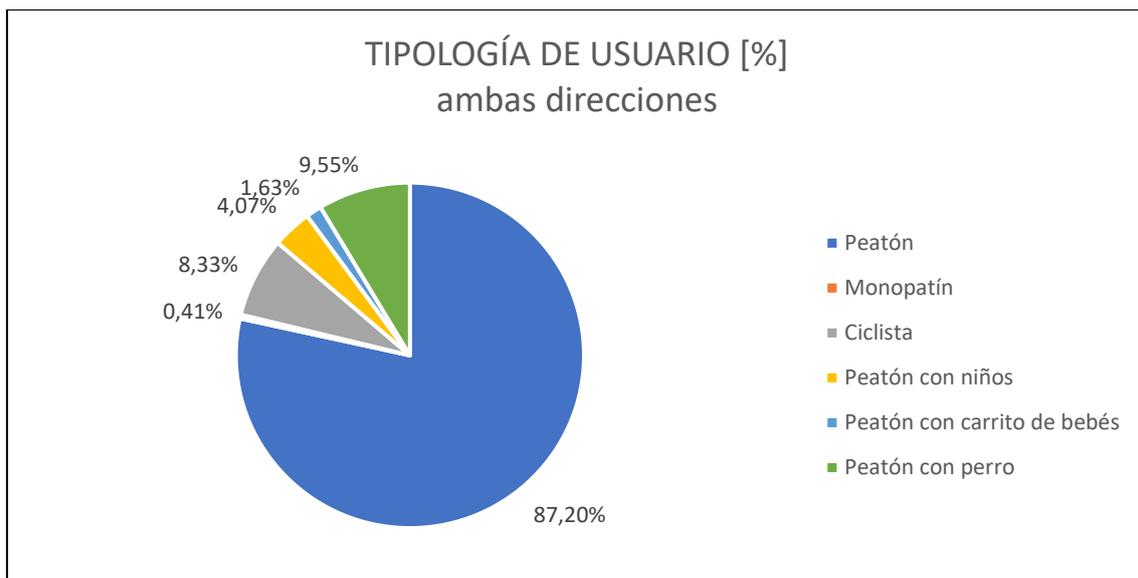


Tabla 16: Tipología de los usuarios que hacen uso del paso peatonal en ambas direcciones en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Además, los valores que se observan en las distintas categorías de usuarios comparando las dos direcciones de los cruces son bastante similares todos ellos, a excepción de algún pequeño cambio que no tiene ninguna importancia significativa en el estudio. Por lo tanto, de las siguientes tablas relativas a la tipología de los usuarios del cruce peatonal no hay ningún comentario destacable a hacer ya que son datos muy similares a los que se tenían al analizar ambas direcciones juntas.

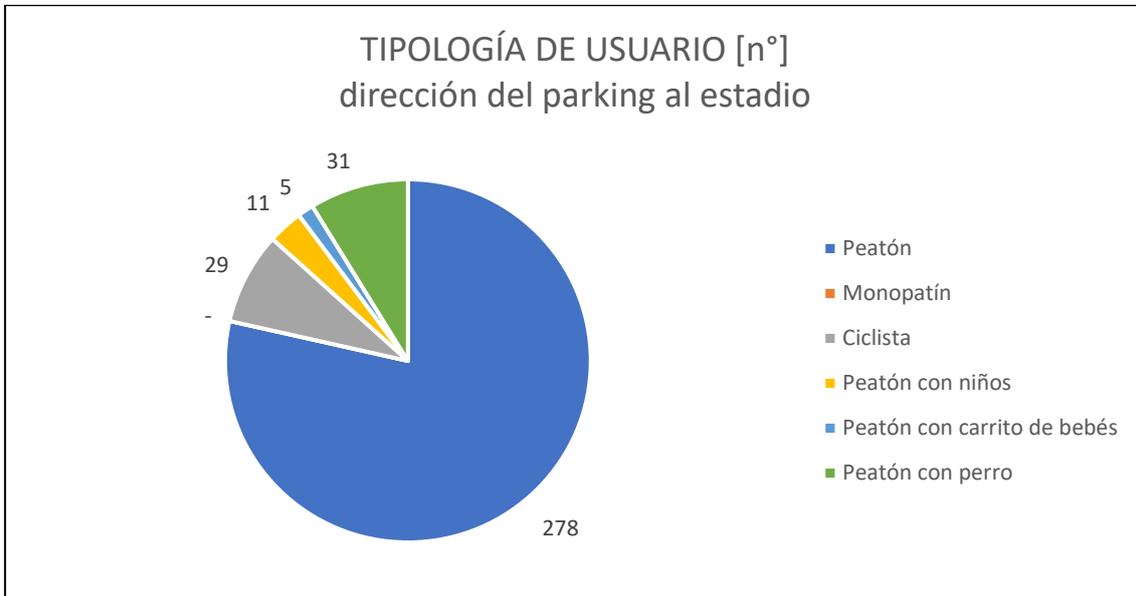


Tabla 17: Tipología de los usuarios que hacen uso del paso peatonal, en la dirección del parking al estadio, en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

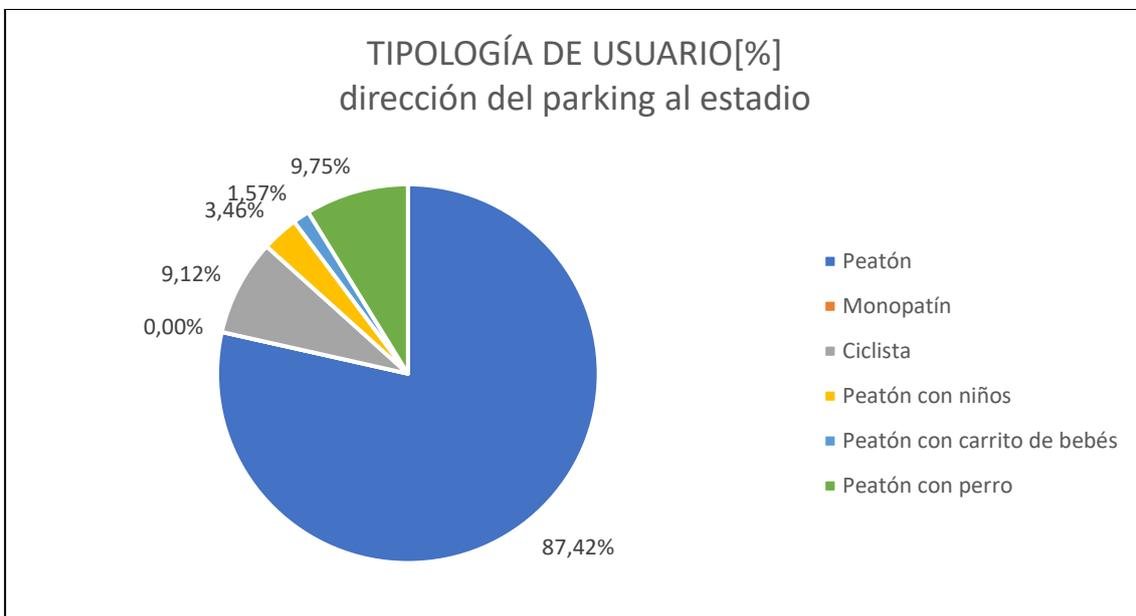


Tabla 18: Tipología de los usuarios que hacen uso del paso peatonal, en la dirección del parking al estadio, en valores porcentuales. Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Tabla 19: Tipología de los usuarios que hacen uso del paso peatonal en la dirección del estadio al parking en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

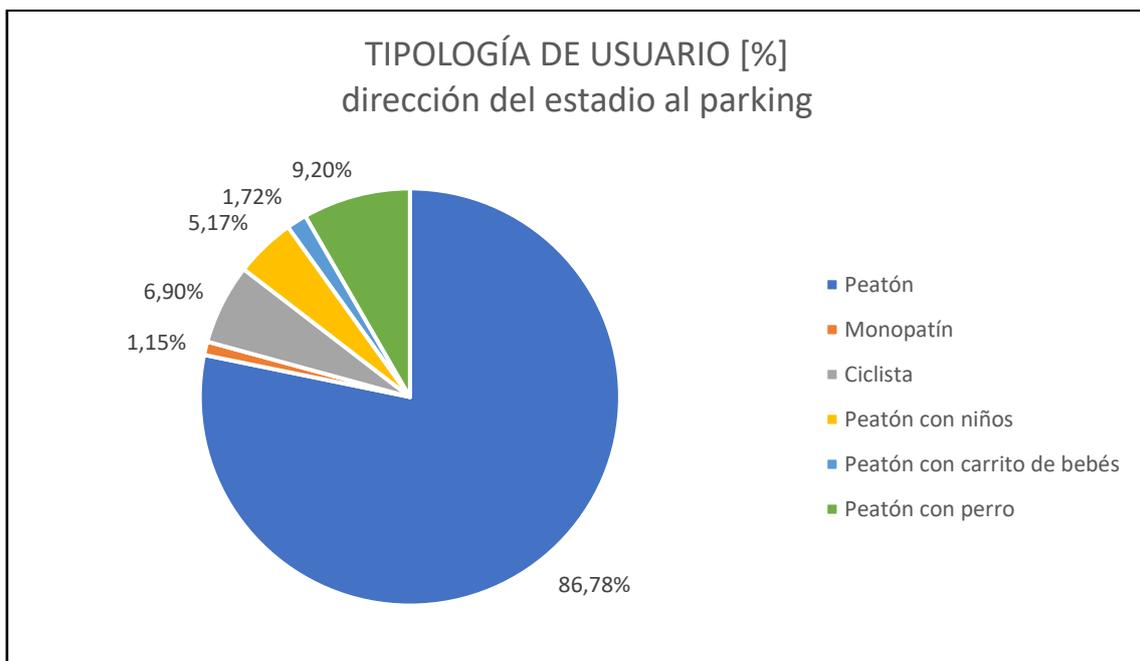


Tabla 20: Tipología de los usuarios que hacen uso del paso peatonal en la dirección del estadio al parking en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Se realizaron periodo análisis en lo respectivo a la falta de activación del sistema con el objetivo de detectar cualquier problema de funcionamiento del sistema en lo relacionado con los sensores de movimiento.

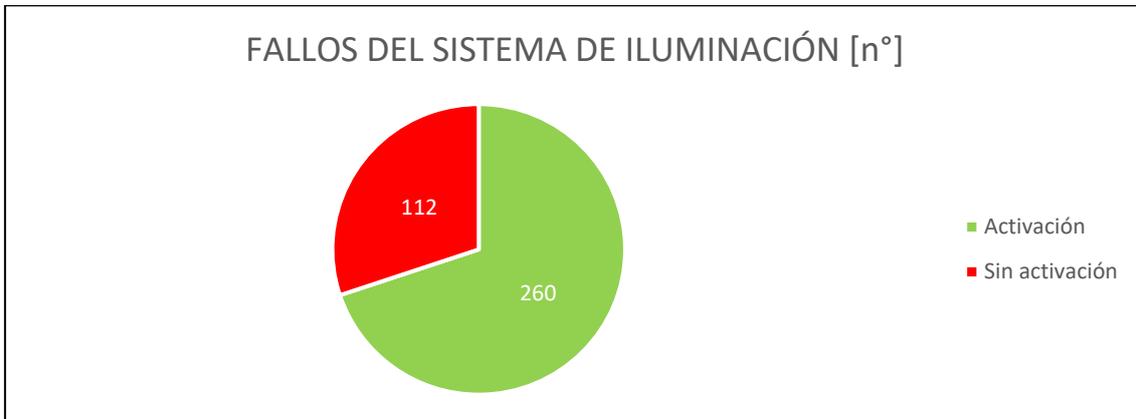


Tabla 21: Errores de activación del sistema de iluminación en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

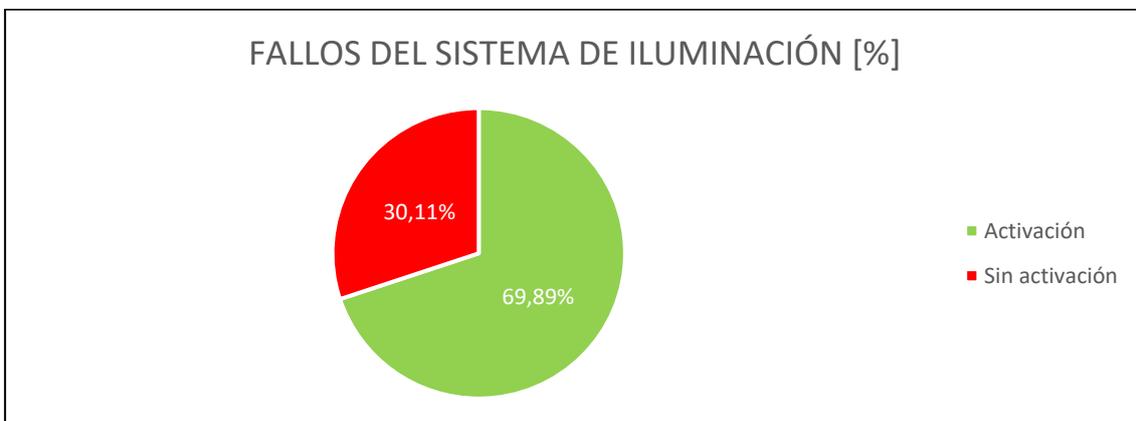


Tabla 22: Errores de activación del sistema de iluminación, en valores porcentuales. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 21 se puede observar como las veces que el sistema no se activó eran de 122 frente a los 372 cruces totales de peatones, esto implica que el sistema no funcionó de manera correcta un 30,11% de las veces, un porcentaje demasiado alto. Este porcentaje de falta de activación se intentará disminuir tomando varias medidas de cara al análisis de las grabaciones de meses posteriores como se verá más adelante en este mismo trabajo.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

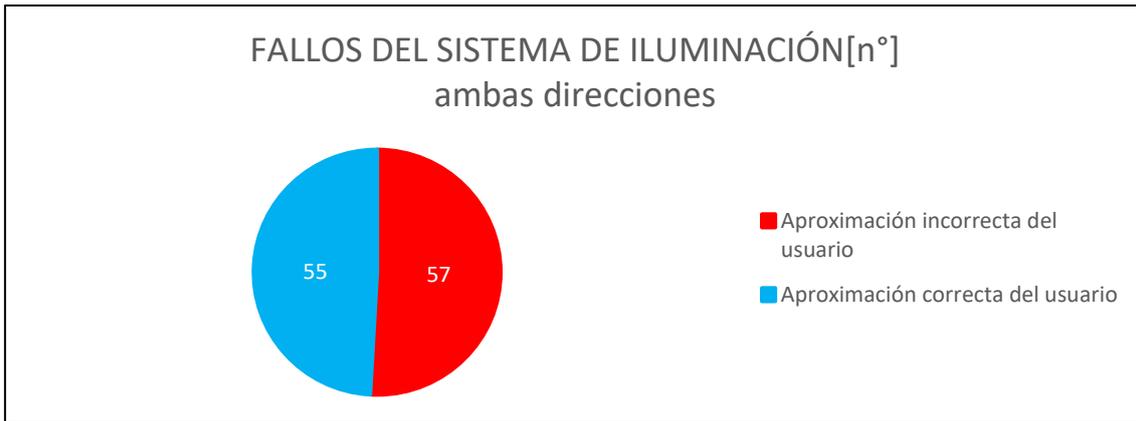


Tabla 23: Causa de los fallos en la activación del sistema de iluminación, en ambas direcciones, en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

De los 112 fallos del sistema que se habían notificado, se puede observar en la tabla 23 que el motivo del fallo está dividido casi al 50% entre fallo con aproximación incorrecta del usuario y fallo con aproximación correcta del usuario.

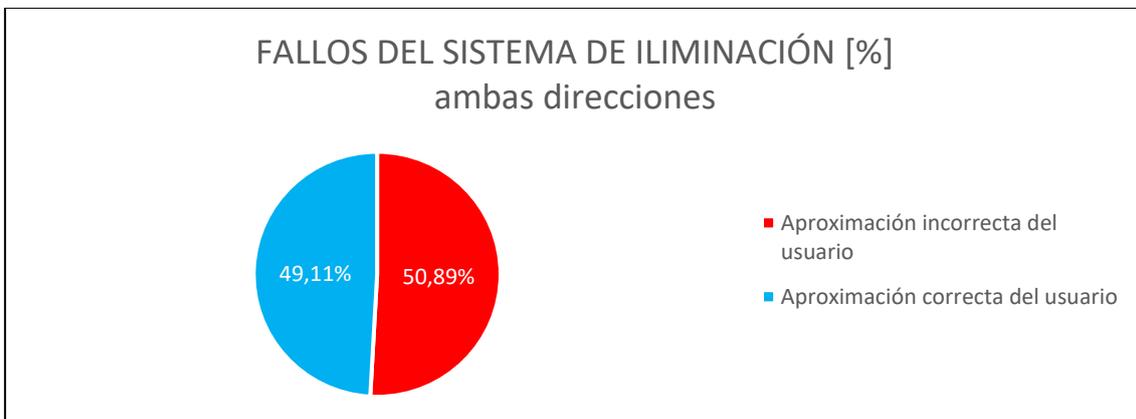


Tabla 24: Causa de los fallos en la activación del sistema de iluminación, en ambas direcciones, en valores porcentuales. Fuente: Elaboración propia.

Esto deja como dato que en 57 veces de los 372 cruces (15,32% de los eventos) el sistema de detección de movimiento de peatones ha fallado. No es un valor exageradamente alto, pero obviamente es mejorable, se tomarán medidas para que en los próximos meses de análisis de datos este porcentaje sea menor.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)



Figura 74: Dos peatones acortando el paso por el cruce peatonal. Fuente: Facoltà d'Ingenieria di Bologna

En el caso de aproximación incorrecta del usuario hay casos en los que no se puede hacer nada ya que, debido a la baja actividad del tráfico rodado a ciertas horas de la noche, muchos peatones optan por acortar el camino al cruzar el paso de peatones, esto hace que el sensor de movimiento no detecte a ningún peatón, el sistema no se active y no se consiga la mejora de iluminación que se está buscando.

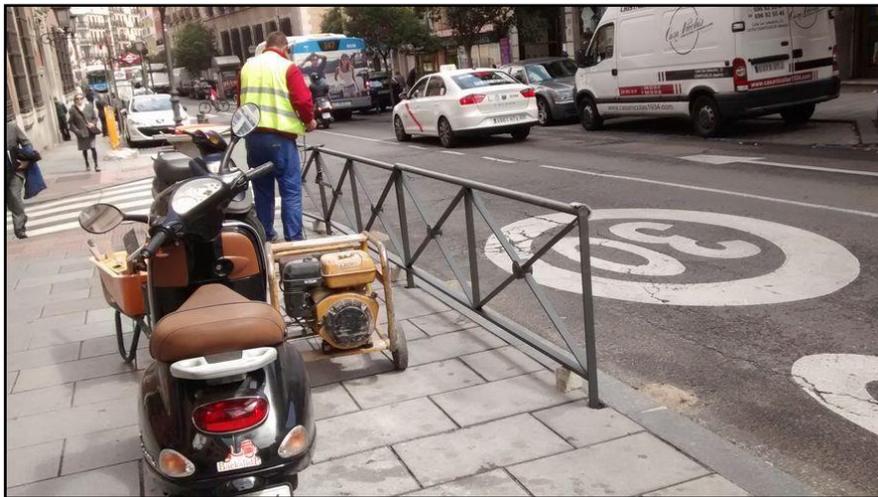


Figura 75: Vallas para evitar cruces indebidos de los peatones. Fuente: eldiario.es

De todas maneras, existen posibles soluciones para obligar a los peatones cruzar por la zona correcta el paso de peatones y se eviten actitudes como las que se puede ver en la figura 75. Una posible solución es la colocación de vallas para evitar que los peatones crucen por sitios que no son seguros, como es este caso. Con vallas como las de la ilustración x se podrían evitar gran parte de estos cruces indebidos y se bajaría considerablemente ese porcentaje de cruces indebidos de los peatones que hace que el sistema no funcione como se espera.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Se muestra también la distribución de errores del sistema en cada una de las dos direcciones, con el objetivo de detectar algún posible fallo en alguno de los sistemas de detección de movimiento de alguna de las dos aceras del paso peatonal.



Tabla 25: Causa de los fallos en la activación del sistema de iluminación, en la dirección del estadio al parking, en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

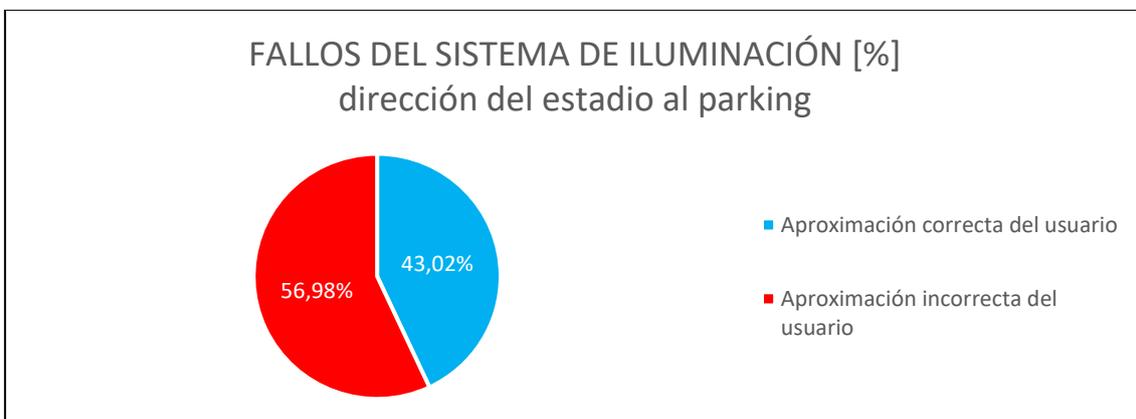


Tabla 26: Causa de los fallos en la activación del sistema de iluminación, en la dirección del estadio al parking, en valores porcentuales. Fuente: Elaboración propia.

En la dirección del estadio al parking se decanta la balanza levemente hacia la aproximación incorrecta del usuario frente a las veces que el sistema ha fallado pese a haber una aproximación correcta del usuario, pero tampoco son unos datos que permitan sacar ninguna conclusión clara.

En cambio, en el sentido contrario, del aparcamiento al estadio, el porcentaje de aproximación correcta del usuario es de casi un 70%, dejando un bajo 30% en el caso de aproximación incorrecta del usuario. De estos datos se pueden sacar varias la siguiente posible conclusión: que el sensor de este lado del paso de peatones es más propenso al fallo y por eso se tiene un 70% de fallos de los sensores frente a la presencia de peatones.

Se deberá de tener en cuenta y hacer alguna revisión en este lado de la calle, para ver si este sensor tiene alguna falla en comparación con el del lado opuesto, de cara a la investigación del sistema en futuros meses.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

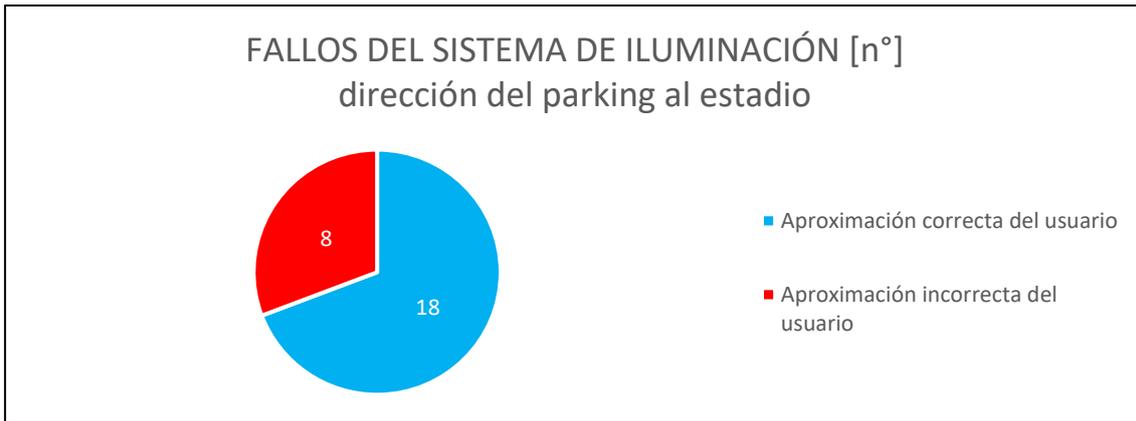


Tabla 27: Causa de los fallos en la activación del sistema de iluminación, en la dirección del parking al estadio, en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

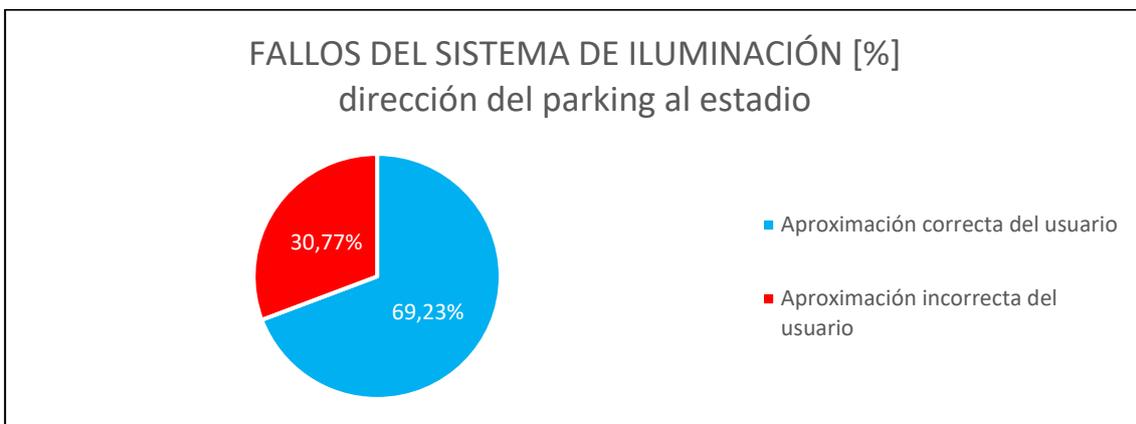


Tabla 28: Causa de los fallos en la activación del sistema de iluminación, en la dirección del parking al estadio, en valores porcentuales. Fuente: Elaboración propia.

Si que es cierto que es necesario distinguir cual es el motivo por el que el sistema no ha funcionado correctamente, pudiendo ser estos fallos de detección de movimiento del propio sistema o comportamiento inadecuado por parte de los usuarios del paso de peatones. En las tablas 23 y 24 en la que se muestran los resultados para las dos direcciones, vistas anteriormente, se puede observar que el 50,89% de las no activaciones, correspondientes a 57 eventos de los 112 totales, son debido a un mal aproximamiento del usuario al paso de peatones, provocando así su no activación. El resto de los fallos (55 sobre los 112 totales, 49,11%) son debidos a fallos del propio sistema de iluminación.

5.6.2.3 ANÁLISIS DE LOS VEHÍCULOS Y SUS COMPORTAMIENTOS

El siguiente punto del análisis del periodo de julio y agosto de 2021 es el análisis de los vehículos que cruzan el paso peatonal y la interacción que estos tienen con los usuarios del cruce.

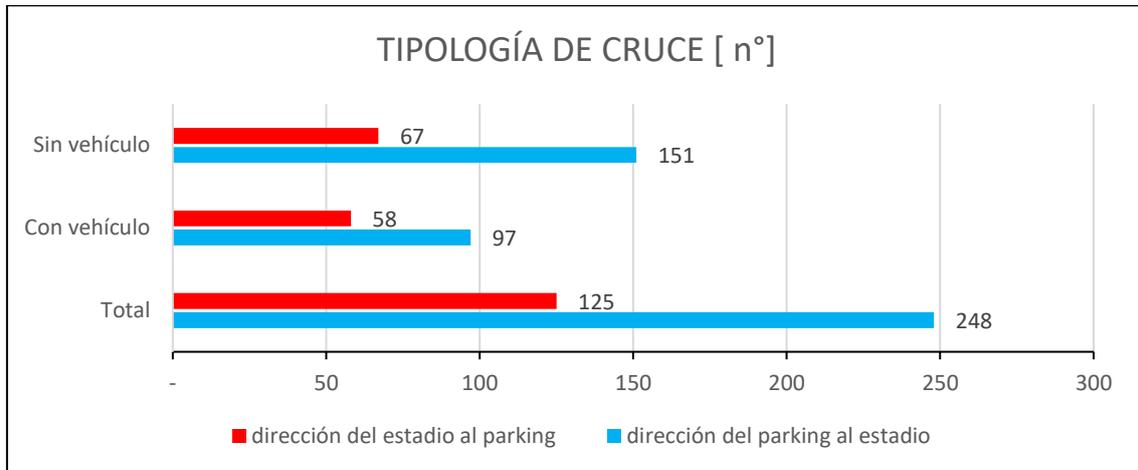


Tabla 29: Tipología del cruce en función de la presencia de vehículos, en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

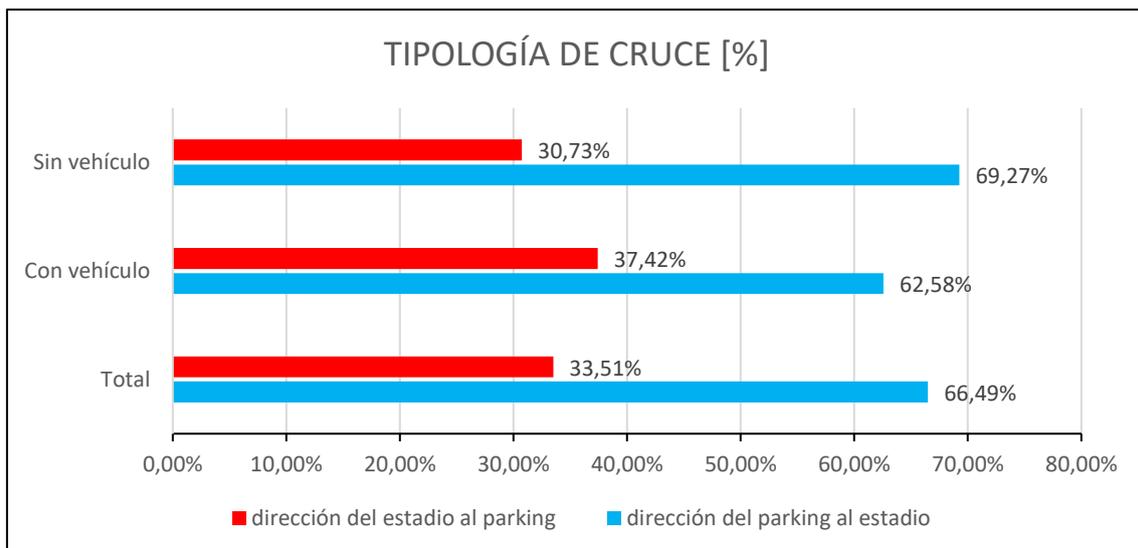


Tabla 30: Tipología del cruce en función de la presencia de vehículos, en valores porcentuales. Fuente: Elaboración propia.

Como se ha comentado ya en puntos anteriores, durante los dos meses objeto de estudio se realizaron 372 cruces peatonales, de los cuales 248 se realizaron en dirección del parking al estadio y 125 en la dirección del estadio al parking.

En las tablas 29 y 30 se pueden ver el tipo de cruce y el número de eventos de este que han tenido lugar en el periodo de estudio. Se puede observar bastante más actividad en la dirección que va del aparcamiento al estadio, ya que duplica prácticamente en número a los cruces que van del estadio al aparcamiento. Distinguiendo los cruces con presencia de vehículos y sin ella se puede ver que pese a que el estudio solo está realizado a horas de baja visibilidad (que suelen ser horas donde no hay tanta presencia de vehículos) no es tan significativa la diferencia entre cruces con vehículo y sin vehículo, como se podría esperar a priori.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Centrando el análisis en el tipo de vehículo que interactúa con el peatón, se identificaron tres categorías distintas de vehículos, la categoría de coche, la correspondiente a las motocicletas y la categoría correspondiente a los autobuses de transporte público.

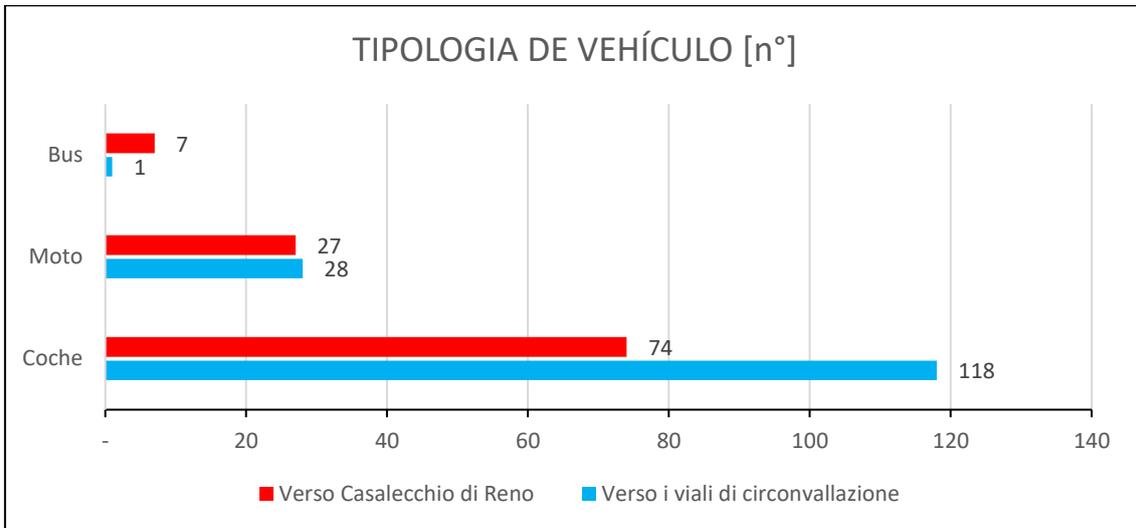


Tabla 31: Tipología de los vehículos que cruzan el paso peatonal, en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

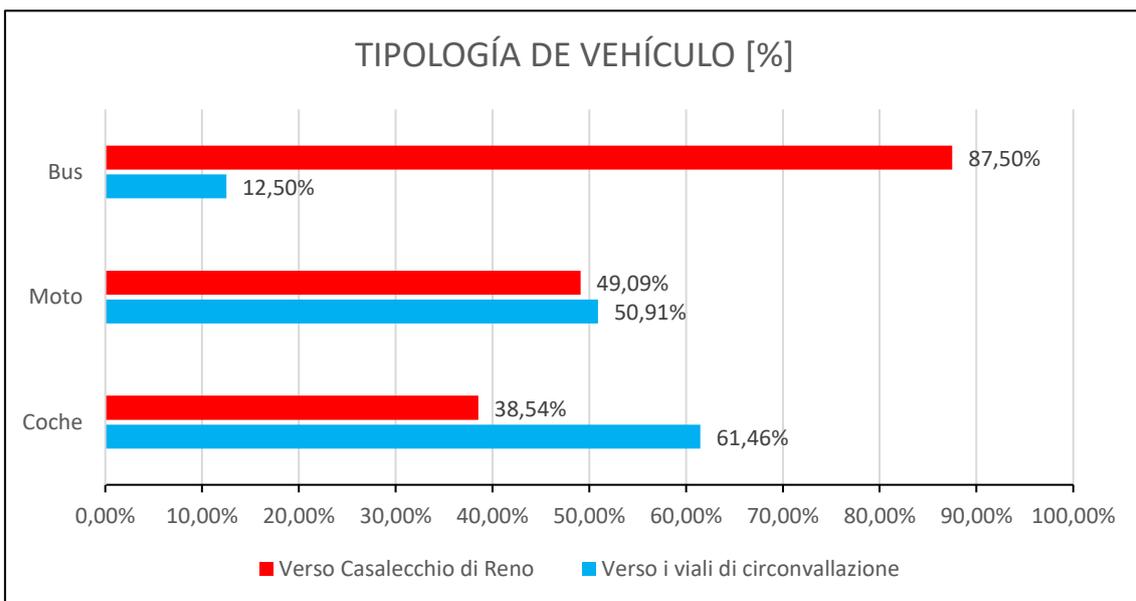


Tabla 32: Tipología de los vehículos que cruzan el paso peatonal, en valores porcentuales. Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 31 y 32 se muestra el desglose de las distintas categorías de vehículo en ambos de los sentidos de la marcha, se puede ver claramente una igualdad en la categoría de las motos, en la que hay un 49,09% para el sentido de Casalecchio di Reno frente a un porcentaje de 50,91% para el sentido de las calles de circulación, mientras que sí que se encuentra una diferencia significativa en los coches por ejemplo, donde hay un valor de 38,54% para el sentido de Casalecchio di Reno y un 61,46% para el sentido de circunvalación. Este es un dato justificable teniendo en cuenta las horas a las que se han realizado este estudio (horas de baja luminosidad, entre 19:30 y las 5:00) dentro de las cuales son mayores los flujos de reingreso a la ciudad desde áreas de trabajo externas al entorno urbano que normalmente requiere el uso del coche.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Para analizar el comportamiento de estos vehículos, se han definido cuatro categorías relacionadas con el comportamiento que toma el conductor:

- Ninguna: el conductor no realiza ninguna maniobra ni modifica la velocidad como respuesta a la presencia de peatón/es sin dar prioridad al usuario del cruce peatonal
- Detención: el conductor percibe al usuario del cruce peatonal y detiene la marcha dándole prioridad al peatón.
- Desaceleración: el conductor percibe al usuario del cruce peatonal y únicamente reduce la velocidad del vehículo sin llegar a detenerlo.
- Anormal: el conductor realiza una maniobra de riesgo para todos los usuarios de la vía, como por ejemplo invadir el carril contrario para no tener que detener el vehículo y dejar al peatón su espacio para cruzar. Hay ejemplos fotográficos de este comportamiento en el punto x del estudio.

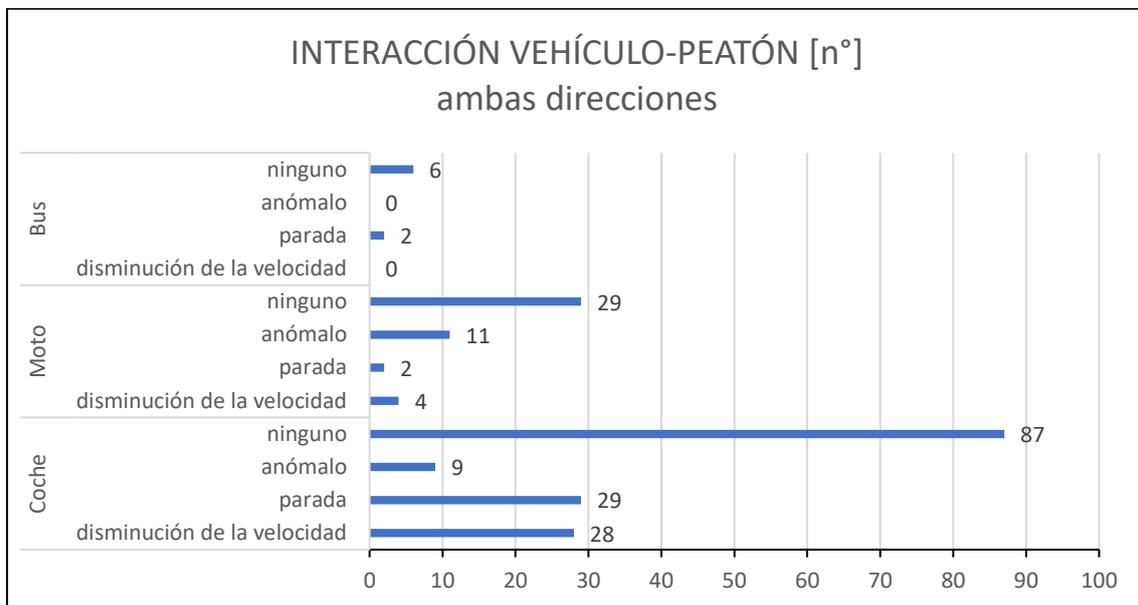


Tabla 33: Interacción vehículo-peatón en función del comportamiento de los vehículos, en ambas direcciones, en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

Antes de ninguna conclusión sobre los comportamientos de las distintas categorías de vehículos, cabe destacar que el número de buses que se observó en el periodo de dos meses era extremadamente pequeño, únicamente ocho vehículos detectados de esta categoría en ambas direcciones. Esto es debido al bajo número de buses nocturnos o "búhos" que circulan por la calle Andrea Costa. Por lo tanto, los buses no serán tomados en cuenta para el estudio del comportamiento de los conductores ya que es una cifra realmente baja y no es representativa.

Observando los resultados al distinguir las tres tipologías posibles de vehículos comentadas anteriormente y los posibles comportamientos que toma los conductores recién descritos, se pueden ver unos resultados alarmantemente altos en las tres tipologías de vehículos en el caso de ningún comportamiento por parte del conductor, en este comportamiento, como se acaba de describir, el conductor no cede el paso al peatón y sigue su marcha sin disminuir si quiera la velocidad.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

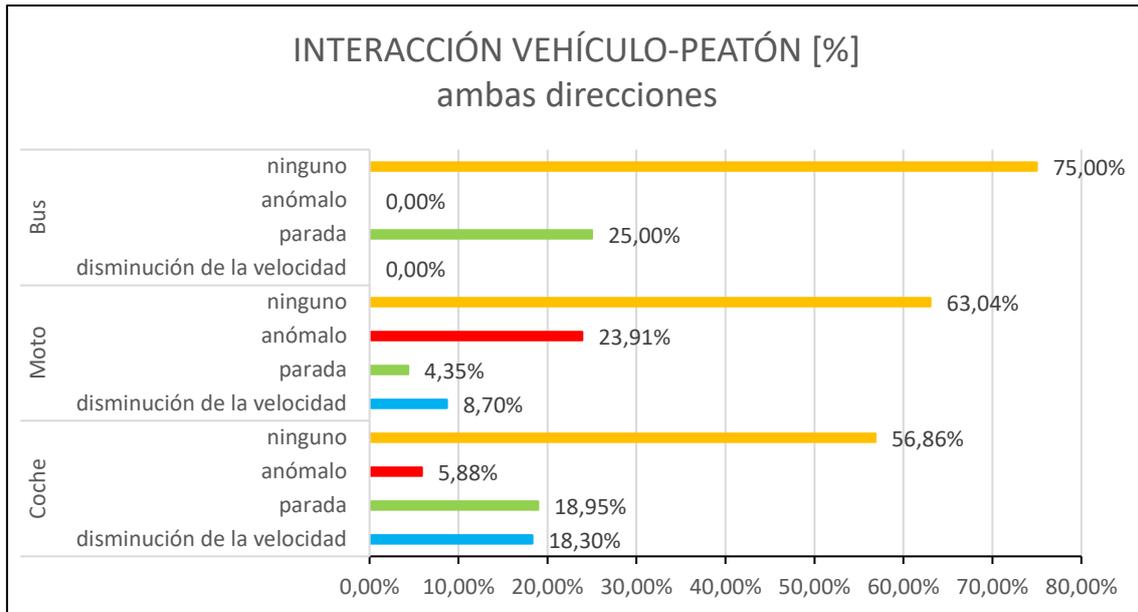


Tabla 34: Interacción vehículo-peatón en función del comportamiento de los vehículos, en ambas direcciones, en ambas direcciones, en valores numéricos. Fuente: Elaboración propia.

Con referencia a la tabla 34 se observa que el 75% de los conductores de autobús no realizó ninguna maniobra y solo el 25% detuvo su marcha para dar prioridad a los usuarios del cruce peatonal.

En cuanto a los coches, el valor porcentual de conductores que no realizaron ninguna maniobra es de 56,86%, mientras que los porcentajes de los comportamientos de parada y disminución de la velocidad son prácticamente iguales, siendo de 18,95% y 18,30% respectivamente. Por otro lado está el valor porcentual de los conductores que tuvieron un comportamiento anómalo que es el valor más bajo de todos, un 5,88%.

En cambio, en lo relativo a los conductores de motos se deberá de poner especial atención a ese 23,91% de los casos en los que los conductores han tenido comportamientos anómalos, dato que es considerablemente mayor que el de los conductores que sí que tuvieron conductas responsables y detuvieron la marcha (4,35%) y los conductores que desaceleraron dando prioridad al peatón (8,70%). El dato de conductores que siguieron con su marcha y no hicieron nada es de un 63,04%, ligeramente mayor al valor porcentual de los conductores de vehículos de cuatro ruedas, pero nada exagerado. Además, ese porcentaje de 23,91% de conductores que tienen conductas de conducción anómalas contrasta drásticamente con el 5,88% de conductores de coche que también tienen conductas anómalas, esto demuestra que con la moto, al ser un vehículo más ligero y manejable, es más fácil y da menos sensación de peligro para el conductor hacer maniobras extrañas que pongan en peligro a todos los usuarios de la vía.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Analizando en detalle los resultados diferenciando el sentido de marcha es posible detectar, tanto algunas similitudes muy grandes, como algunas diferencias también bastante destacables entre los conductores que se dirigen a Casalecchio di Reno y los que se dirigen a las calles de circunvalación de la ciudad de Bologna.

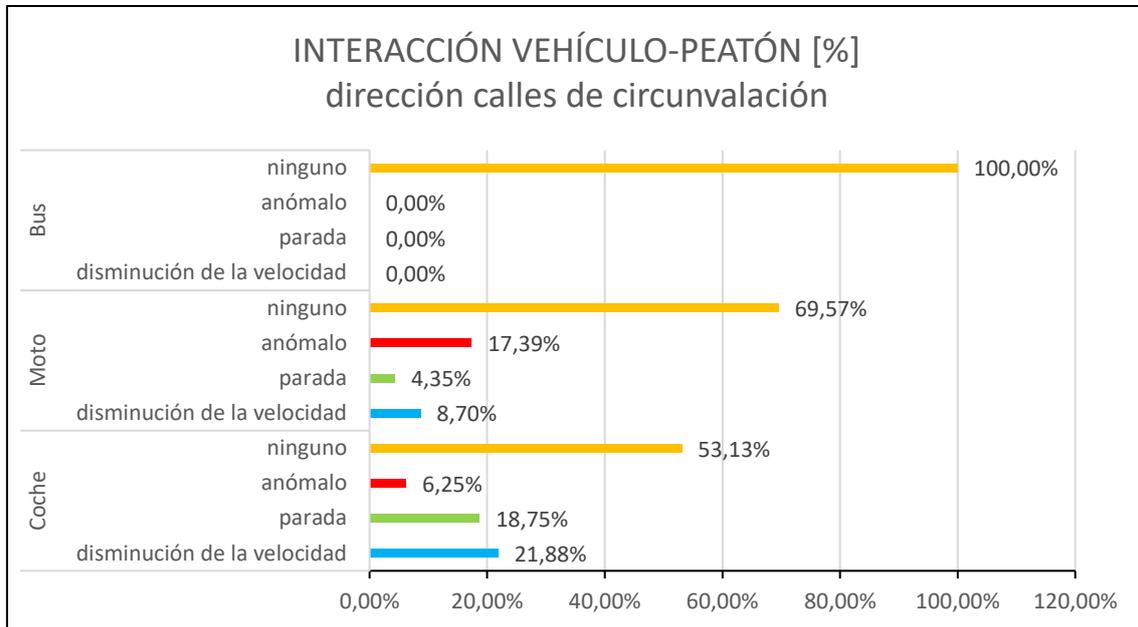


Tabla 35: Interacción vehículo-peatón en función del comportamiento de los vehículos, en la dirección a las calles de circunvalación, en valores porcentuales. Fuente: Elaboración propia.

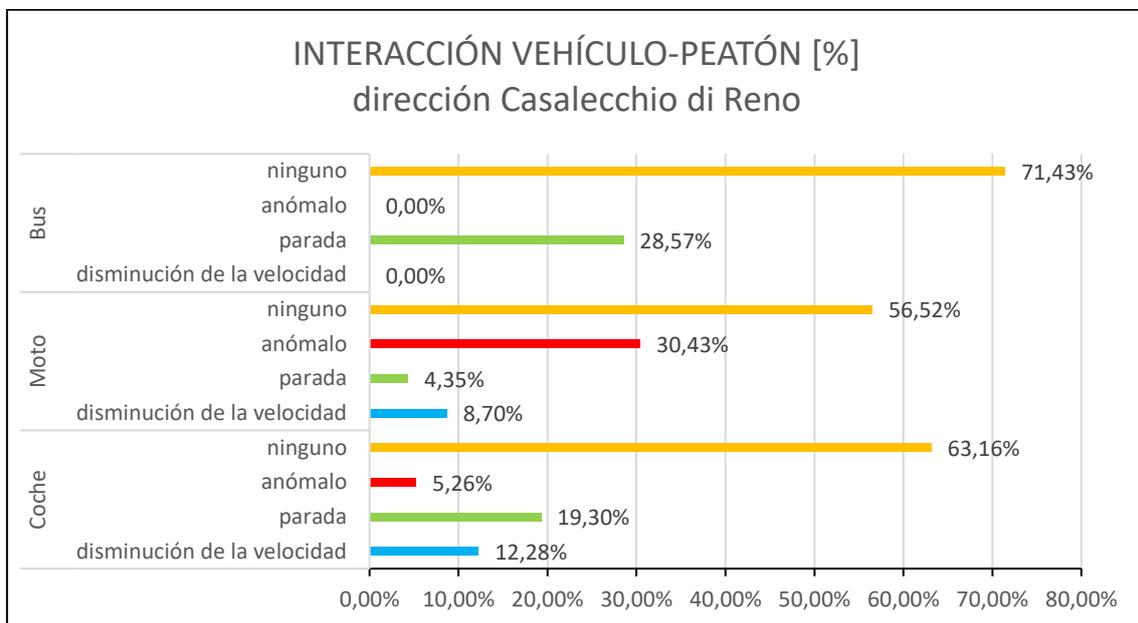


Tabla 36: Interacción vehículo-peatón en función del comportamiento de los vehículos, en la dirección a Casalecchio di Reno, en porcentuales. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, observando la tabla 36 se puede ver que el porcentaje de conductores de coches que se detienen o reducen la velocidad con el objetivo de dar prioridad a los peatones son exactamente los mismos, siendo respectivamente de 4,35% y 8,70%; en cambio, el porcentaje de maniobras anormales es significativamente mayor en los conductores de motocicletas en dirección Casalecchio di Reno que en la dirección del centro ciudad, siendo el

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

primero de 30,43% en comparación con el 17,39% de los conductores que se dirigen a las vías de circunvalación.

Asimismo, en el comportamiento de los conductores de vehículos de cuatro ruedas se pueden encontrar similitudes en las dos direcciones, por ejemplo en las maniobras anómalas, en la dirección Casalecchio di Reno representa un 5,36% y en la dirección circunvalación representa un 6,25%, datos muy similares. También se pueden encontrar comportamientos significativamente diferentes, como la desaceleración de los vehículos para dar prioridad cuyo valor porcentual es de 21,88% para los conductores de coches en dirección a la circunvalación y en cambio, es de 12,28% para los conductores en dirección Casalecchio di Reno.

5.6.2.4 ANÁLISIS DE LOS CRUCES PEATONALES

Con los datos obtenidos en los meses de julio y agosto, se observa que el número total de cruces en los dos meses de estudio asciende a 372, dando así una media diaria de aproximadamente 6,4 cruces y un valor máximo de 23 cruces el día 21/08/2021 ya que ese día hubo un evento deportivo realizado en el estadio municipal.

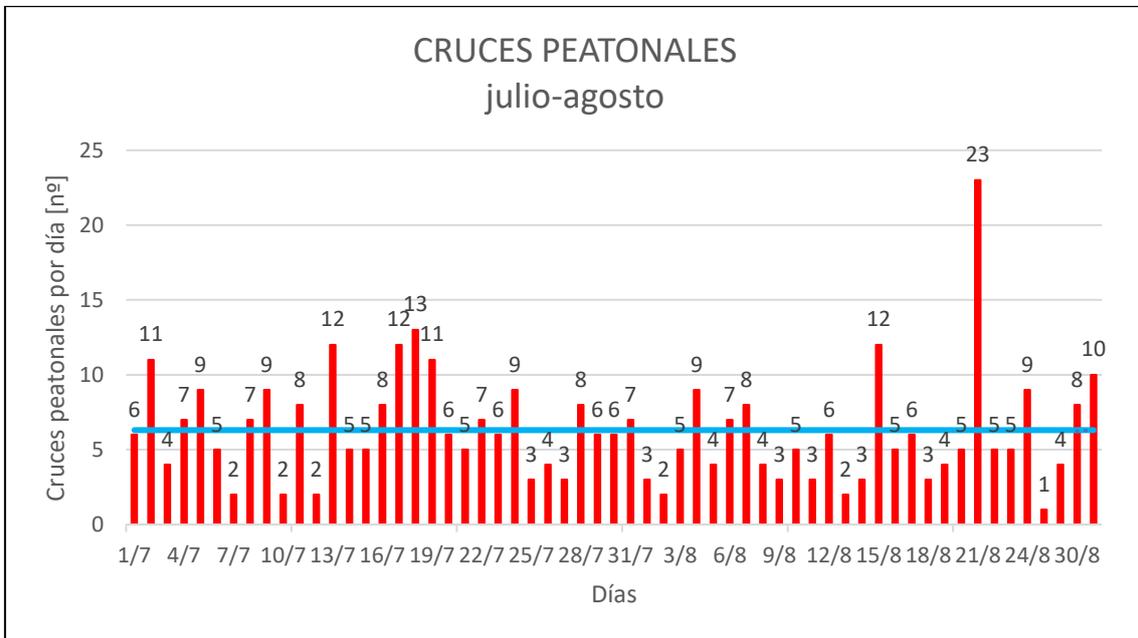


Tabla 37: Numero de cruces peatonales diarios en los meses de julio y agosto, en ambas direcciones. Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

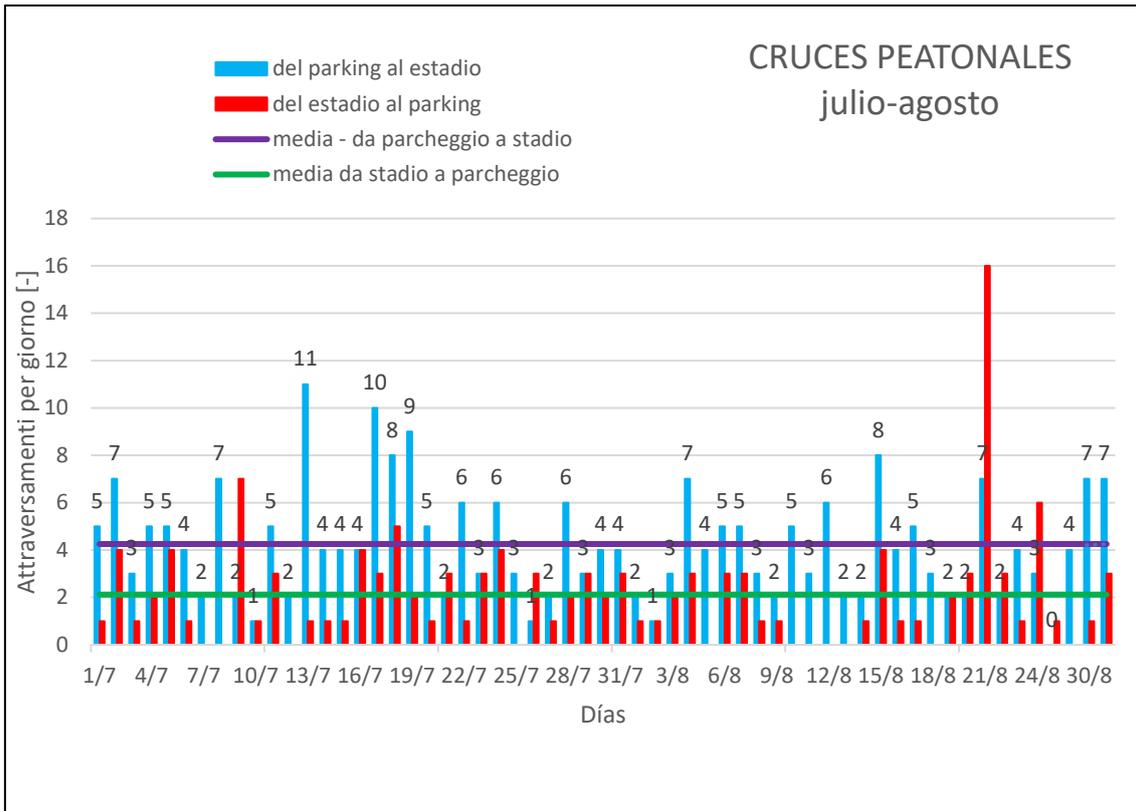


Tabla 38: Numero de cruces peatonales diarios en los meses de julio y agosto, en la dirección del parking al estadio y en la dirección del estadio al parking. Fuente: Elaboración propia.

Observando la tabla 38 existe un claro predominio de cruces en la dirección parking-estadio, cuyo promedio es de 4,3 cruces/día, mientras que en la dirección estadio-parking se observaron únicamente 2,1 cruces/día. Esto da una diferencia de 2,2 cruces/día en los dos sentidos, esto quiere decir que en la dirección parking-estadio se realizan más del doble de cruces diarios que en el sentido estadio-parking de media.

Si centramos la atención únicamente en el mes de julio se puede ver unos valores de cruces diario que no se desvían demasíad de la media que marca la línea azul, ya que el día pico que se comentó anteriormente debido al evento en el estadio era en el mes de agosto.

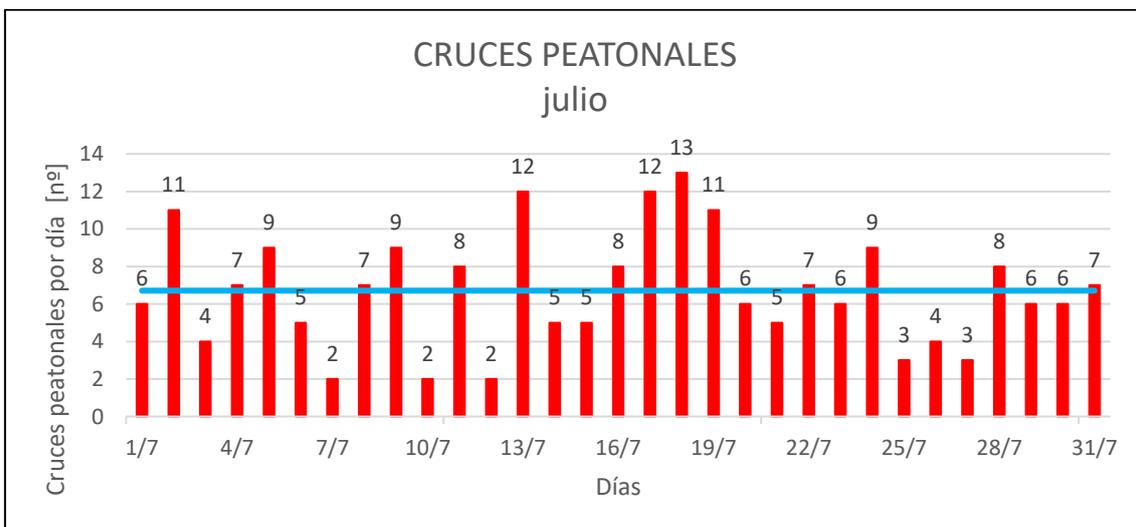


Tabla 39: Numero de cruces peatonales diarios en el mes de julio, en ambas direcciones. Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Si estos cruces diarios los separamos en función de la dirección de cruce, podemos ver como la mayoría de los cruces son en la dirección del parking al estadio, siendo los cruces en la dirección opuesta menos de la mitad.

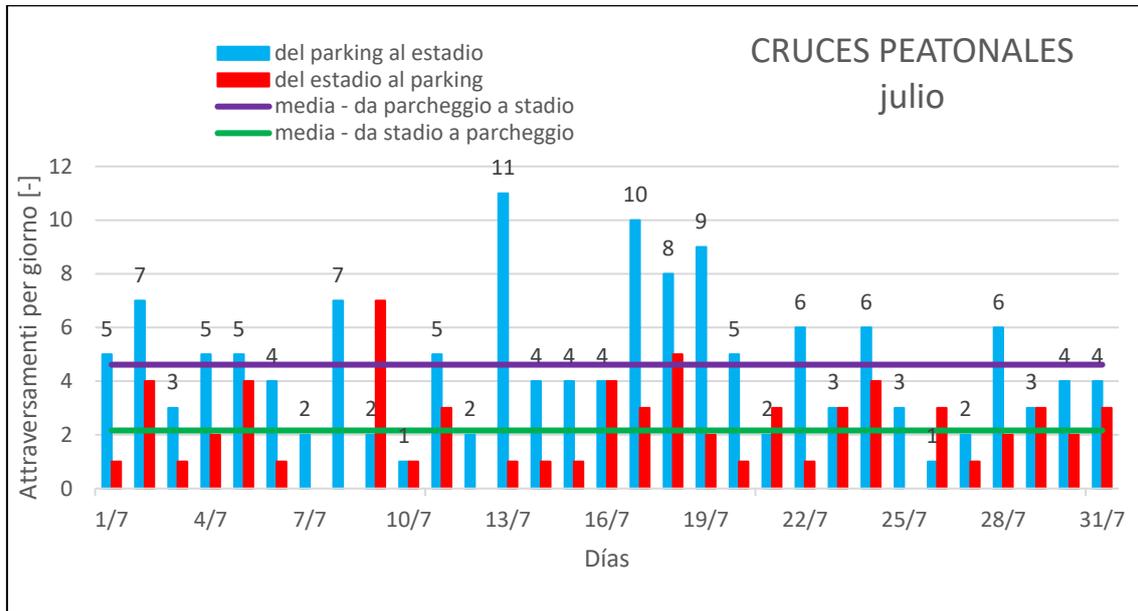


Tabla 40: Numero de cruces peatonales diarios en el mes de julio, en la dirección del parking al estadio y en la dirección del estadio al parking. Fuente: Elaboración propia.

De la observación de la tabla 40, en la que se detallan tanto el número de cruces diarios, como el número de cruces diario con distinción de sentido de cruce en el mes de julio de 2021, se puede ver como el número total de cruces fue de 208, correspondiente a un porcentaje de cruces diarios del 55,91% respecto al total de los cruces de los dos meses de observación.

En los cruces del parking al estadio aumenta la media de los cruces diarios de 4,3 que había en julio y agosto juntos a 4,6 que hay en julio (aumento porcentual de 6,97% respecto al bimestre), asimismo también aumenta la media de los cruces con sentido del estadio al parking aumenta su valor de 2,1 correspondiente al bimestre a un valor de 2,2 correspondiente al mes de julio de 2021 (aumento porcentual de 4,76% respecto al estudio de julio y agosto conjuntamente)

Este aumento también corresponde al aumento de la diferencia entre los dos sentidos de cruce, siendo este antes de 2,2 cruces/día y pasando a 2,5 cruces/día (aumento porcentual del 13% respecto del bimestre).

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

El siguiente gráfico a analizar es el de los cruces peatonales respectivos al mes de agosto, estos cruces siguen una tendencia regular, no desviándose demasiado de la media que marca la línea azul, a excepción del ya comentado día que se produjo el evento en el estadio Renato Dall'Ara con 23 cruces en un mismo día.

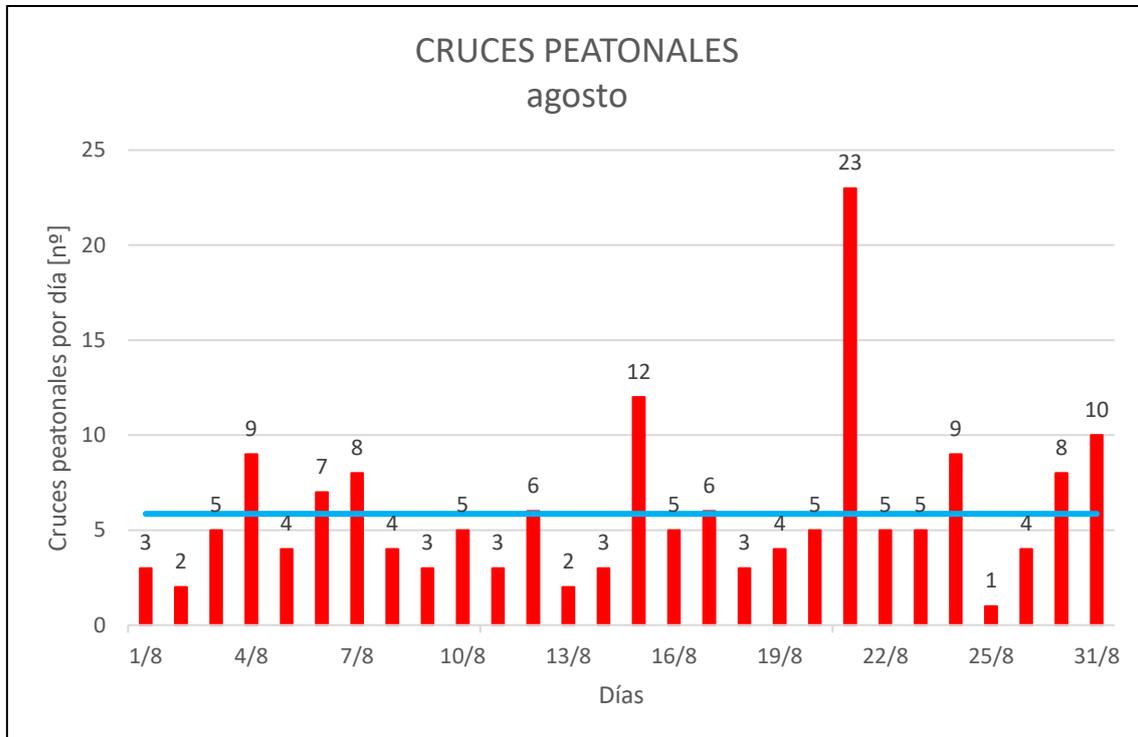


Tabla 41: Numero de cruces peatonales diarios en el mes de agosto, en ambas direcciones. Fuente: Elaboración propia.

Si se observan los datos de la tabla 41 se ve que el número de cruces diarios disminuyó en comparación con el mes anterior, esta bajada es de 208 cruces en el mes de julio a 164 cruces en el mes de agosto. Correspondiente a un porcentaje del total de cruces en el bimestre julio-agosto del año 2021 equivalente a 44,09%. Esta bajada de un mes a otro puede ser debida en gran parte a que Bologna es una ciudad en gran parte estudianta y en el mes de agosto ésta se vacía totalmente y el número de cruces diarios disminuye también a causa de esto.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

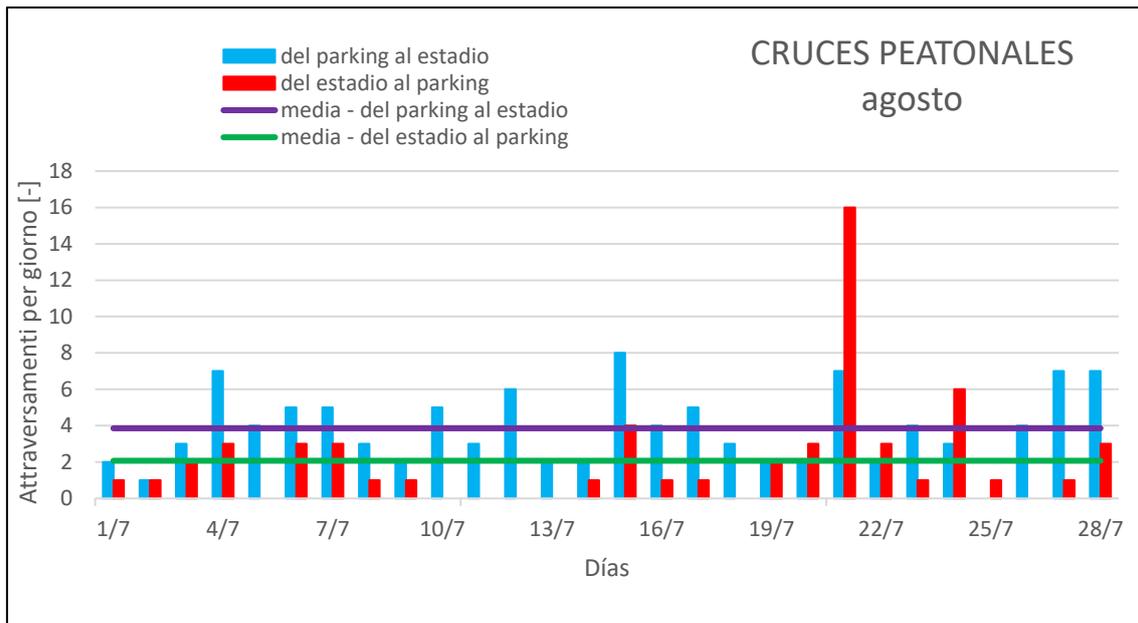


Tabla 42: Número de cruces peatonales diarios en el mes de agosto, en la dirección del parking al estadio y del estadio al parking. Fuente: Elaboración propia.

La disminución que se acaba de comentar de 208 a 164 cruces se ve claramente analizando en detalle los valores de cruces diarios promedio de cada mes, la media de cruces con la dirección desde el estacionamiento hasta el estadio disminuyó su valor del 4,6 cruces/día correspondiente a julio de 2021 a 3,9 cruces/día correspondiente a agosto (disminución porcentual igual al 10,86% con respecto al mes de julio), de igual forma también disminuye el promedio de cruces en la dirección del estadio al estacionamiento, su valor de 2,2 cruces/día correspondiente al mes de julio baja hasta 2,1 cruces/día en el mes de agosto (disminución porcentual igual al 4,76% respecto al mes de julio 2021).

Sin embargo, sería interesante destacar como esta disminución del valor medio de los cruces diarios con la dirección del estadio al estacionamiento es significativamente menos pronunciada que en la dirección opuesta debido al valor del día 21/08/2021 que es de 16 cruces ese día, debido al evento deportivo en el estadio Renato Dall'Ara. Si no se tuviera en cuenta este valor (con el objetivo de estandarizar valores) para calcular la media mensual de cruces diarios en la dirección del estadio al estacionamiento en el mes de agosto se tendría un valor de 1,5 cruces/día, esto daría una disminución porcentual en comparación al mes anterior de un 31,81%.

También en lo respectivo a la diferencia numérica (sin tener en cuenta el día 21/08/2021 con el objetivo de estandarizar valores) entre los dos meses teniendo en cuenta ambas direcciones, existe una diferencia significativa bajando el valor de cruces diarios de 2,5 en julio a 1,8 en el mes de agosto, esto corresponde a una disminución porcentual del 28%.

Analizando, sin embargo el valor medio de cruces diarios teniendo en cuenta el día 21 del mes de agosto la diferencia no sería tanta, siendo el valor de cruces diarios en julio el mismo, 2,5 y el del mes de agosto de 2,4 cruces/día.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Las siguientes gráficas a analizar serán la distribución de cruces peatonales a lo largo del día, dividiendo las horas de baja luminosidad en 10 franjas horarias.

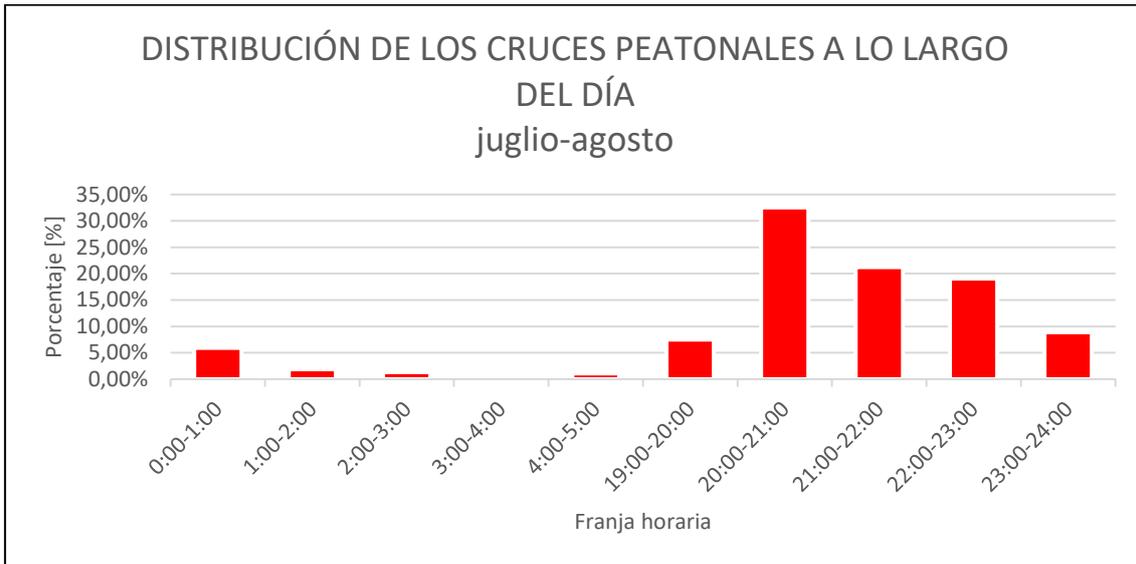


Tabla 43: Distribución en franjas horarias de los cruces diarios en los meses de julio y agosto, en ambas direcciones. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 43, la distribución de cruces diarios en el horario de funcionamiento del sistema de iluminación sin distinción de los sentidos de cruce se ve que la hora de más afluencia en el cruce peatonal es de las 20:00 a las 21:00.

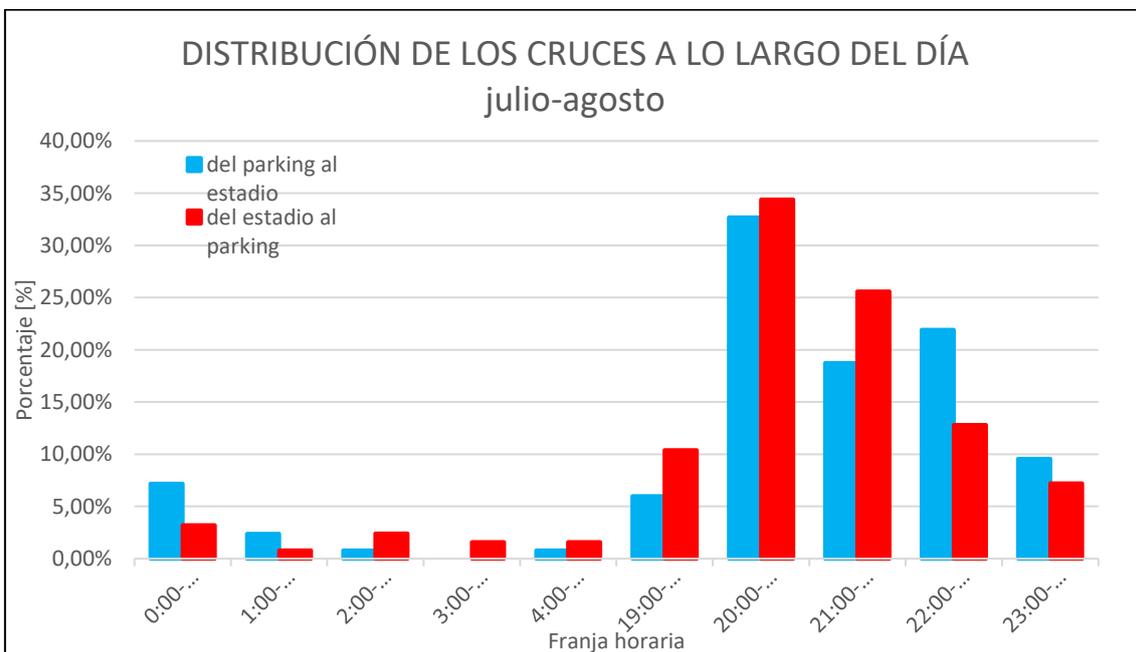


Tabla 44: Distribución en franjas horarias de los cruces diarios en los meses de julio y agosto, en la dirección del parking al estadio y del estadio al parking. Fuente: Elaboración propia.

Si se centra la atención en la tabla 44, la distribución de cruces diarios en las distintas franjas horarias tiene muy poca variación en los dos sentidos de cruce siendo en todas las franjas horarias menos la de 22:00 a 23:00 del orden de 1,5-3%, siendo el valor de la franja mencionada anteriormente de un 9,11%.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

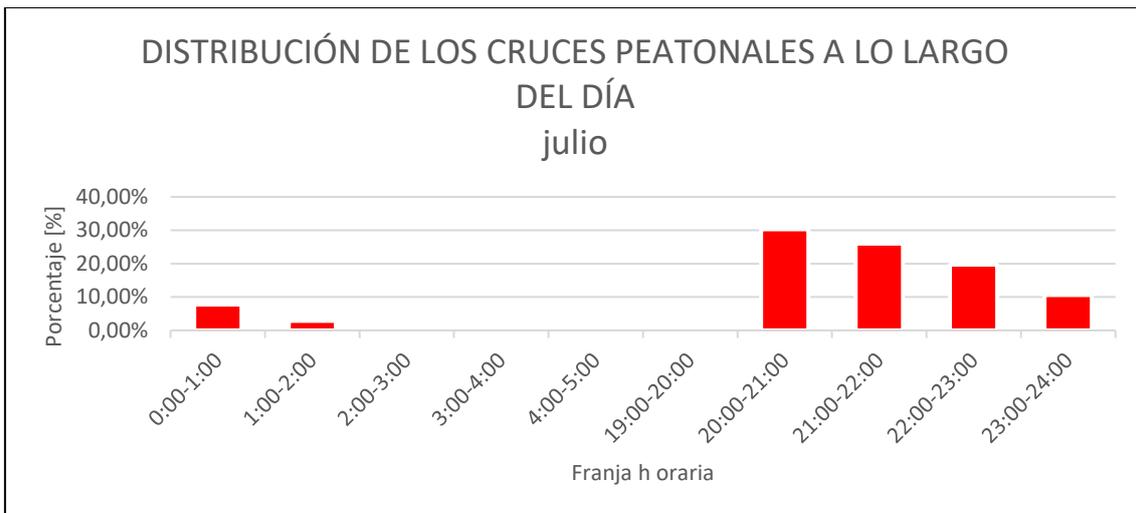


Tabla 45: Distribución en franjas horarias de los cruces diarios en el mes de julio, en ambas direcciones. Fuente: Elaboración propia.

Si se observa la tabla 45 de las franjas horarias, correspondientes a las horas de funcionamiento del sistema de mejora de la iluminación en el paso peatonal, ocurre lo mismo que en la gráfica que analizaba los dos meses de estudio, la mayoría de los cruces se concentran en las horas que van desde las 20:00 a las 22:00.

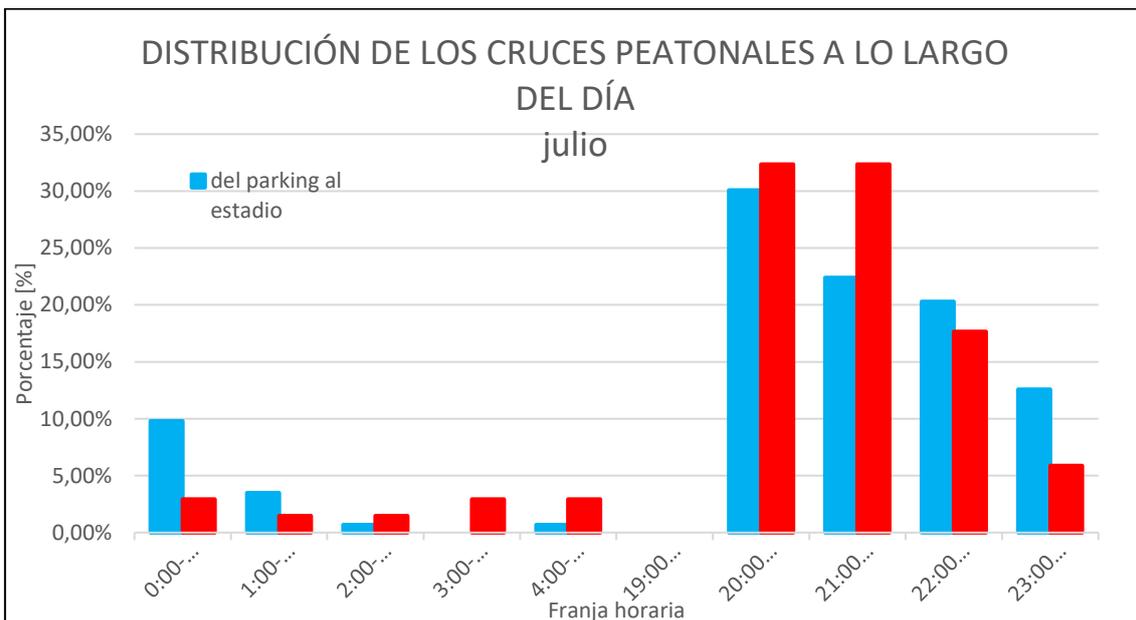


Tabla 46: Distribución en franjas horarias de los cruces diarios en el mes de julio, en la dirección del parking al estadio y del estadio al parking. Fuente: Elaboración propia.

Si separamos los datos distinguiendo las dos direcciones de cruce posibles, se puede ver lo comentado sobre la gráfica anterior, los cruces se concentran de las 20:00 a las 22:00, representando un 52,45% en la dirección del parking al estadio y un 64,7% en la dirección opuesta. También cabe destacar que la diferencia porcentual media entre los cruces en las dos direcciones es de un 3,64% y para la franja horaria que va desde las 21:00 a las 22:00 se dispara hasta un 9,98%.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

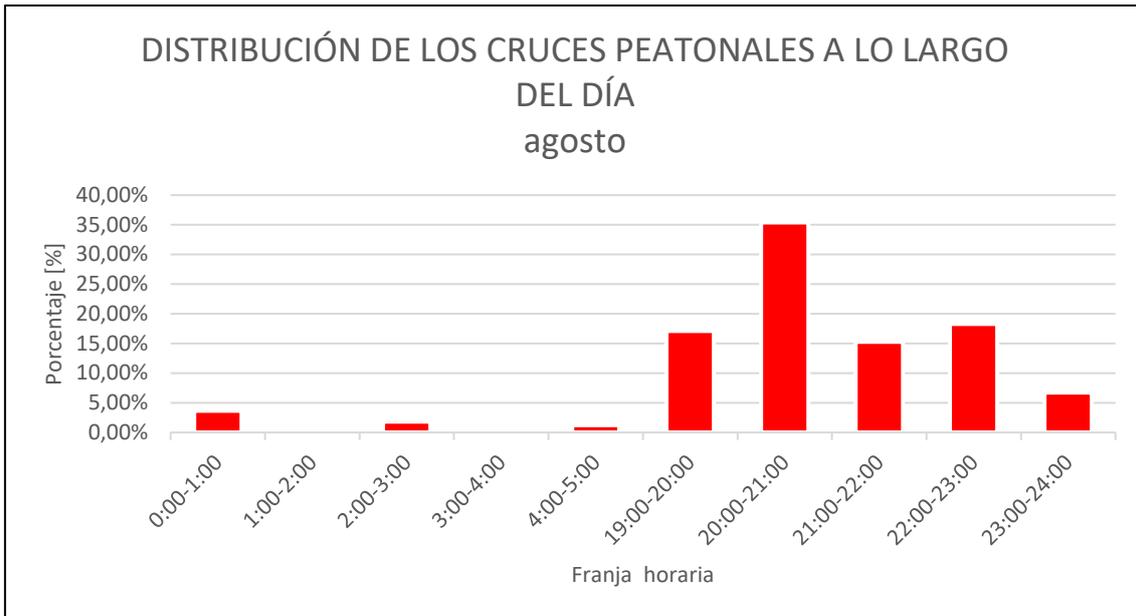


Tabla 47: Distribución en franjas horarias de los cruces diarios en el mes de agosto, en ambas direcciones. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el mes de julio, en agosto, el segundo mes de estudio, la mayoría de los cruces tienen lugar en las últimas horas de la tarde y las primeras en las que las condiciones de visibilidad van empeorando.

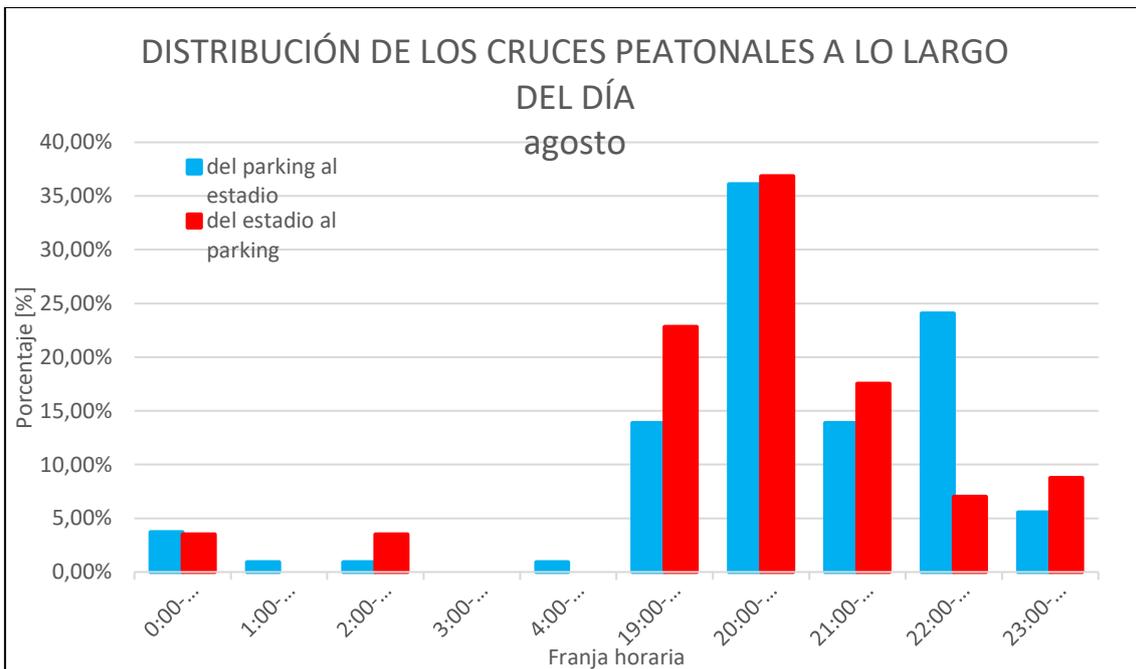


Tabla 48: Distribución en franjas horarias de los cruces diarios en el mes de agosto, en la dirección del parking al estadio y del estadio al parking. Fuente: Elaboración propia.

En concreto en la dirección del estadio al estacionamiento en la que más de la mitad de los cruces, con un porcentaje correspondiente a un 54,39%, ocurren en la franja horaria que ya hemos mencionado anteriormente en el mes de julio, la de las 20:00 a las 22:00, mientras que en la dirección del estacionamiento al estadio no sigue esta tendencia que se venía comentando, ya que en la franja horaria de las 20:00 a las 21:00 tiene un valor de 36,11% y las dos franjas

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

adyacentes tienen el mismo número de cruces, lo que corresponde a un 13,89% cada uno. Finalmente se puede comentar que la diferencia entre las dos direcciones de cruce tiene un valor de 5,90% y destaca la franja de las 20:00 a las 21:00 con una diferencia de 19,30%.

5.7 RESULTADOS FINALES

Teniendo en cuenta las técnicas de procesamiento de datos descritas anteriormente y los resultados que estas arrojan, se podría concluir que el innovador sistema de iluminación instalado en el paso de peatones supone una cierta mejora respecto a los cruces peatonales convencionales, pero aun así tiene ciertas lagunas que afectan significativamente su eficiencia y funcionalidad. Esta afirmación es aún más cierta al ver que al evaluar y comparar las distintas encuestas de los meses objeto de estudio (julio y agosto), sobre el total de las tres categorías de estudio estudiadas,

El porcentaje de conductores que no implementan ningún comportamiento pese a la existencia del paso de peatones inteligente ronda el 50%, por lo tanto, aproximadamente la mitad de los vehículos no implementan ningún comportamiento y ni se detienen, ni disminuyen la velocidad para ceder el paso a los peatones a pesar del nuevo sistema instalado.

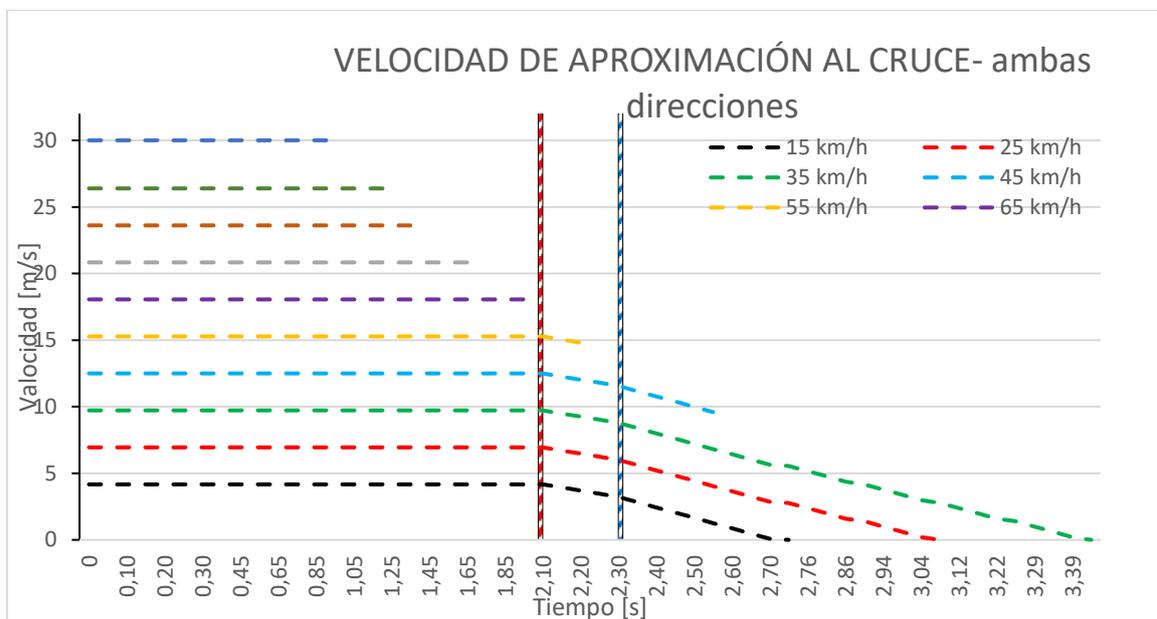


Tabla 49 Velocidad de aproximación al paso peatonal. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior se muestran las curvas de velocidades de aproximación al paso de peatones calculadas con la fórmula E.15 descrita anteriormente. De la observación de este gráfico es posible distinguir tres clases de velocidad dentro de las cuales el conductor del vehículo es capaz de realizar maniobras completas, maniobras parciales o ninguna maniobra.

Para velocidades de hasta 25km/h, el conductor del vehículo puede percibir al usuario del paso de peatones, evaluar la maniobra de emergencia a realizar y detener la marcha de forma segura dentro del espacio del que dispone para realizar la maniobra. Para velocidades de entre 25km/h y 35 km/h, el conductor solo puede percibir al usuario del paso de peatones, evaluar la maniobra de emergencia a realizar y realizar la frenada de emergencia sin siquiera completar la fase de frenada transitoria. Finalmente, para velocidades superiores a 35 km/h el conductor del vehículo ni quiera es capaz de completar el ciclo de percepción del usuario, procesamiento

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

de la información y activación de la maniobra de emergencia debido a que el tiempo del que dispone es menor al tiempo de reacción psicofísica fijado en 2,10 segundos.

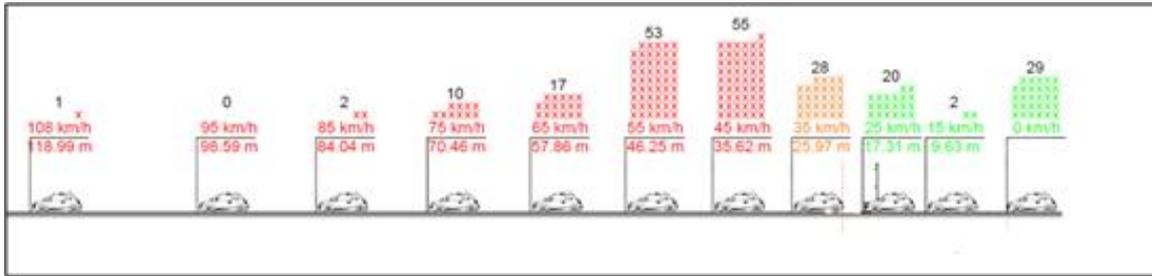


Figura 76 Número total de vehículos por categoría de velocidad, sin distinguir sentido de marcha. Fuente: Elaboración propia.

Al analizar el número total de vehículos dividido por categoría de velocidad sin distinción de sentido de marcha (ver figura 76) en comparación con las velocidades de aproximación aplicadas a la distancia de referencia (ver figura 49) surge que solo 79 vehículos (los que se ven en números verdes en la figura anterior) de 217 en total, correspondientes al 36,41% del total, se desplazaban a una velocidad que permitía al conductor realizar una maniobra para ceder el paso al peatón.

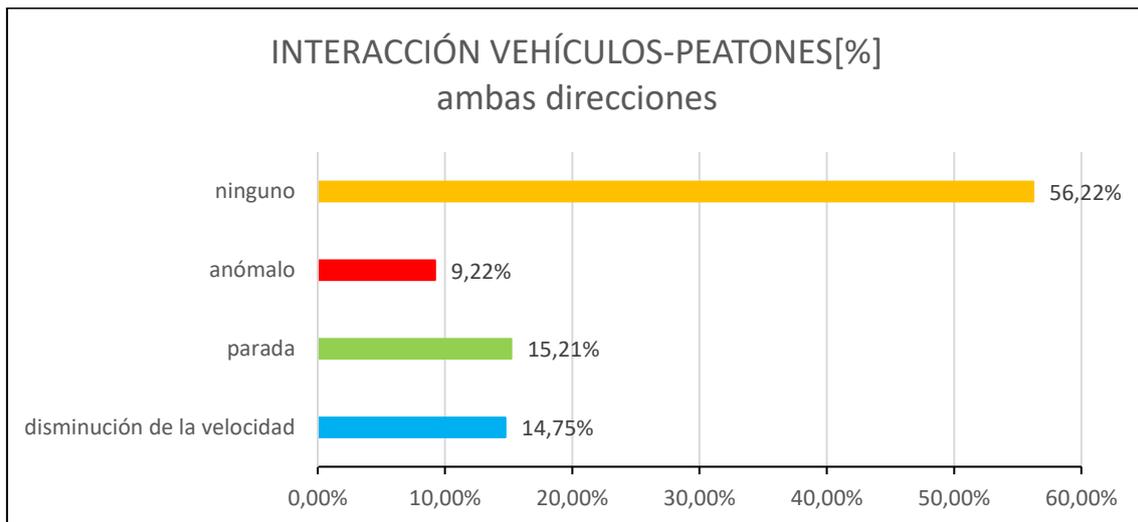


Tabla 50 Interacción global vehículo-peatón para las tres categorías de vehículos y sin distinción de sentido. Fuente: Elaboración propia.

Ahora es posible correlacionar el valor porcentual de los conductores que pudieron percibir, procesar y realizar una maniobra, equivalente al 36,40 % del total, con el valor porcentual de conductores que realizaron una maniobra, equivalente al 39,18 % del total, obtenido como la suma de los comportamientos anómalos (9,22% del total), del comportamiento de parada de marcha (15,21% del total) y de los comportamientos de ralentización (14,75% del total); se observa que el número de conductores que han realizado alguna maniobra como consecuencia de la presencia de usuarios del paso de peatones es superior al valor esperado de conductores potencialmente aptos para realizar maniobras en relación con los tiempos de reacción psicotécnicos.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

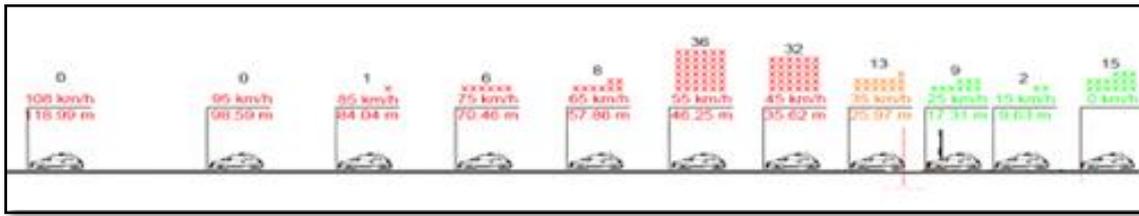


Figura 77 Número total de vehículos por categoría de velocidad, sentido de marcha, carreteras de circunvalación.
Fuente: Elaboración propia

De la figura 77 se puede ver que, comparando, en cuanto a la dirección de viaje, el número total de vehículos dividido por categoría de velocidad a las velocidades de aproximación aplicadas a la distancia de referencia (ver tabla 49) resulta que solo 39 vehículos (los que se ven en números verdes en la figura anterior) de 122 en total, correspondiente al 31,97% del total, se desplazaban a una velocidad que permitía al conductor realizar una maniobra para dar prioridad al peatón.

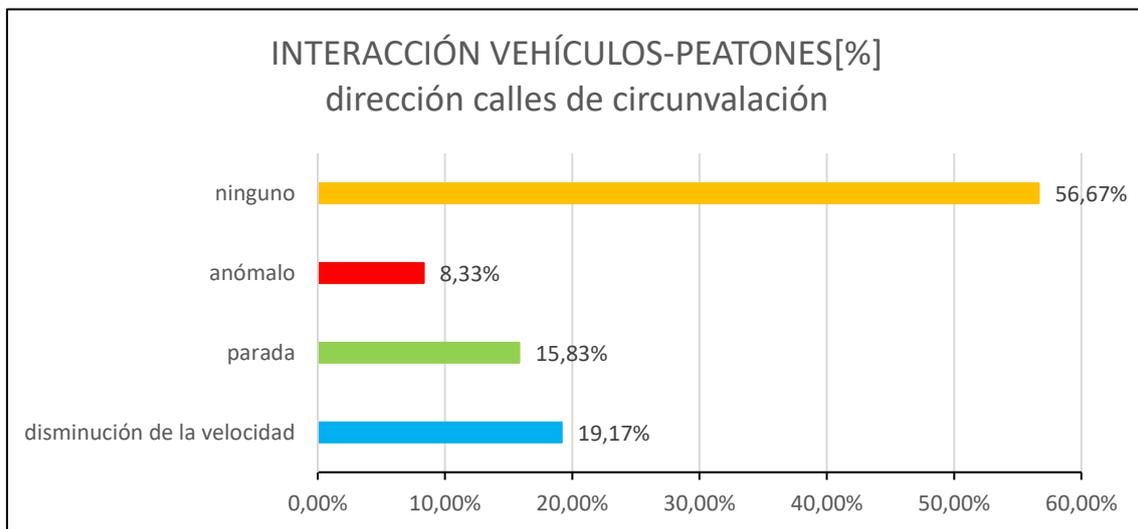


Tabla 51 Interacción global vehículo-peatón para las tres categorías de vehículos en dirección a la circunvalación.
Fuente: Elaboración propia.

De manera similar a lo que se hizo para las evaluaciones sin distinción del sentido de circulación, se realiza la correlación entre el valor porcentual de conductores que fueron capaces de percibir, procesar y realizar una maniobra, igual al 31,97% del total, siendo el valor porcentual global de las maniobras efectivamente realizadas, igual al 43,33% del total, obtenido como la suma de los comportamientos anómalos (8,33% del total), del comportamiento de parada de marcha (15,83% del total) y del comportamiento de ralentización (19,17% del total).

Al igual que en las valoraciones realizadas sin distinción del sentido de circulación, también en este caso se puede observar que el dato de que el número de conductores que han realizado alguna maniobra como consecuencia de la presencia de usuarios del paso de peatones es superior al valor esperado en relación con los tiempos de reacción psicotécnicos, aunque en un valor porcentual significativamente mayor.

En ambos contextos, es por tanto razonable suponer que dentro de los valores porcentuales de conductores que han realizado alguna maniobra, como consecuencia de la presencia de usuarios

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

del cruce, la tasa superior a los valores esperados se debe a vehículos que circularon a una velocidad superior a la máxima permitida.

A efectos estadísticos, por lo tanto, esta tasa es atribuible a la categoría de comportamientos anómalos, especificando, sin embargo, que la relativa maniobra incorrecta, o en cualquier caso potencialmente peligrosa, es atribuible a la falta de tiempo en la elaboración del peligro. y no a conductas deliberadamente peligrosas.

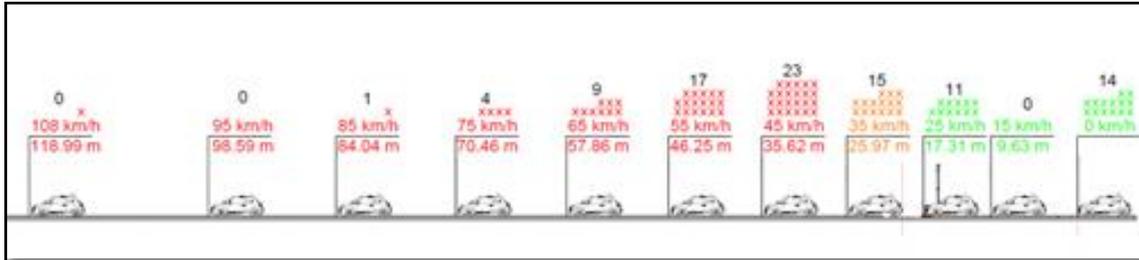


Figura 78 Número total de vehículos por categoría de velocidad dirección de viaje Casalecchio di Reno. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en cuanto a la dirección Casalecchio di Reno, de la comparación entre la figura 78 relativo al número total de vehículos dividido por categoría de velocidad y la tabla 49 en relación con las velocidades de aproximación aplicadas a la distancia de referencia (ver tabla 49) surge que solo 40 vehículos (los que se ven en números verdes en la figura anterior) de un total de 95, correspondientes al 42,11% del total, circulaban a una velocidad que permitía al conductor realizar una maniobra para dar paso al peatón.

Al igual que en los dos casos anteriores, es posible comparar este valor porcentual de los conductores que pudieron percibir, procesar y realizar una maniobra, igual al 42,55% del total, con el valor porcentual global de las maniobras efectivamente realizadas, igual a 37,92% del total, obtenido como la suma de comportamientos anómalos (11,49% del total), comportamientos de parada (16,09% del total) y comportamientos de ralentización (10,34% del total).

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

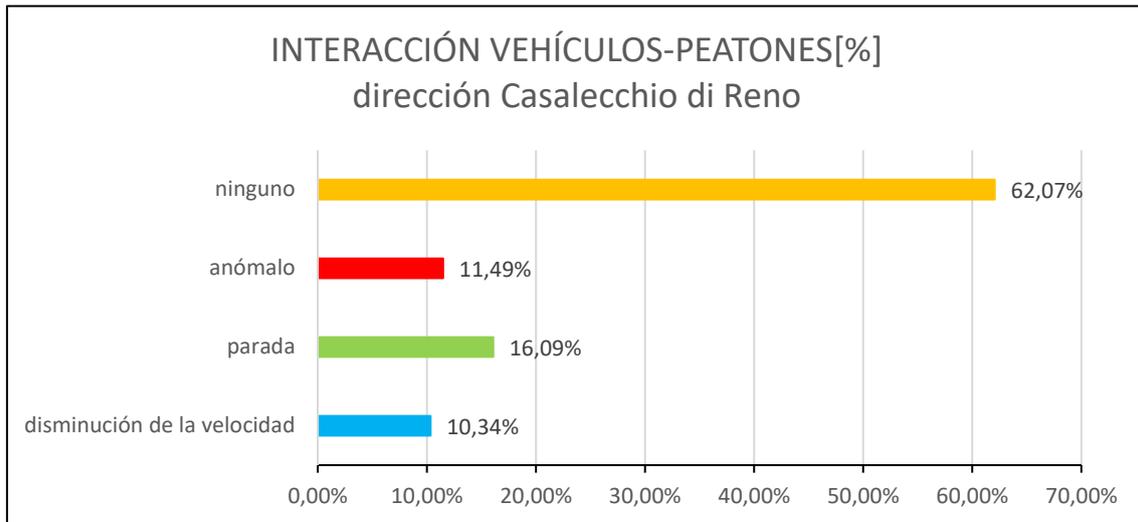


Tabla 52: Interacción general entre vehículos y peatones para las tres categorías de vehículos que se dirigen hacia Casalecchio di Reno. Fuente: Elaboración propia

A diferencia de lo que se constató en el caso sin distinción de sentido de marcha y en aquél con sentido de marcha calles de circunvalación, para la dirección Casalecchio di Reno resulta que el número de conductores que realizaron alguna maniobra resultó ser inferior al valor esperado de los conductores que potencialmente podrían haber realizado una maniobra como consecuencia de la presencia de un usuario del paso de peatones y que, por tanto, hay una serie de conductores que han optado deliberadamente por no dar prioridad al usuario del paso de peatones y no realizar ninguna maniobra.

6. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los objetivos de este estudio que eran analizar la viabilidad y eficacia de los pasos de peatones inteligentes como el descrito a lo largo de este trabajo de fin de grado, con el objetivo de convertir las ciudades en espacios más seguros para los usuarios más vulnerables de la vía.

Respecto a la metodología empleada se ha mejorado el sistema de iluminación del paso peatonal objeto de estudio dotándolo de luces más potentes que funcionan en conjunto con un sistema de detección del peatón para llamar más la atención de los conductores. A su vez también hay instalado un sistema de cámaras para grabar y posteriormente analizar las imágenes

Viendo el dato dado en el punto "6.7 RESULTADOS FINALES" del 50% de los conductores que no realiza ninguna acción al cruzar el paso peatonal se podría tomar la primera conclusión de que el estudio no es conclusivo y el sistema de iluminación mejorado que se ha instalado en el cruce no cumple con los resultados esperados.

Pero si se tiene en cuenta no solo ese dato, sino que también se observa la velocidad de los coches al aproximarse al paso peatonal se ve que esta influye en gran manera en los resultados obtenidos, para velocidades mayores de 25 km/h el conductor no tiene tiempo de efectuar la maniobra de frenado de emergencia a tiempo.

A la luz de estos resultados, la primera observación que se puede realizar está ciertamente relacionada con el índice de eficiencia del innovador sistema de iluminación instalado en el paso de peatones, entendido como la capacidad del propio sistema para inducir al conductor a realizar una maniobra ya que goza de una mejor percepción del usuario del paso de peatones.

Dentro de la tabla de la tabla 53, se muestran los índices de eficiencia del sistema de iluminación, calculados tomando como referencia en un caso el número total de vehículos transitados y en el otro caso el número total de vehículos cuya velocidad permitió a los conductores realizar una maniobra encaminada a dar la prioridad a los usuarios del paso de peatones.

	Ambas direcciones	Dirección calles de circunvalación	Dirección Casalecchio di Reno
Vehículos totales [A]	217	122	95
Vehículos que efectúan una maniobra [B]	85	52	33
Vehículos en condiciones de percibir la mejora de iluminación [C]	79	39	40
Tasa de eficiencia [D]=[B]/[A]	39,17%	42,62%	34,74%
Tasa de eficiencia ponderada [E]=[B]/[C]	107,59%	133,33%	82,50%

Tabla 53 Tasa de eficiencia de la mejora de iluminación. Fuente: Elaboración propia.

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

Con referencia a la tabla 53 se observa, de hecho, que en ausencia de consideraciones sobre las velocidades de los vehículos, la tasa de eficiencia calculada de la planta es igual al valor porcentual de 39,17% considerando ambas direcciones, mientras que se vuelve igual a 42,62% y 34,74% respectivamente solo para la dirección calles de circunvalación y solo para la dirección Casalecchio di Reno. Y el índice de eficiencia del sistema tomando como referencia únicamente el número de vehículos que, en relación con la velocidad y el tiempo de reacción psicotécnica, podrían haber percibido el sistema de iluminación, se observa que el índice de eficiencia varía significativamente y en concreto, pasa a ser 107,59 % considerando ambas direcciones, mientras que se convierte en 133,33% y 82,50% respectivamente solo para la dirección calles de circunvalación y solo para la dirección Casalecchio di Reno.

En relación con lo anterior, es posible afirmar que el innovador sistema de iluminación instalado en el paso de peatones permite mejorar la percepción del usuario sobre el propio paso, ya que es capaz de inducir una reacción incluso en los conductores de vehículos que normalmente, a causa de la velocidad a la que se desplazan, ni siquiera podrían percibir al peatón.

Entre los índices de eficiencia ponderados, sin embargo, surge el valor porcentual de la dirección Casalecchio di Reno, en el que los conductores que implementaron cualquier maniobra no solo fueron inferiores al valor esperado, sino que también se caracterizaron por diez conductores, correspondientes al 11,49% de la dirección total, que implementó una maniobra peligrosa para la seguridad.

No es posible identificar de manera única las razones detrás de este resultado, en contraste con lo que se encontró en la dirección opuesta de viaje, pero es concebible atribuirlo a una combinación de elementos de la infraestructura vial y elementos de la esfera de comportamiento de los conductores.



Figura 79: Vista satelital del paso de peatones. Fuente: Elaboración propia

Con referencia a la figura 79, se puede observar que para la dirección Casalecchio di Reno (según está tomada la vista satelital de derecha a izquierda) se encuentra aguas arriba del paso de peatones una rotonda situada en la intersección con via dello Sport y el acceso al estacionamiento.

Por lo anterior y en consideración al gran número de vehículos que circulan a velocidades superiores a la máxima permitida, es razonable suponer que para el sentido de marcha

ESTUDIO Y MEJORA DE LA MEJORA EN PASOS PEATONALES INTELIGENTES. APLICACIÓN EN LA CIUDAD DE BOLOGNA(ITALIA)

circunvalación la presencia de las dos semicurvas opuestas previas al paso de peatones induce a los conductores de los vehículos a aumentar la atención a la conducción y esto conlleva unos tiempos de reacción inferiores en los conductores que circulan en este sentido. En el caso contrario, para la dirección Casalecchio di Reno es razonable suponer que la combinación de la recta que precede al paso de peatones y la fase de aceleración del vehículo justo después de salir de la rotonda induce a los conductores a una reducción de la percepción del paso de peatones con el consiguiente aumento de eventos en los que no se realiza ninguna maniobra.

Se pueden sacar tres conclusiones principales de los resultados obtenidos. La primera de ellas es la mejora del porcentaje de cesión de paso a los peatones cuando se incluyó la iluminación dedicada mejorada, este porcentaje se duplicó respecto al de la condición 1 (iluminación vial estándar). La segunda es la mejora significativa que se observó cuando todos los elementos estaban presentes y la iluminación LED de la acera estaba funcionando de manera INTERMITENTE. En comparación con la condición de iluminación dedicada mejorada (63,56% frente a 38,21%) y de un 44,56% en comparación con la condición de referencia con la iluminación vial estándar únicamente. La tercera conclusión que se puede obtener de los resultados que se han conseguido en este estudio es que la sola adición de las luces intermitentes naranjas, o esta como alternativa a la iluminación LED, ya sea con emisión de luz continua o intermitente, no mejora significativamente el porcentaje de cesión de paso al peatón en comparación con la condición 2 que solamente tenía como mejora la iluminación dedicada mejorada.

Aunque los problemas de seguridad vial en lo respectivo a los peatones son universales, los resultados específicos de este estudio deben saber interpretarse en conjunto con el contexto italiano en el que los conductores de vehículos suelen ceder el paso principalmente cuando el peatón toma la iniciativa de cruzar y entra al paso de peatones. Es posible que en otros países con una cultura diferente a la italiana, los resultados de porcentaje de cesión de paso a los peatones hubieran sido distintos, teniendo en cuenta tanto las posibles diferencias de comportamiento de los conductores como de los peatones. Los comportamientos del conductor y del peatón vienen marcados fuertemente por los contextos culturales (Hamed, 2001)

Se puede concluir con que el sistema integrado de iluminación y advertencia que se ha creado para este estudio es altamente efectivo para aumentar la cesión de paso a los peatones en condiciones de baja iluminación durante la noche y a velocidades medias/bajas de los vehículos.

7. FUTURAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN

Mejora del sistema de detección del peatón, vista la cantidad de faltas de activaciones que este tiene actualmente, para reducir el porcentaje de detecciones fallidas y el consiguiente fallo en la activación del sistema de iluminación.

Utilización de vallas para encauzar el tráfico de peatones que podría mejorar la eficacia del sistema de detección.

Utilización de distintos tipos de luces y colores para mejorar la visibilidad y llamar la atención del conductor.

Se necesitan futuros estudios para realizar un seguimiento para demostrar que los efectos demostrados en este estudio persisten a largo plazo, cuando los conductores Bologna se hayan acostumbrado a estos cruces peatonales innovadores.

Estudios futuros podrían también rastrear la velocidad del conductor al acercarse al paso de peatones en las condiciones de iluminación mejorada y evaluar la distancia a la que los conductores fijan y miran por primera vez al peatón utilizando la metodología de registro del movimiento ocular

Estudiar la geometría de la vía en las proximidades del paso peatonal en futuros estudios ya que influiría en gran manera en la velocidad de aproximación de los vehículos al cruce.

Mejorar el sistema de transmisión de los datos tomados por las cámaras del paso de peatones, para que no sea necesario hacer el traspaso de una forma física y se pueda hacer de manera remota.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, M., Hazlett, R., Tacker, H., & Graham, B. (1970). *Visibilidad peatonal real estimación de la visibilidad del propio peatón. Optrometría y Ciencia de la visión.*
- Benavides, C. (2015). *Impacto de la luminosidad sobre los accidentes de tránsito y los flujos vehiculares en Chile.*
- Costa, M., Bonetti, L., Vignali, V., Bichicchi, A., Lantieri, C., & Simone, A. (2019). *Atención visual del conductor a diferentes categorías de carteles publicitarios en la carretera.*
- Costa, M., Leonardo, B., Valeria, V., Claudio, L., & Andrea, S. (2018). *Papel de la visión periférica en la identificación y dicriminación de señales de tráfico verticales.*
- Costa, M., Simone, A., Vignali, V., Lantieri, C., & Palena, N. (2018). *Distancia de fijación y duración de la fijación en señales de tráfico verticales.*
- Decreto Ministeriale numero 6792 del 05/11/2001. (2001).
- (2019). *Estrategias de seguridad vial y movilidad del próximo decenio.*
- García Sampere, Á. (2016). *Manual del peatón.*
- Hamed, M. (2001). *Análisis del comportamiento de los peatones en los pasos peatonales.*
- Lenné, M., Rudin-Brown, C., Navarro, J., Edquist, J., Trotter, M., & Tomasevic, N. (s.f.). *Comportamiento del conductor en los pasos a nivel de ferrocarril: respuesta a luces intermitentes, selañes de tráfico y señales de alto en conducción rural simulada.*
- Orden TMA/851/2021, de 23 de julio, por la que se desarrolla el documento técnico de condiciones básicas de accesibilidad y no discriminación para el acceso y la utilización de los espacios públicos urbanizados. (2021).
- Plainis, S., & Murray, I. (2002). *Tiempos de reacción como índice de visibilidad visual al conducir de noche. Óptica oftálmica y fisiología.*
- Real Decreto Legislativo 6/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Tráfico, Circulación de Vehículos a Motor y Seguridad Vial. (2015).
- Shurbutt, J., Van Houten, R., Turner, S., & Huitema, B. (2009). *Análisis de los efectos de las balizas LED rectangulares de destello rápido sobre la cesión de paso a los peatones en los cruces peatonales de varios carriles.*
- Sinar, D. (1984). *Visibilidad peatonal nocturna real frente a la estimada. Ergonomía.*
- Tefft, B. (2012). *Velocidad de impacto y riesgo de los peatones de lesión severa o muerte.*
- Tomczuk, P., Jamroz, K., Tomasz, M., & Chrzanowicz, M. (2019). *Rquisitos de iluminación para pasos de peatones: contraste positivo.*
- Vignali, V., Cuppi, F., Acerra, E., Bichicchi, A., Lantieri, C., Simone, A., & Costa, M. (2018). *Efectos del uso de isleta de refugio en la mediana y señales verticales intermitentes sobre la visibilidad y la seguridad de los cruces peatonales sin semáforos.*
- Wood, J., Tyrrell, R., & Carberry, T. (2005). *Limitaciones en la capacidad de los conductores para reconocer a los peatones durante la noche. Factores humanos: Revista de la Sociedad de factores humanos y ergonomía.*