UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AERONÁUTICOS

METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE
MEDIOS E INFRAESTRUCTURAS EN EL SISTEMA AEROPORTUARIO EN
OPERACIONES INVERNALES MEDIANTE MODELOS BASADOS EN
ALGORÍTMOS GENÉTICOS

TESIS DOCTORAL

César Marín Fernández

Director de Tesis: D. V. Fernando Gómez Comendador
Director de Tesis: D^a. Rosa M^a Arnaldo Valdés

2015

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUCTURA, SISTEMAS AEROESPACIALES Y
AEROPUERTOS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AERONÁUTICOS

TÍTULO: METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA
RESPUESTA DE MEDIOS E INFRAESTRUCTURAS EN EL SISTEMA
AEROPORTUARIO EN OPERACIONES INVERNALES MEDIANTE MODELOS
BASADOS EN ALGORÍTMOS GENÉTICOS

Autor:

César Marín Fernández

Ingeniero Aeronáutico

Directores de Tesis:

Víctor Fernando Gómez Comendador

Doctor Ingeniero Aeronáutico

Departamento de Sistemas Aeroespaciales, Transporte Aéreo y
Aeropuertos

Rosa María Arnaldo Valdés

Doctor Ingeniero Aeronáutico

Departamento de Sistemas Aeroespaciales, Transporte Aéreo y
Aeropuertos

2015

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid,
el día.....de.....de 20....

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....de 20....
en la E.T.S.I. Aeronáuticos

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Resumen

En este estudio, englobado dentro del campo de la investigación operacional en aeropuertos, se considera el problema de la optimización de la secuencia de descontaminación de nieve de los tramos que componen el área de maniobras de un aeropuerto, denominado RM-AM. Este problema se enfrenta a la optimización de recursos limitados para retirar la nieve de las calles de rodadura y pistas, dejándolas en un estado aceptable para la operación de aeronaves. El campo de vuelos se divide en subconjuntos de tramos significativos para la operación y se establecen tiempos objetivo de apertura al tráfico de aeronaves.

Se desarrollan varios algoritmos matemáticos en los que se proponen distintas funciones objetivo, como son la hora de finalización del proceso, la suma de las horas de finalización de cada tramo, o el retraso entre la hora estimada y la hora de finalización. Durante este proceso, se van introduciendo restricciones operativas relativas al cumplimiento de objetivos operativos parciales aplicados a las zonas de especial interés, o relativas a la operación de los equipos de descontaminación. El problema se resuelve mediante optimización basada en programación lineal. Los resultados de las pruebas computacionales se hacen sobre cinco modelos de área de maniobras en los que va creciendo la complejidad y el tamaño. Se comparan las prestaciones de los distintos algoritmos.

Una vez definido el modelo matemático para la optimización, se propone una metodología estructurada para abordar dicho problema para cualquier área de maniobras. Se define una estrategia en la operación. Se acomete el área de maniobras por zonas, con la condición de que los subconjuntos de tramos significativos queden englobados dentro de una sola de estas zonas. El problema se resuelve mediante un proceso iterativo de optimización aplicado sucesivamente a las zonas que componen el área de maniobras durante cada iteración. Se analiza la repercusión de los resultados en los procesos DMAN, AMAN y TP, para la integración de los resultados en el cálculo de TSAT y EBIT. El método se particulariza para el caso del área de maniobras del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid Barajas.

Abstract

This study, which lies within the field of operations research in airports, considers the optimisation of the sequence for clearing snow from stretches of the manoeuvring area of an airport, known as RM-AM. This issue involves the optimisation of limited resources to remove snow from taxiways and runways thereby leaving them in an acceptable condition for operating aircraft. The airfield is divided into subsets of significant stretches for the purpose of operations and target times are established during which these are open to aircraft traffic.

The study contains several mathematical models each with different functions, such as the end time of the process, the sum of the end times of each stretch, and gap between the estimated and the real end times. During this process, we introduce different operating restrictions on partial fulfilment of the operational targets as applied to zones of special interest, or relating to the operation of the snow-clearing machines. The problem is solved by optimisation based on linear programming. Computational tests are carried out on five distinct models of the manoeuvring area, which cover increasingly complex situations and larger areas. The different algorithms are then compared to one other.

Having defined the mathematical model for the optimisation, we then set out a structured methodology to deal with any type of manoeuvring area. In other words, we define an operational strategy. The airfield is divided into subsets of significant stretches for the purpose of operations and target times are set at which these are to be open to aircraft traffic. The manoeuvring area is also divided into zones, with the condition that the subsets of significant stretches lie within just one of these zones. The problem is solved by an iterative optimisation process based on linear programming applied successively to the zones that make up the manoeuvring area during each iteration. The impact of the results on DMAN, AMAN and TP processes is analysed for their integration into the calculation of TSAT and EBIT. The method is particularized for the case of the manoeuvring area of Adolfo Suarez Madrid - Barajas Airport.

Agradecimientos

Gracias F.G.C., por su ayuda y saber hacer.

A A.M.G. me gustaría agradecer su esfuerzo por perseverar en la enseñanza de la teoría del *scheduling*.

Índice

1. ÁMBITO CIENTÍFICO	1
2. ÁMBITO GEOGRÁFICO Y DE NEGOCIO	5
3. ÁMBITO NORMATIVO, MANUALES Y PROCEDIMIENTOS RELACIONADOS	11
4. UBICACIÓN DEL PROBLEMA EN LA OPTIMIZACIÓN APLICADA A LA GESTIÓN DE TRÁFICO.....	15
5. PROBLEMA RM-AM EN OPERACIONES INVERNALES PARA ÁREA DE MANIOBRAS CONTAMINADA POR NIEVE.....	21
5.1. DISTINTAS FORMAS DE ABORDAR EL PROBLEMA RM-AM EN OPERACIONES INVERNALES	21
5.2. MODELOS 1 (M1): GESTIÓN DE RECURSOS DE DESCONTAMINACIÓN DE ÁREA DE MANIOBRAS MINIMIZANDO R_{MAX}	22
5.3. MODELOS 2 (M2): GESTIÓN DE RECURSOS DE DESCONTAMINACIÓN DE ÁREA DE MANIOBRAS MINIMIZANDO ΣR_i^k	25
5.4. MODELO 2W (M2W): GESTIÓN DE RECURSOS DE DESCONTAMINACIÓN DE ÁREA DE MANIOBRAS MINIMIZANDO $\Sigma \omega_i R_i^k$	25
5.5. MODELOS 3 Y 3W (M3 Y M3W): GESTIÓN DE RECURSOS DE DESCONTAMINACIÓN DE ÁREA DE MANIOBRAS MINIMIZANDO $\Sigma R_{MAX Z_MIX}$ Y $\Sigma \omega_z R_{MAX Z_MIX}$	26
5.6. MODELOS 4 Y 4W (M4 Y M4W): GESTIÓN DE RECURSOS DE DESCONTAMINACIÓN DE ÁREA DE MANIOBRAS MINIMIZANDO ΣL_{Z_MIX} Y $\Sigma \omega_z L_{Z_MIX}$	28
5.7. PRUEBAS COMPUTACIONALES.....	30
5.7.1. Áreas de Maniobras consideradas	31
5.7.1.1 Área de Maniobras A0	32
5.7.1.2 Área de Maniobras A1	33
5.7.1.3 Área de Maniobras A2	34
5.7.1.4 Área de Maniobras A3	35
5.7.1.5 Área de Maniobras A4	37
5.7.2. Desarrollo y programación.....	39
5.7.3. Resultados	48
5.7.3.1 Interpretación de los resultados.....	48
5.7.3.2 Presentación de resultados por Modelo Matemático.....	49
5.7.3.2.1 Modelo M1	49
5.7.3.2.1 Modelo M2.....	51
5.7.3.2.2 Modelo M3w	53
5.7.3.2.3 Modelo M4w	55
5.7.3.1 Comparativa de Modelo Matemáticos	57
5.7.3.1.1 Resultado clave R_{max}	57
5.7.3.1.1 Resultado clave ΣR_i^k	59
5.7.3.1.1 Resultado clave número de giros 180°	61
5.7.3.2 Análisis del comportamiento de los modelos frente al tamaño del Área de Maniobras.....	63
5.7.3.2.1 Modelos frente a A1	63

5.7.3.2.1	Modelos frente a A2	66
5.7.3.2.1	Modelos frente a A3	69
5.7.3.3	Análisis específico modelo M4w	73
5.7.3.3.1	Comportamiento de M4W con $\text{card}(k) = (1+0\%) \cdot \text{card}(i)$	74
5.7.3.3.1	Comportamiento de M4W con $\text{card}(k) = (1+30\%) \cdot \text{card}(i)$	76
5.7.3.3.1	Comportamiento de M4W con $\text{card}(k) = (1+40\%) \cdot \text{card}(i)$	78
5.7.3.3.2	Comportamiento de M4W con $\text{card}(k) = (1+50\%) \cdot \text{card}(i)$	80
5.7.3.4	Análisis específico del parámetro w en el modelo M4w	83
5.7.3.5	Análisis de tiempos de resolución	85
5.7.3.6	Análisis específico de comportamiento de modelos frente a Rmax	86
5.8.	DIEZ CONCLUSIONES	87
6.	METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA RM_AM	91
6.1.	PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA ABORDAR EL PROBLEMA RM_AM	91
6.2.	INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RM-AM EN LA SECUENCIA AMAN Y DMAN	99
7.	APLICACIÓN DEL MODELO A UN CASO REAL: ÁREA DE MOVIMIENTO T4S – AEROPUERTO ADOLFO SUÁREZ MADRID BARAJAS.	103
7.1.	MODELIZACIÓN DEL ÁREA DE MANIOBRAS	103
7.1.1.	Área de Maniobras completa	103
7.1.2.	Área de Maniobras por zonas	112
7.1.2.1	Zona 1	113
7.1.2.1	Zona 2	114
7.1.2.1	Zona 3	116
7.2.	PARTICULARIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN	119
7.3.	RESULTADOS	121
7.3.1.	Iteración 1	122
7.3.1.	Iteración 2	126
7.3.2.	Iteración 3	129
7.3.1.	Comparativa entre iteraciones	136
8.	ANEXOS.	141
8.1.	ANEXO I: BIBLIOGRAFÍA.	141
8.1.1.	Referencias en publicaciones indexadas	141
8.1.2.	Otras referencias	143
8.2.	ANEXO II: DATOS ÁMBITO GEOGRÁFICO Y DE NEGOCIO.	144
8.3.	ANEXO III: DATOS DE SIMULACIONES RM_AM. PRUEBAS COMPUTACIONALES	148
8.3.1.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: programación modelos para área de maniobras A3	148
8.3.1.1	Líneas de programación común para M1, M2 y M3w	148
8.3.1.2	Líneas de programación común para M4w	151
8.3.1.3	Modelo M1 para $\text{ord}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+40\%)$	154
8.3.1.1	Modelo M2 para $\text{ord}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+40\%)$	160
8.3.1.1	Modelo M3w para $\text{ord}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+40\%)$	166

8.3.1.1	Modelo M4w para ord (k) = card(i)·(1+40%).....	172
8.3.2.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: card(k)=(1+0%)·card(i).....	179
8.3.3.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: card(k)=(1+30%)·card(i).....	180
8.3.4.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: card(k)=(1+40%)·card(i).....	181
8.3.5.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: card(k)=(1+50%)·card(i).....	182
8.3.6.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: Ficheros de programación *.gms	183
8.3.7.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: Ficheros de salida de datos *.out	188
8.4.	ANEXO IV: DATOS DE SIMULACIONES RM_AM. SIMULACIÓN T4S.....	192
8.4.1.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: programación modelos para área de maniobras T4S	192
8.4.1.1	Líneas de programación común para Zona 1, Zona 2 y Zona 3	192
8.4.1.2	Modelo M4w para T4S Zona 1 para ord (k) = 25	195
8.4.1.3	Modelo M4w para T4S Zona 2 para ord (k) = 32	203
8.4.1.4	Modelo M4w para T4S Zona 3 para ord (k) = 42	211
8.4.2.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Iteración 1	219
8.4.3.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Iteración 2.....	223
8.4.4.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Iteración 3.....	227
8.4.5.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Ficheros de programación *.gms 231	
8.4.6.	Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Ficheros de salida de datos *.out232	

Índice de tablas

TABLA 1: MODELOS DEL PROBLEMA RM-AM.....	21
TABLA 2: CÓDIGO DE COLORES DE SUBCONJUNTOS DE TRAMOS SIGNIFICATIVOS REPRESENTADOS.....	30
TABLA 3: PRUEBAS PARA M1	39
TABLA 4: PRUEBAS PARA M2	39
TABLA 5: PRUEBAS PARA M3W	40
TABLA 6: PRUEBAS PARA M4W	40
TABLA 7: RESULTADOS RMAX, SUMRIK Y NÚMERO DE GIROS 180º PARA M1	49
TABLA 8: RESULTADOS RMAX, SUMRIK Y NÚMERO DE GIROS 180º PARA M2	51
TABLA 9: RESULTADOS RMAX, SUMRIK Y NÚMERO DE GIROS 180º PARA M3W	53
TABLA 10: RESULTADOS RMAX, SUMRIK Y NÚMERO DE GIROS 180º PARA M4W	55
TABLA 11: RESULTADOS Ax VS x% PARA RMAX	57
TABLA 12: RESULTADOS Ax VS x% PARA SUMRIK.....	59
TABLA 13: RESULTADOS Ax VS x% PARA #180º	61
TABLA 14: RESULTADOS Mx VS x% PARA A1 (A)	63
TABLA 15: RESULTADOS Mx VS x% PARA A1 (B).....	65
TABLA 16: RESULTADOS Mx VS x% PARA A2 (A)	66
TABLA 17: RESULTADOS Mx VS x% PARA A2 (B).....	68
TABLA 18: RESULTADOS Mx VS x% PARA A3 (A)	69
TABLA 19: RESULTADOS Mx VS x% PARA A3 (B).....	71
TABLA 20: : CÓDIGO DE COLORES DE SUBCONJUNTO DE TRAMOS SIGNIFICATIVOS REPRESENTADOS	73
TABLA 21: RESULTADOS Ax PARA M4W Y x=0%	74
TABLA 22: RESULTADOS Ax PARA M4W Y x=30%	76
TABLA 23: RESULTADOS Ax PARA M4W Y x=40%	78
TABLA 24: RESULTADOS Ax PARA M4W Y x=50%	80
TABLA 25: VECTORES W CONSIDERADOS.....	83
TABLA 26: RESULTADOS CON M4W PARA A3, x=30% Y DISTINTOS VALORES DE W	83
TABLA 27: MEDIA Y VARIANZA CON M4W PARA A3, x=30% Y DISTINTOS VALORES DE W	85
TABLA 28: TIEMPOS DE RESOLUCIÓN CON M4W PARA Ax, x=50%	85
TABLA 29: TIEMPOS DE RESOLUCIÓN CON M4W PARA A3 EN FUNCIÓN DE x%.....	86
TABLA 30: RESULTADOS EN RMAX CON M1, M3W Y M4W PARA A3 Y x%=30%.....	87
TABLA 31: TIEMPOS DE RESOLUCIÓN CON M4W PARA A3 EN FUNCIÓN DE x% (RESUMEN)	87
TABLA 32: TABLA RESUMEN DE LAS CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS COMPUTACIONALES DE LOS MODELO M1, M2, M3W Y M4W DEL PROBLEMA RM_AM	89
TABLA 33: CÓDIGO DE COLORES PARA LOS SUBCONJUNTOS DE TRAMOS SIGNIFICATIVOS REPRESENTADOS	104
TABLA 34: VALORES EN It1 DE RMAX, R Y L PARA LOS SUBCONJUNTOS DE TRAMOS SIGNIFICATIVOS	122
TABLA 35: VALORES EN It2 DE RMAX, R Y L PARA LOS SUBCONJUNTOS DE TRAMOS SIGNIFICATIVOS	126
TABLA 36: VALORES EN It3 DE RMAX, R Y L PARA LOS SUBCONJUNTOS DE TRAMOS SIGNIFICATIVOS	129
TABLA 37: VALORES R EN ITX PARA LOS SUBCONJUNTOS DE TRAMOS SIGNIFICATIVOS	136
TABLA 38: VALORES R EN ITX PARA LOS SUBCONJUNTOS DE TRAMOS SIGNIFICATIVOS	136
TABLA 39: VALORES L EN ITX PARA LOS SUBCONJUNTOS DE TRAMOS SIGNIFICATIVOS	136
TABLA 40: MEDIA Y VARIANZA DE L EN CADA ITERACIÓN	138
TABLA 41: SECUENCIA DE DESCONTAMINACIÓN PARA CADA ZONA EN CADA ITERACIÓN	139
TABLA 42: COMPARATIVA DE SECUENCIAS POR CADA ITERACIÓN EN CADA ZONA	140
TABLA 43: DATOS WP1 DE AEROPUERTOS EN EL TOP21 POR NÚMERO DE PASAJEROS, MÁS ALGUNOS AEROPUERTOS SIGNIFICATIVOS (1)	144
TABLA 44: DATOS WP1 DE AEROPUERTOS EN EL TOP21 POR NÚMERO DE PASAJEROS, MÁS ALGUNOS AEROPUERTOS SIGNIFICATIVOS (2)	145
TABLA 45: DATOS WP2 DE AEROPUERTOS EN EL TOP21 POR NÚMERO DE PASAJEROS, MÁS ALGUNOS AEROPUERTOS SIGNIFICATIVOS (1)	146
TABLA 46: DATOS WP2 DE AEROPUERTOS EN EL TOP21 POR NÚMERO DE PASAJEROS, MÁS ALGUNOS AEROPUERTOS SIGNIFICATIVOS (2)	147
TABLA 47: SIMULACIONES RM_AM: $CARD(k)=(1+0\%)\cdot CARD(i)$	179
TABLA 48: SIMULACIONES RM_AM: $CARD(k)=(1+30\%)\cdot CARD(i)$	180
TABLA 49: SIMULACIONES RM_AM: $CARD(k)=(1+40\%)\cdot CARD(i)$	181

TABLA 50: SIMULACIONES RM_AM: $CARD(k)=(1+50\%)\bullet CARD(i)$	182
TABLA 51: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 1.....	219
TABLA 54: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 1 ZONA 1, R_i^k VS I, REPETICIONES Y #180º	220
TABLA 55: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 1 ZONA 2, R_i^k VS I, REPETICIONES Y #180º	221
TABLA 56: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 1 ZONA 3, R_i^k VS I, REPETICIONES Y #180º	222
TABLA 52: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 2	223
TABLA 54: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 2 ZONA 1, R_i^k VS I, REPETICIONES Y #180º	224
TABLA 55: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 2 ZONA 2, R_i^k VS I, REPETICIONES Y #180º	225
TABLA 56: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 2 ZONA 3, R_i^k VS I, REPETICIONES Y #180º	226
TABLA 53: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 3	227
TABLA 54: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 3 ZONA 1, R_i^k VS I, REPETICIONES Y #180º	228
TABLA 55: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 3 ZONA 2, R_i^k VS I, REPETICIONES Y #180º	229
TABLA 56: SIMULACIONES RM_AM: T4S ITERACIÓN 3 ZONA 3, R_i^k VS I, REPETICIONES Y #180º	230

Índice de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: MAPA DEL REPARTO DE TRÁFICO DE PASAJEROS EN TOP21 AEROPUERTOS EUROPEOS (EN VERDE), MÁS ALGUNOS AEROPUERTOS SIGNIFICATIVOS (EN ROJO).....	6
ILUSTRACIÓN 2: MAPA QUE MUESTRA EL TRÁFICO DE PASAJEROS ANUAL AFECTADOS POR OPERACIONES INVERNALES (EN MPAX) Y PERIODO DE DURACIÓN AL AÑO (EN MESES).....	7
ILUSTRACIÓN 3: MAPA QUE MUESTRA EL TRÁFICO DE PASAJEROS ANUAL AFECTADOS POR OPERACIÓN BAJO CONDICIONES DE ÁREA DE MOVIMIENTO CONTAMINADA POR NIEVE (EN MPAX) Y ESPESOR MEDIO ANUAL DE CAPA DE NIEVE (EN CM).....	8
ILUSTRACIÓN 4: MAPA DE LAS ZONAS CON EL MISMO PORCENTAJE DE TRÁFICO DE PASAJEROS ANUAL AFECTADOS POR OPERACIONES CON ÁREA DE MOVIMIENTO CONTAMINADA POR NIEVE	9
ILUSTRACIÓN 5: GRÁFICO CON LOS SUBMODELOS DEL MODELO AEROPUERTO	15
ILUSTRACIÓN 6: DETALLE DE SUBMODELOS DEL MODELO AEROPUERTO.....	16
ILUSTRACIÓN 7: DETALLES DE MODELOS RM-AM Y RM-PLT	19
ILUSTRACIÓN 8: ÁREAS DE MANIOBRAS CONSIDERADAS EN LAS PRUEBAS COMPUTACIONALES DEL PROBLEMA RM-AM	31
ILUSTRACIÓN 9: PARA $Z=R_{MAX}$, R_{MAX} FRENTE A $x\%$	50
ILUSTRACIÓN 10: PARA $Z=R_{MAX}$, $SUMRIK$ FRENTE A $x\%$	50
ILUSTRACIÓN 11: PARA $Z=R_{MAX}$, $\#180^\circ$ FRENTE A $x\%$	50
ILUSTRACIÓN 12: PARA $Z=SUMRIK$, R_{MAX} FRENTE A $x\%$	52
ILUSTRACIÓN 13: PARA $Z=SUMRIK$, $SUMRIK$ FRENTE A $x\%$	52
ILUSTRACIÓN 14: PARA $Z=SUMRIK$, $\#180^\circ$ FRENTE A $x\%$	52
ILUSTRACIÓN 15: PARA $Z=R_{MAX_MIX}$, R_{MAX} FRENTE A $x\%$	54
ILUSTRACIÓN 16: PARA $Z=R_{MAX_MIX}$, $SUMRIK$ FRENTE A $x\%$	54
ILUSTRACIÓN 17: PARA $Z=R_{MAX_MIX}$, $\#180^\circ$ FRENTE A $x\%$	54
ILUSTRACIÓN 18: PARA $Z=L_{MIX}$, R_{MAX} FRENTE A $x\%$	56
ILUSTRACIÓN 19: PARA $Z=L_{MIX}$, $SUMRIK$ FRENTE A $x\%$	56
ILUSTRACIÓN 20: PARA $Z=L_{MIX}$, $\#180^\circ$ FRENTE A $x\%$	56
ILUSTRACIÓN 21: RESULTADOS Ax VS $x\%$ PARA R_{MAX}	58
ILUSTRACIÓN 22: RESULTADOS Ax VS $x\%$ PARA $SUMRIK$	60
ILUSTRACIÓN 23: RESULTADOS Ax VS $x\%$ PARA $\#180^\circ$	62
ILUSTRACIÓN 24: COMPORTAMIENTO DE LOS MODELOS FRENTE A $x\%$ PARA $A1$ (A)	64
ILUSTRACIÓN 25: COMPORTAMIENTO DE LOS MODELOS FRENTE A $x\%$ PARA $A1$ (B)	66
ILUSTRACIÓN 26: COMPORTAMIENTO DE LOS MODELOS FRENTE A $x\%$ PARA $A2$ (A)	67
ILUSTRACIÓN 27: COMPORTAMIENTO DE LOS MODELOS FRENTE A $x\%$ PARA $A2$ (B)	69
ILUSTRACIÓN 28: COMPORTAMIENTO DE LOS MODELOS FRENTE A $x\%$ PARA $A3$ (A)	70
ILUSTRACIÓN 29: COMPORTAMIENTO DE LOS MODELOS FRENTE A $x\%$ PARA $A3$ (B)	72
ILUSTRACIÓN 30: ÁREAS DE MANIOBRAS CONSIDERADAS EN LAS PRUEBAS COMPUTACIONALES DEL PROBLEMA RM-AM	74
ILUSTRACIÓN 31: RESULTADOS EN ÁREA DE MANIOBRAS Ax PARA $M4W$ Y $x=0\%$	75
ILUSTRACIÓN 32: RESULTADOS EN ÁREA DE MANIOBRAS Ax PARA $M4W$ Y $x=30\%$	77
ILUSTRACIÓN 33: RESULTADOS EN ÁREA DE MANIOBRAS Ax PARA $M4W$ Y $x=40\%$	79
ILUSTRACIÓN 34: RESULTADOS EN ÁREA DE MANIOBRAS Ax PARA $M4W$ Y $x=50\%$	82
ILUSTRACIÓN 35: ANÁLISIS DE COMBINACIÓN DE PESOS: R_{MAX} TOTAL Y POR SUBCONJUNTO	84
ILUSTRACIÓN 36: ANÁLISIS DE COMBINACIÓN DE PESOS: IDLE L TOTAL Y POR SUBCONJUNTO	84
ILUSTRACIÓN 37: TIEMPO DE RESOLUCIÓN FRENTE A $CARD(i)$ PARA $x=50\%$	85
ILUSTRACIÓN 38: TIEMPO DE RESOLUCIÓN FRENTE A $CARD(k)$ PARA $A3$ ($CARD(i)=46$).....	86
ILUSTRACIÓN 39: PROCESO PARA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN PROPUESTA PARA EL PROBLEMA RM-AM DENTRO DE LA TEORÍA DE SCHEDULING	97
ILUSTRACIÓN 40: PLANTEAMIENTO DE LOS PROBLEMAS RM-AM Y RM-PLT	99
ILUSTRACIÓN 41: INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RM-AM Y RM-PLT EN LA DEFINICIÓN DE TIEMPOS PARA INTEGRAR EN LA SECUENCIA $DMAN$	101
ILUSTRACIÓN 42: INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RM-AM Y RM-PLT EN LA DEFINICIÓN DE TIEMPOS PARA INTEGRAR EN LA SECUENCIA $AMAN$	102
ILUSTRACIÓN 43: CONFIGURACIÓN DEL ÁREA DE MANIOBRAS $T4S$ EMPLEADA PARA LAS PRUEBAS COMPUTACIONALES	105
ILUSTRACIÓN 44: CONFIGURACIÓN DEL ÁREA DE MANIOBRAS $T4S$ EMPLEADA PARA LAS PRUEBAS COMPUTACIONALES POR ZONAS	112

ILUSTRACIÓN 45: PROCESO DE LA METODOLOGÍA DE RESOLUCIÓN PARTICULARIZADA PARA EL ÁREA DE MANIOBRAS DE T4S	120
ILUSTRACIÓN 46: GESTIÓN DE TIEMPOS DE DESCONTAMINACIÓN T4S EN ITERACIÓN 1	122
ILUSTRACIÓN 47: GESTIÓN DE TIEMPOS DE DESCONTAMINACIÓN T4S EN ITERACIÓN 2	126
ILUSTRACIÓN 48: GESTIÓN DE TIEMPOS DE DESCONTAMINACIÓN T4S EN ITERACIÓN 3	129
ILUSTRACIÓN 49: TIEMPOS DE DESCONTAMINACIÓN T4S EN ITERACIÓN 3. RESULTADOS FINALES EN ZONA 1	133
ILUSTRACIÓN 50: TIEMPOS DE DESCONTAMINACIÓN T4S EN ITERACIÓN 3. RESULTADOS FINALES EN ZONA 2	134
ILUSTRACIÓN 51: TIEMPOS DE DESCONTAMINACIÓN T4S EN ITERACIÓN 3. RESULTADOS FINALES EN ZONA 3	135
ILUSTRACIÓN 49: COMPARATIVAS DE ITERACIONES POR OBJETIVOS R, RMAX Y L	137
ILUSTRACIÓN 50: COMPARATIVA DE ITERACIONES. MEDIA Y VARIANZA DEL VALOR L	138

Acrónimos y simbología

Accdice: subíndice de r , R y otros parámetros que particulariza J_x y es relativo el subconjunto de tramos que componen el acceso desde la salida de plataforma a las plataformas de deshielo

AECT: Actual end decontamination time. Hora real de finalización del Plan Invernal.

AMAN: Arrival management. Secuenciación de los vuelos de llegada.

Apron: subíndice de r , R y otros parámetros que particulariza J_x y es relativo el subconjunto de tramos que componen plataforma.

Arr: subíndice de r , R y otros parámetros que particulariza J_x y es relativo el subconjunto de tramos que componen llegadas, incluida la pista de aterrizajes y las calles de salida rápida y rodadura hasta la entrada a plataforma.

ASCT: Actual start decontamination time. Hora real de inicio del Plan de Invernal.

Ax: áreas de maniobras utilizadas para las pruebas computacionales. Se proponen las siguientes: A0, A1, A2, A3 y A4.

B: Parámetro que adimensionaliza la función objetivo del modelo matemático M3w.

B_{estacionamiento}: Hora resultado de finalización de la descontaminación de nieve de un estacionamiento en el problema RM-PLT. Puede aparecer también como B_i^k para referirse al mismo parámetro cuando se trata del estacionamiento i que ha sido descontaminado por el equipo k .

B_l: Parámetro que adimensionaliza la función objetivo del modelo matemático M4w.

B₀: hora de inicio de la descontaminación de plataforma en el problema RM-PLT.

Card(i): Tamaño del área de maniobras.

Card(k): Número de saltos del convoy de descontaminación.

Dep: subíndice de r , R y otros parámetros que particulariza J_x y es relativo el subconjunto de tramos que componen salidas, incluida la pista de despegues y las calles de acceso a cabeceara desde la plataforma de deshielo.

DMAN: Departure management. Secuenciación de los vuelos de salida.

EIZT: Estimated in de-ice apron time. Hora estimada de entrada en plataforma de deshielo.

EDIT: Estimated duration de-ice time. Tiempo estimado de deshielo, incluyendo tiempo de espera hasta inicio del proceso

EECT: Estimated end decontamination time. Hora estimada de finalización del Plan Invernal.

EECT_{PLT}: EECT para RM-PLT. Hora estimada de finalización del Plan de Invernal en los estacionamientos de la plataforma.

EECT_{AM}: EECT para RM-AM. Hora estimada de finalización del Plan de Invernal en el área de maniobras.

EEZT: Estimated end de-ice time. Hora de finalización de deshielo negociada con la base.

EIBT: Estimated in blocks time. Hora estimada de colocación de calzos.

ELDT: Estimated landing time. Hora estimada de aterrizaje.

EOBT: Estimated off blocks time. Hora estimada de retirada de calzos.

ESCT: Estimated start decontamination time. Hora estimada de inicio del Plan de Invernal.

ESCT_{PLT}: ESCT para RM-PLT. Hora estimada de inicio del Plan de Invernal en los estacionamientos de la plataforma.

ESCT_{AM}: ESCT para RM-AM. Hora estimada de inicio del Plan de Invernal en el área de maniobras.

EXIT: Estimated taxi in time. Tiempo estimado de rodadura en llegada desde la pista de aterrizaje hasta el estacionamiento.

EXOT_b: Estimated taxi time-out to De-ice area. Tiempo estimado de rodadura de salida a la plataforma de deshielo

EXOT_{bc}: Estimated taxi time-out from De-ice area to departure runway. Tiempo estimado de rodadura de salida desde la plataforma de deshielo hasta la pista de salidas

GA: Gate Assignment. Optimización del proceso de asignación de estacionamientos.

J_{PLT}: Subconjunto de tramos de la plataforma de estacionamiento de aeronaves, compuesto por las inners de dicha plataforma.

J_{PLT-ZDe-icek}: Subconjunto de tramos que dan acceso a la plataforma de deshielo k desde la salida de la plataforma de estacionamiento.

J_{RWY-Ai}: Subconjunto de tramos que componen la pista de aterrizaje i y las calles de salida rápida, hasta acceder a la plataforma.

J_{RWY-Di}: Subconjunto de tramos que componen la pista de despegues i y las calles de acceso a cabecera, desde las plataformas de deshielo correspondientes.

J_z: Subconjunto de tramos del área de maniobras que son significativos desde el punto de vista de las operaciones invernales.

J_{ZDe-icek}: Subconjunto de tramos de la zona de deshielo k.

l_i: longitud del tramo i.

l_{total}: retraso en área de maniobras, definido como $l_{total} = R_{max} - r_{total}$.

l_z: retraso en el subconjunto de tramos significativos z del área de maniobras, definido como $l_z = R_{max\ z} - r_z$.

Mx: Modelos matemáticos para resolver el problema RM-AM. Se proponen los siguientes: M1, M2, M3, M3w, M4 y M4w.

p_i : tiempo de descontaminación del tramo i

p_i^k : tiempo de descontaminación del tramo i en la posición k .

R_i^k : hora en que el tramo i está listo.

RM-AM: Resources Management en Área de Maniobras. Secuenciación de descontaminación de nieve de tramos del área de maniobras.

$R_{\max}$: hora máxima de finalización del proceso de descontaminación del área de maniobras.

$R_{\max z}$: hora de listo del subconjunto z para cada conjunto de tramos significativos que integran dicho subconjunto.

RM-PLT: Resources Management en Plataforma de Estacionamientos. Secuenciación de descontaminación de nieve de estacionamientos.

r_{PLT} : hora estimada en que la plataforma queda operativa para el movimiento de aeronaves.

R_{PLT} : hora en que la plataforma queda operativa para el movimiento de aeronaves.

$r_{\text{PLT-ZDe-icek}}$: hora estimada en que el acceso de aeronaves desde la salida de la plataforma a la zona de deshielo k queda operativa.

$R_{\text{PLT-ZDe-icek}}$: hora en que el acceso de aeronaves desde la salida de la plataforma a la zona de deshielo k queda operativa.

$r_{\text{RWY-Ai}}$: hora estimada en que la pista de aterrizaje i queda operativa para las aeronaves.

$R_{\text{RWY-Ai}}$: hora en que la pista de aterrizaje i queda operativa para las aeronaves.

$r_{\text{RWY-Di}}$: hora estimada en que la pista de despegues i queda operativa para las aeronaves.

$R_{\text{RWY-Di}}$: hora en que la pista de despegues i queda operativa para las aeronaves.

r_{total} : hora estimada en la que se queda descontaminado el área de maniobras.

r_z : hora estimada de listo del subconjunto de tramos significativos z del área de maniobras.

$r_{\text{ZDe-icek}}$: hora estimada en que la zona de deshielo k queda operativa para las aeronaves.

$R_{\text{ZDe-icek}}$: hora en que la zona de deshielo k queda operativa para las aeronaves.

s_i^k : hora a la que se empieza a descontaminar el tramo i .

$\text{Sum}R_i^k$: Sumatorio desde $k=1$ hasta m de los valores R_i^k . También se denomina este parámetro ΣR_i^k ó $\text{Sum}R_j$.

TLDT: Target landing time. Hora objetivo de aterrizaje

TMA: Terminal Management Area.

TOBT: Target off blocks time. Hora objetivo de colocación de calzos.

Total: subíndice de r , R y otros parámetros y es relativo al objetivo total, referente a todo el área de maniobras.

TP: Taxi Planner. Secuenciación en cruces del área de maniobras.

$t_{\text{resolucion}}$: tiempo de resolución en CPLEX.

TSAT: Target start-up approval time. Hora objetivo de puesta en marcha.

TTOT: Target take off time. Hora objetivo de despegue

T4S: Parte del área de maniobras del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas en torno al terminal satélite T4S.

v : velocidad del convoy de descontaminación.

w : vector de pesos que multiplica a cada uno de los sumandos de las funciones objetivo de los modelos M3w y M4w.

x_{ij}^k : variable de decisión, donde $x_{ij}^k=1$ si el tramo i precede directamente a j en la posición k -ésima, $x_{ij}^k=0$ en otro caso.

$x\%$: incremento del $\text{card}(k)$ frente al $\text{card}(i)$, según expresión $\text{card}(k)=\text{card}(i)\cdot(1+x\%)$.

z : Función objetivo que optimizan los modelos matemáticos que se proponen en este estudio.

Zn_z : Subconjunto de tramos del área de maniobras que integran la zona z .

Z_0 : hora a partir de la cual se inicia el proceso de descontaminación del área de maniobras.

δ_{ij} : función directriz con valor 1 si tramo j puede ser descontaminado después de i , 0 en el resto (tiene en cuenta la compatibilidad entre un tramo y otro, atendiendo a la continuidad del trazado).

#180°: (ó U-turns) número de giros de 180° que efectúa el convoy de descontaminación en la secuencia óptima de tramos resultado de un modelo matemático sobre un área de maniobras.

1. Ámbito científico

En el año 2030, más de treinta aeropuertos europeos presentarán problemas de capacidad en sus infraestructuras, sin posibilidades de grandes ampliaciones debido a la falta de espacio. Este escenario nos conduce a la búsqueda de la eficacia en los procesos en la gestión aeroportuaria para adaptar la capacidad a la demanda (22).

La búsqueda de la eficiencia en los aeropuertos va encaminada a la mejora en la gestión de los mismos, debiendo encontrar modelos y patrones de actuación que automaticen la forma de enfrentarse a los problemas que se presentan y garanticen el éxito.

La 'capacidad declarada' de un aeropuerto es calculada teniendo en cuenta la infraestructura aeroportuaria, la disponibilidad de recursos, y en ocasiones incluso consideraciones político-ambientales.

En el análisis del binomio capacidad-demanda en el ámbito de un aeropuerto, se puede producir un desequilibrio por dos vías diferenciadas: bien por un aumento significativo de la demanda, con capacidad constante; o bien por un decremento de la capacidad, con demanda constante.

Primer caso: aumento significativo de la demanda

Para un determinado proceso aeroportuario, la demanda supera a la capacidad, produciéndose una saturación paulatina en uno o varios puntos del proceso, denominados puntos negros o cuellos de botella. Por lo general esta saturación va aumentando hasta que el proceso colapsa debido a la falta de capacidad en elementos concretos. El origen de este tipo de problemas suele estar en un aumento progresivo de la demanda, en mayor o menor espacio de tiempo, sin que el aeropuerto haya adaptado las infraestructuras, procesos y/o recursos a la nueva situación. La solución para mejorar la capacidad debe ser una acción focalizada en estos cuellos de botella y orientada bien a la mejora de las infraestructuras, bien a la mejora de la gestión.

Fundamentalmente para la mejora de la gestión, la logística computacional se aplica a la planificación y ejecución de la logística de tareas utilizando cálculos y soporte para la toma de decisiones. Se desarrollan sistemas y metodologías para análisis de decisión, la planificación, el avance y las operaciones de logística. Se aplica en diversas áreas, incluyendo el flujo y almacenamiento de bienes o servicios, así como gestión de la información desde su fuente hasta su destino. Típicamente, en la optimización se desarrollan modelos y algoritmos para la planificación de complejas tareas de logística, por ejemplo, buscando la eficiencia en el transporte de pasajeros, movimiento de aeronaves o mercancías.

Son muchos los esfuerzos que se han hecho para optimizar la capacidad de los aeropuertos en este sentido, aplicado a la gestión de asignación de puestos de estacionamiento (4; 6; 7; 8; 30), recorrido óptimo de rodadura en campo de vuelos (3; 14; 29), gestión de colas en pista de despegues (1; 2; 5; 10) y de aterrizaje (10; 15).

Estos modelos y algoritmos se implementan con información avanzada y tecnología de la comunicación (TI) para obtener resultados satisfactorios en el tiempo real, incluso para casos de problemas a gran escala y proporcionando interactividad, visualización, etc., para una mejor comprensión, presentación del problema, y apoyo a las decisiones.

Se proponen herramientas de gestión cada vez más globales y más automatizadas, que recompilan datos de distintas fuentes, teniendo en cuenta variables como capacidad de las infraestructuras, seguridad operacional, consumos de combustible o ruido (9; 11; 18; 19).

Segundo caso: degradación significativa de la capacidad

Pero hay que analizar también una segunda situación en la que se produzca una degradación de la capacidad del aeropuerto en un espacio corto de tiempo, por la aparición de causas adversas. En este caso la demanda se mantiene constante, y es sin embargo la capacidad la que se ve reducida de manera significativa. El Aeropuerto debe enfrentarse a una contingencia, a una situación especial, que lo hace vulnerable ante la demanda a gestionar. El origen está en la degradación de las características de algún elemento de la infraestructura del aeropuerto, que hace que uno o varios procesos no tengan capacidad de respuesta. Por lo general esta situación arrastra al colapso a procesos adyacentes debido al problema inicial. La solución a estos tipos de problemas viene por establecer planes de contingencia que deben ponerse en práctica cuando se tienen indicios de que la capacidad está deteriorándose o va a hacerlo en breve. La demanda en estos casos se ve afectada, en mayor o menor medida, por la eficacia de los planes de contingencia.

El problema es que los métodos descritos en el primer caso no son eficaces ni consistentes, ya sea porque no han tenido en cuenta variables que sacan al aeropuerto de su capacidad habitual, como por ejemplo las variables meteorológicas, o bien porque se aplican sin coordinación con otros aeropuertos afectados (25).

Las operaciones invernales con campo de vuelos contaminado por nieve están dentro del segundo grupo. Los procedimientos de actuación que se establecen en estas condiciones tienen como objetivo la limpieza del campo de vuelos para garantizar la operación segura del tráfico rodado. Existe la necesidad de desarrollar herramientas para la operación invernal y procedimientos para la estimación del coeficiente de fricción en los pavimentos en operaciones invernales con pista contaminada (26).

Bajo el liderazgo de aquellos países donde las operaciones invernales son más extremas y habituales, se han hecho grandes esfuerzos para el desarrollo de estudios enfocados a mejorar la predicción del coeficiente de rozamiento (27; 28; 31; 32). De igual forma, también se está investigando en la mejora de la configuración del sistema de frenado de aeronaves (12; 21; 24).

Los gestores aeroportuarios deben dimensionar adecuadamente los medios necesarios para la descontaminación y limpieza de pistas, calles de rodadura y plataforma hasta un nivel que permita la operación de forma segura, así como proporcionar las instalaciones de deshielo de aeronaves para evitar y prevenir la aparición de hielo en los planos de las aeronaves. Las compañías handling que proporcionan estos servicios durante la operación invernal, deben estar dimensionados y entrenados para afrontar el plan de contingencia.

Se ha analizado la optimización de tareas de equipos handling en un aeropuerto (16; 17). Ha sido analizado también otro servicio proporcionado por las compañías handling, el problema de la optimización de la secuencia de deshielo de las aeronaves (13). Ambos se dan de forma simultánea durante las operaciones invernales con campo de vuelos contaminado por nieve.

El proceso de descontaminación de nieve del área de maniobras se divide por un lado en la descontaminación de pistas y calles de rodadura, y por otro, plataforma y estacionamientos. Para el primer caso se establecen una o varias rutas simultáneas en las que se sigue una secuencia de actuación muy rigurosa y repetitiva. Su objetivo es descontaminar de nieve las superficies del aeropuerto por la que pueda haber tráfico rodado, asegurando un coeficiente de rozamiento adecuado para la operación. Se emplean equipos potentes y con gran rendimiento.

En el caso de la plataforma, la estrategia es completamente distinta. No existe una secuencia fija, sino que la actuación de limpieza debe adaptarse a programación de operaciones vigente. Los estacionamientos deben ser descontaminados de nieve, para permitir la operación de la aeronave y los equipos de tierra que le tiene que dar servicio. Los equipos están condicionados a poder realizar las tareas de descontaminación hasta llegar a la base del tren de aterrizaje de las aeronaves estacionadas en rampa.

Existe la necesidad de desarrollar herramientas para la operación que ayuden en la optimización del uso de los medios e infraestructuras del Aeropuerto en Operaciones Invernales. (23).

Los medios para limpieza de nieve son escasos, y es necesaria la optimización de su puesta en servicio, tanto a nivel de limpieza del campo de vuelos, como a nivel de instalaciones para el deshielo de las aeronaves.

La situación a la que se enfrenta el Aeropuerto con una gran nevada es una situación de contingencia para la que debe estar preparado, mediante el adecuado dimensionamiento de los medios físicos y recursos humanos, con la formación y entrenamiento adecuados. Cuando ocurre este fenómeno, el escenario con el que se encuentra el gestor aeroportuario es área de maniobras cerrada al tráfico de aeronaves. El Plan Invernal es el plan de contingencia con el que se pretende revertir la situación mediante la descontaminación de nieve de pistas, calles de rodadura, plataforma y estacionamientos. Proponer una metodología para obtener la secuencia óptima en la descontaminación de pistas y calles de rodadura, incluidos las de plataforma, es el objetivo de esta Tesis.

No hay que olvidar la gestión del plan de actuaciones invernales antes, durante y después de que se produzca la contingencia. Se debe de disponer de las herramientas específicas adecuadas para la prevención y alerta de la situación de contingencia, para el seguimiento de las actuaciones en curso, y análisis posterior para evaluar la eficiencia del plan. La estrategia debe ser sometida a revisión temporada tras temporada, para la garantizar la mejora continuada.

En el Anexo I aparece la Bibliografía mencionada.

2. Ámbito geográfico y de negocio

A continuación se va a mostrar el ámbito geográfico europeo en el que las conclusiones de este estudio pueden ser aplicadas. Para ello se analiza el volumen de negocio afectado. El análisis se hace por número de pasajeros anuales en 2014 para los aeropuertos incluidos en el TOP21 de dicha clasificación, más veinte aeropuertos significativos más que ayudan a obtener conclusiones.

Se ha analizado el periodo de días que el aeropuerto opera bajo circunstancias de Operaciones Invernales, y los días en que la se opera bajo circunstancias de área de maniobras contaminada por nieve¹. Es importante analizar el espesor medio de nieve en estas circunstancias, lo que indica las condiciones habituales a las que los equipos de descontaminación deben enfrentarse. Pero también es muy importante en el análisis el máximo espesor de nieve que puede formarse en la mayor nevada del año. Esto da idea de la intensidad de la peor nevada a la que los equipos de descontaminación se enfrentan.

Los datos han sido publicados por www.aci-europe.es. Los mapas que a continuación se muestran son de elaboración propia. En el Anexo II se muestran las tablas en las que se basa el análisis. El TOP21 se representa en los mapas que a continuación se muestran en verde y el resto de aeropuertos significativos en rojo.

A continuación se muestra un mapa, ilustración 1, con el reparto de tráfico de pasajeros en Europa para los aeropuertos considerados.

En la ilustración 2 se muestra el periodo medio anual de meses en los que los aeropuertos operan bajo los procedimientos de Operaciones Invernales, y el volumen de tráfico de pasajeros afectados bajo estas condiciones de operación.

En el siguiente mapa, en la ilustración 3, se muestra el espesor medio anual del área de maniobras contaminada por nieve y el volumen de tráfico de pasajeros afectados bajo estas condiciones de operación.

A partir de los mapas 1 y 3, se ha creado la ilustración 4 que indica las curvas con igual porcentaje de tráfico de pasajeros afectados por operación en área de movimientos contaminada por nieve en los aeropuertos considerados.

¹ En la Operación Invernal el área de maniobras está abierta al tráfico de aeronaves. Bajo circunstancias de área de maniobras contaminada por nieve, el área de maniobras está cerrado al tráfico total o parcialmente. Es ante esta contingencia cuando se activa el Plan Invernal.

Ilustración 1: Mapa del reparto de tráfico de pasajeros en TOP21 Aeropuertos europeos (en verde), más algunos aeropuertos significativos (en rojo)

Ilustración 2: Mapa que muestra el tráfico de pasajeros anual afectados por Operaciones Invernales (en Mpax) y periodo de duración al año (en meses)

Ilustración 3: Mapa que muestra el tráfico de pasajeros anual afectado por operación bajo condiciones de área de movimiento contaminada por nieve (en Mpax) y espesor medio anual de capa de nieve (en cm)

Ilustración 4: Mapa de las zonas con el mismo porcentaje de tráfico de pasajeros anual afectados por operaciones con área de movimiento contaminada por nieve

3. **Ámbito normativo, manuales y procedimientos relacionados**

Normativa Nacional

- RD 862/2009, de 14 de mayo, por el que se aprueban las normas técnicas de diseño y operación de aeródromos de uso público y se regula la certificación de los aeropuertos de competencia del Estado.
- Real Decreto 1189/2011, de 19 de agosto, por el que se regula el procedimiento de emisión de los informes previos al planeamiento de infraestructuras aeronáuticas, establecimiento, modificación y apertura al tráfico de aeródromos autonómicos, y se modifica el Real Decreto 862/2009, de 14 de mayo, por el que se aprueban las normas técnicas de diseño y operación de aeródromos de uso público y se regula la certificación de los aeropuertos de competencia del Estado, el Decreto 584/1972, de 24 de febrero, de servidumbres aeronáuticas y el Real Decreto 2591/1998, de 4 de diciembre, sobre la ordenación de los aeropuertos de interés general y su zona de servicio, en ejecución de lo dispuesto por el artículo 166 de la Ley 13/1996, de 30 de diciembre, de Medidas Fiscales, Administrativas y del Orden Social.
- Orden FOM/2086/2011, de 8 de julio, por la que se actualizan las normas técnicas contenidas en el Anexo al Real Decreto 862/2009, de 14 de mayo, por el que se aprueban las normas técnicas de diseño y operación de aeródromos de uso público y se regula la certificación de los aeropuertos de competencia del Estado.
- Instrucción técnica para evaluar el coeficiente de rozamiento de la superficie de la pista, INSA-11-INS-07-1.1, versión 1.1

Normativa Europea

- Reglamento (UE) nº 139/2014 y en su material auxiliar (Medios Aceptables de Cumplimiento -AMC-y Material Guía -GM-).
- EASA. Runway Friction Characteristics Measurement and Aircraft Braking (RuFab) Study.

Publicaciones de OACI

- Doc 9640-AN/9490, Manual of Aircraft Ground De-Icing/Anti-Icing Operations, OACI
- Doc 9157, Manual de Diseño de Aeródromos, Parte 2, OACI
- Doc. 9137, Manual de Servicios de Aeropuerto, Parte 2, Estado de las Superficies de los Pavimentos, OACI
- Doc. 9137, Manual de Servicios de Aeropuerto, Parte 8, Servicios Operacionales del Aeropuerto, OACI
- Doc. 9137, Manual de Servicios de Aeropuerto, Parte 9, Métodos de Mantenimiento de Aeropuertos, OACI
- Doc 9376, Manual de Procedimientos de Inspección de Aeronaves, OACI
- Anexo 6, Parte I, Operación de Aeronaves, OACI
- Anexo 14, Vol. I, Diseño y Operaciones de Aeródromos

Publicaciones del Gobierno de Estados Unidos

- AC 120 60B, Ground De-icing and Anti-icing Program. FAA
- AC 150 5200 30C, Airport Winter Safety and Operations. FAA
- AC 150 5220 20, Airport Snow and Ice Control Equipment. FAA
- AC 150 5300 14B, Design of Aircraft De-icing Facilities. FAA
- AC 150 5320 12C Measurement, construction, and maintenance of skid-resistant airport pavement surfaces. FAA
- AC 91 6A, Water, Slush and Snow on the Runways. FAA
- AC 20 117, Hazards Following Ground Deicing and Ground Operations in Conditions Conducive to Aircraft Icing. FAA
- AC 120 58, Pilot Guide for Large Aircraft Ground Deicing. FAA
- FAA Winter Operations Guidance for Air Carriers and other Adverse Weather Topics.
- FAA Aircraft Ground Deicing and Anti-icing Program. Interim Final Rule and Notice. 14 CRF Part 121. September 1992
- The annual Flight Standards Information Bulletin (FSAT) on ground de-icing.

Publicaciones de Society of Automotive Engineers (SAE)

- Aerospace Materials Specification (AMS) 1424, Deicing/Anti-Icing, Fluid, Aircraft, SAE Type I.
- Aerospace Materials Specification (AMS) 1428, Deicing/Anti-Icing, Fluid, Aircraft, Non-Newtonian, Pseudo-Plastic, SAE Type II, III & IV.
- Aerospace Recommended Practice (ARP) 4737, Aircraft Deicing/Anti-Icing Methods.
- Aerospace Recommended Practice (ARP) 5149, Training Program Guidelines for Deicing/Anti-icing of Aircraft on Ground.

Publicaciones de International Standards Organization (ISO)

- ISO 11075, Aerospace-Aircraft Deicing/Anti-Icing Newtonian Fluids ISO Type I.
- ISO 11076, Aerospace-Aircraft Deicing/Anti-Icing Methods with Fluids.
- ISO 11078, Aerospace-Aircraft Deicing/Anti-Icing Non-Newtonian Fluids ISO

Publicaciones de Association of European Airlines (AEA)

- AEA Recommendations for Deicing/Anti-icing of Aircraft on the Ground. This publication can be found on the following Web site: <http://www.aea.be>. Select “publications” then click on “deicing/anti-icing”.

Otros

- AENA Plan de Actuación Frente a Hielo y Nieve. Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid Barajas

- AENA PO – 20 “Medida del estado superficial de las pistas”
- AENA EXA – 33 “Instrucción Operativa sobre la Evaluación de las Condiciones de Rozamiento de las Pistas”
- CAA. CAP 168. Licensing of Aerodromes.
- CAA. CAP 683. The Assessment of Runway Surface Friction Characteristics.
- AINB Report de Noruega.
- PIARC. Experimento Internacional PIARC de Comparación y Armonización de las Medidas de Textura y Resistencia al Deslizamiento.
- AENOR. Norma UNE EN ISO 13473 1:2006. Caracterización de la textura de los pavimentos mediante el uso de perfiles de superficie. Parte 1: Determinación de la profundidad media del perfil (ISO 13473 1:1997).
- ASTM E965 – 96 (2006). Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique.
- ASTM E1845 – 09. Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth.
- Manuel Opérationnel du Proccessus Assurer le service hivernal/CGD.

4. Ubicación del problema en la Optimización aplicada a la gestión de tráfico.

El marco en el que se desarrolla la Tesis propuesta está basado en el modelo integral presentado por Marín, A. y Marín, C. (2006) (29). El modelo integral del aeropuerto está formado por los submodelos AMAN, TP, GA y DMAN, de acuerdo a la ya vista figura siguiente:

Ilustración 5: Gráfico con los submodelos del modelo Aeropuerto

El aeropuerto se considera como una caja negra en la que existen una serie de entradas y salidas de aeronaves y pasajeros. El conjunto aeropuerto se divide en los siguientes submodelos:

- AMAN
- TP arribadas
- GA
- TP salidas
- DMAN

El modelo de aeropuerto que se plantea en el estudio citado tiene una serie de particularidades que a continuación se pasan a detallar.

- Se consideran tráficos de entrada y salida segregados, con dos pistas independientes para llegadas y otras dos para salidas.
- El flujo de aeronaves de llegada desde las calles de salida de pista hasta la plataforma se hace a través de calles de rodadura, donde sólo se considera un cruce conflictivo. De igual forma, solo se considera un cruce conflictivo en la rodadura desde plataforma hasta el punto de espera para despegue.
- La entrada a plataforma se hace por la puerta A y la salida de la misma desde las puertas B y C.

En la siguiente figura se detallan las fronteras de cada submodelo y las variables de entrada y salida de cada uno de ellos para un campo de vuelos ficticio formado por una plataforma con m estacionamientos, cuatro pistas independientes, la 1 y la 2 de aterrizajes y la 3 y la 4 de despegues, una puerta de entrada a plataforma, Gate A, dos puertas de salida de plataforma, Gates C y B, y dos cruces en calles de rodadura a gestionar, cruce 1 en la gestión de las llegadas y cruce 2 en la gestión de las salidas.

Ilustración 6: Detalle de submodelos del modelo Aeropuerto

Este modelo integral está definido, al igual que los submodelos que lo componen, para un aeropuerto con toda su capacidad disponible. Con el planteamiento del problema integral, se intenta optimizar al máximo estas infraestructuras.

Sin embargo, en condiciones de operación invernal con área de maniobras contaminada por nieve, la capacidad se ve mermada. El plan de contingencia que se activa trata de aproximar en la medida de lo posible la capacidad en estas condiciones a la capacidad óptima.

Con la aplicación del plan de contingencia, los equipos para retirar la nieve que contamina el área de maniobras comienzan su labor, separándose en dos grupos: los equipos que retiran la nieve de las pistas y calles de rodadura, es decir, el área de maniobras, denominados a partir de ahora equipos AM (RWY's/TWY's), y los equipos que retiran la nieve los estacionamientos de aeronaves, denominados a partir de ahora equipos PLT. Existen otros equipos que se encargan de despejar el paso de viales, tanto lado aire como lado tierra, y cuya labor es importantísima en las labores de contingencia, pero quedan fuera del estudio de esta Tesis.

Existen pues dos campos en los que investigar para optimizar los procesos, los equipos que descontaminan del área de maniobras y los equipos que descontaminan las plataformas de estacionamiento. El objetivo es conseguir cumplir el horario de salidas y llegadas programadas.

1. El problema de la gestión de medios para la descontaminación del área de maniobras (RM-AM)

Los equipos RWY's/TWY's tienen rutas asignadas de limpieza muy rígidas y ensayadas, para que los días en que se activa el plan, días por lo general muy complicados debido a las condiciones medioambientales, no se deje nada a la improvisación y existan tiempos estimados en que pistas y calles de rodadura van a quedar despejadas de nieve.

Surge una pregunta: ¿Cómo se establecen las rutas de descontaminación? Existe un camino óptimo para recorrer las calles y pistas, de forma que se puedan conseguir varios objetivos:

- I. El área de maniobras debe quedar descontaminada en el menor tiempo posible.
- II. Las aeronaves en el aire deben poder aterrizar lo antes posible, por tanto, que la pista de aterrizajes esté operativa (siendo el coeficiente de rozamiento el parámetro que valida la efectividad del tratamiento de descontaminación y posterior prevención).
- III. Las aeronaves que aterrizan deben dejar despejada la pista de aterrizajes, por tanto, que las aeronaves que aterricen puedan acceder a los estacionamientos.
- IV. Las aeronaves estacionadas deben poder ponerse en marcha para dirigirse a través de la plataforma a los puntos de deshielo.
- V. Las aeronaves deben poder acceder desde la salida de la plataforma a las plataformas de deshielo.
- VI. Las plataformas de deshielo deben estar operativas, y así aplicar el tratamiento que permita a las aeronaves tener los planos y superficies móviles en perfecto estado.
- VII. La pista de despegues debe estar operativa (siendo el coeficiente de rozamiento el parámetro que valida la efectividad del tratamiento de descontaminación y posterior prevención).

2. El problema de la gestión de medios para la descontaminación de los estacionamientos (RM-PLT)

En el problema RM-AM, las rutas se calculan y ensayan previamente en cada simulacro, con los equipos implicados, independientemente de la programación de vuelos que exista el día de la nevada.

Sin embargo, cuando el riesgo de nevada es inminente y se tiene la certeza de activar el Plan Invernal para área de maniobras contaminada por nieve, existe un grado de libertad al que el gestor aeroportuario debe enfrentarse. Dicho grado de libertad, que no se da en el problema RM-AM, es que la programación de salidas y llegadas de aeronaves es cambiante de una activación a otra, y la gestión de la limpieza de los estacionamientos de plataforma depende de dicha programación. Del orden y el número de estacionamientos a descontaminar depende el éxito o fracaso de todo el Plan Invernal.

Por tanto, se mantiene la estructura presentada por *Marín, A. y Marín, C. (2006) (29)* como base de partida ante una situación de contingencia como es la contaminación por nieve del campo de vuelos, contra la que se activa el Plan Invernal.

Los resultados de la puesta en marcha del Plan Invernal influirán condicionando la hora de inicio de los distintos procesos contemplados en el problema global de gestión de tráfico.

Dicho de otro modo, los resultados de los problema RM-AM y RM-PLT son los datos de entrada de los problemas AMAN, TP arrivadas, GA, TP salidas, DMAN.

- De esta forma, para el proceso **AMAN**, el dato de la hora de inicio de los aterrizajes debe depender del resultado de del proceso RM-AM en lo relativo a la descontaminación de las pistas de aterrizaje y las calles de salida rápida y rodadura hasta llegar a la plataforma de estacionamientos.
- Para el proceso **TP arrivadas**, el dato de la hora de inicio debe depender del resultado de del proceso RM-AM en lo relativo a la descontaminación de las calles de rodadura hasta llegar a la plataforma de estacionamientos desde las calles de salida rápida de la pista de aterrizajes.
- Para el proceso **GA**, el dato de la hora de inicio debe depender
 - a) Del resultado de del proceso RM-AM en lo relativo a la descontaminación de las calles de la plataforma de estacionamientos.
 - b) Del resultado del proceso RM-PLT en el que se van descontaminando estacionamientos hasta las calles de la plataforma.
- Para el proceso **TP salidas**, el dato de la hora de inicio debe depender del resultado de del proceso RM-AM en lo relativo a la descontaminación de las calles de la plataforma, de la descontaminación de las calles de rodadura hasta llegar a las plataformas de deshielo y descontaminación de dichas plataformas.
- Para el proceso **DMAN**, el dato de la hora de inicio debe depender del resultado de del proceso RM-AM en lo relativo a la descontaminación de las pistas de despegue y las calles de acceso a las cabeceras desde las plataformas de deshielo.

A continuación se esquematizan los dos procesos que se activan en el Plan Invernal para área de maniobras contaminada por nieve, el RM-AM cuya misión es descontaminar pistas y calles de rodadura hasta el acceso a los estacionamientos, y el RM-PLT cuya misión es descontaminar de nieve los estacionamientos.

Ilustración 7: Detalles de modelos RM-AM y RM-PLT

En esta Tesis se estudio en profundidad el problema RM-AM, dejando fuera de su ámbito el problema RM-PLT.

5. Problema RM-AM en Operaciones Invernales para área de maniobras contaminada por nieve.

Se va a definir el modelo matemático para abordar el problema propuesto, para a continuación hacer las pruebas computacionales que validen dicho modelo. Con las conclusiones que se obtengan se propondrá una metodología para resolver el problema de forma estructurada.

5.1. Distintas formas de abordar el Problema RM-AM en Operaciones Invernales

Se pasa a continuación a analizar el problema de gestión de recursos para la descontaminación del área de maniobras (RM-AM), constituido por una o varias pistas y las calles de rodadura. Para ello hay que gestionar los recursos para la eliminación de la nieve, dejando un coeficiente de rozamiento apto para las operaciones de aeronaves en tierra. Dichos recursos se dividen en equipos de descontaminación, a los que se les asignan una ruta. Cuando los equipos finalizan las rutas asignadas el área de maniobras está descontaminada y con un tratamiento preventivo aplicado para garantizar el correcto estado de la superficie del pavimento para su utilización por el tráfico rodado. No obstante, una vez finalizadas las rutas, la autoridad aeroportuaria debe considerar el iniciar de nuevo la descontaminación del área de maniobras en función de las condiciones meteorológicas.

Se va a acometer el problema con el enfoque de la teoría del *scheduling*, considerando una máquina, para optimizar la ruta de descontaminación pistas y calles de rodadura. La máquina está compuesta por un convoy de quitanieves, que tienen asignada una zona del área de maniobras. En función del tamaño del área de maniobras y las exigencias del gestor aeroportuario, la zona asignada a la máquina será total o parcial.

En el planteamiento del problema no se va a considerar horas objetivo para la limpieza de cada tramo en que se divide el área de maniobras, sino que se van a establecer horas objetivo de zonas clave del área de maniobras, que serán las siguientes:

1. R_{RWY-Ai} : hora en que la pista de aterrizaje i queda operativa para las aeronaves.
2. R_{RWY-Di} : hora en que la pista de despegues i queda operativa para las aeronaves.
3. $R_{ZDe-icek}$: hora en que la zona de deshielo k queda operativa para las aeronaves.
4. R_{PLT-A} : hora en que la plataforma queda operativa para la llegada de aeronaves.
5. $R_{PLT-ZDe-icek}$: hora en que la plataforma queda operativa para el acceso de aeronaves a la zona de deshielo k .

Los modelos que se van a analizar para abordar el problema RM-AM son los siguientes:

PROBLEMA RM-AM	Denominación formal	Denominación informal
$1/p_i, \delta_{ij} / R_{\max}$	(M1)	$R_{\max}$
$1/p_i, \delta_{ij} / \sum R_i$	(M2)	$\text{Sum}R_j$
$1/p_i, \delta_{ij} / \sum w_i R_i$	(M2w)	
$1/p_i, \delta_{ij} / \sum R_{\max z_{\text{mix}}}$	(M3)	
$1/p_i, \delta_{ij} / \sum w_z R_{\max z_{\text{mix}}}$	(M3w)	$R_{\max_mix}$
$1/r_i, p_i, \delta_{ij} / \sum l_{z_{\text{mix}}}$	(M4)	
$1/r_i, p_i, \delta_{ij} / \sum w_z l_{z_{\text{mix}}}$	(M4w)	l_{mix}

Tabla 1: Modelos del problema RM-AM

En el problema planteado no tiene sentido analizar el tiempo de espera entre la finalización de un tramo y el siguiente, entendido como el tiempo entre que el equipo acaba un tramo y comienza otro. A diferencia del problema RM-PLT, en que una vez finalizado un estacionamiento se le debe asignar otro para continuar con la secuencia, en RM-AM, una vez finalizado un tramo el equipo de descontaminación continúa con el siguiente automáticamente.

5.2. Modelos 1 (M1): Gestión de recursos de descontaminación de área de maniobras minimizando Rmax.

El problema que se plantea es la gestión de recursos de descontaminación en plan invernal en área de movimientos contaminada por nieve de un aeropuerto. El problema se denomina RM-AM. Se va a acometer el problema con el enfoque de la teoría del *scheduling*, considerando una máquina, para optimizar la ruta de descontaminación pistas y calles de rodadura.

Se considera como función objetivo $R_{\max}$:

$$1/p_i, \delta_{ij}/R_{\max}$$

Dado un conjunto $J=(1, 2, \dots, n)$ de N nodos que componen el área de maniobras. Cada tramo entre nodo y nodo, corresponde con un tramo del área de maniobras que debe ser descontaminado de nieve, para dar servicio a un conjunto $I=(1, 2, \dots, z)$ de Z aeronaves que deben despegar / aterrizar / estacionar en un periodo de tiempo planificado. Por tanto, la cola de descontaminación de tramos forma un conjunto $J'=(i^1, i^2, \dots, i^k, i^{k+1}, \dots, i^m)$ de m elementos. Dada la compleja geometría del área de maniobras, puede haber tramos que se repitan con el fin de que todos los tramos sean descontaminados. Por tanto, $m \geq n$. Sólo $m=n$ en el caso de geometrías muy simples del área de maniobras, como se puede intuir, y se verá más adelante.

Este modelo se basa en el propuesto por los autores L. Bianco, P. Dell’Olmo and S. Giordani, 1997 (4) para un recorrido hamiltoniano en el que se impone el inicio y el fin en el vértice 1, con el arco (v_1, v_j) en primera posición y el arco (v_i, v_1) en la posición n . También se ha tomado como referencia a Guinet 1993 (7). Se ha replanteado el algoritmo matemático para hacer frente en la simulación del preceso descrito.

Los datos son los que a continuación se detallan:

- Z_0 : hora a partir de la cual cada se inicia el proceso de descontaminación del área de maniobras.
- p_i : tiempo de descontaminación del tramo i , considerando los siguientes parámetros:
 - l_i : longitud del tramo i
 - v : velocidad del convoy de descontaminación. La tecnología está implícita en este parámetro de modelo, ya que el rendimiento adecuado de superficie descontaminada por unidad de tiempo depende de la velocidad v de avance.
 - Se ha considerado una velocidad de paso por cruce entre calles del orden de la mitad de la velocidad v a lo largo de una longitud de seguridad antes y después del cruce. Esto es debido a motivos de seguridad en la operación.

$$p_i = \frac{l_i - l_{\text{seguridad}}}{v} + \frac{l_{\text{seguridad}}}{v/2}$$

- δ_{ij} : función directriz con valor 1 si tramo j puede ser descontaminado después de i , 0 en el resto (tiene en cuenta la compatibilidad entre un tramo y otro, atendiendo a la continuidad del trazado y la sentido de recorrido)².

Las variables del modelo son:

- x_{ij}^k : variable de decisión, donde $x_{ij}^k=1$ si el tramo i precede directamente a j en la posición k -ésima, $x_{ij}^k=0$ en otro caso;
- s_i^k : hora a la que se empieza a descontaminar el tramo i en la posición k -ésima;
- R_i^k : hora en que el tramo i está listo en la posición k -ésima;
- $R_{\max}$: hora máxima de finalización del proceso de descontaminación del área de maniobras.
- p_i^k : tiempo de descontaminación del tramo i en la posición k -ésima. Nótese que hay tramos en que la descontaminación de nieve se puede hacer en una sola pasada y tramos, como las pistas, que requieren de varias pasadas y en distinta configuración de los equipos. Las ecuaciones del modelo deben ser capaces de descontaminar incluso aquellas calles de rodadura sin salida, es decir, que son fondo de saco. En esos casos el tiempo de descontaminación es más del doble, pues el tramo hay que recorrerlo en el sentido de ida, hacer un giro de 180° , y recorrerlo en el sentido de vuelta. Pero el modelo también tiene libertad para aplicar dicha maniobra en tramos que son pasantes. Es por ello, que el tiempo de descontaminación de un tramo depende del tramo y la posición k que ocupe en la cola.

El tiempo de penalización para un giro de 180° se ha modelizado mediante el cálculo del tiempo en recorrer medio arco de circunferencia de radio el radio de giro de los equipos de descontaminación, a una velocidad $v/2$.

Luego:

- Para tramos i que en la posición k son pasantes:

$$p_i^k = p_i$$

- Para tramos i que en la posición k tiene un giro de 180° :

$$p_i^k = 2p_i + \frac{\pi R_{giro}}{v/2}$$

El modelo (M1), que resuelve el problema

$$1/p_i, \delta_{ij}/R_{\max}$$

se plantea con la siguiente función objetivo:

$$z = R_{\max} \quad (1.1)$$

con las siguientes restricciones:

$$\sum_{j=1}^n \delta_{ij} \cdot x_{ij}^k - \sum_{l=1}^n x_{il}^{k-1} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad k = 2, \dots, n \quad (1.2)$$

² Nótese que si desde el tramo i se puede acceder al tramo j , $\delta_{ij}=1$. Puede suceder que desde j sí se pueda acceder al tramo i , caso en que $\delta_{ji}=1$, o que no se pueda, en cuyo caso $\delta_{ji}=0$. Por tanto, si no hay restricción sobre el sentido de recorrido, la matriz δ_{ji} es simétrica. Si hubiera restricción en el sentido de recorrido, la matriz δ_{ji} no es simétrica.

Todos los algoritmos y la metodología que se plantean en esta Tesis, llevan intrínsecos el hecho de que puedan existir restricciones en el sentido de recorrido de los tramos a través de la función directriz δ_{ij} .

$$\sum_{j=1}^n \delta_{1j} \cdot x_{1j}^1 = 1 \quad (1.3)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^k \geq 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (1.4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^k = 1 \quad k = 1, \dots, n \quad (1.5)$$

$$s_j^{k+1} + \text{BigM} \geq R_i^k + \text{BigM} \cdot x_{ij}^k \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, n \quad i \neq j \quad (1.6)$$

$$R_i^k \leq R_{\max} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (1.7)$$

$$R_i^k + \text{BigM} \geq s_i^k + p_i^k + \text{BigM} \cdot x_{ij}^k \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad i \neq j \quad (1.8)$$

$$p_i^k \geq p_i \quad i = 1, \dots, n \quad (1.9)$$

$$p_i^k + 2\text{BigM} \geq 2p_i + t_{\text{pen_giro}} + \text{BigM} \cdot (x_{li}^{k-1} + x_{lj}^k) \quad i = 1, \dots, n \quad k = 2, \dots, m \quad i \neq j \\ j, l = 1, \dots, n \quad \text{si } j = l \text{ ó } \delta_{lj} = 1 \quad (1.10)$$

$$s_1^1 \geq Z_0 \quad j = 1, \dots, n \quad (1.11)$$

$$x_{ij}^k = 0 \quad i \in \text{rwy} \quad j = 1, \dots, n \quad k = m \quad i \neq j \quad (1.12)$$

añadiendo

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k, \forall (i, j) \quad s_i^k, R_i^k, p_i^k \geq 0 \quad \forall k, \forall i \quad R_{\max}, Z_0 \geq 0$$

La restricción (1.2) asegura continuidad entre tramos. La restricción (1.3) impone que debe empezarse por el tramo 1 no existiendo restricción para el tramo de finalización. La restricción (1.4) impone que todos los tramos deben entrar en cola y además pueden hacerlo en más de una vez. La restricción (1.5) obliga a que cada posición k sea un arco exactamente. La restricción (1.6) impone la separación entre dos tramos descontaminados sucesivos. La restricción (1.7) define el máximo tiempo en que los tramos son descontaminados. La inecuación (1.8) define R_i^k como la suma de s_i^k y p_i^k , cuando i precede a j en la posición k -ésima. La inecuación (1.9) impone que el tiempo de proceso mínimo de cada tramo i en la posición k -ésima como p_i , es decir, como si el tramo fuese pasante. La inecuación (1.10) contempla el caso en que el tramo se procese en el sentido de ida y de vuelta, es decir, en aquellos casos en que el tramo j que continúa al tramo i en la posición $k+1$ -ésima sea igual al tramo l que precede al tramo i en la posición $k-1$ ésima, o que j pertenezca al conjunto de tramos que contactan con l , esto es, $\delta_{lj} = 1$. La inecuación (1.11) obliga a que la hora de inicio del primer tramo 1 sea superior a la hora de inicio del plan invernal en área de maniobras Z_0 . La inecuación (1.12) es una restricción operativa que establece que los tramos considerados pistas no deben ser los últimos en la cola de procesamiento de tramos, siendo rwy el subconjunto de tramos considerados pistas.

5.3. Modelos 2 (M2): Gestión de recursos de descontaminación de área de maniobras minimizando ΣR_i^k .

A partir del modelo anterior, se puede obtener un modelo (M2) que considere como función objetivo el sumatorio de los tiempos en que se completan los procesos ΣR_i^k en lugar de $R_{\max}$.

$$1/p_i, \delta_{ij}/\Sigma R_i^k$$

Se consideran como datos de partida de (M2) los mismos que se definieron para (M1) y como variables de (M2) las mismas que se definieron para (M1), excepto $R_{\max}$, que desaparece como variable. Se elimina la inecuación (1.7).

El modelo (M2) para resolver el problema

$$1/p_i, \delta_{ij}/\Sigma R_i^k$$

se plantea de la siguiente forma:

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m R_i^k \quad (2.1)$$

Con las restricciones (1.3), (1.4), (1.5), (1.6), (1.8), (1.9), (1.10), (1.11) y (1.12) añadiendo

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k, \forall (i, j) \quad s_i^k, R_i^k, p_i^k \geq 0 \quad \forall k, \forall i \quad Z_0 \geq 0$$

5.4. Modelo 2w (M2w): Gestión de recursos de descontaminación de área de maniobras minimizando $\Sigma \omega_i R_i^k$.

A partir del modelo anterior, se puede obtener un modelo (M2w) que considere como función objetivo el sumatorio de los tiempos en que se completan los procesos multiplicados por los coeficientes de ponderación ω_i , siendo la función objetivo $\Sigma \omega_i R_i^k$ en lugar de ΣR_i^k .

$$1/p_i, \delta_{ij}/\Sigma \omega_i R_i^k$$

De esta forma se puede priorizar dentro del modelo a la descontaminación de unos tramos frente a otros, bonificando aquellos tramos que se necesitan descontaminar con mayor urgencia.

Se consideran como datos de partida de (M2w) los mismos que se definieron para (M1) y (M2), añadiendo

- ω_i : peso del tramo i disponible, siendo un valor entre 0 y 1.

Como variables de (M2w) se consideran las mismas que se definieron para (M2).

El modelo (M2w) para resolver el problema

$$1/p_i, \delta_{ij}/\Sigma \omega_i R_i^k$$

se plantea de la siguiente forma:

$$z = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \omega_i R_i^k \quad (2.2)$$

Con las restricciones (1.3), (1.4), (1.5), (1.6), (1.8), (1.9), (1.10), (1.11) y (1.12)

añadiendo

$$\begin{aligned} x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k, \forall (i, j) \quad s_i^k, R_i^k, p_i^k \geq 0 \quad \forall k, \forall i \quad Z_0 \geq 0 \\ 0 \leq \omega_i \leq 1 \end{aligned}$$

5.5. Modelos 3 y 3w (M3 y M3w): Gestión de recursos de descontaminación de área de maniobras minimizando $\Sigma R_{\max z_mix}$ y $\Sigma \omega_z R_{\max z_mix}$

Se van a considerar horas objetivo intermedias, no sólo la $R_{\max}$ de finalización de la descontaminación de todo el área de maniobras. Estas horas objetivo intermedias se corresponden con las horas de finalización de la descontaminación de subconjunto de tramos significativos del área de maniobras.

$$1/p_i, \delta_{ij}/\Sigma R_{\max z_mix}$$

Si se introducen los coeficientes de ponderación ω_z , la función objetivo del (M3w) pasa a ser $\Sigma \omega_z R_{\max z_mix}$.

$$1/p_i, \delta_{ij}/\Sigma \omega_z R_{\max z_mix}$$

De esta forma la gestión de equipos se hace orientado a descontaminar en el menor tiempo posible cada zona significativa. Estas horas de finalización intermedias en cada zona significativa son:

1. R_{RWY-Ai} : hora en que la pista de aterrizaje i queda operativa para las aeronaves.
2. R_{RWY-Di} : hora en que la pista de despegues i queda operativa para las aeronaves.
3. $R_{ZDe-icek}$: hora en que la zona de deshielo k queda operativa para las aeronaves.
4. R_{PLT-A} : hora en que la plataforma queda operativa para la llegada de aeronaves.
5. $R_{PLT-ZDe-icek}$: hora en que la plataforma queda operativa para el acceso de aeronaves a la zona de deshielo k.

Se va a suponer que hay h zonas significativas en el área de maniobras y que cada una de estos zonas significativas se corresponde con un subconjunto de tramos i del conjunto $J=(1, 2, \dots, n)$ de N tramos que componen el área de maniobras.

Cada subconjunto de puntos significativos está compuesto por uno o más tramos i, y forman h subconjuntos cuya unión $J' \subset J$. Sea el subconjunto J_z del conjunto $J'=(J_1, J_2, \dots, J_z, \dots, J_h)$. Sea el tramo t del subconjunto $J_z=(1, 2, \dots, t, \dots, q_z)$, que tiene q_z tramos del conjunto J y que sólo pertenecen a J_z , no perteneciendo a ningún otro subconjunto de puntos significativos de la plataforma. Por tanto

$$J_1 \cup J_2 \cup \dots \cup J_z \cup \dots \cup J_h = J' \subset J$$

$$J_1=(1, 2, \dots, t, \dots, q_1) \subset J$$

$$J_2=(1, 2, \dots, t, \dots, q_2) \subset J$$

...

$$J_z=(1, 2, \dots, t, \dots, q_z) \subset J$$

...

$$J_h=(1, 2, \dots, t, \dots, q_h) \subset J$$

$$J_i \cap J_j = \emptyset \text{ con } i, j \in (1, 2, \dots, z, \dots, h)$$

Se consideran como datos de partida de (M3) y (M3w) los mismos que se definieron para (M1) y (M2w).

Y se consideran como variables de (M3) y (M3w) las mismas que se definieron para (M2), añadiendo

- $R_{\max z}$: hora de listo del subconjunto z para cada conjunto de tramos significativos que integran dicho subconjunto.

$$R_{\max z} = \max\{R_1, R_2, \dots, R_{q_z}\} \text{ siendo } J_z = (1, 2, \dots, t, \dots, q_z) \subset J$$

Los modelos **(M3)** y **(M3w)** para resolver los problemas

$$1/p_i, \delta_{ij}/\Sigma R_{\max z_mix} \text{ y } 1/p_i, \delta_{ij}/\Sigma \omega_z R_{\max z_mix}$$

se plantean de la siguiente forma:

$$z = \sum_{z=1}^h R_{\max z} \quad (3.1)'$$

$$z = \sum_{z=1}^h \omega_z R_{\max z} \quad (3.2)'$$

Con las restricciones (1.3), (1.4), (1.5), (1.6), (1.8), (1.9), (1.10), (1.11) y (1.12)

$$R_t^k \leq R_{\max z} \quad z = 1, \dots, h \quad t = 1, \dots, q_z \quad k = 1, \dots, m \quad (3.13)$$

añadiendo

$$\begin{aligned} x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall k, \forall (i, j) \quad s_i^k, R_i^k, p_i^k \geq 0 \quad \forall k, \forall i \quad R_{\max z}, R_{\max}, Z_0 \geq 0 \\ 0 \leq \omega_i \leq 1 \quad R_z \geq 0 \quad z = 1, \dots, h \end{aligned}$$

La restricción (3.13) define $R_{\max z}$ para cada subconjunto z de tramos significativos.

Como hay tramos que no pertenecen a las zonas significativas, las funciones objetivo (3.1)' y (3.2)' no los contemplan, dando libertad al modelo para asignar las horas de descontaminación libremente. Para corregir esto, y considerando el modelo (M1) que minimiza $R_{\max}$, se va a considerar las siguientes funciones objetivo:

$$z = \frac{1}{B} \left(\sum_{z=1}^h R_{\max z} + R_{\max} \right) \quad (3.1)$$

$$z = \frac{1}{B} \left(\sum_{z=1}^h \omega_z R_{\max z} + \omega_{total} R_{\max} \right) \quad (3.2)$$

Donde B es un parámetro que hace adimensional cada uno de los sumandos que intervienen en las funciones objetivo (3.1) y (3.2). La expresión que define B es:

$$B = \sum_{i=1}^n p_i$$

Con las restricciones (1.3), (1.4), (1.5), (1.6), (1.7), (1.8), (1.9), (1.10), (1.11), (1.12) y (1.13), incluyendo de nuevo la restricción (1.7)

añadiendo

$$\begin{aligned} x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k, \forall (i, j) \quad s_i^k, R_i^k, p_i^k \geq 0 \quad \forall k, \forall i \quad R_{\max z}, R_{\max}, Z_0 \geq 0 \\ 0 \leq \omega_i, \omega_{total} \leq 1 \quad R_z \geq 0 \quad z = 1, \dots, h \end{aligned}$$

5.6. Modelos 4 y 4w (M4 y M4w): Gestión de recursos de descontaminación de área de maniobras minimizando Σl_{z_mix} y $\Sigma \omega_z l_{z_mix}$

Si en los modelos anteriores se hubiesen considerado como dato las horas estimadas en que cada tramo i del área de maniobras debe estar descontaminado de nieve r_i , se podría haber planteado el modelo considerando como función objetivo en (M2) el sumatorio de retrasos entre la hora de listo y la hora estimada para cada tramo del área de maniobras Σl_i , siendo el retraso en el tramo i $l_i = R_i - r_i$, donde R_i representa el mínimo valor de R_i^k , ya que el tramo i ha podido entrar en la cola de descontaminación en más de una ocasión.

$$1/ r_i, p_i, \delta_{ij}/\Sigma l_i$$

Si se introducen los coeficientes de ponderación ω_i , la función objetivo del (M2w) pasa a ser $\Sigma \omega_i l_i$.

$$1/ r_i, p_i, \delta_{ij}/\Sigma \omega_i l_i$$

De esta forma la gestión de equipos se hace orientado cumplir con la hora estimada para cada tramo.

Pero la realidad es que las horas objetivo se establecen en las zonas significativas del área de maniobras, como se ha explicado anteriormente. Estas horas objetivo son:

1. r_{RWY-Ai} : hora estimada en que la pista de aterrizaje i queda operativa para las aeronaves.
2. r_{RWY-Di} : hora estimada en que la pista de despegues i queda operativa para las aeronaves.
3. $r_{ZDe-icek}$: hora estimada en que la zona de deshielo k queda operativa para las aeronaves.
4. r_{PLT-A} : hora estimada en que la plataforma queda operativa para la llegada de aeronaves.
5. $r_{PLT-ZDe-icek}$: hora estimada en que la plataforma queda operativa para el acceso de aeronaves a la zona de deshielo k .

Se define el retraso en cada subconjunto de tramos significativos z como $l_z = R_{\max z} - r_z$, siendo r_z la hora estimada en la que el subconjunto significativo z debe estar disponible, y $R_{\max z}$ la hora en que dicho subconjunto significativo z queda disponible.

Se consideran como datos de partida de (M4) y (M4w) los mismos que se definieron para (M3) y (M3w) añadiendo:

- r_z : hora estimada de listo del subconjunto de tramos significativos z del área de maniobras.

Se consideran como variables de (M4) y (M4w) las mismas que se definieron para (M3), introduciendo la definición del retraso l_z , para cada conjunto de tramos significativos. Esto es:

- l_z : retraso en el subconjunto de tramos significativos z del área de maniobras, definido como la diferencia entre la hora de listo del subconjunto $R_{\max z}$ y la hora estimada r_z del mismo.

Los modelos (M4) y (M4w) para resolver los problemas

$$1/ r_i, p_i, \delta_{ij}/\Sigma l_{z \text{ mix}} \text{ y } 1/ r_i, p_i, \delta_{ij}/\Sigma \omega_z l_{z \text{ mix}}$$

se plantean de la siguiente forma:

$$z = \sum_{z=1}^h l_z \quad (4.1)'$$

$$z = \sum_{z=1}^h \omega_z l_z \quad (4.2)'$$

Con las restricciones (1.3), (1.4), (1.5), (1.6), (1.8), (1.9), (1.10), (1.11), (1.12) y (3.13)

$$l_z \geq R_{\max z} - r_z \quad z = 1, \dots, h \quad (3.14a)$$

$$l_{total} \geq R_{\max} - r_{total} \quad z = 1, \dots, h \quad (3.14b)$$

añadiendo

$$\begin{aligned} x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k, \forall (i, j) \quad s_i^k, R_i^k, p_i^k \geq 0 \quad \forall k, \forall i \quad l_z \geq 0 \quad z = 1, \dots, h \\ R_{\max z}, R_{\max}, Z_0 \geq 0 \quad 0 \leq \omega_i \leq 1 \quad r_{total}, r_z \geq 0 \quad \text{y} \quad R_z \geq 0 \quad z = 1, \dots, h \end{aligned}$$

Las desigualdades (3.14a) y (3.14b) definen l_z para cada conjunto z de tramos significativos, y l_{total} para el conjunto entero del área de maniobras, respectivamente.

Como hay tramos que no pertenecen a las zonas significativas, las funciones objetivo (4.1)' y (4.2)' no los contemplan, dando libertad al modelo para asignar las horas de descontaminación libremente en esos tramos. Para corregir esto, y considerando el modelo (M3) y (M3w) se va a considerar las siguientes funciones objetivo:

$$z = \frac{1}{B_l} \left(\sum_{z=1}^h l_z + l_{total} \right) \quad (4.1)$$

$$z = \frac{1}{B_l} \left(\sum_{z=1}^h \omega_z l_z + \omega_{total} l_{total} \right) \quad (4.2)$$

Se define el retraso total en área de maniobras como $l_{total} = R_{\max} - r_{total}$, siendo r_{total} la hora estimada en la que se queda descontaminado el área de maniobras.

B_l es un parámetro que hace adimensionales cada uno de los sumandos que intervienen en las funciones objetivo (4.1) y (4.2). La expresión que define B_l es:

$$B_l = r_{total} - \sum_{i=1}^n p_i$$

Para $z = 1, \dots, h$

Con las restricciones (1.3), (1.4), (1.5), (1.6), (1.8), (1.9), (1.10), (1.11), (1.12), (3.13), (3.14a) y (3.14b) incluyendo la restricción (1.7)

añadiendo

$$\begin{aligned} x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k, \forall (i,j) \quad s_i^k, R_i^k, p_i^k \geq 0 \quad \forall k, \forall i \quad l_{total}, l_z \geq 0 \quad z = 1, \dots, h \\ R_{\max z}, R_{\max}, Z_0 \geq 0 \quad 0 \leq \omega_i, \omega_{total} \leq 1 \quad r_{total}, r_z \geq 0 \quad y \quad R_z \geq 0 \quad z = 1, \dots, h \end{aligned}$$

5.7. Pruebas computacionales.

Para la evaluación de los modelos presentados, se hace necesario probar cada uno de ellos en distintas configuraciones teóricas del área de maniobras, eligiendo para ello 5 configuraciones, de A0 a A4, donde se va incrementando el grado de complejidad.

En cada una de estas áreas de maniobras existen una serie de parámetros que definen cada configuración. Estos parámetros son:

- Compatibilidad entre tramos, con la presentación general de la configuración, especificando el esquema gráfico y número de
- Longitudes de cada tramo

La tecnología está implícita en los modelos propuestos mediante el parámetro velocidad de avance del convoy de descontaminación de forma que sea efectiva, dejando un coeficiente de rozamiento adecuado en la superficie descontaminada. La velocidad establecida para realizar las pruebas es de 40 Km/h.

En cada configuración se especifica el inicio de la descontaminación, que en todos se corresponde con el tramo 1.

Para los modelos M3 y M4 se deben diferenciar los subconjuntos de tramos significativos del área de maniobras. Dichos subconjuntos se asignan por colores en las configuraciones A0-A4 según el siguiente código de colores:

Subconjunto de tramos significativos	Color
Pistas	Rojo
Deshielo	Marrón
Tramos de acceso a puestos de estacionamiento	Verde
Tramos de acceso desde plataforma a deshielo	Azul

Tabla 2: Código de colores de subconjuntos de tramos significativos representados

En el caso de las pistas, la pista norte es la considerada para despegues y la pista sur para aterrizajes.

Para crear una configuración que se adecue a la realidad en la descontaminación de las pistas se ha considerado un tramo ficticio de acceso a cada pista por la cabecera más cercana a plataforma, que para las configuraciones de pruebas es único. Esto se hace para obligar al modelo a hacer un giro 180° en la cabecera de pista opuesta. Las pistas, a diferencia de las calles de rodadura, necesitan de más pasadas para descontaminarlas de nieve. En las pistas el ancho debe estar disponible en un 100% para poder garantizar la seguridad operacional. El ancho de descontaminación del convoy es el parámetro que determina el número de pasadas necesarias en pista para su descontaminación adecuada. Se consideran cuatro pasadas para pistas de 60 metros de ancho categoría F.

En el modelo A3 estos tramos ficticios son 27 y 28, y en A4 son 32 y 35.

Para la descontaminación de las calles de salida rápida de pista se crean loops de tramos, formados por la calle de rodadura en paralelo a la pista, las propias salidas rápidas y un tramo a través de la pista para cerrar el loop.

En el modelo A4 hay dos loops, el formado para la pista de despegues por los tramos 21, 27, 29 y 31, y otro formado para la pista de aterrizajes por 19, 28, 30 y 34, donde 29 y 30 son los tramos de cierre a través de la pista, y los tramos 27 y 29 y los tramos 28 y 30 son las calles de acceso a umbral y salidas rápidas, respectivamente.

Para modelizar el campo de vuelos se emplea función directriz simétrica δ_{ij} con valor 1 si tramo j puede ser descontaminado después de i , 0 en el resto. Tiene en cuenta la compatibilidad entre un tramo y otro, atendiendo a la continuidad del trazado. Para su definición se emplea la matriz **tramoic_{ic}** donde i son los tramos pertenecientes al conjunto $J=(1, 2, \dots, N)$ del total de tramos con forman el aeropuerto y c son los tramos compatibles con cada tramo i .

5.7.1. Áreas de Maniobras consideradas

Las áreas de maniobra que se van a considerar son los siguientes:

Ilustración 8: Áreas de maniobras consideradas en las pruebas computacionales del problema RM-AM

A continuación se describe detalladamente cada área de maniobras.

Para A3, los tramos 29 y 30 son la pista de despegues y la de aterrizajes respectivamente.

Para A4, los tramos 33 y 36 son la pista de despegues y la de aterrizajes respectivamente.

5.7.1.1 Área de Maniobras A0

Presentación de la configuración A0:

Tramos: 5
Longitud total: 2.000,0 m

Longitud de cada tramo:

ID_TRAMO	SHAPE_Leng (m)
i1	250,0
i2	500,0
i3	500,0
i4	500,0
i5	250,0
Total	2.000,0

Matriz tramoic_{ic} de tramos compatibles:

ID_TRAMO	Compatibilidad de tramos	
i1	2	5
i2	1	3
i3	2	4
i4	3	5
i5	1	4

Función directriz δ_{ij} :

$$\delta_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & i1 - i2 & i1 - i3 & i1 - i4 & i1 - i5 \\ i2 - i1 & 1 & i2 - i3 & i2 - i4 & i2 - i5 \\ i3 - i1 & i3 - i2 & 1 & i3 - i4 & i3 - i5 \\ i4 - i1 & i4 - i2 & i4 - i3 & 1 & i4 - i5 \\ i5 - i1 & i5 - i2 & i5 - i3 & i5 - i4 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

5.7.1.2 Área de Maniobras A1

Presentación de la configuración A1:

Tramos: 12
Longitud total: 6.000,0 m

Longitud de cada tramo:

ID_TRAMO	SHAPE_Leng (m)
i1 al i12	500,0
Total	6.000,0

Matriz tramoic_{ic} de tramos compatibles:

ID_TRAMO	Compatibilidad de tramos				
	c1	c2	c3	c4	c5
i1	2	9	10	11	12
i2	1	3	6	10	11
i3	2	5	6		
i4	5	11	12		
i5	3	4	11		
i6	2	3	7		
i7	6	8	10		
i8	7	9	10		
i9	1	8	12		
i10	1	2	7	8	11
i11	1	2	4	5	10
i12	1	4	9		

Función directriz δ_{ij} :

$$\delta_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5.7.1.3 Área de Maniobras A2

Presentación de la configuración A2:

Tramos: 26
Longitud total: 13.414,2 m

Longitud de cada tramo:

ID_TRAMO	SHAPE_Leng (m)
i1 al 24	500,0
i25	707,1
i26	707,1
Total	13.414,2

Matriz tramoic_{ic} de tramos compatibles:

ID_TRAMO	Compatibilidad de tramos							
	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
i1	2	9	10	11	12			
i2	1	3	6	10	11	23		
i3	2	5	6	15	22	23	25	
i4	5	11	12	13	14	26		
i5	3	4	11	14	15	22	25	26
i6	2	3	7	23	24			
i7	6	8	10	24				
i8	7	9	10					
i9	1	8	12					
i10	1	2	8	7	11			
i11	1	2	4	5	10	14	26	
i12	1	9	4	13				
i13	4	12	19	26				
i14	4	5	11	19	20	26		
i15	3	5	20	21	22	25		

Longitud de cada tramo:

ID_TRAMO	SHAPE_Leng (m)
i1 al i24	500,0
i25	707,1
i26	707,1
i27	1,0
i28	1,0
i29	3.000,0
i30	3.000,0
Total	19.416,2

Matriz tramoic_{ic} de tramos compatibles:

ID_TRAMO	Compatibilidad de tramos							
	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
i1	2	9	10	11	12			
i2	1	3	6	10	11	23		
i3	2	5	6	15	22	23	25	
i4	5	11	12	13	14	26		
i5	3	4	11	14	15	22	25	26
i6	2	3	7	23	24			
i7	6	8	10	24				
i8	7	9	10					
i9	1	8	12					
i10	1	2	8	7	11			
i11	1	2	4	5	10	14	26	
i12	1	9	4	13				
i13	4	12	19	26	28			
i14	4	5	11	19	20	26		
i15	3	5	20	21	22	25		
i16	17	23	24					
i17	16	18	22	23				
i18	17	21	22	25	27			
i19	13	14	20	26	28			
i20	14	15	19	21				
i21	15	18	20	25	27			
i22	3	5	15	17	18	25		
i23	2	3	6	16	17			
i24	6	7	16					
i25	3	5	15	18	21	22	27	
i26	4	5	11	13	14	19	28	
i27	18	21	25	29				
i28	13	19	26	30				
i29	27							
i30	28							

Se ha omitido la presentación de la función directriz δ_{ij} , siendo su cálculo análogo a los casos anteriores.

5.7.1.5 Área de Maniobras A4

Presentación de la configuración A4:

Longitud de cada tramo:

ID_TRAMO	SHAPE_Leng (m)
i1 al i24	500,0
i25	707,1
i26	707,1
i27	707,1
i28	707,1
i29	500,0
i30	500,0
i31	707,1
i32	1,0
i33	3.000,0
i34	707,1
i35	1,0
i36	3.000,0
Total	23.244,6

Matriz tramoic_{ic} de tramos compatibles:

ID_TRAMO	Compatibilidad de tramos							
	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
i1	2	9	10	11	12			
i2	1	3	6	10	11	23		
i3	2	5	6	15	22	23	25	
i4	5	11	12	13	14	26		
i5	3	4	11	14	15	22	25	26
i6	2	3	7	23	24			
i7	6	8	10	24				
i8	7	9	10					
i9	1	8	12					
i10	1	2	8	7	11			
i11	1	2	4	5	10	14	26	
i12	1	9	4	13				
i13	4	12	19	26	28			
i14	4	5	11	19	20	26	34	
i15	3	5	20	21	22	25	31	
i16	17	23	24					
i17	16	18	22	23				
i18	17	21	22	25	27			
i19	13	14	20	26	28	34		
i20	14	15	19	21	31	34		
i21	15	18	20	25	27	31		
i22	3	5	15	17	18	25		
i23	2	3	6	16	17			
i24	6	7	16					
i25	3	5	15	18	21	22	27	
i26	4	5	11	13	14	19	28	
i27	18	21	25	29				
i28	13	19	26	30				
i29	27	31	32					
i30	28	34	35					
i31	15	20	21	29	32			
i32	29	31	33					
i33	32							
i34	14	19	20	30	35			
i35	30	34	36					
i36	35							

Se ha omitido la presentación de la función directriz δ_{ij} , siendo su cálculo análogo a los casos anteriores.

5.7.2. Desarrollo y programación

Las combinaciones a tener en cuenta han sido las siguientes:

Modelos matemáticos: M1, M2, M3w, M4w

Áreas de Maniobra: A0, A1, A2, A3 y A4

Cada área de Maniobras tiene un tamaño y una configuración, definidos, como ya se ha expuesto, según los parámetros:

- Orden máximo de i , que aparecerá abreviado como $\text{card}(i)$ a lo largo del estudio, y representa número de tramos de cada área
- Características de cada tramo: denominación y longitud
- Configuración de cada área, definida con la matriz δ_{ij} de compatibilidad entre tramos

Cada modelo matemático lo definen una serie de inecuaciones y condiciones, como también se ha expuesto detalladamente. Además para cada modelo, hay que elegir el número de “saltos” o tamaño de la secuencia que el equipo de descontaminación debe dar para cubrir el área de maniobras. Este parámetro es el orden máximo de k , que aparecerá abreviado como $\text{card}(k)$ a lo largo del estudio.

La secuencia de desarrollo de las pruebas computacionales da lugar a una serie de combinaciones en función de los parámetros comentados. Se ha hecho atendiendo en primer lugar al modelo matemático, en segundo lugar al área de maniobras, y en tercer lugar al tamaño de la secuencia de descontaminación $\text{card}(k)$.

1. Modelo
2. Área de maniobras
3. Card(k)

En la siguiente tabla se muestran cada una de las pruebas hechas:

Para Modelo M1

$z=R_{\max}$		Card(k)= $\text{card}(i) \cdot (1+x\%)$			
Área de Maniobras	card(i)	0%	30%	40%	50%
A0	5	Rmax-A0-k5	Solución única	Solución única	Solución única
A1	12	Rmax-A1-k12	Rmax-A1-k15	Rmax-A1-k16	Rmax-A1-k17
A2	26	Rmax-A2-k26	Rmax-A2-k34	Rmax-A2-k36	Rmax-A2-k39
A3	30	Rmax-A3-k30	Rmax-A3-k38	Rmax-A3-k42	Rmax-A3-k46
A4	36	Rmax-A4-k36	Rmax-A4-k46	Rmax-A4-k50	Rmax-A4-k54

Tabla 3: Pruebas para M1

Para Modelo M2

$z=\text{Sum } R_j^k$		Card(k)= $\text{card}(i) \cdot (1+x\%)$			
Área de Maniobras	card(i)	0%	30%	40%	50%
A0	5	SumRjk-A0-k5	Solución única	Solución única	Solución única
A1	12	SumRjk-A1-k12	SumRjk-A1-k15	SumRjk-A1-k16	SumRjk-A1-k17
A2	26	SumRjk-A2-k26	SumRjk-A2-k34	SumRjk-A2-k36	SumRjk-A2-k39
A3	30	SumRjk-A3-k30	SumRjk-A3-k38	SumRjk-A3-k42	SumRjk-A3-k46
A4	36	SumRjk-A4-k36	SumRjk-A4-k46	SumRjk-A4-k50	SumRjk-A4-k54

Tabla 4: Pruebas para M2

Para Modelo M3w

$z = \sum R_{\max z, \text{mix}}$		Card(k) = card(i) · (1+x%)			
Área de Maniobras	card(i)	0%	30%	40%	50%
A0	5	Rmax_mix-A0-k5	Np	Np	Np
A1	12	Rmax_mix-A1-k12	Rmax_mix-A1-k15	Rmax_mix-A1-k16	Rmax_mix-A1-k17
A2	26	Rmax_mix-A2-k26	Rmax_mix-A2-k34	Rmax_mix-A2-k36	Rmax_mix-A2-k39
A3	30	Rmax_mix-A3-k30	Rmax_mix-A3-k38	Rmax_mix-A3-k42	Rmax_mix-A3-k46
A4	36	Rmax_mix-A4-k36	Rmax_mix-A4-k46	Rmax_mix-A4-k50	Rmax_mix-A4-k54

Tabla 5: Pruebas para M3w

Para Modelo M4w

$z = \sum w_z _{\max z}$		Card(k) = card(i) · (1+x%)			
Área de Maniobras	card(i)	0%	30%	40%	50%
A0	5	Lmix-A0-k5	Np	Np	Np
A1	12	Lmix-A1-k12	Lmix-A1-k15	Lmix-A1-k16	Lmix-A1-k17
A2	26	Lmix-A2-k26	Lmix-A2-k34	Lmix-A2-k36	Lmix-A2-k39
A3	30	Lmix-A3-k30	Lmix-A3-k38	Lmix-A3-k42	Lmix-A3-k46
A4	36	Lmix-A4-k36	Lmix-A4-k46	Lmix-A4-k50	Lmix-A4-k54

Np: no procede

Tabla 6: Pruebas para M4w

Nótese para un área de maniobras tipo A0, compuesto por n tramos unidos por sus extremos, y en los que cada uno sólo tiene contacto con dos tramos, se plantea un recorrido hamiltoniano en el que se impone el inicio y el fin en el vértice 1, con el arco (v_n, v_1) en primera posición, el arco (v_1, v_2) en segunda posición y el arco (v_{n-1}, v_n) en la posición n. El recorrido óptimo tiene por tanto n saltos, siendo el incremento del orden de k óptimo respecto al orden de i del 0%. Aumentar el orden de k daría lugar a recorridos no óptimos. Por tanto no procede aplicar incrementos en el orden de k respecto al orden de i.

Para el resto de áreas de maniobras, con tramos cruzados, el recorrido óptimo ya no está tan claro como para el caso A0. Para A1, A2, A3 y A4 se proponen variaciones del parámetro x% (incrementos del orden de k respecto al orden de i) de 30%, 40% y 50%. En función de este parámetro pueden darse varios resultados esperados:

- En aquellos recorridos en los que x% sea insuficiente para recorrer todos los tramos, no habrá solución.
- Para aquellos recorridos en los que el parámetro x% esté por encima del orden de i, el modelo optimizará el recorrido ajustándose a este incremento. Recordar que en los modelos propuestos, si el tramo se hace de forma pasante se considera el tiempo de proceso mínimo. Pero si se gira al final del tramo, haciendo un giro de 180°, se considera un tiempo de proceso que incluye el recorrido de ida, el de vuelta y el tiempo de giro. Esta maniobra se contabiliza como un giro 180°. Por tanto, se dan dos situaciones en función de x%:
 - El recorrido óptimo incluirá muchos giros 180°, contraproducentes para la operación del convoy para la eliminación de la nieve.

- El recorrido óptimo elimina un gran número de estos giros 180°, que es eficiente desde el punto de vista operativo de la maniobra del convoy.

Cada prueba consta de una programación y un volcado de resultados. Cada fichero de programación *.gms hace referencia a los tres parámetros. El resultado de procesar dicho archivo en GAMS-CPLEX es un fichero de datos *.out que sigue la misma regla de referencia.

Cada uno de estos ficheros aparece referenciado en el siguiente Anexo:

ANEXO III: DATOS DE SIMULACIONES RM_AM. PRUEBAS COMPUTACIONALES

Anexo datos de simulaciones RM_AM: Ficheros de programación *.gms

Anexo datos de simulaciones RM_AM: Ficheros de salida de datos *.out

Respecto a la programación, los ficheros tienen dos partes diferenciadas. Una primera parte, que afecta a:

- Opciones de configuración de GAMS para la resolución
- Programación para mostrar resultados
- Creación del fichero de salida de datos *.out

Y otra segunda parte referente a:

- Programación de los modelos matemáticos: datos, variables y ecuaciones.

Toda esta documentación se muestra en el siguiente Anexo para el área de maniobras A3, extrapolable al resto de áreas de maniobra:

ANEXO III: DATOS DE SIMULACIONES RM_AM. PRUEBAS COMPUTACIONALES

Anexo datos de simulaciones RM_AM: programación modelos para área de maniobras A3

A modo de ejemplo, para el Modelo 1, para el área de Maniobras A0 y $\text{card}(k) = 5$, el fichero de programación *Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A0_k5.gms*, tiene el siguiente contenido:

```

set ii  set tramos           / i1*i5 /
kk  set posiciones         / k1*k5 /
cc  set tramos compatibles / c1*c8 /
i(ii) subset de tramos
k(kk) subset posiciones
c(cc) subset de tramos compatibles
alias (ii,jj,ll),(i,j,l);
alias (kk,hh),(k,h);

scalars

Zcero      Inicio del plan invernal
conta      contador
BigM       BigM=10000
a1         controlador
a3         controlador j
v          velocidad avance equipo descontaminación (mpmin)
tpen       tiempo de penalización en el giro 180°
longpen    longitud extra en giro 180° ;

```

```

Zzero=0.;
BigM=10000;
v=666.7;
a1=0.;
longpen=3.1416*40. ;
tpen=longpen/(v/2) ;

display tpen;

parameter
    long(ii) longitud del tramo i en m
    /
    i1      500.0
    i2      500.0
    i3      500.0
    i4      250.0
    i5      250.0
    / ;

parameter p(ii) tiempo de proceso del tramo i por el equipo k ;
*Los 40 primeros metros del tramo y los 40 últimos a mitad de velocidad
    loop(ii$(card(ii)<=5),
        p(ii)=(long(ii)-40*2)/v + 40*2/(v/2)
    );

display p;

parameters
    rwy(cc) tramos que son pista

    apron(cc) tramos que son pista

    dice(cc) tramos que son pista
;

Table

    tramoic(ii,cc) tramos c compatibles con tramo i

    c1    c2    c3    c4    c5    c6    c7    c8
    i1     2     5
    i2     1     3
    i3     2     4
    i4     3     5
    i5     1     4
;

parameter M(ii,jj) compatibilidad tramo i vs tramo j cuando j sigue a i ;

loop(ii$(card(ii)<=5),
    loop(jj$(card(jj)<=5),
        loop(cc$(card(cc)<=8),
            a3=card(jj);
            if (a3=tramoic(ii,cc),
                M(ii,jj)=1.
            );
        );
    );

```

```

);
);
);
);

display M;

variables x(ii,jj,kk) variable de decisión donde xij=1 si el tramo i precede directamente a j en
la posición k - xij=0 en otro caso
    Rj(jj,kk) variable tiempo en que el tramo j está listo en la posición k
    Rmax variable máxima Rj
    Rmaxrwy variable máximo Rj en pistas
    Rmaxapron variable máximo Rj en acceso a estacionamientos
    Rmaxdice variable máximo Rj en zona deshielo
    sj(jj,kk) variable tiempo en que el tramo j se comienza a descontaminar en la posición k
    pj(jj,kk) variable tiempo en descontaminar tramo j en la posición k
    z variable objetivo de descontaminación
binary variable x;
positive variable Rj, Rmax, Rmaxrwy, Rmaxapron, Rmaxdice, sj, pj;

equations
    R_max objetivo miniminar Rmax
    inec2(ii,kk) a cada trama i le sigue uno j
    inec3 recorrido hamiltoniano en que se empieza en el tramo 1
    inec6(ii) todos los tramos entran en cola
    inec7(kk) posición k es un arco vi-vj Equivale a 5 y 6
    inec8(ii,jj,kk) def de sjk+1 atendiendo a Rik
    inec9(ii,kk) def Rmax
    inec10(ii,jj,kk) def Rjk atendiendo a sjk
    inec11a(ii,kk) def pjatendiendo a p
    inec11b(ii,jj,ll,kk,cc) def pjatendiendo a p*2
    inec12 inicio en Zcero (sj con j1 cuando k es 1)
;

R_max.. z=e= Rmax;

inec2(i,k)$ (card(k) ne 1).. sum(j,M(i,j)*x(i,j,k))-sum(l,x(l,i,k-1)) =e= 0;
inec3.. sum(j,M('i1',j)*x('i1',j,'k1')) =e= 1;
inec6(i).. sum((j,k),x(i,j,k)) =g= 1;
inec7(k).. sum((i,j),x(i,j,k)) =l= 1;
inec8(i,j,k)$ (card(k) ne card(k)).. sj(j,k+1)+BigM =g= Rj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec9(i,k).. Rmax =g= Rj(i,k);
inec10(i,j,k).. Rj(i,k)+BigM =g= sj(i,k)+pj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec11a(i,k).. pj(i,k) =g= p(i);
inec11b(i,j,l,k,c)$ (((card(k) ne 1) and (card(j) eq tramoic(l,c))) or ((card(k) ne 1) and (card(j)
eq card(l)))).. pj(i,k)+2*BigM =g= tpen+p(i)*2+BigM*(x(l,i,k-1)+x(i,j,k));
inec12.. sj('i1','k1') =g= Zcero;

* exclusión de diagonal en x
*
x.fx(ii,ii,kk) = 0;

set i(ii)/

```

```

i1      'i1'
i2      'i2'
i3      'i3'
i4      'i4'
i5      'i5'
/;

set k(kk) /
k1      'k1'
k2      'k2'
k3      'k3'
k4      'k4'
k5      'k5'
/;

set c(cc) /
c1      'tramo compatible 1'
c2      'tramo compatible 2'
c3      'tramo compatible 3'
c4      'tramo compatible 4'
c5      'tramo compatible 5'
c6      'tramo compatible 6'
c7      'tramo compatible 7'
c8      'tramo compatible 8'
/;
* options. Asegurar que el solver MIP busca la solución global óptima.
*
option optcr=0;

model descontaAM_1 /all/;

solve descontaAM_1 using mip minimizing z;

display x.l;

display z.l;

display Rmax.l;

*display Rmaxrwy.l;

*display Rmaxapron.l;

*display Rmaxdice.l;

display sj.l;

display Rj.l;

display pj.l;

FILE Rman / Res_RM_AM\RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_A0_k5.out/ ;

PUT Rman ;

```

```

    Rman.nw=6;
    Rman.lw=1;

    PUT //
        @1, 'SOLUCIÓN ÓPTIMA';
    PUT //
    loop(k,
    loop(i,
    loop(j,
    if (x.l(i,j,k)=1,
    put //
        @1, 'Posción ';
    put @10, card(k);
    put @13, ' -> tramo ';
    put @30, card(i);
    put @33, ' seguido del tramo ';
    put @62, card(j);
    put @65, ' ';
    if (card(k)=card(k),
    put @33, ' y último ';
    );
    );
    );
    );
    );

    PUT //
    //
    @1, 'HORA A LA QUE SE DEJA LIBRE EL TRAMO i SEGUIDO DEL TRAMO j';
    PUT //
    @1, '          sj   Rj   pj';
    loop(k,
    loop(i,
    loop(j,
    if (x.l(i,j,k)=1,
    put //
        @1, card(i);
    put @1, 'i';
    put @4, ' ';
    put @11, card(j);
    put @11, 'j';
    put @14, ' ';
    put @47, sj.l(i,k);
    put @54, Rj.l(i,k);
    put @61, pj.l(i,k);
    );
    );
    );
    );

    loop(k,
    loop(i,

```

```

    loop(j,
        if (x.l(i,j,k)=1,
            a1=a1+Rj.l(i,k)
        );
    );
);
);

PUT //
    @1, 'Objetivo' ;
PUT //
    @1, z.l;
PUT //
    @1, 'Rmax' ;
PUT //
    @1, Rmax.l;
PUT //
    @1, 'Rmaxrwy' ;
PUT //
*    @1, Rmaxrwy.l;
PUT //
    @1, 'Rmaxapron' ;
PUT //
*    @1, Rmaxapron.l;
PUT //
    @1, 'Rmaxdice' ;
PUT //
*    @1, Rmaxdice.l;
PUT //
    @1, 'Sum Rj' ;
PUT //
    @1, a1;

```

El fichero con los resultados *RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_A0_k5.out* correspondiente, es el siguiente:

SOLUCIÓN ÓPTIMA

Posción 1 -> tramo	1 seguido del tramo	5
Posción 2 -> tramo	5 seguido del tramo	4
Posción 3 -> tramo	4 seguido del tramo	3
Posción 4 -> tramo	3 seguido del tramo	2
Posción 5 -> tramo	2 y último	

HORA A LA QUE SE DEJA LIBRE EL TRAMO i SEGUIDO DEL TRAMO j

	s_j	R_j	p_j
$i 1 \quad j 5$	0.00	0.87	0.87
$i 5 \quad j 4$	0.87	1.36	0.49
$i 4 \quad j 3$	1.36	1.86	0.49
$i 3 \quad j 2$	1.86	2.73	0.87
$i 2 \quad j 1$	2.73	3.60	0.87

Objetivo

3.60

 R_{max}

3.60

 R_{maxrwy} **$R_{maxapron}$** **$R_{maxdice}$** **Sum R_j**

10.42

5.7.3. Resultados

La presentación de los resultados globales se ha ordenado con el criterio de incremento de dificultad del problema propuesto. Se presentan los resultados atendiendo en primer lugar al valor del parámetro $x\%$. Para cada $x\%$, se ha planteado una tabla por cada modelo matemático propuesto, con el siguiente orden:

- M1, ó $R_{\max}$
- M2, ó $\text{Sum}R_j^k$
- M3w, ó $R_{\max_mix}$
- M4w, ó I_{z_mix}

Posteriormente, dado $x\%$ y el modelo considerado, se han analizado las cinco propuestas teóricas de áreas de maniobra, A0 a A4.

Los resultados aparecen en el *Anexo de las simulaciones RM_AM: Pruebas Computacionales* que acompaña a este estudio, en los siguientes apartados:

ANEXO: DATOS DE SIMULACIONES RM_AM: PRUEBAS COMPUTACIONALES.

Anexo datos de simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+0\%)\cdot\text{card}(i)$

Anexo datos de simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+30\%)\cdot\text{card}(i)$

Anexo datos de simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+40\%)\cdot\text{card}(i)$

Anexo datos de simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+50\%)\cdot\text{card}(i)$

5.7.3.1 Interpretación de los resultados

En primer lugar se propone un **análisis por cada modelo matemático**, en el que se analizan, valoran y comparan los resultados obtenidos en función del área de maniobras y el incremento del orden de k frente al orden de i . Se valoran los resultados clave como $R_{\max}$ y ΣR_i^k en valor absoluto y la tendencia para cada binomio $x\%$ -área de maniobras. Se analiza el número de giros 180° obtenidos, para valorar la calidad de la solución. Se comparan estos resultados de $R_{\max}$, ΣR_i^k y número de giros 180° .

A continuación se hace un **análisis comparativo de modelos matemáticos**, analizando para cada uno de ellos, los tres resultados clave: $R_{\max}$, ΣR_i^k y número de giros 180° . Para cada resultado clave, se analizan los distintos modelos, en función del binomio $x\%$ -área de maniobras.

Se prosigue con un **análisis del comportamiento de los modelos frente al tamaño** del área de maniobras. Se analiza para cada área de maniobras el valor de los resultados clave, en función del binomio modelo- $x\%$.

Para el modelo M4w, dado que es el modelo más evolucionado y complejo, en el que entran en juego parámetros como los tiempo de finalización, tiempo estimado de finalización y retraso como objetivos parciales de cada subzona, se ha hecho **análisis específico de M4w frente al número de saltos del convoy de descontaminación**, es decir, del valor de $x\%$.

De igual forma se ha **analizado el comportamiento del modelo M4w frente al peso** que se otorga a cada una de los objetivos parciales de cada subzona.

Se obtienen resultados de **los tiempos de resolución de CPLEX** frente a cada modelo en función del tamaño (orden de i) del área de maniobras considerada, y frente al número de saltos, es decir, parámetro $x\%$ (incremento del orden de k frente al orden de i).

$R_{\max}$ es un valor clave de optimización común en los modelos M1, M3w y M4w, específico para M1 y acompañado de otros objetivos en M3w y M4w, siendo w el parámetro que otorga un peso variable a esos otros objetivos en la función z . Por tanto, se finaliza con el **análisis específico de comportamiento de estos modelos frente al resultado clave $R_{\max}$** .

De cada análisis se extraen conclusiones que se exponen referenciadas al final.

5.7.3.2 Presentación de resultados por Modelo Matemático

Para cada modelo se muestran los resultados obtenidos de los resultados clave $R_{\max}$, ΣR_i^k y número de giros 180° , también denominado a veces $\#180^\circ$, en función del área de maniobras y el número de saltos del convoy de descontaminación, representado en el parámetro $x\%$ que representa el incremento en tanto por ciento del valor cardinal de k frente al de i , siendo el valor cardinal de i el número de tramos del área de maniobras y cardinal de k el número de saltos para la descontaminación de todos los tramos i .

5.7.3.2.1 Modelo M1

$z=R_{\max}$	$R_{\max}$	$\text{card}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+x\%)$			
$\text{card}(i)$	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	3,60	NP	NP	NP
12	A1	12,18	13,05	13,92	14,79
26	A2	sin solución	37,47	42,44	45,92
30	A3	sin solución	92,02	99,00	100,43

$z=R_{\max}$	Sum Rik	$\text{card}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+x\%)$			
$\text{card}(i)$	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	10,42	NP	NP	NP
12	A1	80,04	104,39	118,31	133,1
26	A2	sin solución	685,77	810,79	994,23
30	A3	sin solución	1700	1500	2700

$z=R_{\max}$	$\#180^\circ$	$\text{card}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+x\%)$			
$\text{card}(i)$	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	0	NP	NP	NP
12	A1	2	8	0	0
26	A2	sin solución	11	11	12
30	A3	sin solución	0	14	13

Tabla 7: Resultados $R_{\max}$, SumRik y número de giros 180° para M1

Ilustración 9: Para $z=R_{\max}$, $R_{\max}$ frente a $x\%$ Ilustración 10: Para $z=R_{\max}$, SumRik frente a $x\%$ Ilustración 11: Para $z=R_{\max}$, #180° frente a $x\%$

El modelo matemático optimiza $z=R_{\max}$. Frente a esta variable, M1 se comporta de forma lógica, incrementando frente al tamaño del área de maniobras y frente al número de saltos del convoy de descontaminación.

Frente a la variable ΣR_i^k se observa un comportamiento similar en A0, A1 y A2, siendo en A3 donde en función de la solución alcanzada para el valor de z , ΣR_i^k puede tener un valor menor frente a un incremento del parámetro $x\%$.

Si se analiza el número de giros de 180° , se observa que para A3 el comportamiento del modelo es muy bueno, encontrando soluciones óptimas en $R_{\max}$ que no implican ningún giro de este tipo. De igual forma para A1, los giros son nulos en la solución óptima para $x\%=40\%$ y $x\%=50\%$.

Por tanto, para el modelo M1, y a partir de áreas de maniobras con un tamaño del orden de 30 tramos, el valor ΣR_i^k puede tener un comportamiento decreciente frente a incrementos del número de saltos. Para la resolución de áreas de maniobras de este tamaño, se recomienda un $x\%=30\%$.

5.7.3.2.1 Modelo M2

$z=\text{SumRj}$		$\text{card}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+x\%)$			
$\text{card}(i)$	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	3,60	NP	NP	NP
12	A1	12,18	13,05	13,92	15,66
26	A2	sin solución	37,47	42,36	49,65
30	A3	sin solución	74,43	74,12	81,57

$z=\text{SumRj}$		$\text{card}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+x\%)$			
$\text{card}(i)$	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	10,42			
12	A1	75,69	104,39	118,31	133,97
26	A2		602,69	749,6	929,73
30	A3		1336,64	1344,28	1798,2

$z=\text{SumRj}$		$\text{card}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+x\%)$			
$\text{card}(i)$	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	0			
12	A1	2	8	0	1
26	A2		10	12	16
30	A3		0	6	12

Tabla 8: Resultados $R_{\max}$, SumRik y número de giros 180° para M2

Ilustración 12: Para $z=\text{SumRik}$, $R_{\max}$ frente a $x\%$ Ilustración 13: Para $z=\text{SumRik}$, SumRik frente a $x\%$ Ilustración 14: Para $z=\text{SumRik}$, $\#180^\circ$ frente a $x\%$

El modelo matemático optimiza $z=\sum R_i^k$. Frente a esta variable, M2 se comporta de forma lógica, incrementando frente al tamaño del área de maniobras y frente al número de saltos del convoy de descontaminación. Frente a $R_{\max}$, el comportamiento es muy similar y coherente, salvo en A3, donde disminuye muy ligeramente para un incremento de $x\%$ entre el 30% y el 40%.

Le modelo encuentra solución sin giros de 180° para $x\%=30\%$ en A3 y $x=40\%$ en A1. Se concluye que el modelo M2 tiene unas recomendaciones análogas a las de M1.

5.7.3.2.2 Modelo M3w

z=Rmax_mix	Rmax total	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (B=3,60)	3,60	NP	NP	NP
12	A1 (B=10,44)	12,18	13,05	13,92	14,79
26	A2 (B=23,24)	sin solución	38,65	43,87	48,53
30	A3 (B=41,72)	sin solución	75,55	81,08	83,13

z=Rmax_mix	Sum Rj	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (B=3,60)	11,92			
12	A1 (B=10,44)	77,43	104,39	118,31	133,1
26	A2 (B=23,24)		698,07	780,41	978,07
30	A3 (B=41,72)		1300	2100,00	1900

z=Rmax_mix	#180º	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (B=3,60)	0			
12	A1 (B=10,44)	0	9	0	0
26	A2 (B=23,24)		0	13	15
30	A3 (B=41,72)		0	13	12

Tabla 9: Resultados Rmax, SumRik y número de giros 180º para M3w

Ilustración 15: Para $z=R_{\max_mix}$, $R_{\max}$ frente a $x\%$ Ilustración 16: Para $z=R_{\max_mix}$, $SumRik$ frente a $x\%$ Ilustración 17: Para $z=R_{\max_mix}$, $\#180^\circ$ frente a $x\%$

El modelo matemático optimiza $z=R_{\max_mix}$, siendo esta variable el sumatorio de $R_{\max}$ en cada subzona, con un coeficiente de ponderación w por cada subzona. En esta fase del análisis se ha tomado

$$(w_{ar} \ w_{apro} \ w_{accdice} \ w_{dice} \ w_{dep} \ w_{total}) = (1 \ 0,25 \ 0,25 \ 0,25 \ 1 \ 0,25)$$

Frente a $R_{\max}$, $M3w$ se comporta de forma lógica, como ocurría en $M1$, incrementando frente al tamaño del área de maniobras y frente al número de saltos del convoy de descontaminación.

Frente a la variable ΣR_i^k se observa un comportamiento similar en A1 y A2, siendo en A3 donde en función de la solución alcanzada para el valor de z , ΣR_i^k puede tener un valor menor frente a un incremento del parámetro $x\%$. Si bien en el M1 este decremento se daba para $x\%=40\%$, en M3w se da para $x\%=50\%$.

Si se analiza el número de giros de 180° , hay una mejora significativa en cuanto a la calidad de las soluciones óptimas en M3w frente a M1 y M2. Se observa que para A3 el comportamiento del modelo es muy bueno, encontrando soluciones óptimas en $R_{\max}$ que no implican ningún giro de este tipo para $x\%=30\%$. De igual forma para A1, los giros son nulos en la solución óptima para $x\%=40\%$ y $x\%=50\%$, en A2 para $x\%=30\%$.

Esto es debido a que se incluyen soluciones parciales que el modelo matemático tiene que ir ajustando, orientándolo en la búsqueda a la solución óptima de la minimización del $R_{\max}$ global.

Por tanto, para el modelo M3w, las soluciones son de mayor calidad operativa debido a la reducción del número de giros de 180° . Además, para áreas de maniobras con un tamaño del orden a partir de 30 tramos, el valor ΣR_i^k puede tener un comportamiento decreciente frente a incrementos del número de saltos. Para la resolución de áreas de maniobras a partir de un orden de tamaño de 20 tramos, se recomienda un $x\%=30\%$. El comportamiento de las ecuaciones en la búsqueda de una solución óptima es mejor con la introducción de objetivos parciales.

5.7.3.2.3 Modelo M4w

z=lmix		card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (BI=0,10)	3,60	NP	NP	NP
12	A1 (BI=0,56)	13,05	13,05	13,92	14,79
26	A2 (BI=13,76)	sin solución	37	41,26	50,39
30	A3 (BI=33,38)	sin solución	76,8	79,47	90

z=lmix		card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (BI=0,10)	11,93			
12	A1 (BI=0,56)	80,91	104,39	118,31	133,1
26	A2 (BI=13,76)		585,75	738,22	1000
30	A3 (BI=33,38)		1500	1500,00	2400

z=lmix		card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (BI=0,10)	0,00			
12	A1 (BI=0,56)	0,00	5	0	0
26	A2 (BI=13,76)		12	10	15
30	A3 (BI=33,38)		0	7,00	13

Tabla 10: Resultados $R_{\max}$, SumRik y número de giros 180° para M4w

Ilustración 18: Para $z=l_{mix}$, R_{max} frente a $x\%$ Ilustración 19: Para $z=l_{mix}$, SumRik frente a $x\%$ Ilustración 20: Para $z=l_{mix}$, #180º frente a $x\%$

Si el modelo M3w se asemejaba en comportamiento a M1, mejorándolo en cuanto al número de giros de 180º, M4w se asemeja más a M2.

El modelo matemático optimiza $z=\sum l_{z_{mix}}$, siendo esta variable el sumatorio de las desviaciones entre los R_{max} y los tiempos estimados en cada subzona, con un coeficiente de ponderación w

por cada subzona. Frente a $R_{\max}$ y ΣR_i^k , M4w se comporta de forma lógica, incrementando frente al tamaño del área de maniobras y frente al número de saltos del convoy de descontaminación. Si bien en A3 para $x=40\%$, se mantiene constante la variable clave ΣR_i^k para el incremento de $x\%$.

Le modelo encuentra solución sin giros de 180° para $x\%=30\%$ en A3 y $x=40\%$ y $x\%=50\%$ en A1.

Se concluye que el modelo M4w tiene unas recomendaciones análogas a las de M1 y M2 respecto a las variables clave $R_{\max}$ y ΣR_i^k , añadiendo la calidad de la solución en cuanto al número de giros de 180° que ofrece M3w.

5.7.3.1 Comparativa de Modelo Matemáticos

5.7.3.1.1 Resultado clave $R_{\max}$

z=Rmax	Rmax	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	3,60	NP	NP	NP
12	A1	12,18	13,05	13,92	14,79
26	A2	sin solución?	37,47	42,44	45,92
30	A3	sin solución	92,02	99,00	100,43

z=SumRjk	Rmax	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	3,60	NP	NP	NP
12	A1	12,18	13,05	13,92	15,66
26	A2	sin solución?	37,47	42,36	49,65
30	A3	sin solución	74,43	74,12	81,57

z=Rmax_mix	Rmax total	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (B=3,60)	3,60	NP	NP	NP
12	A1 (B=10,44)	12,18	13,05	13,92	14,79
26	A2 (B=23,24)	sin solución	38,65	43,87	48,53
30	A3 (B=41,72)	sin solución	75,55	81,08	83,13

z=lmix	Rmax total	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (Bl=0,10)	3,60	NP	NP	NP
12	A1 (Bl=0,56)	13,05	13,05	13,92	14,79
26	A2 (Bl=13,76)	sin solución	37,00	41,26	50,39
30	A3 (Bl=33,38)	sin solución	76,80	79,47	90

Tabla 11: Resultados Ax vs x% para $R_{\max}$

Ilustración 21: Resultados Ax vs x% para Rmax

El comportamiento de todos los modelos en cuanto al $R_{\max}$ frente al binomio $\text{card}(i)-x\%$ es coherente, aumentando $R_{\max}$ con ambos parámetros. Únicamente para A3, el modelo M2 presenta un $R_{\max}$ similar para $x=30\%$ y $x=40\%$.

Para tamaños de áreas de maniobra superiores a 30 tramos el modelo M1 es el que peores resultados proporciona para $R_{\max}$, si bien, hasta ese tamaño, las soluciones que proporcionan todos los modelos son muy similares.

5.7.3.1.1 Resultado clave ΣR_i^k

z=Rmax	Sum Rjk	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	10,42			
12	A1	80,0	104,39	118,31	133,1
26	A2		685,77	810,79	994,23
30	A3		1,70E+03	1,50E+03	2,70E+03

z=SumRjk	Sum Rjk	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	10,42			
12	A1	75,7	104,39	118,31	133,97
26	A2		602,69	749,6	929,73
30	A3		1,34E+03	1,34E+03	1,80E+03

z=Rmax_mix	Sum Rjk	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (B=3,60)	11,9			
12	A1 (B=10,44)	77,4	104,39	118,31	133,1
26	A2 (B=23,24)		698,07	780,41	978,07
30	A3 (B=41,72)		1,30E+03	2,10E+03	1,90E+03

z=lmix	Sum Rjk	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (Bl=0,10)	11,9			
12	A1 (Bl=0,56)	80,9	104,39	118,31	133,1
26	A2 (Bl=13,76)		585,75	738,22	1000
30	A3 (Bl=33,38)		1,50E+03	1,50E+03	2,40E+03

Tabla 12: Resultados Ax vs x% para SumRik

Ilustración 22: Resultados Ax vs x% para SumRik

El comportamiento de los modelos frente a la variable clave ΣR_i^k es similar hasta un tamaño de área de maniobra inferior a 30 tramos y coherente frente al binomio $\text{card}(i)-x\%$, como ocurría en el caso de $R_{\max}$. Sin embargo, a partir de 30 tramos hay discrepancias en los comportamientos. Para $\text{card}(k)$ en torno a 30:

- Para M1 el mejor comportamiento lo tiene para $x\%=40\%$.
- Para M3w el peor comportamiento lo tiene para $x\%=40\%$
- Para M2 y M4w el peor comportamiento lo tiene para $x\%=50\%$

M1 vuelve a ser el peor modelo, con un resultado óptimo sensiblemente peor que el del resto de modelos, y con un comportamiento no coherente.

5.7.3.1.1 Resultado clave número de giros 180°

z=Rmax	#180º	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	0			
12	A1	2	8	0	0
26	A2		11	11	12
30	A3		0	14	13

z=SumRj	#180º	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0	0			
12	A1	2	8	0	1
26	A2		10	12	16
30	A3		0	6	12

z=Rmax_mix #180º		card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (B=3,60)	0			
12	A1 (B=10,44)	0	9	0	0
26	A2 (B=23,24)		0	13	15
30	A3 (B=41,72)		0	13	12

z=lmix	#180º	card(k) = card(i)·(1+x%)			
card(i)	Área Maniobras	0%	30%	40%	50%
5	A0 (Bl=0,10)	0			
12	A1 (Bl=0,56)	0	5	0	0
26	A2 (Bl=13,76)		12	10	15
30	A3 (Bl=33,38)		0	7	13

Tabla 13: Resultados Ax vs x% para #180°

Ilustración 23: Resultados Ax vs x% para #180°

Se observa que, en función del tamaño del área de movimiento y de $x\%$, existen soluciones óptimas con mejor comportamiento operativo que otras, es decir, que reducen o eliminan el número de giros de 180° en el proceso de descontaminación. Además, el comportamiento frente a los giros de 180° es muy homogéneo en todos los modelos.

- Para A1, el número de saltos que mejor se adapta es para $x\%=40\%$.
- Para A3, es $x\%=30\%$.
- Para A2, sólo en el caso de M3w se ha observado un comportamiento operativo óptimo para el caso $x\%=30\%$.

5.7.3.2 Análisis del comportamiento de los modelos frente al tamaño del Área de Maniobras

En este análisis se han estudiado, para cada tamaño de área de maniobra propuesto, el comportamiento de cada modelo frente al binomio ($x\%$ -resultado clave), siendo los resultados clave analizados $R_{\max}$, ΣR_i^k y $\#180^\circ$.

Posteriormente se ha comparado para cada área de maniobras el valor de $R_{\max}$ y ΣR_i^k en cada modelo para cada $x\%$, para comparar cualitativamente los resultados.

5.7.3.2.1 Modelos frente a A1

card(i)	Área Maniobras	card(k) = card(i)·(1+30%)		
12	A1 (BI=0,56)	Rmax	Sum Rj	#180º
	z=Rmax	13,05	104,39	8
	z=SumRj	13,05	104,39	8
	z=Rmax_mix	13,05	104,39	9
	z=lmix	13,05	104,39	5

card(i)	Área Maniobras	card(k) = card(i)·(1+40%)		
12	A1 (BI=0,56)	Rmax	Sum Rj	#180º
	z=Rmax	13,92	118,31	0
	z=SumRj	13,92	118,31	0
	z=Rmax_mix	13,92	118,31	0
	z=lmix	13,92	118,31	0

card(i)	Área Maniobras	card(k) = card(i)·(1+50%)		
12	A1 (BI=0,56)	Rmax	Sum Rj	#180º
	z=Rmax	14,79	133,10	0
	z=SumRj	15,66	133,97	1
	z=Rmax_mix	14,79	133,10	0
	z=lmix	14,79	133,10	0

Tabla 14: Resultados Mx vs $x\%$ para A1 (a)

Ilustración 24: Comportamiento de los modelos frente a x% para A1 (a)

Para A1, el comportamiento de los modelos frente a $R_{\max}$ y ΣR_i^k es muy plano y con resultados equivalentes frente a x%. Solo en el caso de M2 para x=50% se observa una solución peor que

para el resto de modelos tanto en $R_{\max}$ como en ΣR_i^k . Respecto a $\#180^\circ$, para $x=30\%$ la calidad de la solución es considerablemente peor desde el punto de vista operativo que para $x\%$ superiores.

card(i)	Área Maniobras	Rmax		
12	A1 (Bl=0,56)	30%	40%	50%
	z=Rmax	13,05	13,92	14,79
	z=SumRj	13,05	13,92	15,66
	z=Rmax_mix	13,05	13,92	14,79
	z=lmix	13,05	13,92	14,79

card(i)	Área Maniobras	SumRj		
12	A1 (Bl=0,56)	30%	40%	50%
	z=Rmax	104,39	118,31	133,1
	z=SumRj	104,39	118,31	133,97
	z=Rmax_mix	104,39	118,31	133,1
	z=lmix	104,39	118,31	133,1

Tabla 15: Resultados Mx vs x% para A1 (b)

Ilustración 25: Comportamiento de los modelos frente a x% para A1 (b)

Comparando los resultados $R_{\max}$ y ΣR_i^k en A1 para cada modelo matemático en función de la variación del número de saltos del convoy de descontaminación, esto es, de x%, se observa un aumento del tiempo con el aumento de los saltos.

5.7.3.2.1 Modelos frente a A2

card(i)	Área Maniobras	card(k) = card(i) · (1+30%)		
26	A2 (BI=13,76)	Rmax	Sum Rj	#180º
	z=Rmax	37,47	685,77	11
	z=SumRj	37,47	602,69	10
	z=Rmax_mix	38,65	698,07	0
	z=lmix	38,65	585,75	12

card(i)	Área Maniobras	card(k) = card(i) · (1+40%)		
26	A2 (BI=13,76)	Rmax	Sum Rj	#180º
	z=Rmax	42,44	810,79	11
	z=SumRj	42,36	749,60	12
	z=Rmax_mix	43,87	780,41	13
	z=lmix	43,87	738,22	10

card(i)	Área Maniobras	card(k) = card(i) · (1+50%)		
26	A2 (BI=13,76)	Rmax	Sum Rj	#180º
	z=Rmax	45,92	994,23	12
	z=SumRj	49,65	929,73	16
	z=Rmax_mix	48,53	978,07	15
	z=lmix	48,53	1000,00	15

Tabla 16: Resultados Mx vs x% para A2 (a)

Ilustración 26: Comportamiento de los modelos frente a x% para A2 (a)

Para A2 y $R_{\max}$, M1 y M2 son los modelos que dan una solución mejor, excepto para $x=50\%$ donde M2 se va a la peor solución.

Para A2 y ΣR_i^k , M4w y M2 son los modelos que arrojan una solución mejor, excepto para $x=50\%$, donde M4w se va a la peor solución.

Para A2 y considerando $R_{\max}$ y ΣR_i^k , M2 es el modelo que mejores resultados da para $x\% < 50\%$, sin embargo para $x=50\%$ es curiosamente el que mejor resultado da en ΣR_i^k y el que peor en $R_{\max}$.

Respecto a #180°, la calidad de las soluciones desde el punto de vista operativo no son buenas para ningún valor de $x\%$ ni ningún modelo, excepto para $x\%=30\%$ en M3w.

card(i)	Área Maniobras	Rmax		
26	A2 (BI=13,76)	30%	40%	50%
	z=Rmax	37,47	42,44	45,92
	z=SumRj	37,47	42,36	49,65
	z=Rmax_mix	38,65	43,87	48,53
	z=lmix	38,65	43,87	48,53

card(i)	Área Maniobras	SumRj		
26	A2 (BI=13,76)	30%	40%	50%
	z=Rmax	685,77	810,79	994,23
	z=SumRj	602,69	749,6	929,73
	z=Rmax_mix	698,07	780,41	978,07
	z=lmix	585,75	738,22	1000

Tabla 17: Resultados Mx vs $x\%$ para A2 (b)

Ilustración 27: Comportamiento de los modelos frente a x% para A2 (b)

Comparando los resultados $R_{\max}$ y ΣR_i^k en A2 para cada modelo matemático en función de la variación del número de saltos del convoy de descontaminación, esto es, de x%, se observa un aumento del tiempo con el aumento de los saltos. La mayor amplitud de resultados para el caso de $R_{\max}$ se encuentra en M2, mientras que para ΣR_i^k se encuentra en A4w.

5.7.3.2.1 Modelos frente a A3

card(i)	Área Maniobras	card(k) = card(i) · (1+30%)		
30	A3 (BI=33,38)	Rmax	Sum Rj	#180º
	z=Rmax	92,02	1,70E+03	0
	z=SumRj	74,43	1,34E+03	0
	z=Rmax_mix	75,55	1,30E+03	0
	z=lmix	75,55	1,50E+03	0

card(i)	Área Maniobras	card(k) = card(i) · (1+40%)		
30	A3 (BI=33,38)	Rmax	Sum Rj	#180º
	z=Rmax	99,00	1,50E+03	14
	z=SumRj	74,12	1,34E+03	6
	z=Rmax_mix	81,08	2,10E+03	13
	z=lmix	81,08	1,50E+03	7

card(i)	Área Maniobras	card(k) = card(i) · (1+50%)		
30	A3 (BI=33,38)	Rmax	Sum Rj	#180º
	z=Rmax	100,43	2,70E+03	13
	z=SumRj	81,57	1,80E+03	12
	z=Rmax_mix	83,13	1,90E+03	12
	z=lmix	83,13	2,40E+03	13

Tabla 18: Resultados Mx vs x% para A3 (a)

Ilustración 28: Comportamiento de los modelos frente a x% para A3 (a)

Para A3 y $R_{\max}$, el comportamiento es muy similar para $x\%=30\%$ y $x\%=50\%$, siendo M2 y M3w los mejores modelos, M4w levemente peor, y M1 el peor.

Para A3 y ΣR_i^k , M2, M3w y M4w tienen un comportamiento similar y mejor que el de M1.

Para A3 y considerando $R_{\max}$ y ΣR_i^k , M2 seguido de M4w son los modelos que mejor se comportan.

Respecto a $\#180^\circ$, la calidad de las soluciones desde el punto de vista operativo son las mejores para $x\%=30\%$ en todos los modelos.

card(i)	Área Maniobras	Rmax		
30		30%	40%	50%
	z=Rmax	92,02	99,00	100,43
	z=SumRj	74,43	74,12	81,57
	z=Rmax_mix	75,55	81,08	83,13
	z=lmix	75,55	81,08	83,13

card(i)	Área Maniobras	SumRj		
30	A3 (BI=33,38)	30%	40%	50%
	z=Rmax	1,70E+03	1,50E+03	2,70E+03
	z=SumRj	1,34E+03	1,34E+03	1,80E+03
	z=Rmax_mix	1,30E+03	2,10E+03	1,90E+03
	z=lmix	1,50E+03	1,50E+03	2,40E+03

Tabla 19: Resultados Mx vs $x\%$ para A3 (b)

Ilustración 29: Comportamiento de los modelos frente a x% para A3 (b)

Comparando los resultados $R_{\max}$ y ΣR_i^k en A3 para cada modelo matemático en función de la variación del número de saltos del convoy de descontaminación, esto es, de x%, se observa un comportamiento paralelo para x%=30% y x%=50%, tanto para $R_{\max}$ como para ΣR_i^k .

Para x%=40%, queda la tendencia enmarcada entre ambas en $R_{\max}$. Pero para ΣR_i^k se convierte en el mejor resultado para M1 y en el peor para M3w.

5.7.3.3 Análisis específico modelo M4w

En M3 y M4w se introduce el concepto de subconjuntos de tramos en el área de maniobras en los que se obtienen resultados parciales, que ayudan a ir abriendo al tráfico zonas de Aeropuerto. Además en el modelo M4w se añade la hora estimada de apertura al tráfico como parámetro de cálculo. Aparece una variable nueva, denominada *idle* 1, o diferencia de tiempo entre el objetivo y el resultado obtenido, y se aplica a cada subconjunto y al total del campo de vuelo. Cada subconjunto lleva asociado un sufijo, siendo el significado de los sufijos los que a continuación se indican:

- Arr: relativo el subconjunto de tramos que componen llegadas, incluida la pista de aterrizajes y las calles de salida rápida y rodadura hasta la entrada a plataforma.
- Apron: relativo el subconjunto de tramos que componen plataforma
- Accdice: relativo el subconjunto de tramos que componen el acceso desde la salida de plataforma a las plataformas de deshielo
- Dep: relativo el subconjunto de tramos que componen salidas, incluida la pista de despegues y las calles de acceso a cabeceara desde la plataforma de deshielo.
- Total: objetivo total, referente al área de maniobras al completo.

Es por esta razón que se ha hecho un análisis específico del comportamiento de este modelo donde se detallan los resultados para cada área de maniobras.

Recordar para la interpretación de los resultados las subzonas que aparecen en cada área de maniobras teórica considerada así como los códigos de colores para cada una de ellas.

Subconjunto de tramos significativos	Color
Pistas	Rojo
Deshielo	Marrón
Tramos de acceso a puestos de estacionamiento	Verde
Tramos de acceso desde plataforma a deshielo	Azul

Tabla 20: : código de colores de subconjunto de tramos significativos representados

Ilustración 30: Áreas de maniobras consideradas en las pruebas computacionales del problema RM-AM

5.7.3.3.1 Comportamiento de M4W con $\text{card}(k) = (1+0\%)\cdot\text{card}(i)$

A0	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr			
apron	2,61	2,60	0,01
accdice			
dice			
dep			
total	3,60	1,55	2,05

A1	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr			
apron	2,61	2,00	0,61
accdice			
dice	6,09	5,00	1,09
dep			
total	13,05	11,00	2,05

Tabla 21: Resultados Ax para M4w y x=0%

Ilustración 31: Resultados en área de maniobras Ax para M4w y x=0%

Se observa que para A0 el resultado se acerca mucho al objetivo. En A1, el idle va en aumento a medida que se va desarrollando el plan invernal.

5.7.3.3.1 Comportamiento de M4W con $\text{card}(k) = (1+30\%)\cdot\text{card}(i)$

A1	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr			
apron	2,61	2,00	0,61
accdice			
dice	5,22	5,00	0,22
dep			
total	13,05	11,00	2,05

A2	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr			
apron	5,00	5,00	0,00
accdice			
dice	13,36	10,00	3,36
dep			
total	37,00	37,00	0,00

A3	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr	62,13	10,00	52,13
apron	69,84	20,00	49,84
accdice	25,00	25,00	0,00
dice	25,00	25,00	0,00
dep	38,12	30,00	8,12
total	76,80	75,00	1,80

Tabla 22: Resultados Ax para M4w y x=30%

Ilustración 32: Resultados en área de maniobras Ax para M4w y x=30%

A1 tiene para $x\%=30\%$ unos resultados muy parecidos que para $x\%=0\%$. Para A2 se observa un cambio de tendencia, en la que el idle en el subconjunto plataforma de deshielo (dice) es mayor que el idle total. En A3 este cambio de tendencia se confirma, siendo los idles en la segunda mitad del plan invernal más bajos que en la primera mitad. Esto nos indica la forma de trabajar en la búsqueda de la solución óptima de CPLEX desde el final del recorrido hacia el inicio.

5.7.3.3.1 Comportamiento de M4W con $\text{card}(k) = (1+40\%)\cdot\text{card}(i)$

A1	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr			
apron	2,61	2,00	0,61
accdice			
dice	5,22	5,00	0,22
dep			
total	13,92	11,00	2,92

A2	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr			
apron	34,30	5,00	29,30
accdice			
dice	13,05	10,00	3,05
dep			
total	41,26	37,00	4,26

A3	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr	34,33	10,00	24,33
apron	75,68	20,00	55,68
accdice	43,46	25,00	18,46
dice	43,46	25,00	18,46
dep	61,82	30,00	31,82
total	79,47	75,00	4,47

Tabla 23: Resultados Ax para M4w y $x=40\%$

Ilustración 33: Resultados en área de maniobras Ax para M4w y x=40%

Con $x\%=40\%$ vuelve a pasar algo parecido a las pruebas con $x\%=30\%$. En A1 los resultados no varían demasiado en cuanto al *idle*, y sin embargo en A2 y A3 los *idles* en la segunda mitad del plan invernal son menores que en la primera, en A2 de forma significativa que en A3. Es significativo que el resultado en A3 con $x\%=30\%$ es mucho mejor que con $x\%=40\%$.

5.7.3.3.2 Comportamiento de M4W con $\text{card}(k) = (1+50\%)\cdot\text{card}(i)$

A1	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr			
apron	2,61	2,00	0,61
accdice			
dice	6,09	5,00	1,09
dep			
total	14,79	11,00	3,79

A2	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr			
apron	41,38	5,00	36,38
accdice			
dice	17,15	10,00	7,15
dep			
total	50,39	37,00	13,39

A3	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr	47,90	10,00	37,90
apron	78,60	20,00	58,60
accdice	26,62	24,13	2,49
dice	26,62	25,00	1,62
dep	30,00	30,00	0,00
total	90,00	90,00	0,00

A4	Rmax l1	r l1	lmax l1
arr	63,35	10,00	53,35
apron	69,75	20,00	49,75
accdice	25,00	25,00	0,00
dice	25,00	25,00	0,00
dep	90,28	30,00	60,28
total	98,28	89,49	8,79

Tabla 24: Resultados Ax para M4w y $x=50\%$

Ilustración 34: Resultados en área de maniobras Ax para M4w y x=50%

Con $x\%=50\%$ se obtienen resultados para todas las áreas de maniobra, incluso A4. El comportamiento con respecto a la variable *idle* es similar a lo que se ha venido observando para otros $x\%$. Esto es, para A0 el resultado se cambia. Se aprecia un cambio de tendencia a partir de A1 en el que en la primera mitad del recorrido óptimo los idles son mayores que en la segunda. La solución para A3 en cuanto a idle es muy buena y similar a la obtenida para $x\%=30\%$, aunque con valores absolutos mayores. Respecto a A4, casi se mantiene la tendencia observada en cuanto a menor idle en la segunda mitad del recorrido óptima, salvo por el resultado en el subconjunto de salidas, en el que no se produce un buen resultado.

5.7.3.4 Análisis específico del parámetro w en el modelo M4w

Para el caso de M4w se va a analizar cuál es el reparto de pesos recomendable para las simulaciones.

Para ellos se ha partido de diferentes combinaciones del vector w:

$$W = (W_{arr} - W_{apron} - W_{accdice} - W_{dice} - W_{dep} - W_{total}).$$

Las combinaciones son las siguientes:

W1	(0-0-0-0-0-1)	Solo estableciendo un objetivo, el tiempo total de finalización
W2	(1-1-1-1-1-1)	Dando el mismo peso a todas los objetivos, subconjuntos y total
W3	(0,25-0,25-0,25-0,25-0,25-1)	Dando mayor peso al tiempo total, y el mismo y en menor importancia a los objetivos de tiempo en las subconjuntos
W4	(1-0,25-0,25-0,25-1-0,25)	Dando prioridad a los aterrizajes y despegues, frente al resto de subzonas, incluso al tiempo objetivo total

Tabla 25: Vectores w considerados

Esta última combinación es muy interesante desde el punto de vista de la seguridad, pues se da prioridad a las aeronaves en el aire, para aterrizar. En segundo lugar se da prioridad al proceso de despegues, siendo el último paso en el proceso de descontaminación la limpieza de la pista de despegues. Se da importancia a este hito frente a la finalización total del área de movimientos. Es decir, se puede estar acabando de descontaminar el área de movimientos en calles de rodadura de segundo nivel de importancia mientras existen ya aeronaves aterrizando/despegando.

Las pruebas se han hecho para un $x=30\%$ y el área de maniobras A3, con un tiempo de resolución de 2.000 seg. Los resultados son los que se muestran a continuación:

z=lmix			card(k)=(1+ 30%)-card(i) (A3 BI=33,28 B=41,72) (time resolution = 2000 seg)								
card(i)	warr,wapro,waccdice,wdice,w	card (k)	Rmax arr	Rmax apro	Rmax accdice	Rmax dice	Rmax dep	Rmax total	Obj	Sum Rj	#180º
30	(0-0-0-0-0-1)	38	75,30	75,30	75,30	75,30	75,30	75,30	0,01	1,50E+03	10
30	(1-1-1-1-1-1)	38	90,18	64,24	55,54	55,54	52,81	92,05	7,01	1,70E+03	12
30	(0,25-0,25-0,25-0,25-0,25-1)	38	41,91	68,66	48,12	48,12	66,48	75,00	1,05	1,10E+03	7
30	(1-0,25-0,25-0,25-1-0,25)	38	62,13	69,84	25,00	25,00	38,12	76,80	2,20	1,50E+03	12
Objetivo por subconjunto			10,00	20,00	25,00	25,00	30,00	75,00			
card(i)	card(k)=(1+ x%) card(i)	card (k)	lmax arr	lmax apro	lmax accdice	lmax dice	lmax dep	lmax total		media	varianza
30	(0-0-0-0-0-1)	38	65,30	55,30	50,30	50,30	45,30	0,30		53,30	57,50
30	(1-1-1-1-1-1)	38	80,18	44,24	30,54	30,54	22,81	17,05		41,66	523,27
30	(0,25-0,25-0,25-0,25-0,25-1)	38	31,91	48,66	23,12	23,12	36,48	0,00		32,66	113,29
30	(1-0,25-0,25-0,25-1-0,25)	38	52,13	49,84	0,00	0,00	8,12	1,80		22,02	710,88

Tabla 26: Resultados con M4w para A3, $x=30\%$ y distintos valores de w

Estos resultados se muestran en dos gráficas en la que se representan los valores de R_{max} para cada subconjunto y objetivo total, comparado con los objetivos establecidos, y los valores del tiempo de diferencia entre los valores obtenidos y los valores objetivo para cada subconjunto y objetivo total.

Ilustración 35: Análisis de combinación de pesos: $R_{\max}$ total y por subconjunto

Ilustración 36: Análisis de combinación de pesos: idle I total y por subconjunto

Se alcanza el objetivo total para todos los w , excepto para w_2 . Se observa que en los objetivos intermedios el mejor w es w_4 , seguido de w_3 , w_2 y w_1 . El objetivo de la plataforma es el que en todos los casos queda más agrupado el resultado, y en los objetivos de acceso a deshielo y deshielo los resultados están menos agrupados. Se observa una tendencia descendente en la que la proximidad al objetivo disminuye a medida que va creciendo el tiempo del proceso.

La media aritmética de los valores resultado de I , tanto en subconjuntos como en valor total, corrobora los resultados observados, estableciendo un orden de calidad en la solución (de mejor a peor) que es el siguiente: w_4 , w_3 , w_2 y w_1 .

	Obj arr	Obj apron	Obj accdice	Obj dice	Obj dep	Obj total
media	52,22	48,99	29,75	29,75	29,32	3,83
varianza	447,6	16,9	394,4	394,4	204,8	55,2

Tabla 27: Media y varianza con M4w para A3, x=30% y distintos valores de w

5.7.3.5 Análisis de tiempos de resolución

Se ha realizado el análisis del comportamiento frente al tiempo de resolución en CPLEX del modelo M4w frente a card(i) para card(k) constante, y viceversa, frente a card(k) para card(i) constante.

- Comportamiento frente al tamaño del área de maniobras para número de saltos constante, con x%=50%.

Card(k) 50%		
	Card(i)	Time
A0	5	0:00:01
A1	12	0:16:40
A2	26	0:33:28
A3	30	1:23:33
A4	36	8:20:00

Tabla 28: Tiempos de resolución con M4w para Ax, x=50%

Ilustración 37: Tiempo de resolución frente a card(i) para x=50%

Siendo la línea de tendencia potencial de expresión $y = 3E-05x^{5,9556}$.

Se puede observar que para un crecimiento *cuasi* lineal del número de tramos del área de maniobras el tiempo de resolución sufre un incremento exponencial, para un valor de x% constante.

- Comportamiento frente al número de saltos para un tamaño del área de maniobras constante, con $\text{card}(i)=46$.

Card(i) 46 A3	
Card(k)	Time
0%	7 np
30%	17 0:33:30
40%	39 2:46:53
50%	46 1:23:33

Tabla 29: Tiempos de resolución con M4w para A3 en función de x%

Ilustración 38: Tiempo de resolución frente a $\text{card}(k)$ para A3 ($\text{card}(i)=46$)

Siendo la línea de tendencia lineal de expresión $y = 0,0267x - 0,017$.

Para un crecimiento *cuasi* lineal del número de saltos del convoy de descontaminación en la solución óptima, el tiempo de resolución sufre un incremento que se ha asociado a una tendencia lineal, para un tamaño de área de maniobras constante. Se haría necesario hacer mayor la muestra para aseverar que la tendencia es lineal.

5.7.3.6 Análisis específico de comportamiento de modelos frente a $R_{\max}$

Para finalizar, y dado que M1, M3w y M4w incluyen el parámetro $R_{\max}$ para el total del área de maniobras, se ha considerado comparar estos tres modelos para una función z común:

$$z = R_{\max}$$

particularizando M3w y M4w con el vector $w=(0, 0, 0, 0, 0, 1)$. Se ha parametrizado el análisis con el área de maniobras A3, $x\%=30\%$ y un tiempo de resolución de 2.000seg.

Los resultados obtenidos son los que se muestra en la siguiente tabla:

z=lmix			card(k)=(1+ 30%)-card(i) (A3 B=48,28) (time resolution = 2000 seg)								
card(i)	(warr,wapron)	card(k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º
30	(0-0-0-0-0-1)	30	75,30	75,30	75,30	75,30	75,30	75,30	0,01	1,50E+03	11
			lmax total	lmax arr	lmax dep	lmax dice	lmax apron	lmax accdice			
			0,00	np	np	np	np	np			
z=Rmax_mix			card(k)=(1+ 30%)-card(i) (A3 B=41,42) (time resolution = 2000 seg)								
card(i)	(warr,wapron)	card(k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º
30	(0-0-0-0-0-1)	30	75,55	75,55	75,55	75,55	75,55	75,55	1,81	1,30E+03	12
z=Rmax			card(k)=(1+ 30%)-card(i) (A3 B=41,42) (time resolution = 2000 seg)								
card(i)	(wtotal, warr)	card(k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º
30		30	92,05							1,70E+03	11

Tabla 30: Resultados en Rmax con M1, M3w y M4w para A3 y x%=30%

Como resumen:

2000seg		Rmax total	Sum Rj	#180º
z=lmix		75,30	1,50E+03	11
z=Rmax_mix		75,55	1,30E+03	12
z=Rmax		92,05	1,70E+03	11

Tabla 31: Tiempos de resolución con M4w para A3 en función de x% (resumen)

Se puede concluir que M1 es el modelo que peor solución aporta en cuanto al resultado clave $R_{\max}$ y ΣR_i^k .

El modelo M4w es el que mejor solución aporta en cuanto al resultado clave $R_{\max}$, y M3w respecto a ΣR_i^k , siendo su resultado en $R_{\max}$ también muy bueno.

Desde el punto de vista de la calidad en la operación, M4w es el modelo que mejor se comporta ya que el tiempo de resolución total máximo es menor y el número de giros el menor, igualado con M1.

5.8. Diez Conclusiones

- Conclusión 1: Para los modelos M1, M3w y M4w, que optimizan con $R_{\max}$, ya sea para el total del área de maniobras o para subconjuntos del mismo, el valor clave $R_{\max}$ tiene un comportamiento coherente, incrementado el valor con el número de tramos y el número de saltos del convoy de descontaminación. Para el valor clave ΣR_i^k , y a partir de áreas de maniobras con un tamaño del orden de 30 tramos, puede darse un comportamiento decreciente frente a incrementos del número de saltos.
- Conclusión 2: Para los modelos M3w y M4w, las soluciones son de mayor calidad operativa que para M1 y M2 debido a la reducción del número de giros de 180°. El comportamiento de las ecuaciones en la búsqueda de una solución óptima es mejor con la introducción de objetivos parciales.
- Conclusión 3: Para tamaños de áreas de maniobra superiores a 30 tramos el modelo M1 es el que peores resultados proporciona para $R_{\max}$, si bien, hasta ese tamaño, las soluciones que proporcionan todos los modelos son muy similares.
- Conclusión 4: Respecto al resultado clave #180°, el comportamiento de los modelos es muy homogéneo, observándose mayor calidad operativa para tamaños de área de

maniobras inferior a 20 si $x\%$ está en torno a 40%, para áreas de maniobra entre 20 y 30 $x\%$ se recomienda del 30%, y para tamaños superiores $x\%$ se recomienda del 50%.

- Conclusión 5: Respecto al resultado clave ΣR_i^k el comportamiento de los modelos es muy homogéneo.
- Conclusión 6: Cuanto mayor es el área de maniobras menos plano es el comportamiento de los modelos frente a $R_{\max}$ y ΣR_i^k . También se observa de forma global una penalización de la solución en tiempo con el incremento de $x\%$, es decir, del número de saltos de convoy de descontaminación, por tanto, hay que ir al $x\%$ menor posible. Pero no hay que olvidar la calidad operativa de la solución, reflejada en el número de giros de 180°.
- Conclusión 7: El tiempo de resolución en CPLEX para el modelo matemático M4w es lineal con el incremento de $x\%$, para $\text{card}(i)=\text{cte}$. Sin embargo dicho parámetro crece potencialmente frente a $\text{card}(i)$, para $x\%=\text{cte}$. Conclusiones similares se pueden extender al resto de modelos propuestos, analizando los datos de la tabla expuesta en el Anexo de simulaciones de RM_AM.
- Conclusión 8: Para el modelo M4w, se observa una dependencia de la variable *idle* l (como la diferencia entre la hora calculada y la hora estimada para el total del área de maniobras y cada subzona) con el tamaño del área de maniobras. Se aprecia que para áreas de maniobra con un tamaño hasta del orden de 30 tramos en la primera mitad del recorrido óptimo los *idles* son mayores que en la segunda mitad. La solución que se obtiene en cuanto a *idle* es muy buena para $x\%=30\%$ y $\text{card}(i)\sim 30$ tramos. Respecto a tamaños de áreas de maniobra superiores a 30 tramos, se mantiene la tendencia observada en cuanto a menor *idle* en la segunda mitad del recorrido óptima, salvo resultados aislados en algún subconjunto.
- Conclusión 9: Para M4w, con $x\%=50\%$ se obtienen resultados para todas áreas de maniobra con un tamaño entre 40 y 50 tramos, logro que el resto de modelos no ofrecen. Además M4w es el modelo que mejor se comporta en cuanto a $R_{\max}$ y calidad de la operación.
- Conclusión 10: para áreas de maniobra con tamaños superiores a 50 tramos, los tiempos de resolución se disparan, de forma potencial. Por tanto, se recomienda no superar este tamaño en el planteamiento de problemas aplicados a áreas de maniobra reales.

A continuación se propone una tabla resumen de las conclusiones.

Modelos	Variable $R_{\max}$	Variable ΣR_i^k	#180°	Card(i)	Card(k)	$t_{\text{resolution}}$ VS card(i)	$t_{\text{resolution}}$ VS card(k)
M1	**	*	*	Card(i) < 15	x% = 40-50% para card(i)<15 x% = 30% para card(i)≈30	Lineal	Potencial
M2	***	***	*	Card(i) < 15	x% = 40% para card(i)<15 30% para card(i)≈30		
M3w	****	****	*****	Card(i) < 30	x% = 40-50% para card(i)<15 x% = 40% para card(i)≈20 x% = 30% para card(i)≈30		
M4w	****	****	*****	Card(i) < 50	x% = 40%-50% para card(i)<15 x% = 30% para card(i)≈30		

Tabla 32: Tabla resumen de las conclusiones de las pruebas computacionales de los modelo M1, M2, M3w y M4w del problema RM_AM

Card(i): Tamaño del área de maniobras

Card(k): Número de saltos del convoy de descontaminación

x%: incremento del card(k) frente al ord (i), según expresión $\text{card}(k) = \text{card}(i) \cdot (1 + x\%)$

#180°: número de giros de 180° del convoy de descontaminación en la solución óptima.

$t_{\text{resolucion}}$: tiempo de resolución en CPLEX.

6. Metodología de resolución para el problema RM_AM

6.1. Propuesta de metodología para abordar el problema RM_AM

La metodología que se plantea es para la resolución del problema de la gestión de recursos de descontaminación en plan invernal en área de movimientos de un aeropuerto. El problema se denomina RM-AM. Se va a acometer el problema con el enfoque de la teoría del *scheduling*, considerando un equipo de retirada de la nieve que contamina las pistas y las calles de rodadura.

Se denomina a este problema:

$$1/ r_i, p_i, \delta_{ij}/\Sigma \omega_z l_z \text{ mix}$$

Dado un conjunto $J=(1, 2, \dots, n)$ de N nodos que componen el área de maniobras. Cada tramo entre nodo y nodo, corresponde con un tramo del área de maniobras que debe ser descontaminado de nieve, para dar servicio a un conjunto $I=(1, 2, \dots, z)$ de Z aeronaves que deben despegar / aterrizar / estacionar en un periodo de tiempo planificado. Por tanto, la cola de descontaminación de tramos forma un conjunto $J'=(i^1, i^2, \dots, i^k, i^{k+1}, \dots, i^m)$ de M elementos. Dada la compleja geometría del área de maniobras, puede haber tramos que se repitan con el fin de que todos los tramos sean descontaminados.

Se van a considerar H zonas significativas en el área de maniobras y que cada una de estas zonas significativas se corresponde con un subconjunto de tramos i del conjunto $J=(1, 2, \dots, n)$ de N tramos que componen el área de maniobras.

Cada subconjunto de puntos significativos está compuesto por uno o más tramos i , y forman H subconjuntos cuya unión $J' \subset J$. Sea el subconjunto J_z del conjunto $J'=(J_1, J_2, \dots, J_z, \dots, J_h)$. Sea el tramo t uno de los tramos pertenecientes al subconjunto $J_z=(1, 2, \dots, t, \dots, q_z)$. El subconjunto de tramos significativos J_z tiene q_z tramos del conjunto J y que sólo pertenecen a J_z , no perteneciendo a ningún otro subconjunto de puntos significativos del área de maniobras. Por tanto

$$J_1 \cup J_2 \cup \dots \cup J_z \cup \dots \cup J_h = J' \subset J$$

$$J_1=(1, 2, \dots, t, \dots, q_1) \subset J$$

$$J_2=(1, 2, \dots, t, \dots, q_2) \subset J$$

...

$$J_z=(1, 2, \dots, t, \dots, q_z) \subset J$$

...

$$J_h=(1, 2, \dots, t, \dots, q_h) \subset J$$

$$J_i \cap J_j = \emptyset \text{ con } i, j \in (1, 2, \dots, z, \dots, h)$$

Los H subconjuntos de puntos significativos que se proponen para un área de maniobras genérico son los siguientes:

- J_{RWY-Ai} : Subconjunto de tramos que componen la pista de aterrizaje i y las calles de salida rápida, hasta acceder a la plataforma.
- J_{RWY-Di} : Subconjunto de tramos que componen la pista de despegues i y las calles de acceso a cabecera, desde las plataformas de deshielo correspondientes.
- $J_{ZDe-icek}$: Subconjunto de tramos de la zona de deshielo k .
- J_{PLT} : Subconjunto de tramos de la plataforma de estacionamiento de aeronaves, compuesto por las *inners* de dicha plataforma.
- $J_{PLT-ZDe-icek}$: Subconjunto de tramos que dan acceso a la plataforma de deshielo k desde la salida de la plataforma de estacionamiento.

Se establecen horas objetivo en las zonas significativas del área de maniobras, como se ha explicado anteriormente:

1. r_{RWY-Ai} : hora estimada en que la pista de aterrizaje i queda operativa para las aeronaves.
2. r_{RWY-Di} : hora estimada en que la pista de despegues i queda operativa para las aeronaves.
3. $r_{ZDe-icek}$: hora estimada en que la zona de deshielo k queda operativa para las aeronaves.
4. r_{PLT} : hora estimada en que la plataforma queda operativa para el movimiento de aeronaves.
5. $r_{PLT-ZDe-icek}$: hora estimada en que el acceso de aeronaves desde la salida de la plataforma a la zona de deshielo k queda operativa.

De esta forma la gestión de equipos se hace orientado a descontaminar cuanto antes cada zona significativa. Estas horas de finalización intermedias en cada zona significativa son:

1. R_{RWY-Ai} : hora en que la pista de aterrizaje i queda operativa para las aeronaves.
2. R_{RWY-Di} : hora en que la pista de despegues i queda operativa para las aeronaves.
3. $R_{ZDe-icek}$: hora en que la zona de deshielo k queda operativa para las aeronaves.
4. R_{PLT} : hora en que la plataforma queda operativa para el movimiento de aeronaves.
5. $R_{PLT-ZDe-icek}$: hora en que el acceso de aeronaves desde la salida de la plataforma a la zona de deshielo k queda operativa.

Los datos son los que a continuación se detallan:

- Z_0 : hora a partir de la cual cada se inicia el proceso de descontaminación del área de maniobras.
- p_i : tiempo de descontaminación del tramo i , considerando los siguientes parámetros:
 - l_i : longitud del tramo i
 - v : velocidad del convoy de descontaminación. La tecnología está implícita en este parámetro de modelo, ya que el rendimiento de superficie descontaminada por unidad de tiempo depende de la velocidad v de avance.
 - Se ha considerado una velocidad de paso por cruce entre calles del orden de la mitad de la velocidad v a lo largo de una longitud de seguridad antes y después del cruce. Esto es debido a motivos de seguridad a la hora de abordar el cambio de calle por motivos de seguridad en la maniobra.

$$p_i = \frac{l_i - l_{seguridad}}{v} + \frac{l_{seguridad}}{v/2}$$

- δ_{ij} : función directriz con valor 1 si tramo j puede ser descontaminado después de i , 0 en el resto (tiene en cuenta la compatibilidad entre un tramo y otro, atendiendo a la continuidad del trazado).
- r_{total} : hora estimada en la que se queda descontaminado el área de maniobras.
- r_z : hora estimada de listo del subconjunto de tramos significativos z del área de maniobras.

Las variables del modelo son:

- x_{ij}^k : variable de decisión, donde $x_{ij}^k=1$ si el tramo i precede directamente a j en la posición k -ésima, $x_{ij}^k=0$ en otro caso;
- s_i^k : hora a la que se empieza a descontaminar el tramo i ;
- R_i^k : hora en que el tramo i está listo;
- R_{max} : hora máxima de finalización del proceso de descontaminación del área de maniobras.

- $R_{\max z}$: hora de listo del subconjunto z para cada conjunto de tramos significativos que integran dicho subconjunto.

$$R_z = \max\{R_1, R_2, \dots, R_{q_z}\} \quad \text{siendo } J_z = (1, 2, \dots, t, \dots, q_z) \subset J$$

- l_{total} : retraso en área de maniobras, definido como $l_{\text{total}} = R_{\max} - r_{\text{total}}$.
- l_z : retraso en el subconjunto de tramos significativos z del área de maniobras, definido como $l_z = R_{\max z} - r_z$.
- p_i^k : tiempo de descontaminación del tramo i en la posición k . Nótese que el tiempo hay tramos en que la descontaminación de nieve se puede hacer en una sola pasada y tramos, como las pistas, que requieren de varias pasadas y en distinta configuración de los equipos. Las ecuaciones del modelo deben ser capaces de descontaminar incluso aquellas calles de rodadura sin salidas, es decir, que son fondo de saco. En esos casos el tiempo de descontaminación es doble, pues el tramo hay que recorrerlo en el sentido de ida, hacer un giro de 180° , y recorrerlo en el sentido de vuelta. Pero el modelo también tiene libertad para aplicar dicha maniobra en tramos que son pasantes. Es por ello, que el tiempo de descontaminación de un tramo depende del tramo y la posición k que ocupe en la cola.

Se ha modelizado el giro mediante un arco de semicircunferencia de radio el radio de giro de los equipos de descontaminación, a una velocidad $v/2$. Luego:

- Para tramos i que en la posición k son pasantes:

$$p_i^k = p_i$$

- Para tramos i que en la posición k tiene un giro de 180° :

$$p_i^k = 2p_i + \frac{\pi R_{\text{giro}}}{v/2}$$

El modelo (M4w), que resuelven el problema

$$1/p_i, \delta_{ij}/\Sigma \omega_z l_z \text{ mix}$$

se plantea con la siguiente función objetivo:

$$z = \frac{1}{B_l} \left(\sum_{z=1}^h \omega_z l_z + \omega_{\text{total}} l_{\text{total}} \right) \quad (4.2)$$

con las siguientes restricciones:

$$\sum_{j=1}^n \delta_{ij} \cdot x_{ij}^k - \sum_{l=1}^n x_{lj}^{k-1} = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad k = 2, \dots, n \quad (1.2)$$

$$\sum_{j=1}^n \delta_{1j} \cdot x_{1j}^1 = 1 \quad (1.3)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^k \geq 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (1.4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^k = 1 \quad k = 1, \dots, n \quad (1.5)$$

$$s_j^{k+1} + BigM \geq R_i^k + BigM \cdot x_{ij}^k \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, n \quad i \neq j \quad (1.6)$$

$$R_i^k \leq R_{max} \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad (1.7)$$

$$R_i^k + BigM \geq s_i^k + p_i^k + BigM \cdot x_{ij}^k \quad i = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, m \quad i \neq j \quad (1.8)$$

$$p_i^k \geq p_i \quad i = 1, \dots, n \quad (1.9)$$

$$p_i^k + 2BigM \geq 2p_i + t_{pen_giro} + BigM \cdot (x_{li}^{k-1} + x_{ij}^k) \quad i = 1, \dots, n \quad k = 2, \dots, m \quad i \neq j \\ j, l = 1, \dots, n \quad \text{si } j = l \text{ ó } \delta_{lj} = 1 \quad (1.10)$$

$$s_1^1 \geq R_0 \quad j = 1, \dots, n \quad (1.11)$$

$$x_{ij}^k = 0 \quad i \in rwy \quad j = 1, \dots, n \quad k = m \quad i \neq j \quad (1.12)$$

$$R_t^k \leq R_{maxz} \quad z = 1, \dots, h \quad t = 1, \dots, q_z \quad k = 1, \dots, m \quad (3.13)$$

$$l_z \geq R_{maxz} - r_z \quad z = 1, \dots, h \quad (3.14a)$$

$$l_{total} \geq R_{max} - r_{total} \quad z = 1, \dots, h \quad (3.14b)$$

añadiendo

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k, \forall (i, j) \quad s_i^k, R_i^k, p_i^k \geq 0 \quad \forall k, \forall i \quad l_{total}, l_z \geq 0 \quad \forall z \\ 0 \leq \omega_i, \omega_{total} \leq 1 \quad R_{maxz}, R_{max}, Z_0 \geq 0 \\ r_{total}, r_z \geq 0 \quad y \quad R_z \geq 0 \quad z = 1, \dots, h$$

B_l es un parámetro que hace adimensionales cada uno de los sumandos que intervienen en la función objetivo (4.2). La expresión que define B_l es:

$$B_l = r_{total} - \sum_{i=1}^n p_i$$

para $z = 1, \dots, h$.

La restricción (1.2) asegura continuidad entre tramos. La restricción (1.3) impone que debe empezarse por el tramo 1 no existiendo restricción par al tramo de finalización. La restricción (1.4) impone que todos los tramos deben entrar en cola y además pueden hacerlo más de una vez. La restricción (1.5) obliga a que cada posición k sea un arco exactamente. La restricción (1.6) impone la separación entre dos tramos descontaminados sucesivos. Y la restricción (1.7) define el máximo tiempo en que los tramos son descontaminados. La inecuación (1.8) define R_i como la suma de s_i^k y p_i^k , cuando i precede a j en la posición k -ésima. La inecuación (1.9) impone que el tiempo de proceso mínimo de cada tramo i en la posición k -ésima como p_i , es decir, como si el tramo fuese pasante. La inecuación (1.10) contempla el caso en que el tramo se procese en el sentido de ida y de vuelta, es decir, en aquellos casos en el tramo j que continúa al

tramo i en la posición $k+1$ -ésima sea igual al tramo l que precede al tramo i en la posición $k-1$ ésima, o que j pertenezca al conjunto de tramos que contactan con l , esto es, $\delta_{lj} = 1$. La inecuación (1.11) obliga a que la hora de inicio del primer tramo l sea superior a la hora de inicio del plan invernal en área de maniobras R_0 . La inecuación (1.12) es una restricción operativa que establece que los tramos considerados pistas no deben ser los últimos en la cola de procesamiento de tramos, siendo rwy el subconjunto de tramos considerados pistas. La restricción (3.13) define $R_{\max z}$ para cada subconjunto z de tramos significativos. Las desigualdades (3.14a) y (3.14b) definen l_z para cada conjunto z de tramos significativos, y l_{total} para todo el área de maniobras, respectivamente.

Hasta aquí queda definido el problema para abordar de forma conjunta, considerando el áreas de maniobra completa. Pero atendiendo a las conclusiones obtenidas en el análisis de resultados, se propone un método de resolución que divide en W zonas el área de maniobras y establece tramos de conexión, que se conviertan en los puntos de inicio y fin de cada una de las zonas. Se van a considerar W zonas en el área de maniobras y que cada una de estas zonas se corresponde con un subconjunto de tramos i del conjunto $J=(1, 2, \dots, n)$ de N tramos que componen el área de maniobras.

Cada zona está compuesto por uno o más tramos i , y forman W subconjuntos cuya unión Z_n' es igual a J . Sea el subconjunto Z_n del conjunto $Z_n' = (Z_{n_1}, Z_{n_2}, \dots, Z_{n_z}, \dots, Z_{n_w}) = J$. Sea el tramo y uno de los tramos pertenecientes al subconjunto $Z_n=(1,2,\dots,y,\dots,p_z)$. La zona Z_n tiene p_z tramos del conjunto J y que sólo pertenecen a Z_n , no perteneciendo a ninguna otra zona del área de maniobras. Por tanto:

$$Z_{n_1} \cup Z_{n_2} \cup \dots \cup Z_{n_z} \cup \dots \cup Z_{n_h} = Z_n' = J \quad Z_{n_i} \cap Z_{n_j} = \emptyset \text{ con } i, j \in (1, 2, \dots, z, \dots, w)$$

Cada zona se inicia en el tramo l y finaliza a través de alguno de los tramos que tienen vértice común con el tramo l de la siguiente zona. Para cada zona, si llamamos nodo final a dicho vértice y *nodofin* al subconjunto de tramos que convergen en el nodo final, al inecuación que impone que el proceso de descontaminación de una zona finalice a través de algún tramo del subconjunto *nodofin* es la siguiente:

$$\sum_{i \in \text{nodofin}} \sum_{j=1}^n x_{ij}^k = 1 \quad i \in \text{nodofin} \quad k = m \quad (5.15)$$

Por tanto, la inecuación (5.15) sustituye a la inecuación (1.12) en todas las zonas menos en la última, en Z_{n_w} , y es una restricción operativa que establece que cada zona debe acabar a través de alguno de los tramos contenidos en el subconjunto de tramos *nodofin* que se define para cada una de las zonas.

Según los resultados obtenidos en el análisis de resultados el número de tramos de cada zona se recomienda que esté entre 30 y 40, no superando los 50 tramos.

Los subconjuntos de tramos objetivo deben estar íntegramente contenidos en alguna de las zonas en que se divide el área de maniobras, de forma que sólo se incluirá en cada resolución parcial aquel subconjunto afectado. Es decir, para cualquier $J_i = (1, 2, \dots, t, \dots, q_i) \subset J$, con $i \in (1, 2, \dots, z, \dots, h)$, se cumple que J_i pertenece a una única zona Z_{n_j} , con $j \in (1, 2, \dots, z, \dots, w)$.

La resolución se plantea mediante iteraciones sucesivas de aproximación a la solución final. En cada iteración se procesan las w zonas por orden: Zona 1, Zona 2, ..., Zona z , ..., Zona w .

El esquema del proceso de resolución es el siguiente:

Ilustración 39: Proceso para aplicación de la metodología de resolución propuesta para el problema RM-AM dentro de la teoría de scheduling

Datos:

Para cada zona, existen una serie de datos comunes, como son p_i , δ_{ij} , que son independientes de la iteración en que se encuentre el proceso. La primera zona comenzará con un origen de tiempos igual a 0 minutos. La siguiente zona situará el origen de tiempos en el $R_{\max}^{Zn1}$ de la Zn_1 , la siguiente en el $R_{\max}^{Zn2}$ de la Zn_2 , y así sucesivamente, de forma que en Zn_w $R_{\max}^{Znw}=R_{\max}$, que es el total del área de maniobras para la iteración en la que se encuentre el proceso. Y con cada iteración se ajustan los datos objetivo por cada subconjunto, aproximando dichos tiempos estimados a los resultados de la iteración anterior. Así, para la iteración In , los datos objetivo r_{total} , $r_{\text{RWY-Ai}}$, $r_{\text{RWY-Di}}$, $r_{\text{ZDe-icek}}$, r_{PLT} , $r_{\text{PLT-ZDe-icek}}$ se ajustan a los resultados de la iteración $In-1$ $R_{\text{RWY-Ai}}$, $R_{\text{RWY-Di}}$, $R_{\text{ZDe-icek}}$, R_{PLT} , $R_{\text{PLT-ZDe-icek}}$.

Variables:

Para cada zona, las variables resultado son s_i^k , R_i^k , p_i^k , x_{ij}^k y $R_{\max}$, más $R_{\max z}$ y l_z en los subconjuntos de tramos significativos contenidos en cada zona. El valor $R_{\max}$ de una zona es el origen de tiempos en la zona que continúa, como ya se ha comentado en *Datos*. Las variables resultado por una iteración In dada son $R_{\text{RWY-Ai}}$, $R_{\text{RWY-Di}}$, $R_{\text{ZDe-icek}}$, R_{PLT} , $R_{\text{PLT-ZDe-icek}}$ y $l_{\text{RWY-Ai}}$, $l_{\text{RWY-Di}}$, $l_{\text{ZDe-icek}}$, l_{PLT} y $l_{\text{PLT-ZDe-icek}}$, más las variables $R_{\max}^{ZnwIn}=R_{\max}^{In}$ y $l_{\text{total}}^{ZnwIn}=l_{\text{total}}^{In}$.

El proceso finaliza cuando en la iteración Iz no se mejoran los tiempos de la iteración $Iz-1$, siendo el resultado final el de la iteración Iz para las variables $R_{\text{RWY-Ai}}$, $R_{\text{RWY-Di}}$, $R_{\text{ZDe-icek}}$, R_{PLT} , $R_{\text{PLT-ZDe-icek}}$ y $l_{\text{RWY-Ai}}$, $l_{\text{RWY-Di}}$, $l_{\text{ZDe-icek}}$, l_{PLT} y $l_{\text{PLT-ZDe-icek}}$, más las variables $R_{\max}^{ZnwIz}=R_{\max}^{Iz}$ y $l_{\text{total}}^{ZnwIz}=l_{\text{total}}^{Iz}$.

6.2. Integración de los resultados de RM-AM en la secuencia AMAN y DMAN

La hora estimada de comienzo de limpieza es (ESCT) y hora estimada de fin de limpieza (EECT) que se irán actualizando con las horas reales de inicio (ASCT) y fin (AECT).

El Plan Invernal activa dos procesos, el RM-PLT y el RM-AM. Las estimada de comienzo para RM-PLT es $B_0 = ESCT_{PLT}$, y la estimada de RM-AM es $Z_0 = ESCT_{AM}$, de plataforma y área de maniobras respectivamente. Análogamente, las estimadas de finalización de cada proceso son $R_{max PLT} = EECT_{PLT}$ y $R_{max AM} = EECT_{AM}$.

Recordemos el planteamiento de estos problemas:

Ilustración 40: Planteamiento de los problemas RM-AM y RM-PLT

RM-PLT

Se solicita el listado de priorización de vuelos por parte de las compañías aéreas. Con los vuelos programados se hará una selección de los priorizados y orden de priorización aportada por la compañía. Se establece una lista definitiva de vuelos priorizados en salidas para los que se planificará la limpieza de m stands. Luego para el problema RM-PLT se conocen los tiempos estimados por las compañías de hora fuera de calzos EOBT. Esos tiempos son los tiempos objetivo r^k de estacionamiento k descontaminado de nieve.

Igualmente se conoce de AMAN las aeronaves que van a tomar tierra a partir de la activación del Plan Invernal. Por tanto se conocen los tiempos estimados de colocación de calzos EIBT. Estos tiempos para las llegadas también hay que incluirlos en la secuencia de limpieza de estacionamientos como tiempos objetivo r^k de estacionamiento k descontaminado de nieve, al igual que en las salidas.

La resolución del problema RM-PLT aporta una secuencia óptima de m estacionamientos a descontaminar por los z equipos de descontaminación de nieve en plataforma. Donde R_i^k es el tiempo estimado en la secuencia óptima en que el equipo i dejará listo el estacionamiento k . Donde se cumple:

$$B_0 = ESCT_{PLT} < B_i^k = B_{\text{para cada estacionamiento}} < EECT_{PLT} = B_{max}$$

RM-AM

Pero tanto para las llegadas como para las salidas, las aeronaves tienen que rodar desde pista de aterrizaje hasta el estacionamiento y desde el estacionamiento hasta la pista de despegues, respectivamente.

El problema RM-AM establece una secuencia óptima de descontaminación de las calles de rodadura y pistas del Aeropuerto para un equipo de descontaminación que se enfrenta a un área de maniobras de n tramos contaminados por nieve, y que descontamina en m saltos de tramo a tramo.

Esta actuación tiene por objetivos cumplir un tiempo máximo y total de descontaminación del área de maniobras asignada r_{total} . Pero además tiene unos objetivos parciales, en son los tiempos de finalización de la limpieza de los subconjuntos de tramos significativos del área de maniobras, que se pueden ir abriendo al tráfico a medida que se vayan descontaminando. Estos H subconjuntos son los subconjuntos J_{RWY-Ai} , J_{RWY-Di} , $J_{ZDe-icek}$, J_{PLT} , $J_{PLT-ZDe-icek}$ definidos en el apartado anterior.

A cada uno de los cuales les corresponde una hora objetivo de fin de descontaminación de nieve r_{RWY-Ai} , r_{RWY-Di} , $r_{ZDe-icek}$, r_{PLT} y $r_{PLT-ZDe-icek}$.

Se debe establecer una estrategia de prioridad en el orden de descontaminación. La estrategia que se propone en este estudio debe cumplir con que:

- I. El área de maniobras quede descontaminada en el menor tiempo posible.
- II. Las aeronaves en el aire puedan aterrizar lo antes posible, por tanto, que la pista de aterrizajes esté operativa (siendo el coeficiente de rozamiento el parámetro que valida la efectividad del tratamiento de descontaminación y posterior prevención).
- III. Las aeronaves que aterrizan dejen despejada la pista de aterrizajes, por tanto, que las aeronaves que aterricen puedan acceder a los estacionamientos.
- IV. Las aeronaves estacionadas puedan ponerse en marcha para dirigirse a través de la plataforma a los puntos de deshielo.
- V. Las aeronaves puedan acceder desde la salida de la plataforma a las plataformas de deshielo.
- VI. Las plataformas de deshielo estén operativas, y así aplicar el tratamiento que permita a las aeronaves tener los planos y superficies móviles en perfecto estado.
- VII. La pista de despegues esté operativa (siendo el coeficiente de rozamiento el parámetro que valida la efectividad del tratamiento de descontaminación y posterior prevención).

Por tanto, se parte de la hipótesis la siguiente relación en el establecimiento de los objetivos:

$$Z_0 = ESCT_{AM} < r_{RWY-Ai} < r_{RWY-Di} < r_{ZDe-icek} < r_{PLT} < r_{PLT-ZDe-icek} < EECT_{AM}$$

La resolución del problema RM-AM aporta una secuencia óptima de descontaminación de n tramos contaminados por nieve por un equipo de descontaminación en m saltos de tramo a tramo. Donde R_i^k es el tiempo estimado en la secuencia óptima en que el tramo i queda listo en el salto k . En dicha secuencia quedan establecidos los tiempos óptimos de descontaminación de los subconjuntos significativos R_{RWY-Ai} , R_{RWY-Di} , $R_{ZDe-icek}$, R_{PLT} , $R_{PLT-ZDe-icek}$ y del área de maniobras completa R_{max} . Se cumple la siguiente relación:

$$Z_0 = ESCT_{AM} < R_{RWY-Ai} < R_{ZDe-icek} < R_{PLT} < R_{PLT-ZDe-icek} < R_{RWY-Di} < EECT_{AM} = R_{max}$$

En la secuencia DMAN se integran los tiempos que aparecen a continuación, donde los resultados de los problemas RM-AM y RM-PLT aparecen como barreras de horas estimadas mínimas:

Estimadas	Fuera calzos	Rodadura hasta plataforma de deshielo	Deshielo	Rodadura hasta cabecera
TTOT	=	TOBT + EXOT _b	+ IDLE _{De-ice} + EDIT	+ EXOT _{bc}
TOBT	=	TOBT		
		>R _{PLT} >B _{estacionamiento}		
EIZT	=	TOBT + EXOT _b		
			>R _{R_{PLT}-ZDe-icek}	
EEZT	=	EIZT + IDLE _{De-ice} + EDIT		
				>R _{ZDe-icek}
TTOT	=		EEZT	+ EXOT _{bc}
				>R _{RWY-Di}

Ilustración 41: Integración de los resultados de RM-AM y RM-PLT en la definición de tiempos para integrar en la secuencia DMAN

Donde, para un vuelo de salida dado:

$EIZT$: Hora Estimada de entrada en la plataforma de deshielo

$EEZT$: Hora Estimada de finalización de deshielo negociada con la base

$IDLE_{De-ice}$: Tiempo hasta la hora de deshielo negociada con la base de deshielo

$EDIT$: Tiempo estimado de deshielo, incluyendo tiempo de espera hasta inicio del proceso

$EXOT_b$: Estimated taxi time-out to de-ice area. Tiempo estimado de rodadura de stand a salida a la plataforma de deshielo

$EXOT_{bc}$: Estimated taxi time-out from de-ice to departure runway. Tiempo estimado de rodadura de salida desde la plataforma de deshielo hasta la pista de salidas

$TOBT$: Target off blocks time. Hora objetivo de retirada de calzos

$TTOT$: Target take off time. Hora objetivo de despegue

La secuencia DMAN integra los tiempos en la secuencia de despegues, y devuelve, a partir de estos datos, una hora objetivo de despegue actualizada $TTOT$ y una hora objetivo aprobada de retirada de calzos $TSAT$, en la que se han integrado no sólo los deshielos de las vuelos programados, sino los tiempos resultado de los problemas RM-AM y RM-PLT, calculada como:

$$TSAT = TTOT - EXOT_b - IDLE_{De-ice} - EDIT - EXOT_{bc}$$

Con las restricciones de:

$$TTOT > R_{RWY-Di}$$

$$EEZT > R_{PLT-ZDe-icek}$$

$$EIZT > R_{ZDe-icek}$$

$$TSAT > \text{Max}(R_{PLT}, B_{estacionamiento})$$

Donde para un vuelo de salida dado:

TSAT: Target start-up approval time. Hora objetivo de puesta en marcha.

Para la secuencia AMAN, análogamente a los tiempos estimados anteriores, se integran los resultados de los problemas RM-AM y RM-PLT:

Estimadas	Aterrizaje	Rodadura hasta plataforma de estacionamiento
EIBT	=	ELDT + EXIT
ELDT	=	ELDT
EIBT	=	ELDT + EXIT

$> B_{\text{estacionamiento}}$
 $> R_{\text{PLT}}$

Ilustración 42: Integración de los resultados de RM-AM y RM-PLT en la definición de tiempos para integrar en la secuencia AMAN

Donde para un vuelo de llegada dado:

ELDT: Estimated landing time. Hora estimada de aterrizaje

EXIT: Estimated taxi in time. Tiempo estimado de rodadura en llegada desde la pista de aterrizaje hasta el estacionamiento

EIBT: Estimated in blocks time

La secuencia AMAN integra los tiempos en la secuencia de aterrizaje, y devuelve, a partir de estos datos, una hora objetivo de aterrizaje actualizada ELDT , a partir de la que se puede calcular una hora objetivo de colocación de calzos EIBT de la misma forma que se ha mostrado anteriormente, pero en la que se han integrado ya los tiempos resultado de los problemas RM-AM y RM-PLT.

Luego:

$$\text{EIBT} = \text{ELDT} + \text{EXIT}$$

Donde para un vuelo de llegada dado:

$$\text{TLDT} > \text{R}_{\text{RWY-Ai}}$$

$$EIBT > \text{Max} (R_{PLT}, B_{\text{estacionamiento}})$$

Dada la dualidad en el tratamiento de las secuencias de llegadas y salidas, podría pensarse en dividir la descontaminación de la plataforma, en una parte para los aterrizajes y otra parte para las llegadas. Sin embargo, desde el punto de vista operativo, ni el problema RM-AM ni en el RM-PLT esto es aconsejable, debido a que los estacionamientos que intervienen tanto en una secuencia como en otra no tienen un patrón de localización en función de si pertenecen a salidas o llegadas, estando distribuidos en la plataforma de estacionamiento.

7. Aplicación del modelo a un caso real: Área de movimiento T4S – Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid Barajas.

7.1. Modelización del área de maniobras.

7.1.1. Área de Maniobras completa.

Se va a considerar un área de maniobras basado en el del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, considerando la zona de la plataforma de la terminal T4S, y las pistas 14L-32R y 18L-36R en configuración Norte, es decir, con la 32R para aterrizajes y la 36R para despegues. El área de maniobras está compuesta por una plataforma, con estacionamientos en remoto y en fachada de terminal, y las dos pistas mencionadas en uso exclusivo para despegues y para aterrizajes. Se han tomado los ejes de calles de rodadura y pistas y se le ha asignado un número consecutivo a cada tramo. Los tramos están definidos por los puntos de intersección con otros tramos.

No se introduce la restricción del sentido de recorrido en los tramos a descontaminar, es decir, todos los tramos pueden ser descontaminados en uno u otro sentido. Esto es porque se parte de una situación de área de maniobras cerrada al tráfico de aeronaves, y cuya situación se va a revertir con la ejecución del plan invernal.³ Por tanto no es compatible en cada zona propuesta el tráfico de aeronaves con la ejecución del plan invernal.

En total el modelo está compuesto por 117 tramos. Nótese que hay tramos en que la descontaminación de nieve se puede hacer en una sola pasada y tramos, como las pistas, que requieren de varias pasadas y en distinta configuración de los equipos. Para calcular el rendimiento de los equipos se ha considerado la longitud del tramo con una velocidad de descontaminación de 40 km/h como velocidad de referencia de un equipo de descontaminación. Para todos los tramos se ha considerado una sola pasada, excepto para la pista que requiere cuatro. En cada tramo se ha supuesto un proceso de descontaminación a velocidad constante, que únicamente se ve distorsionado al comienzo y al final del tramo, donde la velocidad tiende a reducirse. Esta variación se ha considerado despreciable para el cálculo teórico. Se ha comparado este tiempo con simulaciones reales, para validar dichos rendimientos. En caso de que un equipo de descontaminación aplique otra velocidad, se adapta el rendimiento.

El proceso empieza en el tramo 1 y el código de colores de los subconjuntos de tramos significativos descrito en las pruebas computacionales se mantiene:

³ Si se quisiese compatibilizar la ejecución del plan invernal con el tráfico rodado, ya que se ejecutase dicho plan de contingencia como prevención a una degradación mayor de las condiciones de la operación en el área de maniobras, el equipo de descontaminación debe recorrer los tramos de forma compatible con el tráfico rodado, es decir, el sentido de recorrido de los tramos es una condición en la solución óptima del problema RM-AM. Esto es así porque el equipo de limpieza recorrería la ruta asignada como si se tratase de un tráfico rodado más. En dicho caso, la metodología propuesta es completamente válida ya que esta restricción del sentido de recorrido de cada tramo aparece en la definición del a función directriz δ_{ji} . La ruta óptima resultante de la aplicación de la metodología, sería compatible con el sentido de recorrido de cada tramo del área de maniobras para una configuración dada.

Subconjunto de tramos significativos	Color
Pistas	Rojo
Deshielo	Marrón
Tramos de acceso a puestos de estacionamiento	Verde
Tramos de acceso desde plataforma a deshielo	Azul

Tabla 33: código de colores para los subconjuntos de tramos significativos representados

La tabla con la denominación del tramo, el nombre de la calle de rodadura o pista, la longitud y p_i , que define tiempo de descontaminación del tramo i , junto con la tabla de compatibilidad entre tramos, se muestra a continuación de la ilustración 43.

Presentación de la configuración del área de maniobras empleada para las pruebas computacionales:

Tramos: 117
Longitud total: 36.289 m

Ilustración 43: Configuración del área de maniobras T4S empleada para las pruebas computacionales

Longitud de cada tramo:

ID_TRAMO	Nombre	SHAPE_Leng (m)	ρ_{ik} : Tiempo (min) con $v=40\text{Km/h}=666,7\text{m/min}$
i1	A24	80,0	0,12
i2	36R-18L	4.274,8	25,65
i3	A21	97,5	0,15
i4	A22	97,5	0,15
i5	A23	387,8	0,58
i6	32R-14L	3.512,4	21,07
i7	A25	173,9	0,26
i8	M21	97,5	0,15
i9	M22	97,4	0,15
i10	M23	387,8	0,58
i11	M24	80,0	0,12
i12	M25	173,9	0,26
i13	AM1	104,9	0,16
i14	M33	97,5	0,15
i15	M34	97,4	0,15
i16	EB1	104,9	0,16
i17	EC1	104,9	0,16
i18	B1	104,2	0,16
i19	B2	218,1	0,33
i20	B3	139,7	0,21
i21	B4	117,9	0,18
i22	B5	500,8	0,75
i23	B11_b	80,1	0,12
i24	B12	166,4	0,25
i25	B13	97,5	0,15
i26	N12	166,4	0,25
i27	KB2	128,1	0,19
i28	KC1	90,0	0,14
i29	KC2	223,2	0,33
i30	KA4	535,7	0,80
i31	KA5	370,6	0,56
i32	KA6	2.363,5	3,55
i33	K8	233,7	0,35
i34	AY_b	542,5	0,81
i35	Y5	655,9	0,98
i36	BY13	97,4	0,15
i37	A34	97,6	0,15
i38	EA1	105,0	0,16
i39	A26	658,9	0,99
i40	N1	104,9	0,16
i41	KA3_a	156,2	0,23

i42	A28	123,9	0,19
i43	A29	159,7	0,24
i44	KA1	90,0	0,13
i45	A30	211,6	0,32
i46	A31	216,9	0,33
i47	A32	97,4	0,15
i48	EC8	97,5	0,15
i49	A33	97,5	0,15
i50	N2	218,2	0,33
i51	N3	139,7	0,21
i52	G11	97,5	0,15
i53	BN1	97,5	0,15
i54	G12	97,5	0,15
i55	N4	117,9	0,18
i56	N5	500,8	0,75
i57	G13	97,5	0,15
i58	N6	316,3	0,47
i59	BN3	97,5	0,15
i60	KB1	90,0	0,13
i61	KA7	193,5	0,29
i62	Y3	272,5	0,41
i63	Y2	272,2	0,41
i64	Y1	369,7	0,55
i65	AM3	89,9	0,13
i66	N13	97,5	0,15
i67	NY13	93,1	0,14
i68	M32	97,7	0,15
i69	B8	490,5	0,74
i70	B9	97,5	0,15
i71	Y4	571,3	0,86
i72	B10	387,8	0,58
i73	BY11	115,7	0,17
i74	BY12	169,9	0,25
i75	EC9	83,9	0,13
i76	K2	211,7	0,32
i77	KA2	204,8	0,31
i78	K3	317,8	0,48
i79	K1	317,3	0,48
i80	K4	582,5	0,87
i81	K5	628,4	0,94
i82	K7	463,6	0,70
i83	M27	483,3	0,72
i84	M28	123,8	0,19
i85	M29	159,8	0,24
i86	M30	211,6	0,32

i87	M31	217,1	0,33
i88	EB7	97,4	0,15
i89	NY11	80,0	0,12
i90	N10	387,8	0,58
i91	EA6	316,3	0,47
i92	EA5	500,8	0,75
i93	EA2	218,2	0,33
i94	EB2	766,9	1,15
i95	EB6	428,5	0,64
i96	G14	80,0	0,12
i97	EC6	428,6	0,64
i98	GATE14	173,9	0,26
i99	EC2	766,9	1,15
i100	N9	97,4	0,15
i101	NY12	170,7	0,26
i102	EA7	97,4	0,15
i103	GATE13	97,4	0,15
i104	GATE12	97,5	0,15
i105	GATE11	97,4	0,15
i106	N11	80,0	0,12
i107	EB8	97,4	0,15
i108	EC7	97,2	0,15
i109		97,5	0,15
i110		483,4	0,73
i111		628,7	0,94
i112		207,4	0,31
i113		458,2	0,69
i114		584,7	0,88
i115		515,2	0,77
i116		1,0	0,00
i117		1,0	0,00

Matriz tramoic_{ic} de tramos compatibles:

ID_TRAMO	Nombre	Compatibilidad de tramos							
		c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
i1	A24	5	7	16	17				
i2	36R-18L	116							
i3	A21	4	18	40					
i4	A22	3	5	38	40				
i5	A23	4	1	16	38				
i6	32R-14L	117							
i7	A25	1	13	17	39				
i8	M21	9	18	19	40	50			

i9	M22	8	10	38	40	50	93		
i10	M23	9	11	16	38	93	94		
i11	M24	10	12	16	17	94	99		
i12	M25	11	13	17	83	99			
i13	AM1	7	12	39	83				
i14	M33	15	24	25	26	66	68		
i15	M34	14	24	25	36	74			
i16	EB1	1	5	10	11	94			
i17	EC1	1	7	11	12	99			
i18	B1	3	8	19					
i19	B2	8	18	20	52				
i20	B3	19	21	52	53				
i21	B4	20	22	53	54				
i22	B5	21	69	54	57				
i23	B11_b	24	48	72	73	75	107		
i24	B12	14	15	23	25	48	75		
i25	B13	14	15	24	37	49	62		
i26	N12	14	48	66	68	106	108		
i27	KB2	41	42	43	60	76	77	78	
i28	KC1	29	39	42	83	84			
i29	KC2	28	30	39	41	42	80		
i30	KA4	29	31	41	80	81			
i31	KA5	30	32	81					
i32	KA6	31	61	82					
i33	K8	61	115						
i34	AY_b	35	36	37	71				
i35	Y5	34	111						
i36	BY13	15	34	37	71	74			
i37	A34	25	34	36	49	62	71		
i38	EA1	4	5	9	10	93			
i39	A26	7	13	28	29	42			
i40	N1	3	4	8	9	50			
i41	KA3_a	27	29	30	76	77	78	80	
i42	A28	27	28	29	39	43	60		
i43	A29	27	42	44	45	60	77	79	
i44	KA1	43	45	77	79	85	86	98	
i45	A30	43	44	46	65	77	79		
i46	A31	45	47	64	65	67			
i47	A32	46	49	63	64	66	67		
i48	EC8	23	24	26	75	106	108		
i49	A33	25	37	47	62	63	66		
i50	N2	8	9	40	51	52	105		
i51	N3	50	52	53	55	505			
i52	G11	19	20	50	51	105			
i53	BN1	20	21	51	55				

i54	G12	21	22	55	56	104			
i55	N4	51	53	54	56	104			
i56	N5	54	55	57	58	103	104		
i57	G13	22	56	58	69	103			
i58	N6	56	57	59	100	103			
i59	BN3	58	69	70	100				
i60	KB1	27	42	43	84	85			
i61	KA7	32	33	82					
i62	Y3	25	37	49	109	110			
i63	Y2	47	49	64	66	109	116		
i64	Y1	46	47	63	67	109	116		
i65	AM3	45	46	86	87				
i66	N13	14	26	47	49	63	68		
i67	NY13	46	47	64	68	87	101		
i68	M32	14	26	66	67	87	101		
i69	B8	22	57	59	70				
i70	B9	59	69	72	102				
i71	Y4	34	36	37	110	111			
i72	B10	23	70	73	102	107			
i73	BY11	23	72	74	75	107			
i74	BY12	15	36	73	75				
i75	EC9	23	24	48	73	74			
i76	K2	27	41	77	78	79	112	117	
i77	KA2	27	41	43	44	45	76	78	79
i78	K3	27	41	76	77	112	113		
i79	K1	43	44	76	77	45	112	117	
i80	K4	29	30	41	113	114			
i81	K5	30	31	114					
i82	K7	32	61	115					
i83	M27	12	13	28	84				
i84	M28	28	60	83	85				
i85	M29	44	60	84	86	98			
i86	M30	44	65	85	87	98			
i87	M31	65	67	68	86	101			
i88	EB7	89	90	95	106	107			
i89	NY11	88	95	97	101	108			
i90	N10	88	91	100	102	106	107		
i91	EA6	90	92	100	102	103			
i92	EA5	91	103	104					
i93	EA2	9	10	38	105				
i94	EB2	10	11	16	95	96			
i95	EB6	88	89	94	96				
i96	G14	94	95	97	98	99			
i97	EC6	89	96	98	99	101	108		
i98	GATE14	44	85	86	96	97	99		

i99	EC2	11	12	17	96	97	98		
i100	N9	58	59	90	91	102			
i101	NY12	67	68	87	89	97	108		
i102	EA7	70	72	90	91	100			
i103	GATE13	56	57	58	91	92			
i104	GATE12	54	55	56	92				
i105	GATE11	50	51	52	93				
i106	N11	26	48	88	90	107	108		
i107	EB8	23	72	73	88	90	106		
i108	EC7	26	48	89	97	101	106		
i109		62	63	64	110	116			
i110		62	71	109	111				
i111		35	71	110					
i112		76	78	79	113	117			
i113		78	80	112	114				
i114		80	81	113					
i115		33	82						
i116		2	63	64	109				
i117		6	76	79	112				

Como se ha explicado en las conclusiones del análisis de resultados, a través del análisis de tiempos en función del tamaño del área de maniobras realizado en este estudio, el modelo creado requiere de un largo tiempo de cálculo en un equipo con unas características muy especiales y exigentes.

Como se ha comprobado en este estudio, el tamaño óptimo del área de maniobras ($\text{card}(i)$) para el análisis está en un rango entre 20 y 50 elementos. Por tanto, siguiendo la metodología propuesta de resolución, se ha optado por subdividir el área de maniobras en tres partes, obligando en la resolución a entrar y salir por puntos determinados o nodos de enlace.

7.1.2. Área de Maniobras por zonas

Ilustración 44: Configuración del área de maniobras T4S empleada para las pruebas computacionales por zonas

7.1.2.1 Zona 1

Presentación de la configuración de la Zona 1:

Longitud de cada tramo:

ID_TRAMO	ID_TWY	SHAPE_Leng (m)
i1	A28	123,9
i2	K1	317,3
i3	i3	1,0
i4	i4	207,4
i5	K2	211,7
i6	K3	317,8
i7	32R-14L	3.512,4
i8	KA2	204,8
i9	A29	159,7
i10	KB2	128,1
i11	M29	159,8
i12	KB1	90,0
i13	M28	123,8
i14	KC1	90,0
i15	KA1	90,0
i16	KC2	223,2
i17	KA3_a	156,2
i18	i18	458,2
i19	K4	582,5
Total	Zona 1	7.157,8

Matriz tramoic_{ic} de tramos compatibles:

ID_TRAMO	Compatibilidad de tramos						
	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7
i1	9	10	12	14	16		
i2	3	4	5	8	9	15	
i3	2	4	5	7			
i4	2	3	5	6	18		
i5	2	3	4	6	8	10	17
i6	4	5	8	10	17	18	
i7	3						
i8	2	5	6	9	10	15	17
i9	1	2	8	10	12	15	
i10	1	5	6	8	9	12	17
i11	12	13	15				
i12	1	9	10	11	13		
i13	11	12	14				
i14	1	13	16				
i15	2	8	9	11			
i16	1	9	14	17			
i17	5	6	8	10	16	19	
i18	4	6	19				
i19	17	18					

Subconjunto $rw_y = (7)$

Subconjunto $nodofinal = (11, 15)$

7.1.2.1 Zona 2

Presentación de la configuración de la Zona 2:

Longitud de cada tramo:

ID_TRAMO	ID_TWY	SHAPE_Leng (m)
i1	M25-M27	657,2
i2	EB2	766,9
i3	EC2	766,9
i4	M28-M29	283,6
i5	G14	80,0
i6	GATE14	173,9
i7	KA1	90,0
i8	AM3	89,9
i9	KC1	90,0
i10	M24	80,0
i11	EB6	428,5
i12	EC6	428,6
i13	M31	217,1
i14	A31	216,9
i15	EB7	97,4
i16	NY11	80,0
i17	Y1-2	184,9
i18	NY13	93,1
i19	EB8	97,4
i20	i20	2.263,4
i21	i21	6.079,0
i22	M30	211,6
i23	A30	211,6
Total	Zona 2	13.264,8

Matriz tramoic_{ic} de tramos compatibles:

ID_TRAMO	Compatibilidad de tramos					
	c1	c2	c3	c4	c5	c6
i1	4	9	10	3		
i2	5	10	11	20		
i3	1	5	6	10	12	
i4	1	6	7	9	22	
i5	2	3	6	11	12	
i6	3	4	5	7	12	22
i7	4	6	22	23		
i8	13	14	22	23		
i9	1	4	21			
i10	1	2	3	20		
i11	2	5	15	16		
i12	3	5	6	16	17	
i13	8	17	18	22		
i14	8	18	23			
i15	11	16	19	20		
i16	11	12	15	17		
i17	12	13	16	18		
i18	13	14	17			
i19	15	20	21			
i20	2	10	15	19		
i21	9	19				
i22	4	6	7	8	13	
i23	7	8	14			

Subconjunto $\text{nodofinal} = (13, 17, 18)$

7.1.2.1 Zona 3

Presentación de la configuración de la Zona 3:

Longitud de cada tramo:

ID_TRAMO	ID_TWY	SHAPE_Leng (m)
i1	M32	97,7
i2	M33	97,5
i3	B13	97,5
i4	A32	97,4
i5	A33	97,5
i6	B12	166,4
i7	EC8	97,5
i8	EC7	97,2
i9	Y1-2	184,9
i10	NY12	170,7
i11	N13	97,5
i12	NY13	93,1
i13	Y1	369,7
i14	Y2	272,2
i15	B11_b	80,1
i16	BY12	169,9
i17	BY13	97,4
i18	Y4	571,3
i19	Y1-1	184,9
i20	i20	97,5
i21	i21	483,4
i22	A34	97,6
i23	M34	97,4
i24	EC9	83,9
i25	BY11	115,7
i26	B11_b	80,1
i27	i27	1,0
i28	EB8	97,4
i29	36R-18L	4.274,8
i30	N11	80,0
Total	Zona 3	8.649,0

Matriz tramoic_{ic} de tramos compatibles:

ID_TRAMO	Compatibilidad de tramos					
	c1	c2	c3	c4	c5	c6
i1	2	9	10	11	12	
i2	1	3	6	10	11	23
i3	2	5	6	15	22	23
i4	5	11	12	13	14	
i5	3	4	11	14	15	22
i6	2	3	7	23	24	26
i7	6	8	10	24	26	30
i8	7	9	10	30		
i9	1	8	12			
i10	1	2	8	7	11	30
i11	1	2	4	5	10	14
i12	1	9	4	13		
i13	4	12	19	27		
i14	4	5	11	19	20	
i15	3	5	20	21	22	
i16	17	23	24	25		
i17	16	18	22	23		
i18	17	21	22			
i19	13	14	20	27		
i20	14	15	19	21		
i21	15	18	20			
i22	3	5	15	17	18	
i23	2	3	6	16	17	
i24	6	7	16	25	26	
i25	16	24	26	28		
i26	6	7	24	25	28	
i27	13	19	29			
i28	25	26	30			
i29	27					
i30	7	8	10	28		

Subconjunto $\text{rwy} = (29)$

7.2. Particularización de la metodología de resolución

Para la aplicación del método de resolución, y atendiendo a las conclusiones obtenidas en el análisis del método, se ha procedido a resolver mediante iteraciones sucesivas de aproximación a la solución final. En cada iteración se procesan las tres zonas presentadas en el apartado *Área de Maniobras por Zonas*: Zona 1, Zona 2 y Zona 3. Se han realizado tres iteraciones. En el análisis de resultados obtenidos se explicará por qué se han realizado tres iteraciones.

Dada la geometría del área de maniobras los H subconjuntos de puntos significativos se han particularizado en cinco subconjuntos. Sólo se ha considerado una pista de llegadas, una pista de aterrizajes, una plataforma de deshielo, y por tanto, un solo subconjunto de tramos de acceso a la zona de deshielo desde la plataforma, y una plataforma.

$$\begin{array}{ll}
 J_{RWY-Ai} \text{ (para } i=1) = & J_{arr} = (2, 3, 6, 7, 10, 12, 14, 15, 16, 19)|_{Zn1} \subset Zn_1 \\
 J_{PLT} = & J_{apron} = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 20)|_{Zn2} \subset Zn_2 \\
 J_{PLT-ZDe-icek} \text{ (para } k=1) = & J_{accdice} = (7, 8, 24, 25, 26, 28, 30)|_{Zn3} \subset Zn_3 \\
 J_{ZDe-icek} \text{ (para } k=1) = & J_{dice} = (6, 10, 16)|_{Zn3} \subset Zn_3 \\
 J_{RWY-Di} \text{ (para } i=1) = & J_{dep} = (3, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 27, 29)|_{Zn3} \subset Zn_3
 \end{array}$$

El esquema del proceso de resolución es el siguiente, particularizando la metodología propuesta para tres zonas y tres iteraciones:

Ilustración 45: Proceso de la metodología de resolución particularizada para el área de maniobras de T4S

7.3. Resultados

A continuación se muestran los objetivos y los resultados obtenidos en cada iteración, es decir, la hora objetivo r , la hora máxima de finalización $R_{\max}$ y el *idle* l para cada subconjunto de tramos significativo y para el total del área de maniobras T4S.

Los resultados aparecen en el *Anexo de las simulaciones RM_AM: Simulación T4S* que acompaña a este estudio, en los siguientes apartados:

ANEXO IV: DATOS DE SIMULACIONES RM_AM. SIMULACIÓN T4S

Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Iteración 1

Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Iteración 2

Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Iteración 3

Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Ficheros de programación *.gms

Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Ficheros de salidas de datos *.out

Respecto a la programación, los ficheros tienen dos partes diferenciadas. Una primera parte, que afecta a:

- Opciones de configuración de GAMS para la resolución
- Programación para mostrar resultados
- Creación del fichero de salida de datos *.out

Y otra segunda parte referente a:

- Programación de los modelos matemáticos: datos, variables y ecuaciones.

Toda esta documentación se muestra en el siguiente Anexo para el área de maniobras T4S:

ANEXO IV: DATOS DE SIMULACIONES RM_AM. SIMULACIÓN T4S

Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S programación modelos para área de maniobras T4S

En una primera aproximación, con la iteración 1, se ha aplicado un tiempo máximo de resolución de 1000 seg. Posteriormente, en las iteraciones 2 y 3, se han empleado tiempos de resolución suficientes, de 3000 seg.

Indicar que en que los resultados que mejoran de una iteración están indicados con el color verde, mientras que los que empeoran se indican en rojo.

7.3.1. Iteración 1

En T4S los valores de $R_{\max}$, r y l para los subconjuntos de tramos significativos son:

	$R_{\max}$	r	$l_{\max}$
arr	29,89	12,00	17,89
apron	59,01	41,22	17,79
accdice	69,01	64,55	4,46
dice	69,01	69,01	0,00
dep	102,97	84,11	18,86
total	103,23	94,01	9,22

Tabla 34: Valores en It1 de $R_{\max}$, r y l para los subconjuntos de tramos significativos

Ilustración 46: Gestión de tiempos de descontaminación T4S en Iteración 1

Se puede observar cómo para el total de T4S así como para el subconjunto de tramos de acceso a deshielo y en la zona de deshielo, los tiempos obtenidos son muy buenos comparados con los objetivos propuestos.

A continuación se muestra para cada zona, la secuencia de tramos i que el equipo de descontaminación recorre, así como la posición k en que cada tramo es descontaminado. También se muestra el tramo j que sigue al tramo i en la secuencia, el tiempo de inicio de descontaminación de cada tramo i en la posición k s_i^k , el tiempo de finalización de descontaminación de cada tramo i en la posición k R_i^k , el tiempo de proceso de cada tramo i descontaminado en la posición k p_i^k , y el tiempo estándar de descontaminación del tramo i p_i si el equipo de descontaminación lo recorriese un sola vez en un solo sentido. Cuando p_i^k y p_i difieren, significa que el equipo de descontaminación hace un giro de 180° para continuar la secuencia óptima. Obsérvese que los resultados resaltados son para cada zona los valores de Z_0 , y de $R_{\max}$, hora de inicio y de finalización de cada zona.

Resolución Zona 1 Iteración 1 (tiempo de resolución 1000 seg):

k	i	j	s_i^k	R_i^k	p_i^k	p_i
1	1	10	0.00	0.31	0.31	0.31
2	10	5	0.31	0.62	0.31	0.31
3	5	3	0.62	1.06	0.44	0.44
4	3	7	1.06	1.18	0.12	0.12
5	7	3	1.18	22.49	21.31	10.66
6	3	2	22.49	22.61	0.12	0.12
7	2	15	22.61	23.21	0.60	0.60
8	15	8	23.21	23.72	0.51	0.25
9	8	6	23.72	24.14	0.43	0.43
10	6	4	24.14	24.74	0.60	0.60
11	4	3	24.74	25.17	0.43	0.43
12	3	4	25.17	25.42	0.24	0.12
13	4	8	25.42	25.85	0.43	0.43
14	18	19	25.85	26.65	0.81	0.81
15	19	17	26.65	27.65	0.99	0.99
16	17	16	27.65	28.00	0.35	0.35
17	16	14	28.00	28.46	0.45	0.45
18	14	13	28.46	28.71	0.25	0.25
19	13	12	28.71	29.02	0.31	0.31
20	12	9	29.02	29.27	0.25	0.25
21	9	15	29.27	29.63	0.36	0.36
22	15	11	29.63	29.89	0.25	0.25
23	11	13	29.89	30.25	0.36	0.36
24	13	11	30.25	30.86	0.61	0.31
25	11	15	30.86	31.22	0.36	0.36

Resolución Zona 2 Iteración 1 (tiempo de resolución 1000 seg):

k	i	j	s_i^k	R_i^k	p_i^k	p_i
1	1	3	31.22	32.33	1.11	1.11
2	3	5	32.33	33.60	1.27	1.27
3	5	6	33.60	34.08	0.48	0.24
4	6	7	34.08	34.46	0.38	0.38
5	7	6	34.46	34.97	0.51	0.25
6	6	5	34.97	35.35	0.38	0.38
7	5	6	35.35	35.83	0.48	0.24
8	6	7	35.83	36.21	0.38	0.38
9	7	23	36.21	36.46	0.25	0.25
10	23	14	36.46	36.90	0.44	0.44
11	14	8	36.90	37.79	0.89	0.45
12	8	22	37.79	38.05	0.25	0.25
13	22	6	38.05	38.48	0.44	0.44
14	6	5	38.48	38.86	0.38	0.38
15	5	2	38.86	39.10	0.24	0.24
16	2	10	39.10	40.37	1.27	1.27
17	10	20	40.37	40.85	0.48	0.24
18	20	15	40.85	44.37	3.51	3.51
19	15	11	44.37	44.64	0.27	0.27
20	11	5	44.64	45.40	0.76	0.76
21	5	12	45.40	45.64	0.24	0.24
22	12	16	45.64	46.40	0.76	0.76
23	16	15	46.40	46.64	0.24	0.24
24	15	19	46.64	46.91	0.27	0.27
25	19	21	46.91	47.17	0.27	0.27
26	21	9	47.17	56.41	9.24	9.24
27	9	4	56.41	56.67	0.25	0.25
28	4	22	56.67	57.21	0.55	0.55
29	22	13	57.21	57.65	0.44	0.44
30	13	18	57.65	58.09	0.45	0.45
31	18	17	58.09	58.61	0.52	0.26
32	17	16	58.61	59.01	0.40	0.40

Resolución Zona 3 Iteración 1 (tiempo de resolución 1000 seg):

k	i	j	s_i^k	R_i^k	p_i^k	p_i
1	1	2	59.01	59.28	0.27	0.27
2	2	23	59.28	59.54	0.27	0.27
3	23	16	59.54	59.81	0.27	0.27
4	16	24	59.81	60.18	0.37	0.37
5	24	25	60.18	60.68	0.49	0.25
6	25	26	60.68	61.26	0.59	0.29
7	26	28	61.26	61.74	0.48	0.24
8	28	30	61.74	62.01	0.27	0.27
9	30	7	62.01	62.25	0.24	0.24
10	7	10	62.25	62.78	0.53	0.27
11	10	1	62.78	63.16	0.38	0.38
12	1	12	63.16	63.42	0.27	0.27
13	12	4	63.42	63.68	0.26	0.26
14	4	14	63.68	63.95	0.27	0.27
15	14	5	63.95	65.01	1.06	0.53
16	5	22	65.01	65.27	0.27	0.27
17	22	15	65.27	65.81	0.53	0.27
18	15	3	65.81	66.29	0.48	0.24
19	3	23	66.29	66.55	0.27	0.27
20	23	6	66.55	67.08	0.53	0.27
21	6	7	67.08	67.45	0.37	0.37
22	7	30	67.45	67.72	0.27	0.27
23	30	8	67.72	68.20	0.48	0.24
24	8	9	68.20	68.47	0.27	0.27
25	9	1	68.47	68.86	0.40	0.40
26	1	11	68.86	69.13	0.27	0.27
27	11	4	69.13	69.40	0.27	0.27
28	4	14	69.40	69.93	0.53	0.27
29	14	20	69.93	70.46	0.53	0.53
30	20	19	70.46	70.99	0.53	0.27
31	19	13	70.99	71.39	0.40	0.40
32	13	27	71.39	72.73	1.35	0.67
33	27	29	72.73	72.86	0.12	0.12
34	29	27	72.86	98.74	25.89	12.94
35	27	13	98.74	98.87	0.12	0.12
36	13	19	98.87	100.21	1.35	0.67
37	19	20	100.21	100.61	0.40	0.40
38	20	21	100.61	100.88	0.27	0.27
39	21	18	100.88	101.72	0.85	0.85
40	18	17	101.72	102.70	0.98	0.98
41	17	23	102.70	102.97	0.27	0.27
42	23	6	102.97	103.23	0.27	0.27

7.3.1. Iteración 2

En la iteración 2 se han rectificado los valores objetivo en todas las zonas, a excepción de la zona de la pista de llegadas y la plataforma de estacionamientos, que quedan igual. Se puede observar en los resultados que todos los valores mejoran, a excepción de la zona de la pista de llegadas, en la que se mantienen los resultados, como es lógico ya que se mantuvo el objetivo, y en las zonas de acceso a deshielo y deshielo, en las que a pesar de mejorar $R_{\max}$ accdice y $R_{\max}$ dice, el *idle* entre $R_{\max}$ y el objetivo *r* empeora.

	Rmax	r	lmax
arr	29,89	12,00	17,89
apron	56,99	41,22	15,77
accdice	68,99	63,13	5,86
dice	68,99	68,13	0,86
dep	99,27	83,13	16,14
total	99,93	93,13	6,80

Tabla 35: Valores en It2 de Rmax, r y l para los subconjuntos de tramos significativos

Ilustración 47: Gestión de tiempos de descontaminación T4S en Iteración 2

Se puede observar de nuevo cómo para el total de T4S así como para el subconjunto de tramos de acceso a deshielo y en la zona de deshielo, los tiempos obtenidos son los mejores comparados con los objetivos propuestos.

A continuación se muestra para cada zona la secuencia de tramos i y la posición k en que cada tramo es descontaminado, s_i^k , R_i^k , p_i^k y p_i . Se han resaltado para cada zona los valores de Z_0 , y de $R_{\max}$, hora de inicio de finalización de cada zona.

Resolución Zona 1 Iteración 2 (tiempo de resolución 1000 seg):

Es la misma simulación que para la Zona 1 en la Iteración 1.

Resolución Zona 2 Iteración 2 (tiempo de resolución 3000 seg):

k	i	j	s_i^k	R_i^k	p_i^k	p_i
1	1	3	31.22	32.33	1.11	1.11
2	3	5	32.33	33.60	1.27	1.27
3	5	6	33.60	34.08	0.48	0.24
4	6	22	34.08	34.46	0.38	0.38
5	22	13	34.46	34.89	0.44	0.44
6	13	17	34.89	35.34	0.45	0.45
7	17	16	35.34	35.74	0.40	0.40
8	16	17	35.74	36.22	0.48	0.24
9	17	13	36.22	36.61	0.40	0.40
10	13	8	36.61	37.06	0.45	0.45
11	8	23	37.06	37.31	0.25	0.25
12	23	7	37.31	37.75	0.44	0.44
13	7	6	37.75	38.01	0.25	0.25
14	6	5	38.01	38.39	0.38	0.38
15	5	2	38.39	38.63	0.24	0.24
16	2	10	38.63	39.90	1.27	1.27
17	10	20	39.90	40.38	0.48	0.24
18	20	15	40.38	43.89	3.51	3.51
19	15	11	43.89	44.16	0.27	0.27
20	11	5	44.16	44.92	0.76	0.76
21	5	12	44.92	45.16	0.24	0.24
22	12	16	45.16	45.92	0.76	0.76
23	16	15	45.92	46.16	0.24	0.24
24	15	19	46.16	46.43	0.27	0.27
25	19	21	46.43	46.70	0.27	0.27
26	21	9	46.70	55.94	9.24	9.24
27	9	4	55.94	56.19	0.25	0.25
28	4	7	56.19	56.74	0.55	0.55
29	7	23	56.74	56.99	0.25	0.25
30	23	14	56.99	57.43	0.44	0.44
31	14	18	57.43	57.87	0.45	0.45
32	18	13	57.87	58.13	0.26	0.26

Resolución Zona 3 Iteración 2 (tiempo de resolución 3000 seg):

k	i	j	s_i^k	R_i^k	p_i^k	p_i
1	1	11	58.13	58.40	0.27	0.27
2	11	14	58.40	58.66	0.27	0.27
3	14	20	58.66	59.19	0.53	0.53
4	20	21	59.19	59.46	0.27	0.27
5	21	18	59.46	60.30	0.85	0.85
6	18	22	60.30	61.28	0.98	0.98
7	22	3	61.28	61.55	0.27	0.27
8	3	2	61.55	61.81	0.27	0.27
9	2	10	61.81	62.08	0.27	0.27
10	10	7	62.08	62.45	0.38	0.38
11	7	6	62.45	62.72	0.27	0.27
12	6	23	62.72	63.09	0.37	0.37
13	23	3	63.09	63.62	0.53	0.27
14	3	5	63.62	63.89	0.27	0.27
15	5	14	63.89	64.15	0.27	0.27
16	14	19	64.15	64.68	0.53	0.53
17	19	13	64.68	65.08	0.40	0.40
18	13	4	65.08	65.75	0.67	0.67
19	4	5	65.75	66.02	0.27	0.27
20	5	15	66.02	66.29	0.27	0.27
21	15	21	66.29	66.53	0.24	0.24
22	21	18	66.53	67.37	0.85	0.85
23	18	17	67.37	68.35	0.98	0.98
24	17	16	68.35	68.62	0.27	0.27
25	16	24	68.62	68.99	0.37	0.37
26	24	7	68.99	69.24	0.25	0.25
27	7	30	69.24	69.50	0.27	0.27
28	30	28	69.50	69.74	0.24	0.24
29	28	25	69.74	70.01	0.27	0.27
30	25	24	70.01	70.30	0.29	0.29
31	24	26	70.30	70.79	0.49	0.25
32	26	7	70.79	71.27	0.48	0.24
33	7	8	71.27	71.54	0.27	0.27
34	8	9	71.54	71.81	0.27	0.27
35	9	12	71.81	72.20	0.40	0.40
36	12	13	72.20	72.46	0.26	0.26
37	13	27	72.46	73.14	0.67	0.67
38	27	29	73.14	73.26	0.12	0.12
39	29	27	73.26	99.15	25.89	12.94
40	27	19	99.15	99.27	0.12	0.12
41	19	20	99.27	99.67	0.40	0.40
42	20	21	99.67	99.93	0.27	0.27

7.3.2. Iteración 3

Analizados los resultados de las iteraciones anteriores, para la tercera iteración se han tomado unos valores objetivo adaptados a las soluciones observadas. De esta forma, para las zonas de la pista de llegadas, la pista de despegues y para el total del área de maniobras de T4S, los objetivos r se han aumentado, y para el resto de zonas se han restringido más aún.

El resultado ha sido que en las zonas de la pista de llegadas y la pista de despegues y para el total del área de maniobras de T4S se ha mejorado el $idle$ l y $R_{\max \text{ apron}}$, y ligeros empeoramientos de $R_{\max \text{ arr}}$ y $R_{\max \text{ dep}}$ inferiores al 1%.

En las zonas de la plataforma de estacionamientos, acceso a deshielo y zona de deshielo, en la que se mejoraron objetivos, se ha conseguido mejorar $R_{\max \text{ apron}}$, y se ha empeorado $R_{\max \text{ accdice}}$ y $R_{\max \text{ dice}}$, en un 3.2% y 4% respectivamente.

A la vista de los resultados se toma la decisión de que la iteración 3 sea la última iteración.

	Rmax	r	lmax
arr	30,04	20,00	10,04
apron	55,82	40,00	15,82
accdice	71,23	60,37	10,86
dice	71,73	65,50	6,23
dep	99,06	85,00	14,06
total	100,57	95,00	5,57

Tabla 36: Valores en It3 de $R_{\max}$, r y l para los subconjuntos de tramos significativos

Ilustración 48: Gestión de tiempos de descontaminación T4S en Iteración 3

Se igualan los tiempos *idle* l entre las zonas, pero se mantiene la tendencia de que para las zonas de la plataforma y la pista de despegues dichos tiempos son los peores.

Se muestra para cada zona la secuencia de tramos i la posición k en que cada tramo es descontaminado, s_i^k , R_i^k , p_i^k y p_i . Se han resaltado para cada zona los valores de Z_0 , y de $R_{\max}$, hora de inicio de finalización de cada zona. Se acompañan gráficamente los datos aportados con las ilustraciones 49, 50 y 51, Zonas 1, 2 y 3 respectivamente en la Iteración 3 y última, resultados finales.

Resolución Zona 1 Iteración 3 (tiempo de resolución 3000 seg):

k	i	j	s_i^k	R_i^k	p_i^k	p_i
1	1	14	0.00	0.31	0.31	0.31
2	14	13	0.31	0.56	0.25	0.25
3	13	11	0.56	0.87	0.31	0.31
4	11	15	0.87	1.23	0.36	0.36
5	15	8	1.23	1.48	0.25	0.25
6	8	6	1.48	1.91	0.43	0.43
7	6	4	1.91	2.51	0.60	0.60
8	4	3	2.51	2.94	0.43	0.43
9	3	7	2.94	3.06	0.12	0.12
10	7	3	3.06	24.37	21.31	10.66
11	3	5	24.37	24.49	0.12	0.12
12	5	10	24.49	24.93	0.44	0.44
13	10	9	24.93	25.24	0.31	0.31
14	9	2	25.24	25.60	0.36	0.36
15	2	3	25.60	26.20	0.60	0.60
16	3	4	26.20	26.44	0.24	0.12
17	4	18	26.44	26.87	0.43	0.43
18	18	19	26.87	27.68	0.81	0.81
19	19	17	27.68	28.67	0.99	0.99
20	17	16	28.67	29.03	0.35	0.35
21	16	1	29.03	29.48	0.45	0.45
22	1	12	29.48	29.79	0.31	0.31
23	12	13	29.79	30.04	0.25	0.25
24	13	11	30.04	30.65	0.61	0.31
25	11	j15	30.65	31.01	0.36	0.36

Resolución Zona 2 Iteración 3 (tiempo de resolución 3000 seg):

k	i	j	s_i^k	R_i^k	p_i^k	p_i
1	1	3	31.01	32.12	1.11	1.11
2	3	12	32.12	33.39	1.27	1.27
3	12	17	33.39	34.15	0.76	0.76
4	17	13	34.15	34.55	0.40	0.40
5	13	17	34.55	35.44	0.89	0.45
6	17	16	35.44	35.83	0.40	0.40
7	16	15	35.83	36.07	0.24	0.24
8	15	20	36.07	36.34	0.27	0.27
9	20	10	36.34	39.86	3.51	3.51
10	10	2	39.86	40.34	0.48	0.24
11	2	5	40.34	41.61	1.27	1.27
12	5	6	41.61	41.85	0.24	0.24
13	6	4	41.85	42.23	0.38	0.38
14	4	9	42.23	42.77	0.55	0.55
15	9	21	42.77	43.03	0.25	0.25
16	21	19	43.03	52.27	9.24	9.24
17	19	15	52.27	52.53	0.27	0.27
18	15	11	52.53	52.80	0.27	0.27
19	11	5	52.80	53.56	0.76	0.76
20	5	6	53.56	53.80	0.24	0.24
21	6	7	53.80	54.18	0.38	0.38
22	7	23	54.18	54.44	0.25	0.25
23	23	8	54.44	54.87	0.44	0.44
24	8	22	54.87	55.13	0.25	0.25
25	22	7	55.13	55.57	0.44	0.44
26	7	23	55.57	55.82	0.25	0.25
27	23	8	55.82	56.26	0.44	0.44
28	8	23	56.26	56.77	0.51	0.25
29	23	8	56.77	57.64	0.87	0.44
30	8	14	57.64	58.15	0.51	0.25
31	14	18	58.15	58.60	0.45	0.45
32	18	13	58.60	58.86	0.26	0.26

Resolución Zona 3 Iteración 3 (tiempo de resolución 3000 seg):

k	i	j	s_i^k	R_i^k	p_i^k	p_i
1	1	12	58.86	59.13	0.27	0.27
2	12	13	59.13	59.39	0.26	0.26
3	13	19	59.39	60.06	0.67	0.67
4	19	14	60.06	60.46	0.40	0.40
5	14	5	60.46	60.99	0.53	0.53
6	5	11	60.99	61.52	0.53	0.27
7	11	10	61.52	61.79	0.27	0.27
8	10	8	61.79	62.16	0.38	0.38
9	8	9	62.16	62.43	0.27	0.27
10	9	1	62.43	62.82	0.40	0.40
11	1	2	62.82	63.09	0.27	0.27
12	2	23	63.09	63.36	0.27	0.27
13	23	6	63.36	63.89	0.53	0.27
14	6	24	63.89	64.26	0.37	0.37
15	24	6	64.26	64.75	0.49	0.25
16	6	3	64.75	65.12	0.37	0.37
17	3	5	65.12	65.39	0.27	0.27
18	5	4	65.39	65.65	0.27	0.27
19	4	5	65.65	66.18	0.53	0.27
20	5	22	66.18	66.45	0.27	0.27
21	22	18	66.45	66.72	0.27	0.27
22	18	17	66.72	68.67	1.95	0.98
23	17	16	68.67	68.94	0.27	0.27
24	16	25	68.94	69.31	0.37	0.37
25	25	26	69.31	69.61	0.29	0.29
26	26	7	69.61	69.85	0.24	0.24
27	7	28	69.85	70.11	0.27	0.27
28	28	28	70.11	70.35	0.24	0.24
29	28	26	70.35	70.62	0.27	0.27
30	26	6	70.62	70.86	0.24	0.24
31	6	2	70.86	71.23	0.37	0.37
32	2	3	71.23	71.76	0.53	0.27
33	3	15	71.76	72.03	0.27	0.27
34	15	20	72.03	72.27	0.24	0.24
35	20	19	72.27	72.53	0.27	0.27
36	19	27	72.53	72.93	0.40	0.40
37	27	29	72.93	73.05	0.12	0.12
38	29	27	73.05	98.94	25.89	12.94
39	27	19	98.94	99.06	0.12	0.12
40	19	20	99.06	99.46	0.40	0.40
41	20	21	99.46	99.72	0.27	0.27
42	21	18	99.72	100.57	0.85	0.85

Ilustración 49: Tiempos de descontaminación T4S en Iteración 3. Resultados finales en Zona 1

Ilustración 50: Tiempos de descontaminación T4S en Iteración 3. Resultados finales en Zona 2

Ilustración 51: Tiempos de descontaminación T4S en Iteración 3. Resultados finales en Zona 3

7.3.1. Comparativa entre iteraciones

En las siguientes tablas se muestran los resultados para cada iteración ya presentados, pero agrupados para $R_{\max}$, r y l . Se añade además el incremento absoluto y en porcentaje comparativo entre iteraciones sucesivas. Indicar que en que los resultados que mejoran de una iteración a otra están indicados con el color verde, mientras que los que empeoran se indican en rojo.

Obsérvese en la tabla de objetivos de la iteración 2 hay una rectificación de los mismos respecto a los objetivos iniciales de la iteración 1, haciendo más restrictivos los objetivos en algunos subconjuntos, y que en la última iteración se adaptan los objetivos a la realidad de los resultados, destacando un incremento del 66,7% en el valor del objetivo para la pista de llegadas, mucho más realista que en la iteración anterior.

En la tabla de los tiempos de finalización de cada zona y del total del área de maniobras, ninguno de los incrementos entre las iteraciones 1 y 2 es positivo. En la comparativa entre las iteraciones 2 y 3 para $R_{\max}$, destacar que el incremento es negativo o positivo inferior al 1%, excepto para las zonas de acceso a deshielo y deshielo, en la que los incrementos de los tiempos son del 3,2% y 4% respectivamente.

Esto indica que durante el proceso se ha dado un primer paso en el que se ha buscado mejorar resultados en cuanto a horas de finalización, que en la mayoría de los casos ha concluido en la segunda iteración, y un segundo paso en el que se han aproximado los objetivos y soluciones, agrupando los valores *idle*.

	r I1	r I2	Δ I1–I2	$\Delta\%$ I1–I2	r I3	Δ I2–I3	$\Delta\%$ I2–I3
arr	12,00	12,00	0,00	0,0%	20,00	8,00	66,7%
apron	41,22	41,22	0,00	0,0%	40,00	-1,22	-3,0%
accdice	64,55	63,13	-1,42	-2,2%	60,37	-2,76	-4,4%
dice	69,01	68,13	-0,88	-1,3%	65,50	-2,63	-3,9%
dep	84,11	83,13	-0,98	-1,2%	85,00	1,87	2,2%
total	94,01	93,13	-0,88	-0,9%	95,00	1,87	2,0%

Tabla 37: Valores r en Itx para los subconjuntos de tramos significativos

	Rmax I1	Rmax I2	Δ I1–I2	$\Delta\%$ I1–I2	Rmax I3	Δ I2–I3	$\Delta\%$ I2–I3
arr	29,89	29,89	0	0,0%	30,04	0,15	0,5%
apron	59,01	56,99	-2,02	-3,4%	55,82	-1,17	-2,1%
accdice	69,01	68,99	-0,02	0,0%	71,23	2,24	3,2%
dice	69,01	68,99	-0,02	0,0%	71,73	2,74	4,0%
dep	102,97	99,27	-3,7	-3,6%	99,06	-0,21	-0,2%
total	103,23	99,93	-3,3	-3,2%	100,57	0,64	0,6%

Tabla 38: valores R en Itx para los subconjuntos de tramos significativos

	lmax I1	lmax I2	Δ I1–I2	$\Delta\%$ I1–I2	lmax I3	Δ I2–I3	$\Delta\%$ I2–I3
arr	17,89	17,89	0,00	0,0%	10,04	-7,85	-43,9%
apron	17,79	15,77	-2,02	-11,4%	15,82	0,05	0,3%
accdice	4,46	5,86	1,4	31,4%	10,86	5	85,3%
dice	0,00	0,86	0,86	--	6,23	5,37	624,4%
dep	18,86	16,14	-2,72	-14,4%	14,06	-2,08	-12,9%
total	9,22	6,80	-2,42	-26,2%	5,57	-1,23	-18,1%

Tabla 39: Valores l en Itx para los subconjuntos de tramos significativos

A continuación se muestran las gráficas comparativas de los datos obtenidos:

Ilustración 52: Comparativas de iteraciones por objetivos r, $R_{\max}$ y l

Atendiendo a la variable *idle* I, se analiza la evolución de la media y al varianza de las soluciones en el área de maniobras de T4S, observando que para una media muy constante en todas las iteraciones, la varianza va disminuyendo significativamente, fruto de la aproximación entre objetivos y resultados de la simulación.

	Imax I1	Imax I2	Imax I3
media	11,37	10,55	10,43
varianza	64,29	48,47	16,77

Tabla 40: Media y varianza de I en cada iteración

Ilustración 53: Comparativa de Iteraciones. Media y varianza del valor I

La secuencia de tramos a descontaminar en cada iteración es la siguiente:

Secuencia de tramos por zona y por iteración								
Zn1 I1	Zn2 I1	Zn3 I1	Zn1 I2	Zn2 I2	Zn3 I2	Zn1 I3	Zn2 I3	Zn3 I3
1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	3	2	10	3	11	14	3	12
5	5	23	5	5	14	13	12	13
3	6	16	3	6	20	11	17	19
7	7	24	7	22	21	15	13	14
3	6	25	3	13	18	8	17	5
2	5	26	2	17	22	6	16	11
15	6	28	15	16	3	4	15	10
8	7	30	8	17	2	3	20	8
6	23	7	6	13	10	7	10	9
4	14	10	4	8	7	3	2	1
3	8	1	3	23	6	5	5	2
4	22	12	4	7	23	10	6	23
18	6	4	18	6	3	9	4	6
19	5	14	19	5	5	2	9	24
17	2	5	17	2	14	3	21	6
16	10	22	16	10	19	4	19	3
14	20	15	14	20	13	18	15	5
13	15	3	13	15	4	19	11	4
12	11	23	12	11	5	17	5	5
9	5	6	9	5	15	16	6	22
15	12	7	15	12	21	1	7	18
11	16	30	11	16	18	12	23	17
13	15	8	13	15	17	13	8	16
11	19	9	11	19	16	11	22	25
	21	1		21	24		7	26
	9	11		9	7		23	7
	4	4		4	30		8	28
	22	14		7	28		23	28
	13	20		23	25		8	26
	18	19		14	24		14	6
	17	13		18	26		18	2
		27			7			3
		29			8			15
		27			9			20
		13			12			19
		19			13			27
		20			27			29
		21			29			27
		18			27			19
		17			19			20
		23			20			21

Tabla 41: Secuencia de descontaminación para cada zona en cada iteración

Para cada zona se puede comparar la secuencia solución encontrada en cada iteración:

Comparación de secuencias por zonas								
Zn1 I1	Zn1 I2	Zn1 I3	Zn2 I1	Zn2 I2	Zn2 I3	Zn3 I1	Zn3 I2	Zn3 I3
1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	10	14	3	3	3	2	11	12
5	5	13	5	5	12	23	14	13
3	3	11	6	6	17	16	20	19
7	7	15	7	22	13	24	21	14
3	3	8	6	13	17	25	18	5
2	2	6	5	17	16	26	22	11
15	15	4	6	16	15	28	3	10
8	8	3	7	17	20	30	2	8
6	6	7	23	13	10	7	10	9
4	4	3	14	8	2	10	7	1
3	3	5	8	23	5	1	6	2
4	4	10	22	7	6	12	23	23
18	18	9	6	6	4	4	3	6
19	19	2	5	5	9	14	5	24
17	17	3	2	2	21	5	14	6
16	16	4	10	10	19	22	19	3
14	14	18	20	20	15	15	13	5
13	13	19	15	15	11	3	4	4
12	12	17	11	11	5	23	5	5
9	9	16	5	5	6	6	15	22
15	15	1	12	12	7	7	21	18
11	11	12	16	16	23	30	18	17
13	13	13	15	15	8	8	17	16
11	11	11	19	19	22	9	16	25
			21	21	7	1	24	26
			9	9	23	11	7	7
			4	4	8	4	30	28
			22	7	23	14	28	28
			13	23	8	20	25	26
			18	14	14	19	24	6
			17	18	18	13	26	2
						27	7	3
						29	8	15
						27	9	20
						13	12	19
						19	13	27
						20	27	29
						21	29	27
						18	27	19
						17	19	20
						23	20	21

Tabla 42: Comparativa de secuencias por cada iteración en cada zona

8. Anexos.

8.1. Anexo I: Bibliografía.

8.1.1. Referencias en publicaciones indexadas

1. Atkin, J. A. D., Burke, E. K., Greenwood, J. S., Reeson, D., 2008. On-line decision support for take-off runway scheduling with uncertain taxi times at London Heathrow airport. *Journal of Scheduling*, Volume 11, Issue 5, 323-346.
2. Atkin, J. A. D.; Burke, E. K.; G., John S., 2011. A comparison of two methods for reducing take-off delay at London Heathrow airport. *Journal of Scheduling*, Volume 14, Issue 5, 409-421.
3. Atkin, J. A. D.; De Maere, G.; Burke, E. K., 2013. Addressing the Pushback Time Allocation Problem at Heathrow Airport. *Transportation Science*, Volume: 47, Issue 4, 584-602.
4. Babic, O., Teodorovic, D, Tosic, V., 1984. Aircraft Stand Assignment to Minimize Walking. *Journal of Transportation Engineering*, Volume 110, Issue 1, 55-66.
5. Bianco, L., Dell’Olmo, P. and Giordani, S., 1997. Scheduling Models And Algorithms For Tma Traffic Management. *Modelling And Simulation In Air Traffic Management* eds. 139-167.
6. Bianco, L., Ricciardelli, S., Rinaldi, G., y Sassano, A., 1988. Scheduling Task With Sequence-Dependent Processing Time. *Naval Research Logistics*, Vol. 35, Issue 2, 177-184.
7. Bolat, A., 2001. Models and a genetic algorithm for static aircraft-gate assignment problem. *Journal of the Operational Research Society*, Volume 52, Issue 10, 1107-1120.
8. Diepen, G.; van den Akker, J. M.; Hooijveen, J. A., 2012. Finding a robust assignment of flights to gates at Amsterdam Airport Schiphol. *Journal of Scheduling*, Volume 15, Issue 6, 703-715.
9. García Sáez, J., 2012. ePlanAirport: a Web-based tool to user-friendly decision-support systems for airport stakeholders and policy-makers. *Technology Engineering and Management in Aviation: Advancements and Discoveries*, 214-222.
10. Guinet, A. 1993. Sequence-Dependent Jobs On Identical Parallel Machines To Minimize Completion Time Criteria. *International Journal Production Research*. Volume 22, Issue 7, 1579-1594.
11. Herrero, J.G., Berlanga, A., Molina, J. M., Casar, J. R., 2005. Methods for operations planning in airport decision support systems. *Applied Intelligence*, Volume 22, Issue 3, 183-206.
12. Klein-Paste, A., Huseby A.B., Anderson, J.D., Giesman, P., Bugge, H.J., Langedahl, T.B., 2012. Braking performance of commercial airplanes during operation on winter contaminated runways. *Cod Regions Science and Technology*, 79-80, pp. 29–37.
13. Norin, A.; Yuan, D.; Granberg, T. A., 2012. Scheduling de-icing vehicles within airport logistics: a heuristic algorithm and performance evaluation. *Journal of the Operation Research Society*, Volume 63, Issue 8, 1116-1125.
14. Ravizza, S.; Atkin, J. A. D.; Maathuis, M. H., 2013. A combined statistical approach and ground movement model for improving taxi time estimations at airports. *Journal of the Operation Research Society*, Volume 64, Issue 9, 1347-1360.

15. Rocha Murca, Mayara Conde; Mueller, Carlos, 2015. Control-based optimization approach for aircraft scheduling in a terminal area with alternative arrival routes. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, Volume 73, 96-113.
16. Stolletz, R.; Zamorano, E., 2014. A rolling planning horizon heuristic for scheduling agents with different qualifications. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, Volume 68, 39-52.
17. Tang, J.; Yu, Y.; Li, J., 2015. An exact algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem of pickup and delivery of customers to the airport. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, Volume 73, 114-132.
18. Yan, Z. X., Eftekhari, M., 2013. An Integrated Airport Operations Interface Integrating and Automating Airport Operations, *PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER, COMMUNICATION, CONTROL AND AUTOMATION*, Volume 68, 401-405, Singapur.
19. Zografos, K.G., Madasz, M.A., Salouras, Y., 2013. A decision support system for total airport operations management and planning. *Journal of Advanced Transportation*, Volume 47, Issue 2, 170-189.

8.1.2. Otras referencias

21. Aarrestad, O., Norheim A., Huseby, A.B., Rabbe, M., 2007. Safe Winter Operations Projet (SWOP). Oslo Airport OSL AS, Gardermoen Norway (in Norwegian).
22. ACI EUROPE, 2010. An outlook for Europe's airports—Facing the challenges of the 21st century. Technical Report, Airports Council International Europe. www.aci-europe.org.
23. AENA, S.A., 2013. 9ª Jornadas Invernales, Huesca, España. www.aena.es.
24. Croll, J.B., 2004. Prediction of aircraft landing distance on winter contaminated runway using the Canadian Runway Friction index. Proceeding of the Third International Meeting on Aircraft Performance on Contamination Runways. TP 13579. Transport Development Centre, Transport Canada, Montreal, Québec.
25. Eurocontrol, Airport CDM Coordination Group, 2009. Airport CDM steps to efficiency. www.euro-cdm.org.
26. European Aviation Safety Agency (EASA), 2010. Runway Friction and Aircraft Braking: The Way Forward. www.easa.europa.eu.
27. Giesberts, M.K.H., 2001. Test and evaluation of precipitation drag on an aircraft caused by snow and standing water on a runway. NLR-TP-490. Nationaal Lucht-en Ruimtevaart Laboratorium NLR.
28. ICAO, 2003. International standards and recommended practices, Annex 15 Aeronautical Information Services Chapter 5 NOTAM. International Civil Aviation Organization.
29. Marín, A., y Marín, C., “Scheduling on TMA”. VIII Congreso de Ingeniería de Transporte. Ciudad Real. Junio de 2006.
30. Neuman, U. M., Atkin, J.A.D., 2013. Airport Gate Assignment Considering Ground Movement. Computational Logistics, 4Th International Conference, ICCL 2013. Copenhagen, Denmark, September 25-27.
31. O'Donnell, M.J., Gardner, S., 2010. Paved Runway Condition Assessment Matrix and New Winter Operations AC Overview. Presented at the 33rd annual airports conference, held at March 2-4, 2010, Hershey, Pennsylvania.
32. SØderholm, B., Bugge, H.J., Huseby, A.B., Rabbe, M., Klein-Paste, A., Bergersen, E., SkjØndal, P., 2009. Integrert Rullebane Information System (IRIS). Avinor AS, Oslo, Norway (in Norwegian).

8.2. Anexo II: Datos ámbito geográfico y de negocio.

#	Airport	Country	WP period	WP month	Average annual days of snow	Average snow depth (cm)	Maximun snow in 2	Annual days of de-icing activities	Code	Passanger traffic 2019
1	London Heathrow	UK	Nov-Apr	6	2	0,5	15	17	LHR	73.371.195
2	Paris CDG	France	Nov-15 Apr	5,5	5	10	5	70	CDG	63.813.756
3	Frankfurt	Germany	15 Oct-15 Apr	6	60	40	50	70	FRA	59.566.132
4	Istanbul Ataturk	Turkey	Dec-15 March	3,5	-	-	-	1	IST	56.954.790
5	Amsterdam Schiphol	Netherlands	Nov-Apr	6	7	1	5	50	AMS	54.978.023
6	Madrid-Barajas	Spain	15 Nov-15 March	4	0,5	10	20	15	MAD	41.833.374
7	Munich	Germany	15 Oct-15 Apr	6	60	42,5	52	67	MUC	39.716.877
8	Rome Fiumicino	Italy	Dec-Apr	5	0,2	-	-	30	FCO	38.506.467
9	London Gatwick	UK	Nov-March	5	5	-	-	17	LGW	38.094.845
10	Barcelona El Prat	Spain	Dec-15 March	3,5	1	0,5	0,7	1	BCN	37.559.044
11	Moscow Domodedovo	Russia	15 Oct-15 Apr	6	70	30	50	100	DME	33.039.531
12	Moscow Sheremetyevo	Russia	15 Oct-15 Apr	6	70	30	50	100	SVO	31.567.974
13	Paris Orly	France	Nov-15 Apr	5,5	5	10	5	70	ORY	28.862.586
14	Antaya	Turkey	Dec-15 March	3,5	-	-	-	1	AYT	28.341.063
15	Copenhagen	Denmark	Nov-Apr	6	11	10	42	91	CPH	25.627.093
16	Zurich	Switzerland	15 Oct-Apr	6,5	20	53	6	36	ZRH	25.477.622
17	Oslo	Norway	Oct-Apr	7	80	150	30	68	OSL	24.269.235
18	Istanbul Sabiha Gokcen	Turkey	Dec-15 March	3,5	-	-	-	1	SAW	23.508.141
19	Palma de Mallorca	Spain	Dec-15 March	3,5	-	-	-	1	PMI	23.115.499
20	Vienna	Austria	15 Oct-March	5,5	20	81	10	119	VIE	22.483.158
21	Stockholm	Sweden	Oct-Apr	7	80	150	30	68	ARN	22.417.351
22	Brussels	Belgium	15 Nov-March	4,5	7	3	15	14	BRU	21.933.190
23	Geneve	Switzerland	Nov-15 Apr	5,5	2	5	5	108	GVA	15.152.928
24	Athens	Greece	15 Dec-15 March	3	0,5	-	-	30	ATH	15.127.465
25	Hamburg	Germany	Nov-March	5	25	6	15	35	HAM	14.760.280

Tabla 43: Datos WP1 de Aeropuertos en el TOP21 por número de pasajeros, más algunos aeropuertos significativos (1)

#	Airport	Country	WP period	WP mont	Average annual days of snow	Average snow depth (cm)	Maximun snow in 2	Annual days of de-icing activities	Code	Passanger traffic 20
26	Prague Ruz	Czech Repub	Nov-Apr	6	28	79	84	-	PRG	11.149.926
27	Stuttgart	Germany	Nov-15 Apr	5,5	50	30	40	50	STR	9.718.438
28	Birmingham	UK	Nov-March	5	5	20	35	25	BHX	9.698.349
29	Budapest	Hungary	Nov-March	5	30	12	25	75	BUD	9.155.961
30	Lyon	France	15 Nov-15 Apr	5	25	40	20	100	LYS	8.467.093
31	Faro	Portugal	-	-	-	-	-	-	FAO	6.166.954
32	Rome Ciam	Italy	Dec-Apr	5	0,2	few	few	15	CIA	4.989.388
33	Malta	Malta	-	-	-	-	-	-	MLA	4.294.323
34	Sofia	Bulgaria	Nov-March	5	20	7	11	60	SOF	3.815.192
35	London City	UK	Nov-Apr	6	1	0,5	15	13	LCY	3.647.824
36	Katowice	Poland	15 Oct-15 Apr	6	70	6,45	14	65	KTW	2.695.732
37	Yerevan	Armenia	Nov-March	5	15	5	20	50	EVN	2.045.058
38	Tallinn	Estonia	15 Oct-15 Apr	6	65	28	50	35	TLL	2.017.291
39	Chisinau	Moldova	Nov-Apr	6	20	6	20	25	KIV	1.781.169
40	Split	Croatia	Nov-March	5	5	3	-	3	SPU	1.752.657
41	Shannon	Ireland	Nov-Freb	4	-	-	-	10	SNN	1.639.315
42	Dubrovnik	Croatia	Oct-March	6	2	2	5	2	DBV	1.584.471
43	Belgrade	Serbia	Nov-March	5	27	25	39,1	23	BEG	1.335.625
44	Ljubljana	Slovenia	Nov-Apr	6	40	20	30	15	LJU	1.307.379
45	Skopje	Macedonia	15 Oct-Apr	6,5	6	14,1	50	71	SKP	1.210.509
46	Graz	Austria	15 Oct-May	7,5	15	10	30	90	GRZ	897.421
47	Exeter	UK	Nov-March	5	2	0,4	1,7	7	EXT	766.583
48	Podgorica	Montenegro	Oct-Apr	7	120	10	25	45	TGD	701.597
49	Pula	Croatia	Nov-15 Apr	5,5	2	15	15	20	PUY	375.322

Tabla 44: Datos WP1 de Aeropuertos en el TOP21 por número de pasajeros, más algunos aeropuertos significativos (2)

#	Airport	Country	Passanger traffic 2014	Passanger traffic under W	% Passanger traffic under W	Passanger traffic under	%Passanger traffic under sn	X	Y	Source
1	London Hea	UK	73.371.195	36.685.598	50,0%	402.034	0,5%	51,470480	-0,459194	
2	Paris CDG	France	63.813.756	29.247.972	45,8%	874.161	1,4%	49,011530	2,549171	
3	Frankfurt	Germany	59.566.132	29.783.066	50,0%	9.791.693	16,4%	50,036860	8,557663	
4	Istanbul At	Turkey	56.954.790	16.611.814	29,2%	0	0,0%	40,980190	28,817480	
5	Amsterdam	Netherlands	54.978.023	27.489.012	50,0%	1.054.373	1,9%	52,302940	4,761479	www.aci-europe.org
6	Madrid-Bar	Spain	41.833.374	13.944.458	33,3%	57.306	0,1%	40,484560	-3,570900	www.aci-europe.org
7	Munich	Germany	39.716.877	19.858.439	50,0%	6.528.802	16,4%	48,353740	11,779400	www.aci-europe.org
8	Rome Fiumi	Italy	38.506.467	16.044.361	41,7%	21.099	0,1%	41,794290	12,250910	www.aci-europe.org
9	London Gat	UK	38.094.845	15.872.852	41,7%	521.847	1,4%	51,157900	-0,187197	www.aci-europe.org
10	Barcelona	Spain	37.559.044	10.954.721	29,2%	102.901	0,3%	41,297670	2,080536	www.aci-europe.org
11	Moscow Do	Russia	33.039.531	16.519.766	50,0%	6.336.348	19,2%	55,410600	37,900600	
12	Moscow Sh	Russia	31.567.974	15.783.987	50,0%	6.054.132	19,2%	55,97380	37,414460	
13	Paris Orly	France	28.862.586	13.228.685	45,8%	395.378	1,4%	48,726080	2,361374	
14	Antaya	Turkey	28.341.063	8.266.143	29,2%	0	0,0%	36,902410	30,803540	
15	Copenhagen	Denmark	25.627.093	12.813.547	50,0%	772.323	3,0%	55,618550	12,647410	www.aci-europe.org
16	Zurich	Switzerland	25.477.622	13.800.379	54,2%	1.396.034	5,5%	47,459610	8,551140	www.aci-europe.org
17	Oslo	Norway	24.269.235	14.157.054	58,3%	5.319.284	21,9%	60,195350	11,100830	
18	Istanbul Sal	Turkey	23.508.141	6.856.541	29,2%	0	0,0%	40,907380	29,312880	
19	Palma de M	Spain	23.115.499	6.742.021	29,2%	0	0,0%	39,547770	2,730060	
20	Vienna	Austria	22.483.158	10.304.781	45,8%	1.231.954	5,5%	48,117200	16,562580	www.aci-europe.org
21	Stockholm	Sweden	22.417.351	13.076.788	58,3%	4.913.392	21,9%	59,648920	17,924190	www.aci-europe.org
22	Brussels	Belgium	21.933.190	8.224.946	37,5%	420.637	1,9%	50,897620	4,482014	www.aci-europe.org
23	Geneve	Switzerland	15.152.928	6.945.092	45,8%	83.030	0,5%	46,232580	6,104450	www.aci-europe.org
24	Athens	Greece	15.127.465	3.781.866	25,0%	20.723	0,1%	37,935260	23,945220	www.aci-europe.org
25	Hamburg	Germany	14.760.280	6.150.117	41,7%	1.010.978	6,8%	53,636700	9,992495	www.aci-europe.org

Tabla 45: Datos WP2 de Aeropuertos en el TOP21 por número de pasajeros, más algunos aeropuertos significativos (1)

#	Airport	Country	Passanger traffic 2014	Passanger traffic under W	% Passanger traffic under W	Passanger traffic under	%Passanger traffic under sn	X	Y	Source
26	Prague Ruz	Czech Repub	11.149.926	5.574.963	50,0%	855.337	7,7%	50,101450	14,264750	www.aci-europe.org
27	Stuttgart	Germany	9.718.438	4.454.284	45,8%	1.331.293	13,7%	48,682230	9,209290	www.aci-europe.org
28	Birmingham	UK	9.698.349	4.040.979	41,7%	132.854	1,4%	52,453710	-1,745625	www.aci-europe.org
29	Budapest	Hungary	9.155.961	3.814.984	41,7%	752.545	8,2%	47,438420	19,255260	www.aci-europe.org
30	Lyon	France	8.467.093	3.527.955	41,7%	579.938	6,8%	45,721250	5,080833	www.aci-europe.org
31	Faro	Portugal	6.166.954	0	0,0%	0	0,0%	37,019980	-7,966096	www.aci-europe.org
32	Rome Ciam	Italy	4.989.388	2.078.912	41,7%	2.734	0,1%	41,799790	12,591790	www.aci-europe.org
33	Malta	Malta	4.294.323	0	0,0%	0	0,0%	35,856430	14,485730	www.aci-europe.org
34	Sofia	Bulgaria	3.815.192	1.589.663	41,7%	209.052	5,5%	42,689220	23,405770	www.aci-europe.org
35	London City	UK	3.647.824	1.823.912	50,0%	9.994	0,3%	51,505060	0,047894	www.aci-europe.org
36	Katowice	Poland	2.695.732	1.347.866	50,0%	516.990	19,2%	50,472800	19,077460	www.aci-europe.org
37	Yerevan	Armenia	2.045.058	852.108	41,7%	84.043	4,1%	40,148700	44,395920	www.aci-europe.org
38	Tallinn	Estonia	2.017.291	1.008.646	50,0%	359.244	17,8%	59,416610	24,805150	www.aci-europe.org
39	Chisinau	Moldova	1.781.169	890.585	50,0%	97.598	5,5%	46,934670	28,929230	www.aci-europe.org
40	Split	Croatia	1.752.657	730.274	41,7%	24.009	1,4%	43,540460	16,300190	www.aci-europe.org
41	Shannon	Ireland	1.639.315	546.438	33,3%	0	0,0%	52,701150	-8,907423	www.aci-europe.org
42	Dubrovnik	Croatia	1.584.471	792.236	50,0%	8.682	0,5%	42,562120	18,264000	www.aci-europe.org
43	Belgrade	Serbia	1.335.625	556.510	41,7%	98.800	7,4%	44,817770	20,296040	www.aci-europe.org
44	Ljubljana	Slovenia	1.307.379	653.690	50,0%	143.274	11,0%	46,223880	14,460020	www.aci-europe.org
45	Skopje	Macedonia	1.210.509	655.692	54,2%	19.899	1,6%	41,963260	21,624610	www.aci-europe.org
46	Graz	Austria	897.421	560.888	62,5%	36.880	4,1%	46,995710	15,439570	www.aci-europe.org
47	Exeter	UK	766.583	319.410	41,7%	4.200	0,5%	50,731840	-3,418808	www.aci-europe.org
48	Podgorica	Montenegro	701.597	409.265	58,3%	230.662	32,9%	42,359720	19,245210	www.aci-europe.org
49	Pula	Croatia	375.322	172.023	45,8%	2.057	0,5%	44,897350	13,91384	www.aci-europe.org

Tabla 46: Datos WP2 de Aeropuertos en el TOP21 por número de pasajeros, más algunos aeropuertos significativo (2)

8.3. Anexo III: Datos de simulaciones RM_AM. Pruebas computacionales

8.3.1. Anexo datos de simulaciones RM_AM: programación modelos para área de maniobras A3

8.3.1.1 Líneas de programación común para M1, M2 y M3w

Relativas a:

- Opciones de configuración de GAMS para la resolución
- Mostrar resultados
- Crear fichero de salida de datos *.out

```
* options. Asegurar que el solver MIP busca la solución global óptima.
*
Options
  SolPrint = Off
  IterLim  = 1000000
  ResLim   = 10000
  LimRow   = 0
  LimCol   = 0
  Decimals = 2
  SysOut   = ON
  LP       = CPLEX
  MIP      = CPLEX
  RMIP     = CPLEX
  OptcR    = 0.10
;

display x.l;

display z.l;

display Rmax.l;

*display Rmaxrwy.l;

*display Rmaxapron.l;

*display Rmaxdice.l;

display sj.l;

display Rj.l;

display pj.l;

FILE Rman / Res_RM_AM\RM_AM_1_ri-Mij_Modelo_AX_kX.out/ ;

PUT Rman ;

Rman.nw=6;
```

```

Rman.lw=1;

PUT //
    @1, 'SOLUCIÓN ÓPTIMA';
PUT //
loop(k,
    loop(i,
        loop(j,
            if (x.l(i,j,k)=1,
                put //
                    @1, 'Posción ';
                put @10, card(k);
                put @13, ' -> tramo ';
                put @30, card(i);
                put @33, ' seguido del tramo ';
                put @62, card(j);
                put @65, ' ';
                if (card(k)=card(k),
                    put @33, ' y último ';
                );
            );
        );
    );
);

PUT //
//
    @1, 'HORA A LA QUE SE DEJA LIBRE EL TRAMO i SEGUIDO DEL TRAMO j';
PUT //
    @1, '                sj    Rj    pj';
loop(k,
    loop(i,
        loop(j,
            if (x.l(i,j,k)=1,
                put //
                    @1, card(i);
                put @1, 'i';
                put @4, ' ';
                put @11, card(j);
                put @11, 'j';
                put @14, ' ';
                put @47, sj.l(i,k);
                put @54, Rj.l(i,k);
                put @61, pj.l(i,k);
            );
        );
    );
);

loop(k,
    loop(i,
        loop(j,
            if (x.l(i,j,k)=1,

```

```

        a1=a1+Rj.l(i,k)
    );
);
);
);

PUT //
    @1, 'Objetivo' ;
PUT //
    @1, z.l;
PUT //
    @1, 'Rmax' ;
PUT //
    @1, Rmax.l;
PUT //
    @1, 'Rmaxrwy' ;
PUT //
*    @1, Rmaxrwy.l;
PUT //
    @1, 'Rmaxapron' ;
PUT //
*    @1, Rmaxapron.l;
PUT //
    @1, 'Rmaxdice' ;
PUT //
*    @1, Rmaxdice.l;
PUT //
    @1, 'Sum Rj' ;
PUT //
    @1, a1;

```

8.3.1.2 Líneas de programación común para M4w

Par M4w varía la estructura del fichero *.out. Por lo demás, es igual que para el resto de modelos matemáticos.

```

display x.l;

display z.l;

display idle.l;

display Rmax.l;

display sj.l;

display Rj.l;

display pj.l;

FILE Rman / Res_RM_AM\RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A3_k42.out/;

PUT Rman ;

    Rman.nw=6;
    Rman.lw=1;

PUT //
    @1, 'SOLUCIÓN ÓPTIMA' ;
PUT //
loop(k,
    loop(i,
        loop(j,
            if (x.l(i,j,k)=1,
                put //
                    @1, 'Posción ' ;
                put @10, card(k);
                put @13, ' -> tramo ' ;
                put @30, card(i);
                put @33, ' seguido del tramo ' ;
                put @62, card(j);
                put @65, ' ' ;
                if (card(k)=card(k),
                    put @33, ' y último ' ;
                );
            );
        );
    );
);

PUT //
//
    @1, 'HORA A LA QUE SE DEJA LIBRE EL TRAMO i SEGUIDO DEL TRAMO j' ;

```

```

PUT //
    @1, '                                sj   Rj   pj' ;
loop(k,
loop(i,
loop(j,
    if (x.l(i,j,k)=1,
        put //
            @1, card(i);
        put @1, 'i';
        put @4, ' ' ;
        put @11, card(j);
        put @11, 'j';
        put @14, ' ' ;
        put @47, sj.l(i,k);
        put @54, Rj.l(i,k);
        put @61, pj.l(i,k);
    );
);
);
);

loop(k,
loop(i,
loop(j,
    if (x.l(i,j,k)=1,
        a1=a1+Rj.l(i,k)
    );
);
);
);

PUT //
    @1, 'Objetivo' ;
PUT //
    @1, z.l;
PUT //
    @1, 'B      Bl' ;
PUT //
PUT @1, B;
PUT @10, Bl;
PUT //
    @1, 'wtotal   Rmax   ltotal' ;
PUT //
    @1, w('total');
PUT @10, Rmax.l('total');
PUT @22, idle.l('total');
PUT //
    @1, 'warr     Rmaxrwyarr larr' ;
PUT //
    @1, w('arr')
PUT @10, Rmax.l('arr');
PUT @22, idle.l('arr');
PUT //
    @1, 'wdep     Rmaxrwydep ldep' ;
PUT //

```



```

    @1, w('dep')
PUT  @10, Rmax.l('dep');
PUT  @22, idle.l('dep');
PUT  //
    @1, 'wdice  Rmaxdice  ldice' ;
PUT  //
    @1, w('dice')
PUT  @10, Rmax.l('dice');
PUT  @22, idle.l('dice');
PUT  //
    @1, 'wapron  Rmaxapron  lapron' ;
PUT  //
    @1, w('apron')
PUT  @10, Rmax.l('apron');
PUT  @22, idle.l('apron');
PUT  //
    @1, 'waccdice  Rmaxaccdice  laccdice' ;
PUT  //
    @1, w('dice')
PUT  @10, Rmax.l('dice');
PUT  @22, idle.l('accdice');
PUT  //
    @1, 'Sum Rj' ;
PUT  //
    @1, a1;

```

8.3.1.3 Modelo M1 para $\text{ord}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+40\%)$

```

set ii  set tramos          / I3*i30 /
kk  set posiciones        / k1*k42 /
cc  set tramos compatibles / c1*c8 /
i(ii) subset de tramos
k(kk) subset posiciones
c(cc) subset de tramos compatibles
alias (ii,jj,ll),(i,j,l);
alias (kk,hh),(k,h);

scalars

Zzero      Inicio del plan invernal
conta      contador
BigM        BigM=10000
a1          controlador
a3          controlador j
v           velocidad avance equipo descontaminación (mpmin)
tpen        tiempo de penalización en el giro 180°
longpen     longitud extra en giro 180° ;

Zzero=0.;
BigM=10000;
v=666.7;
a1=0.;
longpen=3.1416*40. ;
tpen=longpen/(v/2) ;

display tpen;

parameter
long(ii) longitud del tramo i en m
/
I3      500.0
I3      500.0
i3      500.0
i4      500.0
i5      500.0
i6      500.0
i7      500.0
i8      500.0
i9      500.0
I30     500.0
I31     500.0
I32     500.0
I33     500.0
I34     500.0
I35     500.0
I36     500.0
I37     500.0
I38     500.0

```

I39	500.0
I30	500.0
I31	500.0
I32	500.0
I33	500.0
I34	500.0
I35	707.1
I36	707.1
I37	1.0
I38	1.0
*pista con longx 2	
I39	6000.0
*pista con longx 2	
i30	6000.0
/ ;	
parameter p(ii) tiempo de proceso del tramo i por el equipo k ;	
*Los 40 primeros metros del tramo y los 40 últimos a mitad de velocidad	
loop(ii\$(card(ii)<=30),	
p(ii)=(long(ii)-40*2)/v + 40*2/(v/2)	
);	
display p;	
parameters	
rwy(cc) tramos que son pista	
apron(cc) tramos que son pista	
dice(cc) tramos que son pista	
;	
Table	
tramoic(ii,cc) tramos c compatibles con tramo i	
	c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8
I3	2 9 10 11 12
I3	1 3 6 10 11 23
i3	2 5 6 15 22 23 25
i4	5 11 12 13 14 26
i5	3 4 11 14 15 22 25 26
i6	2 3 7 23 24
i7	6 8 10 24
i8	7 9 10
i9	1 8 12
I30	1 2 8 7 11
I31	1 2 4 5 10 14 26
I32	1 9 4 13
I33	4 12 19 26 28
I34	4 5 11 19 20 26
I35	3 5 20 21 22 25
I36	17 23 24

```

I37 16 18 22 23
I38 17 21 22 25 27
I39 13 14 20 26 28
I30 14 15 19 21
I31 15 18 20 25 27
I32 3 5 15 17 18 25
I33 2 3 6 16 17
I34 6 7 16
I35 3 5 15 18 21 22 27
I36 4 5 11 13 14 19 28
I37 18 21 25 29
I38 13 19 26 30
I39 27
i30 28

```

;

parameter $M(ii,jj)$ compatibilidad tramo i vs tramo j cuando j sigue a i ;

```

loop(ii$(card(ii)<=30),
  loop(jj$(card(jj)<=30),
    loop(cc$(card(cc)<=8),
      a3=card(jj);
      if (a3=tramoic(ii,cc),
        M(ii,jj)=1.
      );
    );
  );
);

```

display M ;

variables $x(ii,jj,kk)$ variable de decisión donde $x_{ij}=1$ si el tramo i precede directamente a j en la posición k - $x_{ij}=0$ en otro caso

$R_j(jj,kk)$ variable tiempo en que el tramo j está listo en la posición k

R_{max} variable máxima R_j

R_{maxrwy} variable máximo R_j en pistas

$R_{maxapron}$ variable máximo R_j en acceso a estacionamientos

$R_{maxdice}$ variable máximo R_j en zona deshielo

$sj(jj,kk)$ variable tiempo en que el tramo j se comienza a descontaminar en la posición k

$pj(jj,kk)$ variable tiempo en descontaminar tramo j en la posición k

z variable objetivo de descontaminación

binary variable x ;

positive variable R_j , R_{max} , R_{maxrwy} , $R_{maxapron}$, $R_{maxdice}$, sj , pj ;

equations

R_{max} objetivo minimizar R_{max}

$inec2(ii,kk)$ a cada trama i le sigue uno j

$inec3$ recorrido hamiltoniano en que se empieza en la aeronave 1

$inec6(ii)$ todos los tramos entran en cola

$inec7(kk)$ posición k es un arco $vi-vj$ Equivale a 5 y 6

$inec8(ii,jj,kk)$ def de $sjk+1$ atendiendo a R_{ik}

$inec9(ii,kk)$ def R_{max}

$inec10(ii,jj,kk)$ def R_{jk} atendiendo a sjk

$inec11a(ii,kk)$ def p_{jk} atendiendo a p

$inec11b(ii,jj,ll,kk,cc)$ def p_{jk} atendiendo a $p*2$

```

inec12      inicio en Zcero (sj con j1 cuando k es 1)
inec13a(j)   condición operativa no se acaba con una pista
inec13b(j)   condición operativa no se acaba con una pista
;

R_max..      z = e = Rmax;

inec2(i,k)$ (card(k) ne 1)..      sum(j,M(i,j)*x(i,j,k))-sum(l,x(l,i,k-1)) = e = 0;
inec3..      sum(j,M('I3',j)*x('I3',j,'k1')) = e = 1;
inec6(i)..   sum((j,k),x(i,j,k)) = g = 1;
inec7(k)..   sum((i,j),x(i,j,k)) = l = 1;
inec8(i,j,k)$ (card(k) ne card(j)).. sj(j,k+1)+BigM = g = Rj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec9(i,k)..   Rmax = g = Rj(i,k);
inec10(i,j,k).. Rj(i,k)+BigM = g = sj(i,k)+pj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec11a(i,k)..   pj(i,k) = g = p(i);
inec11b(i,j,l,k,c)$ (((card(k) ne 1) and (card(j) eq tramoic(l,c))) or ((card(k) ne 1) and (card(j)
eq card(l))))..   pj(i,k)+2*BigM = g = p(i)*2+BigM*(x(l,i,k-1)+x(i,j,k));
inec12..      sj('I3','k1') = g = Zcero;
inec13a(j)..   x('I39',j,'k42') = e = 0;
inec13b(j)..   x('i30',j,'k42') = e = 0;

* exclusión de diagonal en x
*
x.fx(ii,ii,kk) = 0;

set i(ii) /
I3      'I3'
I3      'I3'
i3      'i3'
i4      'i4'
i5      'i5'
i6      'i6'
i7      'i7'
i8      'i8'
i9      'i9'
I30     'I30'
I31     'I31'
I32     'I32'
I33     'I33'
I34     'I34'
I35     'I35'
I36     'I36'
I37     'I37'
I38     'I38'
I39     'I39'
I30     'I30'
I31     'I31'
I32     'I32'
I33     'I33'
I34     'I34'
I35     'I35'
I36     'I36'
I37     'I37'

```

```

I38      'I38'
I39      'I39'
i30      'i30'
/;

set k(kk) /
k1       'k1'
k2       'k2'
k3       'k3'
k4       'k4'
k5       'k5'
k6       'k6'
k7       'k7'
k8       'k8'
k9       'k9'
k10      'k10'
k11      'k11'
k12      'k12'
k13      'k13'
k14      'k14'
k15      'k15'
k16      'k16'
k17      'k17'
k18      'k18'
k19      'k19'
k20      'k20'
k21      'k21'
k22      'k22'
k23      'k23'
k24      'k24'
k25      'k25'
k26      'k26'
k27      'k27'
k28      'k28'
k29      'k29'
k30      'k30'
k31      'k31'
k32      'k32'
k33      'k33'
k34      'k34'
k35      'k35'
k36      'k36'
k37      'k37'
k38      'k38'
k39      'k39'
k40      'k40'
k41      'k41'
k42      'k42'
*k43     'k43'
*k44     'k44'
*k45     'k45'
/;

set c(cc) /
c1       'tramo compatible 1'

```

c2 'tramo compatible 2'
c3 'tramo compatible 3'
c4 'tramo compatible 4'
c5 'tramo compatible 5'
c6 'tramo compatible 6'
c7 'tramo compatible 7'
c8 'tramo compatible 8'
/;

8.3.1.1 Modelo M2 para ord (k) = card(i)·(1+40%)

```

set ii  set tramos                / I3*i30 /
kk  set posiciones              / k1*k42 /
cc  set tramos compatibles      / c1*c8 /
i(ii) subset de tramos
k(kk) subset posiciones
c(cc) subset de tramos compatibles
alias (ii,jj,ll),(i,j,l);
alias (kk,hh),(k,h);

scalars

Zzero      Inicio del plan invernal
conta      contador
BigM       BigM=10000
a1         controlador
a3         controlador j
v          velocidad avance equipo descontaminación (mpmin)
tpen       tiempo de penalización en el giro 180°
longpen     longitud extra en giro 180° ;

Zzero=0.;
BigM=10000;
v=666.7;
a1=0.;
longpen=3.1416*40. ;
tpen=longpen/(v/2) ;

display tpen;

parameter
long(ii) longitud del tramo i en m
/
I3      500.0
I3      500.0
i3      500.0
i4      500.0
i5      500.0
i6      500.0
i7      500.0
i8      500.0
i9      500.0
I30     500.0
I31     500.0
I32     500.0
I33     500.0
I34     500.0
I35     500.0
I36     500.0
I37     500.0
I38     500.0

```


I39	500.0
I30	500.0
I31	500.0
I32	500.0
I33	500.0
I34	500.0
I35	707.1
I36	707.1
I37	1.0
I38	1.0
*pista con longx 2	
I39	6000.0
*pista con longx 2	
i30	6000.0
/ ;	
parameter p(ii) tiempo de proceso del tramo i por el equipo k ;	
*Los 40 primeros metros del tramo y los 40 últimos a mitad de velocidad	
loop(ii\$(card(ii)<=30),	
p(ii)=(long(ii)-40*2)/v + 40*2/(v/2)	
);	
display p;	
parameters	
rwy(cc) tramos que son pista	
apron(cc) tramos que son pista	
dice(cc) tramos que son pista	
;	
Table	
tramoic(ii,cc) tramos c compatibles con tramo i	
	c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8
I3	2 9 10 11 12
I3	1 3 6 10 11 23
i3	2 5 6 15 22 23 25
i4	5 11 12 13 14 26
i5	3 4 11 14 15 22 25 26
i6	2 3 7 23 24
i7	6 8 10 24
i8	7 9 10
i9	1 8 12
I30	1 2 8 7 11
I31	1 2 4 5 10 14 26
I32	1 9 4 13
I33	4 12 19 26 28
I34	4 5 11 19 20 26
I35	3 5 20 21 22 25
I36	17 23 24

```

I37 16 18 22 23
I38 17 21 22 25 27
I39 13 14 20 26 28
I30 14 15 19 21
I31 15 18 20 25 27
I32 3 5 15 17 18 25
I33 2 3 6 16 17
I34 6 7 16
I35 3 5 15 18 21 22 27
I36 4 5 11 13 14 19 28
I37 18 21 25 29
I38 13 19 26 30
I39 27
i30 28

```

;

parameter $M(ii,jj)$ compatibilidad tramo i vs tramo j cuando j sigue a i ;

```

loop(ii$(card(ii)<=30),
  loop(jj$(card(jj)<=30),
    loop(cc$(card(cc)<=8),
      a3=card(jj);
      if (a3=tramoic(ii,cc),
        M(ii,jj)=1.
      );
    );
  );
);

```

display M ;

variables $x(ii,jj,kk)$ variable de decisión donde $xij=1$ si el tramo i precede directamente a j en la posición k - $xij=0$ en otro caso

$Rj(jj,kk)$ variable tiempo en que el tramo j está listo en la posición k

$Rmax$ variable máxima Rj

$Rmaxrwy$ variable máximo Rj en pistas

$Rmaxapron$ variable máximo Rj en acceso a estacionamientos

$Rmaxdice$ variable máximo Rj en zona deshielo

$sj(jj,kk)$ variable tiempo en que el tramo j se comienza a descontaminar en la posición k

$pj(jj,kk)$ variable tiempo en descontaminar tramo j en la posición k

z variable objetivo de descontaminación

binary variable x ;

positive variable Rj , $Rmax$, $Rmaxrwy$, $Rmaxapron$, $Rmaxdice$, sj , pj ;

equations

sum_Rj objetivo minimizar $sumRj$

$inec2(ii,kk)$ a cada trama i le sigue uno j

$inec3$ recorrido hamiltoniano en que se empieza en la aeronave 1

$inec6(ii)$ todos los tramos entran en cola

$inec7(kk)$ posición k es un arco $vi-vj$ Equivale a 5 y 6

$inec8(ii,jj,kk)$ def de $sjk+1$ atendiendo a Rik

$inec9(ii,kk)$ def $Rmax$

$inec10(ii,jj,kk)$ def Rjk atendiendo a sjk

$inec11a(ii,kk)$ def pjk atendiendo a p

$inec11b(ii,jj,ll,kk,cc)$ def pjk atendiendo a $p*2$

```

inec12      inicio en Zcero (sj con j1 cuando k es 1)
inec13a(j)   condición operativa no se acaba con una pista
inec13b(j)   condición operativa no se acaba con una pista
;

sum_Rj..      z = e = sum ((i,k),Rj(i,k));

inec2(i,k)$ (card(k) ne 1)..      sum(j,M(i,j)*x(i,j,k))-sum(l,x(l,i,k-1)) = e = 0;
inec3..      sum(j,M('I3',j)*x('I3',j,'k1')) = e = 1;
inec6(i)..    sum((j,k),x(i,j,k)) = g = 1;
inec7(k)..    sum((i,j),x(i,j,k)) = l = 1;
inec8(i,j,k)$ (card(k) ne card(k)).. sj(j,k+1)+BigM = g = Rj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec9(i,k)..   Rmax = g = Rj(i,k);
inec10(i,j,k).. Rj(i,k)+BigM = g = sj(i,k)+pj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec11a(i,k).. pj(i,k) = g = p(i);
inec11b(i,j,l,k,c)$ (((card(k) ne 1) and (card(j) eq tramoic(l,c))) or ((card(k) ne 1) and (card(j)
eq card(l))))..   pj(i,k)+2*BigM = g = p(i)*2+BigM*(x(l,i,k-1)+x(i,j,k));
inec12..      sj('I3','k1') = g = Zcero;
inec13a(j)..   x('I39',j,'k42') = e = 0;
inec13b(j)..   x('i30',j,'k42') = e = 0;

* exclusión de diagonal en x
*
x.fx(ii,ii,kk) = 0;

set i(ii) /
I3      'I3'
I3      'I3'
i3      'i3'
i4      'i4'
i5      'i5'
i6      'i6'
i7      'i7'
i8      'i8'
i9      'i9'
I30     'I30'
I31     'I31'
I32     'I32'
I33     'I33'
I34     'I34'
I35     'I35'
I36     'I36'
I37     'I37'
I38     'I38'
I39     'I39'
I30     'I30'
I31     'I31'
I32     'I32'
I33     'I33'
I34     'I34'
I35     'I35'
I36     'I36'
I37     'I37'

```

```

I38      'I38'
I39      'I39'
i30      'i30'
/;

set k(kk) /
k1       'k1'
k2       'k2'
k3       'k3'
k4       'k4'
k5       'k5'
k6       'k6'
k7       'k7'
k8       'k8'
k9       'k9'
k10      'k10'
k11      'k11'
k12      'k12'
k13      'k13'
k14      'k14'
k15      'k15'
k16      'k16'
k17      'k17'
k18      'k18'
k19      'k19'
k20      'k20'
k21      'k21'
k22      'k22'
k23      'k23'
k24      'k24'
k25      'k25'
k26      'k26'
k27      'k27'
k28      'k28'
k29      'k29'
k30      'k30'
k31      'k31'
k32      'k32'
k33      'k33'
k34      'k34'
k35      'k35'
k36      'k36'
k37      'k37'
k38      'k38'
k39      'k39'
k40      'k40'
k41      'k41'
k42      'k42'
*k43     'k43'
*k44     'k44'
*k45     'k45'
*k46     'k46'
/;

set c(cc) /

```

```
c1 'tramo compatible 1'  
c2 'tramo compatible 2'  
c3 'tramo compatible 3'  
c4 'tramo compatible 4'  
c5 'tramo compatible 5'  
c6 'tramo compatible 6'  
c7 'tramo compatible 7'  
c8 'tramo compatible 8'  
/;  
  
model descontaAM_1 /all/;  
  
solve descontaAM_1 using mip minimizing z;
```

8.3.1.1 Modelo M3w para $\text{ord}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+40\%)$

```

set ii  set tramos                / I3*i30 /
kk  set posiciones                / k1*k42 /
cc  set tramos compatibles        / c1*c8 /
nn  set subconjuntos de tramos objetivo / arr, dep, dice, apron, accdice, total /
i(ii) subset de tramos
k(kk) subset posiciones
c(cc) subset de tramos compatibles
n(nn) subset de subconjuntos de tramos objetivo
alias (ii,jj,ll),(i,j,l);
alias (kk,hh),(k,h);

scalars

    Zcero      Inicio del plan invernal
    conta      contador
    BigM        BigM=10000
    a1          controlador
    a3          controlador j
    v           velocidad avance equipo descontaminación (mpmin)
    tpen        tiempo de penalización en el giro 180°
    longpen      longitud extra en giro 180°
    B           coeficiente de adimensionalización
    ;

    Zcero=0.;
    BigM=10000;
    v=666.7;
    a1=0.;
    B=0.;
    longpen=3.1416*40. ;
    tpen=longpen/(v/2) ;

display tpen;

parameter
    w(nn) pesos
    /
        arr  1.
        dep  1.
        dice 0.25
        apron 0.25
        accdice 0.25
        total 0.25
    / ;

parameter
    long(ii) longitud del tramo i en m
    /
        I3  500.0
        I3  500.0
        i3  500.0

```

i4	500.0
i5	500.0
i6	500.0
i7	500.0
i8	500.0
i9	500.0
I30	500.0
I31	500.0
I32	500.0
I33	500.0
I34	500.0
I35	500.0
I36	500.0
I37	500.0
I38	500.0
I39	500.0
I30	500.0
I31	500.0
I32	500.0
I33	500.0
I34	500.0
I35	707.1
I36	707.1
I37	1.0
I38	1.0
*pista con longx 2	
I39	6000.0
*pista con longx 2	
i30	6000.0
/ ;	
parameter p(ii) tiempo de proceso del tramo i por el equipo k ;	
*Los 40 primeros metros del tramo y los 40 últimos a mitad de velocidad	
loop(ii\$(card(ii)<=30),	
p(ii)=(long(ii)-40*2)/v + 40*2/(v/2);	
B=B+p(ii);	
);	
display p;	
display B;	
Table	
tramoic(ii,cc) tramos c compatibles con tramo i	
	c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8
I3	2 9 10 11 12
I3	1 3 6 10 11 23
i3	2 5 6 15 22 23 25
i4	5 11 12 13 14 26
i5	3 4 11 14 15 22 25 26
i6	2 3 7 23 24
i7	6 8 10 24

```

i8 7 9 10
i9 1 8 12
I30 1 2 8 7 11
I31 1 2 4 5 10 14 26
I32 1 9 4 13
I33 4 12 19 26 28
I34 4 5 11 19 20 26
I35 3 5 20 21 22 25
I36 17 23 24
I37 16 18 22 23
I38 17 21 22 25 27
I39 13 14 20 26 28
I30 14 15 19 21
I31 15 18 20 25 27
I32 3 5 15 17 18 25
I33 2 3 6 16 17
I34 6 7 16
I35 3 5 15 18 21 22 27
I36 4 5 11 13 14 19 28
I37 18 21 25 29
I38 13 19 26 30
I39 27
i30 28

```

;

parameter $M(ii,jj)$ compatibilidad tramo i vs tramo j cuando j sigue a i ;

```

loop(ii$(card(ii)<=30),
  loop(jj$(card(jj)<=30),
    loop(cc$(card(cc)<=8),
      a3=card(jj);
      if (a3=tramoic(ii,cc),
        M(ii,jj)=1.
      );
    );
  );
);

```

display M ;

variables $x(ii,jj,kk)$ variable de decisión donde $xij=1$ si el tramo i precede directamente a j en la posición k - $xij=0$ en otro caso

$Rj(jj,kk)$ variable tiempo en que el tramo j está listo en la posición k

$Rmax(nn)$ variable máximo Rj mix

$sj(jj,kk)$ variable tiempo en que el tramo j se comienza a descontaminar en la posición k

$pj(jj,kk)$ variable tiempo en descontaminar tramo j en la posición k

z variable objetivo de descontaminación

binary variable x ;

positive variable $Rj, Rmax, sj, pj$;

equations

R_max_mix objetivo minimizar $Rmax_mix$

$inec2(ii,kk)$ a cada trama i le sigue uno j

$inec3$ recorrido hamiltoniano en que se empieza en la aeronave 1

$inec6(ii)$ todos los tramos entran en cola


```

inec7(kk)      posición k es un arco vi-vj Equivale a 5 y 6
inec8(ii,jj,kk) def de sjk+1 atendiendo a Rik
inec9(ii,kk)   def Rmax
inec91(kk)     def Rmaxrwyarr
inec92(kk)     def Rmaxrwydep
inec93(kk)     def Rmaxdice
inec94(kk)     def Rmaxapron
inec95(kk)     def Rmaxapron
inec96(kk)     def Rmaxapron
inec97(kk)     def Rmaxapron
inec98(kk)     def Rmaxaccdice
inec10(ii,jj,kk) def Rjk atendiendo a sjk
inec11a(ii,kk) def pjk atendiendo a p
inec11b(ii,jj,ll,kk,cc) def pjk atendiendo a p*2
inec12         inicio en Zcero (sj con j1 cuando k es 1)
inec13a(j)     condición operativa no se acaba con una pista
inec13b(j)     condición operativa no se acaba con una pista
;

R_max_mix..          z =e= 1/B*( w('arr')*Rmax('arr') + w('dep')*Rmax('dep') +
w('dice')*Rmax('dice') + w('apron')*Rmax('apron') + w('accdice')*Rmax('accdice') +
w('total')*Rmax('total'));

inec2(i,k)$ (card(k) ne 1)..      sum(j,M(i,j)*x(i,j,k))-sum(l,x(l,i,k-1)) =e= 0;
inec3..                          sum(j,M('I3',j)*x('I3',j,'k1')) =e= 1;
inec6(i)..                      sum((j,k),x(i,j,k)) =g= 1;
inec7(k)..                      sum((i,j),x(i,j,k)) =l= 1;
inec8(i,j,k)$ (card(k) ne card(k)).. sj(j,k+1)+BigM =g= Rj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec9(i,k)..                    Rmax('total') =g= Rj(i,k);
inec91(k)..                    Rmax('arr') =g= Rj('i30',k);
inec92(k)..                    Rmax('dep') =g= Rj('I39',k);
inec93(k)..                    Rmax('dice') =g= Rj('I38',k);
inec94(k)..                    Rmax('apron') =g= Rj('I3',k);
inec95(k)..                    Rmax('apron') =g= Rj('i3',k);
inec96(k)..                    Rmax('apron') =g= Rj('i5',k);
inec97(k)..                    Rmax('apron') =g= Rj('I31',k);
inec98(k)..                    Rmax('accdice')=g= Rj('I32',k);
inec10(i,j,k)..                Rj(i,k)+BigM =g= sj(i,k)+pj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec11a(i,k)..                 pj(i,k) =g= p(i);
inec11b(i,j,l,k,c)$ (((card(k) ne 1) and (card(j) eq tramoic(l,c))) or ((card(k) ne 1) and (card(j)
eq card(l))))..   pj(i,k)+2*BigM =g= p(i)*2+BigM*(x(l,i,k-1)+x(i,j,k));
inec12..                      sj('I3','k1') =g= Zcero;
inec13a(j)..                  x('I39',j,'k42') =e= 0;
inec13b(j)..                  x('i30',j,'k42') =e= 0;

* exclusión de diagonal en x
*
x.fx(ii,ii,kk) = 0;

set i(ii) /
I3      'I3'
I3      'I3'
i3      'i3'

```

```

i4      'i4'
i5      'i5'
i6      'i6'
i7      'i7'
i8      'i8'
i9      'i9'
I30     'I30'
I31     'I31'
I32     'I32'
I33     'I33'
I34     'I34'
I35     'I35'
I36     'I36'
I37     'I37'
I38     'I38'
I39     'I39'
I30     'I30'
I31     'I31'
I32     'I32'
I33     'I33'
I34     'I34'
I35     'I35'
I36     'I36'
I37     'I37'
I38     'I38'
I39     'I39'
i30     'i30'
/;

set k(kk) /
k1      'k1'
k2      'k2'
k3      'k3'
k4      'k4'
k5      'k5'
k6      'k6'
k7      'k7'
k8      'k8'
k9      'k9'
k10     'k10'
k11     'k11'
k12     'k12'
k13     'k13'
k14     'k14'
k15     'k15'
k16     'k16'
k17     'k17'
k18     'k18'
k19     'k19'
k20     'k20'
k21     'k21'
k22     'k22'
k23     'k23'
k24     'k24'
k25     'k25'

```

```
k26      'k26'
k27      'k27'
k28      'k28'
k29      'k29'
k30      'k30'
k31      'k31'
k32      'k32'
k33      'k33'
k34      'k34'
k35      'k35'
k36      'k36'
k37      'k37'
k38      'k38'
k39      'k39'
k40      'k40'
k41      'k41'
k42      'k42'
*k43      'k43'
*k44      'k44'
*k45      'k45'
/;

set c(cc) /
  c1 'tramo compatible 1'
  c2 'tramo compatible 2'
  c3 'tramo compatible 3'
  c4 'tramo compatible 4'
  c5 'tramo compatible 5'
  c6 'tramo compatible 6'
  c7 'tramo compatible 7'
  c8 'tramo compatible 8'
/;

model descontaAM_1 /all/;

solve descontaAM_1 using mip minimizing z;
```

8.3.1.1 Modelo M4w para $\text{ord}(k) = \text{card}(i) \cdot (1+40\%)$

```

set ii  set tramos                / I3*i30 /
kk  set posiciones                / k1*k42 /
cc  set tramos compatibles        / c1*c8 /
nn  set subconjuntos de tramos objetivo / arr, dep, dice, apron, accdice, total /
i(ii) subset de tramos
k(kk) subset posiciones
c(cc) subset de tramos compatibles
n(nn) subset de subconjuntos de tramos objetivo
alias (ii,jj,ll),(i,j,l);
alias (kk,hh),(k,h);

scalars

    Zcero      Inicio del plan invernal
    conta      contador
    BigM        BigM=10000
    a1          controlador
    a3          controlador j
    v           velocidad avance equipo descontaminación (mpmin)
    tpen        tiempo de penalización en el giro 180°
    longpen     longitud extra en giro 180°
    B           coeficiente de adimensionalización
    Bl          coeficiente de adimensionalización
    ;

    Zcero=0.;
    BigM=10000;
    v=666.7;
    a1=0.;
    B=0.;
    longpen=3.1416*40. ;
    tpen=longpen/(v/2) ;

display tpen;

parameter
    w(nn) pesos
    /
    arr  1.
    dep  1.
    dice 0.25
    apron 0.25
    accdice 0.25
    total 0.25
    / ;

parameter
    long(ii) longitud del tramo i en m
    /
    I3      500.0

```

```

I3      500.0
i3      500.0
i4      500.0
i5      500.0
i6      500.0
i7      500.0
i8      500.0
i9      500.0
I30     500.0
I31     500.0
I32     500.0
I33     500.0
I34     500.0
I35     500.0
I36     500.0
I37     500.0
I38     500.0
I39     500.0
I30     500.0
I31     500.0
I32     500.0
I33     500.0
I34     500.0
I35     707.1
I36     707.1
I37     1.0
I38     1.0
*pista con longx 2
I39     6000.0
*pista con longx 2
i30     6000.0
/ ;

parameter p(ii) tiempo de proceso del tramo i por el equipo k ;
*Los 40 primeros metros del tramo y los 40 últimos a mitad de velocidad
loop(ii$(card(ii)<=30),
    p(ii)=(long(ii)-40*2)/v + 40*2/(v/2);
    B=B+p(ii);
);

display p;
display B;

parameter
r(nn) hora estimada de finalización del subconjunto de tramos objetivo i
/
arr     10.0
dep     30.0
dice    25.0
apron   20.0
accdice 25.0
total   75.0
/ ;

```

$Bl = r('total') - B;$

display Bl;

Table

tramoic(ii,cc) tramos c compatibles con tramo i

	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	<i>c6</i>	<i>c7</i>	<i>c8</i>
<i>I3</i>	2	9	10	11	12			
<i>I3</i>	1	3	6	10	11	23		
<i>i3</i>	2	5	6	15	22	23	25	
<i>i4</i>	5	11	12	13	14	26		
<i>i5</i>	3	4	11	14	15	22	25	26
<i>i6</i>	2	3	7	23	24			
<i>i7</i>	6	8	10	24				
<i>i8</i>	7	9	10					
<i>i9</i>	1	8	12					
<i>I30</i>	1	2	8	7	11			
<i>I31</i>	1	2	4	5	10	14	26	
<i>I32</i>	1	9	4	13				
<i>I33</i>	4	12	19	26	28			
<i>I34</i>	4	5	11	19	20	26		
<i>I35</i>	3	5	20	21	22	25		
<i>I36</i>	17	23	24					
<i>I37</i>	16	18	22	23				
<i>I38</i>	17	21	22	25	27			
<i>I39</i>	13	14	20	26	28			
<i>I30</i>	14	15	19	21				
<i>I31</i>	15	18	20	25	27			
<i>I32</i>	3	5	15	17	18	25		
<i>I33</i>	2	3	6	16	17			
<i>I34</i>	6	7	16					
<i>I35</i>	3	5	15	18	21	22	27	
<i>I36</i>	4	5	11	13	14	19	28	
<i>I37</i>	18	21	25	29				
<i>I38</i>	13	19	26	30				
<i>I39</i>	27							
<i>i30</i>	28							

;

parameter *M(ii,jj)* compatibilidad tramo *i* vs tramo *j* cuando *j* sigue a *i* ;

```

loop(ii$(card(ii)<=30),
  loop(jj$(card(jj)<=30),
    loop(cc$(card(cc)<=8),
      a3=card(jj);
      if(a3=tramoic(ii,cc),
        M(ii,jj)=1.
      );
    );
  );
);
);

```

display M;

variables $x(ii,jj,kk)$ variable de decisión donde $x_{ij}=1$ si el tramo i precede directamente a j en la posición k - $x_{ij}=0$ en otro caso

$Rj(jj,kk)$ variable tiempo en que el tramo j está listo en la posición k

$Rmax(nn)$ variable máximo Rj mix

$idle(nn)$ variable retraso en cada subconjunto de tramos objetivo

$sj(jj,kk)$ variable tiempo en que el tramo j se comienza a descontaminar en la posición k

$pj(jj,kk)$ variable tiempo en descontaminar tramo j en la posición k

z variable objetivo de descontaminación

binary variable x ;

positive variable $Rj, Rmax, idle, sj, pj$;

equations

l_mix objetivo minimizar $Rmax_mix$

$inec2(ii,kk)$ a cada trama i le sigue uno j

$inec3$ recorrido hamiltoniano en que se empieza en la aeronave 1

$inec6(ii)$ todos los tramos entran en cola

$inec7(kk)$ posición k es un arco v_i-v_j Equivale a 5 y 6

$inec8(ii,jj,kk)$ def de $sjk+1$ atendiendo a Rik

$inec9(ii,kk)$ def $Rmax$

$inec91(kk)$ def $Rmaxrwyarr$

$inec92(kk)$ def $Rmaxrwydep$

$inec93(kk)$ def $Rmaxdice$

$inec94(kk)$ def $Rmaxapron$

$inec95(kk)$ def $Rmaxapron$

$inec96(kk)$ def $Rmaxapron$

$inec97(kk)$ def $Rmaxapron$

$inec98(kk)$ def $Rmaxaccdice$

$inec10(ii,jj,kk)$ def Rjk atendiendo a sjk

$inec11a(ii,kk)$ def pjk atendiendo a p

$inec11b(ii,jj,ll,kk,cc)$ def pjk atendiendo a $p*2$

$inec12$ inicio en $Zcero$ (sj con $j1$ cuando k es 1)

$inec13a(jj)$ condición operativa no se acaba con una pista

$inec13b(jj)$ condición operativa no se acaba con una pista

$inec14$ def $idle$ total

$inec141$ def $idle$ arr

$inec142$ def $idle$ dep

$inec143$ def $idle$ dice

$inec144$ def $idle$ apron

$inec145$ def $idle$ accdice

;

$l_mix..$ $z = e = 1/Bl * (w('arr')*idle('arr') + w('dep')*idle('dep') + w('dice')*idle('dice') + w('apron')*idle('apron') + w('accdice')*idle('accdice') + w('total')*idle('total'))$;

$inec2(i,k) \$(card(k) \neq 1)..$ $sum(j, M(i,j)*x(i,j,k)) - sum(l, x(l,i,k-1)) = e = 0$;

$inec3..$ $sum(j, M('I3',j)*x('I3',j,'k1')) = e = 1$;

$inec6(i)..$ $sum((j,k), x(i,j,k)) = g = 1$;

$inec7(k)..$ $sum((i,j), x(i,j,k)) = l = 1$;

$inec8(i,j,k) \$(card(k) \neq card(k))..$ $sj(j,k+1) + BigM = g = Rj(i,k) + BigM*x(i,j,k)$;

$inec9(i,k)..$ $Rmax('total') = g = Rj(i,k)$;

$inec91(k)..$ $Rmax('arr') = g = Rj('i30',k)$;

$inec92(k)..$ $Rmax('dep') = g = Rj('I39',k)$;

```

inec93(k)..      Rmax('dice') =g= Rj('I38',k);
inec94(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('I3',k);
inec95(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i3',k);
inec96(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i5',k);
inec97(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('I31',k);
inec98(k)..      Rmax('accdice')=g= Rj('I32',k);
inec10(i,j,k)..  Rj(i,k)+BigM =g= sj(i,k)+pj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec11a(i,k)..   pj(i,k) =g= p(i);
inec11b(i,j,l,k,c)$(((card(k) ne 1) and (card(j) eq tramoic(l,c))) or ((card(k) ne 1) and (card(j)
eq card(l))))..  pj(i,k)+2*BigM =g= p(i)*2+BigM*(x(l,i,k-1)+x(i,j,k));
inec12..         sj('I3','k1') =g= Zcero;
inec13a(j)..     x('I39',j,'k42') =e= 0;
inec13b(j)..     x('i30',j,'k42') =e= 0;
inec14 ..        idle('total') =g= Rmax('total')-r('total');
inec141..        idle('arr')   =g= Rmax('arr')-r('arr');
inec142..        idle('dep')   =g= Rmax('dep')-r('dep');
inec143..        idle('dice')  =g= Rmax('dice')-r('dice');
inec144..        idle('apron') =g= Rmax('apron')-r('apron');
inec145..        idle('accdice')=g= Rmax('accdice')-r('accdice');

* exclusión de diagonal en x
*
x.fx(ii,ii,kk) = 0;

set i(ii) /
I3      'I3'
I3      'I3'
i3      'i3'
i4      'i4'
i5      'i5'
i6      'i6'
i7      'i7'
i8      'i8'
i9      'i9'
I30     'I30'
I31     'I31'
I32     'I32'
I33     'I33'
I34     'I34'
I35     'I35'
I36     'I36'
I37     'I37'
I38     'I38'
I39     'I39'
I30     'I30'
I31     'I31'
I32     'I32'
I33     'I33'
I34     'I34'
I35     'I35'
I36     'I36'
I37     'I37'
I38     'I38'

```



```

I39      'I39'
i30      'i30'
/;

set k(kk) /
k1       'k1'
k2       'k2'
k3       'k3'
k4       'k4'
k5       'k5'
k6       'k6'
k7       'k7'
k8       'k8'
k9       'k9'
k10      'k10'
k11      'k11'
k12      'k12'
k13      'k13'
k14      'k14'
k15      'k15'
k16      'k16'
k17      'k17'
k18      'k18'
k19      'k19'
k20      'k20'
k21      'k21'
k22      'k22'
k23      'k23'
k24      'k24'
k25      'k25'
k26      'k26'
k27      'k27'
k28      'k28'
k29      'k29'
k30      'k30'
k31      'k31'
k32      'k32'
k33      'k33'
k34      'k34'
k35      'k35'
k36      'k36'
k37      'k37'
k38      'k38'
k39      'k39'
k40      'k40'
k41      'k41'
k42      'k42'
*k43     'k43'
*k44     'k44'
*k45     'k46'
*k46     'k46'
/;

set c(cc) /
c1       'tramo compatible 1'

```

```
c2 'tramo compatible 2'
c3 'tramo compatible 3'
c4 'tramo compatible 4'
c5 'tramo compatible 5'
c6 'tramo compatible 6'
c7 'tramo compatible 7'
c8 'tramo compatible 8'
/;

model descontaAM_1 /all/;

solve descontaAM_1 using mip minimizing z;
```

8.3.2. Anexo datos de simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+0\%)\cdot\text{card}(i)$

$z=R_{\max}$		$\text{card}(k)=(1+0\%)\cdot\text{card}(i)$					
card(i)	Modelo	card (k)	R max total		Sum Rj	#180°	time
5	A0	5	3,60		10,42	0	0:00:01
12	A1	12	12,18		80,04	2	0:00:24
26	A2	26	NS				0:16:43
30	A3	30	NS				0:10:10
36	A4	36	NS				0:07:13

$z=\text{Sum } R_j^k$		$\text{card}(k)=(1+0\%)\cdot\text{card}(i)$					
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total		Sum Rj	#180°	time
5	A0	5	3,60		10,42	0	0:00:01
12	A1	12	12,18		75,69	2	0:01:02
26	A2	26	NS				
30	A3	30	NS				
36	A4	36	NS				

$z=\text{Sum } R_{\max z_{\text{mix}}}$		$\text{card}(k)=(1+0\%)\cdot\text{card}(i)$ (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180°	time
5	A0	5	3,60				2,61		0,43	11,92	0	0:00:01
12	A1	12	12,18			2,61	8,7		0,00	77,43	0	0:00:35
26	A2	26	NS									
30	A3	30	NS									
36	A4	36	NS									

$z=\text{Sum } w_z l_{\max z}$		$\text{card}(k)=(1+0\%)\cdot\text{card}(i)$ (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180°	time
5	A0	5	3,60				2,61		0,24	11,93	0	0:00:01
12	A1	12	13,05			6,09	2,61		1,67	80,91	0	0:00:34
26	A2	26	NS									
30	A3	30	NS									
36	A4	36	NS									

card(i)	Modelo	card (k)	l total	l arr	l dep	l dice	l apron	l accdice
5	A0	5	0,00				0,01	
12	A1	12	2,05			1,09	0,61	
26	A2	26	NS					
30	A3	30	NS					
36	A4	36	NS					

Tabla 47: Simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+0\%)\cdot\text{card}(i)$

8.3.3. Anexo datos de simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+30\%)\cdot\text{card}(i)$

z=Rmax		card(k)=(1+ 30%)· card(i)						
card(i)	Modelo	card (k)	R max total			Sum Rj	#180°	time
5	A0	6	NA					
12	A1	15	13,05			104,39	0	0:17:19
26	A2	34	37,47			685,77	8	0:16:50
30	A3	38	92,02			1,70E+03	11	0:16:55
36	A4	46	SNF					

z= Sum R_j^k		card(k)=(1+ 30%)· card(i)						
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total			Sum Rj	#180°	time
5	A0	6	NA					
12	A1	15	13,05			104,39	0	0:16:42
26	A2	34	37,47			602,69	8	2:46:47
30	A3	38	74,43			1336,64	10	4:10:00
36	A4	46	SNF					

z=Sum $R_{\max z_{\text{mix}}}$		card(k)=(1+ 30%)· card(i) (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180°	time
5	A0	6	NA									
12	A1	15	13,05			2,61	6,96		0,73	104,39	0	0:22:40
26	A2	34	38,65			12,80	36,04	16,28	1,12	698,07	9	1:23:00
30	A3	38	75,55	73,69	34,33	39,04	47,74	46,87	3,84	1,30E+03	0	1:23:32
36	A4	46	SNF									

z=Sum $w_z l_{\max z}$		card(k)=(1+ 30%)· card(i) (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180°	time
5	A0	6	NA									
12	A1	15	13,05			5,22	2,61		1,28	104,39	0	0:16:40
26	A2	34	37,00			13,36	5,00	13,36	0,48	585,75	5	0:33:27
30	A3	38	76,80	62,13	38,12	25,00	69,84	25,00	2,20	1,50E+03	12	0:33:30
36	A4	46	SNF									
card(i)	Modelo	card (k)	l total	l arr	l dep	l dice	l apron	l accdice				
5	A0	6	NA									
12	A1	15	2,05			0,22	0,61					
26	A2	34	0,00			3,36	0,00	22,81				
30	A3	38	1,80	52,13	8,12	0,00	49,84	0,00				
36	A4	46	SNF									

Tabla 48: Simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+30\%)\cdot\text{card}(i)$

8.3.4. Anexo datos de simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+40\%)\cdot\text{card}(i)$

z=Rmax		card(k)=(1+ 40%)· card(i)						
card(i)	Modelo	card (k)	R max total			Sum Rj	#180°	time
5	A0	7	NA					
12	A1	16	13,92			118,31	0	0:16:56
26	A2	36	42,44			810,79	11	0:16:45
30	A3	42	99,00			1,50E+03	14	0:16:59
36	A4	50	SNF					

z= Sum R_j^k		card(k)=(1+ 40%)· card(i)						
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total			Sum Rj	#180°	time
5	A0	7	NA					
12	A1	16	13,92			118,31	0	0:16:56
26	A2	36	42,44			810,79	11	0:16:45
30	A3	42	99,00			1,50E+03	14	0:16:59
36	A4	50	SNF					

z=Sum $R_{\max z_{\text{mix}}}$		card(k)=(1+ 40%)· card(i) (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180°	time
5	A0	7	NA									
12	A1	16	13,92			2,61	6,96		0,75	118,31	0	0:33:24
26	A2	36	43,87			26,41	38,03	32,81	1,52	780,41	13	1:23:27
30	A3	42	81,08	51,38	22,15	23,14	72,38	29,23	3,00	2,10E+03	13	4:01:08
36	A4	50	SNF									

z=Sum $w_z l_{\max z}$		card(k)=(1+ 40%)· card(i) (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180°	time
5	A0	7	NA									
12	A1	16	13,92			5,22	2,61		1,67	118,31	0	0:16:40
26	A2	36	41,26			13,05	34,30	13,05	0,67	738,22	10	0:33:27
30	A3	42	79,47	34,33	61,82	43,46	75,68	43,46	2,58	1,50E+03	7	2:46:53
36	A4	50	SNF									
card(i)	Modelo	card (k)	l total	l arr	l dep	l dice	l apron	l accdice				
5	A0	7	NA									
12	A1	16	2,92			0,22	0,61					
26	A2	36	4,26			3,05	29,3	0,44				
30	A3	42	4,47	24,33	31,82	18,46	55,68	39,86				
36	A4	50	SNF									

Tabla 49: Simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+40\%)\cdot\text{card}(i)$

8.3.5. Anexo datos de simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+50\%)\cdot\text{card}(i)$

z=Rmax		card(k)=(1+ 50%)· card(i)					
card(i)	Modelo	card (k)	R max total		Sum Rj	#180°	time
5	A0	7	NA				
12	A1	17	14,79		133,10	0	0:16:54
26	A2	39	45,92		994,23	12	0:16:50
30	A3	46	100,43		2,70E+03	13	0:16:52
36	A4	54	SNF				

z= Sum R_j^k		card(k)=(1+ 50%)· card(i)					
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total		Sum Rj	#180°	time
5	A0	7	NA				
12	A1	17	15,66		133,97	1	0:16:40
26	A2	39	49,65		929,73	16	2:46:00
30	A3	46	81,57		1798,2	12	4:10:00
36	A4	54	SNF				

z=Sum $R_{\max z_{\text{mix}}}$		card(k)=(1+ 50%)· card(i) (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180°	time
5	A0	7	NA									
12	A1	17	14,79			2,61	6,96		0,77	133,10	0	0:33:21
26	A2	39	48,53			28,21	41,57	26,47	1,56	978,07	15	0:10:15
30	A3	46	83,13	82,14	22,15	37,06	57,94	40,54	3,81	1,90E+03	12	4:10:00
36	A4	54	SNF									

z=Sum $w_z l_{\max z}$		card(k)=(1+ 50%)· card(i) (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
card(i)	Modelo	card (k)	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180°	time
5	A0	7	NA									
12	A1	17	14,79			6,09	2,61		2,45	133,10	0	0:16:40
26	A2	39	50,39			17,15	41,38	17,15	1,32	1,00E+03	15	0:33:28
30	A3	46	90,00	47,90	30,00	26,62	78,60	26,62	1,11	2,40E+03	13	1:23:33
36	A4	54	98,28	63,35	90,28	25,00	69,75	25,00	3,07	2,30E+03	16	8:20:00
card(i)	Modelo	card (k)	l total	l arr	l dep	l dice	l apron	l accdice				
5	A0	7	NA									
12	A1	17	3,79			1,09	0,61					
26	A2	39	13,39			7,15	36,38	15,91				
30	A3	46	0,00	37,90	0,00	1,62	58,60	2,49				
36	A4	54	8,79	53,35	60,28	0,00	49,75	0,00				

Tabla 50: Simulaciones RM_AM: $\text{card}(k)=(1+50\%)\cdot\text{card}(i)$

8.3.6. Anexo datos de simulaciones RM_AM: Ficheros de programación *.gms

Para Modelo M1

A0

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A0_k5.gms

A1

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A1_k12.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A1_k15.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A1_k16.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A1_k17.gms

A2

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A2_k26.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A2_k34.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A2_k36.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A2_k39.gms

A3

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A3_k30.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A3_k38.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A3_k42.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A3_k46.gms

A4

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A4_k54.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A4_k36.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A4_k46.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_A4_k50.gms

Para Modelo M2

A0

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A0_k5.gms

A1

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A1_k12.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A1_k15.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A1_k16.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A1_k17.gms

A2

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A2_k26.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A2_k34.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A2_k36.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A2_k39.gms

A3

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A3_k38.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A3_k42.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_SumRj_A3_k46.gms

A4

Para Modelo M3w

A0

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A0_k5.gms

A1

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A1_k12.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A1_k15.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A1_k16.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A1_k17.gms

A2

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A2_k26.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A2_k34.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A2_k36.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A2_k39.gms

A3

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A3_k38.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A3_k42.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A3_k46.gms

A4

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A4_k46.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A4_k50.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Rmax_mix_A4_k54.gms

Para Modelo M4w

A0

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A0_k5.gms

A1

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A1_k17.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A1_k12.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A1_k15.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A1_k16.gms

A2

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A2_k26.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A2_k34.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A2_k36.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A2_k39.gms

A3

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A3_k30.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A3_k38.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A3_k42.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A3_k46.gms

A4

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A4_k36.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A4_k46.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A4_k50.gms

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_A4_k54.gms

8.3.7. Anexo datos de simulaciones RM_AM: Ficheros de salida de datos *.out

Para Modelo M1

A0

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_A0_k5.out

A1

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_A1_k12.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_A1_k15.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_A1_k16.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_A1_k17.out

A2

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_A2_k34.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_A2_k36.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_A2_k39.out

A3

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A3_k38.out

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A3_k42.out

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A3_k46.out

A4

No se ha encontrado solución

Para Modelo M2

A0

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A0_k5.out

A1

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A1_k12.out

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A1_k15.out

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A1_k16.out

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A1_k17.out

A2

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A2_k34.out

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A2_k36.out

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A2_k39.out

A3

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A3_k38.out

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A3_k42.out

RM_AM_1_ri-Mij_SumRj_A3_k46.out

A4

No se ha encontrado solución

Para Modelo M3w

A0

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A0_k5.out

A1

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A1_k12.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A1_k15.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A1_k16.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A1_k17.out

A2

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A2_k34.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A2_k36.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A2_k39.out

A3

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A3_k38.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A3_k42.out

RM_AM_1_ri-Mij_Rmax_mix_A3_k46.out

A4

No se ha encontrado solución

Para Modelo M4w

A0

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A0_k5.out

A1

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A1_k12.out

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A1_k15.out

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A1_k16.out

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A1_k17.out

A2

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A2_k36.out

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A2_k34.out

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A2_k39.out

A3

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A3_k38.out

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A3_k42.out

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A3_k46.out

A4

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_A4_k54.out

8.4. Anexo IV: Datos de simulaciones RM_AM. Simulación T4S

Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S

8.4.1. Anexo datos de simulaciones RM_AM: programación modelos para área de maniobras T4S

8.4.1.1 Líneas de programación común para Zona 1, Zona 2 y Zona 3

Relativas a:

- Opciones de configuración de GAMS para la resolución. En el ejemplo se muestra para un tiempo de resolución limitado a 3000 seg

$$ResLim = 3000$$

Esta opción varía en función de la iteración de que se trate (1000 seg en iteración 1, 3000 seg en el resto).

- Programación para la muestra de resultados
- Creación fichero de salida de datos *.out

Options

```
SolPrint = Off
IterLim = 1000000
ResLim = 3000
LimRow = 0
LimCol = 0
Decimals = 2
SysOut = ON
LP = CPLEX
MIP = CPLEX
RMIP = CPLEX
OptcR = 0.10
;
model descontaAM_1 /all/;
solve descontaAM_1 using mip minimizing z;
display x.l;
display z.l;
display idle.l;
display Rmax.l;
display sj.l;
display Rj.l;
display pj.l;
FILE Rman / Res_RM_AM\RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_T4S_Zona_3_k45_30001.out/ ;
PUT Rman ;
    Rman.nw=6;
    Rman.lw=1;
PUT //
    @1, 'SOLUCIÓN ÓPTIMA' ;
PUT //
loop(k,
loop(i,
```



```

loop(j,
  if (x.l(i,j,k)=1,
    put //
      @1, 'Posción ';
    put @10, ord(k);
    put @13, ' -> tramo ';
    put @30, ord(i);
    put @33, ' seguido del tramo ';
    put @62, ord(j);
    put @65, ' ' ;
    if (ord(k)=card(k),
      put @33, ' y último ' ;
    );
  );
);
);
);
);

PUT //
//
@1, 'HORA A LA QUE SE DEJA LIBRE EL TRAMO i SEGUIDO DEL TRAMO j' ;
PUT //
@1, '          sj   Rj   pj   p' ;

loop(k,
  loop(i,
    loop(j,
      if (x.l(i,j,k)=1,
        put //
          @1, ord(i);
        put @1, 'i';
        put @4, ' ' ;
        put @11, ord(j);
        put @11, 'j';
        put @14, ' ' ;
        put @47, sj.l(i,k);
        put @54, Rj.l(i,k);
        put @61, pj.l(i,k);
        put @68, p(i);
      );
    );
  );
);

loop(k,
  loop(i,
    loop(j,
      if (x.l(i,j,k)=1,
        a1=a1+Rj.l(i,k)
      );
    );
  );
);

PUT //

```

```

    @1, 'Zcero T4S Zona 3' ;
PUT //
    @1, Zcero;
PUT //
    @1, 'Objetivo' ;
PUT //
    @1, z.l;
PUT //
    @1, 'B      Bl' ;
PUT //
PUT @1, B;
PUT @10, Bl;
PUT //
    @1, 'wtotal Rmax ltotal' ;
PUT //
    @1, w('total');
PUT @10, Rmax.l('total');
PUT @22, idle.l('total');
PUT //
    @1, 'warr Rmaxrwyarr larr' ;
PUT //
    @1, w('arr')
PUT @10, Rmax.l('arr');
PUT @22, idle.l('arr');
PUT //
    @1, 'wdep Rmaxrwydep ldep' ;
PUT //
    @1, w('dep')
PUT @10, Rmax.l('dep');
PUT @22, idle.l('dep');
PUT //
    @1, 'wdice Rmaxdice ldice' ;
PUT //
    @1, w('dice')
PUT @10, Rmax.l('dice');
PUT @22, idle.l('dice');
PUT //
    @1, 'wapron Rmaxapron lapron' ;
PUT //
    @1, w('apron')
PUT @10, Rmax.l('apron');
PUT @22, idle.l('apron');
PUT //
    @1, 'waccdice Rmaxaccdice laccdice' ;
PUT //
    @1, w('dice')
PUT @10, Rmax.l('dice');
PUT @22, idle.l('accdice');
PUT //
    @1, 'Sum Rj' ;
PUT //
    @1, a1;

```

8.4.1.2 Modelo M4w para T4S Zona 1 para ord (k) = 25

Z_0 y r parametrizados en el ejemplo para la iteración 3.

```

set ii  set tramos                / i1*i19 /
kk  set posiciones              / k1*k25 /
cc  set tramos compatibles      / c1*c8 /
nn  set subconjuntos de tramos objetivo / arr, dep, dice, apron, accdice, total /
i(ii) subset de tramos
k(kk) subset posiciones
c(cc) subset de tramos compatibles
n(nn) subset de subconjuntos de tramos objetivo
alias (ii,jj,ll),(i,j,l);
alias (kk,hh),(k,h);

```

scalars

```

Zcero      Inicio del plan invernal
conta      contador
BigM       BigM=10000
a1         controlador
a3         controlador j
v          velocidad avance equipo descontaminación (mpmin)
tpen       tiempo de penalización en el giro 180°
longpen    longitud extra en giro 180°
B          coeficiente de adimensionalización
Bl         coeficiente de adimensionalización
;

```

```

Zcero=0.;
BigM=10000;
v=666.7;
a1=0.;
B=0.;
longpen=3.1416*40. ;
tpen=longpen/(v/2) ;

```

display tpen;

parameter

```

w(nn) pesos
/
arr  1.
dep  1.
dice 0.25
apron 0.25
accdice 0.25
total 0.25
/ ;

```

parameter

```

long(ii) longitud del tramo i en m
/
i1    123.9
i2    317.3
i3     1.0
i4    207.4
i5    211.7
i6    317.8
*Pista con longitud x2
i7    7024.8
i8     204.8
i9     159.7
i10    128.1
i11    159.8
i12     90.0
i13    123.8
i14     90.0
i15     90.0
i16    223.2
i17    156.2
i18    458.2
i19    582.5
/ ;

parameter p(ii) tiempo de proceso del tramo i por el equipo k ;
*Los 40 primeros metros del tramo y los 40 últimos a mitad de velocidad
loop(ii$(ord(ii)<=19),
    p(ii)=(long(ii)-40*2)/v + 40*2/(v/2);
    B=B+p(ii);
);

display p;
display B;

parameter
r(nn) hora estimada de finalización del subconjunto de tramos objetivo i
/
arr    20.0
dep    0.0
dice   0.0
apron  0.0
accdice 0.0
total  25.0
/ ;

Bl = r('total') -B;

display Bl;

Table

tramoic(ii,cc) tramos c compatibles con tramo i

      c1    c2    c3    c4    c5    c6    c7    c8
i1     9    10    12    14    16

```

```

i2 3 4 5 8 9 15
i3 2 4 5 7
i4 2 3 5 6 18
i5 2 3 4 6 8 10 17
i6 4 5 8 10 17 18
i7 3
i8 2 5 6 9 10 15 17
i9 1 2 8 10 12 15
i10 1 5 6 8 9 12 17
i11 12 13 15
i12 1 9 10 11 13
i13 11 12 14
i14 1 13 16
i15 2 8 9 11
i16 1 9 14 17
i17 5 6 8 10 16 19
i18 4 6 19
i19 17 18
;

```

parameter $M(ii,jj)$ compatibilidad tramo i vs tramo j cuando j sigue a i ;

```

loop(ii$(ord(ii)<=19),
  loop(jj$(ord(jj)<=19),
    loop(cc$(ord(cc)<=8),
      a3=ord(jj);
      if (a3=tramoic(ii,cc),
        M(ii,jj)=1.
      );
    );
  );
);

```

display M ;

variables $x(ii,jj,kk)$ variable de decisión donde $xij=1$ si el tramo i precede directamente a j en la posición k - $xij=0$ en otro caso

$Rj(jj,kk)$ variable tiempo en que el tramo j está listo en la posición k

$Rmax(nn)$ variable máximo Rj mix

$idle(nn)$ variable retraso en cada subconjunto de tramos objetivo

$sj(jj,kk)$ variable tiempo en que el tramo j se comienza a descontaminar en la posición k

$pj(jj,kk)$ variable tiempo en descontaminar tramo j en la posición k

z variable objetivo de descontaminación

binary variable x ;

positive variable $Rj, Rmax, idle, sj, pj$;

equations

l_mix objetivo minimizar $Rmax_mix$

$inec2(ii,kk)$ a cada trama i le sigue uno j

$inec3$ recorrido hamiltoniano en que se empieza en la aeronave 1

$inec6(ii)$ todos los tramos entran en cola

$inec7(kk)$ posición k es un arco $vi-vj$ Equivale a 5 y 6

$inec8(ii,jj,kk)$ def de $sjk+1$ atendiendo a Rik

$inec9(ii,kk)$ def $Rmax$

*	<i>inec91(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91a(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91b(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91c(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91b(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91c(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91d(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91e(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91f(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91g(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91h(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
*	<i>inec91i(kk)</i>	<i>def Rmaxrwydep</i>
	<i>inec92(kk)</i>	<i>def Rmaxrwyarr</i>
	<i>inec92a(kk)</i>	<i>def Rmaxrwyarr</i>
	<i>inec92b(kk)</i>	<i>def Rmaxrwyarr</i>
	<i>inec92c(kk)</i>	<i>def Rmaxrwyarr</i>
	<i>inec92d(kk)</i>	<i>def Rmaxrwyarr</i>
	<i>inec92e(kk)</i>	<i>def Rmaxrwyarr</i>
	<i>inec92f(kk)</i>	<i>def Rmaxrwyarr</i>
	<i>inec92g(kk)</i>	<i>def Rmaxrwyarr</i>
	<i>inec92h(kk)</i>	<i>def Rmaxrwyarr</i>
	<i>inec92j(kk)</i>	<i>def Rmaxrwyarr</i>
*	<i>inec93a(kk)</i>	<i>def Rmaxdice</i>
*	<i>inec93b(kk)</i>	<i>def Rmaxdice</i>
*	<i>inec93c(kk)</i>	<i>def Rmaxdice</i>
*	<i>inec94a(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94b(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94c(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94d(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94e(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94f(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94g(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94h(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94i(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94j(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94k(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94l(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94m(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94n(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94o(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec94p(kk)</i>	<i>def Rmaxapron</i>
*	<i>inec95a(kk)</i>	<i>def Rmaxacdice</i>
*	<i>inec95b(kk)</i>	<i>def Rmaxacdice</i>
*	<i>inec95c(kk)</i>	<i>def Rmaxacdice</i>
*	<i>inec95d(kk)</i>	<i>def Rmaxacdice</i>
*	<i>inec95e(kk)</i>	<i>def Rmaxacdice</i>
*	<i>inec95f(kk)</i>	<i>def Rmaxacdice</i>
*	<i>inec95g(kk)</i>	<i>def Rmaxacdice</i>
	<i>inec10(ii,jj,kk)</i>	<i>def Rjk atendiendo a sjk</i>
	<i>inec11a(ii,kk)</i>	<i>def pjk atendiendo a p</i>

```

    inec11b(ii,jj,ll,kk,cc)  def pjk atendiendo a p*2
    inec12      inicio en Zcero (sj con j1 cuando k es 1)
*    inec13a(j)    condición operativa no se acaba con una pista
*    inec13b(j)    condición operativa no se acaba con una pista
    inec13c      condición operativa se acaba inicio Zona 2
    inec14      def idle total
    inec141      def idle arr
    inec142      def idle dep
    inec143      def idle dice
    inec144      def idle apron
    inec145      def idle accdice
;

l_mix..      z = e = 1/Bl*( w('arr')*idle('arr') + w('dep')*idle('dep') + w('dice')*idle('dice')
+ w('apron')*idle('apron') + w('accdice')*idle('accdice') + w('total')*idle('total'));

inec2(i,k)$ (ord(k) ne 1)..      sum(j,M(i,j)*x(i,j,k))-sum(l,x(l,i,k-1)) = e = 0;
inec3..      sum(j,M('i1',j)*x('i1',j,'k1')) = e = 1;
inec6(i)..      sum((j,k),x(i,j,k)) = g = 1;
inec7(k)..      sum((i,j),x(i,j,k)) = l = 1;
inec8(i,j,k)$ (ord(k) ne card(k)).. sj(j,k+1)+BigM = g = Rj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec9(i,k)..      Rmax('total') = g = Rj(i,k);

*inec91(k)..      Rmax('dep') = g = Rj('i29',k);
*inec91a(k)..      Rmax('dep') = g = Rj('i27',k);
*inec91b(k)..      Rmax('dep') = g = Rj('i13',k);
*inec91c(k)..      Rmax('dep') = g = Rj('i14',k);
*inec91d(k)..      Rmax('dep') = g = Rj('i15',k);
*inec91e(k)..      Rmax('dep') = g = Rj('i18',k);
*inec91f(k)..      Rmax('dep') = g = Rj('i12',k);
*inec91g(k)..      Rmax('dep') = g = Rj('i11',k);
*inec91h(k)..      Rmax('dep') = g = Rj('i3',k);
*inec91i(k)..      Rmax('dep') = g = Rj('i17',k);

inec92(k)..      Rmax('arr') = g = Rj('i7',k);
inec92a(k)..      Rmax('arr') = g = Rj('i15',k);
inec92b(k)..      Rmax('arr') = g = Rj('i2',k);
inec92c(k)..      Rmax('arr') = g = Rj('i3',k);
inec92d(k)..      Rmax('arr') = g = Rj('i12',k);
inec92e(k)..      Rmax('arr') = g = Rj('i10',k);
inec92f(k)..      Rmax('arr') = g = Rj('i6',k);
inec92g(k)..      Rmax('arr') = g = Rj('i14',k);
inec92h(k)..      Rmax('arr') = g = Rj('i16',k);
inec92j(k)..      Rmax('arr') = g = Rj('i19',k);

*inec93a(k)..      Rmax('dice') = g = Rj('i16',k);
*inec93b(k)..      Rmax('dice') = g = Rj('i6',k);
*inec93c(k)..      Rmax('dice') = g = Rj('i10',k);

*inec94a(k)..      Rmax('apron') = g = Rj('i20',k);
*inec94b(k)..      Rmax('apron') = g = Rj('i15',k);
*inec94c(k)..      Rmax('apron') = g = Rj('i16',k);
*inec94d(k)..      Rmax('apron') = g = Rj('i17',k);
*inec94e(k)..      Rmax('apron') = g = Rj('i11',k);

```

```

*inec94f(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i12',k);
*inec94g(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i13',k);
*inec94h(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i22',k);
*inec94i(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i5',k);
*inec94j(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i6',k);
*inec94k(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i7',k);
*inec94l(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i2',k);
*inec94m(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i3',k);
*inec94n(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i4',k);
*inec94o(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i10',k);
*inec94p(k)..      Rmax('apron') =g= Rj('i1',k);

*inec95a(k)..      Rmax('accdice')=g= Rj('i24',k);
*inec95b(k)..      Rmax('accdice')=g= Rj('i25',k);
*inec95c(k)..      Rmax('accdice')=g= Rj('i26',k);
*inec95d(k)..      Rmax('accdice')=g= Rj('i28',k);
*inec95e(k)..      Rmax('accdice')=g= Rj('i30',k);
*inec95f(k)..      Rmax('accdice')=g= Rj('i7',k);
*inec95g(k)..      Rmax('accdice')=g= Rj('i8',k);

inec10(i,j,k)..    Rj(i,k)+BigM =g= sj(i,k)+pj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec11a(i,k)..      pj(i,k) =g= p(i);
inec11b(i,j,l,k,c)$(((ord(k) ne 1) and (ord(j) eq tramoic(l,c))) or ((ord(k) ne 1) and (ord(j) eq
ord(l))))..      pj(i,k)+2*BigM =g= p(i)*2+BigM*(x(l,i,k-1)+x(i,j,k));
inec12..            sj('i1','k1') =g= Zcero;
*inec13a(j)..      x('i29',j,'k42') =e= 0;
*inec13b(j)..      x('i7',j,'k27') =e= 0;
inec13c..          sum(j,x('i11',j,'k25'))+sum(j,x('i15',j,'k25')) =e= 1;
inec14 ..          idle('total') =g= Rmax('total')-r('total');
inec141..          idle('arr') =g= Rmax('arr')-r('arr');
inec142..          idle('dep') =g= Rmax('dep')-r('dep');
inec143..          idle('dice') =g= Rmax('dice')-r('dice');
inec144..          idle('apron') =g= Rmax('apron')-r('apron');
inec145..          idle('accdice')=g= Rmax('accdice')-r('accdice');

* exclusión de diagonal en x
*
x.fx(ii,ii,kk) = 0;

set i(ii) /
i1      'A28'
i2      'K1'
i3      'i3'
i4      'i4'
i5      'K2'
i6      'K3'
i7      '32R-14L'
i8      'KA2'
i9      'A29'
i10     'KB2'
i11     'M29'
i12     'KB1'
i13     'M28'
i14     'KC1'
i15     'KAI'

```



```

i16      'KC2'
i17      'KA3_a'
i18      'i18'
i19      'K4'
/;

set k(kk) /
k1       'k1'
k2       'k2'
k3       'k3'
k4       'k4'
k5       'k5'
k6       'k6'
k7       'k7'
k8       'k8'
k9       'k9'
k10      'k10'
k11      'k11'
k12      'k12'
k13      'k13'
k14      'k14'
k15      'k15'
k16      'k16'
k17      'k17'
k18      'k18'
k19      'k19'
k20      'k20'
k21      'k21'
k22      'k22'
k23      'k23'
k24      'k24'
k25      'k25'
*k26     'k26'
*k27     'k27'
*k28     'k28'
*k29     'k29'
*k30     'k30'
*k31     'k31'
*k32     'k32'
*k33     'k33'
*k34     'k34'
*k35     'k35'
*k36     'k36'
*k37     'k37'
*k38     'k38'
*k39     'k39'
*k40     'k40'
*k41     'k41'
*k42     'k42'
/;

set c(cc) /
c1       'tramo compatible 1'
c2       'tramo compatible 2'
c3       'tramo compatible 3'

```

c4 'tramo compatible 4'
c5 'tramo compatible 5'
c6 'tramo compatible 6'
c7 'tramo compatible 7'
c8 'tramo compatible 8'
/;

8.4.1.3 Modelo M4w para T4S Zona 2 para ord (k) = 32

Z_0 y r parametrizados en el ejemplo para la iteración 3.

```

set ii  set tramos                / i1*i23 /
kk  set posiciones                / k1*k32 /
cc  set tramos compatibles        / c1*c8 /
nn  set subconjuntos de tramos objetivo / arr, dep, dice, apron, accdice, total /
i(ii) subset de tramos
k(kk) subset posiciones
c(cc) subset de tramos compatibles
n(nn) subset de subconjuntos de tramos objetivo
alias (ii,jj,ll),(i,j,l);
alias (kk,hh),(k,h);

scalars

    Zcero      Inicio del plan invernal
    conta      contador
    BigM        BigM=10000
    a1          controlador
    a3          controlador j
    v           velocidad avance equipo descontaminación (mpmin)
    tpen        tiempo de penalización en el giro 180°
    longpen     longitud extra en giro 180°
    B           coeficiente de adimensionalización
    Bl          coeficiente de adimensionalización
    ;

*Rmax de Zona 1
Zcero=31.01;
BigM=10000;
v=666.7;
a1=0.;
B=0.;
longpen=3.1416*40. ;
tpen=longpen/(v/2) ;

display tpen;

parameter
w(nn) pesos
/
    arr  1.
    dep  1.
    dice 0.25
    apron 0.25
    accdice 0.25
    total 0.25
/ ;

parameter
long(ii) longitud del tramo i en m

```

```

/
i1    657.2
i2    766.9
i3    766.9
i4    283.6
i5    80.0
i6    173.9
i7    90.0
i8    89.9
i9    90.0
i10   80.0
i11   428.5
i12   428.6
i13   217.1
i14   216.9
i15   97.4
i16   80.0
i17   184.9
i18   93.1
i19   97.4
i20   2263.4
i21   6079.0
i22   211.6
i23   211.6
/ ;

parameter p(ii) tiempo de proceso del tramo i por el equipo k ;
*Los 40 primeros metros del tramo y los 40 últimos a mitad de velocidad
loop(ii$(ord(ii)<=23),
  p(ii)=(long(ii)-40*2)/v + 40*2/(v/2);
  B=B+p(ii);
);

B=B+Zcero;

display p;
display B;

parameter
r(nn) hora estimada de finalización del subconjunto de tramos objetivo i
*A partir de Zcero
/
arr    0.0
dep    0.0
dice   0.0
apron  40.0
accdice 0.0
total  55.0
/ ;

Bl = r('total') -B;

display Bl;

Table

```

tramoic(ii,cc) tramos c compatibles con tramo i

	<i>c1</i>	<i>c2</i>	<i>c3</i>	<i>c4</i>	<i>c5</i>	<i>c6</i>	<i>c7</i>	<i>c8</i>
<i>i1</i>	4	9	10	3				
<i>i2</i>	5	10	11	20				
<i>i3</i>	1	5	6	10	12			
<i>i4</i>	1	6	7	9	22			
<i>i5</i>	2	3	6	11	12			
<i>i6</i>	3	4	5	7	12	22		
<i>i7</i>	4	6	22	23				
<i>i8</i>	13	14	22	23				
<i>i9</i>	1	4	21					
<i>i10</i>	1	2	3	20				
<i>i11</i>	2	5	15	16				
<i>i12</i>	3	5	6	16	17			
<i>i13</i>	8	17	18	22				
<i>i14</i>	8	18	23					
<i>i15</i>	11	16	19	20				
<i>i16</i>	11	12	15	17				
<i>i17</i>	12	13	16	18				
<i>i18</i>	13	14	17					
<i>i19</i>	15	20	21					
<i>i20</i>	2	10	15	19				
<i>i21</i>	9	19						
<i>i22</i>	4	6	7	8	13			
<i>i23</i>	7	8	14					

;

parameter M(ii,jj) compatibilidad tramo i vs tramo j cuando j sigue a i ;

```

loop(ii$(ord(ii)<=23),
  loop(jj$(ord(jj)<=23),
    loop(cc$(ord(cc)<=8),
      a3=ord(jj);
      if (a3=tramoic(ii,cc),
        M(ii,jj)=1.
      );
    );
  );
);

```

display M;

variables x(ii,jj,kk) variable de decisión donde xij=1 si el tramo i precede directamente a j en la posición k - xij=0 en otro caso

Rj(jj,kk) variable tiempo en que el tramo j está listo en la posición k

Rmax(nn) variable máximo Rj mix

idle(nn) variable retraso en cada subconjunto de tramos objetivo

sj(jj,kk) variable tiempo en que el tramo j se comienza a descontaminar en la posición k

pj(jj,kk) variable tiempo en descontaminar tramo j en la posición k

z variable objetivo de descontaminación

binary variable x;

positive variable Rj, Rmax, idle, sj, pj;

equations

l_mix objetivo miniminar *Rmax_mix*
inec2(ii,kk) a cada trama *i* le sigue uno *j*
inec3 recorrido hamiltoniano en que se empieza en la aeronave 1
inec6(ii) todos los tramos entran en cola
inec7(kk) posición *k* es un arco *vi-vj* Equivale a 5 y 6
inec8(ii,jj,kk) def de *sjk+1* atendiendo a *Rik*
inec9(ii,kk) def *Rmax*

* *inec91(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91a(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91b(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91c(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91b(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91c(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91d(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91e(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91f(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91g(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91h(kk)* def *Rmaxrwydep*
 * *inec91i(kk)* def *Rmaxrwydep*

* *inec92(kk)* def *Rmaxrwyarr*
 * *inec92a(kk)* def *Rmaxrwyarr*
 * *inec92b(kk)* def *Rmaxrwyarr*
 * *inec92c(kk)* def *Rmaxrwyarr*
 * *inec92d(kk)* def *Rmaxrwyarr*
 * *inec92e(kk)* def *Rmaxrwyarr*
 * *inec92f(kk)* def *Rmaxrwyarr*
 * *inec92g(kk)* def *Rmaxrwyarr*
 * *inec92h(kk)* def *Rmaxrwyarr*
 * *inec92j(kk)* def *Rmaxrwyarr*

* *inec93a(kk)* def *Rmaxdice*
 * *inec93b(kk)* def *Rmaxdice*
 * *inec93c(kk)* def *Rmaxdice*

inec94a(kk) def *Rmaxapron*
inec94b(kk) def *Rmaxapron*
inec94c(kk) def *Rmaxapron*
inec94d(kk) def *Rmaxapron*
inec94e(kk) def *Rmaxapron*
inec94f(kk) def *Rmaxapron*
inec94g(kk) def *Rmaxapron*
inec94h(kk) def *Rmaxapron*
inec94i(kk) def *Rmaxapron*
inec94j(kk) def *Rmaxapron*
inec94k(kk) def *Rmaxapron*
inec94l(kk) def *Rmaxapron*
inec94m(kk) def *Rmaxapron*
inec94n(kk) def *Rmaxapron*
inec94o(kk) def *Rmaxapron*
inec94p(kk) def *Rmaxapron*

```

*      inec95a(kk)      def Rmaxaccdice
*      inec95b(kk)      def Rmaxaccdice
*      inec95c(kk)      def Rmaxaccdice
*      inec95d(kk)      def Rmaxaccdice
*      inec95e(kk)      def Rmaxaccdice
*      inec95f(kk)      def Rmaxaccdice
*      inec95g(kk)      def Rmaxaccdice

inec10(ii,jj,kk) def Rjk atendiendo a sjk
inec11a(ii,kk)  def pjk atendiendo a p
inec11b(ii,jj,ll,kk,cc)  def pjk atendiendo a p*2
inec12          inicio en Zcero (sj con j1 cuando k es 1)
*      inec13a(j)      condición operativa no se acaba con una pista
*      inec13b(j)      condición operativa no se acaba con una pista
*      inec13c          condición operativa se acaba inicio Zona 2
inec13d          condición operativa se acaba inicio Zona 3
inec14           def idle total
inec141          def idle arr
inec142          def idle dep
inec143          def idle dice
inec144          def idle apron
inec145          def idle accdice
;

l_mix..          z = e = 1/Bl*( w('arr')*idle('arr') + w('dep')*idle('dep') + w('dice')*idle('dice')
+ w('apron')*idle('apron') + w('accdice')*idle('accdice') + w('total')*idle('total')));

inec2(i,k)$ (ord(k) ne 1)..      sum(j,M(i,j)*x(i,j,k))-sum(l,x(l,i,k-1)) = e = 0;
inec3..          sum(j,M('i1',j)*x('i1',j,'k1')) = e = 1;
inec6(i)..       sum((j,k),x(i,j,k)) = g = 1;
inec7(k)..       sum((i,j),x(i,j,k)) = l = 1;
inec8(i,j,k)$ (ord(k) ne card(k)).. sj(j,k+1)+BigM = g = Rj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec9(i,k)..      Rmax('total') = g = Rj(i,k);

*inec91(k)..      Rmax('dep')  = g = Rj('i29',k);
*inec91a(k)..     Rmax('dep')  = g = Rj('i27',k);
*inec91b(k)..     Rmax('dep')  = g = Rj('i13',k);
*inec91c(k)..     Rmax('dep')  = g = Rj('i14',k);
*inec91d(k)..     Rmax('dep')  = g = Rj('i15',k);
*inec91e(k)..     Rmax('dep')  = g = Rj('i18',k);
*inec91f(k)..     Rmax('dep')  = g = Rj('i12',k);
*inec91g(k)..     Rmax('dep')  = g = Rj('i11',k);
*inec91h(k)..     Rmax('dep')  = g = Rj('i3',k);
*inec91i(k)..     Rmax('dep')  = g = Rj('i17',k);

*inec92(k)..      Rmax('arr')  = g = Rj('i7',k);
*inec92a(k)..     Rmax('arr')  = g = Rj('i15',k);
*inec92b(k)..     Rmax('arr')  = g = Rj('i2',k);
*inec92c(k)..     Rmax('arr')  = g = Rj('i3',k);
*inec92d(k)..     Rmax('arr')  = g = Rj('i12',k);
*inec92e(k)..     Rmax('arr')  = g = Rj('i10',k);
*inec92f(k)..     Rmax('arr')  = g = Rj('i6',k);
*inec92g(k)..     Rmax('arr')  = g = Rj('i14',k);
*inec92h(k)..     Rmax('arr')  = g = Rj('i16',k);

```

<i>*inec92j(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i19',k);$
<i>*inec93a(k)..</i>	$Rmax('dice') = g = Rj('i16',k);$
<i>*inec93b(k)..</i>	$Rmax('dice') = g = Rj('i6',k);$
<i>*inec93c(k)..</i>	$Rmax('dice') = g = Rj('i10',k);$
<i>inec94a(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i20',k);$
<i>inec94b(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i15',k);$
<i>inec94c(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i16',k);$
<i>inec94d(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i17',k);$
<i>inec94e(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i11',k);$
<i>inec94f(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i12',k);$
<i>inec94g(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i13',k);$
<i>inec94h(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i22',k);$
<i>inec94i(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i5',k);$
<i>inec94j(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i6',k);$
<i>inec94k(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i7',k);$
<i>inec94l(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i2',k);$
<i>inec94m(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i3',k);$
<i>inec94n(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i4',k);$
<i>inec94o(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i10',k);$
<i>inec94p(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i1',k);$
<i>*inec95a(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i24',k);$
<i>*inec95b(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i25',k);$
<i>*inec95c(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i26',k);$
<i>*inec95d(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i28',k);$
<i>*inec95e(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i30',k);$
<i>*inec95f(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i7',k);$
<i>*inec95g(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i8',k);$
<i>inec10(i,j,k)..</i>	$Rj(i,k)+BigM = g = sj(i,k)+pj(i,k)+BigM*x(i,j,k);$
<i>inec11a(i,k)..</i>	$pj(i,k) = g = p(i);$
<i>inec11b(i,j,l,k,c)\$(((ord(k) ne 1) and (ord(j) eq tramoic(l,c))) or ((ord(k) ne 1) and (ord(j) eq ord(l))))..</i>	$pj(i,k)+2*BigM = g = p(i)*2+BigM*(x(l,i,k-1)+x(i,j,k));$
<i>inec12..</i>	$sj('i1',k1') = g = Zcero;$
<i>*inec13a(j)..</i>	$x('i29',j,'k42') = e = 0;$
<i>*inec13b(j)..</i>	$x('i7',j,'k27') = e = 0;$
<i>*inec13c..</i>	$sum(j,x('i11',j,'k27'))+sum(j,x('i15',j,'k27')) = e = 1;$
<i>inec13d..</i>	$sum(j,x('i13',j,'k32'))+sum(j,x('i17',j,'k32'))+sum(j,x('i18',j,'k32')) = e = 1;$
<i>inec14 ..</i>	$idle('total') = g = Rmax('total')-r('total');$
<i>inec141..</i>	$idle('arr') = g = Rmax('arr')-r('arr');$
<i>inec142..</i>	$idle('dep') = g = Rmax('dep')-r('dep');$
<i>inec143..</i>	$idle('dice') = g = Rmax('dice')-r('dice');$
<i>inec144..</i>	$idle('apron') = g = Rmax('apron')-r('apron');$
<i>inec145..</i>	$idle('accdice') = g = Rmax('accdice')-r('accdice');$
<i>* exclusión de diagonal en x</i>	
<i>*</i>	
$x.fx(ii,ii,kk) = 0;$	
<i>set i(ii) /</i>	
<i>i1</i>	<i>'M25-M27'</i>
<i>i2</i>	<i>'EB2'</i>

i3 'EC2'
i4 'M28-M29'
i5 'G14'
i6 'GATE14'
i7 'KA1'
i8 'AM3'
i9 'KC1'
i10 'M24'
i11 'EB6'
i12 'EC6'
i13 'M31'
i14 'A31'
i15 'EB7'
i16 'NY11'
i17 'Y1-2'
i18 'NY13'
i19 'EB8'
i20 'i20'
i21 'i21'
i22 'M30'
i23 'A30'
 /;

set *k(kk)* /

k1 'k1'
k2 'k2'
k3 'k3'
k4 'k4'
k5 'k5'
k6 'k6'
k7 'k7'
k8 'k8'
k9 'k9'
k10 'k10'
k11 'k11'
k12 'k12'
k13 'k13'
k14 'k14'
k15 'k15'
k16 'k16'
k17 'k17'
k18 'k18'
k19 'k19'
k20 'k20'
k21 'k21'
k22 'k22'
k23 'k23'
k24 'k24'
k25 'k25'
k26 'k26'
k27 'k27'
k28 'k28'
k29 'k29'
k30 'k30'
k31 'k31'

```
k32      'k32'  
*k33     'k33'  
*k34     'k34'  
*k35     'k35'  
*k36     'k36'  
*k37     'k37'  
*k38     'k38'  
*k39     'k39'  
*k40     'k40'  
*k41     'k41'  
*k42     'k42'
```

```
/;
```

```
set c(cc) /
```

```
  c1 'tramo compatible 1'  
  c2 'tramo compatible 2'  
  c3 'tramo compatible 3'  
  c4 'tramo compatible 4'  
  c5 'tramo compatible 5'  
  c6 'tramo compatible 6'  
  c7 'tramo compatible 7'  
  c8 'tramo compatible 8'
```

```
/;
```

8.4.1.4 Modelo M4w para T4S Zona 3 para ord (k) = 42

Z_0 y r parametrizados en el ejemplo para la iteración 3.

```

set ii  set tramos                / i1*i30 /
kk  set posiciones              / k1*k42 /
cc  set tramos compatibles      / c1*c8 /
nn  set subconjuntos de tramos objetivo / arr, dep, dice, apron, accdice, total /
i(ii) subset de tramos
k(kk) subset posiciones
c(cc) subset de tramos compatibles
n(nn) subset de subconjuntos de tramos objetivo
alias (ii,jj,ll),(i,j,l);
alias (kk,hh),(k,h);

scalars

    Zcero      Inicio del plan invernal
    conta      contador
    BigM        BigM=10000
    a1          controlador
    a3          controlador j
    v           velocidad avance equipo descontaminación (mpmin)
    tpen        tiempo de penalización en el giro 180°
    longpen     longitud extra en giro 180°
    B           coeficiente de adimensionalización
    Bl          coeficiente de adimensionalización
    ;

*Rmax de Zona 2
Zcero=58.86;
BigM=10000;
v=666.7;
a1=0.;
B=0.;
longpen=3.1416*40. ;
tpen=longpen/(v/2) ;

display tpen;

parameter
w(nn) pesos
/
    arr  1.
    dep  1.
    dice 0.25
    apron 0.25
    accdice 0.25
    total 0.25
/ ;

parameter
long(ii) longitud del tramo i en m

```

```

/
i1    97.7
i2    97.5
i3    97.5
i4    97.4
i5    97.5
i6    166.4
i7    97.5
i8    97.2
i9    184.9
i10   170.7
i11   97.5
i12   93.1
i13   369.7
i14   272.2
i15   80.1
i16   169.9
i17   97.4
i18   571.3
i19   184.9
i20   97.5
i21   483.4
i22   97.6
i23   97.4
i24   83.9
i25   115.7
i26   80.1
i27   1.0
i28   97.4
*Pista con logintud x2
i29   8549.6
i30   80.0

/ ;

parameter  p(ii) tiempo de proceso del tramo i por el equipo k ;
*Los 40 primeros metros del tramo y los 40 últimos a mitad de velocidad
loop(ii$(ord(ii)<=30),
    p(ii)=(long(ii)-40*2)/v + 40*2/(v/2);
    B=B+p(ii);
);

B=B+Zcero;

display p;
display B;

parameter
r(nn) hora estimada de finalización del subconjunto de tramos objetivo i
*A partir de Zcero
/
arr    0.0
dep    85.
dice   65.
apron  0.0

```

```

    accdice 60.
    total 95.
    / ;

Bl = r('total') -B;

display Bl;

Table

    tramoic(ii,cc) tramos c compatibles con tramo i

        c1  c2  c3  c4  c5  c6  c7  c8
i1  2  9  10  11  12
i2  1  3  6  10  11  23
i3  2  5  6  15  22  23
i4  5  11  12  13  14
i5  3  4  11  14  15  22
i6  2  3  7  23  24  26
i7  6  8  10  24  26  30
i8  7  9  10  30
i9  1  8  12
i10 1  2  8  7  11  30
i11 1  2  4  5  10  14
i12 1  9  4  13
i13 4  12  19  27
i14 4  5  11  19  20
i15 3  5  20  21  22
i16 17  23  24  25
i17 16  18  22  23
i18 17  21  22
i19 13  14  20  27
i20 14  15  19  21
i21 15  18  20
i22 3  5  15  17  18
i23 2  3  6  16  17
i24 6  7  16  25  26
i25 16  24  26  28
i26 6  7  24  25  28
i27 13  19  29
i28 25  26  30
i29 27
i30 7  8  10  28
    ;

parameter M(ii,jj) compatibilidad tramo i vs tramo j cuando j sigue a i ;

loop(ii$(ord(ii)<=30),
    loop(jj$(ord(jj)<=30),
        loop(cc$(ord(cc)<=8),
            a3=ord(jj);
            if (a3=tramoic(ii,cc),
                M(ii,jj)=1.
            );
        );
    );
);

```

```

);
);

display M;

variables x(ii,jj,kk)  variable de decisión donde  $x_{ij}=1$  si el tramo  $i$  precede directamente a  $j$  en
la posición  $k$  -  $x_{ij}=0$  en otro caso
    Rj(jj,kk)  variable tiempo en que el tramo  $j$  está listo en la posición  $k$ 
    Rmax(nn)   variable máximo  $R_j$  mix
    idle(nn)   variable retraso en cada subconjunto de tramos objetivo
    sj(jj,kk)  variable tiempo en que el tramo  $j$  se comienza a descontaminar en la posición  $k$ 
    pj(jj,kk)  variable tiempo en descontaminar tramo  $j$  en la posición  $k$ 
    z          variable objetivo de descontaminación

binary variable x;
positive variable Rj, Rmax, idle, sj, pj;

equations
    l_mix          objetivo minimizar  $R_{max\_mix}$ 
    inec2(ii,kk)   a cada trama  $i$  le sigue uno  $j$ 
    inec3          recorrido hamiltoniano en que se empieza en la aeronave 1
    inec6(ii)      todos los tramos entran en cola
    inec7(kk)      posición  $k$  es un arco  $v_i-v_j$  Equivale a 5 y 6
    inec8(ii,jj,kk) def de  $s_{jk}+1$  atendiendo a  $R_{ik}$ 
    inec9(ii,kk)   def  $R_{max}$ 

    inec91(kk)     def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91a(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91b(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91c(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91b(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91c(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91d(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91e(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91f(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91g(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91h(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 
    inec91i(kk)    def  $R_{maxrwydep}$ 

*    inec92(kk)     def  $R_{maxrwyarr}$ 
*    inec92a(kk)    def  $R_{maxrwyarr}$ 
*    inec92b(kk)    def  $R_{maxrwyarr}$ 
*    inec92c(kk)    def  $R_{maxrwyarr}$ 
*    inec92d(kk)    def  $R_{maxrwyarr}$ 
*    inec92e(kk)    def  $R_{maxrwyarr}$ 
*    inec92f(kk)    def  $R_{maxrwyarr}$ 
*    inec92g(kk)    def  $R_{maxrwyarr}$ 
*    inec92h(kk)    def  $R_{maxrwyarr}$ 
*    inec92j(kk)    def  $R_{maxrwyarr}$ 

    inec93a(kk)     def  $R_{maxdice}$ 
    inec93b(kk)     def  $R_{maxdice}$ 
    inec93c(kk)     def  $R_{maxdice}$ 

*    inec94a(kk)     def  $R_{maxapron}$ 
*    inec94b(kk)     def  $R_{maxapron}$ 

```

```

*      inec94c(kk)      def Rmaxapron
*      inec94d(kk)      def Rmaxapron
*      inec94e(kk)      def Rmaxapron
*      inec94f(kk)      def Rmaxapron
*      inec94g(kk)      def Rmaxapron
*      inec94h(kk)      def Rmaxapron
*      inec94i(kk)      def Rmaxapron
*      inec94j(kk)      def Rmaxapron
*      inec94k(kk)      def Rmaxapron
*      inec94l(kk)      def Rmaxapron
*      inec94m(kk)      def Rmaxapron
*      inec94n(kk)      def Rmaxapron
*      inec94o(kk)      def Rmaxapron
*      inec94p(kk)      def Rmaxapron

      inec95a(kk)      def Rmaxaccdice
      inec95b(kk)      def Rmaxaccdice
      inec95c(kk)      def Rmaxaccdice
      inec95d(kk)      def Rmaxaccdice
      inec95e(kk)      def Rmaxaccdice
      inec95f(kk)      def Rmaxaccdice
      inec95g(kk)      def Rmaxaccdice

      inec10(ii,jj,kk) def Rjk atendiendo a sjk
      inec11a(ii,kk)  def pjk atendiendo a p
      inec11b(ii,jj,ll,kk,cc) def pjk atendiendo a p*2
      inec12          inicio en Zcero (sj con j1 cuando k es 1)
      inec13a(j)      condición operativa no se acaba con una pista
*      inec13b(j)      condición operativa no se acaba con una pista
*      inec13c          condición operativa se acaba inicio Zona 2
*      inec13d          condición operativa se acaba inicio Zona 3
      inec14          def idle total
      inec141         def idle arr
      inec142         def idle dep
      inec143         def idle dice
      inec144         def idle apron
      inec145         def idle accdice
;

l_mix..              z = e= 1/Bl*( w('arr')*idle('arr') + w('dep')*idle('dep') + w('dice')*idle('dice')
+ w('apron')*idle('apron') + w('accdice')*idle('accdice') + w('total')*idle('total'));

inec2(i,k)$ (ord(k) ne 1)..      sum(j,M(i,j)*x(i,j,k))-sum(l,x(l,i,k-1)) = e= 0;
inec3..                  sum(j,M('i1',j)*x('i1',j,'k1')) = e= 1;
inec6(i)..               sum((j,k),x(i,j,k)) = g= 1;
inec7(k)..               sum((i,j),x(i,j,k)) = l= 1;
inec8(i,j,k)$ (ord(k) ne card(k)).. sj(j,k+1)+BigM = g= Rj(i,k)+BigM*x(i,j,k);
inec9(i,k)..             Rmax('total') = g= Rj(i,k);

inec91(k)..              Rmax('dep') = g= Rj('i29',k);
inec91a(k)..             Rmax('dep') = g= Rj('i27',k);
inec91b(k)..             Rmax('dep') = g= Rj('i13',k);
inec91c(k)..             Rmax('dep') = g= Rj('i14',k);
inec91d(k)..             Rmax('dep') = g= Rj('i15',k);

```

<i>inec91e(k)..</i>	$Rmax('dep') = g = Rj('i18',k);$
<i>inec91f(k)..</i>	$Rmax('dep') = g = Rj('i12',k);$
<i>inec91g(k)..</i>	$Rmax('dep') = g = Rj('i11',k);$
<i>inec91h(k)..</i>	$Rmax('dep') = g = Rj('i3',k);$
<i>inec91i(k)..</i>	$Rmax('dep') = g = Rj('i17',k);$
<i>*inec92(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i7',k);$
<i>*inec92a(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i15',k);$
<i>*inec92b(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i2',k);$
<i>*inec92c(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i3',k);$
<i>*inec92d(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i12',k);$
<i>*inec92e(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i10',k);$
<i>*inec92f(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i6',k);$
<i>*inec92g(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i14',k);$
<i>*inec92h(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i16',k);$
<i>*inec92j(k)..</i>	$Rmax('arr') = g = Rj('i19',k);$
<i>inec93a(k)..</i>	$Rmax('dice') = g = Rj('i16',k);$
<i>inec93b(k)..</i>	$Rmax('dice') = g = Rj('i6',k);$
<i>inec93c(k)..</i>	$Rmax('dice') = g = Rj('i10',k);$
<i>*inec94a(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i20',k);$
<i>*inec94b(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i15',k);$
<i>*inec94c(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i16',k);$
<i>*inec94d(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i17',k);$
<i>*inec94e(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i11',k);$
<i>*inec94f(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i12',k);$
<i>*inec94g(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i13',k);$
<i>*inec94h(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i22',k);$
<i>*inec94i(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i5',k);$
<i>*inec94j(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i6',k);$
<i>*inec94k(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i7',k);$
<i>*inec94l(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i2',k);$
<i>*inec94m(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i3',k);$
<i>*inec94n(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i4',k);$
<i>*inec94o(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i10',k);$
<i>*inec94p(k)..</i>	$Rmax('apron') = g = Rj('i1',k);$
<i>inec95a(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i24',k);$
<i>inec95b(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i25',k);$
<i>inec95c(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i26',k);$
<i>inec95d(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i28',k);$
<i>inec95e(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i30',k);$
<i>inec95f(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i7',k);$
<i>inec95g(k)..</i>	$Rmax('accdice') = g = Rj('i8',k);$
<i>inec10(i,j,k)..</i>	$Rj(i,k) + BigM = g = sj(i,k) + pj(i,k) + BigM * x(i,j,k);$
<i>inec11a(i,k)..</i>	$pj(i,k) = g = p(i);$
<i>inec11b(i,j,l,k,c)\$(((ord(k) ne 1) and (ord(j) eq tramoic(l,c))) or ((ord(k) ne 1) and (ord(j) eq ord(l))))..</i>	$pj(i,k) + 2 * BigM = g = p(i) * 2 + BigM * (x(l,i,k-1) + x(i,j,k));$
<i>inec12..</i>	$sj('i1', 'k1') = g = Zcero;$
<i>inec13a(j)..</i>	$x('i29', j, 'k42') = e = 0;$
<i>*inec13b(j)..</i>	$x('i7', j, 'k27') = e = 0;$
<i>*inec13c..</i>	$sum(j, x('i11', j, 'k27')) + sum(j, x('i15', j, 'k27')) = e = 1;$


```

*inec13d..                sum(j,x('i13',j,'k32'))+sum(j,x('i17',j,'k32'))+sum(j,x('i18',j,'k32'))
=e= 1;
inec14 ..                idle('total') =g= Rmax('total')-r('total');
inec141..                idle('arr')   =g= Rmax('arr')-r('arr');
inec142..                idle('dep')   =g= Rmax('dep')-r('dep');
inec143..                idle('dice')  =g= Rmax('dice')-r('dice');
inec144..                idle('apron') =g= Rmax('apron')-r('apron');
inec145..                idle('accdice')=g= Rmax('accdice')-r('accdice');

* exclusión de diagonal en x
*
x.fx(ii,ii,kk) = 0;

set i(ii) /
i1      'M32'
i2      'M33'
i3      'B13'
i4      'A32'
i5      'A33'
i6      'B12'
i7      'EC8'
i8      'EC7'
i9      'Y1-2'
i10     'NY12'
i11     'N13'
i12     'NY13'
i13     'Y1'
i14     'Y2'
i15     'B11_b'
i16     'BY12'
i17     'BY13'
i18     'Y4'
i19     'Y1-1'
i20     'i20'
i21     'i21'
i22     'A34'
i23     'M34'
i24     'EC9'
i25     'BY11'
i26     'B11_b'
i27     'i27'
i28     'EB8'
i29     '36R-18L'
i30     'N11'
/;

set k(kk) /
k1      'k1'
k2      'k2'
k3      'k3'
k4      'k4'
k5      'k5'
k6      'k6'
k7      'k7'
k8      'k8'

```

```

k9      'k9'
k10     'k10'
k11     'k11'
k12     'k12'
k13     'k13'
k14     'k14'
k15     'k15'
k16     'k16'
k17     'k17'
k18     'k18'
k19     'k19'
k20     'k20'
k21     'k21'
k22     'k22'
k23     'k23'
k24     'k24'
k25     'k25'
k26     'k26'
k27     'k27'
k28     'k28'
k29     'k29'
k30     'k30'
k31     'k31'
k32     'k32'
k33     'k33'
k34     'k34'
k35     'k35'
k36     'k36'
k37     'k37'
k38     'k38'
k39     'k39'
k40     'k40'
k41     'k41'
k42     'k42'

```

```

/;

```

```

set c(cc) /

```

```

c1 'tramo compatible 1'
c2 'tramo compatible 2'
c3 'tramo compatible 3'
c4 'tramo compatible 4'
c5 'tramo compatible 5'
c6 'tramo compatible 6'
c7 'tramo compatible 7'
c8 'tramo compatible 8'

```

```

/;

```

8.4.2. Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Iteración 1

Iteración	1												
z=lmix													
Zona 1	Zcero (min)=	0,00	(0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
	card(i)	card(k)=(1+ 30%) card(i)	card k	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º	time (seg)
	19	A5 (B=18,28; BI=1,72))	25	31,22	29,89					7,61	570,11	2	1000
				lmax total	lmax arr	lmax dep	lmax dice	lmax apron	lmax accdice				
				11,22	17,89								
				r total	r arr	r dep	r dice	r apron	r accdice				
				20,00	12,00								
Zona 2	Zcero (min)=	31,22	(0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
	card(i)	card(k)=(1+ 40%) card(i)	card k	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º	time (seg)
	23	A5 (B=54,51; BI=0,71))	32	59,01				59,01		6,59	1,40E+03	6	1000
				lmax total	lmax arr	lmax dep	lmax dice	lmax apron	lmax accdice				
				3,79				17,79					
				r total	r arr	r dep	r dice	r apron	r accdice				
				55,22				41,22					
Zona 3	Zcero (min)=	59,01	(0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
	card(i)	card(k)=(1+ 40%) card(i)	card k	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º	time (seg)
	30	A5 (B=81,99; BI=12,02)	42	103,23		102,97	69,01		69,01	1,86	3,10E+03	14	1000
				lmax total	lmax arr	lmax dep	lmax dice	lmax apron	lmax accdice				
				9,22		18,86	0,00		4,46				
				r total	r arr	r dep	r dice	r apron	r accdice				
				94,01		84,11	69,01		64,55				

Tabla 51: simulaciones RM_AM: T4S Iteración 1

k	i	j	sj	Rj	pj	p	U-turns
1	1	10	0.00	0.31	0.31	0.31	
2	10	5	0.31	0.62	0.31	0.31	
3	5	3	0.62	1.06	0.44	0.44	
4	3	7	1.06	1.18	0.12	0.12	
5	7	3	1.18	22.49	21.31	10.66	3
6	3	2	22.49	22.61	0.12	0.12	
7	2	15	22.61	23.21	0.60	0.60	
8	15	8	23.21	23.72	0.51	0.25	1
9	8	6	23.72	24.14	0.43	0.43	
10	6	4	24.14	24.74	0.60	0.60	
11	4	3	24.74	25.17	0.43	0.43	
12	3	4	25.17	25.42	0.24	0.12	1
13	4	8	25.42	25.85	0.43	0.43	
14	18	19	25.85	26.65	0.81	0.81	
15	19	17	26.65	27.65	0.99	0.99	
16	17	16	27.65	28.00	0.35	0.35	
17	16	14	28.00	28.46	0.45	0.45	
18	14	13	28.46	28.71	0.25	0.25	
19	13	12	28.71	29.02	0.31	0.31	
20	12	9	29.02	29.27	0.25	0.25	
21	9	15	29.27	29.63	0.36	0.36	
22	15	11	29.63	29.89	0.25	0.25	
23	11	13	29.89	30.25	0.36	0.36	
24	13	11	30.25	30.86	0.61	0.31	1
25	11	15	30.86	31.22	0.36	0.36	

Tabla 52: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 1 Zona 1, R_i^k vs i, repeticiones y #180°

k	i	j	s _j	R _j	p _j	p	U-turns
1	1	3	31.22	32.33	1.11	1.11	
2	3	5	32.33	33.60	1.27	1.27	
3	5	6	33.60	34.08	0.48	0.24	1
4	6	7	34.08	34.46	0.38	0.38	
5	7	6	34.46	34.97	0.51	0.25	1
6	6	5	34.97	35.35	0.38	0.38	
7	5	6	35.35	35.83	0.48	0.24	1
8	6	7	35.83	36.21	0.38	0.38	
9	7	23	36.21	36.46	0.25	0.25	
10	23	14	36.46	36.90	0.44	0.44	
11	14	8	36.90	37.79	0.89	0.45	1
12	8	22	37.79	38.05	0.25	0.25	
13	22	6	38.05	38.48	0.44	0.44	
14	6	5	38.48	38.86	0.38	0.38	
15	5	2	38.86	39.10	0.24	0.24	
16	2	10	39.10	40.37	1.27	1.27	
17	10	20	40.37	40.85	0.48	0.24	1
18	20	15	40.85	44.37	3.51	3.51	
19	15	11	44.37	44.64	0.27	0.27	
20	11	5	44.64	45.40	0.76	0.76	
21	5	12	45.40	45.64	0.24	0.24	
22	12	16	45.64	46.40	0.76	0.76	
23	16	15	46.40	46.64	0.24	0.24	
24	15	19	46.64	46.91	0.27	0.27	
25	19	21	46.91	47.17	0.27	0.27	
26	21	9	47.17	56.41	9.24	9.24	
27	9	4	56.41	56.67	0.25	0.25	
28	4	22	56.67	57.21	0.55	0.55	
29	22	13	57.21	57.65	0.44	0.44	
30	13	18	57.65	58.09	0.45	0.45	
31	18	17	58.09	58.61	0.52	0.26	1
32	17	16	58.61	59.01	0.40	0.40	

Tabla 53: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 1 Zona 2, R_i^k vs i, repeticiones y #180°

k	i	j	s _j	R _j	p _j	p	U-turns
1	1	2	59.01	59.28	0.27	0.27	
2	2	23	59.28	59.54	0.27	0.27	
3	23	16	59.54	59.81	0.27	0.27	
4	16	24	59.81	60.18	0.37	0.37	
5	24	25	60.18	60.68	0.49	0.25	1
6	25	26	60.68	61.26	0.59	0.29	1
7	26	28	61.26	61.74	0.48	0.24	1
8	28	30	61.74	62.01	0.27	0.27	
9	30	7	62.01	62.25	0.24	0.24	
10	7	10	62.25	62.78	0.53	0.27	1
11	10	1	62.78	63.16	0.38	0.38	
12	1	12	63.16	63.42	0.27	0.27	
13	12	4	63.42	63.68	0.26	0.26	
14	4	14	63.68	63.95	0.27	0.27	
15	14	5	63.95	65.01	1.06	0.53	1
16	5	22	65.01	65.27	0.27	0.27	
17	22	15	65.27	65.81	0.53	0.27	1
18	15	3	65.81	66.29	0.48	0.24	
19	3	23	66.29	66.55	0.27	0.27	
20	23	6	66.55	67.08	0.53	0.27	1
21	6	7	67.08	67.45	0.37	0.37	
22	7	30	67.45	67.72	0.27	0.27	
23	30	8	67.72	68.20	0.48	0.24	1
24	8	9	68.20	68.47	0.27	0.27	
25	9	1	68.47	68.86	0.40	0.40	
26	1	11	68.86	69.13	0.27	0.27	
27	11	4	69.13	69.40	0.27	0.27	
28	4	14	69.40	69.93	0.53	0.27	1
29	14	20	69.93	70.46	0.53	0.53	
30	20	19	70.46	70.99	0.53	0.27	1
31	19	13	70.99	71.39	0.40	0.40	
32	13	27	71.39	72.73	1.35	0.67	1
33	27	29	72.73	72.86	0.12	0.12	
34	29	27	72.86	98.74	25.89	12.94	3
35	27	13	98.74	98.87	0.12	0.12	
36	13	19	98.87	100.21	1.35	0.67	1
37	19	20	100.21	100.61	0.40	0.40	
38	20	21	100.61	100.88	0.27	0.27	
39	21	18	100.88	101.72	0.85	0.85	
40	18	17	101.72	102.70	0.98	0.98	
41	17	23	102.70	102.97	0.27	0.27	
42	23	6	102.97	103.23	0.27	0.27	

Tabla 54: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 1 Zona 3, R_i^k vs i, repeticiones y #180°

8.4.3. Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Iteración 2

Iteración	2												
z=lmix													
Zona 1	Zcero (min)=	0,00	(wttotal, warr, wdep, wdice, waprón, waccdice)= (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
	card(i)	card(k)=(1+ 30%) card(i)	card k	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º	time (seg)
	19	A5 (B=18,28; BI=1,72))	25	31,22	29,89					7,61	570,11	2	1000
				lmax total	lmax arr	lmax dep	lmax dice	lmax apron	lmax accdice				
				11,22	17,89								
				r total	r arr	r dep	r dice	r apron	r accdice				
				20,00	12,00								
Zona 2	Zcero (min)=	31,22	(wttotal, warr, wdep, wdice, waprón, waccdice)= (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
	card(i)	card(k)=(1+ 40%) card(i)	card k	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º	time (seg)
	23	A5 (B=54,51; BI=0,71))	32	58,13				56,99		6,59	1,40E+03	6	3000
				lmax total	lmax arr	lmax dep	lmax dice	lmax apron	lmax accdice				
				2,91				15,77					
				r total	r arr	r dep	r dice	r apron	r accdice				
				55,22				41,22					
Zona 3	Zcero (min)=	58,13	(wttotal, warr, wdep, wdice, waprón, waccdice)= (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)										
	card(i)	card(k)=(1+ 40%) card(i)	card k	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º	time (seg)
	30	A5 (B=81,99; BI=12,02)	42	99,93		99,27	68,99		68,99	1,68	2,90E+00	3	3000
				lmax total	lmax arr	lmax dep	lmax dice	lmax apron	lmax accdice				
				6,80		16,14	5,86		0,86				
				r total	r arr	r dep	r dice	r apron	r accdice				
				93,13		83,13	63,13		68,13				

Tabla 55: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 2

k	i	j	s _j	R _j	p _j	p	U-turns
1	1	10	0.00	0.31	0.31	0.31	
2	10	5	0.31	0.62	0.31	0.31	
3	5	3	0.62	1.06	0.44	0.44	
4	3	7	1.06	1.18	0.12	0.12	
5	7	3	1.18	22.49	21.31	10.66	3
6	3	2	22.49	22.61	0.12	0.12	
7	2	15	22.61	23.21	0.60	0.60	
8	15	8	23.21	23.72	0.51	0.25	1
9	8	6	23.72	24.14	0.43	0.43	
10	6	4	24.14	24.74	0.60	0.60	
11	4	3	24.74	25.17	0.43	0.43	
12	3	4	25.17	25.42	0.24	0.12	1
13	4	8	25.42	25.85	0.43	0.43	
14	18	19	25.85	26.65	0.81	0.81	
15	19	17	26.65	27.65	0.99	0.99	
16	17	16	27.65	28.00	0.35	0.35	
17	16	14	28.00	28.46	0.45	0.45	
18	14	13	28.46	28.71	0.25	0.25	
19	13	12	28.71	29.02	0.31	0.31	
20	12	9	29.02	29.27	0.25	0.25	
21	9	15	29.27	29.63	0.36	0.36	
22	15	11	29.63	29.89	0.25	0.25	
23	11	13	29.89	30.25	0.36	0.36	
24	13	11	30.25	30.86	0.61	0.31	1
25	11	15	30.86	31.22	0.36	0.36	

Tabla 56: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 2 Zona 1, R_i^k vs i, repeticiones y #180°

k	i	j	s _j	R _j	p _j	p	U-turns
1	1	3	31.22	32.33	1.11	1.11	
2	3	5	32.33	33.60	1.27	1.27	
3	5	6	33.60	34.08	0.48	0.24	1
4	6	22	34.08	34.46	0.38	0.38	
5	22	13	34.46	34.89	0.44	0.44	
6	13	17	34.89	35.34	0.45	0.45	
7	17	16	35.34	35.74	0.40	0.40	
8	16	17	35.74	36.22	0.48	0.24	1
9	17	13	36.22	36.61	0.40	0.40	
10	13	8	36.61	37.06	0.45	0.45	
11	8	23	37.06	37.31	0.25	0.25	
12	23	7	37.31	37.75	0.44	0.44	
13	7	6	37.75	38.01	0.25	0.25	
14	6	5	38.01	38.39	0.38	0.38	
15	5	2	38.39	38.63	0.24	0.24	
16	2	10	38.63	39.90	1.27	1.27	
17	10	20	39.90	40.38	0.48	0.24	1
18	20	15	40.38	43.89	3.51	3.51	
19	15	11	43.89	44.16	0.27	0.27	
20	11	5	44.16	44.92	0.76	0.76	
21	5	12	44.92	45.16	0.24	0.24	
22	12	16	45.16	45.92	0.76	0.76	
23	16	15	45.92	46.16	0.24	0.24	
24	15	19	46.16	46.43	0.27	0.27	
25	19	21	46.43	46.70	0.27	0.27	
26	21	9	46.70	55.94	9.24	9.24	
27	9	4	55.94	56.19	0.25	0.25	
28	4	7	56.19	56.74	0.55	0.55	
29	7	23	56.74	56.99	0.25	0.25	
30	23	14	56.99	57.43	0.44	0.44	
31	14	18	57.43	57.87	0.45	0.45	
32	18	13	57.87	58.13	0.26	0.26	

Tabla 57: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 2 Zona 2, R_i^k vs i, repeticiones y #180°

k	i	j	sj	Rj	pj	p	U-turns
1	1	11	58.13	58.40	0.27	0.27	
2	11	14	58.40	58.66	0.27	0.27	
3	14	20	58.66	59.19	0.53	0.53	
4	20	21	59.19	59.46	0.27	0.27	
5	21	18	59.46	60.30	0.85	0.85	
6	18	22	60.30	61.28	0.98	0.98	
7	22	3	61.28	61.55	0.27	0.27	
8	3	2	61.55	61.81	0.27	0.27	
9	2	10	61.81	62.08	0.27	0.27	
10	10	7	62.08	62.45	0.38	0.38	
11	7	6	62.45	62.72	0.27	0.27	
12	6	23	62.72	63.09	0.37	0.37	
13	23	3	63.09	63.62	0.53	0.27	1
14	3	5	63.62	63.89	0.27	0.27	
15	5	14	63.89	64.15	0.27	0.27	
16	14	19	64.15	64.68	0.53	0.53	
17	19	13	64.68	65.08	0.40	0.40	
18	13	4	65.08	65.75	0.67	0.67	
19	4	5	65.75	66.02	0.27	0.27	
20	5	15	66.02	66.29	0.27	0.27	
21	15	21	66.29	66.53	0.24	0.24	
22	21	18	66.53	67.37	0.85	0.85	
23	18	17	67.37	68.35	0.98	0.98	
24	17	16	68.35	68.62	0.27	0.27	
25	16	24	68.62	68.99	0.37	0.37	
26	24	7	68.99	69.24	0.25	0.25	
27	7	30	69.24	69.50	0.27	0.27	
28	30	28	69.50	69.74	0.24	0.24	
29	28	25	69.74	70.01	0.27	0.27	
30	25	24	70.01	70.30	0.29	0.29	
31	24	26	70.30	70.79	0.49	0.25	1
32	26	7	70.79	71.27	0.48	0.24	1
33	7	8	71.27	71.54	0.27	0.27	
34	8	9	71.54	71.81	0.27	0.27	
35	9	12	71.81	72.20	0.40	0.40	
36	12	13	72.20	72.46	0.26	0.26	
37	13	27	72.46	73.14	0.67	0.67	
38	27	29	73.14	73.26	0.12	0.12	
39	29	27	73.26	99.15	25.89	12.94	3
40	27	19	99.15	99.27	0.12	0.12	
41	19	20	99.27	99.67	0.40	0.40	
42	20	21	99.67	99.93	0.27	0.27	

Tabla 58: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 2 Zona 3, R_i^k vs i, repeticiones y #180°

8.4.4. Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Iteración 3

Iteración	3												
z=lmix													
Zona 1	Zcero (min)= 0,00	(wttotal, warr, wdep, wdice, wapron, waccdice)= (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)											
	card(i)	card(k)=(1+ 30%) card(i)	card k	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º	time (seg)
	19	A5 (B=18,28; BI=6,72))	25	31,01	30,04					1,72	455,35	1	3000
				lmax total	lmax arr	lmax dep	lmax dice	lmax apron	lmax accdice				
				6,01	10,04								
				r total	r arr	r dep	r dice	r apron	r accdice				
				25,00	20,00								
Zona 2	Zcero (min)= 31,01	(wttotal, warr, wdep, wdice, wapron, waccdice)= (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)											
	card(i)	card(k)=(1+ 40%) card(i)	card k	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º	time (seg)
	23	A5 (B=54,30; BI=0,70))	32	58,86				55,82		6,59	1,50E+03	4	3000
				lmax total	lmax arr	lmax dep	lmax dice	lmax apron	lmax accdice				
				3,86				15,82					
				r total	r arr	r dep	r dice	r apron	r accdice				
				55,00				40,00					
Zona 3	Zcero (min)= 58,86	(wttotal, warr, wdep, wdice, wapron, waccdice)= (0,25, 1, 1,0,25,0,25,0,25)											
	card(i)	card(k)=(1+ 40%) card(i)	card k	Rmax total	Rmax arr	Rmax dep	Rmax dice	Rmax apron	Rmax accdice	Obj	Sum Rj	#180º	time (seg)
	30	A5 (B=81,84; BI=13,16)	42	100,57		99,06	71,73		71,23	1,68	3,00E+03	6	3000
				lmax total	lmax arr	lmax dep	lmax dice	lmax apron	lmax accdice				
				5,57		14,06	6,23		10,86				
				r total	r arr	r dep	r dice	r apron	r accdice				
				95,00		85,00	65,50		60,37				

Tabla 59: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 3

k	R _j	i	repetitions	j	R _j	p _j	p	U-turns
1	0,31	1	1	14	0,31	0.31	0.31	
2	0,56	14	1	13	0,56	0.25	0.25	
3	0,87	13	1	11	0,87	0.31	0.31	
4	1,23	11	1	15	1,23	0.36	0.36	
5	1,48	15	1	8	1,48	0.25	0.25	
6	1,91	8	1	6	1,91	0.43	0.43	
7	2,51	6	1	4	2,51	0.60	0.60	
8	2,94	4	1	3	2,94	0.43	0.43	
9	3,06	3	1	7	3,06	0.12	0.12	
10	24,37	7	1	3	24,37	21.31	10.66	3
11	24,49	3	2	5	24,49	0.12	0.12	
12	24,93	5	1	10	24,93	0.44	0.44	
13	25,24	10	1	9	25,24	0.31	0.31	
14	25,6	9	1	2	25,60	0.36	0.36	
15	26,2	2	1	3	26,20	0.60	0.60	
16	26,44	3	1	4	26,44	0.24	0.12	1
17	26,87	4	2	18	26,87	0.43	0.43	
18	27,68	18	1	19	27,68	0.81	0.81	
19	28,67	19	1	17	28,67	0.99	0.99	
20	29,03	17	1	16	29,03	0.35	0.35	
21	29,48	16	1	1	29,48	0.45	0.45	
22	29,79	1	2	12	29,79	0.31	0.31	
23	30,04	12	1	13	30,04	0.25	0.25	
24	30,65	13	2	11	30,65	0.61	0.31	1
25	31,01	11	2	j15	31,01	0.36	0.36	

Tabla 60: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 3 Zona 1, R_i^k vs i, repeticiones y #180°

k	Rj	i	repetitions	j	Rj	pj	p	U-turns
1	32,1	1	1	3	32,12	1.11	1.11	
2	33,4	3	1	12	33,39	1.27	1.27	
3	34,2	12	1	17	34,15	0.76	0.76	
4	34,6	17	1	13	34,55	0.40	0.40	
5	35,4	13	1	17	35,44	0.89	0.45	1
6	35,8	17	1	16	35,83	0.40	0.40	
7	36,1	16	1	15	36,07	0.24	0.24	
8	36,3	15	1	20	36,34	0.27	0.27	
9	39,9	20	1	10	39,86	3.51	3.51	
10	40,3	10	1	2	40,34	0.48	0.24	1
11	41,6	2	1	5	41,61	1.27	1.27	
12	41,9	5	1	6	41,85	0.24	0.24	
13	42,2	6	1	4	42,23	0.38	0.38	
14	42,8	4	1	9	42,77	0.55	0.55	
15	43	9	1	21	43,03	0.25	0.25	
16	52,3	21	1	19	52,27	9.24	9.24	
17	52,5	19	1	15	52,53	0.27	0.27	
18	52,8	15	2	11	52,80	0.27	0.27	
19	53,6	11	1	5	53,56	0.76	0.76	
20	53,8	5	2	6	53,80	0.24	0.24	
21	54,2	6	2	7	54,18	0.38	0.38	
22	54,4	7	1	23	54,44	0.25	0.25	
23	54,9	23	1	8	54,87	0.44	0.44	
24	55,1	8	1	22	55,13	0.25	0.25	
25	55,6	22	1	7	55,57	0.44	0.44	
26	55,8	7	2	23	55,82	0.25	0.25	
27	56,3	23	2	8	56,26	0.44	0.44	
28	56,8	8	1	23	56,77	0.51	0.25	
29	57,6	23	3	8	57,64	0.87	0.44	1
30	58,2	8	2	14	58,15	0.51	0.25	1
31	58,6	14	1	18	58,60	0.45	0.45	
32	58,9	18	1	13	58,86	0.26	0.26	

Tabla 61: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 3 Zona 2, R_i^k vs i, repeticiones y #180°

k	R _j	i	repetitions	j	R _j	p _j	p	U-turns
1	59,1	1	1	12	59,13	0.27	0.27	
2	59,4	12	1	13	59,39	0.26	0.26	
3	60,1	13	1	19	60,06	0.67	0.67	
4	60,5	19	1	14	60,46	0.40	0.40	
5	61	14	1	5	60,99	0.53	0.53	
6	61,5	5	1	11	61,52	0.53	0.27	
7	61,8	11	1	10	61,79	0.27	0.27	
8	62,2	10	1	8	62,16	0.38	0.38	
9	62,4	8	1	9	62,43	0.27	0.27	
10	62,8	9	1	1	62,82	0.40	0.40	
11	63,1	1	2	2	63,09	0.27	0.27	
12	63,4	2	1	23	63,36	0.27	0.27	
13	63,9	23	1	6	63,89	0.53	0.27	1
14	64,3	6	1	24	64,26	0.37	0.37	
15	64,8	24	1	6	64,75	0.49	0.25	1
16	65,1	6	2	3	65,12	0.37	0.37	
17	65,4	3	1	5	65,39	0.27	0.27	
18	65,7	5	2	4	65,65	0.27	0.27	
19	66,2	4	1	5	66,18	0.53	0.27	1
20	66,5	5	2	22	66,45	0.27	0.27	
21	66,7	22	1	18	66,72	0.27	0.27	
22	68,7	18	1	17	68,67	1.95	0.98	1
23	68,9	17	1	16	68,94	0.27	0.27	
24	69,3	16	1	25	69,31	0.37	0.37	
25	69,6	25	1	26	69,61	0.29	0.29	
26	69,9	26	1	7	69,85	0.24	0.24	
27	70,1	7	1	30	70,11	0.27	0.27	
28	70,4	30	1	28	70,35	0.24	0.24	
29	70,6	28	2	26	70,62	0.27	0.27	
30	70,9	26	2	6	70,86	0.24	0.24	
31	71,2	6	3	2	71,23	0.37	0.37	
32	71,8	2	2	3	71,76	0.53	0.27	1
33	72	3	1	15	72,03	0.27	0.27	
34	72,3	15	1	20	72,27	0.24	0.24	
35	72,5	20	1	19	72,53	0.27	0.27	
36	72,9	19	2	27	72,93	0.40	0.40	
37	73,1	27	1	29	73,05	0.12	0.12	
38	98,9	29	1	27	98,94	25.89	12.94	3
39	99,1	27	1	19	99,06	0.12	0.12	
40	99,5	19	3	20	99,46	0.40	0.40	
41	99,7	20	1	21	99,72	0.27	0.27	
42	101	21	1	18	100,57	0.85	0.85	

Tabla 62: Simulaciones RM_AM: T4S Iteración 3 Zona 3, R_i^k vs i, repeticiones y #180°

8.4.5. Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Ficheros de programación *.gms

Variando hora de inicio y tiempo de resolución, con los ficheros que a continuación se muestran se han hecho las simulaciones en las iteraciones 1, 2 y 3.

Los archivos adjuntos están parametrizados en Z_0 y r para la iteración 3.

Iteración 1, 2, 3 Zona 1

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_T4S_Zona_1_k25.gms

Iteración 1, 2, 3 Zona 2

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_T4S_Zona_2_k32.gms

Iteración 1, 2, 3 Zona 3

Marin_RM_AM_1_ri-cij-Mik_Imix_T4S_Zona_3_k42.gms

8.4.6. Anexo datos de simulaciones RM_AM: T4S Ficheros de salida de datos *.out

Iteración 1 Zona 1

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_T4S_Zona_1_k25_1000.out

Iteración 1 Zona 2

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_T4S_Zona_2_k32_1000.out

Iteración 1 Zona 3

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_T4S_Zona_3_k45_1000.out

Iteración 2 Zona 1

Fichero Iteración 1 Zona 1

Iteración 2 Zona 2

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_T4S_Zona_2_k32_3000.out

Iteración 2 Zona 3

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_T4S_Zona_3_k45_3000.out

Iteración 3 Zona 1

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_T4S_Zona_1_k25_30001.out

Iteración 3 Zona 2

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_T4S_Zona_2_k32_30001.out

Iteración 3 Zona 3

RM_AM_1_ri-Mij_idle_mix_T4S_Zona_3_k45_30001.out