

# ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DEL TRAMO 1 DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ



ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DEL TRAMO 1  
DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE  
BOGOTÁ (PLMB)

PLAN DE OPERACIÓN PRELIMINAR

HASTA HORIZONTE 2030

DOCUMENTO N°

ETPLMB-ET00-L01-IFU-P-0002\_RA

CONSORCIO METRO BOG

**SYSTRA**



**INGETEC**  
INGENIEROS CONSULTORES

## LISTA DE DISTRIBUCIÓN

### DEPENDENCIA

### No. de copias

CLIENTE Financiera de Desarrollo Nacional (FDN)	1
Centro de Documentación del Proyecto	1

### ÍNDICE DE MODIFICACIONES

Revisión del documento	Sección modificada	Fecha de modificación	Observaciones
A	-	14/07/2017	POP hasta 2030

### ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

Contrato:		ESTRUCTURACIÓN TÉCNICA DEL TRAMO 1 DE LA PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ (PLMB)			
Título Documento:		PLAN DE OPERACIÓN PRELIMINAR HASTA HORIZONTE 2030			
Documento No. :					
<b>A P R O B A C I O N</b>	<b>Número de revisión</b>		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
	<b>Ingeniero ejecutor</b>	Nombre	P. Cherry		
		Firma			
		Fecha	12/07/2017		
	<b>Vo. Bo Director de Departamento</b>	Nombre	C. Larzul		
		Firma			
		Fecha	13/07/2017		
	<b>Vo. Bo Director de División</b>	Nombre	F. Layani		
		Firma			
		Fecha	13/07/2017		
	<b>Vo. Bo Coordinador del Proyecto</b>	Nombre	F. Sánchez		
		Firma			
		Fecha	14/07/2017		
	<b>Vo. Bo. Director del proyecto</b>	Nombre	H. Abjean		
		Firma			
Fecha		14/07/2017			

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1 Alcance del Plan de Operación Preliminar .....	9
1.2 Documentos relacionados .....	9
2. PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ.....	10
2.1 Presentación de la línea .....	10
2.2 Características del trazado .....	11
2.2.1 Sentido de circulación.....	11
2.2.2 Ubicación de las estaciones .....	11
2.2.3 Planimetría.....	12
2.2.4 Altimetría.....	15
2.3 Infraestructura.....	17
2.3.1 La vía .....	17
2.3.2 Velocidad comercial y límites de velocidad .....	18
2.3.3 Terminales .....	19
2.4 Características del servicio .....	20
2.4.1 Descripción del tren .....	20
2.4.2 Puesta en servicio.....	22
2.4.3 Horarios.....	22
2.4.4 Tipos de servicio comercial.....	24
2.4.5 Tiempos de retorno en terminal.....	25
2.4.6 Modos de conducción .....	25
3. CÁLCULOS DE DESEMPEÑO DE LA PLMB .....	27
3.1 Definiciones y método.....	27
3.1.1 Capacidad de la línea .....	27
3.1.2 Tiempo de estacionamiento en las estaciones.....	27
3.1.3 Tiempo de retorno en la estación terminal .....	27
3.1.4 Intervalo mínimo práctico en línea.....	27
3.1.5 Intervalo mínimo de retorno en la estación terminal.....	27
3.1.6 Intervalo mínimo operacional.....	27
3.1.7 Método para el cálculo.....	27
3.2 Cálculo de desempeño de la línea .....	28
3.2.1 Etapa 1 – 2022.....	29
3.2.2 Etapa 2 – 2030.....	45
3.2.3 Capacidad máxima de la línea .....	50
4. APÉNDICES .....	51
4.1 Disposición de las puertas .....	51
4.2 Flujo de pasajeros.....	51
4.2.1 Etapa 1 – 2022.....	51

4.2.2	Etapa 2 – 2030.....	52
4.3	Ubicación de los incidentes y consecuencias sobre la operación.....	54
4.4	Posición de los aparatos de vías en estaciones de retorno .....	56
4.5	Cálculo del intervalo mínimo de línea .....	58
4.5.1	Sentido 1: Calle 72 – Portal de las Américas .....	58
4.5.2	Sentido 2: Portal de las Américas – Calle 72 .....	62
4.6	Perfiles de velocidad de la PLMB .....	67
4.6.1	Etapa 1 – sentido 1 .....	67
4.6.2	Etapa 1 – sentido 2 .....	71

## LISTA DE LAS TABLAS

Tabla 1.	Estaciones de la Primera Línea del Metro de Bogotá en la etapa 1 .....	12
Tabla 2.	Planimetría de la PLMB.....	15
Tabla 3.	Altimetría de la PLMB.....	17
Tabla 4.	Velocidades máximas permitidas en función del PK (menores a 80 km/h).....	19
Tabla 5.	Hipótesis sobre el material rodante.....	21
Tabla 6.	Cantidad de días en un año calendario para cada uno de los tres días tipo .....	23
Tabla 7.	Horarios de inicio y fin de la operación comercial para cada uno de los días tipos .....	23
Tabla 8.	Evolución del intervalo de la línea a lo largo de un día laborable (lunes a viernes) .....	23
Tabla 9.	Evolución del intervalo de la línea para los días sábado .....	24
Tabla 10.	Evolución del intervalo de la línea para los días domingo y festivo .....	24
Tabla 11.	Misiones de operación de la PLMB .....	25
Tabla 12.	PPHPD de la PLMB en la hora pico para el año 2022.....	30
Tabla 13.	Desempeño requerido de la PLMB en horas pico, en etapa 1, 2022 .....	30
Tabla 14.	Nivel de confort con intervalo de 180s, hora de pico de la mañana, para el sentido 2 en 2022	31
Tabla 15.	Tiempos de estacionamiento durante la hora pico de la mañana en 2022.....	33
Tabla 16.	Intervalo mínimo práctico en línea en 2022 .....	33
Tabla 17.	Puntos de operación.....	34
Tabla 18.	Tiempos de recorrido para una terminal .....	34
Tabla 19.	Resumen de los tiempos de retorno en las estaciones Portal de las Américas y Calle 72 en 2022	41
Tabla 20.	Resumen intervalos mínimos .....	41
Tabla 21.	Tiempo de recorrido en el sentido 1 para el año 2022 .....	43
Tabla 22.	Tiempo de recorrido en el sentido 2 para el año 2022 .....	44
Tabla 23.	Resumen del tiempo de recorrido para cada sentido para el año 2022 .....	44
Tabla 24.	Desempeño de la PLMB para el año 2022 .....	44
Tabla 25.	TVR de PLMB para el año 2022.....	45
Tabla 26.	Dimensionamiento de la flota para el año 2022 .....	45
Tabla 27.	PPHPD de la PLMB en la hora pico para el año 2030 .....	47
Tabla 28.	Desempeño requerido de la PLMB en horas pico, en etapa 2, 2030 .....	47
Tabla 29.	Longitud aproximada para la etapa 2, 2030 .....	47
Tabla 30.	TVR aproximado para la etapa 2, 2030.....	48
Tabla 31.	Comparación de los tiempos de estacionamiento entre 2022 y 2030 durante la hora pico de la mañana en la vía 2 .....	49
Tabla 32.	Dimensionamiento de la flota para el año 2030 .....	50
Tabla 33.	Capacidad máxima de la línea para dos intervalos y capacidades de tren distintas ..	50

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Esquema de la PLMB para los tres horizontes.....	10
Ilustración 2.	Plano de vías de la PLMB.....	18
Ilustración 3.	Estación terminal Portal de las Américas .....	20
Ilustración 4.	Estación terminal Calle 72 .....	20
Ilustración 5.	Curva de esfuerzo velocidad del material rodante de la PLMB.....	22
Ilustración 6.	Evolución del intervalo de la línea durante un día de semana .....	24
Se presenta a continuación la evolución del intervalo propuesto para los días sábados y luego para los domingos y festivos: .....		24
Ilustración 7.	Método de dimensionamiento de la PLMB .....	28
Ilustración 8.	Número de usuarios de la PLMB durante la hora pico de la mañana en el sentido 1 para el año 2022 .....	29
Ilustración 9.	Número de usuarios de la PLMB durante la hora pico de la mañana en el sentido 2 para el año 2022 .....	29
Ilustración 10.	Retorno en la estación Portal de las Américas .....	35
Ilustración 11.	Estudio del intervalo de retorno para la terminal Portal de las Américas .....	38
Ilustración 12.	Retorno en la estación Calle 72 .....	38
Ilustración 13.	Estudio del intervalo de retorno para la terminal Calle 72 .....	41
Ilustración 14.	Número de usuarios de la PLMB durante la hora pico de la mañana en el sentido 1 para el año 2030 .....	46
Ilustración 15.	Número de usuarios de la PLMB durante la hora pico de la mañana en el sentido 2 para el año 2030 .....	46
Ilustración 16.	Número de pasajeros en la hora pico de la mañana y ocupación de los trenes en cada interestación para el sentido 1 (2022, etapa 1).....	51
Ilustración 17.	Número de pasajeros en la hora pico de la mañana y ocupación de los trenes en cada interestación para el sentido 2 (2022, etapa 1).....	52
Ilustración 18.	Número de pasajeros en la hora pico de la mañana y ocupación de los trenes en cada interestación para el sentido 1 (2030, etapa 2).....	52
Ilustración 19.	Número de pasajeros en la hora pico de la mañana y ocupación de los trenes en cada interestación para el sentido 2 (2030, etapa 2).....	53
Ilustración 20.	Incidente entre Portal de las Américas y Kennedy .....	54
Ilustración 21.	Incidente en Boyacá.....	54
Ilustración 22.	Incidente entre Avenida 68 y Rosario .....	55
Ilustración 23.	Incidente en NQS .....	55
Ilustración 24.	Incidente entre Santander y Calle 10 - 11.....	55
Ilustración 25.	Incidente Calle 26.....	56
Ilustración 26.	Incidente entre Calle 45 y Calle 72 .....	56
Ilustración 27.	Configuraciones de retorno detrás de estación .....	56
Ilustración 28.	Simulaciones para el cálculo de intervalo en línea, sentido 1 .....	61
Ilustración 29.	Simulaciones para el cálculo de intervalo en línea, sentido 2 .....	66
Ilustración 30.	Gráfico de velocidad/distancia, sentido 1.....	70
Ilustración 31.	Gráfico de velocidad/distancia, sentido 2.....	73



## REFERENCIAS

Ref. N°	Ref. ID número	Ref. Descripción
R1	170321_RESUMEN_EJECUTIVO_SUPUESTOS_ _Y_RESULTADOS_MODELACIÓN_BASE_ _ESTRUCTURACIÓN_TÉCNICA.pdf  170321_resumen_escenarios_entregados_ estructuración_metro_con_mosquera_final_enviado.xlsx	Estudio de demanda de la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB) transmitidos por FDN a Sysra el 21/03/2017.
R2	PLMB-SYS-PLA-TRA-3300-0C.dwg	Planialtimetría y trazado realizado por SYSTRA.
R3	BOG_L01_Principal_0.7.2_H-V.dwg	Planialtimetría y trazado actualizado realizado por SYSTRA y transmitido el 25/04/2017.  Esta versión incorpora las terminales y tiene en cuenta los desplazamientos de la estación Boyacá y Calle 72.  Documento interno.
R4	PLMB-SYS-DOC-TOD-0900-0B	Estudio comparativo de alternativas de ejecución por tramos y tipologías de la primera línea de metro para la ciudad de Bogotá (PLMB), con identificación y cuantificación de ahorros que optimicen el beneficio.
RB	PLMB-ET00-L01-IFU-P-0002_RA	POP PLMB

## ABREVIACIONES

<b>ADV</b>	Aparato de vía
<b>ATC</b>	Control Automático del Tren
<b>ATO</b>	Operación Automática del Tren
<b>ATP</b>	Protección Automática del Tren
<b>ATS</b>	Supervisión Automática del Tren
<b>CBTC</b>	Communication Based Train Control
<b>CCTV</b>	Circuito cerrado de televisión
<b>MAS</b>	Máquina Auto Servicio
<b>MRA</b>	Máquina Recarga Automática
<b>PCC</b>	Puesto Central de Comando
<b>PDA</b>	Puertas de Andén
<b>PLMB</b>	Primera Línea de Metro de Bogotá
<b>PMT</b>	Puesto de Maniobras de Taller
<b>SCADA</b>	Supervisión de Control y Adquisición de Datos
<b>SOP</b>	Procedimientos Operativos Normalizados (Standard Operating Procedures)
<b>SP</b>	Servicio Provisorio
<b>TCO</b>	Tablero de Control Óptico
<b>UTO</b>	Operación de Tren Desatendido (Unattended Train Operation)



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 ALCANCE DEL PLAN DE OPERACIÓN PRELIMINAR

El plan de operación preliminar define la oferta de transporte y los principios funcionales de un sistema de transporte, así como los métodos que deben aplicarse para asegurar el funcionamiento óptimo de este sistema. Constituye una etapa importante en el proceso progresivo que conduce a la puesta en servicio comercial del sistema de transporte.

Este documento proporciona los principios generales de **operación para la Primera Línea del Metro de Bogotá hasta el horizonte 2030**, entre los que se destacan:

- Política general de transporte: objetivos de producción y de calidad de servicio<sup>1</sup>, objetivos de seguridad del funcionamiento<sup>2</sup>;
- Características del servicio: oferta de transporte necesaria para hacer frente a la demanda;
- Estructura y equipamientos de la PLMB: descripción del plano de vía, ubicación y tipología de las terminales y cocheras, principios de funcionamiento del sistema, características del material rodante;
- Propuesta organizativa de la empresa operadora;
- Operación de la línea en modo nominal;
- Operación de la línea en modo degradado;
- Servicios en estación;
- Puesto Central de Comando (PCC): funcionalidades del PCC, regulación de horarios y de intervalo, inyección/retirada de trenes.

Visto que se dispone únicamente del trazado correspondiente al horizonte 2022, los resultados presentes en este documento se limitan principalmente a la primera etapa del proyecto, realizándose unas estimaciones al horizonte 2030.

### 1.2 DOCUMENTOS RELACIONADOS

Para una mejor comprensión del presente documento se requiere la información contenida en los documentos mencionados anteriormente en el apartado de referencias.

---

<sup>1</sup> Los objetivos de producción y de calidad son los mismos que para cualquier servicio público: seguimiento de la oferta, pilotaje en calidad del servicio proporcionado por medio de indicadores.

<sup>2</sup> Los objetivos de seguridad de funcionamiento son específicos al sector ferroviario: plan de seguridad, seguimiento de la operación, estudios e investigaciones, base de datos de incidentes, retroalimentación, etc.

## 2. PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ

### 2.1 PRESENTACIÓN DE LA LÍNEA

En un contexto de expansión y crecimiento demográfico, y con el objetivo de mejorar la calidad del servicio de transporte de la capital colombiana, la ciudad de Bogotá observa la necesidad de incorporar a su actual red de transporte una línea de metro completamente automática, con rodado de acero y alimentación eléctrica por medio de tercer riel (750 V). Se trata de la Primera Línea de Metro de Bogotá.

El trazado de la PLMB será completamente en viaducto. El proyecto se compone de tres etapas:

- **Etapa 1 (2022): Portal de las Américas – Calle 72**
- **Etapa 2 (2030): con extensión al norte de Calle 72 hasta Calle 127.**
- Etapa 3 (2050): con extensión al norte de Calle 127 a Calle 170

Se presenta a continuación el esquema de la Primera Línea de Metro de Bogotá para los horizontes 2022, 2030 y 2050:



Ilustración 1. Esquema de la PLMB para los tres horizontes

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DEL TRAZADO

Los datos que se presentan a continuación deberán ser revisados luego de las eventuales modificaciones que pudieran producirse en el trazado. Estas modificaciones podrían tener impactos sobre los resultados de desempeño de la línea (capítulo 4).

A continuación, se exponen los datos de entrada considerados en las simulaciones de operación. Estos fueron determinados basándose en la referencia [R2][R3]. Cuando no fue posible encontrar datos precisos en las referencias antes mencionadas, se han hecho hipótesis para desarrollar el estudio. **Cabe señalar que al no contar con información suficiente del trazado para las etapas 2, el cálculo del parque de trenes se ha realizado de manera estimativa.**

### 2.2.1 Sentido de circulación

Se definen los sentidos de circulación 1 y 2 como se indica en el Plano de vías de la PLMB. Los trenes circulan por la vía derecha. El sentido de circulación 1 es el que va de Calle 72 a Portal de las Américas. El sentido de circulación 2 es el que va de Portal de las Américas a Calle 72. La denominación de las vías sigue la misma lógica.

### 2.2.2 Ubicación de las estaciones

A continuación, se indican los puntos kilométricos del centro de andén de cada estación [R2] [R3].

Etapa	Estación	Longitud de inter-estación (m)	Andén de 150 metros			Punto de parada	
			PK medio del andén	PK del principio del andén	PK del fin del andén	Vía 1	Vía 2
1	Portal de las Américas		331	256	406	256	406
		1 108					
	Villablanca		1 439	1 364	1 514	1 364	1 514
		1 084					
	Palenque		2 523	2 448	2 598	2 448	2 598
		949					
	Kennedy		3 472	3 397	3 547	3 397	3 547
		1 297					
	Avenida Boyacá		4 769	4 694	4 844	4 694	4 844
		1 628					
	Avenida 68		6 397	6 322	6 472	6 322	6 472
		1 145					
	Rosario		7 542	7 467	7 617	7 467	7 617
		1 405					
	NQS		8 947	8 872	9 022	8 872	9 022
		1 666					
Santander		10 613	10 538	10 688	10 538	10 688	
	1 207						
Hospitales		11 820	11 745	11 895	11 745	11 895	

Etapa	Estación	Longitud de inter-estación (m)	Andén de 150 metros			Punto de parada	
			PK medio del andén	PK del principio del andén	PK del fin del andén	Vía 1	Vía 2
		1 091					
	<b>Calle 10 - 11</b>		12 911	12 836	12 986	12 836	12 986
		1 580					
	<b>Calle 26</b>		14 491	14 416	14 566	14 416	14 566
		2 036					
	<b>Calle 45</b>		16 527	16 452	16 602	16 452	16 602
		2 018					
	<b>Calle 63</b>		18 545	18 470	18 620	18 470	18 620
		1 328					
	<b>Calle 72</b>		19 873	19 798	19 948	19 798	19 948

**Tabla 1. Estaciones de la Primera Línea del Metro de Bogotá en la etapa 1**

Se define una longitud de andenes de 150 metros. Esta longitud tiene en cuenta el crecimiento de la demanda para el año 2050 y las futuras extensiones.

El punto de parada corresponde a la posición de la cabeza del tren cuando el mismo se encuentra detenido en la estación. Esta se ubica sobre el final del andén.

### 2.2.3 Planimetría

A continuación, se presentan los datos de planimetría de la PLMB [R2] [R3].

Etapa	Número de curva	Tipo	PK inicial	Longitud (m)	Radio (m)
1		Recta	0	505	-
	1	Curva	505	103	210
		Recta	608	30	-
	2	Curva	638	153	250
		Recta	791	111	-
	3	Curva	902	157	210
		Recta	1059	30	-
	4	Curva	1089	135	250
		Recta	1224	333	-
	5	Curva	1557	73	5000
		Recta	1630	477	-

Etapa	Número de curva	Tipo	PK inicial	Longitud (m)	Radio (m)
	6	Curva	2107	279	200
		Recta	2386	1322	-
	7	Curva	3 708	142	1 000
		Recta	3850	489	-
	8	Curva	4339	257	300
		Recta	4596	293	-
	9	Curva	4889	215	300
		Recta	5104	533	-
	10	Curva	5637	233	500
		Recta	5870	216	-
	11	Curva	6086	91	950
		Recta	6177	30	-
	12	Curva	6207	100	300
		Recta	6307	180	-
	13	Curva	6487	105	550
		Recta	6592	50	-
	14	Curva	6642	93	5 000
		Recta	6735	309	-
	15	Curva	7044	174	450
		Recta	7218	667	-
	16	Curva	7885	188	1000
		Recta	8073	431	-
	17	Curva	8504	346	250
		Recta	8850	270	-
	18	Curva	9120	396	300
		Recta	9516	376	-
	19	Curva	9892	226	250
		Recta	10118	180	-

Etapa	Número de curva	Tipo	PK inicial	Longitud (m)	Radio (m)
	20	Curva	10298	162	300
		Recta	10460	247	-
	21	Curva	10707	126	2000
		Recta	10833	322	-
	22	Curva	11155	190	700
		Recta	11345	30	-
	23	Curva	11375	314	210
		Recta	11689	222	-
	24	Curva	11911	133	1800
		Recta	12044	453	-
	25	Curva	12497	154	3000
		Recta	12651	361	-
	26	Curva	13012	142	5000
		Recta	13154	89	-
	27	Curva	13243	141	5000
		Recta	13384	460	-
	28	Curva	13844	141	600
		Recta	13985	1018	-
	29	Curva	15003	108	3000
		Recta	15111	167	-
	30	Curva	15278	339	900
		Recta	15617	214	-
	31	Curva	15831	97	3000
		Recta	15928	70	-
	32	Curva	15998	91	5000
		Recta	16089	918	-
	33	Curva	17007	99	2000
		Recta	17106	1013	-

Etapa	Número de curva	Tipo	PK inicial	Longitud (m)	Radio (m)
	34	Curva	18119	103	25000
		Recta	18222	413	-
	35	Curva	18635	151	5000
		Recta	18786	142	-
	36	Curva	18928	235	600
		Recta	19163	143	-
	37	Curva	19310	123	250
		Recta	19433	875	-

Tabla 2. Planimetría de la PLMB

## 2.2.4 Altimetría

A continuación, se presentan los datos de altimetría de la PLMB [R2] [R3].

Etapa	Sección	PK inicial	Longitud (m)	Pendiente (%)
1	1	0	556	0
	2	556	270	11
	3	826	156	6
	4	982	342	15
	5	1 324	218	0
	6	1 542	111	-10
	7	1 653	124	-20
	8	1 777	301	4,5
	9	2 078	209	20
	10	2 287	135	10
	11	2 422	220	0
	12	2 642	226	-20
	13	2 868	308	3
	14	3 176	163	20
	15	3 339	251	0
	16	3 590	189	-15
	17	3 779	132	-10
	18	3 911	387	2
	19	4 298	318	13



Etapa	Sección	PK inicial	Longitud (m)	Pendiente (‰)
	20	4 616	376	0
	21	4 992	262	-20
	22	5 254	525	3
	23	5 779	478	10
	24	6 257	282	0
	25	6 539	78	-10
	26	6 617	150	-20
	27	6 767	249	-2,5
	28	7 016	252	7
	29	7 268	147	20
	30	7 415	261	0
	31	7 676	180	-20
	32	7 856	406	3
	33	8 262	502	20
	34	8 764	450	0
	35	9 214	188	-20
	36	9 402	293	-5
	37	9 695	308	8,5
	38	10 003	240	20
	39	10 243	239	12
	40	10 482	293	0
	41	10 775	280	-10
	42	11 055	559	20
	43	11 614	489	0
	44	12 103	684	21
	45	12 787	296	0
	46	13 083	329	-4
	47	13 412	374	9
	48	13 786	339	-10
	49	14 125	166	14
	50	14 291	336	0
	51	14 627	522	-20
	52	15 149	555	-9
	53	15 704	259	4
	54	15 963	247	-19

Etapa	Sección	PK inicial	Longitud (m)	Pendiente (‰)
	55	16 210	192	20
	56	16 402	250	0
	57	16 652	575	-20
	58	17 227	772	-4
	59	17 999	382	20
	60	18 381	333	0
	61	18 714	321	-20
	62	19 035	428	-5,3
	63	19 463	845	-2

Tabla 3. Altimetría de la PLMB

## 2.3 INFRAESTRUCTURA

Los datos que se presentan a continuación deberán ser revisados luego de las eventuales modificaciones que pudieran producirse en la infraestructura. Estas modificaciones podrían tener impactos sobre los resultados de desempeño de la línea (3.2).

### 2.3.1 La vía

Un plano de vía adecuado es esencial para poder proporcionar un buen nivel de servicio en la línea y un programa de operación fiable.

El plano de vía debe permitir:

- La operación de la línea en situación normal, con el intervalo mínimo entre dos trenes;
- El retorno de los trenes al final de la línea;
- La inserción y retirada de trenes, al comienzo y fin del día, y para ajustar la oferta de transporte a la demanda a lo largo del día;
- La operación en situación de incidente (situación degradada);
- La configuración de la vía y los andenes permite realizar un servicio rápido, frecuente, seguro, operando en modo normal y modo degradado.

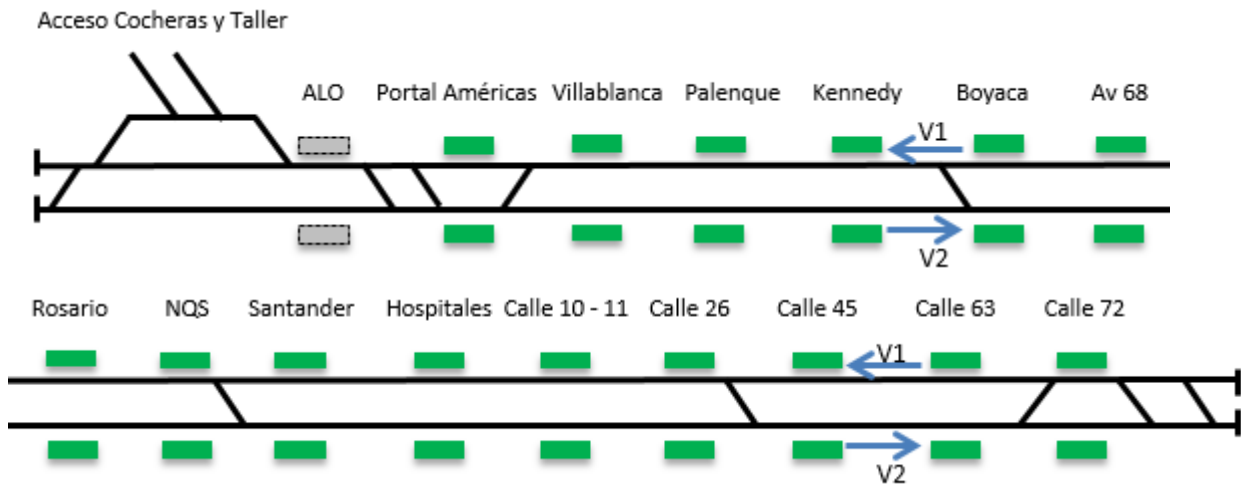
El esquema de vías deberá admitir movimientos en ambos sentidos a lo largo de toda la línea. Esta flexibilidad permite retroceder los trenes en caso de necesidad.

Además, se instalarán aparatos de vía que permitan realizar Servicios Provisorios (SP) en las estaciones principales. Estas se definen según los siguientes criterios:

- Estaciones terminales;
- Estaciones que cuentan con un flujo importante de pasajeros (aproximadamente más de 5000 por hora);
- Estaciones cuyas interestaciones presentan una alta cantidad de pasajeros;
- Una repartición lógica en la línea (cada 3 o 4 estaciones).

Estos se ubicarán entonces en las estaciones de Portal de las Américas, Avenida Boyacá, NQS, Calle 26 y Calle 72. Los aparatos de vía serán bidireccionales, posibilitando así una operación más simple en situaciones degradadas. Además, por razones de seguridad, se instalarán de manera que sean tomados por el talón en el sentido normal de circulación.

A continuación, se representa el esquema de vías propuesto:



**Ilustración 2. Plano de vías de la PLMB**

### 2.3.2 Velocidad comercial y límites de velocidad

La velocidad comercial de la línea es un factor importante para atraer a pasajeros de otros medios de transporte. Esta depende en gran parte de las características de la vía. En efecto, la velocidad comercial no aumenta considerablemente con una mayor velocidad máxima del material rodante. El factor limitante de la velocidad comercial es, en general, la reducción de velocidad entre las estaciones y las curvas.

A continuación, se presentan las características de la vía con mayor impacto sobre la operación de la línea. Para un mayor detalle de dichas características se sugiere consultar el trazado de la línea [R2] [R3].

La velocidad máxima de servicio que podrá ser alcanzada en vía principal, cuando no hay reducción de velocidad debido al perfil de la vía, es de 80 km/h. Esta velocidad no sólo se encuentra dentro de los parámetros habituales de las principales líneas de metro del mundo, sino que es coherente con la elevada longitud de la interestación media que presenta la línea (1 396 metros) y permite alcanzar una velocidad comercial por encima de los 40 km/h.

Al tomar un aparato de vía por el talón, el tren debe poder mantener su velocidad, sin restricción particular debida a este.

Las curvas que presentan un radio menor a 310 metros provocan una limitación de la velocidad respecto a la velocidad máxima de servicio de 80 km/h. La restricción de velocidad asociada a una curva se aplica desde el punto kilómetro (PK) de comienzo de la curva (curva y enlace de curva) hasta el punto kilómetro de fin de la curva (curva y enlace de curva) más la longitud del tren.

A continuación, se identifican los puntos kilómetros de la línea donde se observan curvas horizontales y sus limitaciones de velocidad asociadas [R2] [R3]. Entre los tramos mencionados en la siguiente tabla, no se define limitación de velocidad y el tren puede circular a la velocidad máxima de servicio de 80 km/h.

PK de inicio de la curva	PK de fin de la curva	Longitud del tramo cuya velocidad está limitada (m)	Radio de curva (m)	Velocidad máxima (km/h)
505	608	103	210	60
638	791	153	250	65
902	1059	157	210	60
1089	1224	135	250	65
2107	2386	279	200	55
4339	4596	257	300	75
4889	5104	215	300	75
6207	6307	100	300	65
8504	8850	346	250	65
9120	9516	396	300	75
9892	10118	226	250	65
10298	10460	162	300	75
11375	11689	314	210	60
19310	19433	123	250	65

**Tabla 4. Velocidades máximas permitidas en función del PK (menores a 80 km/h)**

### 2.3.3 Terminales

#### 2.3.3.1 Portal de las Américas

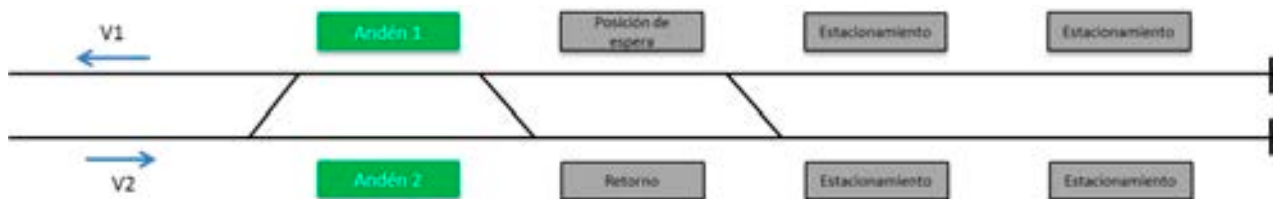
La estación Portal de las Américas es una estación de retorno con dos vías. El esquema siguiente presenta el plano de vías funcional de la terminal [R2] [R3].



**Ilustración 3. Estación terminal Portal de las Américas**

### 2.3.3.2 Calle 72

La estación Calle 72 es una estación de retorno con dos vías. El esquema siguiente presenta el plano de vías funcional de la terminal [R2] [R3].



**Ilustración 4. Estación terminal Calle 72**

## 2.4 CARACTERÍSTICAS DEL SERVICIO

### 2.4.1 Descripción del tren

Las características del material rodante sobre las cuales se basa el cálculo del desempeño de la Primera Línea del Metro de Bogotá se presentan en la tabla y curva siguientes:

<b>Diagrama de puertas<sup>3</sup></b>	Número de puertas por coche, por lado	3
	Pasaje libre por puerta	1,60 m
	Flujo de pasajeros por puerta	40 pasajeros/minuto
<b>Dimensión</b>	Longitud total del tren (8 coches)	140 m
	Ancho del tren	2,90 m
<b>Diagrama interior</b>	Tipo	1 nivel
	Intercirculación	En todo el tren
	Norma de comodidad	6 pasajeros/m <sup>2</sup>
	Capacidad por tren, respetando la norma de comodidad	1778 pasajeros

<sup>3</sup> Ver el apéndice **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

	Proporción de pasajeros sentados	10.8 %	
Desempeño	Velocidad máxima de servicio	80 km/h <sup>4</sup>	
	Masa estática (6 pax/m <sup>2</sup> )	325 toneladas	
	Masa rotacional	8 %	
	Frenado de servicio	1 m/s <sup>2</sup>	
	Aceleración máxima	0,86 m/s <sup>2</sup>	
	Esfuerzo resistente = $A + B \cdot V + C \cdot V^2$	A	6236,54 N
		B	45,42 N*h/km
C		0,93 N*h <sup>2</sup> /km <sup>2</sup>	
Tiempo técnico	Inversión del sentido de circulación	10 s	
Energía	Alimentación	Tercer riel	
	Tensión	750 V	

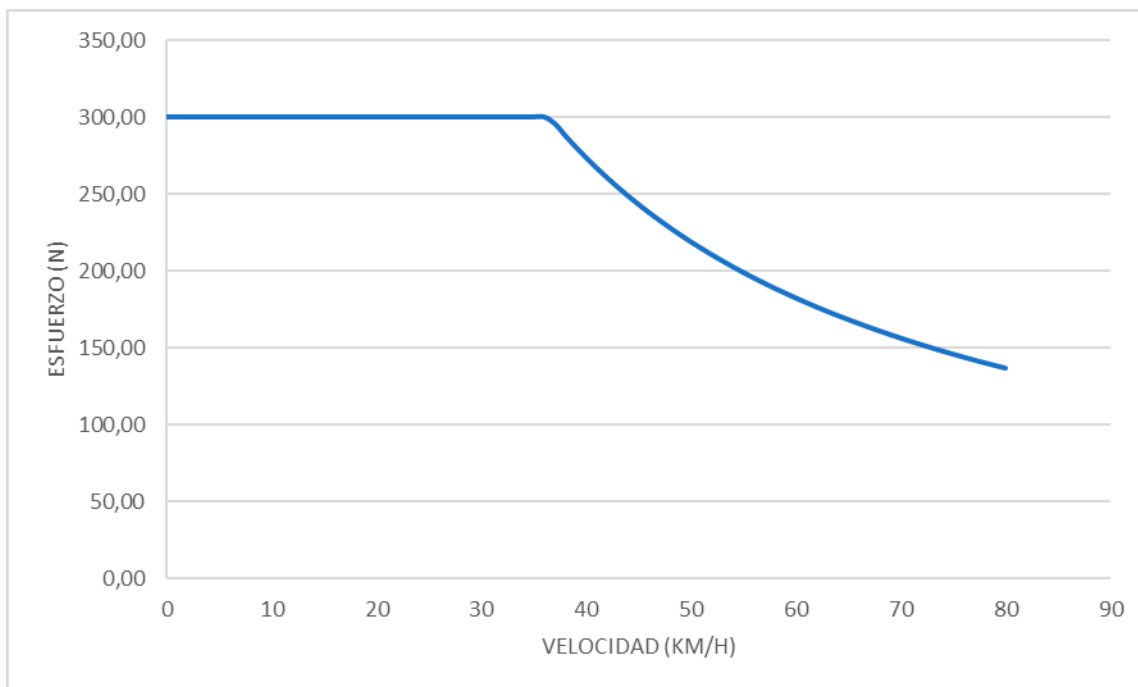
**Tabla 5. Hipótesis sobre el material rodante**

La longitud del tren ha sido fijada a 140 metros durante el seminario de operación del 05/04/2017 dado que se trata de la alternativa más conveniente.

Si bien la utilización de trenes de 70 metros con un intervalo de 2 minutos permite satisfacer la demanda en la primera etapa, esta alternativa presenta serias dificultades hacia 2030. En efecto, la necesidad de cambio a unidades múltiples antes del fin de vida útil de los vehículos y la adaptación que requerirían los diferentes sistemas ante la variación de longitud de los trenes (puertas de andén, señalización, etc.), representan grandes inconvenientes para la consideración de esta opción como se observó durante el seminario de operación del 05/04/2017.

Si bien los tiempos de recorrido y de estacionamiento han sido calculados con una formación de 8 coches de 17,5 metros, a raíz de los primeros resultados del estudio del material rodante, se propone la utilización de una formación de **7 coches de 20 metros**. Esta configuración deberá garantizar una capacidad y un rendimiento similar al proporcionado por el material rodante presentado anteriormente en la tabla y en la curva a continuación.

<sup>4</sup> Velocidad de diseño de 90 km/h.



**Ilustración 5. Curva de esfuerzo velocidad del material rodante de la PLMB**

En efecto, una longitud de coche de 20 metros supone una medida estándar para los principales fabricantes de material rodante de metro del mundo. Esta longitud admite 4 puertas por coche y por lado, lo que representa un total de 28 accesos y la consecuente disminución del tiempo de estacionamiento.

Finalmente, esta configuración representa un muy buen compromiso económico respecto a trenes de 6 u 8 coches. Por una parte, los coches de 20 metros suponen un peso por eje razonable, lo que implica una infraestructura menos robusta y, por lo tanto, menos costosa respecto a coches de mayores longitudes. Por otro lado, la configuración de trenes de 7 coches se traduce en menos costos de adquisición y mantenimiento respecto a la alternativa de 8 coches (menos unidades y menos bogíes).

#### **2.4.2 Puesta en servicio**

La puesta en servicio de la etapa 1 está prevista para 2022. Como se indicó anteriormente, dos extensiones se prevén en 2030 y 2050.

#### **2.4.3 Horarios**

La determinación de los horarios de operación comercial y de la evolución del intervalo a lo largo del día para la PLMB se ha realizado en base a la definición de tres días tipo: laborable (lunes a viernes); sábado; y domingo y festivos. Además, se ha considerado la siguiente distribución para un año calendario:

Día tipo	Cantidad de días
Laborable (lunes a viernes)	244
Sábados	52
Domingos	52



Día tipo	Cantidad de días
Festivos	17

**Tabla 6. Cantidad de días en un año calendario para cada uno de los tres días tipo**

Para cada uno de estos, se define:

- Un horario de inicio de servicio que corresponde al horario de salida del primer tren desde cada una de las estaciones terminales;
- Un horario de fin del servicio que corresponde al horario de llegada del último tren desde cada una de las estaciones terminales;
- La evolución del intervalo a lo largo de cada día tipo.

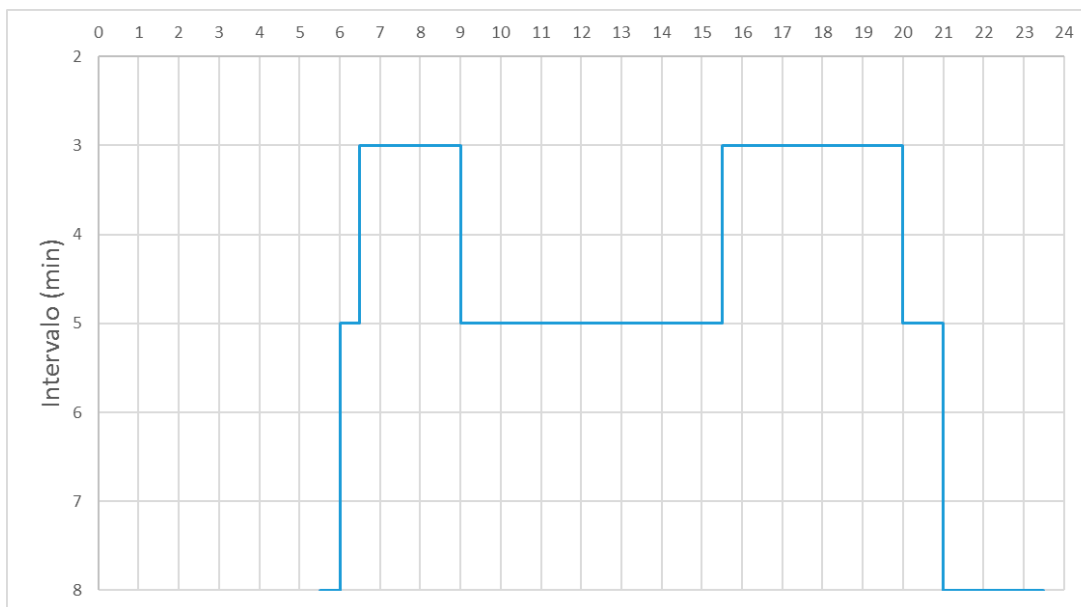
Día tipo	Hora Inicio	Hora Fin
Laborable (lunes a viernes)	05h30	23h00
Sábados	05h30	24h00
Domingos y Festivos	7h00	23h00

**Tabla 7. Horarios de inicio y fin de la operación comercial para cada uno de los días tipos**

La siguiente tabla muestra la propuesta de SYSTRA para la evolución del intervalo para los días laborales (de lunes a viernes):

Horario	Intervalo (min)
5:30 – 6:00	8
6:00 – 6:30	5
6:30 – 9:00	3 (hora punta)
9:00 – 15:30	5
15:30 – 20:00	3 (hora punta)
20:00 – 21:00	5
21:00 – 23:00	8

**Tabla 8. Evolución del intervalo de la línea a lo largo de un día laborable (lunes a viernes)**



**Ilustración 6. Evolución del intervalo de la línea durante un día de semana**

Se presenta a continuación la evolución del intervalo propuesto para los días sábados y luego para los domingos y festivos:

Horario	Intervalo (min)
5:30 – 7:00	8
7:00 – 24:00	5

**Tabla 9. Evolución del intervalo de la línea para los días sábado**

Horario	Intervalo (min)
7:00 – 9:00	8
9:00 – 23:00	5

**Tabla 10. Evolución del intervalo de la línea para los días domingo y festivo**

Los horarios de operación podrían extenderse durante eventos especiales o días festivos. El período dedicado al mantenimiento de la infraestructura durante un día laboral será aproximadamente de las 23:00 a las 5:30 AM.

## 2.4.4 Tipos de servicio comercial

### 2.4.4.1 Modo nominal

Se prevé operar de igual manera tanto para la hora pico como para la hora valle. La tabla siguiente presenta las distintas misiones de operación en hora pico en función de los escenarios considerados:

Etapa 1 - 2022	Etapa 2 – 2030
Una única misión desde Portal de las Américas hasta Calle 72.	Una única misión desde Portal de las Américas hasta Calle 127.

**Tabla 11. Misiones de operación de la PLMB**

#### 2.4.4.2 En modo degradado

Los aparatos de vía deben permitir realizar la maniobra de retorno de los trenes en caso de obstrucción de la vía (debida a la falla de un tren, o a la falla de un equipo) para poder realizar servicios provisorios.

#### 2.4.5 **Tiempos de retorno en terminal**

La configuración de las estaciones terminales es estratégica para asegurar la regularidad del tráfico. La estación terminal debe permitir el retorno de trenes y, al mismo tiempo, realizar el intervalo mínimo deseado. Además, debe también proporcionar suficiente margen de tiempo para recuperar un retraso de menor magnitud y así mantener el intervalo previsto.

#### 2.4.6 **Modos de conducción**

En función de los requerimientos de operación, del tráfico y del estado de los equipamientos, se debe poder operar en distintos modos:

- Operación normal
  - Modo UTO: completamente automático, sin agente y bajo la protección del sistema CBTC;
- Operación degradada:
  - CMR-30: Conducción manual restringida a 30 km/h impuesta por el tren (marcha a la vista).  
Se propone una restricción de velocidad más importante (15 km/h) en la zona de talleres.

El modo de funcionamiento nominal para la operación con pasajeros debe ser de conducción automática y sin asistencia, es decir, UTO. Este modo debe ser utilizado en las vías principales, en la vía de pruebas, en las zonas de retorno de la línea, talleres hasta la zona de transferencia, en las cocheras y en la máquina de lavado.

Este modo aporta una mayor flexibilidad a la operación pudiendo, por ejemplo, añadir trenes en caso de aumento inesperado de la demanda. Es también el modo más económico en términos de costos de operación y mantenimiento.

En modo UTO, las siguientes funciones deben ser automáticas:

- Parada del tren en estación, salida de estación;
- Conducción de trenes, respetando los límites de velocidad;
- Apertura/cierre de puertas del tren y del andén;
- Gestión de la energía de tracción;
- Regulación del tráfico;
- Gestión de rutas.

Se deberá tener en cuenta que, al tratarse de una línea completamente automática, no se dispone de conductores que puedan observar a los pasajeros durante el acceso del metro a la estación. Por esta razón, se deberán implementar algunas soluciones de sustitución como la protección del área de la vía y la instalación de puertas de andén de 2,20 metros. Además, la información a los pasajeros y la operación en modo degradado deben manejarse por el operador del PCC.

Asimismo, se debe admitir la posibilidad de conducir los trenes en modo manual. Este modo de conducción tendrá una restricción de velocidad asociada y se utilizará cuando el sistema CBTC no se encuentre operativo por motivo de falla o en las zonas de conducción manual, como los talleres luego de la zona de transferencia. En este modo, la conducción del tren está bajo responsabilidad del conductor.

Es conclusión, una línea automática también necesita personal para poder ser operada, pero en puestos diferentes a los de una línea con conductores.

### **3. CÁLCULOS DE DESEMPEÑO DE LA PLMB**

#### **3.1 DEFINICIONES Y MÉTODO**

##### **3.1.1 Capacidad de la línea**

La capacidad de la línea es el número máximo de personas que pueden ser transportadas en la línea por hora y por dirección. Depende de la norma de comodidad considerada para el proyecto. En este caso, FDN ha definido un valor de 6 pasajeros por m<sup>2</sup>.

La capacidad debe ser adaptada a la demanda por hora y por dirección (expresado en número de Pasajeros Por Hora Por Dirección, PPHPD) que ocurre en las horas punta y en el tramo más cargado.

##### **3.1.2 Tiempo de estacionamiento en las estaciones**

El tiempo de estacionamiento se define como la duración desde la parada del tren en la estación hasta cuando inicia su salida de la misma.

##### **3.1.3 Tiempo de retorno en la estación terminal**

Es el tiempo que un tren necesita para ir de una vía a la otra desde el momento que se detiene en el andén de llegada hasta el momento que inicia la salida desde el andén de salida. Se incluyen los tiempos de estacionamiento, los tiempos de recorrido y el tiempo de cambio de dirección.

##### **3.1.4 Intervalo mínimo práctico en línea**

El intervalo mínimo práctico en línea es el tiempo mínimo entre dos trenes consecutivos que permite el desplazamiento del segundo sin que su recorrido sea afectado por la circulación del primero. Ese intervalo depende del desempeño del sistema de señalización, del tiempo de estacionamiento máximo y de las características del material rodante (longitud del tren, índices de aceleración y desaceleración). El intervalo mínimo práctico es calculado con un margen, ya que no es posible sostener la operación sin este margen.

##### **3.1.5 Intervalo mínimo de retorno en la estación terminal**

El intervalo mínimo de retorno es definido como el intervalo mínimo práctico en la estación terminal. Además de los parámetros ya mencionados en la definición del intervalo mínimo práctico, el intervalo mínimo de retorno depende de la configuración de la terminal.

##### **3.1.6 Intervalo mínimo operacional**

El intervalo mínimo operacional tiene que ser superior al intervalo mínimo práctico y al intervalo mínimo de retorno. Además, el intervalo mínimo operacional debe incluir un margen. De no ser así, el menor incidente podría provocar demoras impactando la totalidad de la línea.

##### **3.1.7 Método para el cálculo**

El proyecto de la PLMB se dimensionará con las previsiones de demanda del año 2022, **2030** y 2050 realizadas por la Secretaría Distrital de Movilidad [R1].

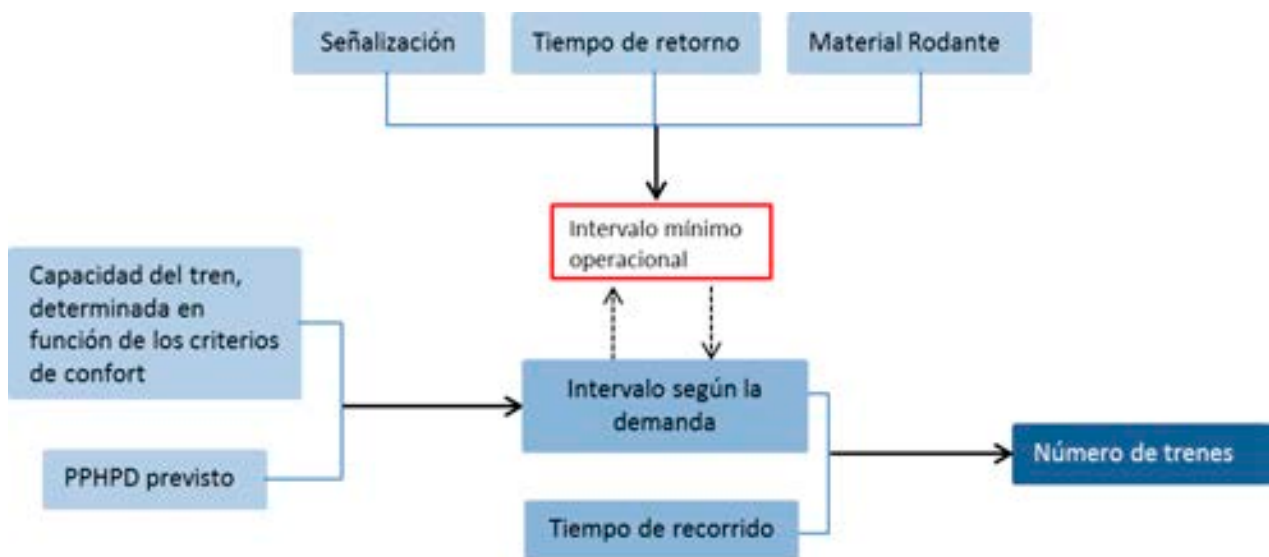
Para dimensionar la línea, se debe considerar una norma de comodidad que, asociada a las dimensiones de los trenes y sus características interiores, determina la capacidad de pasajeros por tren. Con la capacidad del tren y el PPHPD previsto, se calcula la frecuencia de trenes necesaria (número de trenes requerido por hora) durante las horas punta en el tramo más cargado de la línea y, por tanto, el intervalo mínimo necesario entre los trenes. Se debe comprobar que este intervalo sea viable, es decir, superior o igual al intervalo mínimo operacional del sistema de transporte.

Si el intervalo mínimo necesario puede ser alcanzado por el sistema de transporte, se puede calcular el desempeño del sistema, es decir:

- El tiempo de estacionamiento en cada estación y en cada dirección;
- Los tiempos de recorrido del tren entre cada estación, en ambas vías y en ambas direcciones.

Con estos valores, sumados al tiempo de retorno en las estaciones terminales, se puede estimar el tiempo de recorrido de la vuelta redonda del tren en la línea.

Con el tiempo de vuelta redonda y el intervalo práctico mínimo, se puede determinar el tamaño de la flota del material rodante.



**Ilustración 7. Método de dimensionamiento de la PLMB**

### 3.2 CÁLCULO DE DESEMPEÑO DE LA LÍNEA

Para el cálculo de desempeño de la Primera Línea del Metro de Bogotá para el año 2022 se procede de la siguiente manera:

- Se indica las previsiones de demanda proporcionadas por SDM a través de FDN;
- Se calcula los tiempos mínimos de estacionamiento en cada estación y cada sentido;
- Se calcula el intervalo necesario para satisfacer la demanda en hora pico, y se comprueba su factibilidad en la línea y en las terminales;
- Se estima la velocidad comercial con base en los tiempos de recorrido simulados con la herramienta RailSys;
- Se dimensiona la flota de material rodante necesaria.

Para el escenario 2030, se calcula el intervalo correspondiente a la demanda y luego se estima la flota de trenes necesaria. Para realizar esta estimación, los cálculos se basarán en la velocidad comercial obtenida en la etapa 1.

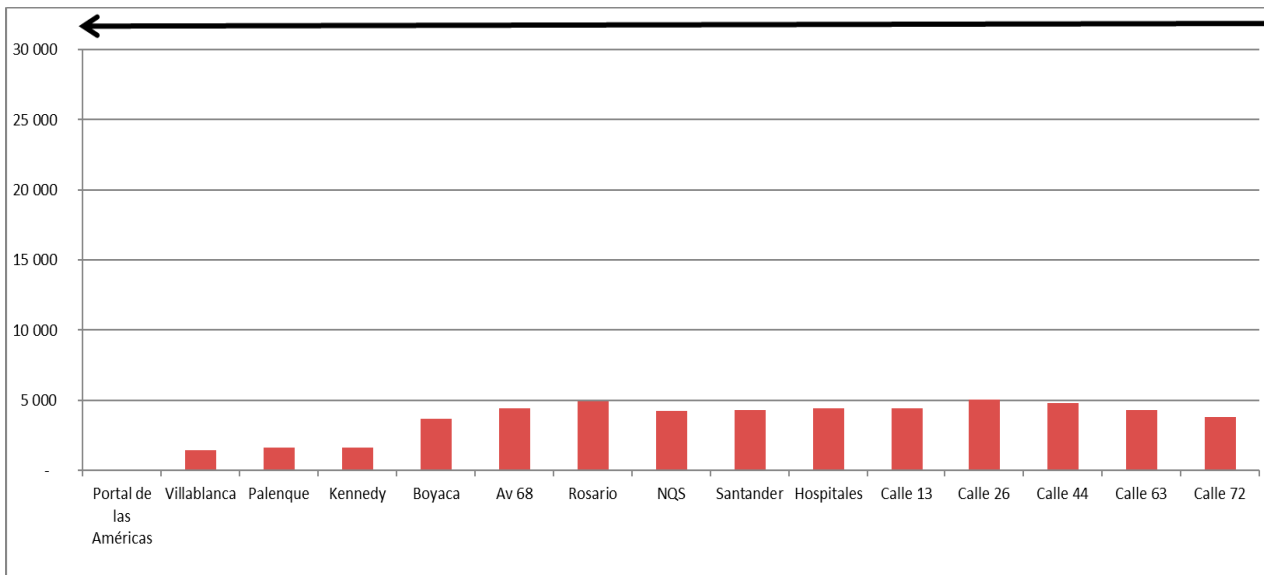
### 3.2.1 Etapa 1 – 2022

En este escenario, la PLMB operará entre las estaciones Portal de las Américas y Calle 72. Todos los trenes realizan una misma misión, deteniéndose en cada estación.

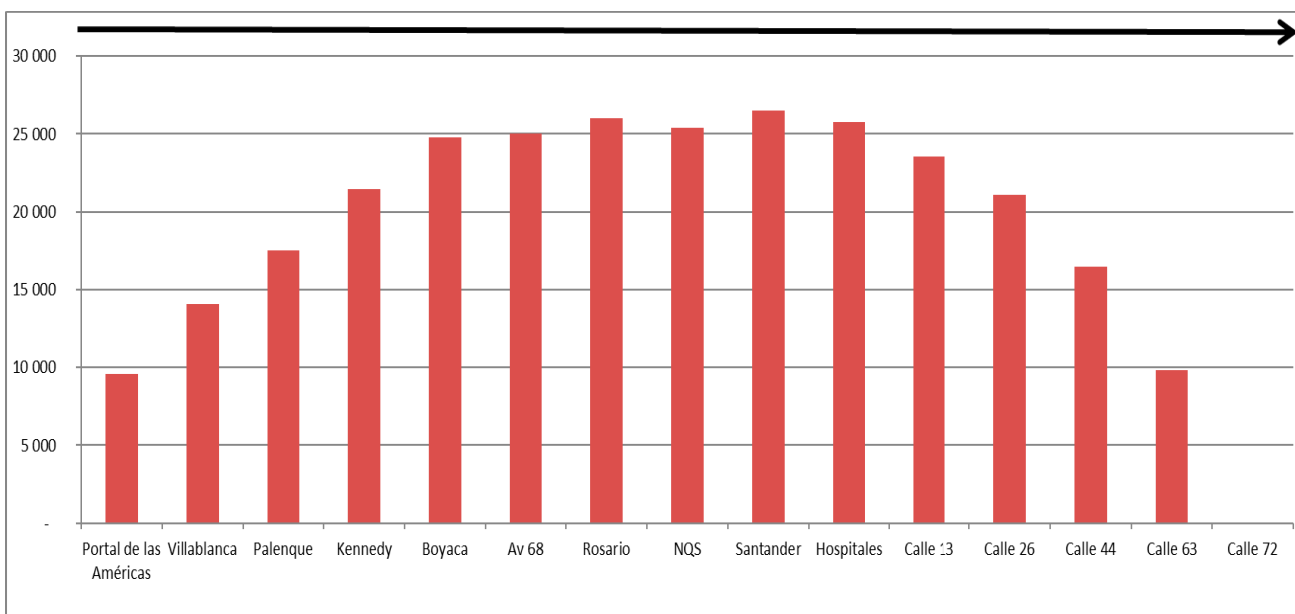
#### 3.2.1.1 Flujo de pasajeros

El flujo de pasajeros por estación de la PLMB en 2022 se presenta en el apéndice 4.2.1.

Los diagramas siguientes muestran la ocupación de los trenes en la PLMB durante la hora pico de la mañana:



**Ilustración 8. Número de usuarios de la PLMB durante la hora pico de la mañana en el sentido 1 para el año 2022**



**Ilustración 9. Número de usuarios de la PLMB durante la hora pico de la mañana en el sentido 2 para el año 2022**



El tramo más cargado de la línea se observa entre las estaciones Santander y Hospitales, en la vía 2 en la hora punta de la mañana.

Año 2022	
Tráfico máximo: SANTANDER – HOSPITALES	26 492 pasajeros/hora-sentido

**Tabla 12. PPHPD de la PLMB en la hora pico para el año 2022**

### 3.2.1.2 Cálculo del intervalo mínimo para satisfacer la demanda

Considerando la capacidad máxima del tren (C) y el valor del PPHPD previsto (PPHPD) que se debe satisfacer, se deduce el número de trenes necesarios por hora (N) para adecuar la demanda y por lo tanto el intervalo mínimo necesario para el año 2022.

$$I = \frac{3600 * C}{PPHPD} ; N = \frac{PPHPD}{C}$$

**Ecuación 1.** Fórmulas del intervalo mínimo para satisfacer la demanda y del número de trenes asociado  
**Ecuación 2.**

Escenario 2022	
Intervalo mínimo necesario para satisfacer la demanda	240 s
Número mínimo de trenes circulando por hora	15

**Tabla 13. Desempeño requerido de la PLMB en horas pico, en etapa 1, 2022**

Un intervalo de 240 segundos (4 minutos) permite satisfacer la demanda para el año 2022 pero es poco atractivo para la puesta en servicio.

**Por esta razón, se propone un intervalo de 180 segundos (3 minutos).**

### 3.2.1.3 Nivel de confort

Basándose en los flujos de pasajeros (ver 4.2) y en las características del material rodante (ver 2.4.1), se puede calcular el nivel de confort de los pasajeros en los trenes durante la hora pico, en función de la oferta de transporte (intervalo entre dos trenes sucesivos).

A continuación, se presenta el número de pasajeros parados por metro cuadrado libre en cada interestación, durante la hora pico de la mañana, en el sentido más cargado:

Estaciones	Número de pasajeros parados por m <sup>2</sup>
Portal de las Américas	
	1,1
Villablanca	
	2,0
Palenque	
	2,7
Kennedy	
	3,4
Avenida Boyacá	
	4,1
Avenida 68	
	4,1
Rosario	
	4,3
NQS	
	4,2
Santander	
	4,4
Hospitales	
	4,3
Calle 10 - 11	
	3,8
Calle 26	
	3,4
Calle 45	
	2,5
Calle 63	
	1,2
Calle 72	

**Tabla 14. Nivel de confort con intervalo de 180s, hora de pico de la mañana, para el sentido 2 en 2022**

#### 3.2.1.4 Cálculo de los tiempos de estacionamiento

El tiempo de estacionamiento depende de los flujos de pasajeros (4.2) y de las características del tren (2.4.1).

Para calcular el tiempo de estacionamiento se consideran:

- El tiempo técnico de apertura y cierre de las puertas del tren y del andén;
- El tiempo necesario para que los pasajeros bajen y suban.

$$\text{Tiempo de estacionamiento} = \frac{\left(\frac{\text{subidas}}{h} + \frac{\text{bajadas}}{h}\right) \times \text{intervalo}/3600}{n^{\circ} \text{ de puertas} \times \text{flujo de personas por puerta}} + \text{tiempo de puertas}$$

**Ecuación 3. Fórmula para el cálculo del tiempo de estacionamiento**

Para obtener el tiempo necesario para que los pasajeros bajen y suban se consideró:

- Un total de 24 puertas de cada lado (3 puertas de cada lado en cada uno de los 8 coches);
- Dos filas de pasajeros por puerta;
- Un flujo de pasajeros por fila de 0,67 pasajeros/s.

El llamado tiempo de puertas es la suma de:

- Tiempo técnico entre la parada del tren y la apertura completa de las puertas de andén y puertas de tren;
- Tiempo técnico entre el inicio del cierre de las puertas de andén y puertas de tren y la salida del tren.

Se adopta un tiempo de puertas de 5 segundos.

Los tiempos de estacionamiento se calculan para la hora pico de la mañana.

Se supone que el flujo de pasajeros que suben y bajan se encuentra distribuido uniformemente a lo largo del tren. Además, se redondea los tiempos de estacionamiento a múltiplos de 5 segundos.

Aunque las puertas de andén permiten una mayor regularidad en la línea, estas aumentan ligeramente el tiempo de estacionamiento. Por esta razón se adopta un tiempo de parada mínimo de 20 segundos en hora pico. En el caso de las terminales, se adoptará un tiempo mínimo de 30 segundos en el andén de llegada. De esta manera, el personal de operación podrá verificar que ningún pasajero quede dentro del tren previo a la realización de la maniobra de retorno.

Los tiempos de estacionamiento en cada estación de la PLMB para el escenario 2022 con un intervalo de 180 segundos, son los siguientes:

Estaciones	Tiempo de estacionamiento (s) - Intervalo de 180s					
	Vía 1			Vía 2		
	Pasajeros totales	Tiempo teórico	Tiempo práctico	Pasajeros totales	Tiempo teórico	Tiempo práctico
Portal de las Américas	1 464	7,29	(30)	9 572	19,96	(20)
Villablanca	292	5,46	20	4 487	12,01	20
Palenque	295	5,46	20	3 481	10,44	20
Kennedy	2 201	8,44	20	3 999	11,25	20
Avenida Boyacá	2 653	9,15	20	8 428	18,17	20
Avenida 68	2 568	9,01	20	5 501	13,60	20
Rosario	1 121	6,75	20	1 590	7,48	20
NQS	365	5,57	20	2 090	8,27	20
Santander	818	6,28	20	2 500	8,91	20
Hospitales	889	6,39	20	1 860	7,91	20

Estaciones	Tiempo de estacionamiento (s) - Intervalo de 180s					
	Vía 1			Vía 2		
	Pasajeros totales	Tiempo teórico	Tiempo práctico	Pasajeros totales	Tiempo teórico	Tiempo práctico
Calle 10 - 11	1 192	6,86	20	3 504	10,48	20
Calle 26	1 212	6,89	20	4 451	11,95	20
Calle 45	1 861	7,91	20	5 355	13,37	20
Calle 63	471	5,74	20	6 662	15,41	20
Calle 72	3 825	10,98	(20)	9 801	20,31	(30)
<b>TOTAL (sin terminal)</b>			<b>260</b>			<b>260</b>

**Tabla 15. Tiempos de estacionamiento durante la hora pico de la mañana en 2022**

### 3.2.1.5 Cálculo del intervalo mínimo práctico en línea

El cálculo de este intervalo se realiza mediante el programa RailSys. Para ello, se utilizan circulaciones tipo (con márgenes de regularidad), pues se quiere determinar el valor de este intervalo en situación nominal.

Mediante la simulación de la señalización CBTC, se ha podido comprobar el tiempo mínimo de salida entre dos trenes sucesivos sin que se produzca interferencia entre ellos. Para las simulaciones con bloque móvil, se adoptó una distancia de seguridad detrás del tren de 20 metros y 10 segundos adicionales para tener en cuenta los tiempos técnicos del sistema (cálculo de la posición, cálculo de la curva de frenado correspondiente...) y los tiempos necesarios en la vía (movimiento de aparatos de vía).

Los resultados de las simulaciones con RailSys, indican un intervalo mínimo práctico en línea de 85 segundos (75s + 10s margen). Los gráficos de estas simulaciones se encuentran en el apéndice 4.5.

Luego, el intervalo mínimo práctico en línea es:

Año 2022	
Intervalo mínimo práctico en línea	<b>85 s</b>

**Tabla 16. Intervalo mínimo práctico en línea en 2022**

### 3.2.1.6 Cálculo del intervalo mínimo de retorno en las estaciones terminales

El intervalo mínimo de retorno en la estación terminal es el tiempo mínimo entre dos trenes consecutivos que permite realizar el retorno sin que el primer tren perturbe el desplazamiento del segundo. Su obtención permite determinar cuál es el intervalo mínimo que permite realizar la terminal analizada.

Se consideran las siguientes hipótesis:

- 10 segundos para realizar el cambio de dirección;
- Aparatos de vía de 1/9 tg ubicados a 15 metros del inicio o fin del andén;
- Una velocidad de 40 km/h en toda la zona de maniobras detrás del andén de llegada;
- Tiempo técnico de 10 segundos cuando incluya movimiento del ADV y 7 segundos para desbloqueo del itinerario.

Para el cálculo de los tiempos de recorrido en la terminal es necesario definir en primer lugar una serie de puntos de operación. Estos puntos representan el lugar geográfico a partir del cual un tren

libera una posición para que el siguiente pueda ocuparla o la ubicación donde deberá detenerse el tren si el precedente no ha abandonado aún el andén o la posición de retorno. Se presentan a continuación los puntos de operación utilizados:

Punto de operación	Definición
<b>P. Parada A</b>	Punto donde debería detenerse el tren 2 si el tren 1 no ha liberado completamente el andén de llegada.
<b>P. Liberación B</b>	Punto para el cual se considera que el tren 1 ha liberado el andén de llegada.
<b>P. Parada C</b>	Punto donde debería detenerse el tren 2 si el tren 1 no ha liberado la posición de retorno o el ADV.
<b>P. Liberación D</b>	Punto para el cual se considera que el tren 1 ha liberado la posición de retorno o el ADV.
<b>P. Parada E</b>	Punto donde debería detenerse el tren 2 si el tren 1 no ha liberado completamente el andén de salida.
<b>P. Liberación F</b>	Punto para el cual se considera que el tren 1 ha liberado el andén de salida.

**Tabla 17. Puntos de operación**

Se considera que el tren libera una determinada posición una vez que la totalidad del tren ha liberado el punto en cuestión. Por esta razón, la longitud del tren posee un impacto sobre los tiempos de recorrido. Finalmente, a cada punto de parada definido en la anterior tabla le corresponde un punto de perturbación. Este último representa el punto para el cual el tren 2 debería comenzar a frenar si el tren 1 se encuentra ocupando aún la posición correspondiente.

Una vez definidos los puntos de operación, se calculan los siguientes tiempos de recorrido utilizando las simulaciones RailSys:

Tiempos de recorrido	Definición
<b>T1</b>	Tiempo de recorrido entre el punto de perturbación de A y el punto de parada del andén de llegada.
<b>T2/1</b>	Tiempo de recorrido entre el punto de parada del andén de llegada y el punto de liberación B.
<b>T2/2</b>	Tiempo de recorrido entre el punto de perturbación de C y el punto de parada de la posición de retorno.
<b>T2</b>	Tiempo de recorrido entre el punto de parada del andén 1 y el punto de parada de la posición de retorno.
<b>T3/1</b>	Tiempo de recorrido entre el punto de parada de la posición de retorno y el punto de liberación D.
<b>T3/2</b>	Tiempo de recorrido entre el punto de perturbación de E y el punto de parada del andén de salida.
<b>T3</b>	Tiempo de recorrido entre el punto de parada de la posición de retorno y en el punto de parada del andén de salida.
<b>T4</b>	Tiempo de recorrido entre el punto de parada del andén de salida y el punto de liberación F.

**Tabla 18. Tiempos de recorrido para una terminal**

Con los tiempos de recorrido, los tiempos de estacionamiento en los andenes y en la posición de retorno (ST) y los tiempos técnicos (tt), se procede a calcular el intervalo mínimo de la terminal.

Como se definió anteriormente, este intervalo corresponde al tiempo mínimo necesario para liberar cada una de las posiciones (andén de llegada, posición de retorno y andén de salida) y permitir el acceso del siguiente tren sin que se produzcan perturbaciones entre ellos. Asimismo, para evitar la degradación sistemática de la línea, se considerará un margen mínimo para cada uno de los movimientos que realiza un tren en la terminal. Para la configuración analizada, se definen los siguientes márgenes:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 = I - (T_1 + ST_1 + T_{2/1} + tt_1) \\ M_2 = I - (T_{2/2} + ST_2 + T_{3/1} + tt_2) \\ M_3 = I - (T_{3/2} + ST_3 + T_4 + tt_3) \end{array} \right\}$$

**Ecuación 4. Cálculo de los márgenes de las terminales estudiadas**

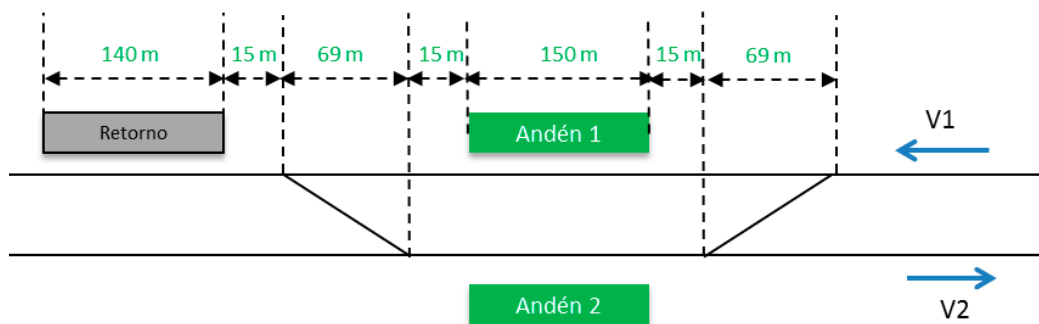
Los márgenes deberán cumplir con las siguientes condiciones:

- Positivos, de lo contrario, el tren siguiente tendrá que detenerse;
- Superior a 20 segundos para lograr un intervalo estable en el terminal.

### 3.2.1.6.1 Estación Portal de las Américas

El funcionamiento de la terminal Portal de las Américas es el siguiente: todos los trenes llegan al andén 1 donde se paran 30 segundos para permitir el descenso de los pasajeros. Luego, se dirigen a la vía de maniobra donde estacionan 10 segundos para realizar el cambio de dirección. Por último, parten al andén de salida por la vía 2, estacionan 20 segundos para permitir el ascenso de los pasajeros y finalmente partir hacia la próxima estación.

Se presenta a continuación las longitudes y distancias de los principales elementos de la terminal definidas en la planimetría [R2] [R3]:



**Ilustración 10. Retorno en la estación Portal de las Américas**

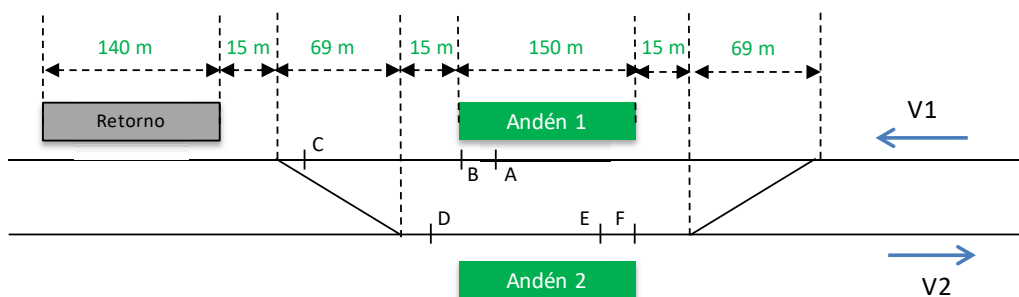
En operación nominal, los trenes realizan la maniobra de retorno detrás de la estación Portal de las Américas. La configuración de la terminal permite también realizar la maniobra cero, es decir, con retorno delante de la estación por la vía 2. Esta maniobra permite recuperar un eventual retraso.

A continuación, se presenta el estudio realizado para el cálculo del intervalo mínimo de retorno para la terminal Portal de las Américas. Este incluye:

- Intervalo;
- Tiempos de recorrido calculados con RailSys en función de los puntos de operación definidos anteriormente;
- Tiempos de estacionamiento en los andenes y en la posición de retorno;
- Tiempos técnicos;
- Márgenes;
- Tiempo de retorno en terminal.



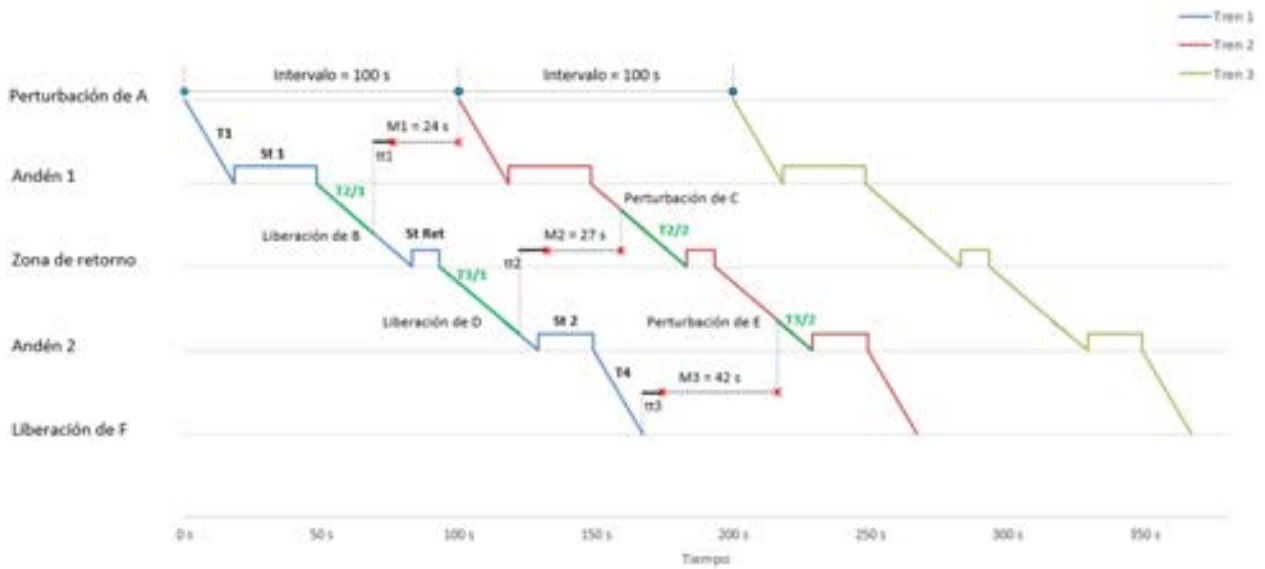
## Portal de las Américas



Intervalo = 100 s

Tiempo de recorrido		
Perturbación de A --> Andén 1	<b>T1 =</b>	<b>18 s</b>
Andén 1 --> Liberación de B	<b>T1/2 =</b>	<b>21 s</b>
Perturbación de C --> Zona de retorno	<b>T2/2 =</b>	<b>24 s</b>
Andén 1 --> Zona de retorno	<b>T2 =</b>	<b>35 s</b>
Zona de retorno --> Liberación de D	<b>T3/1 =</b>	<b>29 s</b>
Perturbación de E --> Andén 2	<b>T3/2 =</b>	<b>13 s</b>
Zona de retorno --> Andén 2	<b>T3 =</b>	<b>36 s</b>
Andén 2 --> Liberación de F	<b>T4 =</b>	<b>18 s</b>
Tiempos de parada		
Est Andén 1	<b>St1 =</b>	<b>30 s</b>
Est Zona de retorno	<b>St Ret =</b>	<b>10 s</b>
Est Andén 2	<b>St2 =</b>	<b>20 s</b>
Tiempo técnico		
Perturbación de A y B	<b>tt1 =</b>	<b>07 s</b>
Cambio del ADV	<b>tt2 =</b>	<b>10 s</b>
Liberación de E y D	<b>tt3 =</b>	<b>07 s</b>
Márgenes		
Margen 1 =	<b>M1 =</b>	<b>24 s</b>
Margen 2 =	<b>M2 =</b>	<b>27 s</b>
Margen 3 =	<b>M3 =</b>	<b>42 s</b>

Tiempo de retorno en la terminal = 131 s

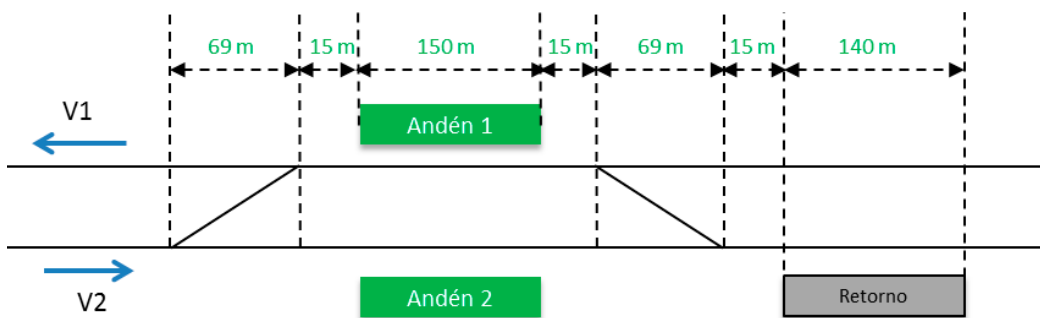


**Ilustración 11. Estudio del intervalo de retorno para la terminal Portal de las Américas**

### 3.2.1.6.2 Estación Calle 72

El funcionamiento de la terminal Calle 72 es el siguiente: todos los trenes llegan al andén 2 donde se paran 30 segundos para permitir el descenso de los pasajeros. Luego, se dirigen a la vía de maniobra donde estacionan 10 segundos para realizar el cambio de dirección. Por último, parten al andén de salida por la vía 1, estacionan 20 segundos para permitir el ascenso de los pasajeros y finalmente partir hacia la próxima estación.

Se presenta a continuación las longitudes y distancias de los principales elementos de la terminal definidas en la planimetría [R2] [R3]:



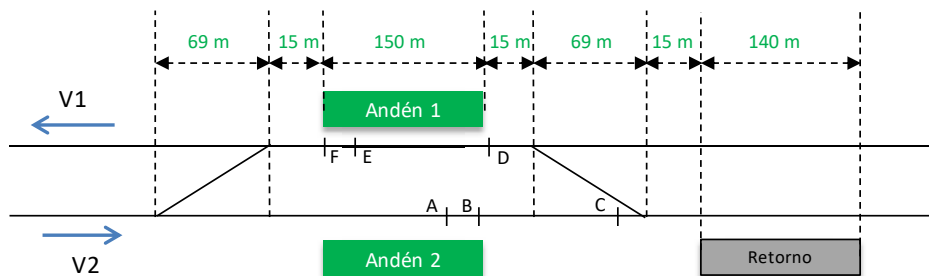
**Ilustración 12. Retorno en la estación Calle 72**

En operación nominal, los trenes realizan la maniobra de retorno detrás de la estación Calle 72. La configuración de la terminal permite también la maniobra cero, es decir, con retorno delante de la estación por la vía 1. Esta maniobra permite recuperar un eventual retraso.

A continuación, se presenta el estudio realizado para el cálculo del intervalo mínimo de retorno para la terminal Calle 72. Este incluye:

- Intervalo;
- Tiempos de recorrido calculados con RailSys en función de los puntos de operación definidos anteriormente;
- Tiempos de estacionamiento en los andenes y en la posición de retorno;
- Tiempos técnicos;
- Márgenes;
- Tiempo de retorno en terminal.

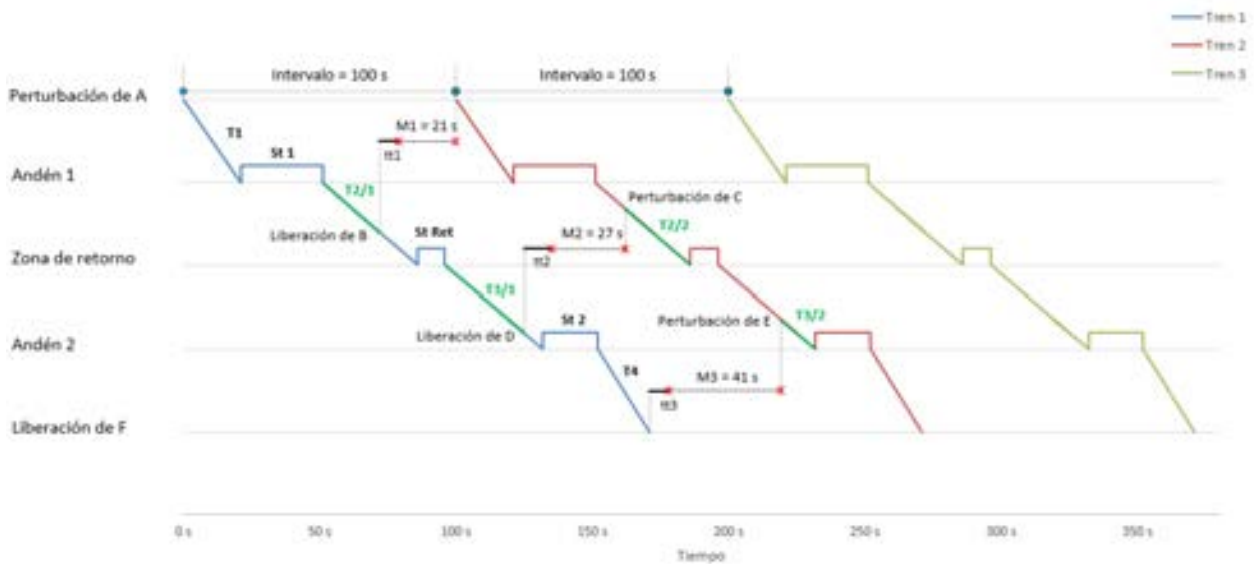
## Calle 72



Intervalo = 100 s

Tiempo de recorrido		
Perturbación de A --> Andén 1	T1 =	21 s
Andén 1 --> Liberación de B	T1/2 =	21 s
Perturbación de C --> Zona de retorno	T2/2 =	24 s
Andén 1 --> Zona de retorno	T2 =	35 s
Zona de retorno --> Liberación de D	T3/1 =	29 s
Perturbación de E --> Andén 2	T3/2 =	13 s
Zona de retorno --> Andén 2	T3 =	36 s
Andén 2 --> Liberación de F	T4 =	19 s
Tiempos de parada		
Est Andén 1	St1 =	30 s
Est Zona de retorno	St Ret =	10 s
Est Andén 2	St2 =	20 s
Tiempo técnico		
Perturbación de A y B	tt1 =	07 s
Cambio del ADV	tt2 =	10 s
Liberación de E y D	tt3 =	07 s
Márgenes		
Margen 1 =	M1 =	21 s
Margen 2 =	M2 =	27 s
Margen 3 =	M3 =	41 s

Tiempo de retorno en la terminal = 131 s



**Ilustración 13. Estudio del intervalo de retorno para la terminal Calle 72**

El resumen de los tiempos de retorno para cada una de las terminales se presenta en la siguiente tabla:

Estaciones terminales	Tiempos de retorno (en s)
Portal de las Américas	131
Calle 72	131

**Tabla 19. Resumen de los tiempos de retorno en las estaciones Portal de las Américas y Calle 72 en 2022**

### 3.2.1.7 Intervalo mínimo operacional

El intervalo mínimo operacional corresponde al mayor intervalo entre el intervalo mínimo práctico en línea y al intervalo mínimo de retorno. Además, el intervalo mínimo operacional debe incluir un margen. De no ser así, el menor incidente provocaría retrasos impactando la totalidad de la línea.

En este caso, **el intervalo mínimo operacional se encuentra definido por el intervalo de retorno en terminal y corresponde a 100 segundos.**

Intervalo mínimo	Tiempo (segundos)
En línea	85
Retorno en Portal de las Américas	100
Retorno en Calle 72	100
Intervalo de servicio en 2022	180

**Tabla 20. Resumen intervalos mínimos**

Como se observa en la tabla, el sistema de transporte es capaz de responder a la demanda. En la puesta en servicio de la etapa 1 de Portal de las Américas a Calle 72, el intervalo entre trenes en horas de pico, como se definió anteriormente, será de 180 segundos.

### 3.2.1.8 Velocidad comercial y tiempo de vuelta redonda

El tiempo de vuelta redonda es la suma de:

- Los tiempos de recorrido entre cada estación, incluyendo el margen de regularidad;
- Los tiempos de estacionamiento;
- Los tiempos de retorno en las estaciones terminales.

El tiempo de recorrido entre las estaciones es el resultado de las simulaciones en RailSys. Esta simulación tiene en cuenta las características del material rodante y del trazado (perfil y curvas) de la línea.

Se añade un margen de regularidad de 5s/km al tiempo de recorrido inicial con el fin de calcular el tiempo de recorrido nominal. Esta reserva de tiempo representa la flexibilidad de la operación, permitiendo al sistema garantizar cierta regularidad.

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones RailSys para la Primera Línea del Metro de Bogotá para el horizonte 2022 y para cada una de las vías. Los perfiles de velocidades de la PLMB respecto de la distancia están en el apéndice **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

#### 3.2.1.8.1 *Vía 1: Desde Calle 72 hasta Portal de las Américas*

Estación	Desde Calle 72 hasta Portal de las Américas					
	Punto de parada (m)	Tiempo de estacionamiento (s)	Longitud del inter-estación (m)	Tiempo de recorrido sin reserva (s)	Reserva (s)	Tiempo de recorrido con reserva (s)
Calle 72	19 798					
Calle 63	18 470	20	1 328	90	7	97
Calle 45	16 452	20	2 018	116	10	126
Calle 26	14 416	20	2 036	117	10	127
Calle 10 - 11	12 836	20	1 580	96	8	104
Hospitales	11 745	20	1 091	74	6	80
Santander	10 538	20	1 207	84	6	90
NQS	8 872	20	1 666	106	8	114
Rosario	7 467	20	1 405	91	7	98
Avenida 68	6 322	20	1 145	76	6	82

Estación	Desde Calle 72 hasta Portal de las Américas					
	Punto de parada (m)	Tiempo de estacionamiento (s)	Longitud del inter-estación (m)	Tiempo de recorrido sin reserva (s)	Reserva (s)	Tiempo de recorrido con reserva (s)
Avenida Boyaca			1 628	99	8	107
	4 694	20				
Kennedy			1 297	84	7	91
	3 397	20				
Palenque			949	67	5	72
	2 448	20				
Villablanca			1 084	81	6	87
	1 364	20				
Portal de las Américas			1 108	84	6	90
	256					
<b>TOTAL</b>		<b>04min20s</b>				<b>1365s = 22min45s</b>

Tabla 21. Tiempo de recorrido en el sentido 1 para el año 2022

### 3.2.1.8.2 Vía 2: Desde Portal de las Américas hasta Calle 72

Estación	Desde Portal de las Américas hasta Calle 72					
	Punto de parada (m)	Tiempo de estacionamiento (s)	Longitud del inter-estación (m)	Tiempo de recorrido sin reserva (s)	Reserva (s)	Tiempo de recorrido con reserva (s)
Portal de las Américas	406					
Villablanca			1108	84	6	90
	1 514	20				
Palenque			1084	81	6	87
	2 598	20				
Kennedy			949	67	5	72
	3 547	20				
Avenida Boyacá			1259	84	7	91
	4 844	20				
Avenida 68			1666	100	8	108
	6 472	20				
Rosario			1145	76	6	82
	7 617	20				
NQS			1405	92	7	99
	9 022	20				
			1666	107	8	115

Estación	Desde Portal de las Américas hasta Calle 72					
	Punto de parada (m)	Tiempo de estacionamiento (s)	Longitud del inter-estación (m)	Tiempo de recorrido sin reserva (s)	Reserva (s)	Tiempo de recorrido con reserva (s)
Santander	10 688	20				
Hospitales			1207	85	6	91
	11 895	20				
Calle 10 - 11			1091	76	6	82
	12 986	20				
Calle 26			1580	97	8	105
	14 566	20				
Calle 45			2036	116	10	126
	16 602	20				
Calle 63			2018	115	10	125
	18 620	20				
Calle 72			1115	89	7	96
	19 948					
<b>TOTAL</b>		<b>04min20s</b>				<b>1369s = 22min49s</b>

Tabla 22. Tiempo de recorrido en el sentido 2 para el año 2022

De esta forma, el tiempo de recorrido entre cabeceras para la vía 1 y la vía 2 resulta:

	Vía 1 I=180s	Vía 2 I=180s
Tiempo de inter-estación entre terminales	22min45s	22min49s
Tiempo de estacionamiento entre terminales	04min20s	04min20s
Tiempo de recorrido entre terminales	<b>27min05s</b>	<b>27min09s</b>

Tabla 23. Resumen del tiempo de recorrido para cada sentido para el año 2022

Con estos valores, se determina la velocidad comercial por sentido y por misión. La velocidad comercial es la relación entre la distancia entre terminales y el tiempo de recorrido de una terminal a la otra, incluyendo la reserva y los tiempos de estacionamiento.

Misión		Vía 1 I=180s	Vía 2 I=180s
Portal de las Américas – Calle 72	Distancia entre terminales (m)	19 692	
	Tiempo entre terminales	27min05s	27min09s
	Velocidad Comercial (km/h)	43.63	43.52

Tabla 24. Desempeño de la PLMB para el año 2022



Finalmente, se obtiene el tiempo de vuelta redonda como se muestra en la siguiente tabla:

Misión		I = 180s
Portal de las Américas – Calle 72	Tiempo de retorno en Portal de las Américas	02min11s
	Tiempo total entre cabeceras, vía 1	27min05s
	Tiempo de retorno en Calle 72	02min11s
	Tiempo total entre cabeceras, vía 2	27min09s
	<b>Tiempo de Vuelta Redonda (TVR)</b>	<b>58min36s</b>

Tabla 25. TVR de PLMB para el año 2022

### 3.2.1.9 Cálculo del número de trenes requeridos

La cantidad de trenes en circulación se obtiene de la relación entre el tiempo de vuelta redonda (TVR) y el intervalo. Finalmente, para la cantidad de trenes de mantenimiento se adopta un 10% de los trenes en circulación y un tren de reserva por ramal.

Intervalo	180s
Tiempo de Vuelta Redonda	58min36s
Trenes en operación	20
Trenes en mantenimiento	2
Trenes de reserva	1
<b>Trenes totales</b>	<b>23</b>

Tabla 26. Dimensionamiento de la flota para el año 2022

El tiempo extra en terminales es el tiempo excedente de cada misión debido al redondeo necesario en el dimensionamiento de la flota. Se calcula como:

$$T_{\text{extra}} = (N \cdot I) - T$$

Ecuación 5. Tiempo de vuelta en terminales

Con  $N$ : trenes en operación,  $I$ : intervalo operacional,  $T$ : TVR

Este tiempo se distribuye entre las terminales, como tiempo de sobrestacionamiento. No es necesario que la repartición sea igual en las dos terminales.

$$T_{\text{extra}} = 20 \cdot 180s - 58\text{min}36s = 84s$$

Este tiempo será distribuido entre las terminales Portal de las Américas y Calle 72.

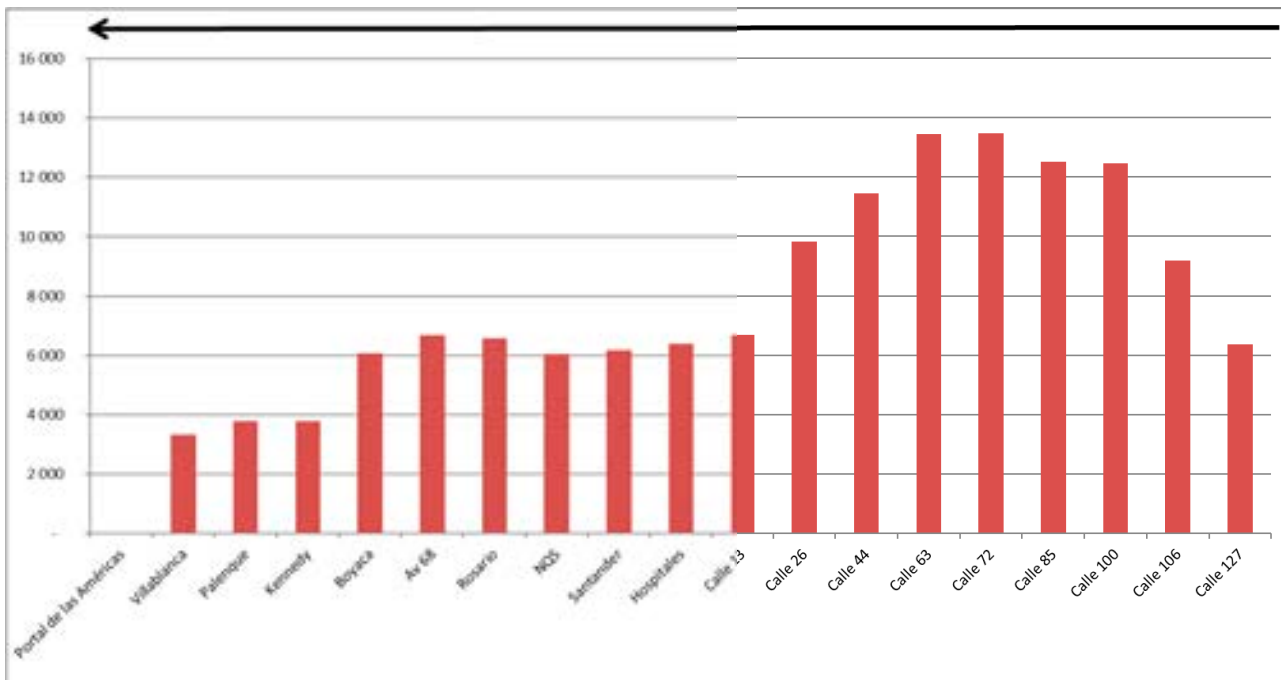
## 3.2.2 Etapa 2 – 2030

En este escenario, la PLMB operará entre las estaciones Portal de las Américas y Calle 127. Todos los trenes realizan una única misión, deteniéndose en cada estación.

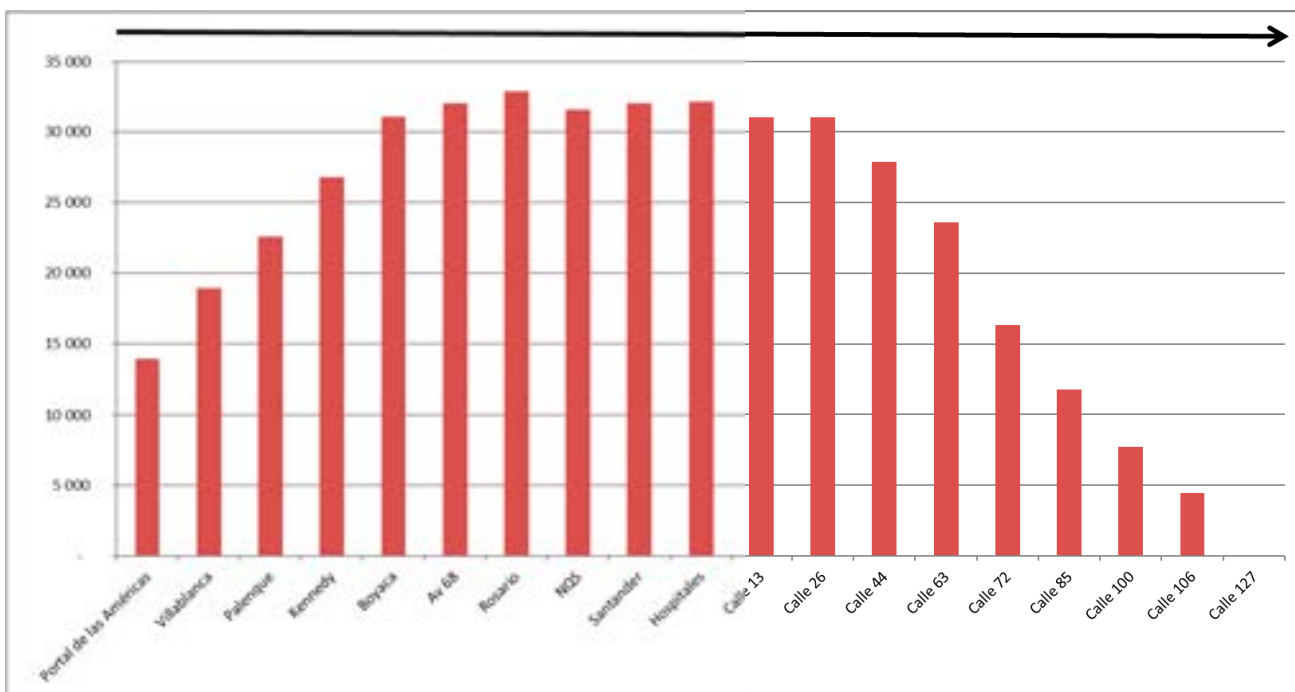
### 3.2.2.1 Flujo de pasajeros

El flujo de pasajeros por estación de la PLMB en 2030 se presenta en el apéndice 4.2.2.

Los diagramas siguientes muestran la ocupación de los trenes en la PLMB durante la hora pico de la mañana para cada sentido:



**Ilustración 14.** Número de usuarios de la PLMB durante la hora pico de la mañana en el sentido 1 para el año 2030



**Ilustración 15.** Número de usuarios de la PLMB durante la hora pico de la mañana en el sentido 2 para el año 2030

El tramo más cargado de la línea se observa entre las estaciones Rosario y NQS, en la vía 2 en la hora punta de la mañana.

Año 2030	
Tráfico máximo: ROSARIO – NQS	32 868 pasajeros/hora-sentido

Tabla 27. PPHPD de la PLMB en la hora pico para el año 2030

### 3.2.2.2 Cálculo del intervalo mínimo para satisfacer la demanda

Considerando la capacidad máxima del tren (C) y el valor del PPHPD previsto (PPHPD) que se debe satisfacer, se deduce el número de trenes necesarios por hora (N) para adecuar la demanda y, por lo tanto, el intervalo mínimo necesario para el año 2030.

$$I = \frac{3600 * C}{PPHPD} ; N = \frac{PPHPD}{C}$$

Ecuación 6. Fórmulas del intervalo mínimo para satisfacer la demanda y del número de trenes asociado

Escenario 2030	
Intervalo mínimo necesario para satisfacer la demanda	190 s
Número mínimo de trenes circulando por hora	19

Tabla 28. Desempeño requerido de la PLMB en horas pico, en etapa 2, 2030

Un intervalo de 190 segundos (3min10s) permite satisfacer la demanda para el año 2030, pero **se propone mantener el intervalo de 180 segundos** como indicado para la etapa 1.

### 3.2.2.3 Cálculo del número de trenes requeridos

Por lo general, la cantidad de trenes en circulación se obtiene de la relación entre el tiempo de vuelta redonda (TVR) y el intervalo. Sin embargo, al no contar con el trazado correspondiente, no es posible calcular los tiempos de recorrido y, por lo tanto, el tiempo de vuelta redonda. En este contexto, se decidió estimar el parque de trenes adoptando la velocidad comercial obtenida para la etapa 1 del proyecto.

Para ello, se obtuvo en primer lugar la longitud de la línea entre ambas terminales, es decir, sin tener en cuenta la zona de maniobras detrás de estas. Esta se calculó como la suma entre la longitud entre terminales para el año 2022 (19,69 km) y el tramo entre Calle 72 y Calle 127 (5,4 km). De esta manera se obtiene:

Longitud (km)	
Portal de las Américas – Calle 127	25,09

Tabla 29. Longitud aproximada para la etapa 2, 2030

Con la velocidad comercial calculada para el año 2022 y la longitud que figura en la tabla se calcula el tiempo entre terminales para uno de los dos sentidos de circulación.

$$Tiempo\ entre\ terminales = \frac{Longitud}{Velocidad\ comercial} = 00:34:36$$

**Ecuación 7. Estimación del tiempo entre terminales**

En lo que respecta al tiempo de retorno en terminales, se realizaron las siguientes hipótesis:

- **Portal de las Américas:** se consideró un tiempo igual al calculado para el escenario 2022 y se tuvo en cuenta el incremento de 10 segundos en el tiempo de parada en el andén de salida. De esta manera, se obtiene un tiempo de retorno de 2min10s;
- **Calle 127:** al no contar con ninguna información acerca del trazado y de la ubicación de los aparatos de vía detrás de la estación, se decidió adoptar un tiempo de retorno estándar de 3 minutos.

Con esta información, se estima el TVR para el año 2030 como se muestra a continuación:

$$TVR_{2030} = 2 \times Tiempo\ entre\ terminales + Tiempo\ de\ retorno\ en\ terminales$$

**Ecuación 8. Estimación del tiempo de vuelta redonda**

De esta manera se obtiene:

	TVR
Portal de las Américas – Calle 127	01:14:21

**Tabla 30. TVR aproximado para la etapa 2, 2030**

Cabe señalar que, a pesar de mantenerse el mismo intervalo que en 2022, no se verifican modificaciones significativas en los tiempos de parada. En efecto, mientras que las estaciones Portal de las Américas y Boyacá aumentan ligeramente su tiempo de estacionamiento (10 y 5 segundos respectivamente), la anterior terminal Calle 72 lo disminuye en 10 segundos, observándose un aumento neto de 5 segundos respecto la primera etapa del proyecto.

Tiempo de estacionamiento (s) - Intervalo de 180s				
Vía 2				
Estaciones	Pasajeros totales	Tiempo teórico	Tiempo práctico	Diferencia 2030- 2022
Portal de las Américas	13 920	26,75	(30)	<b>10</b>
Villablanca	18 923	13,02	20	0
Palenque	22 586	10,75	20	0
Kennedy	26 797	12,07	20	0
Avenida Boyacá	31 095	21,69	25	<b>5</b>
Avenida 68	32 053	13,46	20	0
Rosario	32 868	8,28	20	0
NQS	31 583	9,69	20	0
Santander	32 068	8,83	20	0
Hospitales	32 140	9,61	20	0
Calle 10 - 11	31 019	14,90	20	0
Calle 26	31 043	15,25	20	0
Calle 45	27 851	15,26	20	0
Calle 63	23 618	16,25	20	0
Calle 72	16 312	18,40	20	<b>-10</b>
Calle 85	11 774	12,21	20	-
Calle 100	7 705	11,94	20	-
Calle 106	4 425	10,16	20	-
Calle 127	-	11,91	(30)	-
<b>TOTAL (sin terminal)</b>			<b>405</b>	

Tabla 31. Comparación de los tiempos de estacionamiento entre 2022 y 2030 durante la hora pico de la mañana en la vía 2

Finalmente, considerando un intervalo de 180 segundos, se calcula el número de trenes necesarios para operar la línea en 2030:

$$\text{Trenes en operación} = \frac{TVR_{2030}}{\text{Intervalo}}$$

Ecuación 9. Estimación de los trenes en operación

Además, para los trenes de mantenimiento se adopta un 10% de los trenes en circulación y un tren de reserva por ramal. Los resultados se exponen en la siguiente tabla:

<b>Intervalo</b>	180s
<b>Tiempo de Vuelta Redonda</b>	01:14:21
<b>Trenes en operación</b>	25
<b>Trenes en mantenimiento</b>	3
<b>Trenes de reserva</b>	1
<b>Trenes totales</b>	<b>29</b>

**Tabla 32. Dimensionamiento de la flota para el año 2030**

### 3.2.3 Capacidad máxima de la línea

La capacidad máxima de la línea se calcula teniendo en cuenta el menor intervalo permitido por el sistema (100 segundos) y la capacidad del tren. El intervalo utilizado para este cálculo corresponde al mínimo obtenido para el año 2022.

Para la etapa 2 del proyecto, el intervalo mínimo podría llegar a variar en función del trazado de la línea y, principalmente, de la configuración de las futuras terminales.

En la tabla siguiente se presentan los resultados obtenidos para. A modo de ejemplo, se incluye la capacidad máxima de la línea para un intervalo de 90 y 110 segundos.

<b>Capacidad máxima de la línea</b>			
<b>Capacidad del tren</b>	<b>Intervalo 100 s</b>	<b>Intervalo 90 s</b>	<b>Intervalo 110 s</b>
1778 pasajeros	64 008 pasajeros	71 120 pasajeros	58 189 pasajeros

**Tabla 33. Capacidad máxima de la línea para dos intervalos y capacidades de tren distintas**

## 4. APÉNDICES

### 4.1 DISPOSICION DE LAS PUERTAS

El diagrama de puertas utilizado en este estudio contempla 4 puertas por coche, con ancho de puerta de aproximadamente 1.60 metros, con el fin de permitir el pasaje de dos personas simultáneamente. Los coches utilizados poseen una longitud aproximada de 17,5 metros.

Se considera que pueden circular 40 personas por minuto y por fila de puerta, o sea 80 personas por minuto y por puerta. El tiempo técnico de apertura y cierre de puerta es de 5 segundos.

Con esta disposición, **el tiempo máximo de estacionamiento para el año 2022 se produce en la estación terminal Calle 72 y es de 25s** (ver 3.2.1.4).

### 4.2 FLUJO DE PASAJEROS

Se presentan a continuación el flujo de pasajeros para cada uno de los escenarios y para cada sentido.

#### 4.2.1 Etapa 1 – 2022

##### 4.2.1.1 Sentido 1

Nombre de la estación	Suben	Bajan	Sección
Portal de las Américas	-	1 464	-
Villablanca	69	223	1 465
Palenque	132	163	1 619
Kennedy	73	2 128	1 650
Boyaca	971	1 682	3 705
Av 68	1 045	1 523	4 416
Rosario	876	245	4 894
NQS	153	212	4 263
Santander	359	459	4 322
Hospitales	444	445	4 422
Calle 13	290	902	4 423
Calle 26	726	486	5 035
Calle 44	1 180	681	4 795
Calle 63	471	-	4 296
Calle 72	3 825	-	3 825

**Ilustración 16. Número de pasajeros en la hora pico de la mañana y ocupación de los trenes en cada interestación para el sentido 1 (2022, etapa 1)**

#### 4.2.1.2 Sentido 2

Nombre de la estación	Suben	Bajan	Sección
Portal de las Américas	9 572	-	9 572
Villablanca	4 485	2	14 055
Palenque	3 474	7	17 522
Kennedy	3 969	30	21 461
Boyaca	5 865	2 563	24 763
Av 68	2 866	2 635	24 994
Rosario	1 315	275	26 034
NQS	729	1 361	25 402
Santander	1 795	705	26 492
Hospitales	573	1 287	25 778
Calle 13	643	2 861	23 560
Calle 26	998	3 453	21 105
Calle 44	357	4 998	16 464
Calle 63	-	6 662	9 802
Calle 72	-	9 801	-

Ilustración 17. Número de pasajeros en la hora pico de la mañana y ocupación de los trenes en cada interestación para el sentido 2 (2022, etapa 1)

#### 4.2.2 Etapa 2 – 2030

##### 4.2.2.1 Sentido 1

Nombre de la estación	Suben	Bajan	Sección
Portal de las Américas	-	3 332	-
Villablanca	114	568	3 331
Palenque	341	349	3 785
Kennedy	64	2 350	3 793
Boyaca	1 895	2 506	6 079
Av 68	1 560	1 451	6 690
Rosario	811	282	6 581
NQS	227	367	6 052
Santander	686	898	6 192
Hospitales	722	993	6 404
Calle 13	780	3 928	6 675
Calle 26	499	2 133	9 823
Calle 44	680	2 664	11 457
Calle 63	1 271	1 296	13 441
Calle 72	2 042	1 092	13 466
Calle 85	461	418	12 516
Calle 100	3 615	331	12 473
Calle 106	3 153	327	9 189
Calle 127	6 363	-	6 363

Ilustración 18. Número de pasajeros en la hora pico de la mañana y ocupación de los trenes en cada interestación para el sentido 1 (2030, etapa 2)



4.2.2.2 Sentido 2

Nombre de la estación	Suben	Bajan	Sección
Portal de las Américas	13 920	-	13 920
Villablanca	5 069	66	18 923
Palenque	3 673	10	22 586
Kennedy	4 369	158	26 797
Boyaca	7 491	3 193	31 095
Av 68	3 187	2 229	32 053
Rosario	1 456	641	32 868
NQS	858	2 143	31 583
Santander	1 467	982	32 068
Hospitales	1 512	1 440	32 140
Calle 13	2 607	3 728	31 019
Calle 26	3 293	3 269	31 043
Calle 44	1 686	4 878	27 851
Calle 63	1 485	5 718	23 618
Calle 72	635	7 941	16 312
Calle 85	38	4 576	11 774
Calle 100	187	4 256	7 705
Calle 106	12	3 292	4 425
Calle 127	-	4 425	-

Ilustración 19. Número de pasajeros en la hora pico de la mañana y ocupación de los trenes en cada interestación para el sentido 2 (2030, etapa 2)

### 4.3 UBICACIÓN DE LOS INCIDENTES Y CONSECUENCIAS SOBRE LA OPERACIÓN

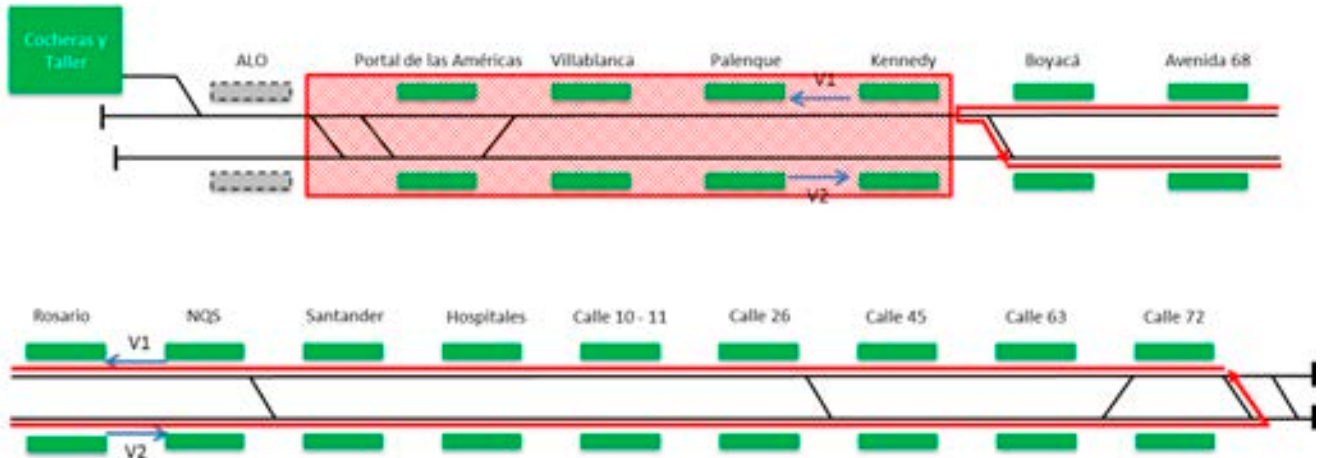
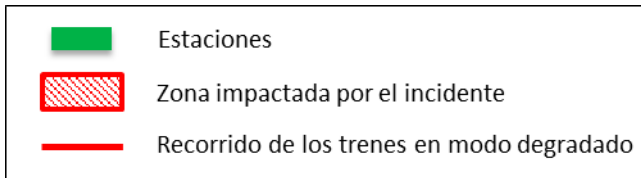


Ilustración 20. Incidente entre Portal de las Américas y Kennedy

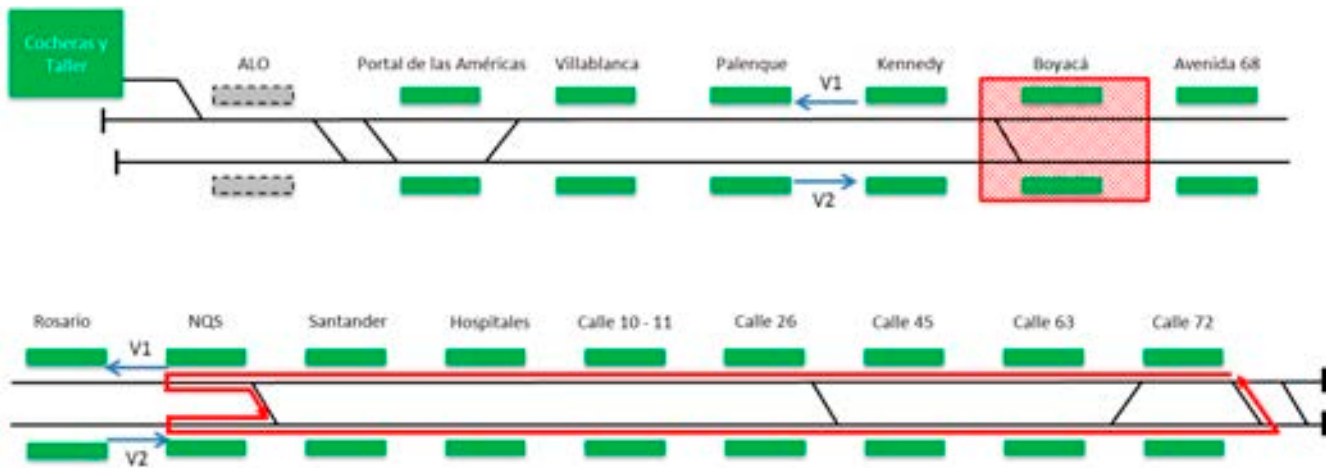


Ilustración 21. Incidente en Boyacá



Ilustración 22. Incidente entre Avenida 68 y Rosario

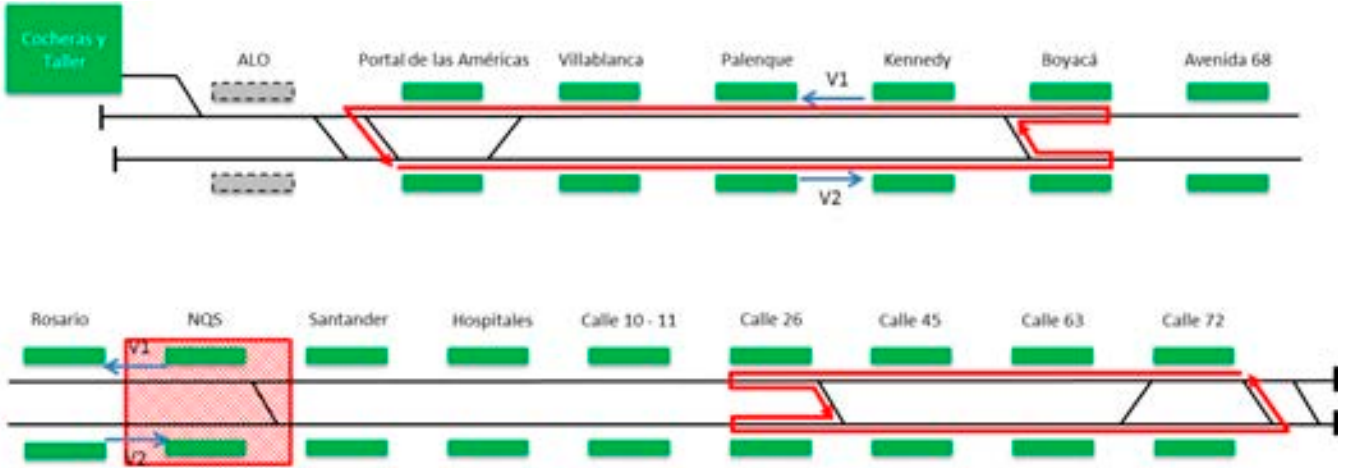


Ilustración 23. Incidente en NQS

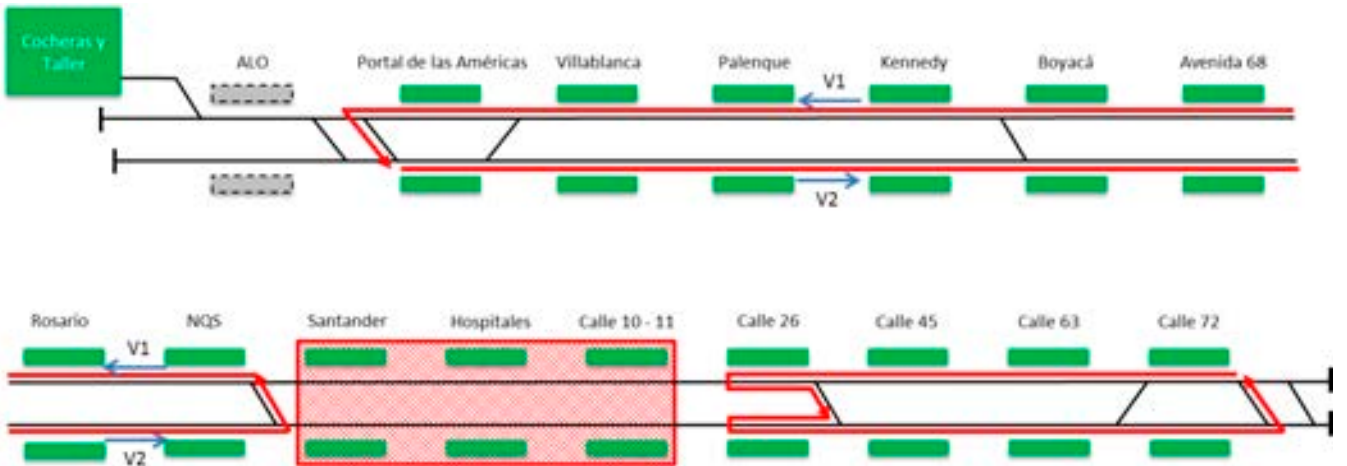


Ilustración 24. Incidente entre Santander y Calle 10 - 11

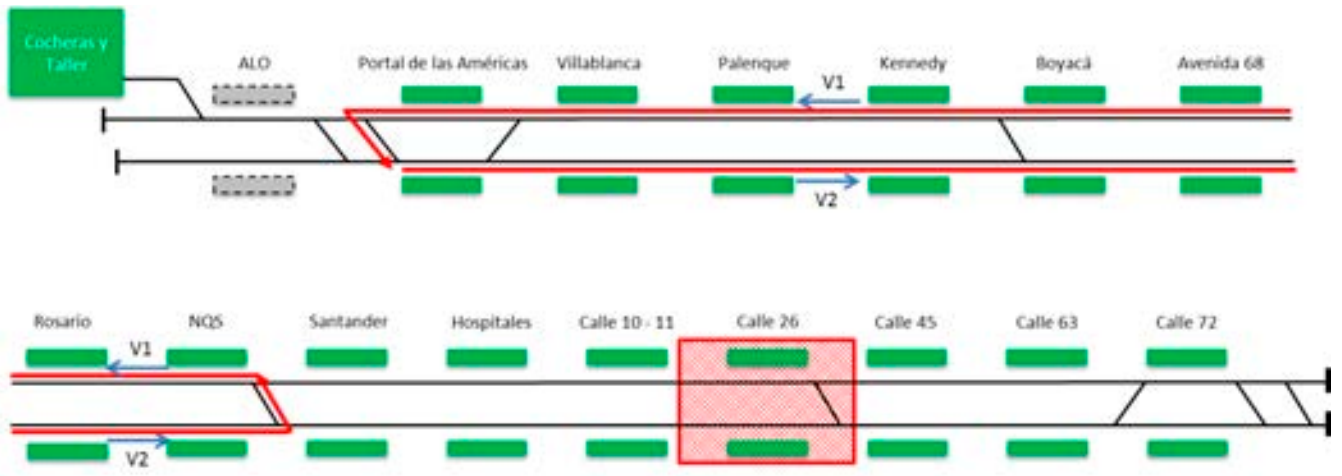


Ilustración 25. Incidente Calle 26



Ilustración 26. Incidente entre Calle 45 y Calle 72

#### 4.4 POSICIÓN DE LOS APARATOS DE VÍAS EN ESTACIONES DE RETORNO

Para realizar la maniobra de retorno detrás de una estación, dos configuraciones son posibles:

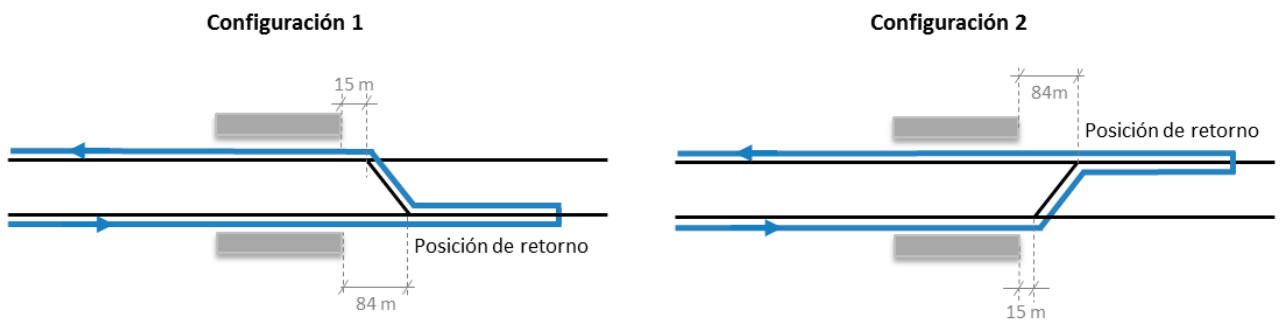


Ilustración 27. Configuraciones de retorno detrás de estación

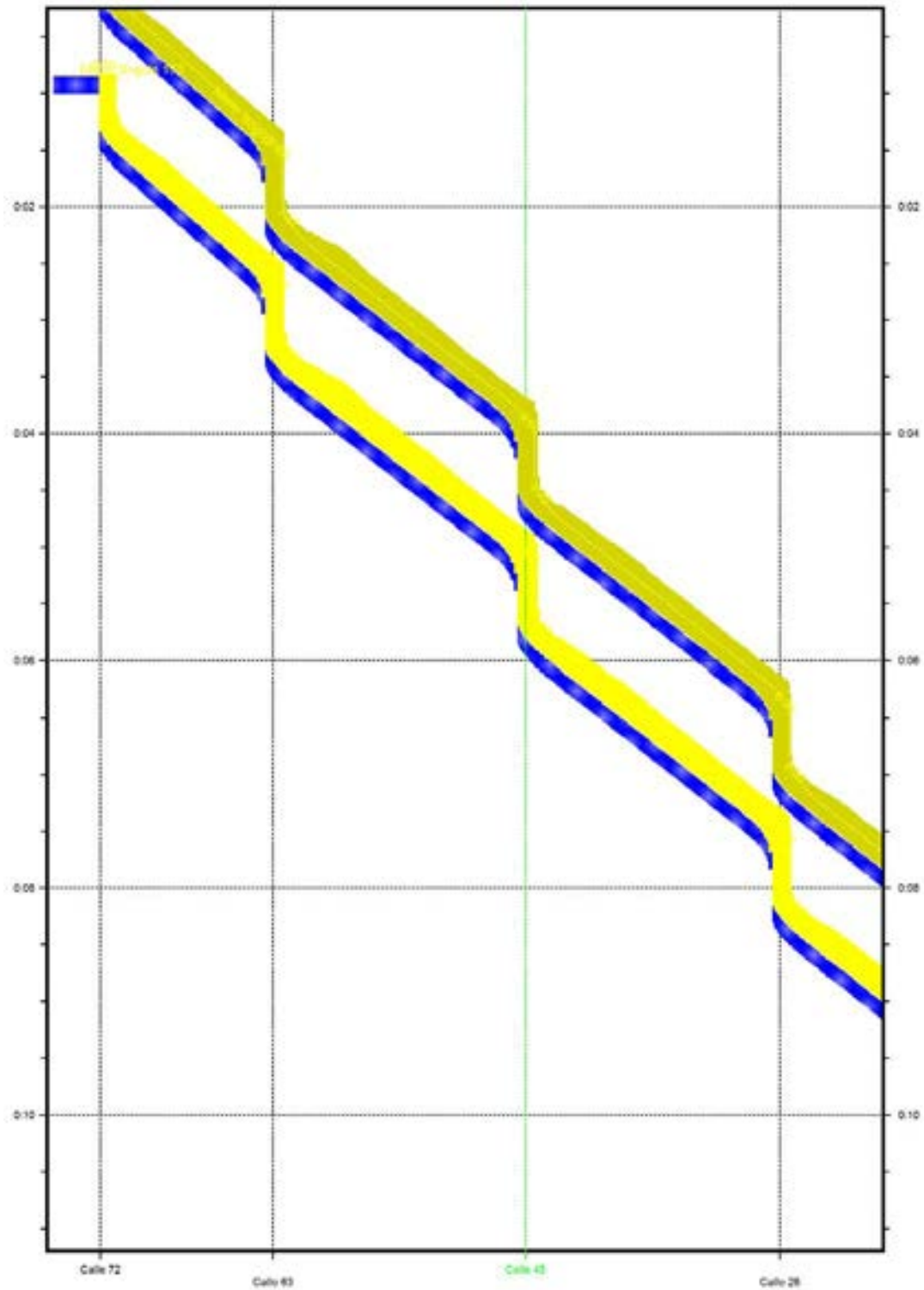
La elección entre una u otra puede verse influenciada por diversas variables, sin embargo, ante un deslizamiento del tren, las consecuencias no serán las mismas. En efecto, si un tren no se detiene en la posición de parada prevista, este seguirá avanzando algunos metros hasta que se accione el freno de emergencia. Dependiendo la configuración elegida, distintos escenarios pueden presentarse:

- Configuración 1 (ADV tomado por el talón):
  - Probablemente el tren nunca alcance el aparato de vía;
  - Si alcanza el aparato de vía, el tren no descarrila porque este es tomado por el talón.
- Configuración 2 (ADV tomado por la punta):
  - Si el aparato de vía está enclavado en posición desviada, existe riesgo de choque con un tren que se dirige des la posición de retorno hacia el andén de salida;
  - Si el aparato de vía no está enclavado, el tren podría descarrilar.

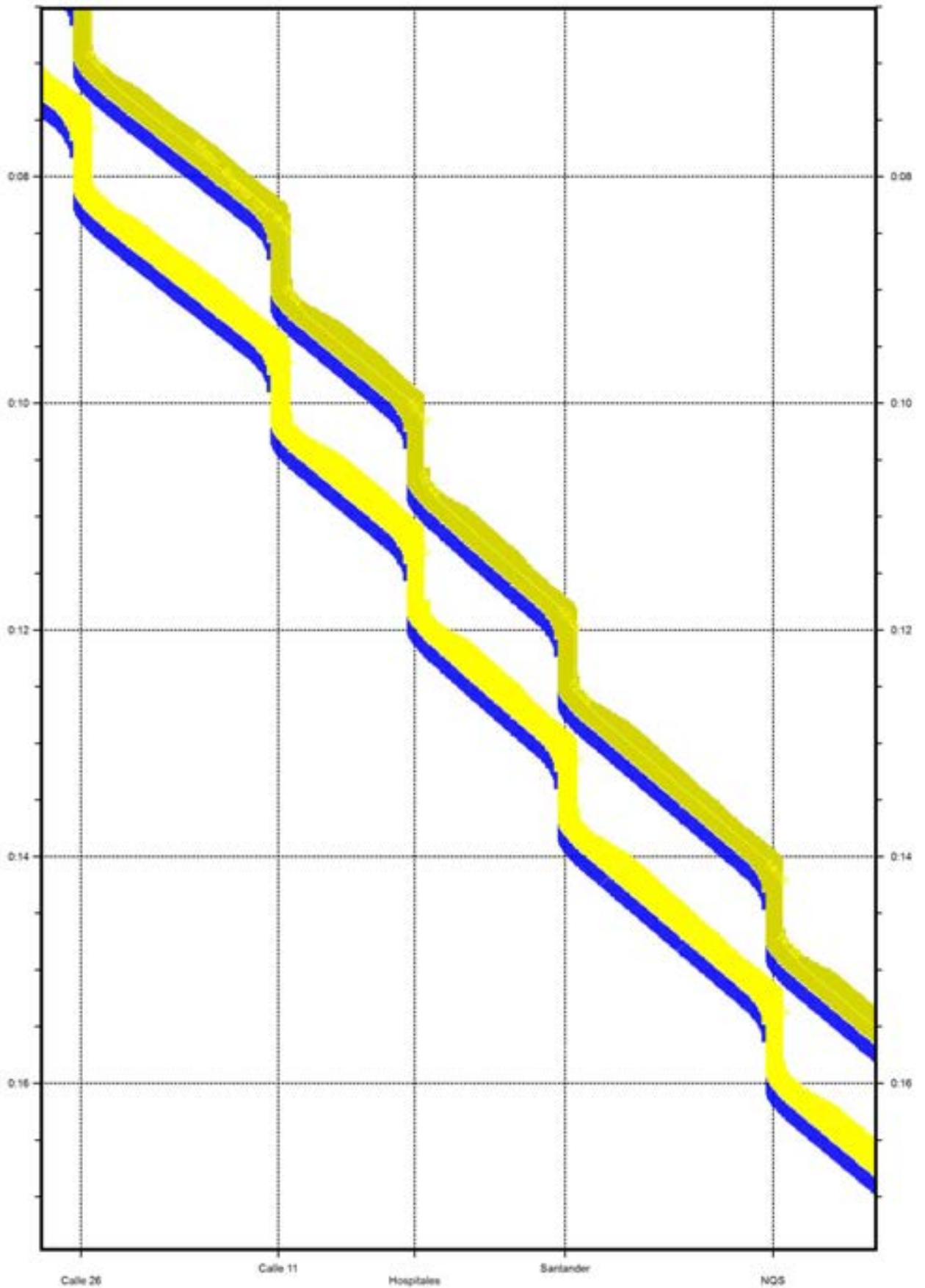
Como se observa, el operador deberá priorizar, siempre que sea posible, la configuración 1 ya que presenta menores riesgos en caso de deslizamiento del tren. En caso contrario, disposiciones particulares deberán adoptarse para evitar los riesgos anteriormente descritos.

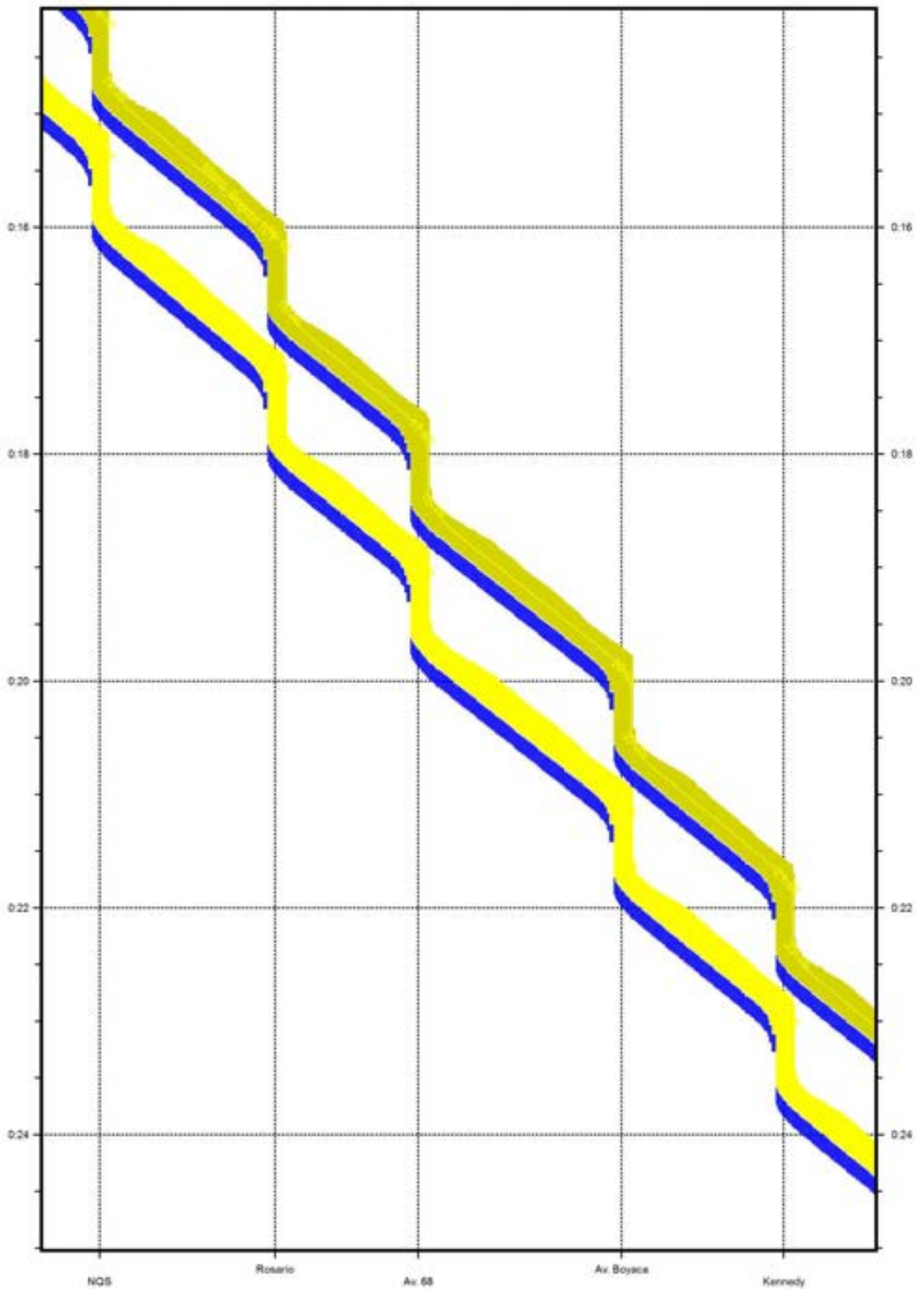
## 4.5 CÁLCULO DEL INTERVALO MÍNIMO DE LÍNEA

### 4.5.1 Sentido 1: Calle 72 – Portal de las Américas

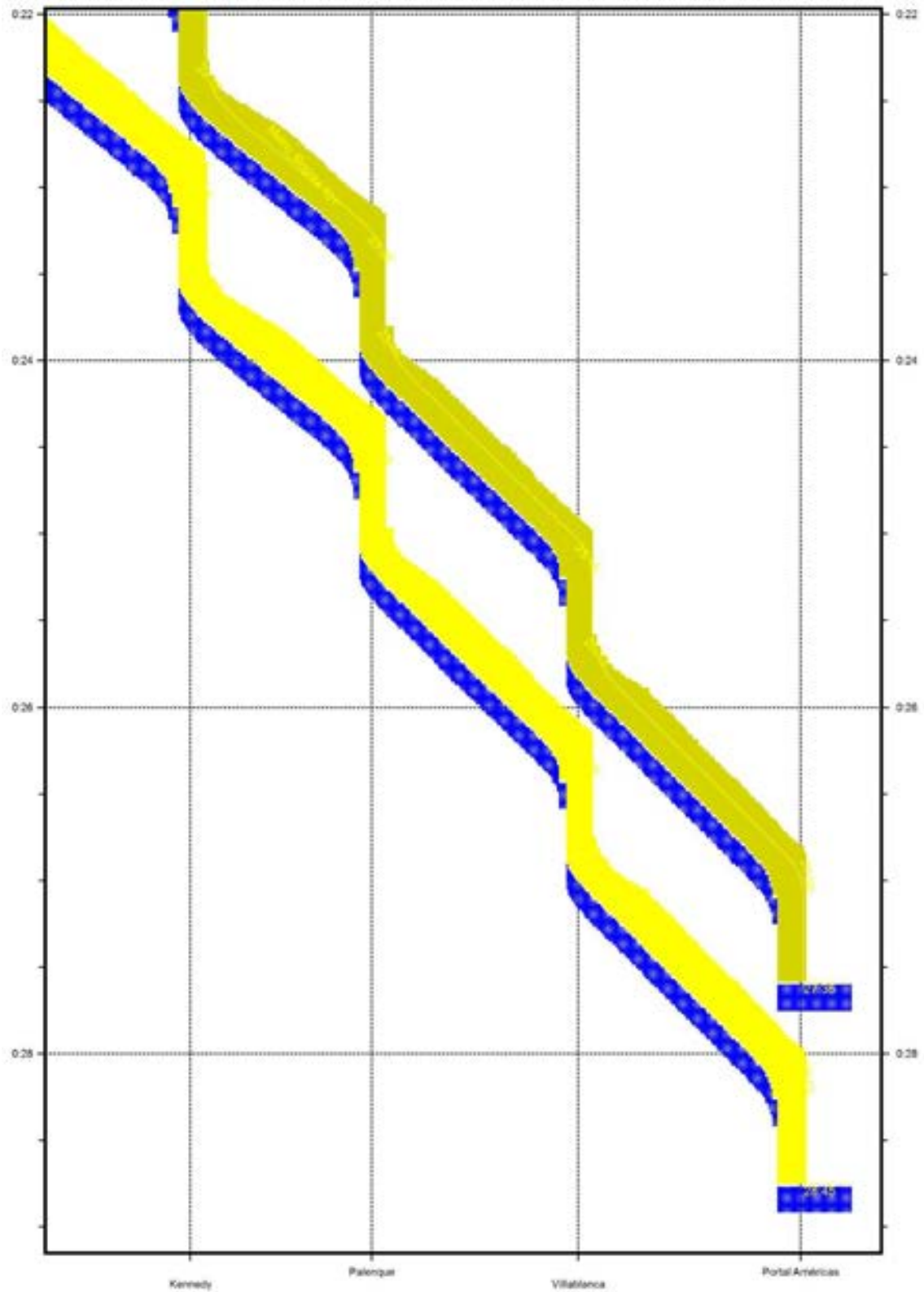






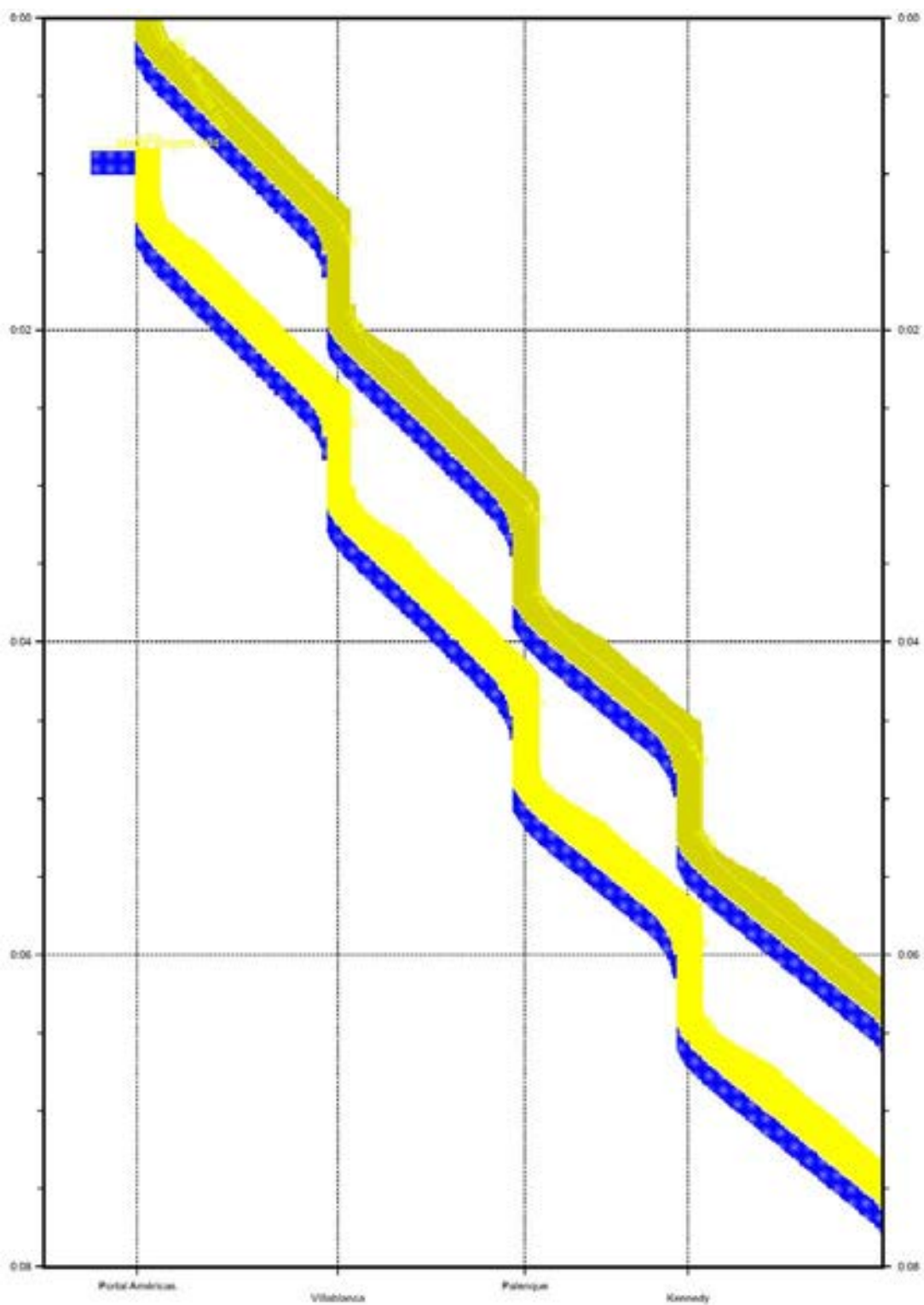


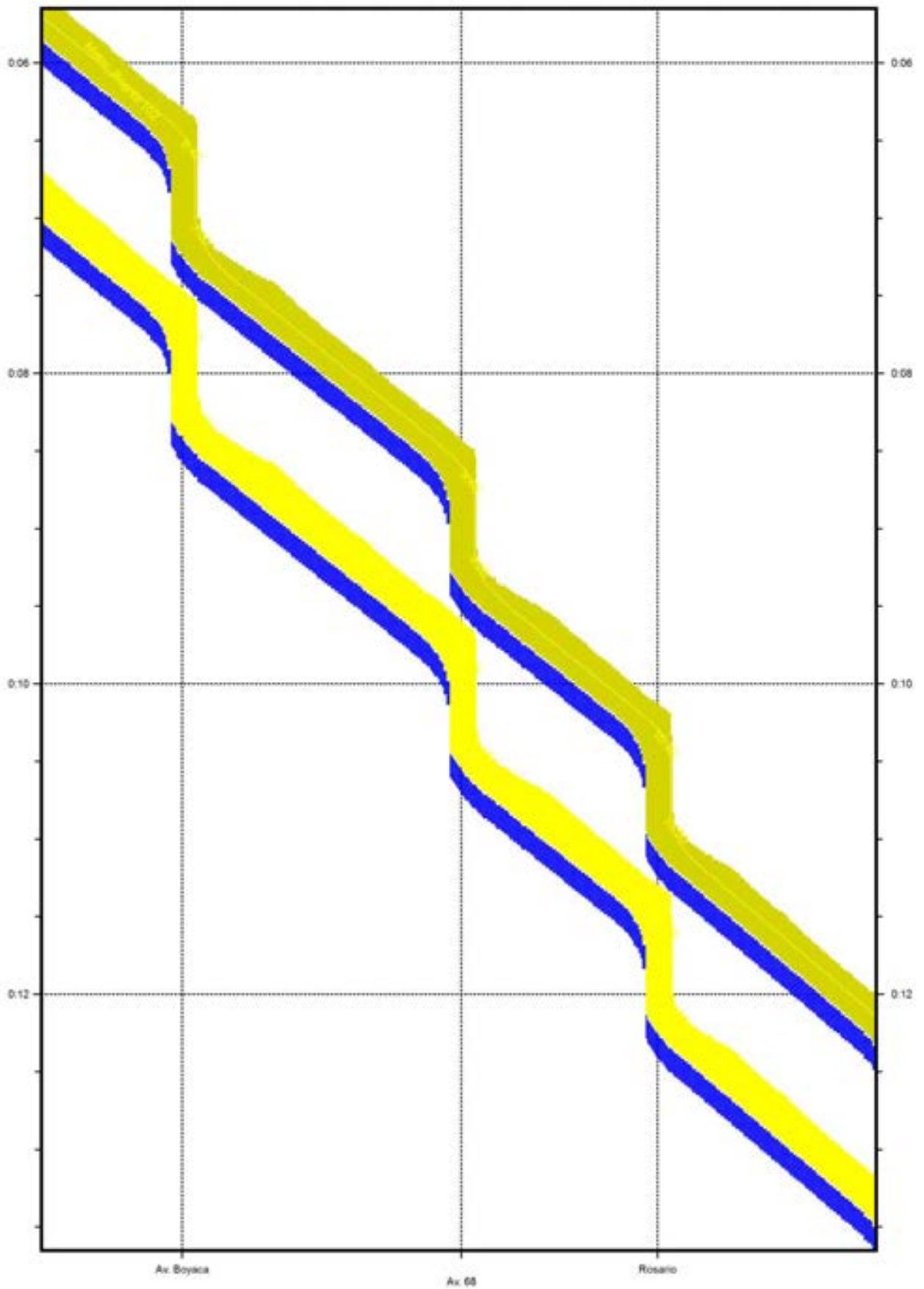




**Ilustración 28. Simulaciones para el cálculo de intervalo en línea, sentido 1**

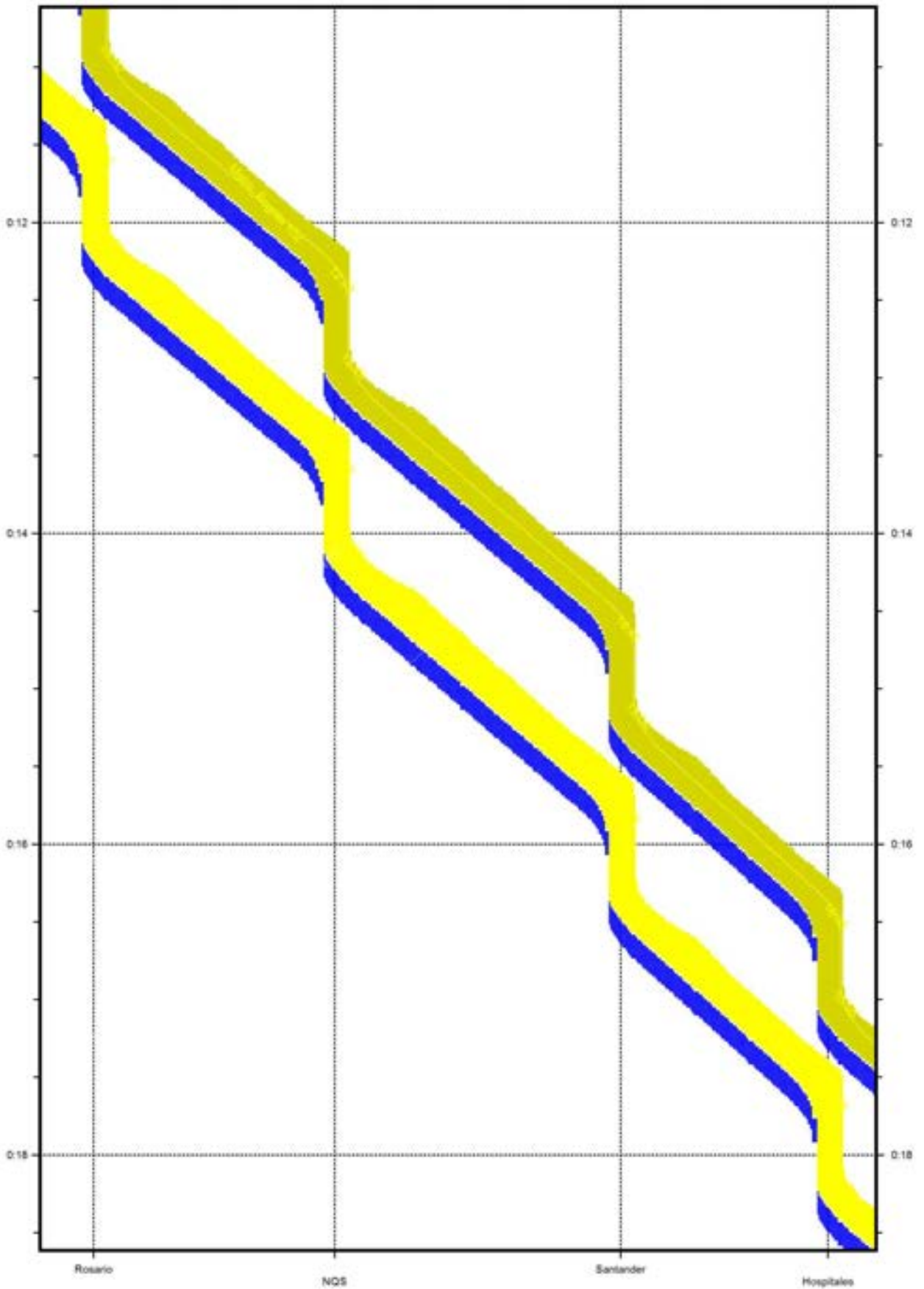
#### 4.5.2 Sentido 2: Portal de las Américas – Calle 72





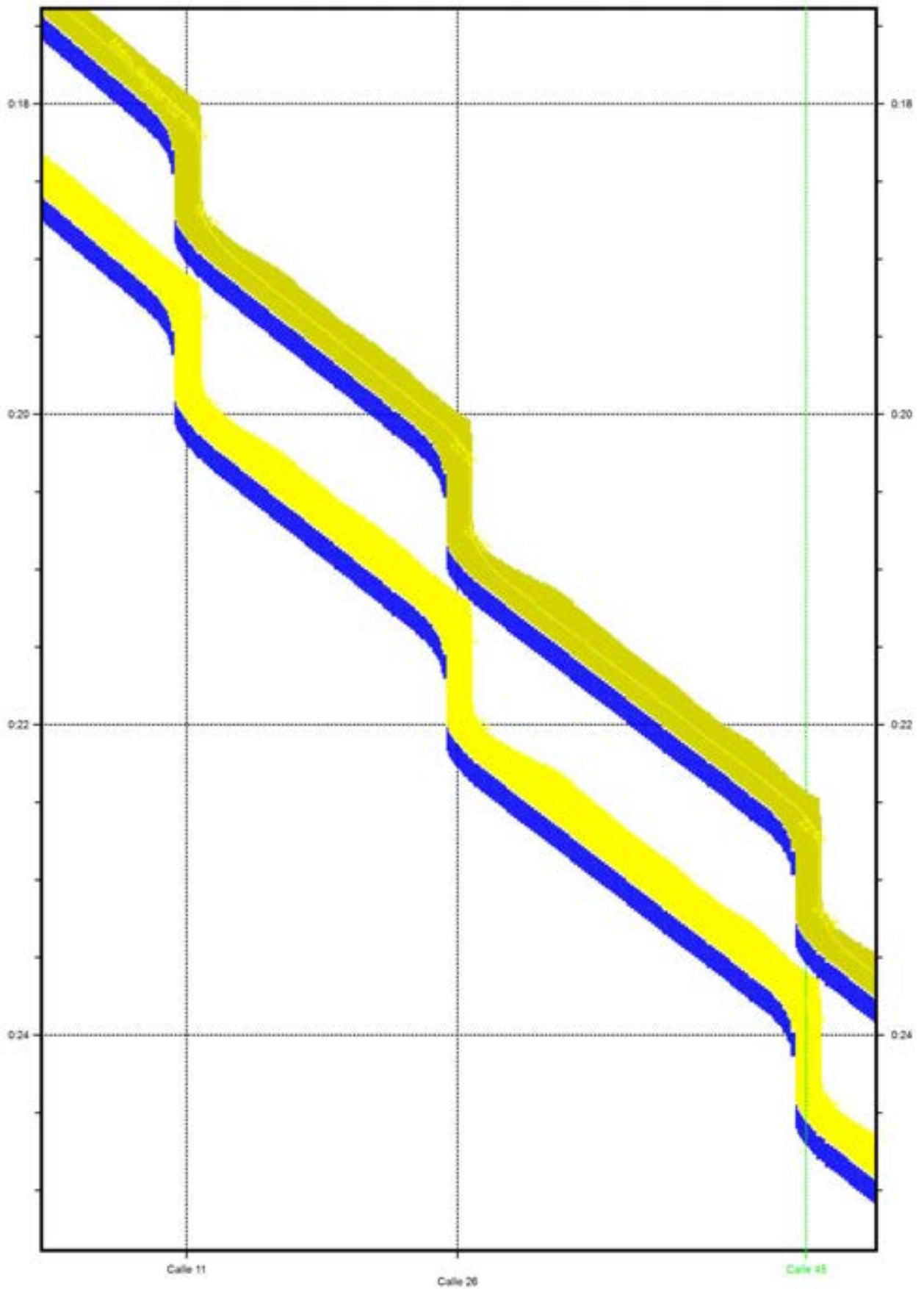
REV. A, 14-07-2017  
 ETPLMB-ET00-L01-IFU-P-0001



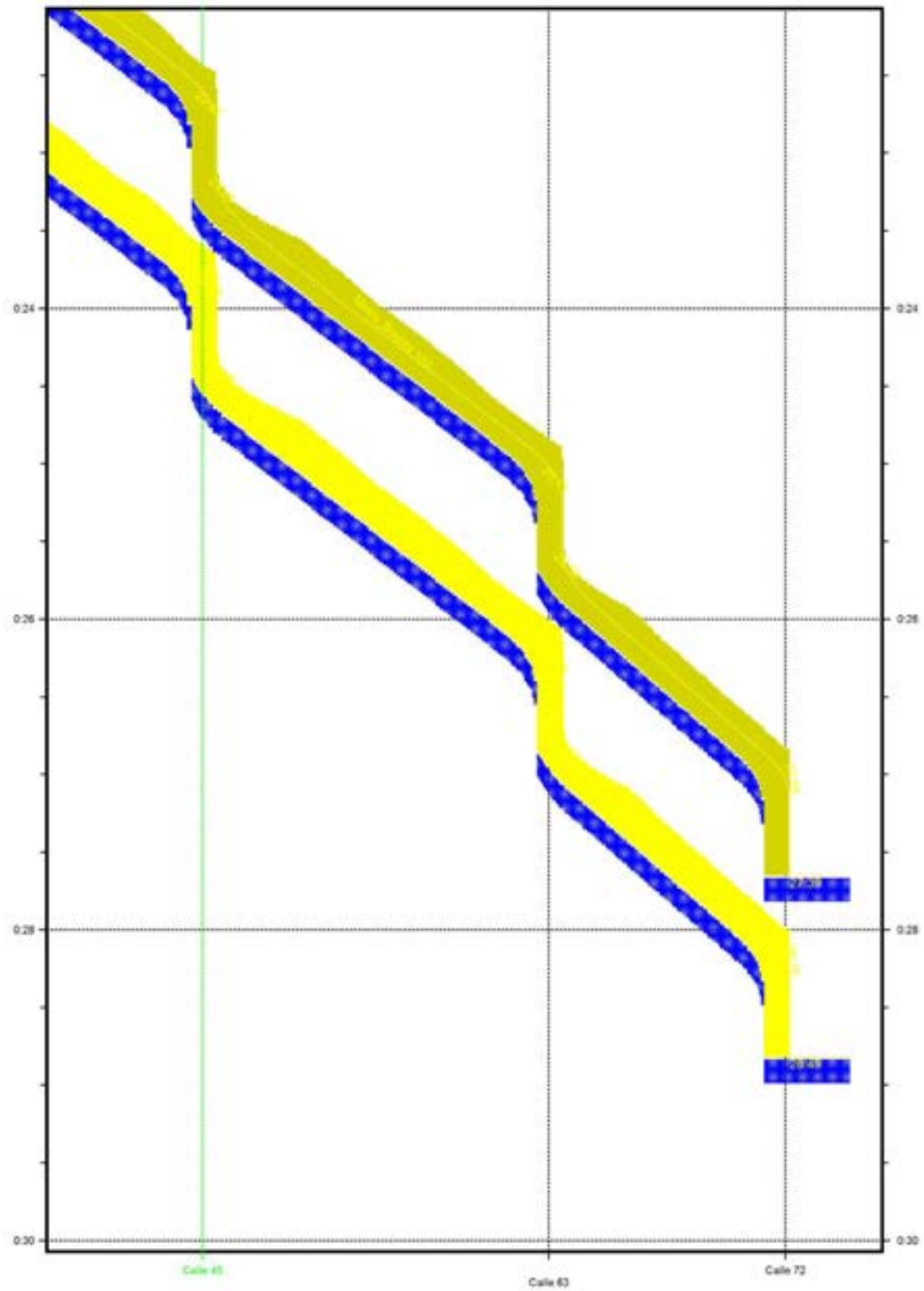


REV. A, 14-07-2017  
 ETPLMB-ET00-L01-IFU-P-0001









**Ilustración 29. Simulaciones para el cálculo de intervalo en línea, sentido 2**

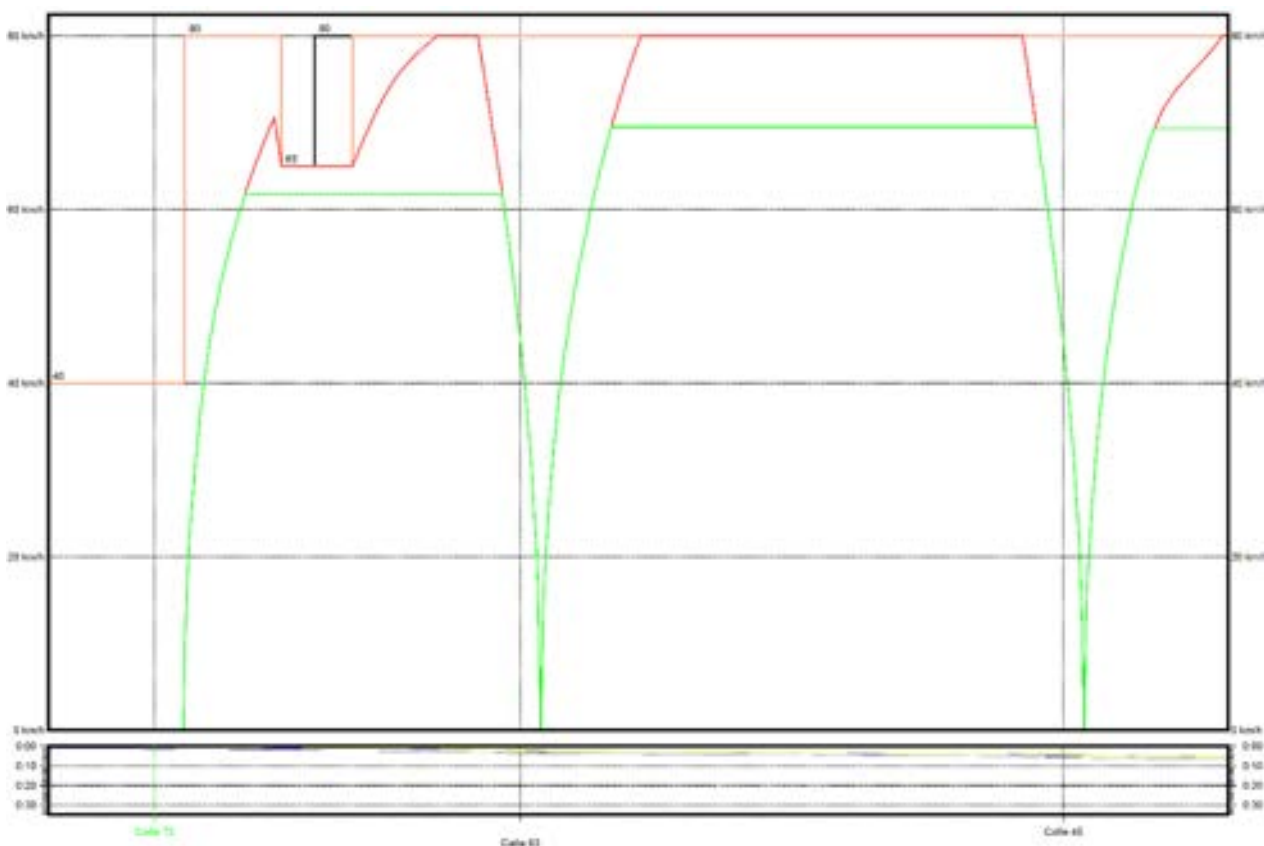
## 4.6 PERFILES DE VELOCIDAD DE LA PLMB

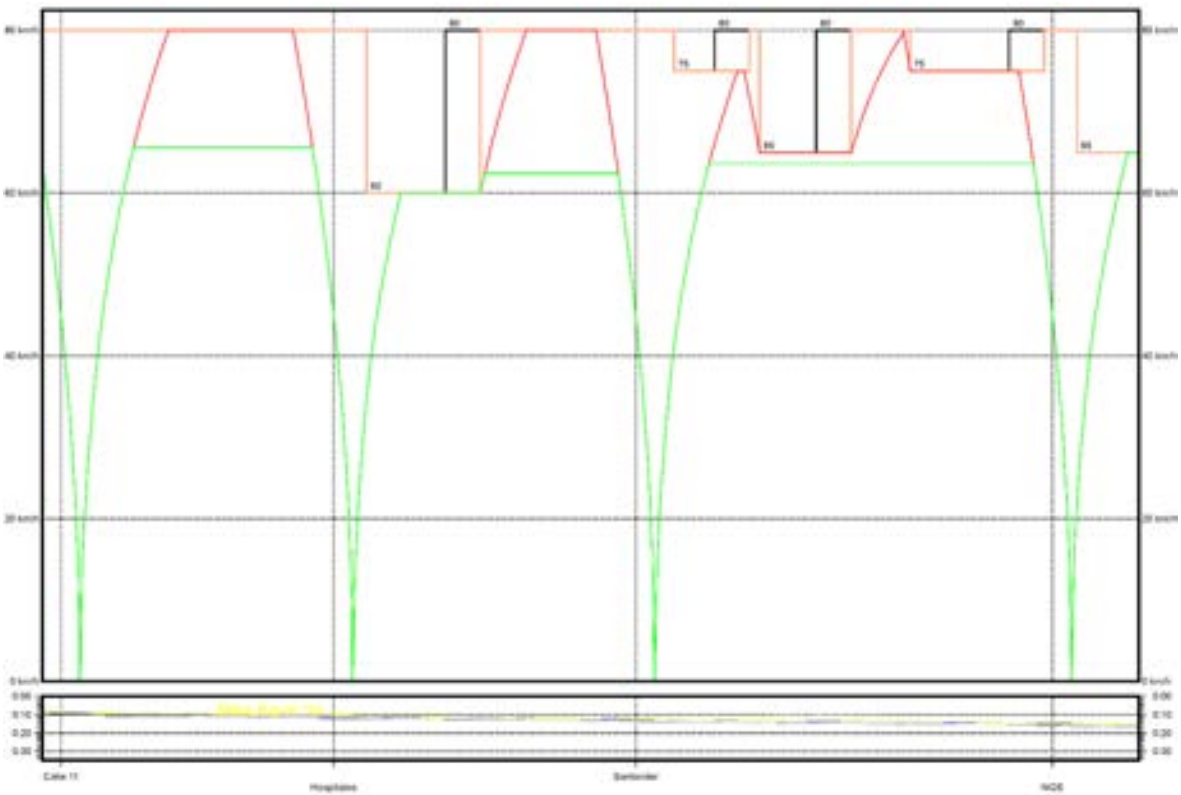
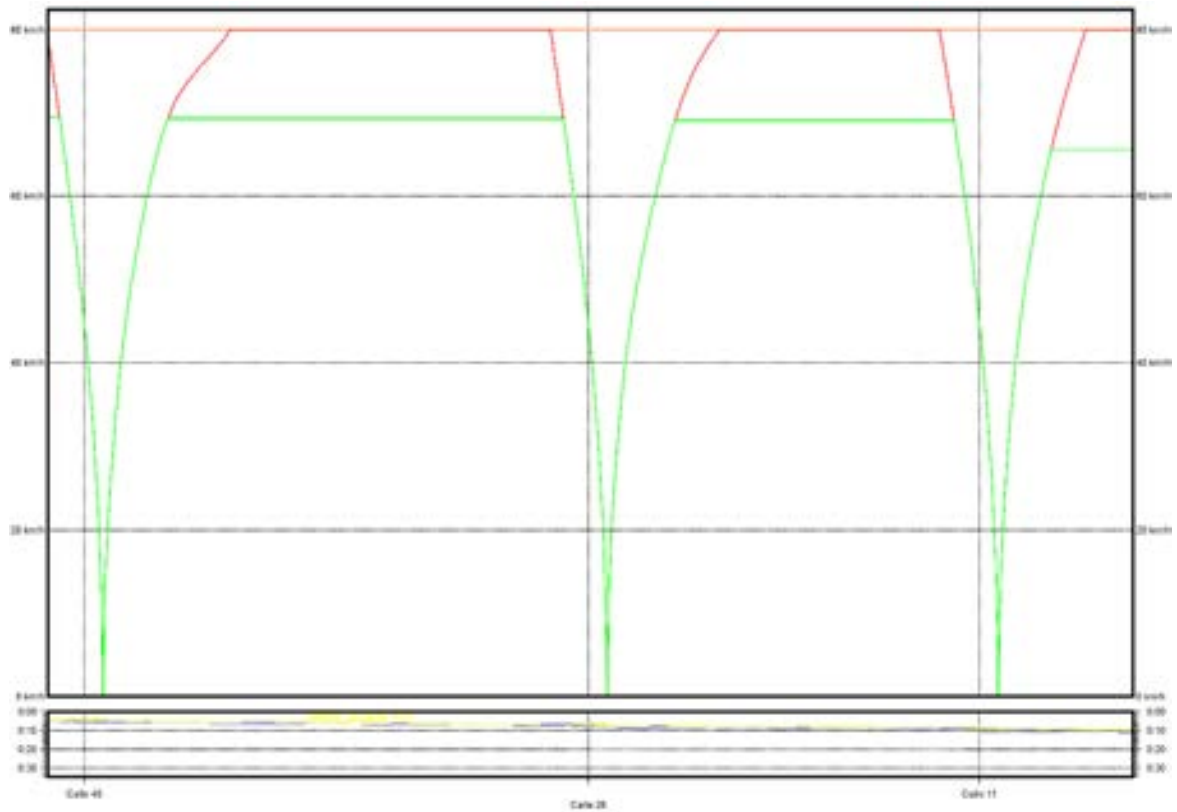
A continuación, se presentan los perfiles de velocidad para la etapa 1, obtenidos mediante las simulaciones RailSys, para cada sentido y tramo de la línea. Para una mejor comprensión, se indica el código de colores utilizado:

- Verde: velocidad prevista para realizar los tiempos de recorrido programados y que incluye una reserva de tiempo de 5 s/km;
- Rojo: máxima velocidad que podría alcanzar el metro y que se corresponde con el tiempo de recorrido mínimo, es decir, sin reserva de tiempo.
- Negro: máxima velocidad permitida por el trazado de la línea;
- Naranja: máxima velocidad permitida por el trazado de la línea pero que toma en cuenta la longitud del tren.

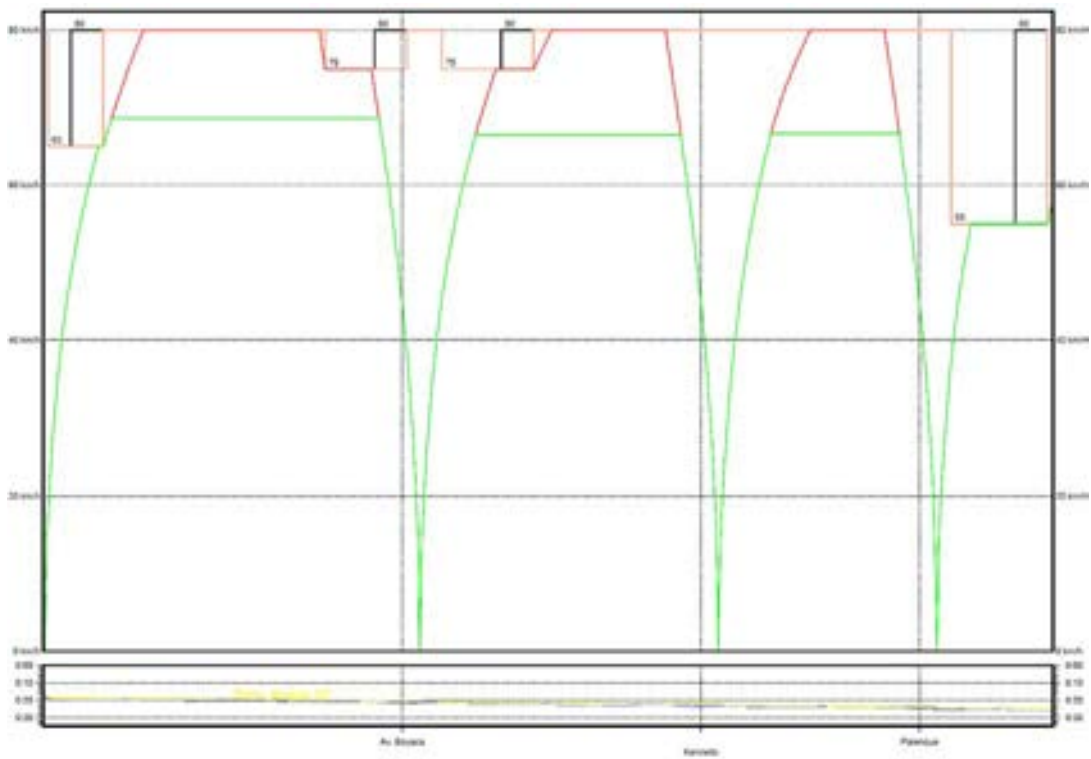
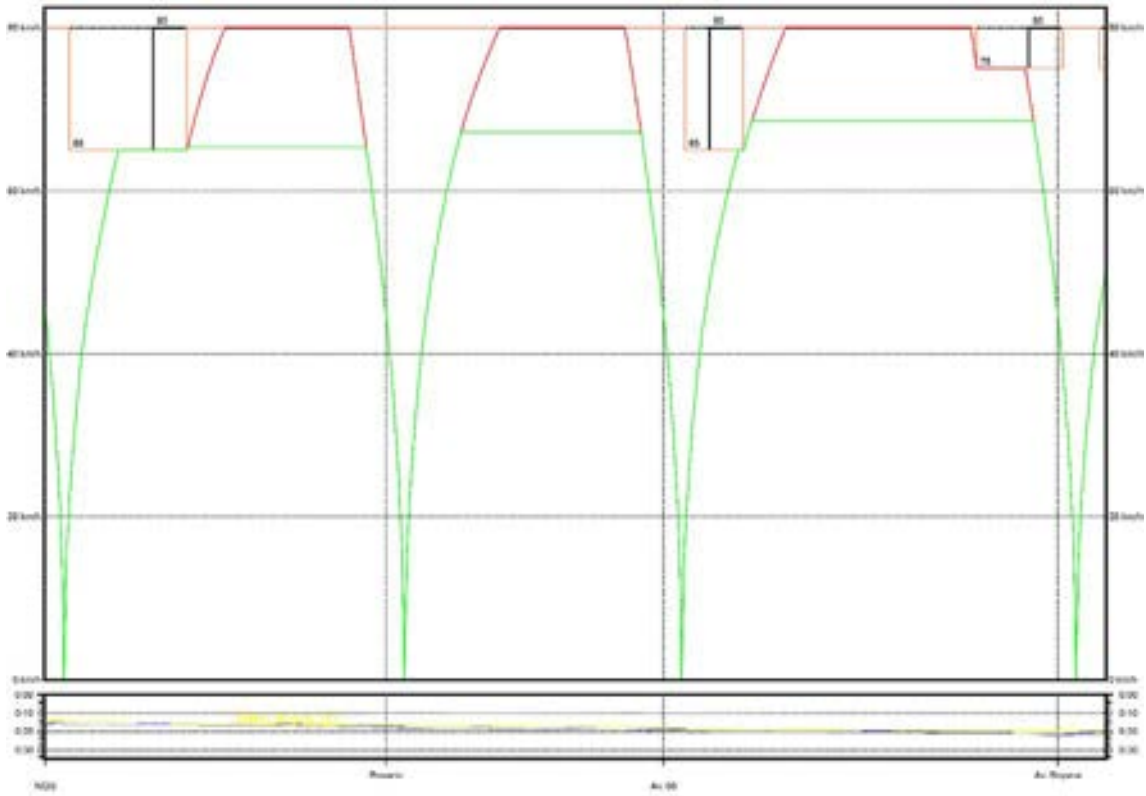
De esta manera, la línea negra y naranja coinciden cuando se inicia la restricción de velocidad, pero difieren en una distancia igual a la longitud del tren una vez terminada la limitación. Es decir, el material rodante no comenzará a acelerar hasta que todo el tren haya pasado la limitación de velocidad.

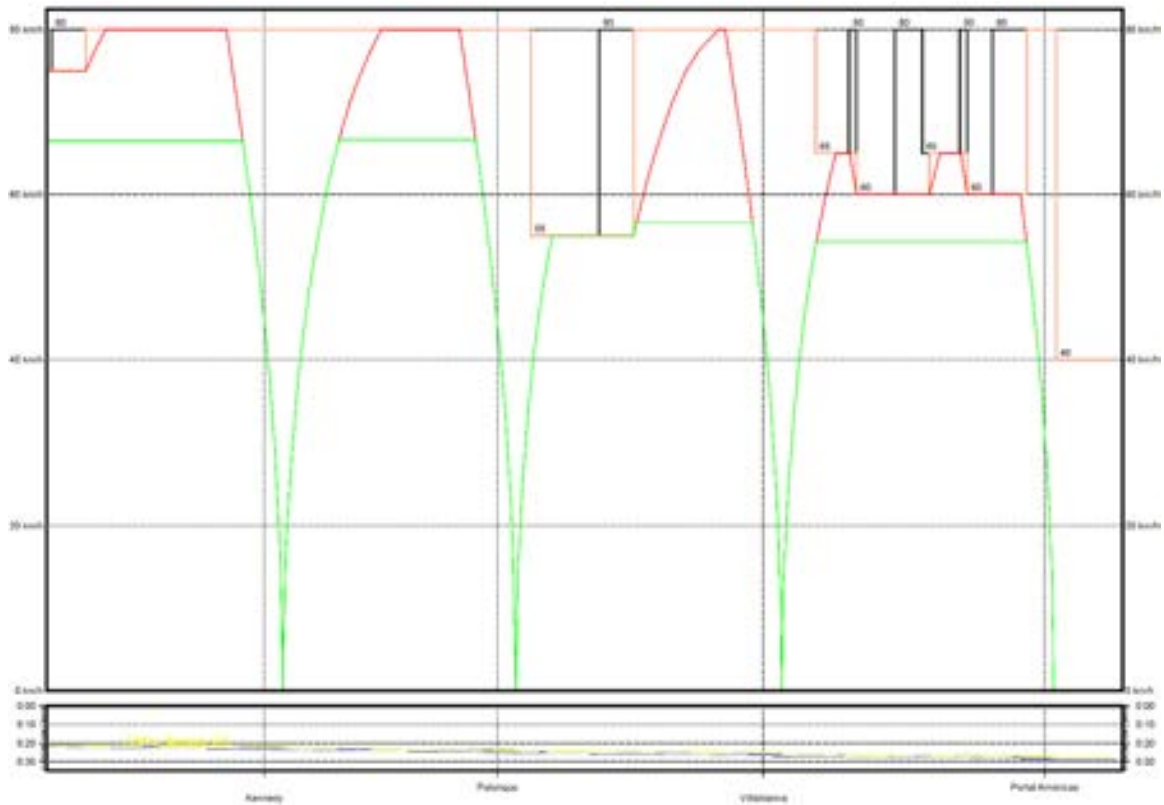
### 4.6.1 Etapa 1 – sentido 1





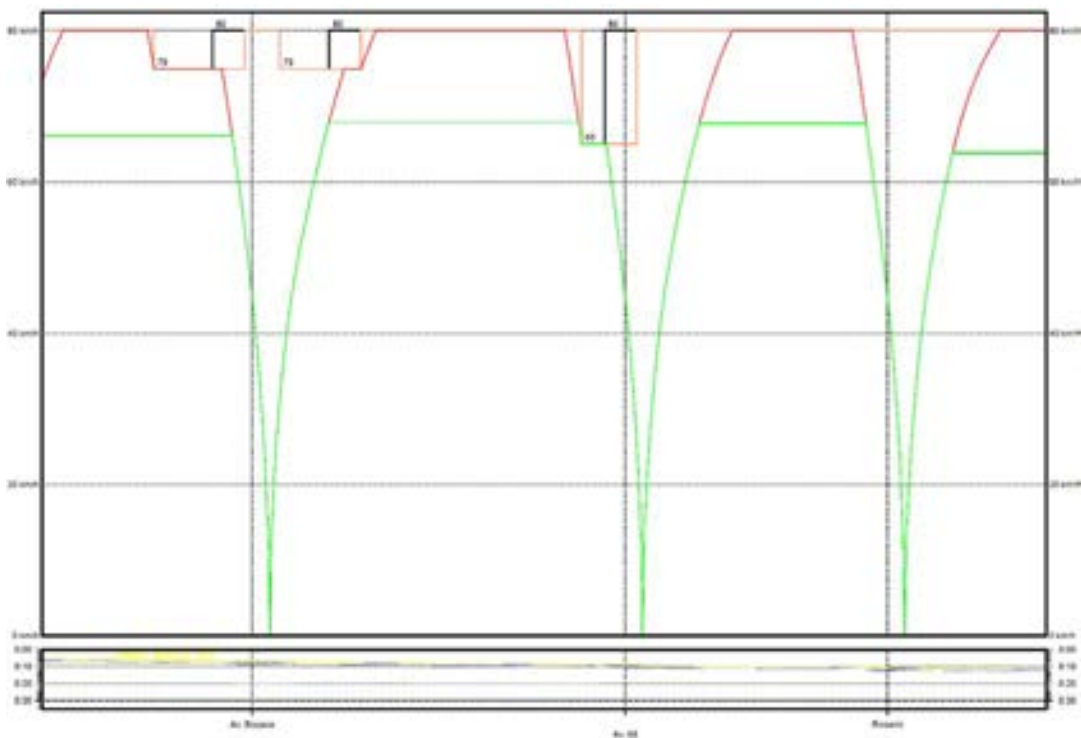
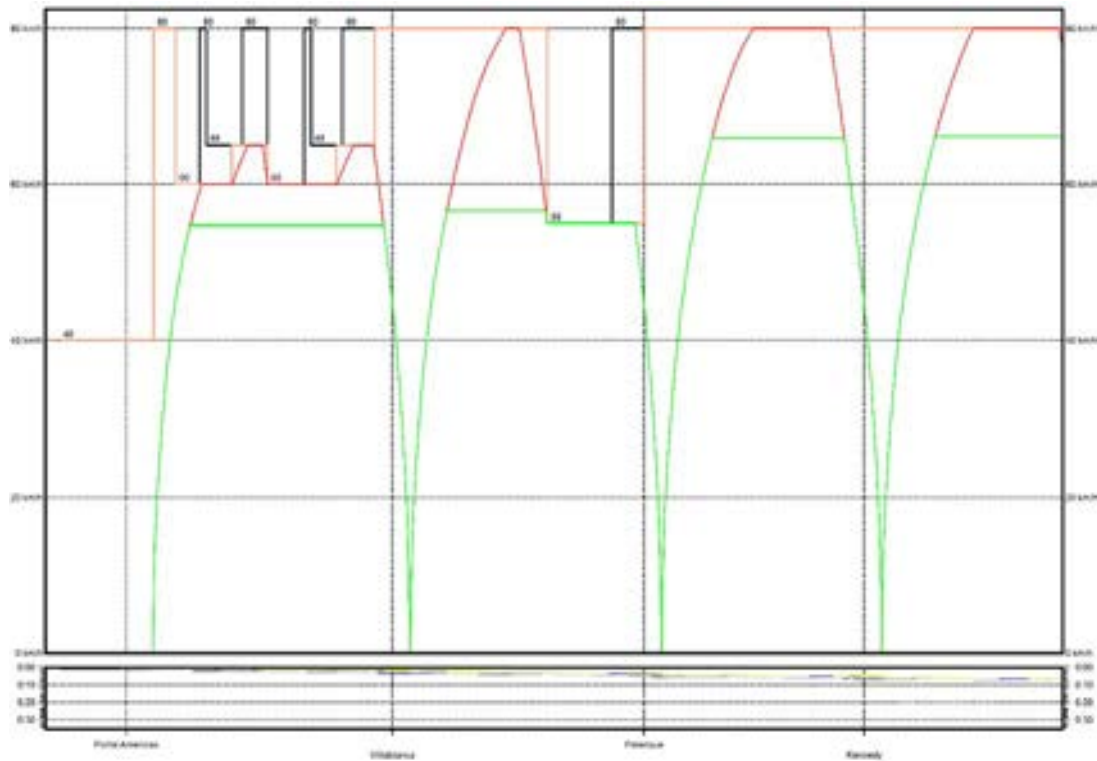


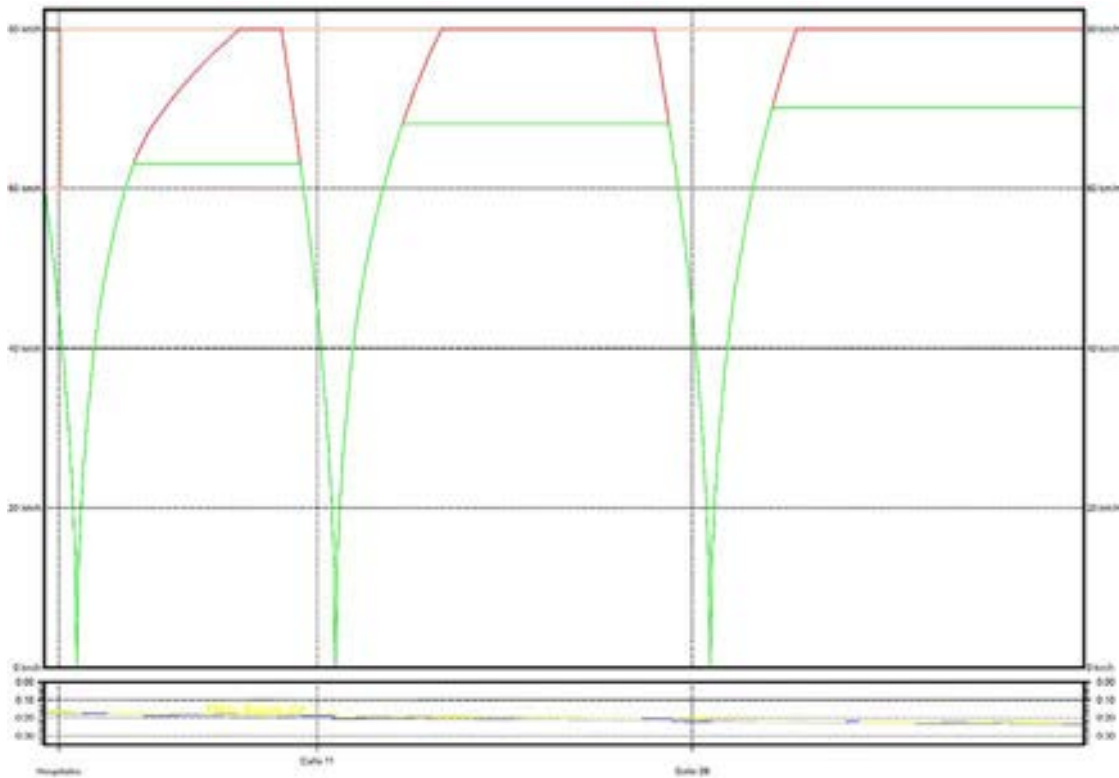
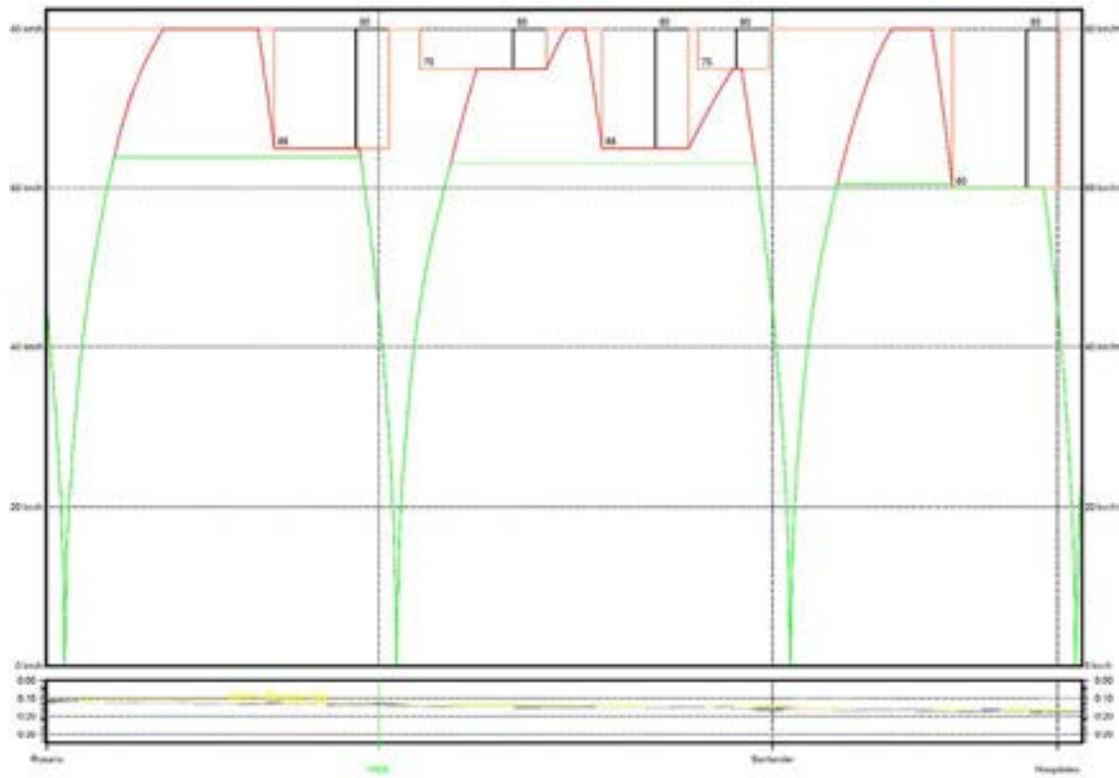


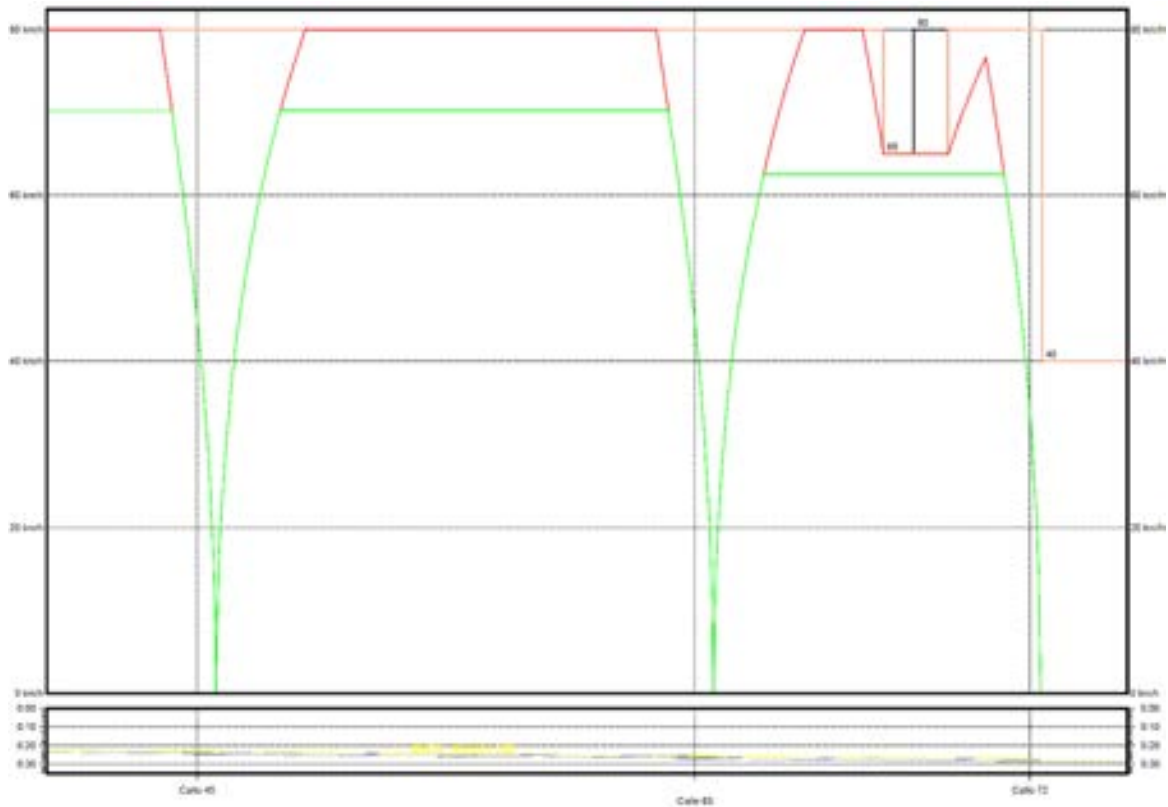


**Ilustración 30. Gráfico de velocidad/distancia, sentido 1**

#### 4.6.2 Etapa 1 – sentido 2







**Ilustración 31. Gráfico de velocidad/distancia, sentido 2**

-----FIN DEL DOCUMENTO-----