



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y ESTUDIOS URBANOS
ESCUELA DE ARQUITECTURA

Bienestar físico asociado al uso de Infraestructura subterránea

Alternativas y disposición de elementos de la

Misma red de metro de Santiago

2022

Por

Ciro Elías Barraza Mansilla

Tesis presentada a la Escuela de Arquitectura de la
Pontificia Universidad Católica de Chile,
Para optar al título de Arquitecto
Y máster en Arquitectura Sustentable y Energía

Profesores guía:

Pilar García Pérez de Arce
Maria Jose Martinez Getner
Renato D'Alençon Castrillón

Enero, 2022

Santiago, Chile

©2022, Ciro Elías Barraza Mansilla

©2022, Ciro Elías Barraza Mansilla

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica que acredita al trabajo y a su autor.

INDICE

RESUMEN	4
1 INTRODUCCIÓN	5
2 PROBLEMA	6
3 FORMULACIÓN	8
3.1 Requerimientos ambientales dentro de un sistema subterráneo de metro	8
3.2 Elementos base del sistema de ventilación	9
4.3 Elementos del sistema de ventilación de refuerzo	10
4.4 El efecto pistón	10
4.5 Climatización geotérmica	11
4.6 Infraestructura del metro de Santiago	13
4.6.1 Breve historia de la construcción de metro de Santiago	13
4.6.2 Método NATM (Nuevo Método Austriaco de Túneles)	14
4.7 Una propuesta de diseño de organización de espacios y elementos.	21
5 PREGUNTA/HIPÓTESIS:	24
6 OBJETIVOS	24
7 Metodología:	24
8 Elaboración:	25
8.1 Antecedentes	26
8.1.1 Definición de Instrumentos necesarios para desarrollar el levantamiento de datos	26
8.1.2 Recintos y zonas instrumentadas	26
9 RESULTADOS	28
10 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	33
11 CONCLUSIONES	37
12 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	41
13 ANEXOS	42

RESUMEN

El sobrecalentamiento en las estaciones subterráneas de metro, es sin duda uno de los problemas más notorios a la hora de viajar en hora punta. A pesar de que en el diseño original de las primeras líneas de metro se consideraron estrategias pasivas de ventilación, la empresa de metro de Santiago ha tenido que hacer grandes inversiones enfocadas en el uso de mecanismos adicionales de ventilación forzada, que a pesar de todo no han podido combatir el problema, especialmente en estaciones de combinación tan conocidas como los Héroes, Baquedano y Tobalaba (Entre muchas otras). Debido a los nuevos sistemas de construcción, que han aparecido en las últimas líneas construidas en Santiago como lo son la 3 y 9, el sistema ha adquirido nuevas características que hacen pensar que el problema del sobrecalentamiento podría aminorarse con un replanteo de las mismas estrategias pasivas que los sistemas subterráneos de metro del mundo han adoptado desde la misma aparición de los trenes subterráneos.

Debido a la materialidad, el sistema de funcionamiento de un tren subterráneo y la nueva ubicación de los túneles con respecto a la superficie de la ciudad, existen una serie de oportunidades que pueden ser aprovechadas para ayudar a mejorar la condición de malestar térmico. Hablamos principalmente de la inercia térmica, el efecto pistón y el relativamente nuevo sistema constructivo NATM ya usado en las recientes líneas de metro, que ordenados desde la arquitectura, pueden ser usados para mejorar las condiciones ambientales de los usuarios con cierta predisposición a temperaturas de viaje en transporte público.

El propósito principal de esta investigación es determinar cómo se podría utilizar la relativamente nueva infraestructura para ser *replanteada en la conexión entre una antigua y una futura estación de metro de Santiago*, en pos de una posible mejora de condiciones ambientales y térmicas, mediante el uso de estrategias pasivas. Se instrumentan siete estaciones de la antigua Línea 1, dos estaciones de la línea 3 y finalmente dos estaciones de la línea 4. Se detectan velocidades de viento de pistón que van de los 0,7 – 1 m/s (momento en que el tren entra o sale de la estación) y una velocidad relativa de 0,1 - 0,3 m/s (Cuando el viento se distribuye aproximadamente en la 1/2 o 2/3 partes del andén). La boca de túnel de tren de expansión abrupta v/s la gradual, tiene mayor probabilidad de producir viento y mayores circulaciones de aire, dependiendo del diseño de su sección, proximidad de pozos de compensación y túneles de circulación peatonal, y diseño de sección de túnel de estación, entre otros. Se concluye que es posible utilizar los elementos propios de metro debido a que se detectan reducciones de temperatura, producto del viento de pistón, que van de los -2°C a las 12:00 hrs y de -1°C a las 16:00 hrs.

Palabras clave: Metro de Santiago, Santa Lucía, Sobrecalentamiento, Bienestar térmico, Efecto pistón, masa térmica.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente el Metro de Santiago es uno de los sistemas de transportes neurálgicos de la actual red de transporte público de la ciudad, debido a su gran capacidad de transporte e influencia positiva que conlleva esto para el desarrollo de la ciudad. La llegada de una estación de metro a una comuna, es un hito que puede tener un impacto profundo en el bienestar social, urbano y cultural, y que sin duda es celebrado por los beneficiados que acceden a este servicio. El crecimiento notorio que ha tenido metro de Santiago durante estos últimos años y las futuras ampliaciones o construcción de nuevas líneas, harán que nuevos flujos de personas se encuentren en nodos urbanos preexistentes que deberán ampliar sus capacidades no solo espaciales. Tales encuentros generarán roces que pueden ser muy evidentes por una parte de los usuarios de metro. Uno de los principales problemas detectados en las primeras etapas de investigación en terreno del Metro de Santiago, se relaciona principalmente con las condiciones térmicas y ambientales de sus grandes espacios subterráneos, y que a futuro podrían agravarse y afectar notoriamente el bienestar de los usuarios.

El sobrecalentamiento dentro de las estaciones de combinación ha sido un problema recurrente que Metro de Santiago ha intentado reducir en estaciones como Tobalaba, Baquedano, Santa Lucía, Los Héroes, Estación Central (Entre otras)¹ y lamentablemente el problema ha persistido (Tabla 2-1), especialmente por la saturación del sistema.

Según las propias fuentes de Metro de Santiago, el año 2010 esta empresa llegó a invertir 2.000.000.000 de pesos en sistemas de ventilación forzada para incorporarlo al ya existente sistema de ventilación. Dentro de estos sistemas (que tienen asociados costos operacionales y de mantención), encontramos mega ventiladores y ventiladores con nebulizador (Fig. 2-1), siendo estos últimos, tal vez, no tan adecuados considerando su rango de alcance de 2 metros con una disminución promedio de 6°C y las actuales condiciones de pandemia producto del Covid19.

TEMPERATURAS, HUMEDAD Y SENSACIÓN TÉRMICA EN ANDEN LOS LEONES L1

CLIMA	DÍA ABRIL 2021	Condición	Vestimenta (Clo)	Actividad (Met)	Temperatura Operativa (°C)	Humedad Operativa (%)	TSV (Thermal Sensation Votes)	PMV (Predicted Mean Vote)	PPD (Percentage of People Dissatisfied)
OTOÑO	Jueves 8	Máxima	1	2	27,5	35	LIGERAMENTE CÁLIDA	1.16	34 %
	Viernes 9	Máxima	1	2	28	31	LIGERAMENTE CÁLIDA	1.20	35 %
	Sábado 10	Máxima	1	2	28	31	LIGERAMENTE CÁLIDA	1.21	35 %
	Jueves 8	Mínima	1	2	24	25	LIGERAMENTE CÁLIDA	0.64	0,14
	Viernes 9	Mínima	1	2	22,5	25	NEUTRAL	0.45	9 %
	Sábado 10	Mínima	1	2	25	26	LIGERAMENTE CÁLIDA	0.77	18 %

TEMPERATURAS, HUMEDAD Y SENSACIÓN TÉRMICA EN ANDEN LOS HÉROES L1

CLIMA	DÍA ABRIL 2021	Condición	Vestimenta (Clo)	Actividad (Met)	Temperatura Operativa (°C)	Humedad Operativa (%)	TSV (Thermal Sensation Votes)	PMV (Predicted Mean Vote)	PPD (Percentage of People Dissatisfied)
OTOÑO	Viernes 16	Máxima	1	2	28	60	LIGERAMENTE CÁLIDA	1.44	47 %
	Sábado 17	Máxima	1	2	27	58	LIGERAMENTE CÁLIDA	1.27	39 %
	Domingo 18	Máxima	1	2	26	62	LIGERAMENTE CÁLIDA	1.14	33 %
	Lunes 19	Máxima	1	2	26	61	LIGERAMENTE CÁLIDA	1.15	32 %
	Viernes 16	Mínima	1	2	26	46	LIGERAMENTE CÁLIDA	1.03	27 %
	Sábado 17	Mínima	1	2	25	54	LIGERAMENTE CÁLIDA	0.94	24 %
	Domingo 18	Mínima	1	2	24	57	LIGERAMENTE CÁLIDA	0.82	19 %
	Lunes 19	Mínima	1	2	24,5	57	LIGERAMENTE CÁLIDA	0.89	22 %

Tabla 2-1: Condición térmica registrada y sensación térmica prevista (Según método Fanger) en dos estaciones de combinación de metro durante abril del año 2021. Es importante notar que las mediciones fueron desarrolladas en otoño y que la medición puede estar alterada por el cambio de la frecuencia de uso debido a la pandemia. Por lo tanto las condiciones pueden ser más drásticas en las estaciones del año con más calor o cuando la condición del transporte público se normalice (Fuente: Elaboración propia).

¹ Metro de Santiago. (2010). Metro implementa mega ventiladores para disminuir calor en estaciones. 05-05-2021, de Metro S.A Sitio web: <https://www.metro.cl/noticias/detalle/923>

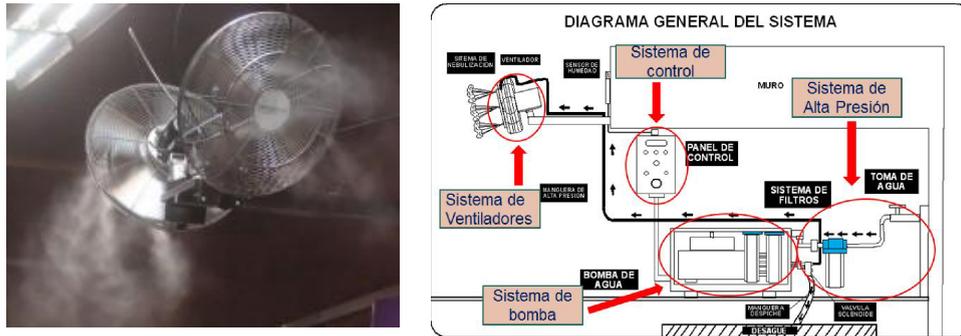


Figura 2-1: Ventiladores con nebulizador utilizados en el sistema de Metro de Santiago y diagrama general del sistema de funcionamiento. (Fuente: Especificaciones Técnicas Particulares del Sistema de Nebulizadores en <https://www.metro.cl/licitaciones/descarga/b91b1facf3b3a7890177f02ac188f14c>.)

La futura línea 9 que conectará el centro de Santiago con la comuna de la Pintana, tiene proyectada como una de sus principales estaciones de combinación la existente **Estación Santa Lucía**, que para el año 2026 verá sus dependencias ampliadas para tal efecto. El gran impacto que tendrá la futura línea 9 al conectar, una zona históricamente relegada, con el centro de Santiago -beneficiando directamente a 900.000 habitantes² - hace de este punto de combinación uno de los principales focos de atención para la presente investigación, no solo por sus problemas de sobrecalentamiento, impacto urbano, social y cultural, sino que también por su posible impacto medio ambiental y económico en pos de su desarrollo sostenible (Aunque sea en una pequeña medida). Esto es posible debido a la oportunidad que existe de implementar estrategias pasivas, disponibles por el contexto en el que estará inserta la futura estación y principalmente por las mismas nuevas característica de la infraestructura de metro y que básicamente, pueden ayudar en el ahorro energético (y económico), mediante el buen funcionamiento térmico de una mega estructura que ya existe en otras partes del sistema y que podría usarse ordenándola de una forma específica.

Es así como la arquitectura encuentra cabida en este tipo de proyectos, debido a que con los recursos propios de una construcción y la correcta disposición de los elementos de esta, posiblemente se podrían generar las condiciones mínimas de bienestar térmico de un espacio subterráneo, reduciendo los requerimientos de energía para ventilar o enfriar ciertas zonas.

2 PROBLEMA

El problema del sobrecalentamiento de una estación se debe a diversos factores y que básicamente están asociados al funcionamiento del tren, las instalaciones y los usuarios. Las zonas de andenes y de circulación de los trenes concentran la mayor cantidad de cargas internas (Fig. 3-1). El calor generado por el funcionamiento de los trenes constituye, por lejos, la principal carga existente (92%), debido principalmente al sistema de frenado que ocupa cerca de la mitad de la carga térmica interna total. Luego le siguen las instalaciones (6%) y en menor cantidad los ocupantes (2%) (Fig. 3-2).

² Metro de Santiago. (2019). Futura Línea 9. 05-05-2021, de Metro S.A Sitio web: <https://www.metro.cl/minisitio/linea-3-y-6/futura-linea-9>

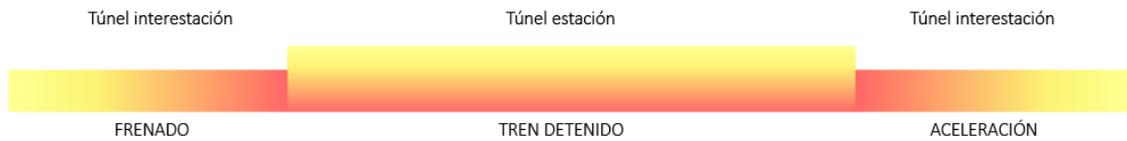


Figura 3-1: Esquema de producción de las principales cargas producidas en una estación subterránea. (Fuente: Elaboración propia).

La exposición a ambientes calurosos puede generar una serie de malestares y síntomas³ que afectan tanto a los trabajadores de metro como a los usuarios. Los signos y síntomas del agotamiento por calor pueden aparecer repentinamente o con el paso del tiempo, especialmente en períodos prolongados de exposición. Los signos y síntomas posibles del agotamiento por calor comprenden los siguientes: Piel fría y húmeda, Sudoración intensa, Fatiga, Pulso débil y acelerado, Presión arterial baja al ponerse de pie, Calambres musculares, Náuseas y Dolor de cabeza.

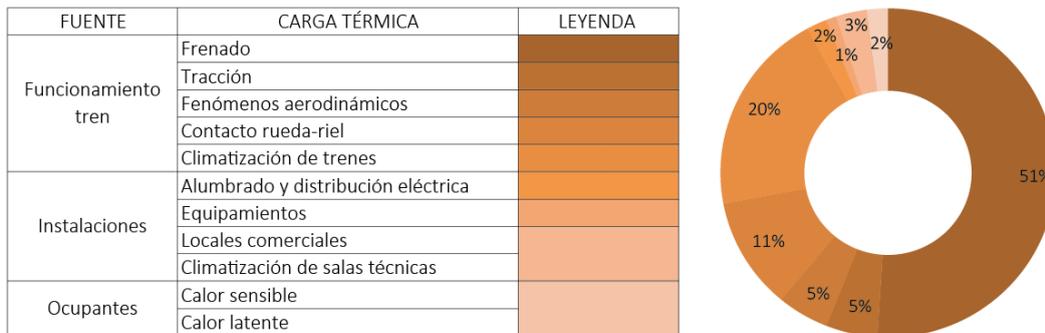


Figura 3-2: Distribución y clasificación de cargas térmicas internas. (Fuente: Elaboración propia en base a Herrero ,2009).

Ahora bien, como un problema secundario podemos mencionar la existencia de humedad, CO₂ y compuestos orgánicos volátiles (HCHO y TVOC). Más que nada estos pueden servir como indicadores de que tan bueno es el aire que tiene un recinto según lo estancado que puede estar. De esta forma se podría hacer un supuesto de lo agradable o saludable que resulta ser, según la acumulación de ciertos gases asociados a malos olores o acumulación de partículas o sustancias nocivas para la salud, que son difíciles de detectar. Tomando como base los niveles de CO₂⁴ presentes en el aire de un recinto por ejemplo, este podría catalogarse de la siguiente manera⁵:

- Hasta 350 ppm: calidad de aire interior alta
- Entre 350 y 500 ppm: calidad de aire interior buena
- Entre 500 y 800 ppm: calidad de aire interior moderada
- Entre 800 y 1200 ppm: calidad de aire interior baja

³<https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/heat-exhaustion/symptoms-causes/syc-20373250>

⁴ <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/efectos-co2/>

⁵ <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/efectos-co2/>

- Nivel superior a 1200 ppm: calidad de aire interior mala.

Por otra parte el problema no es solo el **bienestar térmico y sensación ambiental** en una futura estación de combinación (L1+L9) de metro de Santiago con gran intensidad de uso y afluencia de público. También es el **continuo suministro que se debe entregar** y la gran cantidad de gente a la que se debe prestar. De esta forma podemos centrarnos en dos puntos a favor: El **cambio paulatino de temperatura de viaje** y la **predisposición del usuario** a las temperaturas propias de un viaje en transporte público. De este modo, el diseño de estos recintos no debe enfocarse en el drástico manejo de las condiciones interiores de un lugar, si no que en la homologación, conservación y desarrollo de temperaturas que resultan aptas para un grupo significativo de personas. En este sentido el diseño arquitectónico cobra gran relevancia debido a que por este medio, se podrían establecer relaciones con una suficiente sensibilidad, que medie entre los usuarios de metro y su infraestructura.

3 FORMULACIÓN

Antes de explicar cómo es que se podrían abordar estos temas planeados, debemos entender las cuestiones asociadas a los requerimientos mínimos relacionados con el ambiente subterráneo de una estación, los sistemas de ventilación base y de refuerzo, el efecto pistón, la geotermia y finalmente los sistemas constructivos usados en la infraestructura del sistema subterráneo de Metro de Santiago.

3.1 Requerimientos ambientales dentro de un sistema subterráneo de metro

Según norma UNE-EN (Herrero, 2009, p. 13-17):

Temperatura del aire:

- Verano 23-25 ° C
- Invierno 21-23°C

Humedad del aire

- Verano 45-60%
- Invierno 40-50%

Variaciones de presión admisibles

- Sobrepresiones máximas de 2 a 6 Pa
- Depresiones máximas de -2 a -6 Pa

Caudal mínimo

- 29 m³/h por persona

Velocidad del aire

- En función de la temperatura operativa y del índice de molestia por corriente de aire en general, tanto para las condiciones de diseño de verano (24 °C) como las de invierno (22°C), la velocidad media no debe superar los **0,2 m/s**. En el caso de las velocidades de diseño para emergencias (salvo situaciones especiales como atentados) son habituales las velocidades en torno a 1,5 – 2,5 m/s, a satisfacer en el túnel afectado.

3.2 Elementos base del sistema de ventilación

En general estos sistemas, podemos encontrarlos de forma híbrida, es decir, se podrían considerar como sistemas de ventilación pasiva pero pueden llegar a necesitar de un sistema mecánico de ventilación que ayude a darle dirección y sentido a la entra o salida de aire de ciertos recintos. En las estaciones subterráneas, donde el problema es más crítico, el calor generado debe ser evacuado al exterior del sistema. Los sumideros principales son, en este sentido, la atmósfera y, en menor medida, el terreno circundante. Los elementos base de cualquier sistema subterráneo de metro son los siguientes (Fig. 4-2-1):

Pozos de extracción: Se sitúan en las proximidades del punto medio de los tramos del túnel inter-estación y su función es extraer el aire desde el interior. Disponen de una galería donde se ubican los equipos electromecánicos necesarios para extraer el aire hacia el exterior.

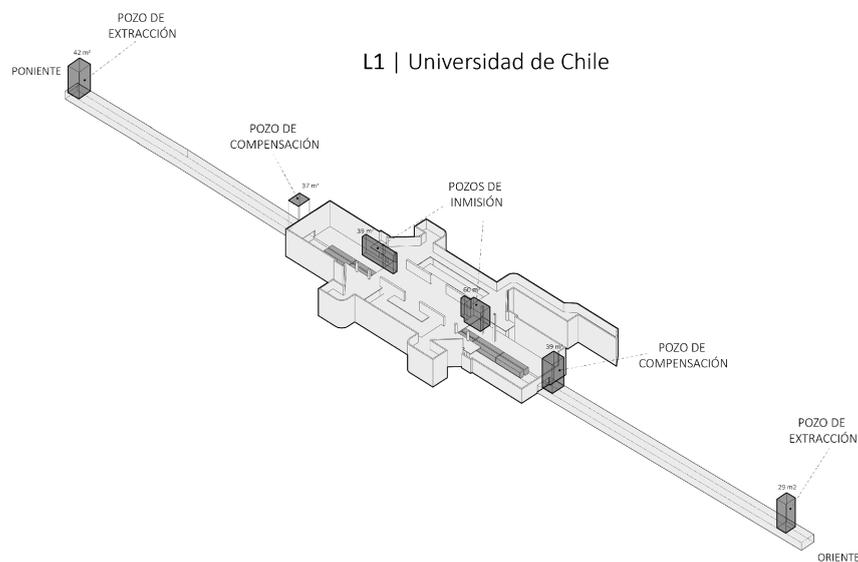


Figura 4-2-1: Elementos del sistema de ventilación pasiva presentes en una de las estaciones subterráneas de metro de Santiago (Fuente: Elaboración propia).

Pozos de compensación: generalmente existen dos por estación, localizándose preferentemente en los piñones de entrada y salida de la misma. Su función es evitar las molestias de aire generadas por el efecto pistón⁶ sin aporte energético adicional, fenómeno que ocurre cuando el tren, al circular por el túnel, empuja el aire que se encuentra a su paso de manera que ante este se genera una capa de aire con una presión superior a la normal que podría perturbar o sobre cargar la atmosfera, afectando los oídos de los usuarios.

Pozos de inmisión: Se ubican en el andén y a través de ellos se impulsa aire desde el exterior con ayuda de ventiladores con el fin de aumentar las renovaciones de aire. Generalmente, se prescinde de pozos de inmisión (salvo escasas excepciones), cuando, en su lugar, se asocia la entrada de aire desde el exterior a los pozos de compensación en períodos donde no ocurre el efecto pistón.

⁶ Más adelante veremos con mayor detalle en qué consiste.

4.3 Elementos del sistema de ventilación de refuerzo

Como forma de complementar a los sistemas de ventilación pasiva, la empresa Metro ha implementado planes de verano que contemplan la incorporación de trenes con aire acondicionado y sistemas de ventilación activa en estaciones, con costos de inversión que solo hasta el año 2010 sobrepasaban los \$2.000.000.000 (Metro S.A., 2010). El último plan de verano 2018-2019 contempló la instalación de 106 megaventiladores en 8 estaciones diferentes, la instalación de puertas con rejillas de ventilación en los coches de las líneas 2 y 5, y la dotación de aire acondicionado para la flota completa de las líneas 1 y 6. En este caso podemos encontrar los siguientes equipos de ventilación.

Ventiladores nebulizadores: Equipos de ventilación que utilizan una bomba eléctrica de alta presión y boquillas especiales para enfriar la temperatura del aire, utilizando agua nebulizada.

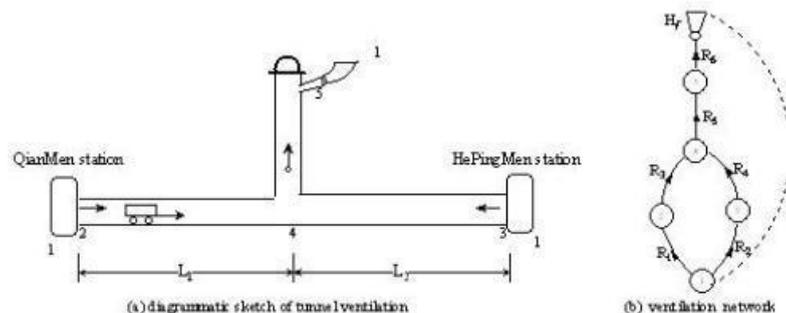
Ventiladores convencionales: Equipos de ventilación que aumentan el movimiento de las masas de aire en el interior.

Mega ventiladores: Sistemas de ventilación industrial que aprovechan el efecto pistón para inducir el movimiento de masas de aire caliente a través del mismo al generar un flujo de aire adicional. Operan mediante celosías y/o ventiladores que pueden ser tanto de inyección como de extracción, dependiendo de las necesidades.

4.4 El efecto pistón⁷

Básicamente este efecto ocurre cuando un tren subterráneo viaja a través de un túnel relativamente estrecho (Fig. 4-4-1). La presión positiva formada en la cabeza empuja el aire viciado hacia afuera, mientras que la presión negativa formada en la cola aspira aire fresco. Esto genera un viento de pistón. El viento de pistón ventila la estación de metro, pero también trae calor del túnel, lo que puede resultar en altas temperaturas en la estación y mala calidad del aire. El viento de pistón es uno de los factores más importantes en el entorno del metro e influye mucho en el consumo de energía. Dentro de los factores que influyen en su ocurrencia y que pueden ser de interés por parte de la arquitectura están:

- La velocidad del tren
- El coeficiente de bloqueo (Relación entre la sección transversal del tren y la del túnel)
- La longitud del tren
- La longitud del túnel
- La entrada y salida del túnel
- Efecto Venturi y principio de conservación de la masa



⁷ Pan S; Fan L ; Liu J ; Xie J ; Sun Y ; Cui N; Zhang L; Zheng B (2013). A Review of the Piston Effect in Subway Stations.China: College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing. Fuente: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1155/2013/950205>

Figura 4-4-1: Esquema básico del funcionamiento del efecto pistón. Fuente: <https://tuberrota.wordpress.com/2008/11/10/efecto-piston/>

El término “efecto pistón” como tal, proviene de la disciplina de la ingeniería y su fin es reducirlo al máximo, con el objetivo de:

- Aumentar la velocidad del tren
- Eliminar efectos del roce con el aire y turbulencias: Reducir los gastos de energía y el calentamiento de la estructura
- Limitar la amplitud de la sobre presión y depresiones soportadas por el usuario.
- Velocidad de viento dentro del túnel de 3- 5 m/s

Como referencia de su posible buen funcionamiento podemos hablar de la estación Dongdan de la Línea 1 del Metro de Beijing (Clima Continental), en el que por implementar el efecto pistón se pudieron tomar medidas de mitigación para el calor. La información proporcionada por el artículo “A Review of the Piston Effect in Subway Stations” habla de que se pudo llegar a una **reducción del consumo de energía** del sistema de ventilación y aire acondicionado cercanos al **50%** durante las temporadas de transición e invierno y una reducción del **30%** en energía anual. Los factores que influyeron en el adecuado funcionamiento de este efecto tienen relación con el cambio de parámetros geométricos de la estación o velocidad del aire en el túnel. Ahora bien ¿Cómo hacer un uso eficiente del efecto pistón? Nuevamente aparecen factores que son de gran interés por parte de la arquitectura y estos son:

- Área de la estación
- Área de escaleras Sirve para el control de velocidad y presión de aire en estación
- Áreas del corredor
- Velocidad del tren
- Tamaño de túnel
- Sistema de escape (Chimeneas/respiraderos)
- Control de salida de aire en periodos de transición, invierno y verano.
- Uso de índices de comodidad: el índice de calor relativo (RWI) y tasa de déficit de calor (HDR) Modificados debido a la velocidad y temperatura del flujo

4.5 Climatización geotérmica

Es un sistema de climatización que utiliza la gran inercia térmica de la tierra para calefaccionar o refrigerar espacios con la temperatura constante que se puede encontrar en el subsuelo poco profundo. Las características propias del sistema subterráneo de metro de Santiago, nos hacen creer que *la temperatura* que se podría obtener luego de los 15 m de excavación (Fig. 4-5-1) podría utilizarse para mejorar las condiciones de todo el sistema. Por lo tanto, los posibles vínculos con estaciones superiores deberían ocurrir no solo con los niveles inferiores sino que también con los túneles de interestación, que son los recintos más alejados de la superficie de la ciudad.

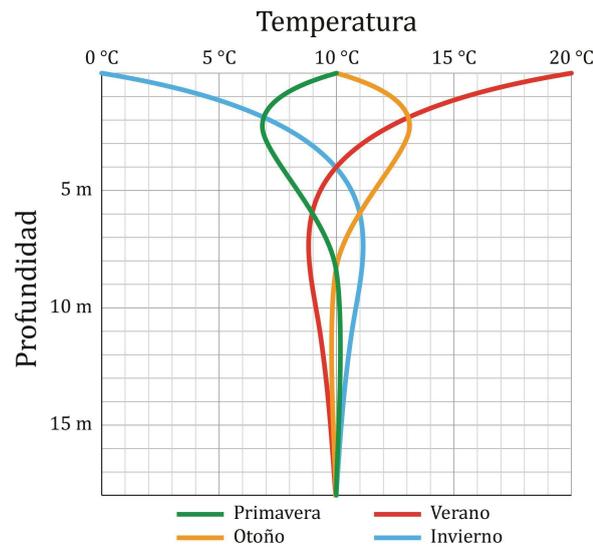


Figura 4-5-1: *Curva Azul:* En invierno, a medida que profundizamos, la temperatura va aumentando hasta alcanzar un valor próximo a 10 °C. *Curva roja:* En verano ocurre lo contrario; a medida que profundizamos la temperatura desciende hasta los 10 °C. *Verde y amarilla:* En primavera y otoño las variaciones son menores, alcanzándose en profundidad, el mismo valor de 10 °C (Fuente: <https://iaipro.es/sistemas-de-aprovechamiento-geotermico-de-baja-entalpia-muy-baja-temperatura/>)

Las primeras mediciones de temperatura hechas en la estación de combinación Los Leones -que se presume como ejemplo tipo para la futura estación de combinación Santa Lucía - demuestran que a medida que uno desciende a través del sistema se podrían conseguir mejores temperaturas debido a que podemos llegar a profundidades cercanas a los 25-30 m bajo la superficie de la ciudad (Fig. 4-5-2).

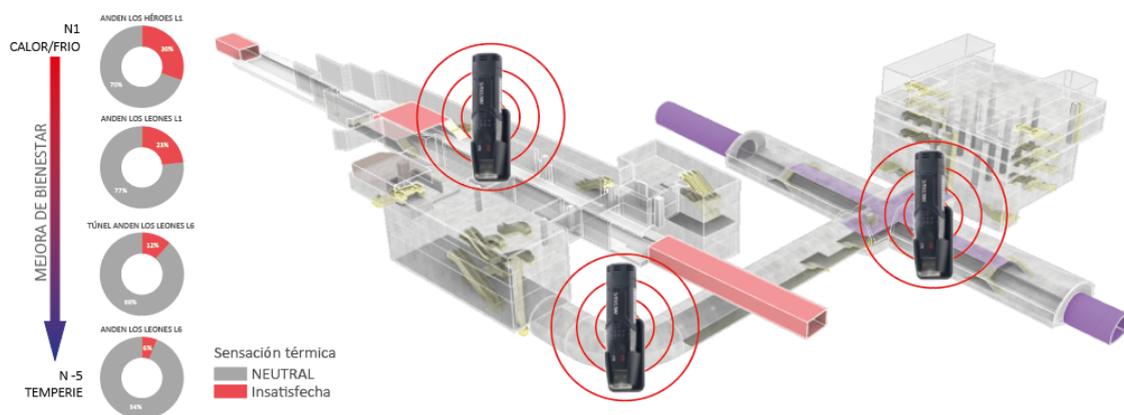


Figura 4-5-2: Gráficos de la izquierda: PMV sobre mediciones de temperatura y humedad hechas en estación de combinación Los Leones. Se puede observar que a medida que uno desciende por el sistema, la opinión media estimada (PMV) mejora hacia una percepción neutral de temperatura. Imagen derecha: Ubicación de los sensores de temperatura y humedad relativa dentro de la estación (Fuente: Elaboración Propia)

4.6 Infraestructura del metro de Santiago

4.6.1 Breve historia de la construcción de metro de Santiago

En 1969 comienzan las primeras obras de construcción del metro de Santiago en el tramo San Pablo – La Moneda de la Línea 1 (Fig. 4-6-1), las cuales fueron inauguradas 6 años más tarde, en 1975. Estas obras se realizaron utilizando técnicas del método cut and cover o “a cielo abierto”, realizando excavaciones con grandes taludes y eventualmente entibadas con grandes puntales.

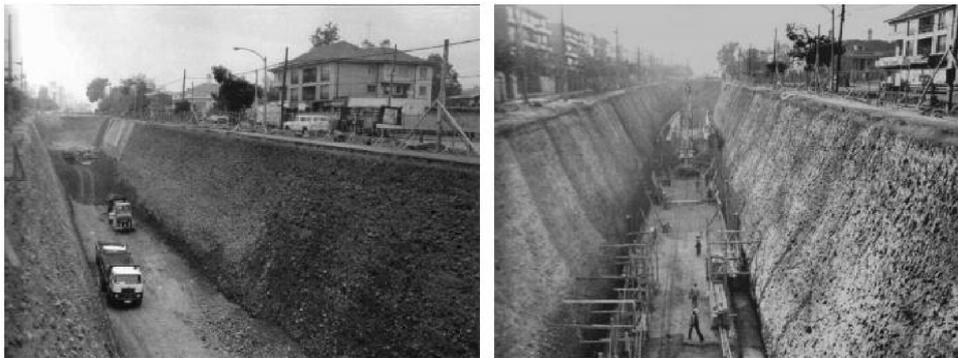


Figura 4-6-1: Excavación a cielo abierto, construcción Línea 1 (Fuente: desconocida, González, 2016)

Siguiendo este mismo método de construcción, a finales de 1980 se construyen las extensiones de la Línea 1 que alcanzan la Estación Escuela Militar y dos tramos de la Línea 2 que unen las estaciones Los Héroes y Lo Ovalle, totalizando así los primeros 25 km de la red. El desarrollo de estas obras demandó mucho tiempo y costo, interviniendo drásticamente la vida en superficie, incluso en arterias tan importantes como Alameda, Providencia, Apoquindo y Gran Avenida, produciendo grandes externalidades negativas a la población. Es por eso que en 1995, se implementó por primera vez el método NATM (Nuevo Método Austriaco de Túneles), que buscaba reducir de forma importante el impacto superficial de las obras. Este método se desarrolló cómo un proyecto piloto en los túneles interestación del tramo Estación Baquedano y el sector de Talleres San Eugenio (colindantes a Estación Ñuble), bajo el Parque Bustamante, transformándose en un hito importante en la evolución de las obras subterráneas de Metro. Dada la buena experiencia en la construcción de los túneles de interestación con el método NATM, se continuó con la extensión de la Línea 5 hacia el centro, completando el año 2000 el tramo entre Baquedano y Santa Ana. Aquí se modificó el método de construcción de las estaciones, que siguió a cielo abierto, pero con entibaciones de pilotes anclados al terreno, lo que minimizó sustancialmente el ancho de las excavaciones.

A partir del año 2002 en adelante y durante el proyecto de extensión de la Línea 5 a Quinta Normal, se logra un nuevo hito importante en la construcción de Metro, la excavación de las estaciones se realizó íntegramente utilizando el método NATM, con secciones hasta 3 veces más grandes que los túneles de interestación. Así la construcción completa del proyecto se realizó en forma subterránea, necesitando sólo de piques puntuales para el movimiento de tierra, materiales y maquinarias. De esta forma, la industria nacional comienza a perfeccionar el método NATM a las condiciones locales.

Luego de su desarrollo en mayor medida mediante el método NATM (Fig. 4-6-2), en el año 2006 se inauguran las líneas 4 y 4-A que unen el centro de Providencia con la comuna de Puente Alto. A fines del 2010 se inaugura la extensión de la Línea 1 hasta Los Domínicos y al año siguiente la extensión de la Línea 5 hasta Maipú. Finalmente la construcción de las actuales líneas 3 y 6 -que significó el mayor desafío de la historia de metro hasta ahora- han desarrollado su infraestructura también mediante el uso del método NATM con un menor impacto en la superficie, a un tiempo y costos más razonables, debido a que ya han sido asimilado por la construcción Chilena. Cabe destacar adicionalmente que este sistema ha dado la posibilidad de generar espacios más compactos y con posibilidades de hacer excavaciones más profundas que las antiguas líneas de metro.



Figura 4-6-2: Estación construida mediante método NATM.

4.6.2 Método NATM (Nuevo Método Austriaco de Túneles)

Para construir una obra mediante el uso del método NATM se requieren desarrollar las siguientes obras previas:

Los Piques, galerías y estaciones, son las obras que deben iniciarse antes de la excavación de los túneles de vía. A través de estas estructuras se hace posible el acceso al lugar donde se ubica el trazado y donde comienza la excavación de los túneles. Por lo general, las estaciones se construyen paralelamente con los túneles, sin interferir unos con otros. En consecuencia, los piques y galerías dan lugar a los frentes de trabajo de los túneles, siendo allí donde se concentra el ingreso de maquinarias, personal y materiales de construcción, y la salida de todo el material excavado.

El proceso constructivo de estas obras previas, se detalla a continuación:

4.6.2.1 Estaciones:

Con el fin de no interrumpir el tránsito en las calles que coinciden con el trazado de la Línea, la construcción de las estaciones se aborda de manera subterránea, haciendo necesaria la construcción de un pique al costado del trazado, seguido de una galería que permita el acceso a la excavación de un túnel de gran sección que albergará los andenes de la estación. Dada la naturaleza de estas obras, no es posible ejecutarlas de manera simultánea, por lo cual se sigue la siguiente secuencia.

- i. Pique circular
- ii. Galería de acceso

iii. Túnel estación

La figura 4-6-2-1 muestra cada uno de los elementos que integran una estación subterránea típica y el orden de su construcción, además se puede apreciar la continuidad y diferencia de sección entre el túnel estación y el de interestación.

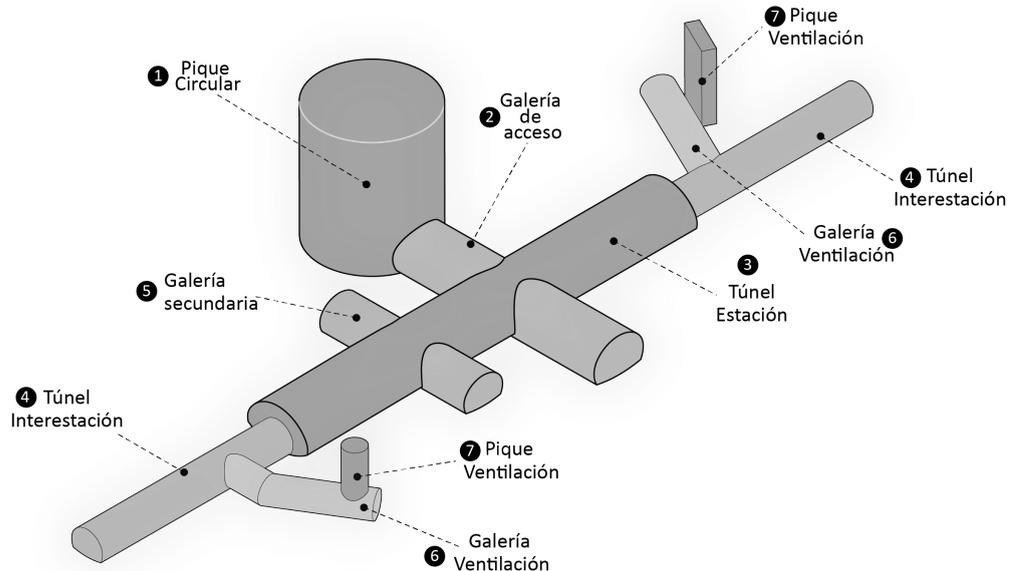


Figura 4-6-2-1: Elementos de una estación subterránea típica desarrollada con el método NATM.
(Fuente: Elaboración propia en base a González 2016)

Las características de cada elemento de la estación son las siguientes:

El pique tiene un diámetro de 25 m y una profundidad que dependerá de la cota necesaria para la excavación de la galería de acceso, típicamente está entre 20 y 35 m., durante la construcción servirá para el ingreso y salida de personal, maquinarias, materiales y escombros de la excavación, y en la etapa de servicio será parte del acceso principal a la estación.

La galería de acceso tiene una longitud necesaria para comunicar el pique con el túnel estación, que típicamente va entre los 25 y 40 m., en la etapa de servicio albergará el sector de boleterías y el acceso a los andenes.

El túnel estación tiene una longitud de 120 m y una sección variable entre 160 m² y 200 m² dependiendo del tamaño de la estación, mucho mayor a la sección de los túneles interestación, en su interior se ubican los andenes de pasajeros que permiten el ingreso al tren.

La ejecución de un pique circular se inicia con la construcción del brocal, la excavación se realiza con medios mecánicos empleando una excavadora convencional, en pases de entre 1 y 2 m, la profundidad queda determinada por la cota de las vías, típicamente entre 20 y 25 m. La excavación de cada pase se divide en cuadrantes que se excavan y sostienen sucesivamente. El orden de excavación es por cuadrantes opuestos tal se muestra en la Figura 4-6-2-2

Una vez terminada la excavación de cada una de las subfases descritas, se proyecta una capa de sello y posteriormente dos capas de shotcrete reforzado con malla electrosoldada. La siguiente fase no se podrá iniciar hasta que se finalizan los ciclos de la fase previa.

Siguiendo la secuencia constructiva expuesta se alcanza el nivel inferior del pique y por último, se ejecuta el anillo de fundación.

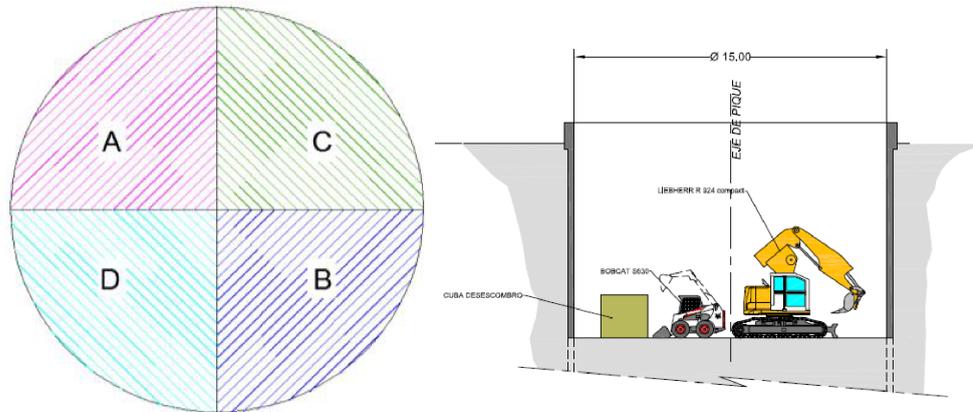


Figura 4-6-2-2: Fases de excavación del pique en cuadrantes y maquinaria empleada. (Fuente: González, 2016)

Tanto el túnel como la galería de acceso de la estación poseen tamaño y geometría similar, ambos presentan una sección transversal con contrabóveda, con un ancho de excavación aproximado de 16 m y una altura máxima de 12 m. La longitud de la galería depende de la distancia entre el pique y el túnel estación, por lo general se excavan galerías entre 30 y 45 m, mientras que el túnel tiene una longitud de 120 m. Adicionalmente, cabe mencionar que la sección del túnel estación está diseñada para albergar las vías y andenes de 3,5 a 5 m de ancho. El ancho del andén depende del flujo de pasajeros que la estación deberá atender y por lo tanto define el tamaño de cada estación. La Figura 4-6-2-3 muestra la sección de excavación típica de un túnel estación.

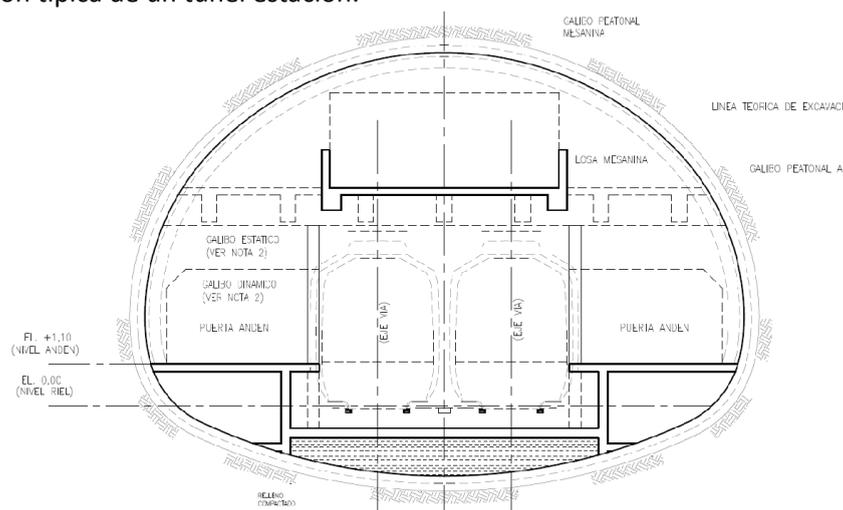


Figura 4-6-2-3: Sección típica túnel Estación Hospitales, Línea 3. (Fuente: González, 2016)

Se considera que las excavaciones de las galerías principales y túneles de estación se ejecutan siguiendo el mismo proceso constructivo. Sus importantes dimensiones a excavar, hacen necesaria su ejecución en diferentes fases de sección más pequeña que eviten inestabilidades del terreno, es por ello que la sección completa se divide en dos secciones más

pequeñas llamadas side drift, separadas por un muro temporal de hormigón proyectado y marcos de acero. A su vez, cada side drift se divide horizontalmente en tres secciones: bóveda, banco y contrabóveda. La excavación de cada side drift sigue la siguiente secuencia constructiva:

- Excavación y sostenimiento de la BÓVEDA en avances de 1 m hasta tener un distanciamiento de 4 m con el banco.
- Excavación y sostenimiento del BANCO en avances de 2 m, quedando a 2 m de la bóveda.
- Excavación y sostenimiento de la CONTRABÓVEDA en avances de 2 m, quedando a 2 m del banco.
- La excavación del side drift (Operación lateral) 2 sigue la misma secuencia y puede iniciarse sólo cuando la contrabóveda terminada del side drift 1 tenga un avance mínimo de 20 m.
- Al finalizar ambos side drift, se comienza con la demolición del muro temporal.

La Figura 4-6-2-4 muestra un esquema de la secuencia constructiva, las diferentes secciones de avance y el distanciamiento entre los side drift 1 y 2.

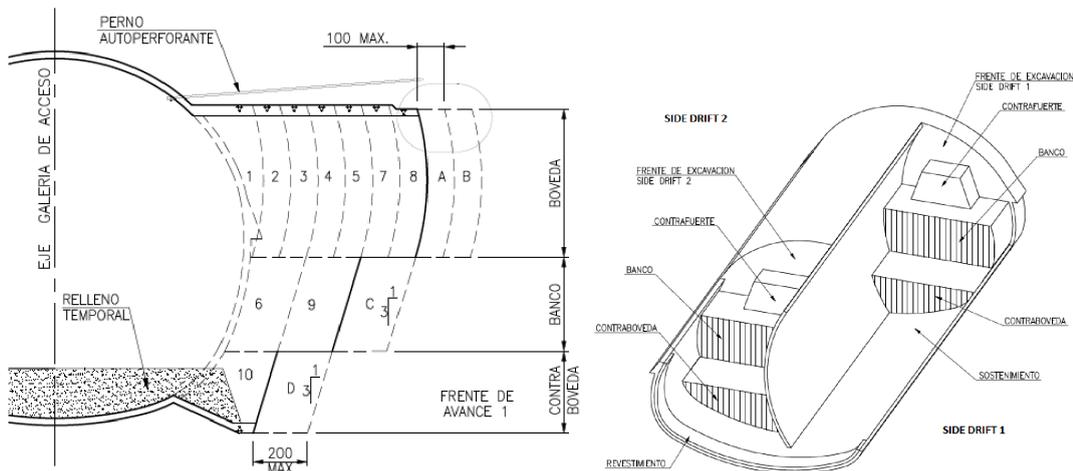


Figura 4-6-2-4: Secuencia de excavación en túnel, estación y galería de acceso. (Fuente: González, 2016)

La altura de la bóveda será de alrededor de 5.5 m lo que permite la circulación de la maquinaria habitual, mientras que banco y contrabóveda tendrán alturas aproximadas de 3,5 m. Estas medidas son orientativas, ya que las dimensiones de la sección varían ligeramente de una estación a otra.

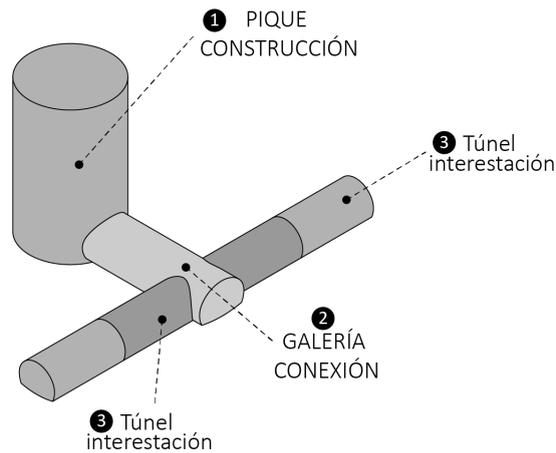
La excavación en varias fases más pequeñas desfasadas entre sí, hacen de esta tarea un proceso lento, con un rendimiento mucho menor que el de la excavación del túnel interestación.

4.6.2.2 Piques de construcción

A diferencia de las estaciones que forman parte integral del trazado de la Línea, los piques de construcción *constituyen obras auxiliares* emplazadas en medio del tramo entre dos estaciones consecutivas, desde cada pique se avanza hacia ambos lados con frentes de trabajo independientes que tienen como fin calar en el túnel estación colindante, de esta forma se

optimiza los tiempos de ejecución de las obras, permitiendo iniciar la excavación del túnel interestación sin tener que esperar el avance en la construcción de las estaciones. 59

Un pique de construcción está formado por un pique vertical de diámetro 15 m, ubicado a un costado del trazado, haciendo necesario la construcción de una galería horizontal que conecte el pique con el túnel interestación y permita la entrada y salida de personal, maquinarias, materiales y escombros de la excavación del túnel. La Figura 4-6-2-5 muestra los elementos que integran un pique de construcción y su conexión con el túnel.



La Figura 4-6-2-5: Esquema pique de construcción típico. (Fuente: González, 2016)

La ejecución del pique vertical, sigue la misma lógica del pique construido para la estación, con avances de 1 a 2 metros, excavados en cuartos opuestos, tal como se detalló en el punto 4.6.2.1

Las galerías que conectan los piques con el túnel interestación poseen una geometría ovalada similar a la geometría de la galería de acceso de la estación, pero con una sección mucho menor, del orden de 70 m², su anchura de excavación es de aproximadamente 9,5 m y la altura alcanza los 9 m, tal y como se puede ver en la Figura 4-6-2-6, estas dimensiones hacen razonable la excavación de una gran bóveda en avances de 1 m y luego, retrasada 4 m, una sección más pequeña para cerrar en contrabóveda en avances de 2 m.

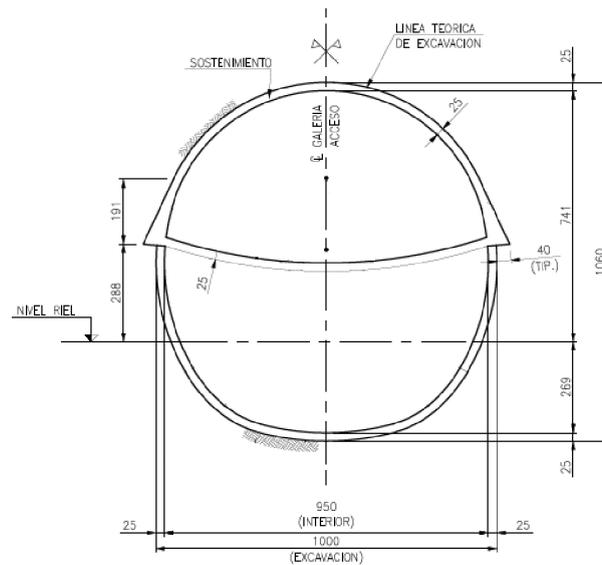


Figura 4-6-2-6: Geometría de las galerías de conexión de piques, Línea 3. (Fuente: González, 2016)
 4.6.2.3 Túnel interestación

Como se ha mencionado, una de las cualidades del método NATM es la posibilidad de trabajar en varios frentes simultáneos, ya que no necesita de maquinaria específica ni grandes recursos para implementarse. Esta condición debe ser aprovechada para reducir los tiempos de excavación del túnel interestación, considerando los bajos rendimientos de un frente en NATM se construyen piques intermedios entre las estaciones, así el número de frentes excavando el túnel simultáneamente se multiplica, logrando un gran rendimiento conjunto de todos los frentes. Rendimiento que en definitiva dependerá del número de piques que sea posible construir.

La Figura 4-6-2-7, representa un tramo de túnel entre dos estaciones con un pique de construcción intermedio, en el que flechas rojas representan el avance de los dos frentes de trabajo, la excavación finaliza al calar el túnel interestación con el túnel estación correspondiente. Al repetir este proceso en cada tramo, se logra la excavación completa de la Línea de Metro proyectada.

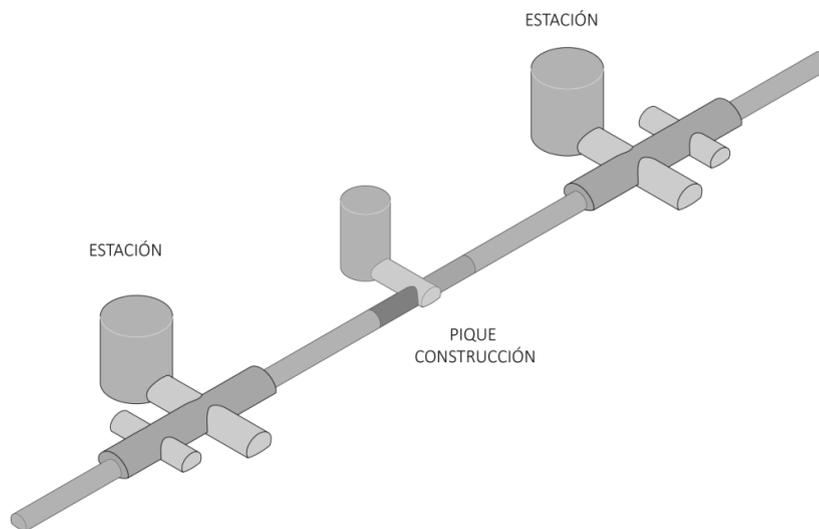


Figura 4-6-2-7: Pique de construcción y tramo de túnel interestación. (Fuente: González, 2016)

El túnel interestación tiene una sección tal que supone excavar aproximadamente 65 m², con una anchura máxima de 10,0 m y una altura de 7,8 m. Esta sección se muestra en la Figura 4-6-2-8

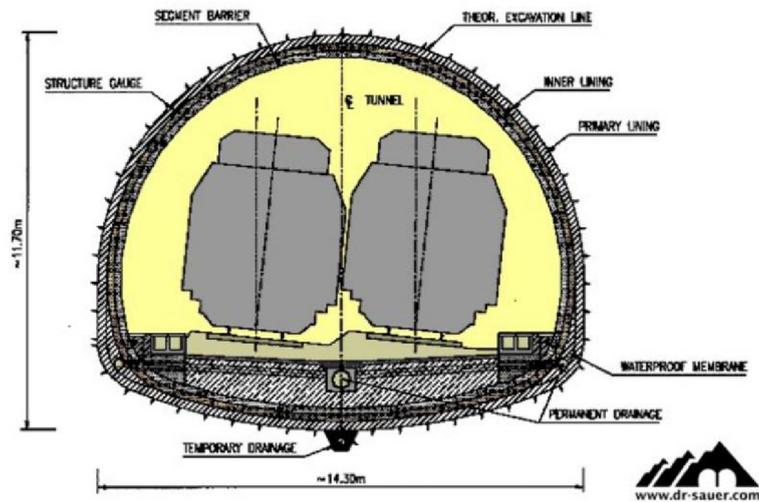


Figura 4-6-2-8: Geometría del túnel interestación. (Fuente: González, 2016)

La excavación, tanto de los piques como de las galerías y túneles se realizará con medio mecánicos tal y como se muestra en la Figura 4-6-2-9

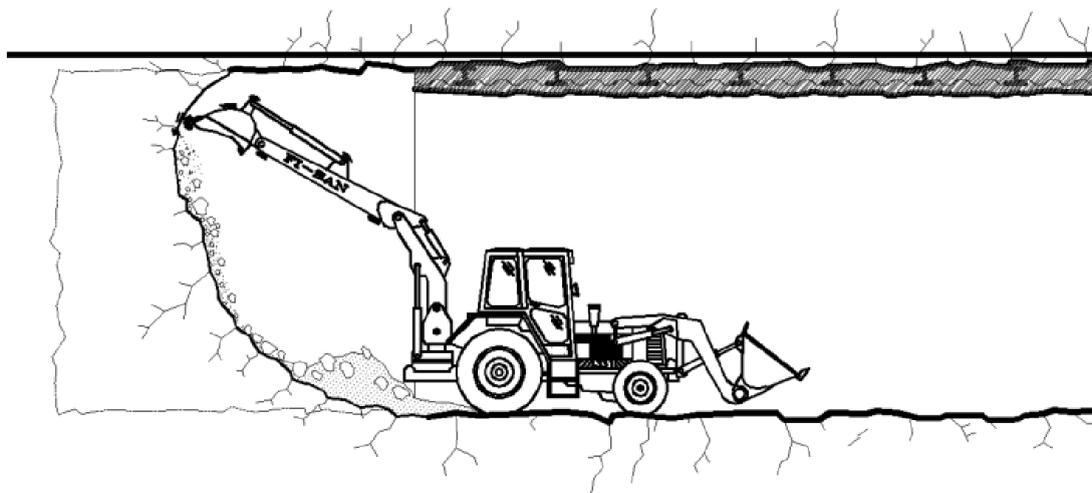


Figura 4-6-2-9: Excavación de túnel por medios mecánicos. (Fuente: González, 2016)

4.7 Una propuesta de diseño de organización de espacios y elementos.

Considerando la serie de variables ya mencionadas, entendidas como una serie de características y elementos que son propios del sistema subterráneo de metro y que, por supuesto, permanecerán casi de forma invariable en el desarrollo de futuras estaciones. Igualmente podríamos proponer otra serie de variaciones que claramente respeten las bases normativas y constructivas que exige el sistema de metro actual. El punto de partida de esta propuesta claramente tiene que ver con el problema de sobrecalentamiento que algunas de las estaciones o líneas de metro de Santiago siguen teniendo hasta la actualidad.

Como podemos observar la empresa de metro de Santiago ha adoptado medidas para suplir las necesidades de ventilación y enfriamiento, pero no es capaz de cubrirlo en determinados periodos, debido a la intensidad de uso del sistema que produce una mayor circulación de trenes producto de la gran afluencia de usuarios. Ahora bien una de las principales características del sistema de metro subterráneo – como ya lo observamos- es su gran masa térmica, propia de la infraestructura y que posiblemente podría usarse no solo en las proximidades de la fuente que produce mayor cantidad de frío. Es así como se propone que una antigua estación subterránea de metro - que está muy cerca de la superficie de la ciudad- podría utilizar la producción de aire fresco y frío, ocurrida en un nivel mucho más alejado de la superficie de la ciudad. De esta forma podría existir una amortiguación de cargas debido a que una estación “más enterrada” apoyaría con las cargas térmicas a su hermana de un nivel más cercano a la superficie, que cuenta con mayores fuentes de calor. Podemos tomar como ejemplo el caso de los desplazamientos de aire que ocurren en algunas escaleras del actual sistema en donde existen desplazamientos de aire que podrían resultar agradables dependiendo de su calidad - según niveles de CO₂ y compuestos orgánicos volátiles- , su temperatura y velocidad.

Un caso específico del desplazamiento de aire entre niveles se puede observar en las escaleras mecánicas del sistema de circulación entre la estación Los Leones de la línea 1 y la estación Los Leones de la línea 9 (Fig. 4-7-2), en donde generalmente, existen desplazamientos de aire asociados a la llegada del tren. El movimiento ocurre entre los niveles -2 y -3 pero de forma dispersa y sin ninguna influencia significativa debido a que se interponen otros 2 niveles. De esta forma el viento de pistón producido en la estación del nivel -2 no influye en la estación del nivel -5, y claramente el viento de pistón producido en el nivel -5 no influye en la estación del nivel -2.

Figura 4-7-1: Escaleras mecánicas del sistema de circulación entre la estación Los Leones L1 y Los Leones L9 en donde generalmente existen desplazamientos de aire asociados a la llegada del tren. (Fuente: Elaboración propia).



Ahora bien la primera piedra de tope a esta propuesta tiene que ver claramente con la temperatura, humedad y velocidades del viento (según índice de molestia por corriente de aire), a las cuales tendremos que poner atención antes de empezar a proponer nuevas configuraciones.

En este sentido y continuando con el hecho de que uno de los objetivos de la presente investigación debería encontrar una justificación para usar los desplazamientos naturales que ocurren dentro de una estación subterránea y que desafortunadamente se “desperdician”. Podemos mencionar en primer lugar que quizás no sea necesario anular tan drásticamente el efecto pistón como ocurre en algunos casos, debido a que las velocidades de los trenes de Santiago están por debajo de lo que fueron pensadas. Esto se debe básicamente a eventualidades que ocurren por la misma composición o forma de la ciudad Santiago. Por ejemplo, la línea 9 tuvo que reducir su velocidad en el tramo que pasa por debajo de la comuna de Providencia debido a reclamos hecho por vecinos que alegaron problema de vibraciones o también como un segundo caso podemos mencionar las relativamente bajas velocidades de las líneas 1 y 2 por las cortas distancias que deben recorrer los trenes entre estaciones. El actual presidente de metro de Santiago (2018- hasta la fecha 2021) Louis de Grange, entregó la estadística de velocidad promedio de los carros de todas las líneas⁸:

En orden de más rápida a más lenta en promedio comercial (velocidad diaria).

- 1.- Línea 4a- 43,9 km/h
- 2.- Línea 4- 36,3 km/h
- 3.- Línea 2- 36,3 km/h
- 4.- Línea 6- 34,7 km/h
- 5.- Línea 5- 34,3 km/h
- 6.- Línea 3- 32 km/h
- 7.- Línea 1- 29,2 km/h

Como podemos ver la velocidad promedio es de 34,4 km/h, que comparada, por ejemplo, con la velocidad media del metro de Shanghái (240 km/h), Tokio (100 km/h)⁹, Nueva York (27 – 89 km/h)¹⁰ o de Madrid (11,8 – 105 km/h dependiendo de la línea)¹¹ resulta ser baja. Es así como ya podemos ver que probablemente no sea necesario aminorar el efecto pistón debido a que las velocidades presentes no resultarán ser una molestia según el índice por corriente de aire (Este tema se convierte en un punto a investigar).

Ahora bien este viento claramente tiene como fuente – como mencionamos anteriormente - el mismo aire disponible en la superficie de la ciudad y debe ser extraído del lugar que cuente con el mejor aire disponible del lugar en donde estará inserta la estación, por ejemplo, lugares que cuenten con vegetación o fuentes de agua que sirva para enfriar o depurar el aire. Ahora bien, cuando este aire cuente con los requerimientos de calidad ya mencionados (En cuanto a humedad y CO2) ¿Qué pasa con la temperatura de este aire?

⁸

<https://www.gonzalovaras.cl/2019/06/27/esta-es-la-velocidad-promedio-de-todas-las-linea-del-metro-de-santiago/>

⁹ <https://www.train-media.net/report/1110/metro.pdf>

¹⁰ https://copro.com.ar/Metro_de_la_ciudad_de_Nueva_York.html

¹¹ <https://ecomovilidad.net/madrid/a-que-velocidad-va-el-transporte-publico/>

Si observamos el sistema actual de metro, los lugares por donde pasará (Fig. 4-7-2) y como se han venido construyendo. La futura línea 9 será excavada y deberá pasar por debajo de otras 4 líneas (L1, L3, L6, L4A), lo que la ubicará con su cota de andenes, como mínimo por debajo de los 25m de la ciudad. Esta ubicación, sin lugar a dudas servirá para la utilización de las propiedades geotérmicas que el sistema tendrá, y que como vimos anteriormente en el apartado 4.5 podrá servir para enfriar como mínimo la misma estación de trenes de la futura estación Sta. Lucia de la Línea 9.

Ya mencionamos a grandes rasgos que una posible solución pasa por el nuevo uso que se le podría dar a la infraestructura dada mediante la **propuesta de un diseño de organización de los espacios y elementos**. Para entender con más detalle cómo podríamos lograr una adecuada organización de tales características y elementos (respetando claramente las bases normativas y constructivas que el sistema requiere) necesitamos entender ciertas cosas que una investigación más detallada puede revelar.

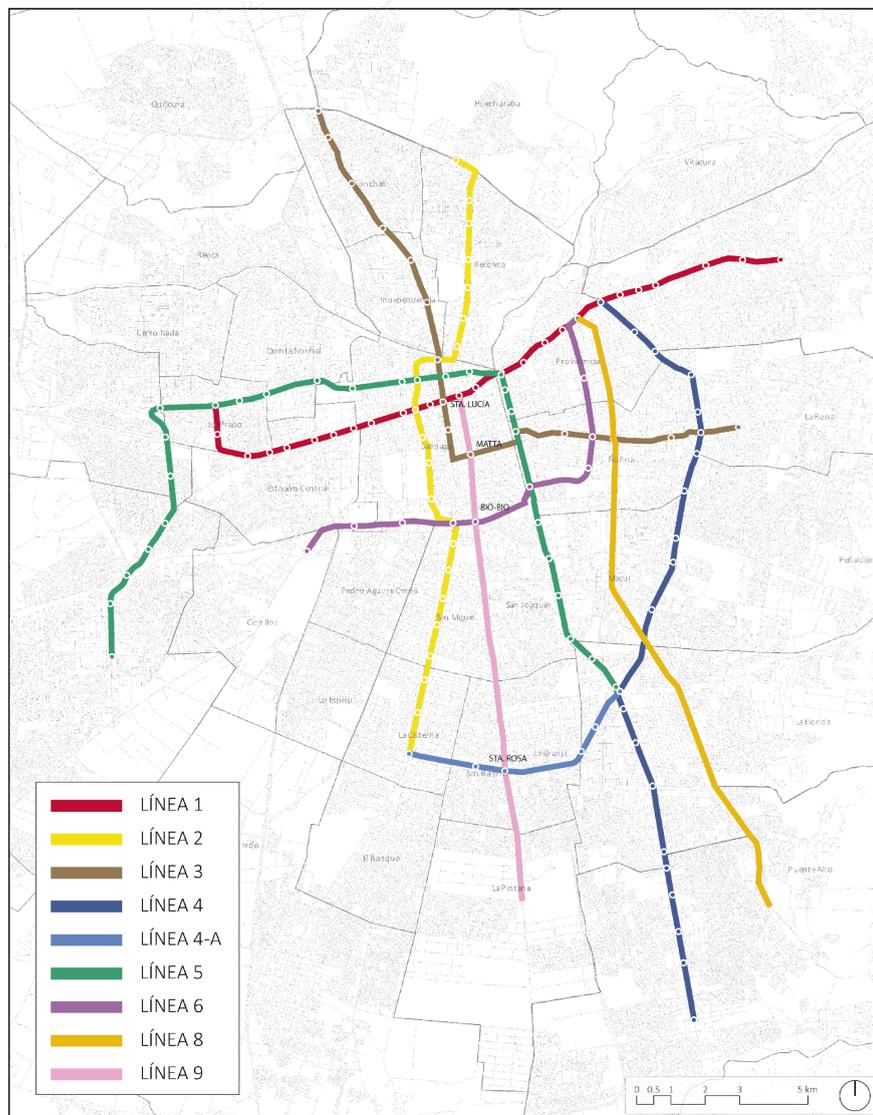


Figura 4-7-2: Plano topográfico de metro de Santiago proyectado para el año 2026, en que las líneas 8 y 9 estarán terminadas.

5 PREGUNTA/HIPÓTESIS:

¿De qué forma es posible utilizar las características térmicas de una estación subterránea, mediante el uso del efecto pistón, para cumplir con los requerimientos de bienestar térmico y ventilación que empiezan a aparecer por la intensidad de uso del sistema subterráneo de metro?

En una primera instancia se asume que esto se puede lograr reordenando y relacionando una estación más alejada de la superficie de la ciudad con una más cercana a la superficie de la ciudad (La que presenta los problemas), utilizando túneles de estación (Zona de andenes) e interestación, mediante las circulaciones que conectan – **mediante una serie de relaciones**- todos los niveles del sistema de una estación de combinación como lo es la Futura estación Sta. Lucía.

6 OBJETIVOS

El principal objetivo de esta investigación es entender cómo, específicamente, **deben ocurrir estas relaciones mencionadas** anteriormente. Para ello la presente investigación busca entender de manera empírica, como los fenómenos ocurren y pueden ser usados dentro de una estación de metro, para el bienestar térmico/ambiental de los usuarios. Se pretende sentar las bases para producir una arquitectura que pueda aprovechar tales fenómenos y características propias de un recinto subterráneo con grandes mecanismos en movimiento.

Los resultados esperados de la investigación in situ, tienen como finalidad determinar decisiones de diseño relacionadas con:

- Medidas y ubicaciones de los accesos, recintos y circulaciones (A modo de corroboración)
-
- Calidad del aire expulsado por los trenes desde los túneles de interestación a los túneles de estación (Temperatura, Presión, Humedad y CO2).
- Entendimiento de la calidad arquitectónica y espacial de la infraestructura propia de metro de Santiago, tanto de sistemas constructivos antiguos como de sistemas constructivos utilizados recientemente.
- Efecto pistón y distribución de su influencia positiva en el sistema de circulaciones subterráneo.

7 Metodología:

Se realizan mediciones de velocidad y calidad de aire en distintas estaciones de metro, con el objetivo de determinar de qué manera influye el diseño de la estación y boca de túneles de trenes en la ocurrencia del efecto pistón para usarlo como mecanismo para desplazar el aire

más frío producto de la inercia térmica. El principal objetivo es determinar, in-situ y a grosso modo, de qué forma el efecto pistón podría influir en el bienestar térmico dentro de una estación y otros niveles y, de qué modo podría replicarse esta sensación de bienestar térmico en otras estaciones. Se instrumentan siete estaciones de la antigua Línea 1, dos estaciones de la línea 3 y finalmente dos estaciones de la línea 4. Se detectan velocidades de viento de pistón que van de los 0,7 – 1 m/s (momento en que el tren entra o sale de la estación) y una velocidad relativa de 0,1 - 0,3 m/s (Cuando el viento se distribuye aproximadamente en la 1/2 o 2/3 partes del andén). La boca de túnel de tren de expansión abrupta v/s la gradual, tiene mayor probabilidad de producir viento y mayores circulaciones de aire, dependiendo del diseño de su sección, proximidad de pozos de compensación y túneles de circulación peatonal, y diseño de sección de túnel de estación, entre otros. Finalmente, se detectan variaciones de temperatura, producto del viento de pistón, que van de los -2°C a las 12:00 hrs y de -1°C a las 16:00 hrs.

8 Elaboración:

Se localizan un anemómetro de cuchara y un medidor de temperatura, humedad y calidad de aire, en el centro y extremo de entrada y de salida del tren de cada estación y en algunos casos se localizan estos instrumentos en la mezzanina de la estación (Fig. 8-1). Las mediciones se realizan durante 3 días no consecutivos en horarios correspondientes a horario valle y punta de metro. Se instrumentan 7 estaciones de la línea 1 (USACH, Estación Central, ULA, República, Los Héroes, U. de Chile y Sta Lucía), 2 estaciones de la línea 3 (Combinación Cal y Canto y combinación U. de Chile) y 2 estaciones de la línea 4 (Los Orientales y Plaza Egaña).

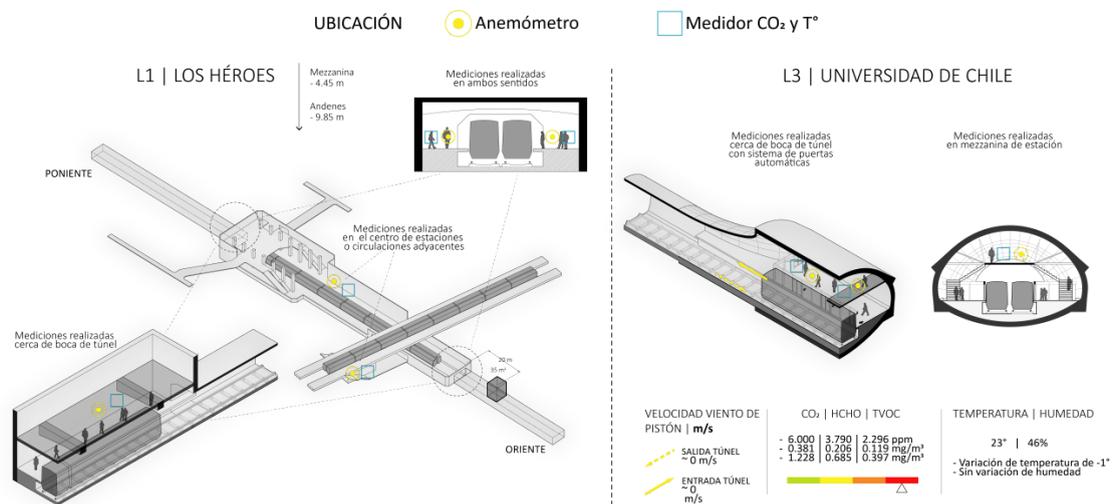


Figura 8-1: Ubicación de instrumentos en 2 de 11 estaciones medidas. (Fuente: elaboración propia).

8.1 Antecedentes

8.1.1 Definición de Instrumentos necesarios para desarrollar el levantamiento de datos

Instrumental físico:

- Medidor de calidad de aire: detección de gases CO₂ , HCHO, TVOC (Compuesto orgánicos volátiles)
- Medidor de temperatura y humedad del aire.
- Anemómetro
- Medidor láser para dimensionar espacios

Herramientas virtuales:

- Rhinoceros 3D¹²

8.1.2 Recintos y zonas instrumentadas

La elección de los lugares mencionados anteriormente se debe a cuatro factores principalmente:

- Forma de construcción y diseño relativamente común para varias estaciones: Estaciones de la línea 1 (Fig. 8-1) y algunas estaciones de la línea 3 y 4.
- El diseño particular de su estación y boca de acceso de tren a zona de andenes (Algunas estaciones de la línea 1, Estación línea 3 combinación U. de Chile y estaciones línea 4 de los orientales y Plaza Egaña).
- Tipo de combinaciones de boca de túnel de interestación (Fig. 8-4).
- Condición de bienestar o malestar asociado a altas temperaturas.

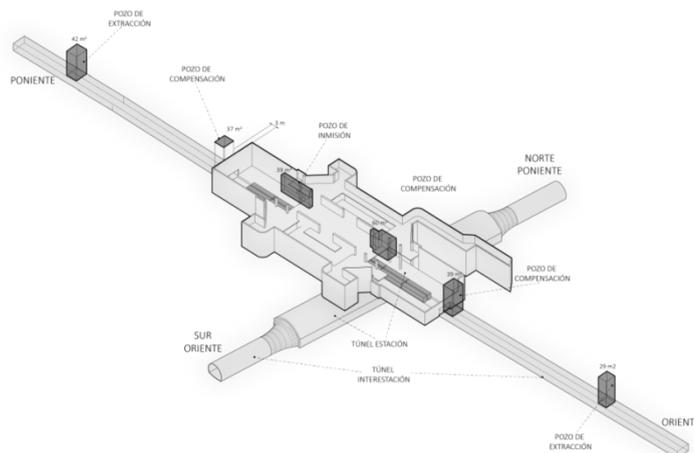


Figura 8-1: Axonometría de estación de combinación Universidad de Chile, construida "a cielo abierto", con elementos presentes en otras estaciones de trenes de la misma línea. Entre estos elementos están los túneles de trenes de sección cuadrada, los pozos de compensación (Cercanos a las bocas de entrada o salida del tren), Pozos de inmisión (sobre la estación) y pozos de extracción (aproximadamente en el punto medio del túnel de inter estación) (Fuente: elaboración propia).

¹² Robert McNeel & Associates (1993-2021). Software de gráficos 3D Rhinoceros 6.0. Seattle, E.E.U.U

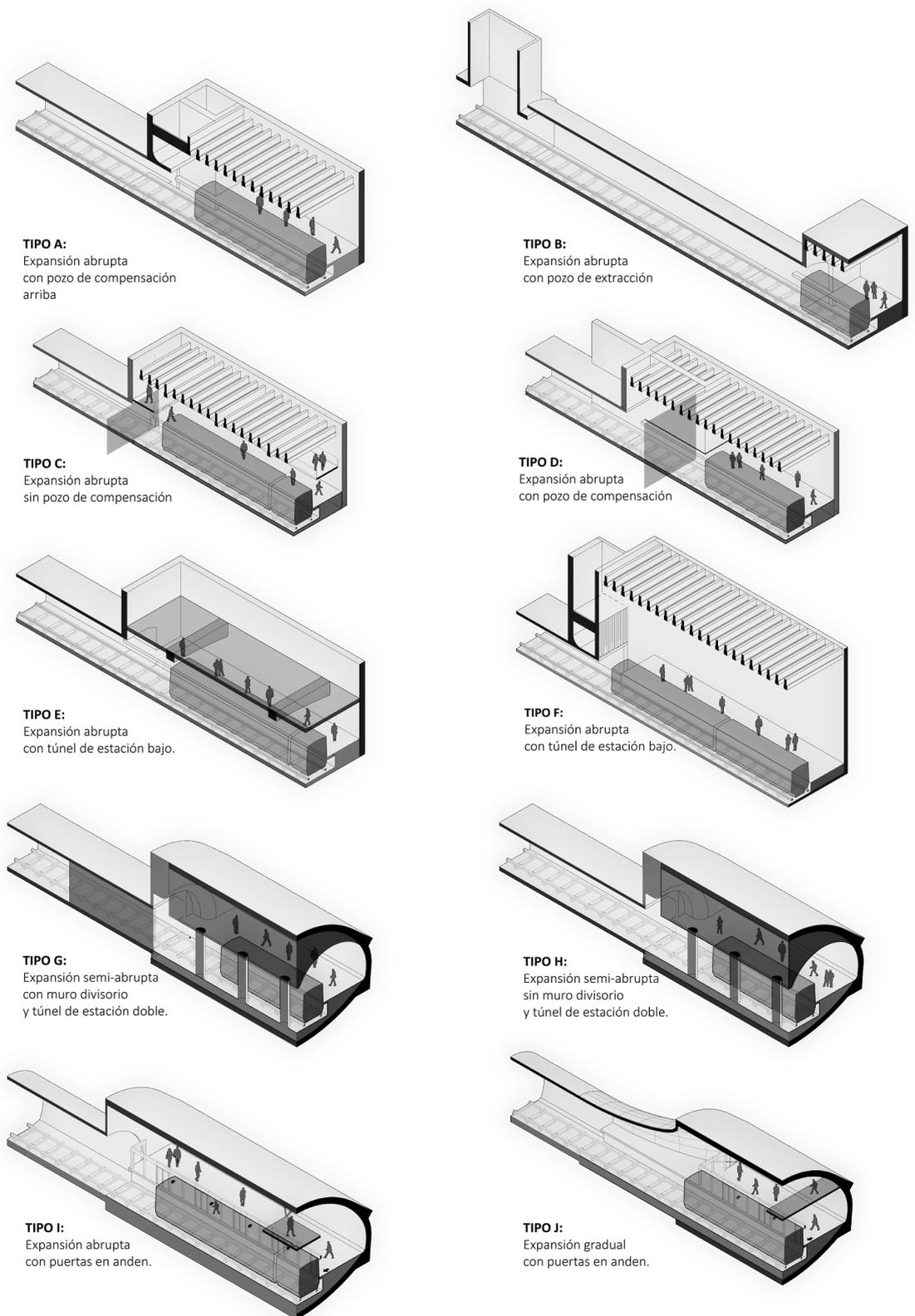


Figura 8-4: Tipologías de boca de túneles comunes instrumentadas en las Líneas 1, 3 y 4 del metro de Santiago. (Fuente: elaboración propia).

9 RESULTADOS

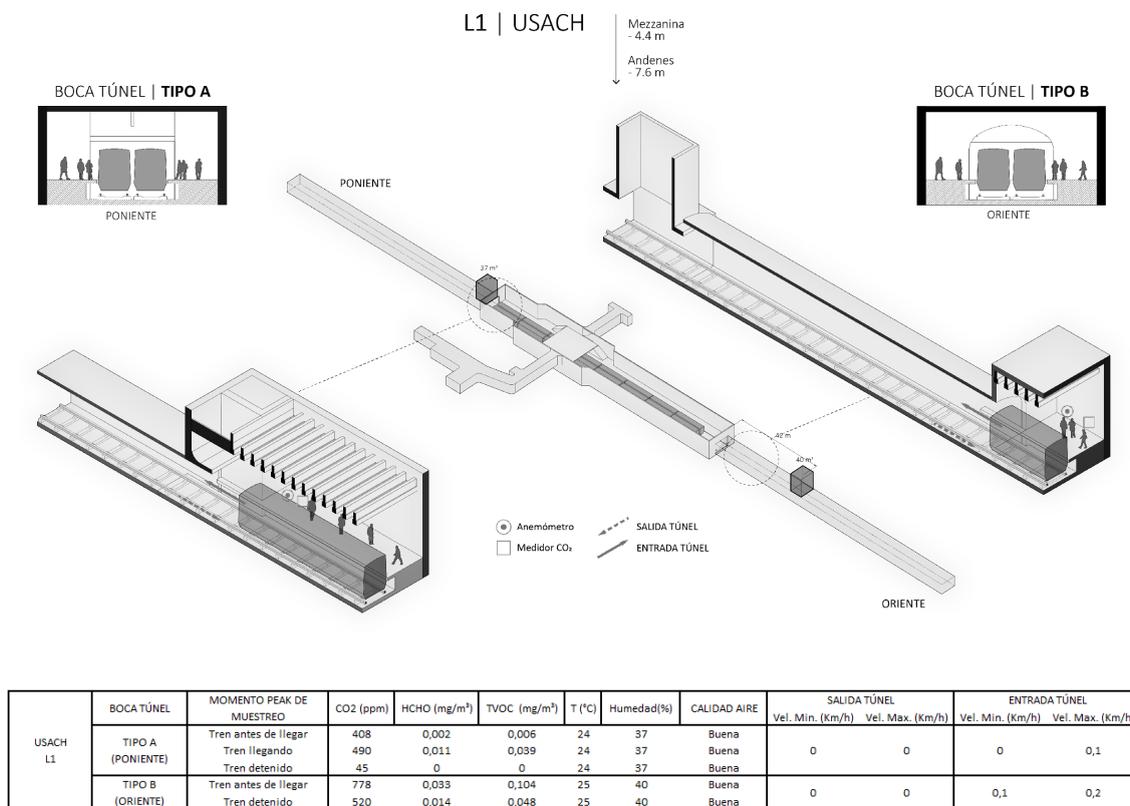


Figura 9-1: Axonometría, corte y lecturas de calidad y velocidad de aire en L1 de estación USACH

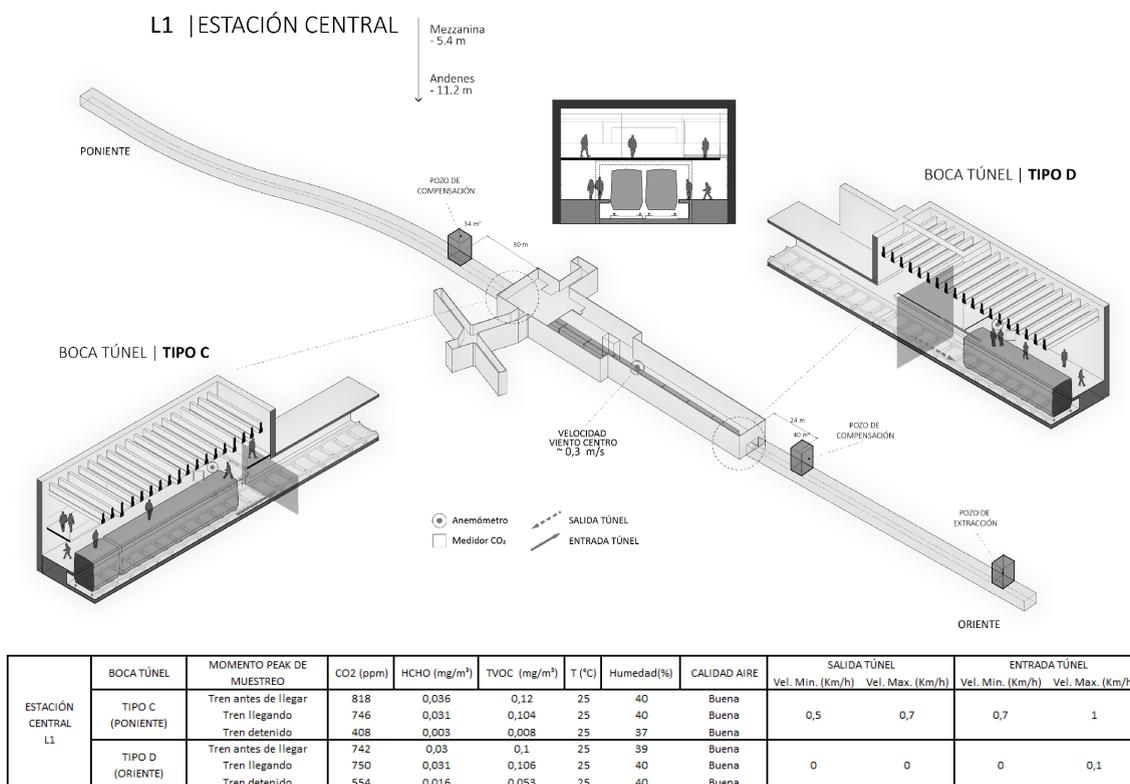


Figura 9-2: Axonometría, corte y lecturas de calidad y velocidad de aire en L1 de estación “ESTACIÓN CENTRAL”

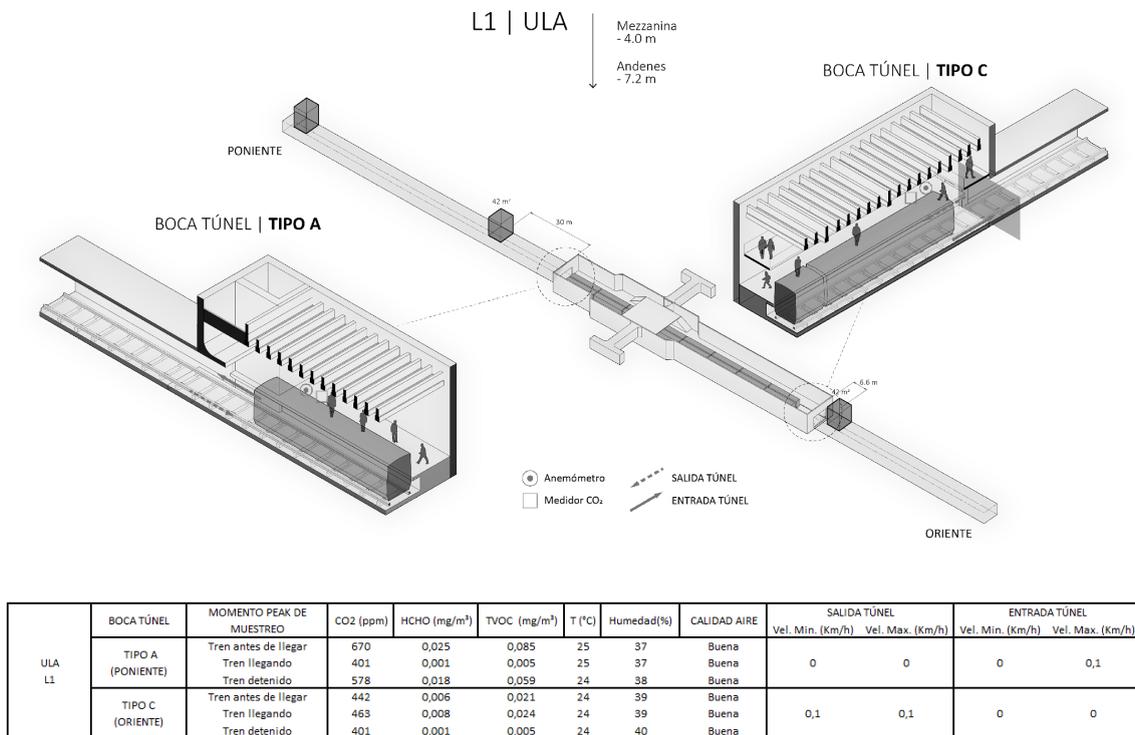


Figura 9-3: Axonometría, corte y lecturas de calidad y velocidad de aire en L1 de estación ULA.

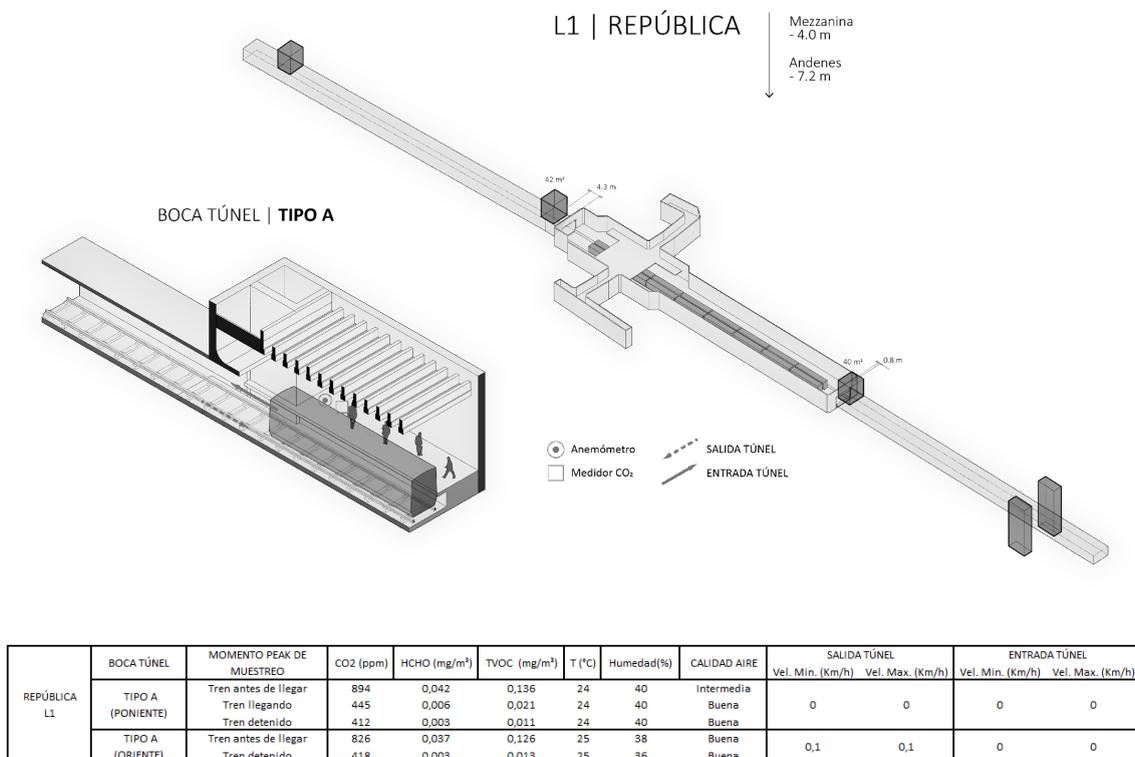


Figura 9-4: Axonometría, corte y lecturas de calidad y velocidad de aire en L1 de estación REPÚBLICA.

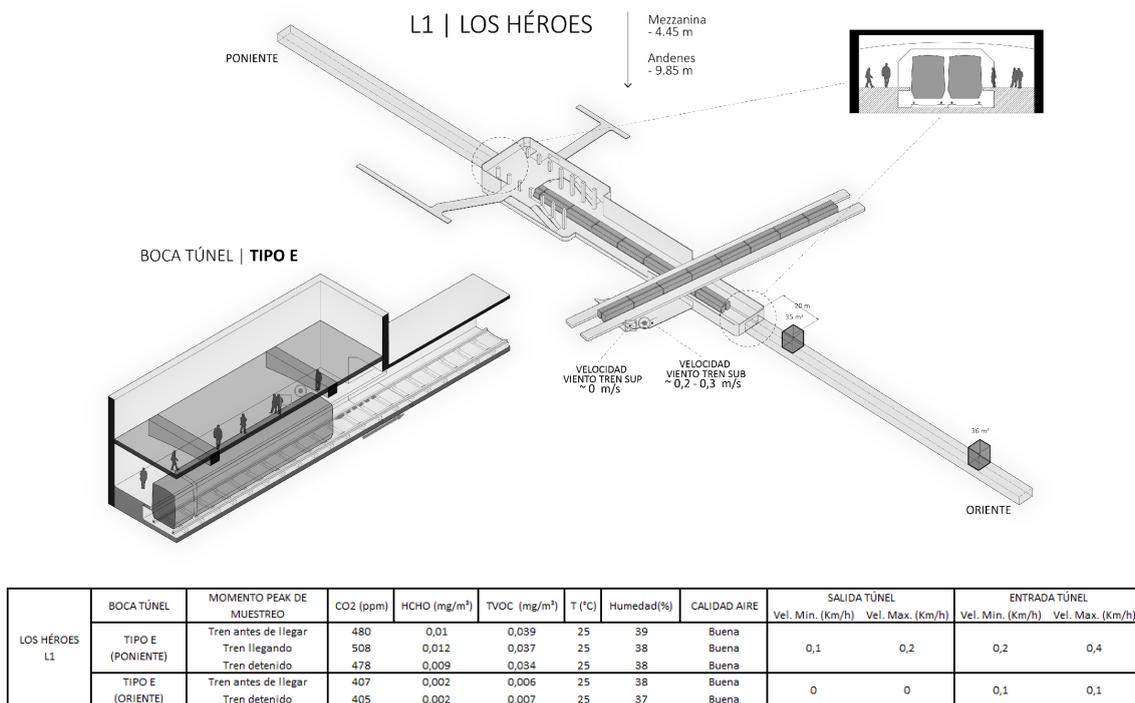


Figura 9-5: Axonometría, corte y lecturas de calidad y velocidad de aire en L1 de estación LOS HÉROES.

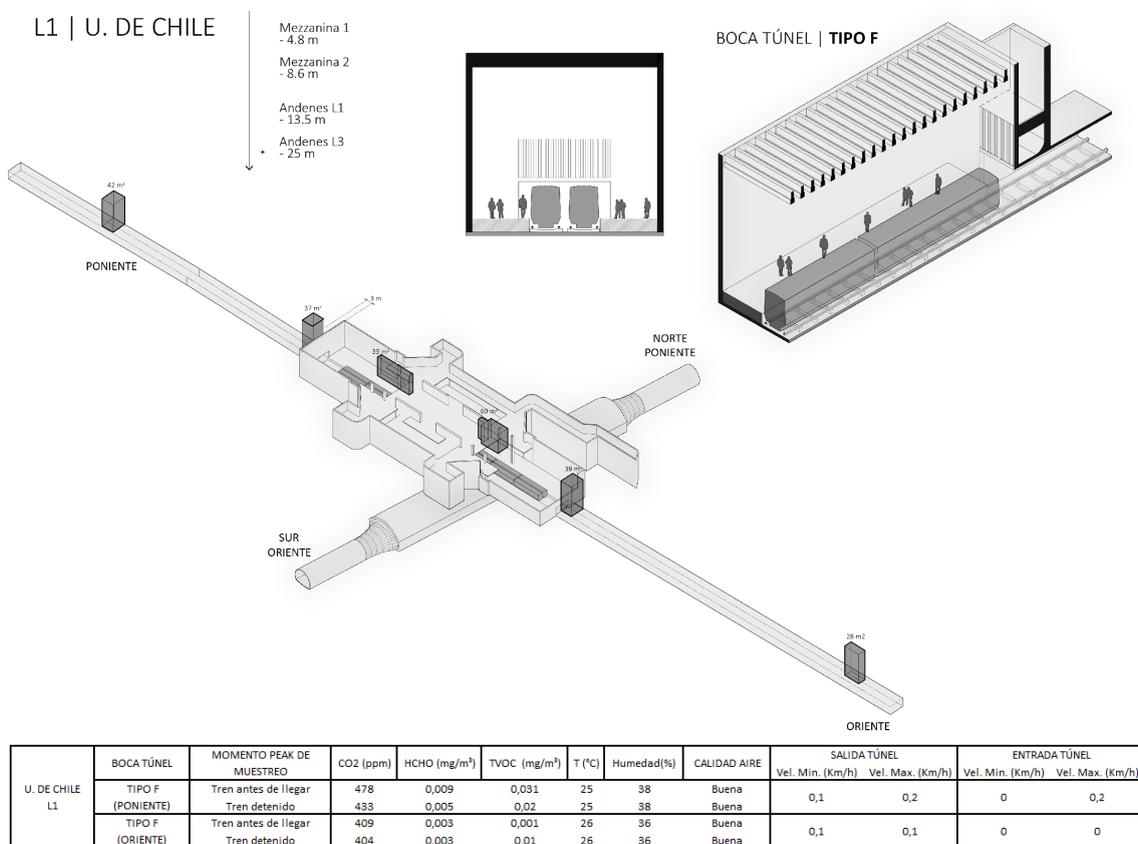
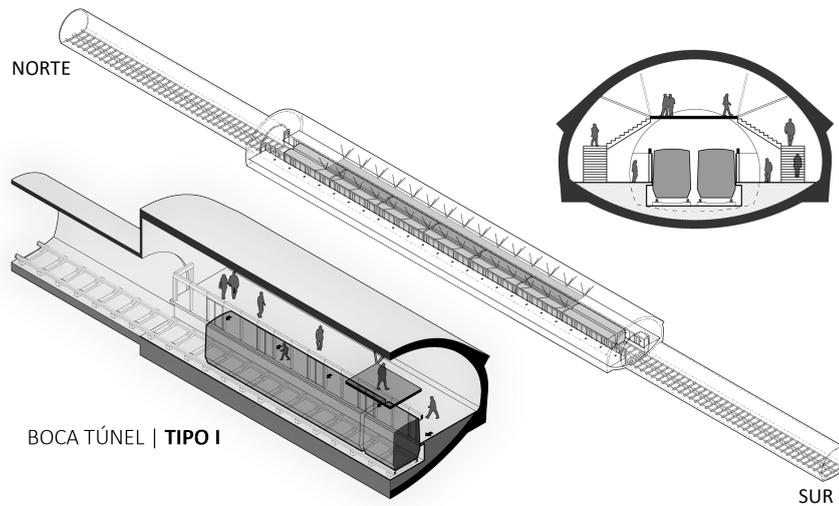


Figura 9-6: Axonometría, corte y lecturas de calidad y velocidad de aire en L1 de estación U. DE CHILE.

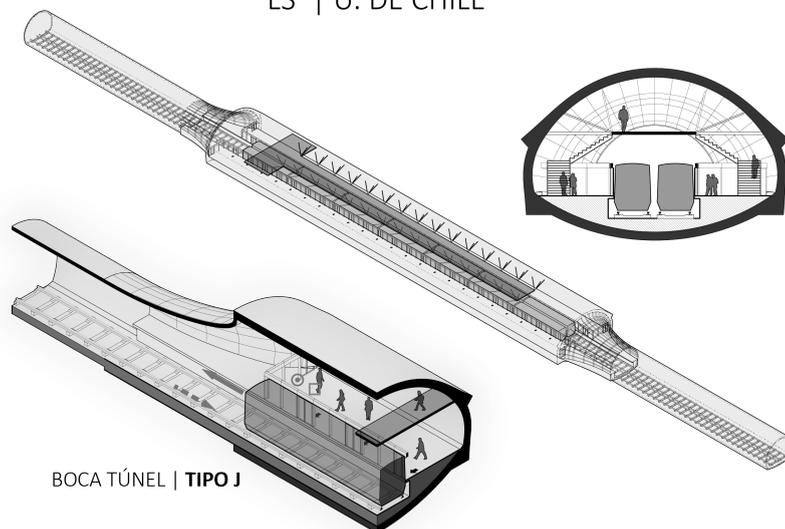
L3 | CAL Y CANTO



CAL Y CANTO L3	BOCA TÚNEL TIPO I (NORTE Y SUR)	MOMENTO PEAK DE MUESTREO Tren antes de llegar Tren detenido	CO2 (ppm)	HCHO (mg/m ³)	TVOC (mg/m ³)	T (°C)	Humedad(%)	CALIDAD AIRE	SALIDA TÚNEL		ENTRADA TÚNEL	
			420 400	0,001 0,011	0,004 0,012	26 24	42 39		Vel. Min. (km/h)	Vel. Max. (km/h)	Vel. Min. (km/h)	Vel. Max. (km/h)
								Buena Buena	0,1	0,3	0	0,2

Figura 9-7: Axonometría, corte y lecturas de calidad y velocidad de aire en L3 de estación CAL Y CANTO.

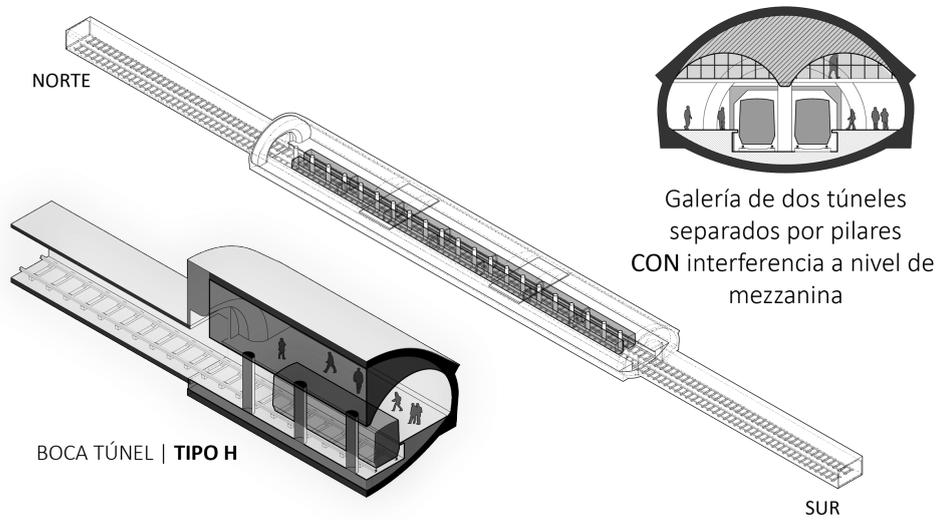
L3 | U. DE CHILE



U. DE CHILE L3	BOCA TÚNEL TIPO J (NORTE Y SUR)	MOMENTO PEAK DE MUESTREO DÍA 1 Tren antes de llegar DÍA 1 Tren llegando DÍA 1 Tren detenido	CO2 (ppm)	HCHO (mg/m ³)	TVOC (mg/m ³)	T (°C)	Humedad(%)	CALIDAD AIRE	SALIDA TÚNEL		ENTRADA TÚNEL	
			6000 3790 2296	0,381 0,206 0,119	1,228 0,685 0,397	23 23 22	46 46 44		Vel. Min. (km/h)	Vel. Max. (km/h)	Vel. Min. (km/h)	Vel. Max. (km/h)
		DÍA 2 Tren antes de llegar DÍA 2 Tren llegando DÍA 2 Tren detenido	418 415 412	0,003 0,003 0,003	0,013 0,012 0,011	25 25 24	41 41 44	Buena Buena Buena	0	0	0	0

Figura 9-8: Axonometría, corte y lecturas de calidad y velocidad de aire en L3 de estación U. DE CHILE.

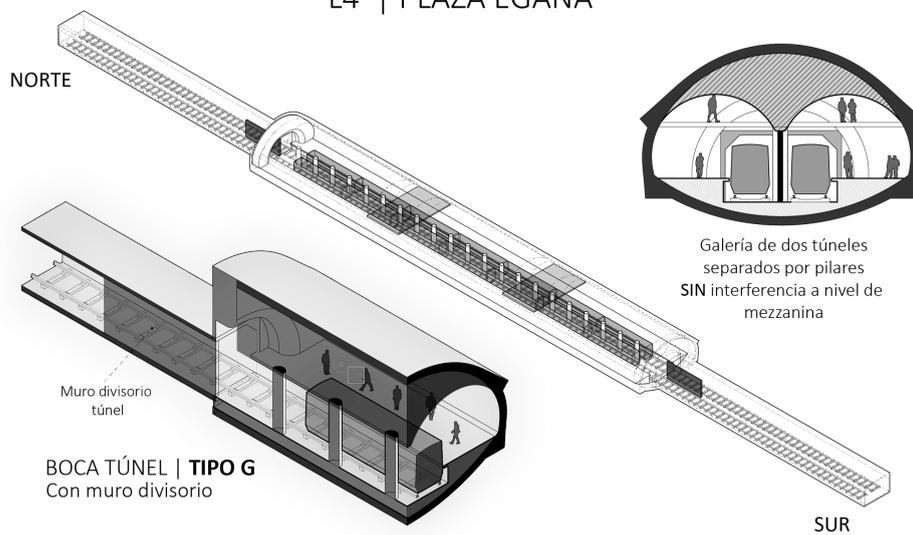
L4 | LOS ORIENTALES



LOS ORIENTALES L4	BOCA TÚNEL	MOMENTO PEAK DE MUESTREO	CO2 (ppm)	HCHO (mg/m ³)	TVOC (mg/m ³)	T (°C)	Humedad(%)	CALIDAD AIRE	SALIDA TÚNEL		ENTRADA TÚNEL	
									Vel. Min. (Km/h)	Vel. Max. (Km/h)	Vel. Min. (Km/h)	Vel. Max. (Km/h)
	TIPO H (NORTE Y SUR)	Tren antes de llegar	710	0,022	0,093	26	32	Buena	0	0	0	0
		Tren detenido	542	0,015	0,055	26	29	Buena	0	0	0	0

Figura 9-9: Axonometría, corte y lecturas de calidad y velocidad de aire en L4 de estación LOS ORIENTALES.

L4 | PLAZA EGAÑA



PLAZA EGAÑA L4	BOCA TÚNEL	MOMENTO PEAK DE MUESTREO	CO2 (ppm)	HCHO (mg/m ³)	TVOC (mg/m ³)	T (°C)	Humedad(%)	CALIDAD AIRE	SALIDA TÚNEL		ENTRADA TÚNEL	
									Vel. Min. (Km/h)	Vel. Max. (Km/h)	Vel. Min. (Km/h)	Vel. Max. (Km/h)
	TIPO G (NORTE Y SUR)	Tren antes de llegar	674	0,025	0,085	26	32	Buena	0	0	0	0
		Tren detenido	420	0,005	0,018	26	31	Buena	0	0	0	0

Figura 9-10: Axonometría, corte y lecturas de calidad y velocidad de aire en L4 de estación PLAZA EGAÑA.

10 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante las mediciones se pudieron observar los siguientes fenómenos que nos pueden ayudar a tomar decisiones, respecto a que elementos existentes en la red de metro, se pueden utilizar o descartar con el fin de mejorar las condiciones térmicas de bienestar asociado a un gran número de usuarios de este sistema de transporte.

El viento de pistón en la mayoría de los casos no tiene influencia en la temperatura de las estaciones de la Línea 1 (Construidas a cielo abierto). Estos se supone que ocurre, relativamente, por la poca profundidad en la que se ubican con respecto a la superficie de la ciudad, lo que genera una baja interacción de la gran masa con el aire exterior que no alcanza a entregar energía calórica a la misma infraestructura de metro compuesta principalmente por hormigón. Adicionalmente uno de los elementos que más influyen, en la anulación casi por completo del efecto pistón, son los pozos de compensación ubicados justo encima de la boca de los túneles de estación (Fig. 10-1).



Figura 10-1: Boca de túnel de estación de metro República. La presencia del pozo de compensación justo encima de la boca del túnel, anula casi por completo el efecto pistón tanto en la llegada o salida de un tren de la estación.

La lejanía de un pozo de compensación de la boca del túnel de inter estación, junto con la pendiente de un túnel de inter estación, son factores que posiblemente influyen en el aumento de la velocidad del viento de pistón. Un ejemplo es lo que ocurre en la estación subterránea de metro de estación central, la cual tiene su pozo de compensación a 30 metros de la boca del túnel poniente. Esto sumado a que la estación está situada en uno de los puntos más bajos de la línea 1, es decir, 11,2 m bajo la cota de la superficie de la ciudad (Fig. 9-2) se produce una pendiente en el túnel de inter estación que la conecta con el metro padre hurtado. Esta situación, es la que produce las mayores lecturas de viento de pistón en la línea 1. Se llega a registrar vientos que varían de los 0,5 m/s a 1 m/s, que luego van perdiendo fuerza a medida que llegan al centro de la estación con una velocidad de hasta 0,3 m/s. Caso similar es lo que

ocurre con la estación los Héroes (Fig. 9-5), que si bien no presenta pendientes significativas en los túneles de interestación, si tiene sus pozos de extracción y compensación más alejados de la boca del túnel (a 250 m lejos del lado poniente y 20 m del lado oriente respectivamente).

También podemos observar que el desplazamiento de aire es más efectivo en salidas de tren de sección oblonga “apaisada”, que en secciones alargadas. Esto podemos observarlo en la boca oriente del túnel de estación de la estación los Héroes (Fig. 10-2). En este caso la altura del túnel de estación es aproximadamente de 4 m con un ancho de túnel de aproximadamente 16 m (Fig. 9-2). Esta situación produce que no exista un cambio abrupto de presión en el entorno, una vez que el tren entra o sale de la estación y adicionalmente se producen desplazamientos de aire a recintos circundantes como lo son las circulaciones que sirven para hacer combinación con la línea 3, en donde se registran vientos que van de los 0,2 a 0,3 m/s. De este modo la zona de escaleras es un lugar desde donde podrían desplazar los vientos producidos por efecto pistón a otros niveles del sistema.

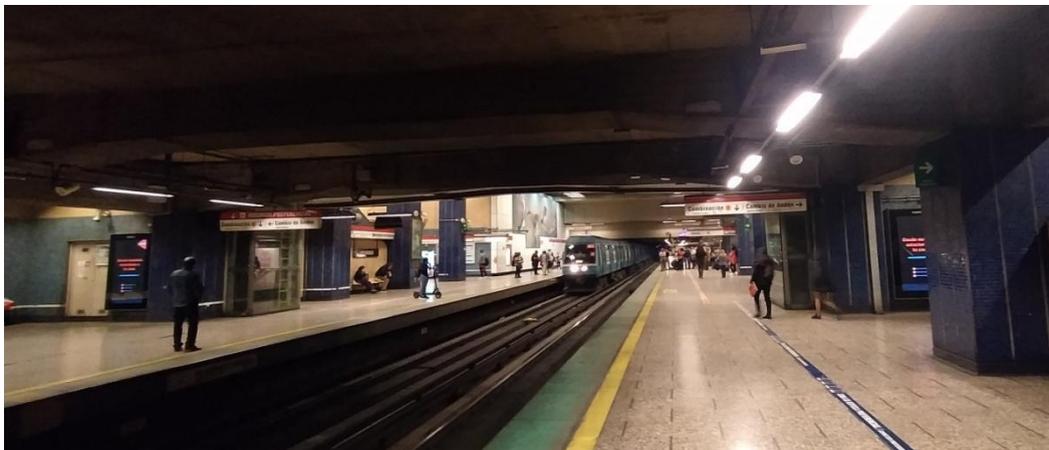


Figura 10-2: Túnel de estación los Héroes.

Por otra parte podemos observar que el viento de pistón tiene mayor presencia en bocas de túneles ajustadas a la sección de los trenes (Fig. 10-3) y no necesariamente las velocidades presentes exceden los máximos permitidos para el bienestar humano (no excede los 0,2 m/s). Para este caso podemos decir que desde este punto el viento de pistón empieza a ser un elemento que puede ser usado al interior de una estación debido a que los vientos no necesariamente exceden los límites permitidos y adicionalmente se pueden llevar a zonas distintas a las fuentes que lo producen.

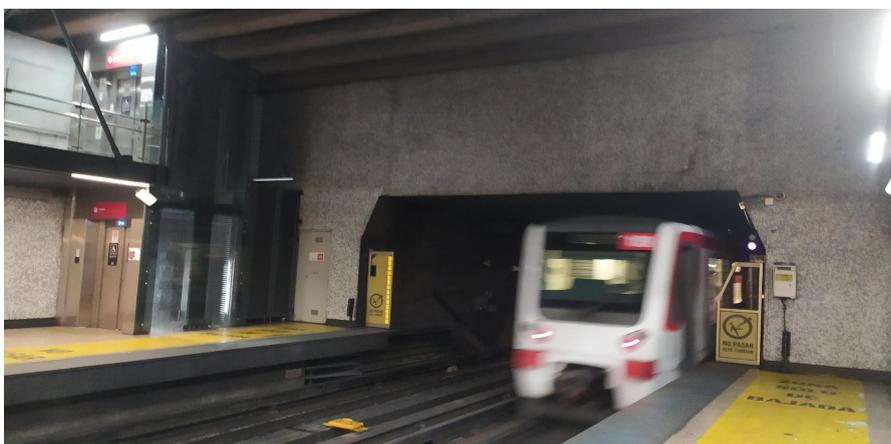


Figura 10-3:
 Boca de túnel
 bidireccional
 ajustada a la
 sección del tren.

El viento de pistón tiene ligera influencia en la temperatura de las estaciones construidas con el método NATM y que adicionalmente su cota de andenes está por debajo de los - 25 m. Dos ejemplos podemos observarlos en: La estación de combinación Cal y Canto (Fig. 9-7), donde se detectan variaciones de -1°C por viento de pistón en la zona de mezzanina y -2°C en la zona de andenes. Y la estación plaza Egaña (Fig. 9-10), que si bien no tiene, su cota bajo los -25 m, también presenta índices de temperatura y calidad de aire favorables debido a la forma de la misma infraestructura, y los tipos de interferencias que existen en el mismo túnel de estación que producen una irrupción en el flujo del viento de pistón, lo que produce una redistribución de los vientos, que casi son imperceptibles por un anemómetro. Esto resulta muy favorable, debido a que el viento que proviene del empuje de la cabeza del tren que en condiciones de máximas lecturas alcanzó los 0,7 m/s (0,5 m/s por sobre el índice de malestar por corriente de aire) tiende a disminuir debido a las obstrucciones tales como la mezzanina, puentes, pilares, y muros divisorios en la boca del túnel de acceso al túnel de estación (Axonometría Fig. 9-10)

La mejora significativa de aire ocurre por el arrastre del tren, mientras que el empeoramiento del aire ocurre por el empuje del tren. Esto se puede observar cuando las lecturas de los niveles de CO₂ empeoran cuando se escucha que el tren subterráneo está llegando, pero empiezan a mejorar cuando el tren es visible y está a punto de detenerse (En general la condición final es mejor que la condición inicial en todos los casos). Si bien esto se puede observar en todas las tablas en el apartado 9 de RESULTADOS, Podemos dar el ejemplo de lo que ocurre en la estación plaza Egaña, en donde encontramos una diferencia de la condición inicial de la final de un 48% menos de CO₂ una vez que el tren ya está completamente detenido. Es decir, el momento exacto en el que el tren se detiene pero la ráfaga de viento de arrastre sigue en movimiento y provocando de esta forma el desplazamiento del aire que empieza a viciarse. Esto quiere decir que el viento de pistón puede ser usado, debido a que si existe una baja significativa de los índices de CO₂, debido a que este viento proviene de la extracción del aire del exterior, que afortunadamente, en este caso, no viene viciado - Considerando como sumidero la superficie de la ciudad, en donde no existen fuentes contaminantes próximas o en la que probablemente existen fuentes importantes, pero que se dispersan en la atmósfera

Otro punto importante a considerar en el caso del comportamiento del CO₂ con respecto al viento de pistón, es la frecuencia con la que circulan los trenes de cada línea. Como podemos ver en la Tabla 10-1, la frecuencia de llegada de un tren es del orden de los 2 minutos con 30 segundos, con un máximo de 3 minutos de llegada de cada tren. En general esta tabla nos muestra la frecuencia con la que probablemente se podría desplazar el aire viciado, por lo menos en la línea 1 y esto sin considerar que la llegada de cada tren (con circulaciones opuestas) tienen llegada de forma alterna con casi 2 minutos de diferencia.

Hora	NORTE			Hora	SUR		
	Andén poniente	Andén centro	Andén Oriente		Andén poniente	Andén centro	Andén Oriente
	Derecha		Izquierda		Izquierda		Derecha
	Nº personas	Nº personas	Nº personas		Nº personas	Nº personas	Nº personas
14:24	5	14	6	14:22		20	14
14:27	6	11	5	14:25	5	11	15
14:29	7	14	7	14:28	3	15	8
14:31	3	18	9	14:30	2	10	14
14:34	2	20	3	14:33	3	5	12
14:37	4	17	7	14:35	7	17	12
14:39	2	11	3	14:38	2	8	10
14:42	5	18	8	14:41	5	15	15
14:47	3	21	8	14:43	6	9	17

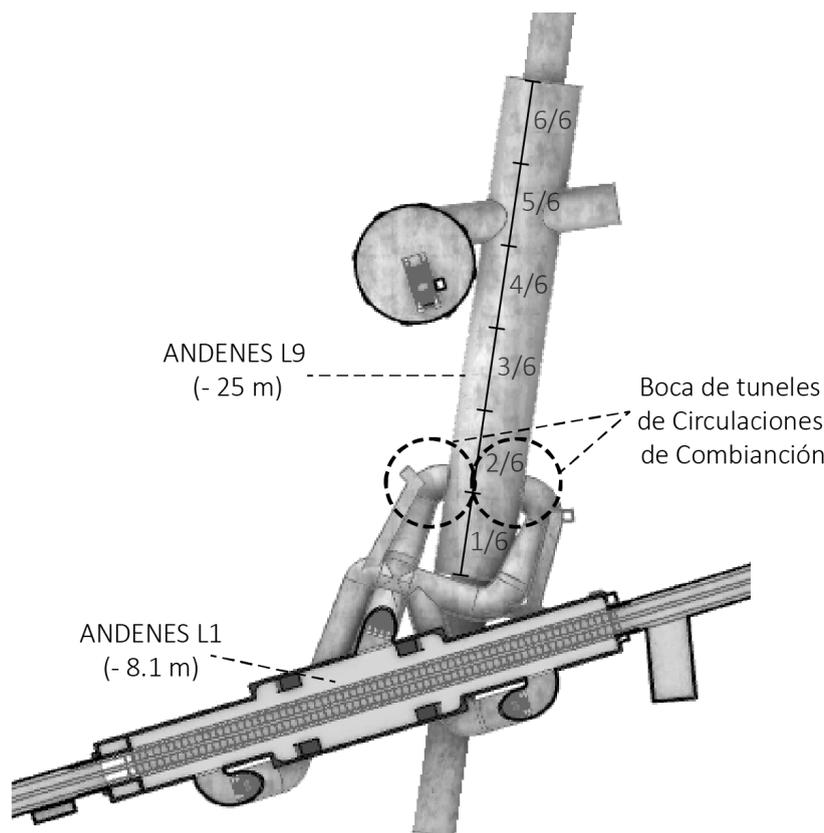
Tabla 10-1: Registro de llegada de trenes en una estación X de la línea 1, en la que podemos observar que la frecuencia de llegada está en el orden de los 2' con 30" a los 3' como máximo. (Fuente: Elaboración Propia).

Como último punto podemos mencionar que los mayores desplazamientos de aire ocurridos lejos de la boca del túnel donde sale el viento de pistón directamente (Con velocidades variables entre 0,1- 03 m/s), Ocurren en circulaciones adyacentes a la boca del túnel del tren que están ubicadas en el andén opuesto al desplazamiento de este. Esto se puede observar en la Figura 9-5. En donde podemos observar vientos producto de la llegada del tren con una máxima de 0,3 m/s. Esta circulación de combinación está ubicada entre la 1/6 a la 2/6 parte del largo total del túnel de estación. Este fenómeno fue percibido en las otras estaciones instrumentadas, pero no con la intensidad necesaria para generar vientos significativos en las escaleras de combinación, que llevan a otras estaciones.

11 CONCLUSIONES

Como ya hemos observado en el capítulo anterior el viento de pistón puede ser empleado en otros niveles, especialmente porque no excede necesariamente el índice de molestia por corriente de aire (como máximo 0,2 m/s), tampoco habría grandes cambios de presión a la salida de cada túnel de interestación, debido a que las velocidades de los trenes no son tan altas y tampoco significaría un empeoramiento de los niveles de CO₂ y por extensión los niveles de calidad de aire. En este caso como también vimos en capítulos anteriores, el lugar al que más deberíamos prestarle atención, especialmente en una estación de combinación, es a las zonas más antiguas de la red. En este caso, como el proyecto se enfoca en la Futura estación de combinación Santa Lucía, claramente el foco de las prestaciones de mejora de las condiciones térmicas de la estación debería estar dirigida a la zona de los andenes de la línea 1, debido a que si la futura línea 9 se proyecta bajo la cota -25 (Como se propone en este mismo escrito), por si misma ya podría suplir sus propias necesidades de aire fresco.

El vínculo entre estas dos líneas resulta crucial para que la futura línea 9 pueda ayudar en la amortiguación de las altas temperaturas que podrían registrarse en la estación superior de la línea 1. Para este caso se propone la relación 1/6 a 2/6 de la proximidad de las circulaciones de combinación a la boca del túnel de estación del nivel inferior, mediante circulaciones cercanas a la boca del tren de inter estación (Fig. 11-1)



Para este caso se propone la relación 1/6 a 2/6 de la proximidad de las circulaciones de combinación a la boca del túnel de estación del nivel inferior, mediante circulaciones cercanas a la boca del tren de inter estación (Fig. 11-1)

Figura 11-1: Imagen de proyecto en la que podemos observar la boca de los túneles de circulación de combinación ubicados en la 1/6 parte de todo el largo del futuro túnel de estación cercano al inicio del mismo túnel (Fuente elaboración propia)

Una de las distribuciones que resultan para este caso más ventajosas a la hora de desplazar vientos de pistón a los niveles superiores, son los que conectan de la forma más expedita posible ambas estaciones de la línea 1 y línea 9 (Fig. 11-2) con un sistema de túneles de circulación excavados con el método NATM, en los cuales se podrá disponer sistemas de

escaleras mecánicas de 4 pistas, con circulaciones de 13 m de ancho con una altura máxima de 3.5 m. (Más sistema de ascensores) con largos suficientes para absorber el gran flujo de personas. En este caso tan solo el sistema intermedio de circulaciones tiene 5.712 m² que podría albergar a un poco más de 17.000 personas a razón de 3 personas/m². Esta disposición de túneles se espera que de cómo resultados viento de pistón aproximadamente del orden de 0,2 – 0,3 m/s con una capacidad de enfriamiento de -2 °C a -1°C hacia la zona de andenes de la línea 1 de la estación Santa Lucía.

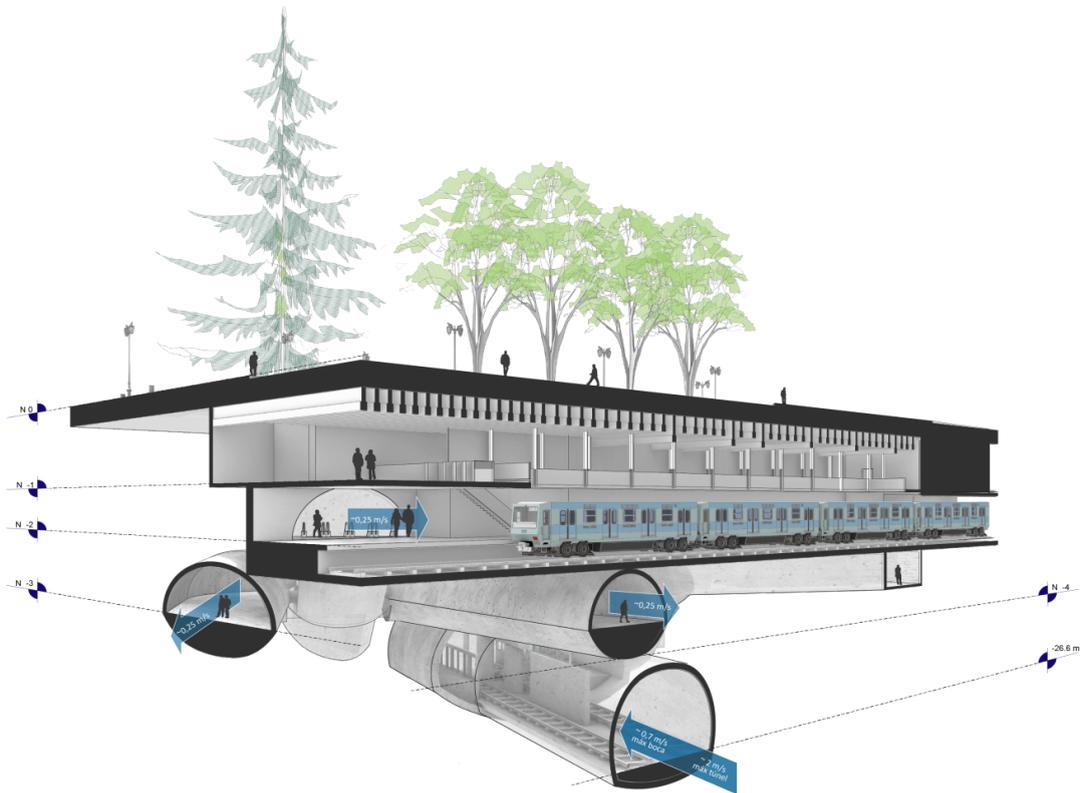
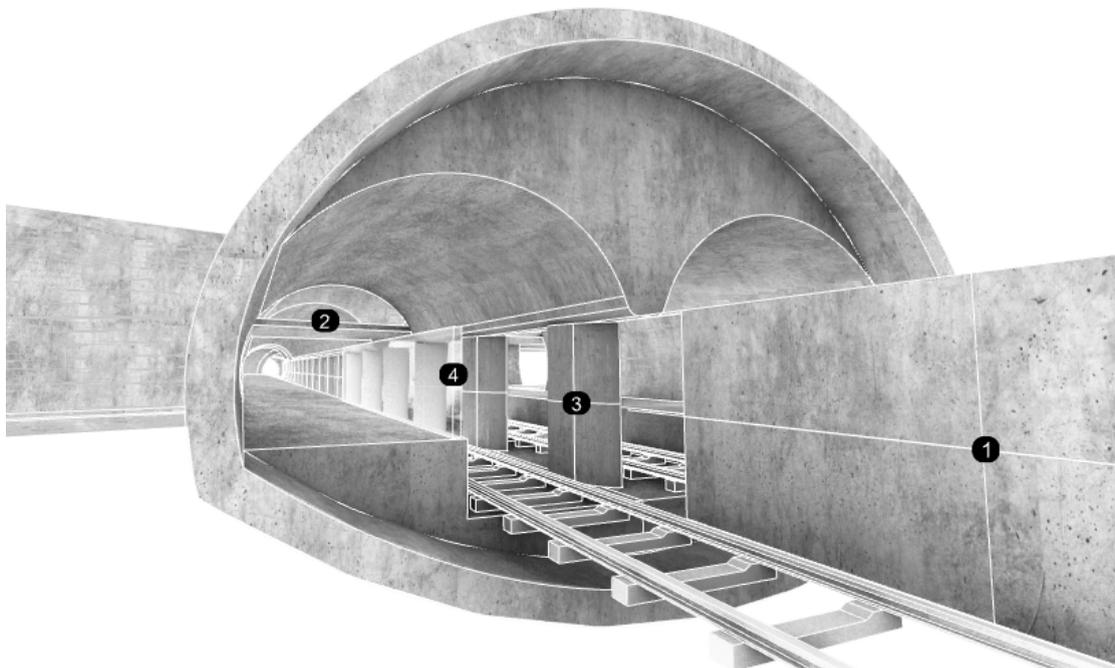


Figura 11-2: Imagen de proyecto en la que podemos observar la ubicación del túnel de tren de la línea 9 con sus respectivas circulaciones de combinación, muy próximas a los andenes de la línea 1 (Fuente elaboración propia).

Uno de los problemas que podría presentar esta disposición, es que el viento de pistón no sería tan efectivo debido a que este podría circular por los túneles de combinación, excediendo el índice de molestia por corriente de aire y adicionalmente podría no prestar el suficiente aire fresco a la red de circulaciones.

Para conseguir una mejor efectividad del viento de pistón, se puede optar por diseños de túnel de estación compacto y con ciertas obstrucciones que reducen la velocidad de viento de pistón. El objetivo de este diseño (fig. 11-3) es que el viento de pistón no sea anulado, pero que sí sea capaz de llegar a otros niveles como pequeñas turbulencias que “inunden” los recintos con aire más fresco. Esto podría ser controlado con elementos tales como muros divisorios en la boca de los túneles (1), puentes sin obstrucción que además cumplen la función de mezzaninas (2), pilarización (3) que divide los dos flujos opuestos de trenes y finalmente puertas automáticas en la zona de andenes (4), que ya son parte de los nuevos sistemas automatizados de la línea 3 y 6.

En esta distribución podemos observar el sistema de dos bóvedas corridas que constituyen al fin de cuentas un solo túnel, sostenido en su centro con una corrida de pilares ovalados que no oponen tanta resistencia al flujo de viento, pero que con una determinada rotación podrían darle cierta dirección al flujo. Adicionalmente podemos observar los puentes o mezzaninas, que en el caso de estaciones como plaza Egaña, cumplen la función de conectar el nivel de andenes con el pique principal, homologando tanto la temperatura como la calidad de aire de ambos recintos, por el viento que pasa por las pequeñas aberturas a una altura próxima a las rodillas de los peatones. El objetivo de tener una temperatura relativamente constante o con cierta calidad en todo el sistema de futura línea 9, se trata de conseguir con



este tipo de conexión.

Figura 11-3: Imagen de proyecto en la que podemos observar el túnel de estación propuesta para la estación Santa Lucía de la línea 9 (Fuente elaboración propia).

Por otra parte una de las ventajas que presenta esta tipología de doble bóveda corrida, es que amplifica el contacto del aire interior del túnel de estación, con esta gran masa que puede absorber más rápidamente el calor producido por las diversas fuentes ya mencionadas. Finalmente podemos mencionar que la misma distribución de los elementos ya mencionados podrían reducir la velocidad del viento de pistón a una casi imperceptible de 0,1 m/s que inicialmente puede venir a 2 m/s como máxima y 0,7 m/s como mínimo. Esto último tomando como ejemplo de lo ocurrido en estaciones como Plaza Egaña y Los Orientales de la Línea 4 construidas con el método NATM.

Considerando que el principal sumidero o fuente de donde tomará aire el sistema de circulación de trenes es la superficie de la ciudad. Cabe destacar que dado el contexto del barrio Santa Lucía es muy posible que se pueda tomar aire fresco de una zona que disponga de un buen aire producto de la presencia de vegetación (Fig. 11-4). La propuesta a este punto se verá en la presentación del proyecto de título, en la que se podrá observar como parte de toda la propuesta general.

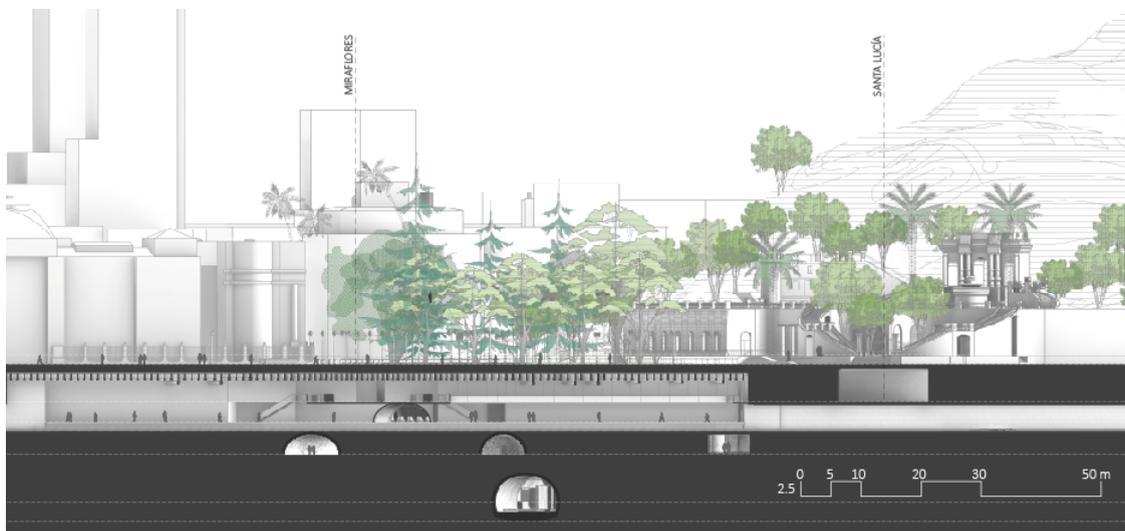


Figura 11-4: Imagen de proyecto en la que podemos observar desde un corte sur la presencia de vegetación tanto en la plaza Benjamín Vicuña Mackenna como en el cerro Santa Lucía, (Fuente elaboración propia).

Finalmente cabe destacar que a modo de corroboración a todo lo mencionado anteriormente, es posible que estas propuestas puedan ser comprobadas mediante un modelo de mecánica de fluidos que puede dar otro nivel de certezas con respecto al comportamiento del aire al interior de estos recintos. A pesar de que uno de los puntos de partida de esta investigación se centró en el manejo de programas que puedan simular el comportamiento de una determinada ráfaga de viento en un túnel subterráneo (Fig. 11-5), no se pudo proseguir debido a que se necesita una simulación que sea capaz de reproducir distintas circunstancias a tiempo real, cosa que la rigidez de las primeras simulaciones del inicio de esta investigación no podían reproducir. Esta investigación como podemos ver adolece de una arista más teórica, pero si ofrece una mirada más práctica, al hacer una propuesta que aproxima al lector a un posible buen uso de la misma infraestructura de metro según las mediciones y condiciones que posibilitan en las distintas líneas instrumentadas.

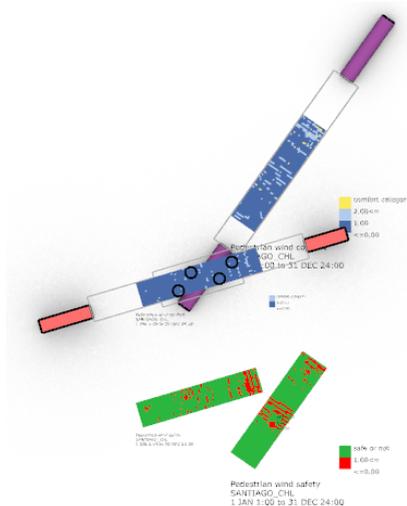


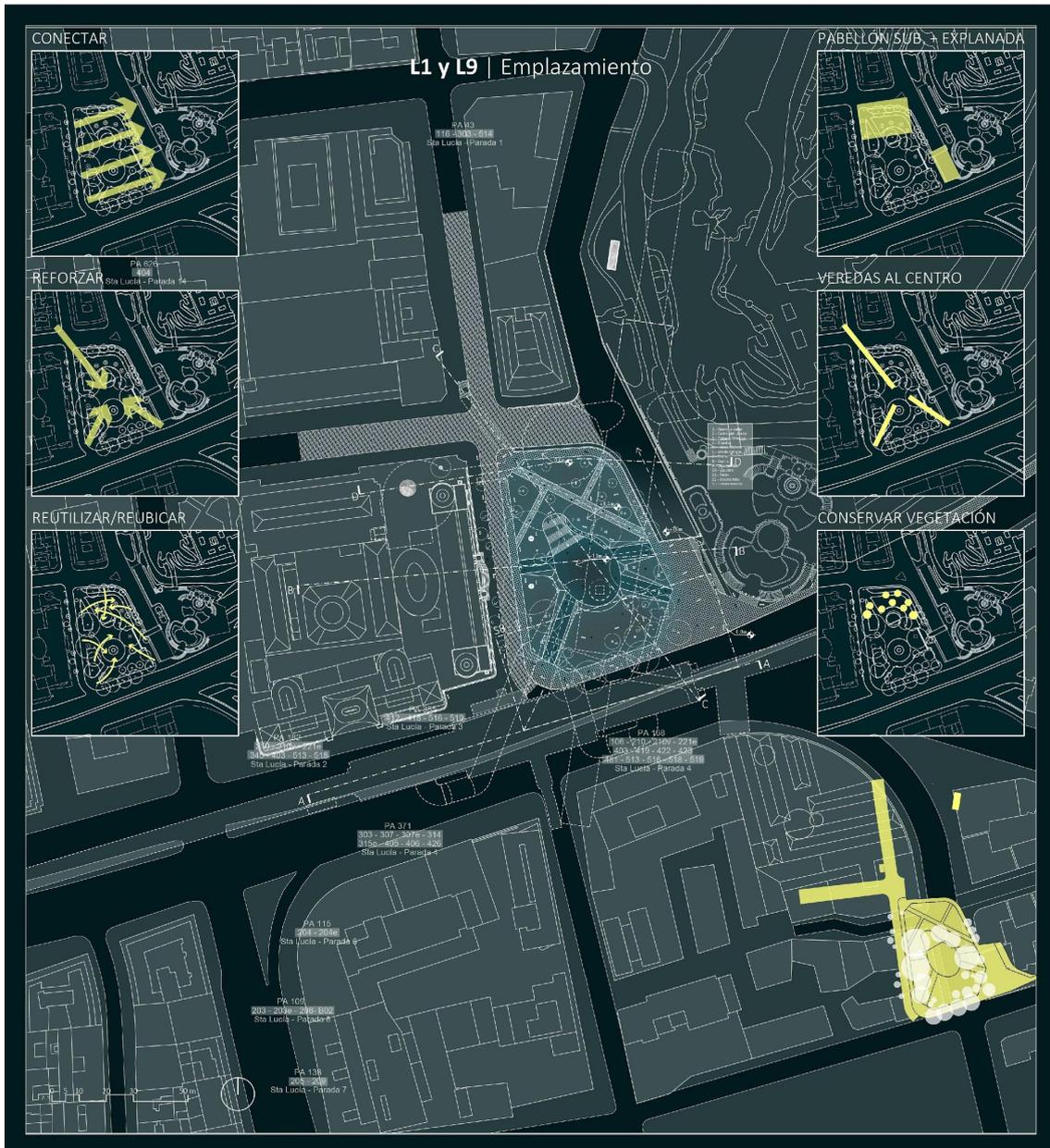
Figura 11-5: Grillas de datos obtenidos de la primera simulación de viento al interior de dos estaciones de metro de Santiago (Fuente: Elaboración Propia).

12 BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

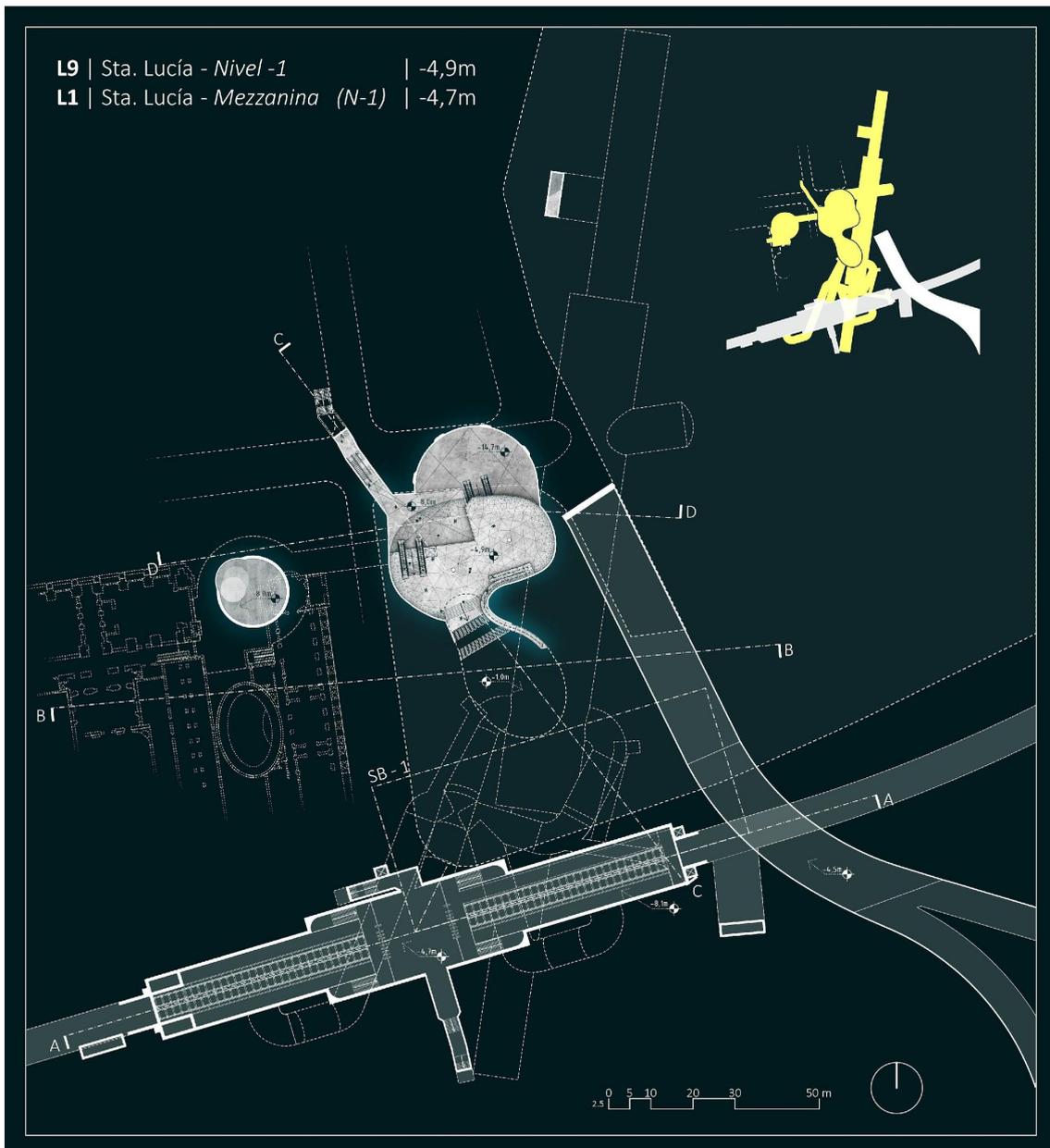
1. González, C (2016). Estudio de pre factibilidad para la construcción de túneles de metro mediante máquinas tuneladoras. Memoria para optar al título de ingeniero civil. Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Departamento de ingeniería civil. Santiago, Chile
2. Herrero, R. (2009). Sistemas de Ventilación en Ferrocarriles Metropolitanos: Panorámica y Estrategias de Diseño. Proyecto fin de Carrera - Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
3. Pan S; Fan L ; Liu J ; Xie J ; Sun Y ; Cui N; Zhang L; Zheng B (2013). A Review of the Piston Effect in Subway Stations . China: College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing. Fuente:
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1155/2013/950205>
4. Robert McNeel & Associates (1993-2021). Software de gráficos 3D Rhinoceros 6.0. Seattle, E.E.U.U
5. Rocío Hidalgo C. (2012). Las estaciones que fundaron el metro en Santiago de Chile. España: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

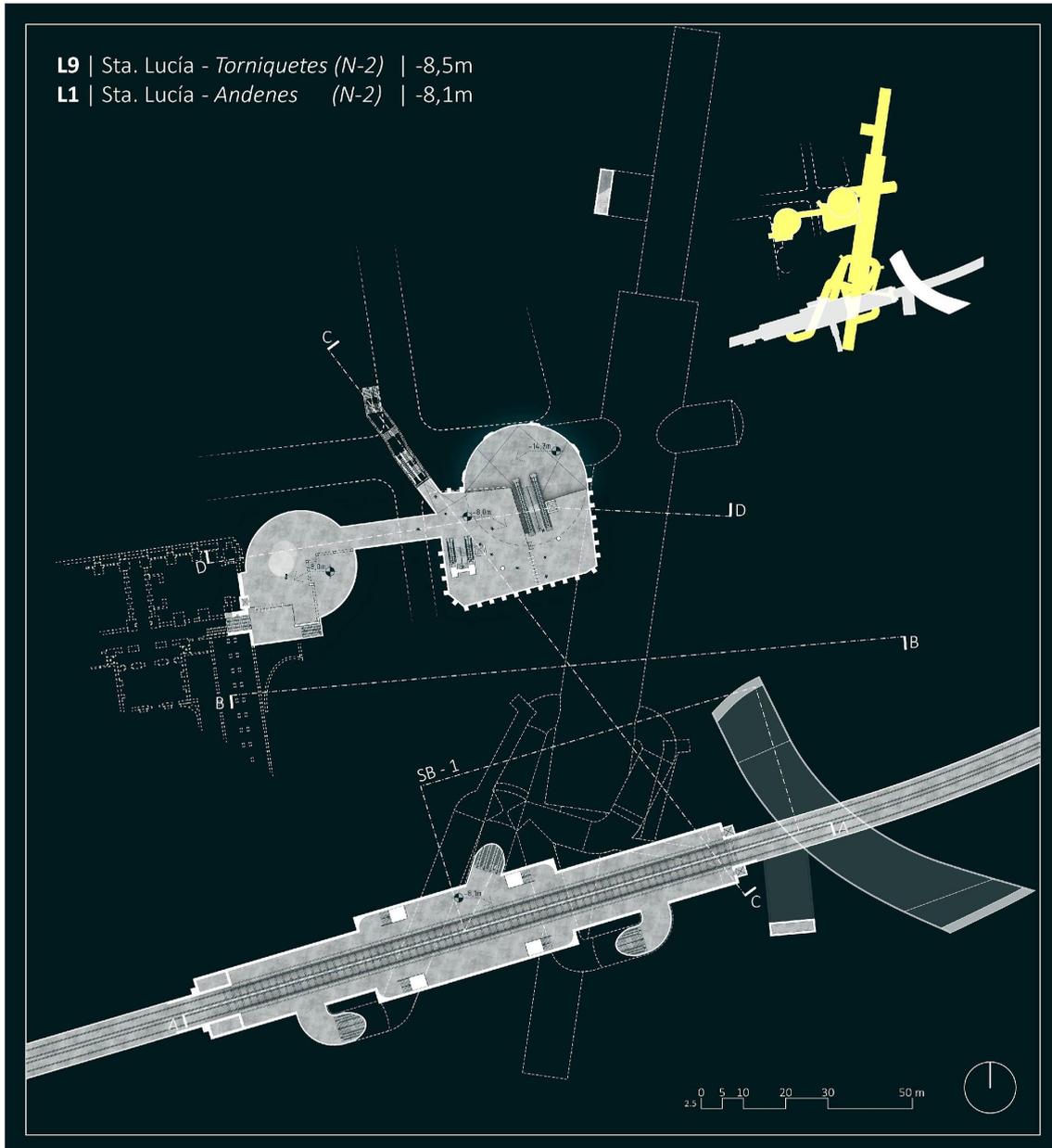
13 ANEXOS

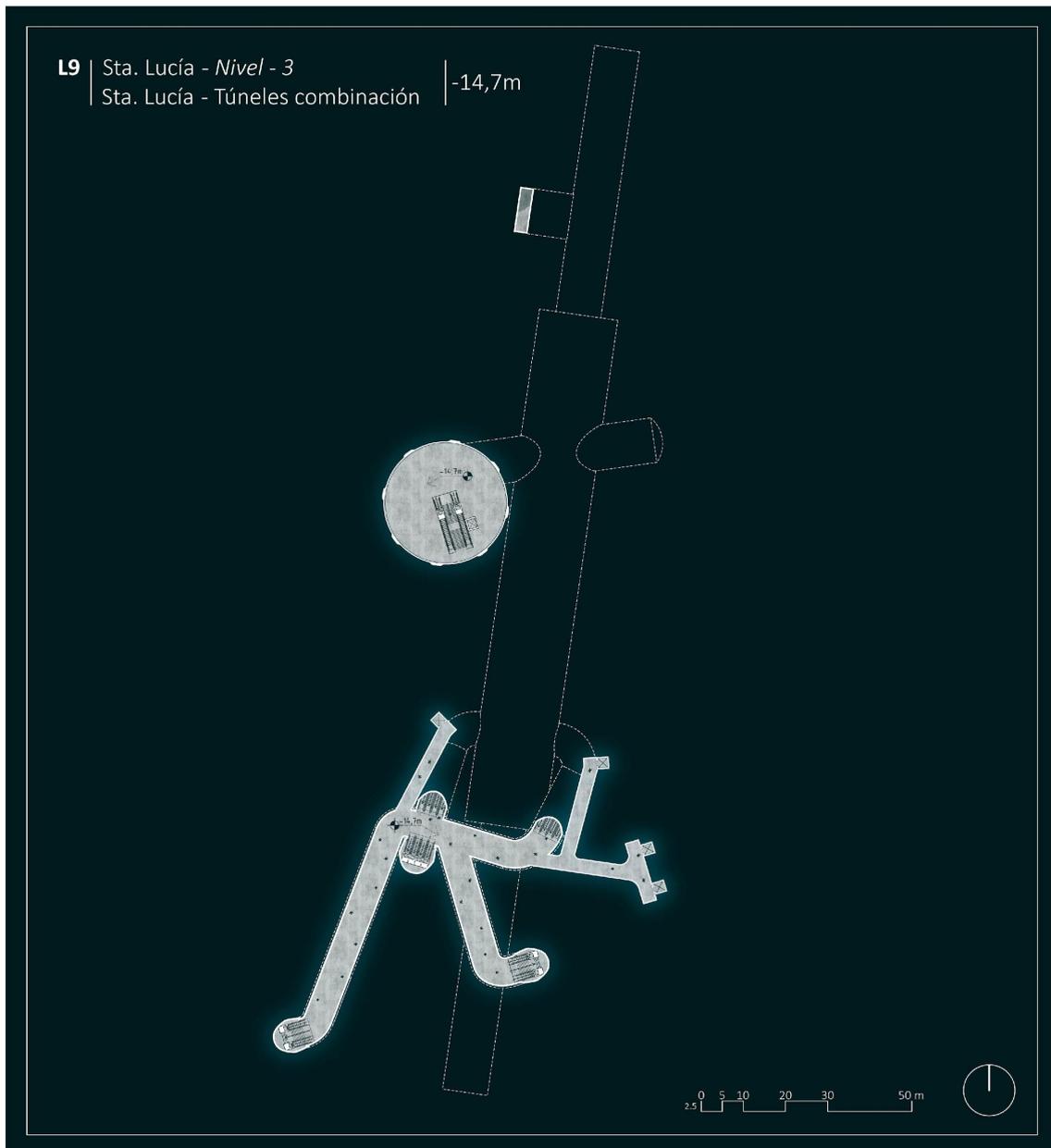
IMÁGENES DE PROYECTO

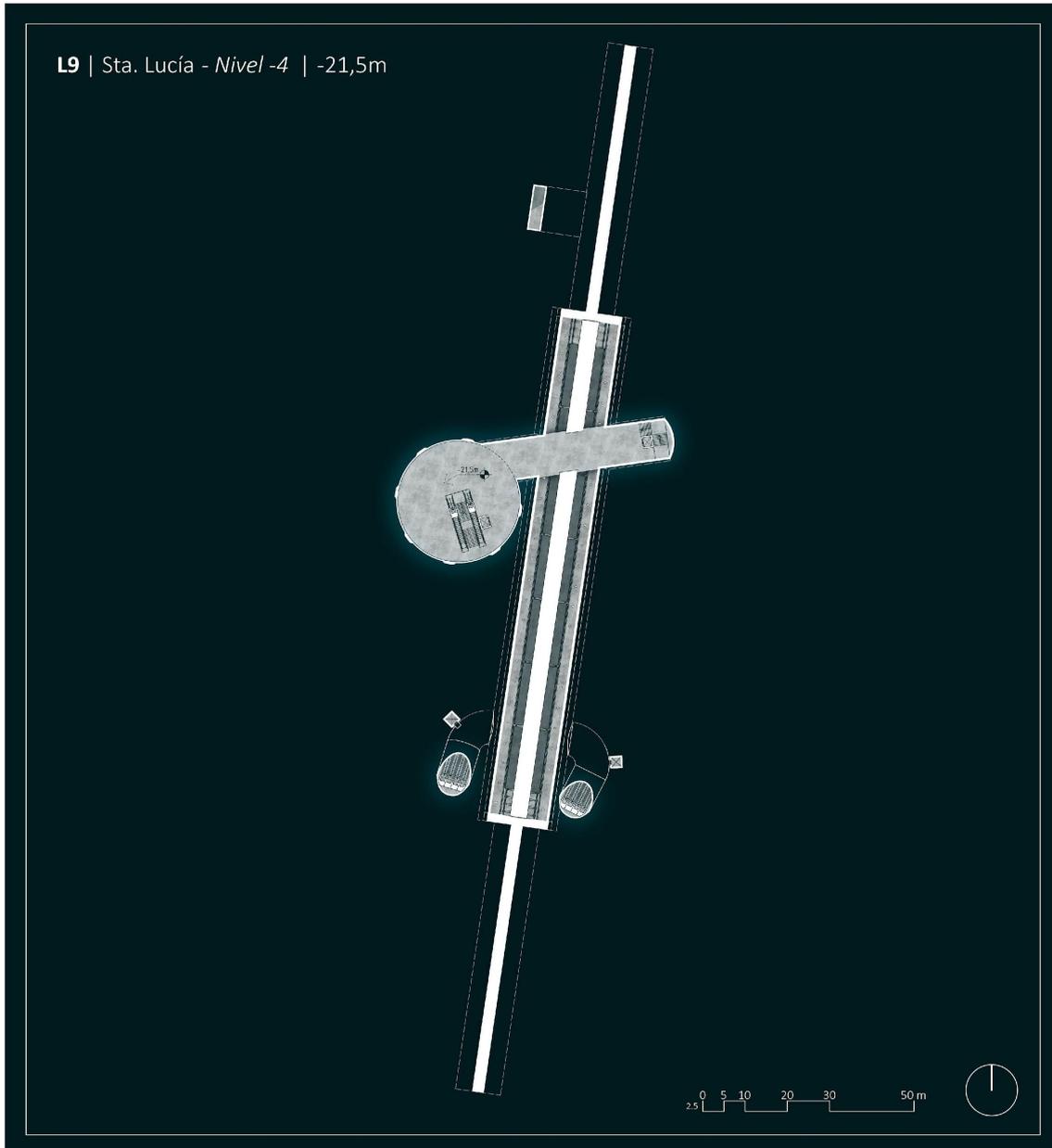


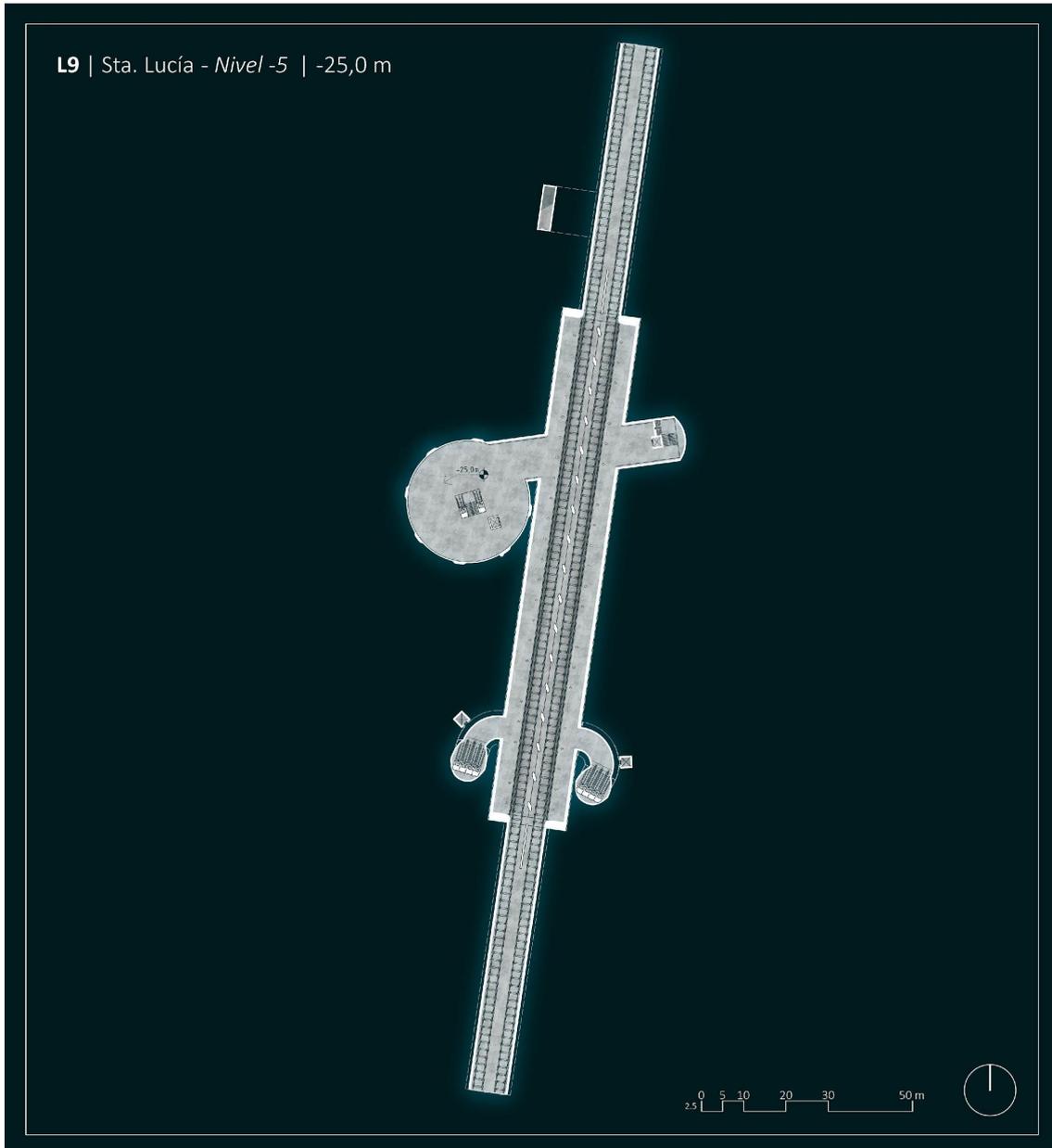




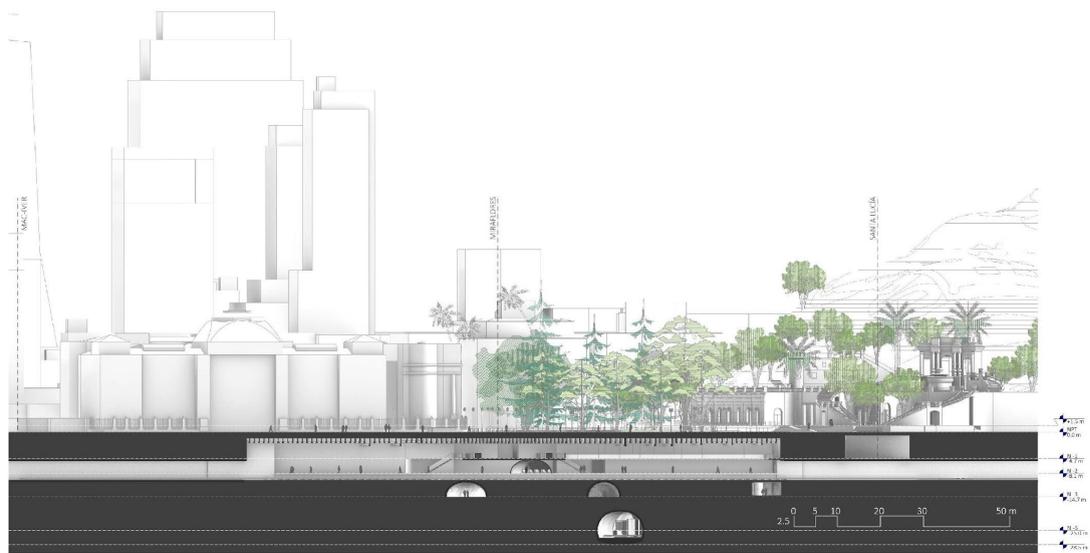








CORTE A-A



CORTE C-C



CORTE B-B



CORTE D-D



