



*“Metodología para el procesamiento de datos  
en el control de deformaciones  
durante la construcción de túneles en suelo  
blando”*

Informe de pasantía para optar al título de Ingeniero Civil

Sebastián Briceño F.  
Prof. Guía: Luis Pisani C.  
Supervisor: Gustavo Estay C.  
Fecha: 06/12/2023

# ÍNDICE

<b>Resumen ejecutivo.....</b>	<b>2</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>3</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>4</b>
Sobre la empresa.....	5
Contexto del Problema.....	5
<b>Estado del arte.....</b>	<b>6</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>8</b>
Objetivo SMART.....	8
Objetivos General y Específicos.....	9
<b>Soluciones propuestas.....</b>	<b>10</b>
Matriz de riesgos.....	11
<b>Evaluación Económica.....</b>	<b>11</b>
<b>Metodología.....</b>	<b>12</b>
Planificación.....	15
<b>Desarrollo.....</b>	<b>16</b>
Implementación.....	19
<b>Medidas de desempeño.....</b>	<b>20</b>
<b>Resultados cualitativos y cuantitativos.....</b>	<b>20</b>
<b>Discusión.....</b>	<b>21</b>
<b>Conclusión.....</b>	<b>23</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>25</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>26</b>
Anexo 1: Marco Teórico.....	26
Anexo 1.1 Túneles.....	26
Anexo 1.2 Estado del Arte.....	29
Anexo 1.3 Reportes entregados por la Unidad de Monitoreo.....	30
Anexo 2: Criterios de Metro.....	33
Anexo 3: Matriz de Riesgo.....	34
Anexo 4: Obtención Datos Tiltmeter.....	35
Anexo 4.1: Formato de Entrega Tiltmeter.....	35
Anexo 4.2: Comparación Datos Brutos vs Promedios Diarios.....	37
Anexo 5: Código Python.....	39
Anexo 6: Archivos Excel.....	41
Anexo 6.1 Datos.....	41
Anexo 6.2 TiltMeter Diario.....	41
Anexo 6.3 Gráficos.....	42
Anexo 7: Gráficos.....	44
Anexo 8: Dashboard.....	45
Anexo 9: Manual de uso del producto.....	47
Anexo 10: Carta Gantt.....	51
Anexo 11: Encuestas.....	52
Anexo 11.1 Evaluando Gráficos.....	52
Anexo 11.2 Evaluando Dashboard.....	56
Anexo 12: Evaluación Económica.....	58
Anexo 13: Diferencia Relativa Transversal.....	59

## Resumen ejecutivo

En el presente informe de pasantía se hablará sobre el contexto donde está inmerso el alumno y la oportunidad de mejora encontrada, haciendo una investigación del Estado del Arte se elaborará una propuesta de solución, la cual será evaluada económica y se identificarán sus distintos riesgos con sus respectivas respuestas de mitigación. Para llevar a cabo la implementación de la solución se definirá una metodología de trabajo, la cual será desarrollada y explicada en este informe, para finalmente exponer los resultados obtenidos con sus respectivos comentarios y conclusiones.

La excavación en suelo blando provoca un asentamiento en el terreno producto de la reacomodación de las partículas, las cuales en un tiempo determinado adquieren un nuevo estado de equilibrio, medir la deformación producida es crucial para un buen desempeño de la construcción de un túnel utilizando la metodología NATM (New Austrian Tunnelling Method), lo cual asegura la seguridad de la obra y permite tomar decisiones con criterios de ingeniería determinantes para el desempeño del proyecto.

Hoy en día se está llevando a cabo la construcción de la Línea 7 del Metro de Santiago supervisada por la empresa CyD Ingeniería, la cual cuenta con una afiatada historia con Metro desde el año 1993 en la construcción de la L5. La excavación de este nuevo túnel afecta a distintas estructuras existentes tales como las actuales líneas de Metro en funcionamiento, las cuales deben mantener su operación sin ningún tipo de inconveniente. Para asegurar esto se debe monitorear el asentamiento y cumplir con ciertos umbrales de seguridad establecidos por Metro.

Esta labor requiere hacer un procesamiento de los datos obtenidos en terreno para luego hacer cálculos matemáticos y así mostrar con gráficos intuitivos y claros los fenómenos de interés. Elaborar esos reportes es un trabajo que se debe realizar al menos una vez a la semana, por lo que requieren una inversión de tiempo considerable, debido a que se necesita un set de gráficos por cada sector estudiado, se deben mostrar el cumplimiento de dos principales criterios de admisibilidad relacionados con las pendientes longitudinales y transversales en las líneas en operación, estos parámetros no se obtienen directamente de los instrumentos de medición por lo que se debe determinar la metodología de cálculo, para luego programar la automatización de estos procesos y lograr que se adapten a cualquiera de los tramos estudiados, finalmente se recopilan los gráficos de los distintos tramos en un dashboard en donde se incorpora información adicional que permite una mejor comprensión del asentamiento producto de la L7 y aporta a una mejor toma de decisiones. Los gráficos y el Dashboard fueron evaluados por distintos colaboradores de la empresa mediante una encuesta según criterios previamente definidos, los cuales tuvieron una buena respuesta, y el

tiempo de demora de la elaboración del Dashboard se redujo en un 90%, superando el objetivo de este proyecto.

## Abstract

Within this internship report, the student will discuss the surrounding context and the opportunity of improvement identified. By conducting a State of the Art investigation, a proposed solution will be developed. This solution will undergo economic evaluation, and its various risk scenarios with their corresponding mitigation responses. To execute the implementation of the solution, a work methodology will be defined, detailed, and explained in this report. Finally, the obtained results, accompanied by relevant comments and conclusions, will be presented.

Excavation in soft soil induces ground settlement due to particle readjustment, which, over time, reaches a new equilibrium state. Measuring the resulting deformation is crucial for the successful construction of a tunnel using the New Austrian Tunneling Method (NATM), ensuring the project's safety and enabling engineering-informed decision-making.

Presently, the construction of Line 7 of Santiago's Metro is underway, overseen by CyD Ingeniería, a company with a longstanding history with Metro since 1993 in the construction of Line 5. This new tunnel excavation affects various existing structures, such as operational Metro lines, which must maintain uninterrupted operation. Monitoring the soil settlement and meeting safety thresholds established by Metro is imperative.

This task involves field data processing followed by mathematical calculations to depict relevant phenomena in intuitive graphs. Compiling these reports is a time-consuming task, requiring at least weekly updates, as each studied sector demands a set of graphs. Currently, adherence to two primary admissibility criteria related to longitudinal and transverse slopes in operational Metro lines must be demonstrated. Since these parameters are not directly obtained from measurement instruments, their calculation methodology needs to be determined. Subsequently, a method to automate these processes across all studied sectors is developed. Finally, compiling graphs from different sectors into a dashboard will enhance understanding of settlement due to Line 7 and facilitate better decision-making. The graphs and dashboard underwent evaluation by various company collaborators via a predefined survey, yielding positive responses. Additionally, dashboard creation time was reduced by 90%, surpassing this project's objectives.

## Introducción

Los túneles son obras civiles de gran envergadura que requieren grandes esfuerzos de ingeniería y una inversión importante de dinero. Para llevar a cabo estos tipos de proyectos son necesarias distintas etapas y una gran variedad de especialistas. En Chile contamos con servicio de Metro desde el año 1975 y desde ese entonces se ha generado un constante progreso en las tecnologías y metodologías de construcción, y también en los profesionales del rubro y el conocimiento que poseen y transmiten. En el año 2023 se inauguró la extensión de la L2 y L3 y actualmente se está construyendo la Línea 7, además, ya se tiene prevista la construcción de la L8 y L9. Esta vasta experiencia de la ingeniería chilena ha permitido que se sigan construyendo nuevas líneas cada vez de forma más eficiente y contando con altos estándares de calidad comparado con el resto de los países, según el estudio Índice de Movilidad Urbana [1] realizado por la Unión Internacional de Transporte Público (UITP), la ciudad de Santiago obtuvo la mejor puntuación dentro de los países latinoamericanos, pero por supuesto siguen existiendo grandes desafíos para mejorar este servicio que es vital para una mejor calidad de vida para los chilenos en este mundo actual sobre poblado, en donde el espacio es un bien muy escaso.

La tunelería se puede separar a grandes rasgos en dos mundos, cuando la excavación es en roca y cuando es en suelo, cada uno tiene sus formas de construcción y sus respectivos estudios siendo en algunos casos compatibles, pero en otros no. En Chile, esta separación se nota por ejemplo, cuando en proyectos mineros usualmente se excava en roca, mientras que en el metro de Santiago usualmente se excava en suelo, por lo que la literatura a utilizar, los métodos y los profesionales involucrados, también tienen este tipo de clasificación. En el caso de esta pasantía, el contexto será en suelo blando y todo el marco teórico explicado a continuación y en el Anexo 1.1, corresponderá a túneles en ese tipo de terreno, obviando esta distinción.

Dado que hay una gran cantidad de factores a considerar, como lo son, por ejemplo, las deformaciones de convergencia en el frente de excavación, las deformaciones en superficie y estructuras aledañas, los problemas en terreno de movimiento de marina, de maquinaria, posibles filtraciones de agua, cambios en el terreno con respecto a lo proyectado, etc., esto conlleva grandes esfuerzos a nivel de ingeniería y un extenso equipo de profesionales. El monitoreo de deformaciones es una de las grandes dificultades del proyecto, no tan solo en cuanto a materializarla en terreno, con los instrumentos adecuados y su constante verificación y calibración, sino también en cuanto a la interpretación de los resultados obtenidos.

A partir de esos datos se deben tomar decisiones con criterios de ingeniería, por lo que se deben considerar factores de seguridad, calidad, financieros, sociales, etc., los cuales son vitales para el buen desempeño del proyecto. En relación con lo mencionado anteriormente se puede elegir, por ejemplo, en el caso de que las deformaciones sean menores a las esperadas, incrementar el avance diario de excavación, o utilizar un método constructivo que permita avanzar más rápido, pero en el caso de que las deformaciones se estén acercando a los umbrales de riesgo, será necesario reducir el avance, o elegir algún método constructivo con mayor subdivisión en la frente que requiera un avance más lento, pero también prevenga mayores deformaciones. Todas estas decisiones claramente tienen sus consecuencias en el presupuesto del proyecto, pero no son soluciones triviales con las implicancias claras luego de cada decisión, por lo que tener una imagen completa del comportamiento del suelo o las estructuras involucradas es crucial, y con una adecuada metodología de monitoreo e interpretación de los datos, es posible anticiparse y manejar el proyecto de una forma eficiente y eficaz.

## Sobre la empresa

CyD Ingeniería (Cruz y Dávila) es una empresa chilena que actualmente se ha expandido al extranjero. Inicialmente comenzó haciendo trabajos de ITO (Inspección Técnica de Obra) pero hoy por hoy se desempeña en diversos aspectos de la ingeniería, como lo es el Gerenciamiento de Proyectos, Validación Técnico Financiera, Asesoría en Siniestros y Servicios de Ingeniería en sectores de minería, transporte (carreteras, trenes, Metro), industrial y energía.

CyD tiene una amplia y afiatada historia con Metro desde la construcción de la Línea 5 del Metro de Santiago en 1993, desde ese entonces ha participado en distintos proyectos a lo largo de la expansión del transporte público subterráneo. Esta basta experiencia ha transformado a la empresa en un referente de la tunelería en ciudad y ha desarrollado a grandes profesionales que siguen aportando al conocimiento colectivo de la ingeniería civil.

Este proyecto de pasantía se ve inmerso en la Gerencia de Ingeniería y Transporte.

## Contexto del Problema

Actualmente se está construyendo la Línea 7 del Metro de Santiago, la cual se tiene prevista estar terminada el año 2028. Esta nueva línea contará con 19 estaciones desde la estación Brasil, en Renca, hasta la estación Estoril en Vitacura.

La empresa Geodata es la encargada de la medición del asentamiento en las líneas existentes que son afectadas por la excavación de la L7. Su forma de entregar los datos es haciendo un gráfico por cada punto de monitoreo, los cuales son más de 60 aproximadamente por tramo estudiado, por lo que la tarea de interpretar los números se vuelve compleja y no permite ver el panorama completo del comportamiento de las vías en operación. (Anexo 1.3.6). Por su parte Metro elabora los Criterios

de Diseño (Anexo 2) que se deben cumplir para las estructuras existentes (como lo es la L1 y L5) y es necesario cumplir con condiciones mínimas (umbrales) de admisibilidad/serviciabilidad para asegurar el buen funcionamiento de los trenes en uso. Los criterios que se tomará mayor atención, son los siguientes:

- Se debe limitar el asentamiento relativo de los túneles en sentido longitudinal, a 1 [mm/m], medido en el hormigón de vías o en el radier de los túneles.
- En sentido transversal, para sectores en recta, la cota de un riel respecto del otro, de una misma vía, no puede exceder los 2 [mm].

El resto de los criterios (revisar Anexo) no se evaluarán, ya que, solo los presentados anteriormente son los que representan un límite efectivo y que a su vez entregan un umbral de control, los cuales se debe demostrar que no son sobrepasados.

Como se comentó anteriormente, a partir de los datos obtenidos de las mediciones realizadas se deben tomar decisiones con grandes repercusiones en el desempeño del proyecto, por lo que en general son tomadas por cargos gerenciales, debido a esto se deben generar reportes claros e intuitivos que permitan conocer a cabalidad los distintos parámetros de interés para una buena toma de decisiones. En la empresa no hay un protocolo establecido de cómo generar algún tipo de reporte que englobe la información importante en cuanto al asentamiento en líneas existentes, y por lo tanto, tampoco existe un método rápido para generar dicho resumen de información relevante para la toma de decisiones.

El problema presentado en este informe no es particular del proyecto en el que se está inmerso, sino que es parte de un contexto que está en auge en Chile. La misma situación se presenta en la estación Puente Cal y Canto y también próximamente en el proyecto AVO II (Vespucio Oriente 2), el cual se construirá una autopista subterránea que pasará por debajo de la actual Línea 4 del Metro.

## Estado del arte

El estudio del asentamiento producido en una línea existente debido a la excavación de una nueva, es un tema bien estudiado en Chile cuando se trata de intersecciones ortogonales. En la memoria del ingeniero chileno Figueroa (2019) [\[2\]](#) se puede observar cómo se analiza este fenómeno y se generan los perfiles de Asentamiento, utilizando modelamiento de distribución normal y haciendo correlación con los puntos medidos en terreno. (Anexo 1.2.1).

Por otro lado, el estudio de las diferencias relativas de asentamiento en el sentido longitudinal y transversal, no poseen un marco teórico robusto. En Chile, son parámetros nuevos que se están estudiando, y en el resto del mundo, en general, no son considerados dentro de los umbrales de seguridad. En China ya es usual construir túneles que intersectan de forma oblicua con uno existente, y en el paper de Xing-Tao Lin, et.al (2019) [\[3\]](#) comentan que aún falta por entender este tipo de

fenómeno: “*The impact of twin shields tunneling undercrossing with an oblique angle on the existing tunnels is complicated and still lacks of understanding*”

El monitoreo de las deformaciones es un trabajo crucial para asegurar un buen desempeño del proyecto, pero sobre todo para asegurar la seguridad de la excavación. En 1994 hubo un caso de derrumbe en un túnel del Heathrow Airport, Londres. Las investigaciones posteriores indicaron que un factor determinante fue la falta de detección y acción en cuanto a las deformaciones del suelo, esta falta de rigurosidad implicó el derrumbe, lo que trajo consigo cerrar el aeropuerto varios días.

En la investigación realizada por la HSE (Health and Safety Executive) [4] llegaron ciertas conclusiones tales como: “*NATM monitoring produces a large amount of data. Management and timely processing is crucial to safety. Tunnel collapses have occurred where this has not happened and there has been insufficient time for contingency plans to be implemented*” (HSE, 1996), además de ese tema, también evidencian otro aspecto que será crucial para este proyecto de pasantía. “*Interpretation is likely to involve several different disciplines within NATM teams (...) Misunderstanding and errors will be reduced if the data available and decisions reached are formally recorded and distributed*”. Es por esto que una vez resuelto el desafío de demostrar el cumplimiento o incumplimiento de los criterios señalados anteriormente, se deberá reportar los gráficos y su complementación con otros parámetros de interés de forma clara e intuitiva. Para lograr esto se pueden utilizar herramientas de BI (Business Intelligence). En el paper de Arnott et al. (2017) [5] explican el avance en el tiempo sobre lo que es el DSS (Decision support system), y comentan que se ha estandarizado en la literatura la descripción de dos sistemas en cuanto a la forma de tomar decisiones. El primero es la forma rápida, intuitiva, instintiva que se basa en el criterio personal del gerente o encargado de la decisión, mientras que el segundo es lento, requiere de un gran esfuerzo cognitivo y está basado en una serie de protocolos y algoritmo que determinan cuál es la mejor decisión. (Anexo 1.2) según el alcance de este proyecto, la propuesta de solución deberá estar enfocada en mejorar el sistema 2, con el fin de apoyar a los encargados de la empresa los cuales con su experiencia pueden basar sus decisiones en el sistema 1 y finalmente utilizar una mezcla de estos.

# Objetivos

## Objetivo SMART

A continuación, se presentarán los objetivos de este proyecto según la metodología SMART, la cual consiste resumidamente en definir los objetivos por:

- S: Específico
- M: Medible
- A: Alcanzable
- R: Relevante
- T: Tiempo límite

Para el caso de este proyecto se tiene:

**S:**

Herramienta Digital Intuitiva que facilite la lectura de deformaciones y permita una buena toma de decisiones

**M:**

Se requiere que el dashboard cumpla con los siguientes requisitos:

**Información Actualizada:** Permite disponer de información con la última lectura de deformaciones, de manera que siempre sea posible tomar una decisión informada.

**Información en Línea:** Es posible sólo con una conexión a internet disponer de la información en terreno.

**Información Visualmente intuitiva:** Lograr diagramar y agrupar adecuadamente, la información de acuerdo a cómo está relacionada dentro del proyecto, permite una fácil lectura y minimiza los errores.

**A:**

Es alcanzable teniendo manejo y conocimiento de:

- Manejo avanzado de hojas de datos de Google y Excel
- Conocimiento en lectura y comprensión de planos de diseño y construcción
- Conocimientos de diseño de túneles en suelo blando
- Conocimientos de construcción de túneles en suelo blando
- Manejo en lenguajes de programación

**R:**

Es relevante porque esta herramienta permitirá ahorrar tiempo y recursos al momento de justificar y reportar las decisiones tomadas por el ingeniero especialista en túneles. Pero no solo eso, también ayudará al ingeniero a visualizar de forma más intuitiva el panorama completo de excavación del túnel, por lo que también será un aporte a la toma de decisiones, lo que hará que el proyecto sea más eficiente y que al mismo tiempo cumpla con todos los requerimientos de calidad y seguridad, lo cual se encuentra totalmente alineado con la misión de la empresa.

*“Contribuir al progreso sostenible de Chile y el mundo, mejorando la calidad de vida de las comunidades y dejando huella en las personas.”*

Esta herramienta permitirá ahorrar recursos del Estado y por lo tanto de la sociedad

**T:**

Herramienta lista para el 04/12/2023

Objetivos General y Específicos

**Objetivo General:** Aportar a la buena toma de decisiones y la demostración del cumplimiento de los criterios de admisibilidad/serviciabilidad definidos por Metro para no afectar la operación de los trenes existentes durante la construcción y excavación de la Línea 7, mediante la creación de Gráficos intuitivos que permitan visualizar los fenómenos de asentamiento de interés.

**Objetivo Específico 1:** Graficar de manera clara e intuitiva el fenómeno de asentamiento relativo en el sentido longitudinal y en el sentido transversal de las Líneas de Metro existentes durante la construcción y excavación de los túneles de L7.

**Objetivo Específico 2:** Los Gráficos deben ser actualizados de forma sencilla y rápida, además, deben estar disponibles en línea, al igual que el sistema que compile la información importante. El tiempo requerido para elaborar los gráficos de un sector estudiado debe reducirse al menos en un 70%.

Ambos objetivos específicos serán medidos según los distintos KPI descritos en las Medidas de desempeño.

## Soluciones propuestas

Se propondrán 3 soluciones considerando el contexto problema, el Estado del Arte y los objetivos.

1. Para cumplir con el objetivo 1 se podría utilizar los reportes que entrega la UM en donde entregan en formato pdf los gráficos del asentamiento en los distintos puntos de medición, sin hacer un procesamiento de los datos. (Anexo 1.3) Se tendría que desarrollar un sistema para leer esos gráficos y ser capaz de evaluar los criterios de admisibilidad en cuanto a las diferencias relativas longitudinales y transversales, lo que requiere hacer comparaciones y procesos matemáticos entre distintos instrumentos. Luego de desarrollar este sistema se debería ser capaz de recopilar esa información, para cumplir con el objetivo 2, y presentar un reporte según la regularidad con la que la UM entregue los suyos.
2. Pensando en lo difícil que puede ser utilizar gráficos entregados en formato pdf para luego hacer una serie de cálculos, se propone desarrollar un archivo excel que procese la información bruta que posee la UM, solicitar que entreguen sus datos obtenidos y a partir de ellos hacer la serie de cálculos y procesos necesarios para cumplir con el objetivo 1. Este proceso requerirá pensar y tomar decisiones sobre los supuestos y criterios que se establecerán para realizar los cálculos. Para la segunda parte del proyecto, relacionado con el objetivo 2, se podría generar un reporte semanal que englobe los distintos gráficos obtenidos y las conclusiones que se puedan obtener a partir de ellos.
3. Considerando que la solución propuesta 2 pueda requerir una cantidad de tiempo considerable pensando en que se deba actualizar toda la información para los distintos tramos estudiados, semanalmente, esta propuesta de solución es una variación de la mencionada anteriormente, y tiene como fin automatizar todos estos procesos, por lo que el archivo excel debe ser desarrollado pensando en que sea automatizable y su actualización o incorporación de un nuevo tramo sea rápida. Y por otro lado que la forma de reportar estos gráficos sea rápida y clara, que en un Dashboard se presente la información de forma organizada y permita ver de manera intuitiva y completa el efecto que produce la excavación de la Línea 7 en las distintas líneas de Metro existentes.

Tomando en cuenta los objetivos, el Estado del Arte y la Matriz de Riesgo que se mostrará a continuación, la solución escogida es la N° 3.

## Matriz de riesgos

Para elaborar la matriz de riesgo se completarán tres aspectos esenciales, para empezar es necesario identificar algunos de los posibles casos desfavorables que traiga la implementación del proyecto de pasantía, se estima el costo asociado a ese suceso (impacto), y por último, la probabilidad de que ocurra dicho evento. Multiplicando el impacto por la probabilidad, se obtiene el Riesgo asociado, además, se incluyen las mitigaciones implementadas para cada caso. Los cálculos del impacto son explicados con mayor detalle en el Anexo 3.

Matriz de Riesgo				Mitigación
Evento	Impacto	Probabilidad	Riesgo	
a) Gráficos no confiables muestran cumplimiento de umbrales cuando en la realidad no se cumplen	US\$100,000,000	0.000001	US\$100	Gráficos sin cálculos matemáticos permite determinar si es que los datos brutos son congruentes con lo esperado según la experiencia y las ciencias de la ingeniería
b) Dashboard poco intuitivo entorpezca la buena toma de decisiones	US\$248	0.1	US\$25	Se realizarán encuestas a los distintos colaboradores evaluando los gráficos y el dashboard, cosa de ir mejorando en caso de que no sea intuitivo y claro
c) Automatización de los nuevos datos obtenidos sea lenta	US\$296	0.5	US\$148	Se compara el tiempo que demora obtener los datos antes y después de la implementación, teniendo como objetivo disminuirlo considerablemente

Tabla 1

A partir de esta tabla se puede observar la importancia que tiene elaborar los gráficos de los datos sin cálculos matemáticos, cosa de evaluar si la información entregada por la UM es congruente con lo esperado y si es que realmente monitorean el asentamiento en terreno. Dichos gráficos son mostrados y justificados en el Desarrollo de este informe. Por otro lado, la tabla entrega una idea de que cosas deberá resguardar las Medidas de desempeño de este proyecto.

## Evaluación Económica.

Para el caso de este proyecto de pasantía, no tiene ningún costo directo asociado, debido a que todos los software utilizados son gratuitos o bien ya forman parte de las licencias que posee la empresa como lo son Microsoft Excel y Visual Studio.

Pero no hay que dejar de lado los costos indirectos que trae, ya que, será necesario que algún empleado supervise y complete la actualización de los datos. Cabe destacar que esos costos ya eran parte de los gastos de la empresa, puesto que no será necesario contratar a alguien más para desempeñar esta labor, y además, se espera que el tiempo necesario para procesar la información disminuirá considerablemente, por lo que se podría considerar que esta solución trae como beneficio usar de manera más eficiente los recursos de la empresa.

Considerando que se cumpla el objetivo de reducir en un 70% el tiempo requerido para elaborar el set de planos por tramo estudiado, serían alrededor de 4 horas menos de trabajo. Teniendo en cuenta que el valor de la HH de un ingeniero de túneles es cercano a los 0.22 UF, el ahorro por tramo estudiado es 0.88 UF cada vez que se deba actualizar la base de datos, por lo que en el caso conservador que esta labor se realice una vez por semana, el ahorro mensual sería cercano a los 3.52 UF por tramo estudiado. Cabe destacar que actualmente se estudian 3 sectores, pero a lo largo de la excavación irá aumentando hasta llegar a al menos 10 tramos. Además, se proyecta que la Línea 7 termine su excavación en el año 2027, por lo que aún quedan al menos 3 años de monitoreo de las líneas existentes, es decir, por tramo estudiado se ahorraría un valor aproximado de 126 UF.

Para dimensionar la importancia de asegurar que las líneas existentes no sufran daños que impidan su operabilidad, se mostrarán las repercusiones monetarias que podrían incurrir en Metro. Según los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadísticas [\[6\]](#) (Revisar Anexo 12), la cantidad de pasajeros que utilizó la Línea 1 y 5 en octubre de 2023, fue de un millón de pasajeros aproximadamente. Según las estimaciones mostradas en el anexo mencionado anteriormente, una falla en estas Líneas (las involucradas en los sectores estudiados de esta fase del proyecto), significa un costo aproximado de 554 millones de pesos por cada día en que se tenga que suspender el servicio en las líneas mencionadas.

## Metodología

La metodología que se utilizará en este proyecto es un “*Modelo de cascada*”, por lo que se definirán las tareas que se completarán de manera secuencial, ya que, cada una tiene como requerimiento terminar la partida anterior, estos pasos a seguir tienen estrecha relación con los objetivos del proyecto de pasantía y a su vez generarán hitos o entregables, los cuales permitirán organizar mediante una carta Gantt los esfuerzos requeridos y los porcentajes de avance del proyecto.

1. Estudiar el Estado del Arte Actual.
2. Estudiar y Ordenar la Información y Datos entregados.
3. Decidir de qué forma generar los 2 Gráficos para los 2 Criterios de Interés.
4. Decidir de qué forma mostrar los datos sin procesamiento matemático para analizar la confiabilidad de estos.
5. Desarrollar un archivo Excel que genere todos los gráficos.
6. Automatizar la plantilla Excel cosa de generar nuevos gráficos a partir de ingresar los datos brutos del sector que se desea estudiar.
7. Determinar cuál es la información necesaria para complementar los gráficos y permitir una buena toma de decisiones.
8. Generar un Dashboard intuitivo que integre los Gráficos con los distintos parámetros de interés.

El **punto 2** se hace en base a los criterios, informes y documentos entregados por Metro adjuntos en el Anexo 1, además, los datos “*brutos*” entregados por la UM, los cuales los podemos separar en los puntos AS y los Tiltmeters, cada cual con su formato propio de entrega.

El **punto 3** necesita mayor innovación y constante retroalimentación por el supervisor y los otros colaboradores involucrados en el proyecto, además, requiere no solo tiempo, sino también imaginación y un buen entendimiento del problema y los objetivos a desarrollar, por lo cual requiere las habilidades de la ingeniería civil.

El **punto 4** requiere un buen manejo de las ciencias de la ingeniería relacionada con túneles, ya que, la forma de presentar los gráficos debe ser útil para analizar el comportamiento del suelo en los distintos tramos estudiados, dicho análisis requiere un basto conocimiento de los fenómenos de asentamiento y su relación con la excavación de túneles.

El **punto 5** requiere organizar de la mejor manera posible las distintas hojas de excel necesarias, así como también pensar en todos los casos posibles, cosa que el software se adapte a las distintas mediciones y sea capaz de realizar los cálculos de la manera más eficiente posible.

El **punto 6** es un paso que escapa un poco de lo que es la ingeniería civil , y se podría asociar más a lo que es la computación o la informática en el área de manejo de la información.

El **punto 7** también requerirá de las habilidades de la ingeniería civil, ya que se requiere consolidar la gran cantidad de información obtenida y procesarla y presentarla con el objetivo de que sea útil para los ingenieros civiles involucrados en el proyecto, por lo que requiere conocimiento y entendimiento de los distintos fenómenos involucrados en la excavación y construcción de túneles.

El **punto 8** requiere de un manejo intermedio/avanzado de la herramienta Excel (Macros)

Para llevar a cabo el proyecto descrito en este informe será necesario utilizar herramientas y conocimientos obtenidos en las siguientes asignaturas:

- Construcción de Túneles
  - Instruido por profesor Juan Carlos Pozo
- Ingeniería Geotécnica, Fundaciones, Geotécnia Avanzada
  - Instruido por profesor Ricardo Moffat
- Project Management
  - Instruido por profesor Luis Pisani

Además, de conocimientos prácticos sobre la construcción y excavación de túneles, el entendimiento del comportamiento del suelo y de la programación de las obras, también se utilizará de una forma u otra, toda la base teórica de los ramos matemáticos y físicos de los años de plan común de la carrera. Sumado a esto, jugarán un rol importante en el desempeño, los ramos CORE, tanto en las habilidades blandas para relacionarse con el resto del equipo de la empresa, como también para elaborar un proyecto que abarque distintas dimensiones del conocimiento humano.

## Planificación

La planificación servirá para llevar un control de avance de la metodología y permitirá organizar los tiempos y esfuerzos de este proyecto.

Se definirán los siguientes hitos de control con su respectiva fecha de término. Cabe destacar que en general estos hitos tienen un carácter secuencial.

Hito de Control	Fecha de Término
Estudio de los Datos entregados por la UM	30-sep-2023
Entrega de los gráficos tipo	11-oct-2023
Entrega del Archivo Excel que genera los gráficos	31-oct-2023
Entrega Archivo Excel automatizado con su manual	06-nov-2023
Determinar cuál es la información importante a entregar en el Dashboard	16-nov-2023
Entregar Dashboard automático	04-dic-2023
Informe final	06-dic-2023
Presentación Empresa	12-dic-2023

Tabla 2

En el Anexo 10 se encuentra disponible en formato de Carta Gantt.

Cabe destacar que no hay costos directos asociados a los hitos mencionados anteriormente y las fechas son utilizadas para mantener la organización del autor, salvo 3 entregables que si tienen una fecha oficial de entrega acordada con el supervisor de la pasantía.

### Los 3 entregables son:

1. Entrega de los gráficos tipo
2. Entrega del archivo Excel automatizado que genera los gráficos, con su respectivo manual
3. Entrega del Dashboard automatizado

## Desarrollo

Teniendo en cuenta el contexto del problema, la implementación de la solución la podemos separar en tres grandes ítems. En la figura 1 se encuentra un flujoograma que resume lo explicado a continuación.

El primero relacionado con el procesamiento de los datos que entrega la Unidad de Monitoreo (UM) en cuanto a los Tiltmeters instalados en distintos tramos de líneas de metro en operación. El segundo consiste en la creación de los distintos gráficos de interés, la cual utilizarán como base de datos los obtenidos con el ítem 1 y otros. El tercero consiste en agrupar los gráficos con otros parámetros importantes, con el enfoque de ayudar a una mejor toma de decisiones.

Para el **primer ítem**, los datos son entregados en una carpeta en formato csv para cada PK (ubicación) como se puede apreciar en el Anexo 4.1.1 y 4.1.2. y están separados por columnas de ID, Fecha hora minutos segundos, asentamiento (Anexo 4.1.3). Para el procesamiento de los datos, se utilizará como método de filtro estadístico calcular el promedio del asentamiento diario, en general cada día tiene 16 mediciones, realizadas con una frecuencia de hora y media. Para cumplir este objetivo se requiere contar solo con la fecha y su asentamiento asociado, luego en una planilla excel filtrar los asentamientos para una misma fecha, sumarlos y luego dividirlos en la cantidad de mediciones que tenga ese día, así se obtiene los asentamientos promedio diarios de un Tiltmeter. Este proceso se debe realizar para toda la carpeta del tramo estudiado, y para hacerlo de forma automática se programó un código python para facilitar la lectura.

El algoritmo consiste en el siguiente: Se leen todos los archivos que contenga la carpeta con los csv del sector de interés. A partir de los títulos de dichos archivos se obtiene el PK al cual hacen referencia. Se filtra los datos sólo utilizando la Fecha y su asentamiento para cada archivo. Luego se juntan las dos columnas de todos los archivos contenidos en la carpeta hacia la derecha y se exporta como un archivo Excel. En la segunda fila del archivo están los PK que comprende el tramo estudiado y las siguientes contienen los datos brutos ya descritos. En el Anexo 5 se puede observar el código con mayor detalle. Con el archivo excel creado, se procede a calcular los datos promedio diarios como se explicó anteriormente (Anexo 6.2).

Para el **segundo ítem**, relacionado con la creación de los distintos gráficos de interés. Es necesario entender que hay dos tipos de instrumentación en este proyecto, los Tiltmeter y los puntos AS (dos AS en cada PK). En el caso de los AS estos son entregados por la UM en formato excel, y hacen

mediciones cada una semana (en el mejor de los casos) por lo que no es necesario hacer un procesamiento como en el caso de los Tiltmeters.

Se elaborarán de manera automática 4 gráficos para cada tramo que se desee, y solo bastará actualizar la base de datos con las mediciones de un tramo nuevo, o bien incorporar las nuevas mediciones de un tramo ya estudiado. Los 4 gráficos tipo muestran los siguientes fenómenos:

1. Revisa cumplimiento del 1er criterio establecido por metro
2. Revisa cumplimiento del 2do criterio establecido por metro
3. Muestra el asentamiento a lo largo del tramo estudiado, para una fecha en específico
4. Muestra el asentamiento en el tiempo, para un PK en específico

En el Anexo 7 se incluyen gráficos de ejemplo obtenidos a partir del tramo estudiado en Baquedano Línea 5.

Para el **gráfico 1** (Anexo 7.1) se requiere mostrar la diferencia relativa longitudinal entre los distintos puntos de medición, los cuales no pueden superar 1 [mm/m]. En el ejemplo mostrado la distancia entre los puntos AS es de 4 metros y la de los Tiltmeters es de 2 metros, pero estas distancias podrían variar para los distintos tramos estudiados. El procedimiento a seguir es calcular la diferencia de los asentamientos entre dos PK contiguos y dividirlos por su distancia, eso entregará un valor constante entre los PK, por lo que el gráfico resulta ser del tipo escalonado. Cabe destacar que en el caso de los AS se reporta el valor absoluto máximo para cada tramo entre PKs. Se mostrarán en un mismo gráfico las distintas mediciones con su fecha y su instrumentación respectiva, las cuales serán representadas con distintos colores identificadas en la leyenda del gráfico.

Para el **gráfico 2** (Anexo 7.2) se muestra la diferencia relativa entre los rieles de una misma vía en el sentido transversal, a lo largo del tramo estudiado. Para lograr estimar este dato solo se puede hacer utilizando las mediciones AS (con el sistema de instrumentación utilizado en este proyecto) ya que, estas se hacen de a pares para cada PK y con esas dos mediciones se puede estimar la diferencia entre los rieles (Anexo 1.3.2). Cabe destacar que se hacen ciertos supuestos técnicos con fundamentos de las ciencias de la ingeniería civil para hacer este cálculo. (revisar Anexo 13).

Se asume que la losa radier en donde se apoyan los rieles es rígida en comparación al suelo en donde se encuentra el túnel, y esto implica que si existe asentamiento relativo en el sentido transversal, provocará que la losa rote rígidamente en el sentido transversal, y es según este supuesto que se estima a partir de la diferencia entre los puntos AS de un mismo PK, la diferencia entre los rieles de una misma vía, esto conociendo la distancia entre los puntos AS y la distancia entre los rieles, y así

hacer una conversión geométrica. Esas distancias se encuentran en los planos del gálibo de la Líneas estudiadas, información con la cual cuenta la empresa.

El cálculo se realiza restando los asentamientos entre AS1 y AS2 de un mismo PK y dividiendo por la distancia entre los puntos AS, por lo que se reporta una pendiente medida en [mm/m]. A su vez, el umbral debe ser transformado para expresarlo en términos de pendiente, este se calcula dividiendo el umbral establecido por metro (2 [mm]), por la distancia entre los rieles, expresada en [m]. Para este ejemplo mostrado en el Anexo 7.2 el valor es 1,333 [mm/m].

Como los puntos calculados son discretos (una pendiente por cada PK a lo largo del tramo), el gráfico resultante es del tipo de dispersión. Se mostrarán en un mismo gráfico las distintas mediciones realizadas en el tiempo, cada fecha representada con distintos colores los cuales se identifican en la leyenda del gráfico.

Para el **gráfico 3**, se muestran los asentamientos a lo largo del tramo estudiado en una misma fecha, por lo que el gráfico no requiere de cálculos ni procesamientos. Se identifican las distintas mediciones con su fecha respectiva y su instrumentación con distintos colores mostrados en la leyenda del gráfico.

El **gráfico 4** tampoco requiere de cálculos matemáticos, en este caso se muestran los asentamientos a través del tiempo para un mismo PK. En el mismo gráfico se mostrarán con distintos colores los PK y la identificación si fue medido con Tiltmeter o puntos AS (1 o 2).

Tanto el gráfico 3 como el 4 son esenciales para determinar la fidelidad de los datos obtenidos por la UM y también para entender de manera completa el fenómeno de asentamiento en las líneas existentes de metro. Los Tiltmeters son instrumentos que necesitan un procesamiento antes de ser entregados en sus reportes, y al ser un método de medición relativamente nuevo, no se sabe con confianza que tan sensibles son estos instrumentos, es por esta razón (y otras más) que se sigue usando la instrumentación AS, los cuales son puntos de medición topográficos más convencionales. Por lo que comparar estas dos instrumentaciones es vital para determinar la confiabilidad de los datos.

Para el **tercer ítem**, relacionado con la elaboración automática de un Dashboard que recopile el set de gráficos del tramo estudiado e información adicional para apoyar la buena toma de decisiones. Se utiliza un código de Visual Basic para Aplicaciones (Macros), con el cual al apretar el botón “Guardar Gráficos en Dashboard” se crea una hoja en el archivo Excel llamado Dashboard la cual contenga los 4 gráficos del sector y la información adicional como fechas de hitos importantes (inicios y términos

de excavaciones cercanas), un mapa del sector y las pendientes máxima y los días teóricos faltantes para que el túnel de L7 cercano termine de ser excavado. En el Anexo 8 se muestra un ejemplo con mayor detalle. Cabe destacar que los hitos y fechas importantes, así como también los días teóricos restantes para que terminen las excavaciones que afecten a la línea de Metro existente, deberán ser rellenadas de forma manual por el usuario, debido a que no es un trabajo que se pueda realizar de forma automática, ya que requiere de lectura, interpretación y las habilidades de la ingeniería civil para completar esa información. Desde la hoja “Mapa” se puede hacer click en el tramo estudiado que se quiera revisar y acceder a su hoja con su información respectiva haciendo click en mapa.

## Implementación

En cuanto a la elaboración de los gráficos ya mencionados, se realizó un manual explicando el algoritmo y mostrando los pasos a seguir que necesita hacer el usuario para elaborar los gráficos deseados (Anexo 9). También se hizo una capacitación presencial a algunos de los colaboradores que eventualmente utilizarían el producto. Se utilizaron datos de ejemplo para probar el uso y detectar posibles errores, además de medir el tiempo que se requería. Se repitió dicho proceso 3 veces para estimar el tiempo promedio que se necesita para generar estos 4 gráficos tipo.

En cuanto al uso del Dashboard, en el mismo Manual se explica la forma de utilizar el Dashboard y cuales son los pasos que realiza automáticamente el programa y cuales son las labores del usuario. Mediante una encuesta que se explica a continuación y se muestra con mayor detalle en el Anexo 11.2 se fue recopilando la retroalimentación sobre la claridad del Dashboard, su intuitividad y la utilidad de la información incorporada. Luego de realizar 3 versiones se llega al resultado final mostrado en el Anexo, del cual se analizan sus resultados y se obtienen conclusiones.

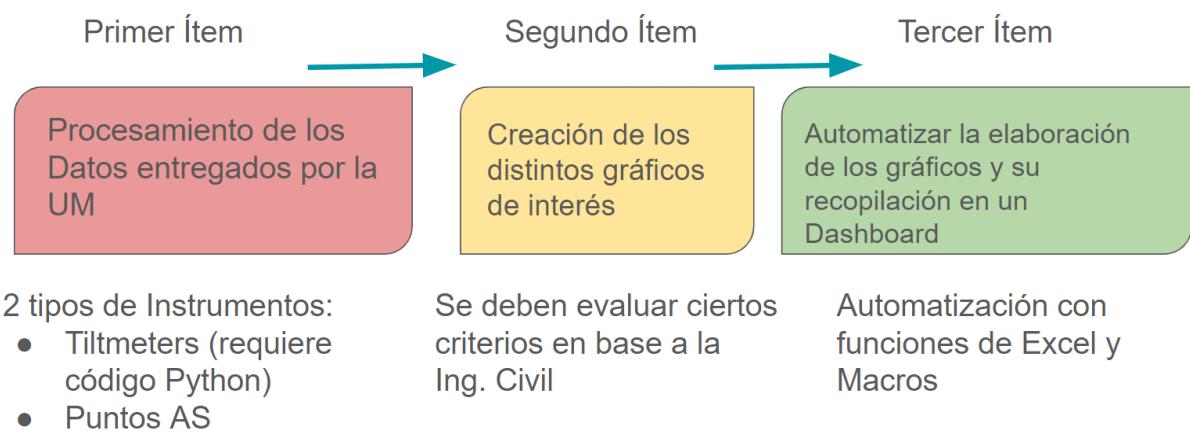


Figura 1

## Medidas de desempeño

Para el **primer entregable**:

Los gráficos deben ser intuitivos y claros, para evaluar este aspecto se realizará una encuesta con una nota del 1 al 7 respondido por distintas personas de la empresa. (Anexo 11.1)

Para el **segundo entregable**:

Se medirá la rapidez con la que se pueden actualizar los 4 gráficos tipo. Se comparará este tiempo con el que se requería antes de implementar la solución. Cabe destacar que se asumirá que ya se había determinado de qué manera presentar los gráficos y como realizar los cálculos necesarios, aún cuando esa etapa fue parte de este proyecto.

El tiempo aproximado que toma realizar los 4 gráficos tipo de un sector estudiado, sin contar con el archivo excel que de forma automatizada crea los gráficos, es alrededor de 6 horas.

El KPI que evaluará este parámetro es el siguiente:

$$KPI = \frac{\text{Tiempo antes de la implementación} - \text{Tiempo después de la implementación}}{\text{Tiempo antes de la implementación}} \times 100 \%$$

Es importante destacar que son varios los tramos o sectores que se requiere estudiar para un buen control de la excavación de la línea 7, por lo que el tiempo ahorrado en esta labor tendrá aún mayor incidencia en la eficiencia de la empresa. Al momento de evaluar este KPI se informará cuántos son los sectores que se están estudiando (y por lo tanto cuantos packs de gráficos) para estimar el tiempo total que se estará ahorrando o desperdiando.

Para el **tercer entregable**:

Se requiere que el dashboard cumpla con los requisitos mostrados en los Objetivos SMART, en la sección “M” y para evaluar estos parámetros se realizará una encuesta a distintos colaboradores de la empresa que eventualmente utilicen el Dashboard. (Anexo 11.2)

## Resultados cualitativos y cuantitativos

Para el **primer entregable**:

Como se puede observar con mayor detalle en el Anexo 11.1, se hicieron encuestas a 10 colaboradores evaluando los 4 gráficos según los parámetros señalados anteriormente. A continuación se muestra el resumen de los resultados:

Gráfico Evaluado	Nota Promedio
Gráfico 1	7.0
Gráfico 2	6.2
Gráfico 3	7.0
Gráfico 4	7.0
Promedio	6.8

Tabla 3

Como se puede observar, el gráfico 2 es el único que tiene una nota menor a la máxima, pero cabe destacar que luego de ser explicados ciertos aspectos, los participantes estuvieron de acuerdo en que se entiende el objetivo del gráfico. Se ahondará más en esto en las conclusiones.

Para el **segundo entregable**:

Se calcula el KPI descrito anteriormente. El tiempo estimado que demoraba realizar el set de gráficos para un tramo estudiado es alrededor de las 6 horas, mientras que el tiempo medido que toma esta misma tarea, pero utilizando la solución propuesta, es de 30 minutos. Por lo tanto el KPI resulta:

$$KPI = \frac{6.0 - 0.5}{6.0} \times 100 = 91.66 \%$$

Para el **tercer entregable**:

Como se puede observar con mayor detalle en el Anexo 11.2 se hicieron 3 preguntas relacionadas con la intuitividad del Dashboard, la eficacia de la información entregada y la utilidad para una mejor toma de decisiones. El promedio obtenido fue el máximo para todas las preguntas. Cabe destacar que no se evalúan los requisitos del inciso “M” de la metodología SMART, relacionado con que la información esté actualizada y que esté en línea, ya que estos objetivos son alcanzados. La información se puede actualizar de forma rápida como se analizó con el KPI del entregable dos, y la información está en línea ya que se encuentra disponible en Google Drive y se puede visualizar con Google Sheets.

## Discusión

En esta sección se comentará sobre algunas de las decisiones tomadas a lo largo de este proyecto y cómo estas afectaron en el desempeño.

Una decisión importante que se puede discutir es la de utilizar como primer filtro estadístico el promedio diario para interpretar los datos obtenidos con los Tiltmeters. Como se comentó anteriormente son alrededor de 16 mediciones que se realizan al día, con un intervalo de 1.5 horas.

En el Anexo 4.2 se encuentra mayor detalle sobre este tema y se puede observar la comparación entre los Datos Brutos que entrega la UM y los promedios diarios calculados como se explica en este informe. A lo largo del día las mediciones varían en promedio con una desviación estándar de 0.025 [mm], y utilizar el promedio diario sirve como “amortiguación” del error intrínseco que tiene el instrumento. Una alternativa sería realizar todos los procesos de este proyecto con todos los datos obtenidos, pero cabe destacar que no solo se utiliza el promedio diario para disminuir la cantidad de información que tendría que ser procesada, sino que también para utilizar datos representativos del asentamiento real en terreno (asumiendo que el instrumento funciona correctamente). Viendo el gráfico a lo largo del tiempo, se puede observar un comportamiento sinusoidal aproximado, y esos picks que se tienen a lo largo de un día se producen por distintos factores, como las vibraciones que producen los trenes en funcionamiento, la temperatura, etc.

Utilizar el promedio como “filtro” de esos datos es una alternativa viable debido a que el comportamiento a lo largo del día es similar para el general de las fechas. (El asentamiento aumenta en el transcurso del día). Además, cabe destacar que la desviación estándar mencionada anteriormente es aceptable para la magnitud del asentamiento medido (del orden de décima de milímetro). En el Anexo 4.2.3 y 4.2.4 se comparan los cálculos de diferencia relativa longitudinal con distintos métodos, tales como, utilizar los promedios diarios, los valores máximos y mínimos de cada día, o todos los datos de la fecha escogida. Según el ejemplo mostrado, se puede apreciar que el uso del filtro escogido en este proyecto es adecuado considerando las leves diferencias encontradas entre los otros métodos para realizar los procesos requeridos.

Otra decisión que se puede discutir, es sobre el supuesto realizado para el cálculo de la diferencia relativa en el sentido transversal. Como se comentó anteriormente se asume que la losa radier de la línea existente es rígida en comparación con el suelo y que por lo tanto se puede considerar que la losa rota en el eje longitudinal. Este supuesto es coherente considerando que nos encontramos dentro de suelo blando, y además, es importante destacar que sin hacer este supuesto se imposibilita realizar el cálculo de la diferencia relativa transversal solo con dos puntos de medición AS por PK (revisar Anexo 13 para mayor detalle), en el caso en que se quiera hacer ese cálculo de una forma directa, sin que requiera interpretación o algún supuesto, se deberán instalar 2 puntos AS por vía, lo cual subiría los costos del plan de monitoreo del proyecto.

## Conclusión

Como se puede apreciar en los Resultados Esperados, en cuanto al primer entregable, el gráfico tipo 2 es el único que presenta una nota menor a 7, según las encuestas realizadas. La confusión que hubo en general fue debido a la forma en que se expresa el umbral de seguridad. Según los criterios de Metro (Anexo 2) la diferencia entre las cotas de los rieles de una misma vía no puede superar los 2 [mm], pero al necesitar un cálculo indirecto para estimar la diferencia mencionada, en el gráfico se hace una conversión del umbral de la misma forma en que se calcula el valor de cada PK propiamente tal. Como se explica a mayor detalle en el Desarrollo de este informe, la forma de estimar esta diferencia es calculando la pendiente transversal a partir de los dos puntos AS que se encuentran en cada PK, como lo realmente calculado es la pendiente que tiene la losa radier, se escogió expresar el umbral de esa misma forma (en [mm/m]), para así evidenciar en el gráfico como es que se está calculando el cumplimiento del criterio.

Esta decisión se presta para confusión en el caso de ver el gráfico sin saber previamente la metodología de cálculo, pero una vez explicado hubo una buena respuesta por parte de los encuestados, por lo que la medida tomada para mejorar este aspecto es dejar una nota en el gráfico que explique que el umbral expresado en [mm/m] es una conversión a pendiente, de los 2 [mm] definidos por Metro, dividido por la distancia entre los puntos As.

En cuanto al segundo entregable, se supera el objetivo de reducir en un 70% el tiempo necesario para elaborar los gráficos, por lo que la justificación económica de este proyecto también aumenta, significando un mayor ahorro para la empresa.

Cabe destacar que la metodología para elaborar los gráficos de forma automática puede seguir mejorando, y reducir aún más las labores del usuario y por lo tanto el tiempo de uso, pero para lograr eso se requieren habilidades avanzadas de programación y mayor tiempo, lo cual escapa del alcance de este proyecto. De igual forma se le ofrece a la empresa este servicio y se dan por escrito las recomendaciones de mejora al programa utilizado.

Otro punto importante, es que el formato del Dashboard entregado a la empresa será utilizado a lo largo de la construcción de la L7, por lo que hay ciertos parámetros que podrán ser agregados o retirados según las necesidades del proyecto y de los criterios del usuario. Se entrega por escrito a la empresa algunas de las sugerencias de parámetros que podrían ser agregados al Dashboard, como lo es colocar el avance de la excavación en el sector, y estimar a partir de ese dato, por cuánto tiempo más habrá deformaciones en las líneas existentes antes de alcanzar su nuevo equilibrio.

Esta pasantía significó un gran avance tanto en lo académico/profesional como en lo personal, el hecho de insertarse en un grupo de personas en un ambiente al cual no se estaba acostumbrado,

requirió adaptarse rápidamente y utilizar habilidades “blandas”, por lo que el buen ambiente laboral y lo aprendido en los cursos CORE de la universidad permitieron desenvolverme de buena forma.

El proceso de escoger el problema a resolver, fue un poco largo, pero quise invertir mayor tiempo y buscar en conjunto con mi supervisor algún proyecto que generará un real aporte a la empresa, y me parece que se cumplió ese objetivo. Fue desafiante cumplir con todo el proceso de automatización, ya que no tenía algún ramo de programación desde primer año y nunca había utilizado Excel al nivel que tuve hacerlo y muchos menos utilizar Macros, pero fue justamente eso de las cosas que más rescato de esta experiencia, a no limitarme a sólo hacer cosas que manejo y aprender lo que sea necesario.

Me deja tranquilo saber que mi trabajo ayudará por varios años más, considerando que queda bastante tiempo de excavación de la L7 y que también será útil para el resto de Líneas de Metro. La mejor toma de decisiones es crucial para desarrollar un túnel de forma eficiente y que cumpla con todas las normas de seguridad. El tiempo ahorrado gracias a este proyecto también se traduce en un ahorro monetario, el cual repercute en Metro y por tanto en el país, y ese dinero podrá ser invertido en algún otro proyecto o en aumentar los estándares de calidad para los usuarios, lo que me deja muy motivado con la vida profesional como ingeniero, viendo la posibilidad y responsabilidad, de aportar aunque sea un poco, a la mejor calidad de vida de la sociedad.

## Referencias

- [1] BBC Mundo. (2017). *¿Cuáles son las ciudades con mejor y peor transporte público en América Latina?*. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-38927134#:~:text=Santiago%20de%20Chile%20fue%20evaluada,transporte%20p%C3%BAblico%20de%20Am%C3%A9rica%20Latina>.
- [2] Figueroa, C. (2014). *Estudio de deformaciones de Túneles Metropolitanos en zona de cruce por construcción de Túnel inferior*. Repositorio Académico - Universidad de Chile
- [3] Xing-Tao Lin et al. (2019). *Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle*. ScienceDirect
- [4] HSE. (1996). *Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels*. Health and Safety Executive
- [5] Arnott, D. et al. (2017). *Patterns of business intelligence systems use in organizations*. ScienceDirect
- [6] Instituto Nacional de Estadísticas. (2023). Cuadros Estadísticos, Transporte y Comunicaciones, Metro. Recuperado de <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/transporte-y-comunicaciones>

## Anexos

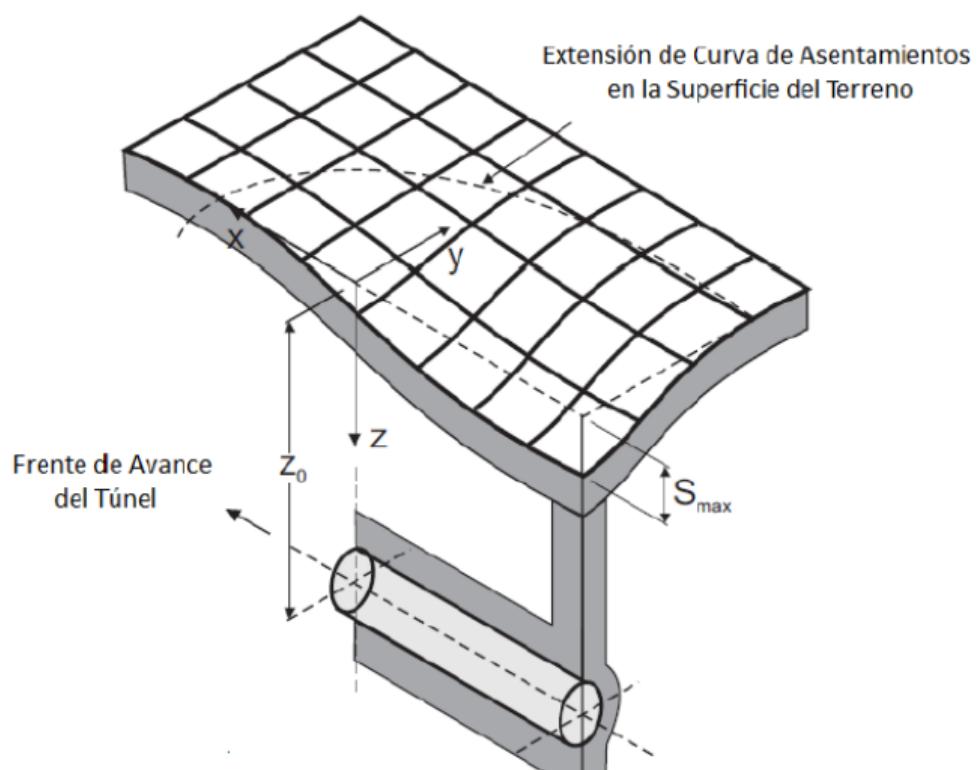
### Anexo 1: Marco Teórico

#### Anexo 1.1 Túneles

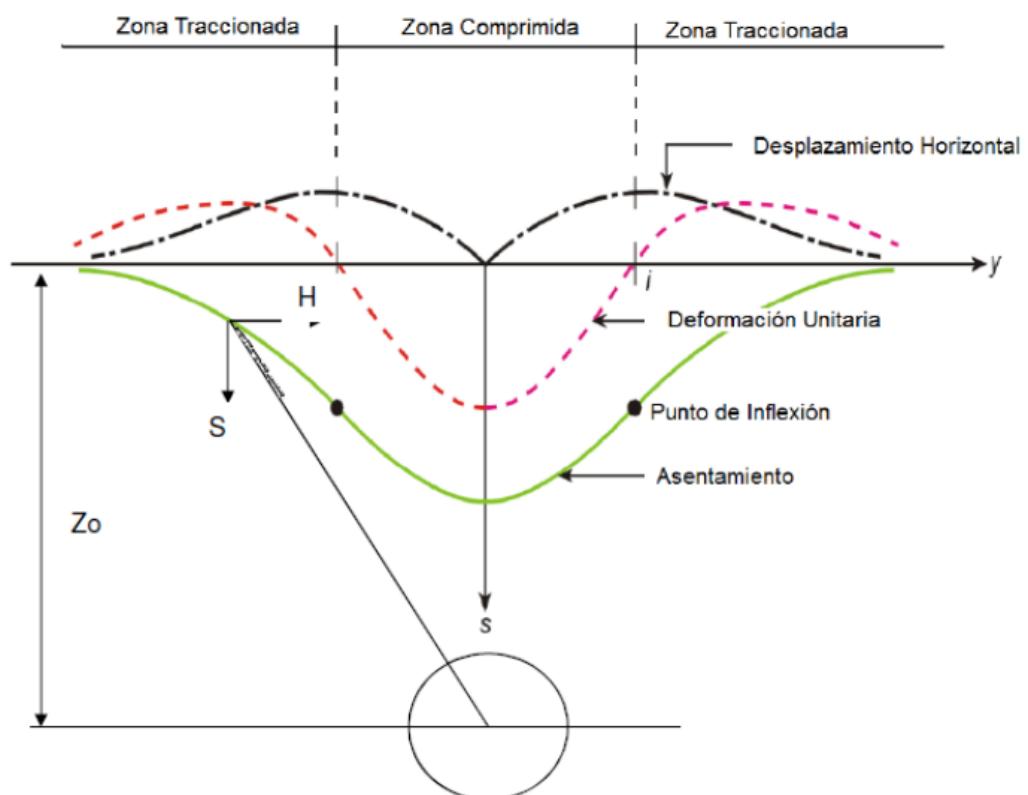
La construcción de túneles ha sido un gran avance para la humanidad, según algunos historiadores el primer paso subterráneo del mundo se hizo hace más de 4.000 años, bajo el río Éufrates, pero existen algunos más conservadores que indican que los primeros túneles comenzarían como obras de ingeniería en el siglo XVII. Por supuesto, el conocimiento sobre la construcción de túneles que se tiene hoy en día es mucho mayor, permitiendo que las posibilidades sean impresionantes, las cuales representan una solución imperante en el mundo actual sobre poblado, en donde el espacio es un bien muy escaso.

En primer lugar hay que tomar en cuenta que la deformación que provoca la excavación de túneles tiene un efecto tridimensional en la superficie (Anexo 1.1.1). Esta se puede separar en el asentamiento vertical del suelo, en un desplazamiento horizontal del suelo, lo que genera una zona comprimida y otra traccionada (Anexo 1.1.2), y además, también existe asentamiento delante de la frente de excavación. (Anexo 1.1.3).

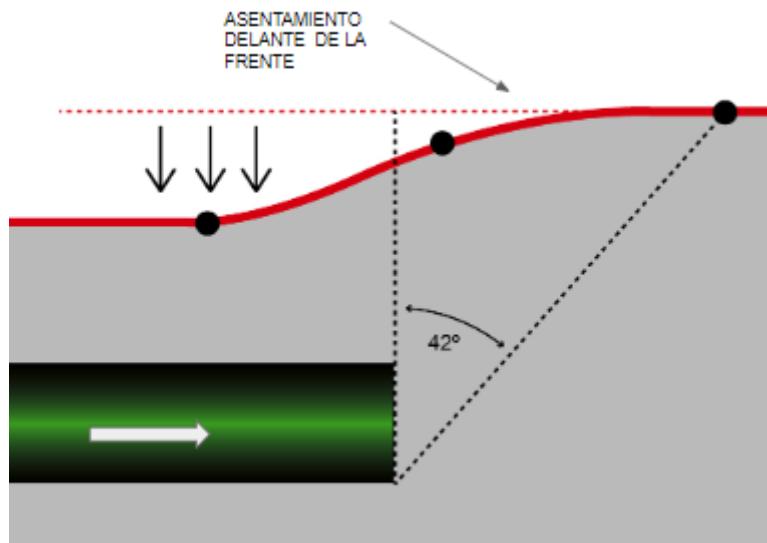
No solo es necesario preocuparse de la deformación en la superficie, también es necesario monitorear las deformaciones al interior del túnel en la excavación, midiendo el nivel de convergencia. Otro factor importante es la deformación en estructuras adyacentes, en el cual es necesario hacer modelaciones numéricas en 2 y 3 dimensiones con cada una de las edificaciones que puedan ser afectadas. En ese caso, es necesario tener especial cuidado con las deformaciones diferenciales que se puedan presentar, ya que, estas generan esfuerzos dentro de la estructura lo que podría llevar a provocar algún daño.



Anexo 1.1.1



Anexo 1.1.2



Anexo 1.1.3

## Anexo 1.2 Estado del Arte

Referencia [1], A continuación, se muestra un ejemplo de cómo se hicieron los modelos de asentamiento en las líneas existentes producto de la excavación de la Línea 3 del Metro de Stgo.

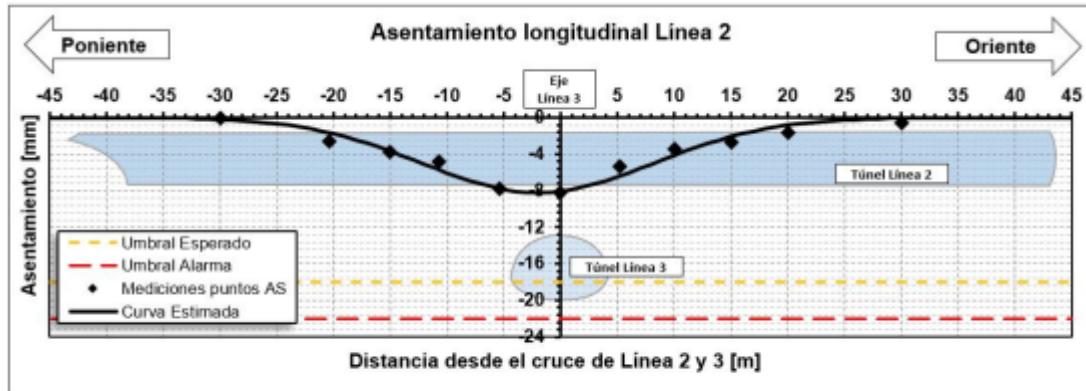


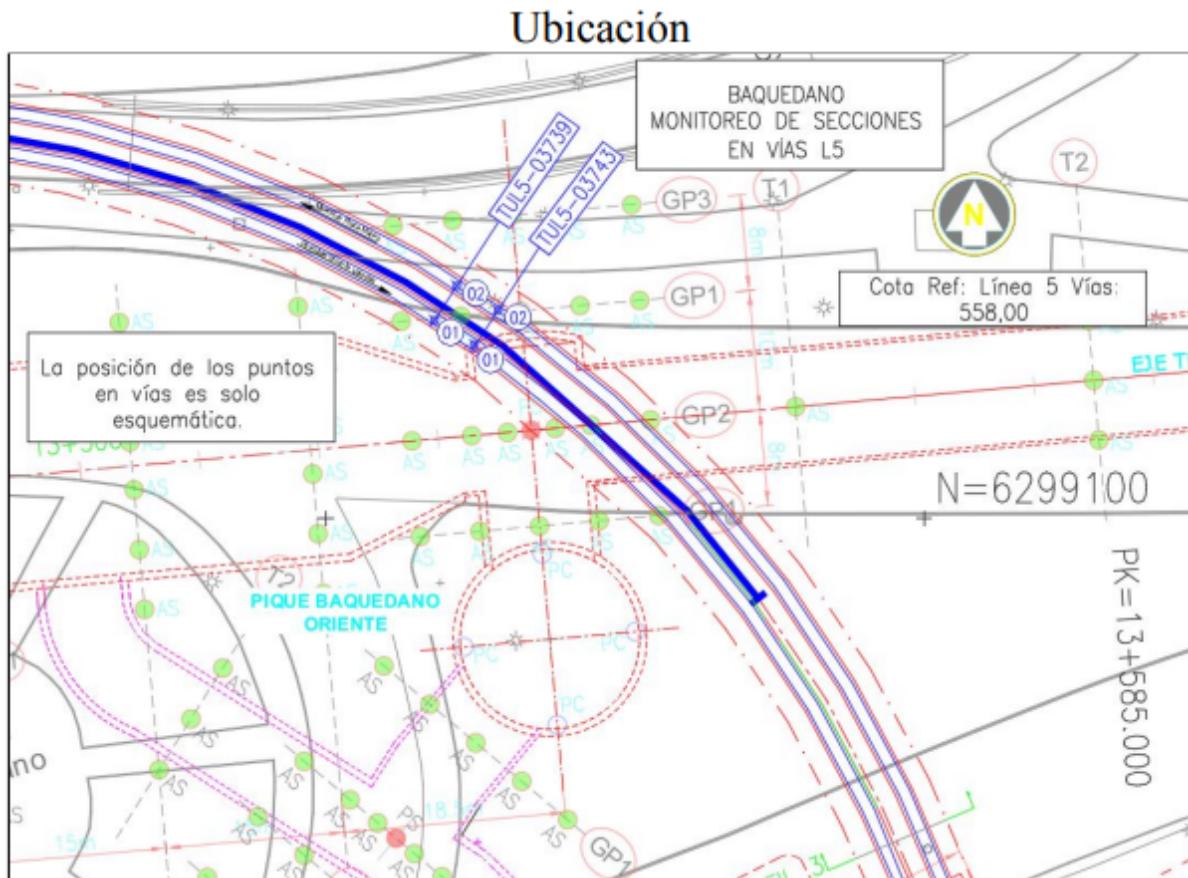
Figura 4.2: Curva de desplazamientos verticales, Estación Cal y Canto

### Anexo 1.2.1

Referencia [3], página 60 : “The dual process theory of decision cognition is the successor to Simon's phase model of decision making in behavioral economics. The dual process theory holds that decision-making occurs within and between two cognitive systems. Kahneman and Frederick [37] typified these systems as two families of cognitive operations; they are not a continuum like the concept of decision structuredness. In an influential paper, Stanovich and West [71] termed these systems System 1 and System 2 in order to avoid descriptive labeling and terms have become standard. Table 1 is partly based on Thaler and Sunstein ([73], Table 1.1), Evans ([25], Table 2), and Stanovich and West ([71], Table 3) and shows the properties and nature of the two cognitive systems. System 1 is fast, automatic, effortless, and intuitive. When facing a decision, System 1 is the first in action. It operates through innate, instinctive behavior. In an evolutionary sense, System 1 is the oldest form of decision-making ([71], p. 660; [36], p. 301). It is difficult to explain or document how System 1 arrives at a decision, we only know it has when the decision enters our consciousness. System 2 is slow, deliberate, and requires significant cognitive effort. The complex System 2 evolved uniquely in humans. System 2's abilities are not innate and must be formed through education, both formally in schools and universities, and less formally in families, the work place, and social interaction. The essence of System 2 is the application of a set of rules or algorithms to a decision task”.

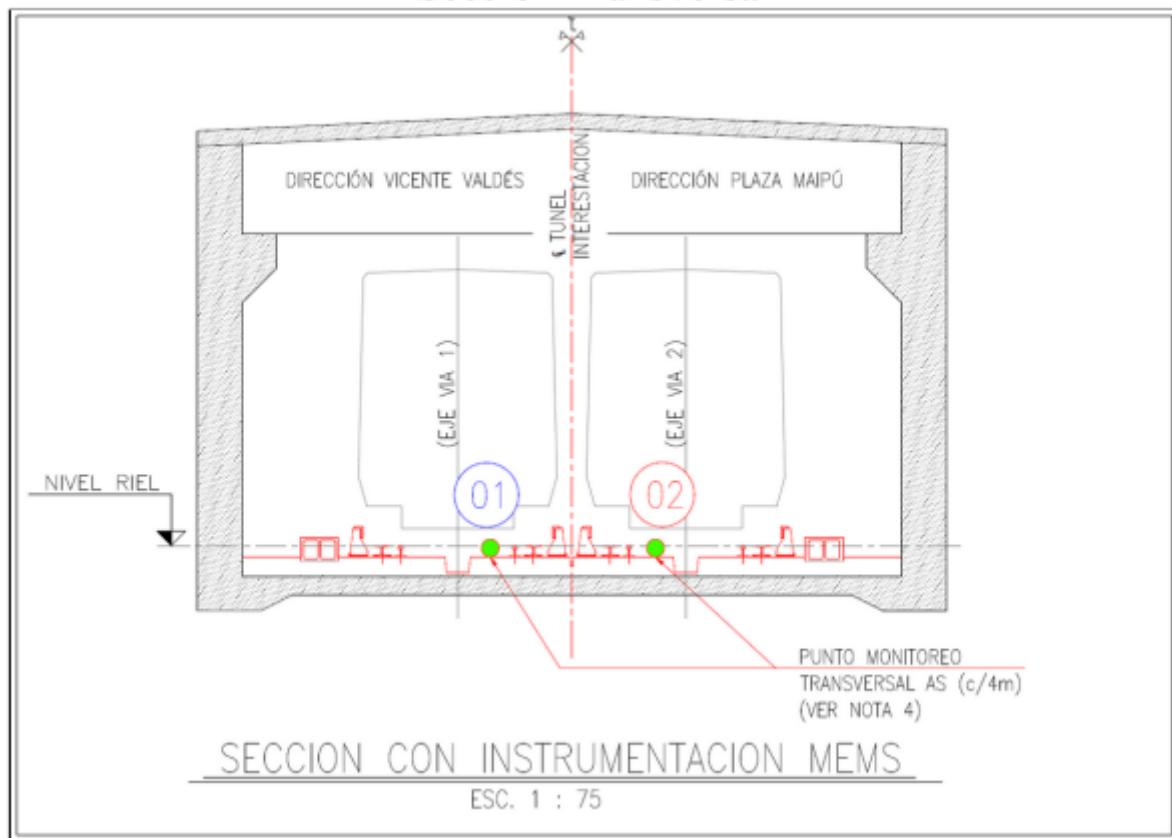
### Anexo 1.3 Reportes entregados por la Unidad de Monitoreo

Se presentarán ejemplos de los reportes entregados por la UM. Para esta ocasión se revisan los efectos de la línea 5 sector Baquedano.

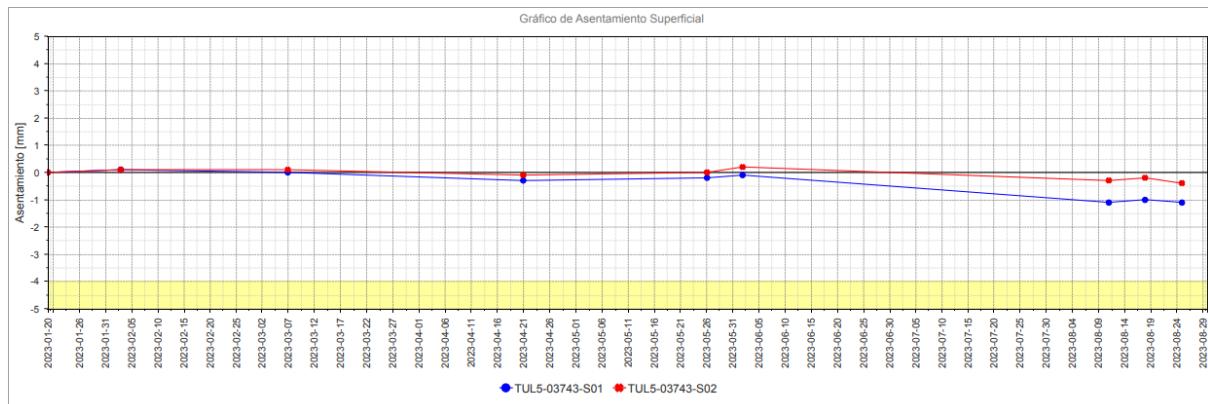


Anexo 1.3.1

## Sección Transversal

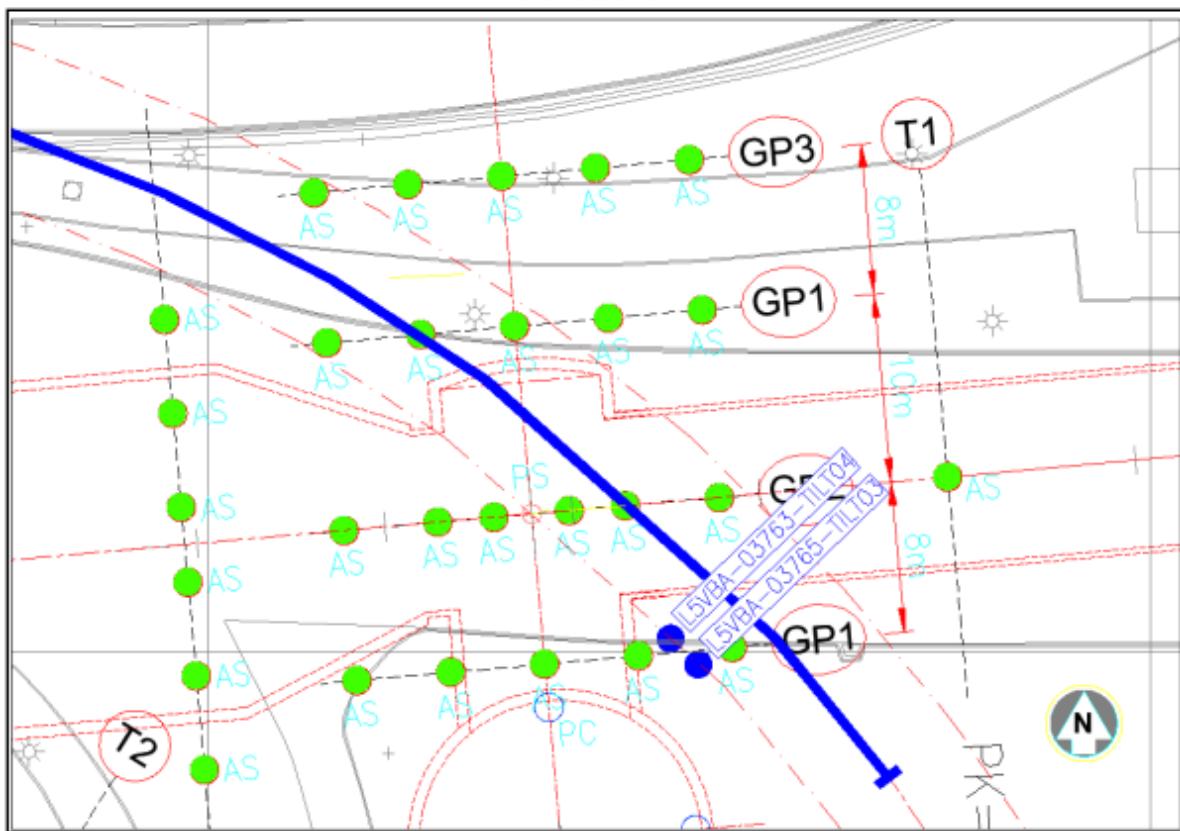


Anexo 1.3.2

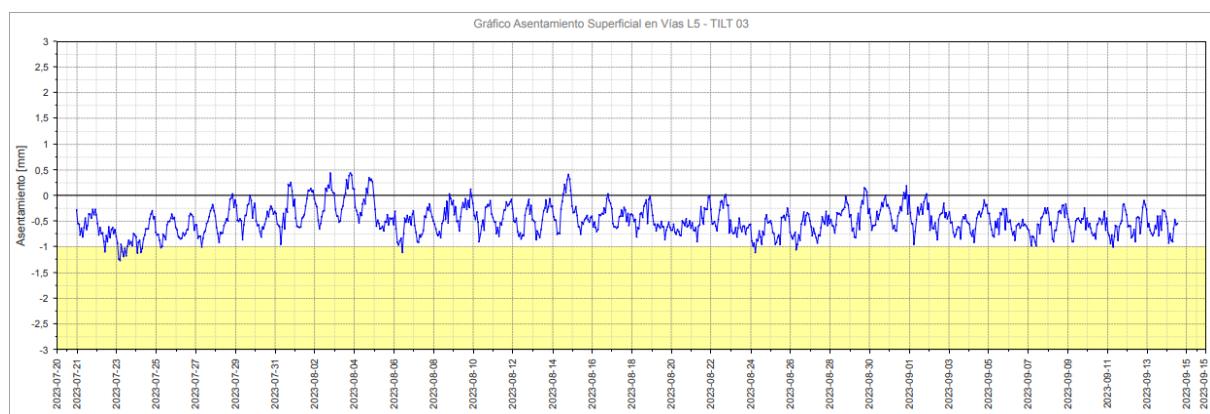


Anexo 1.3.3

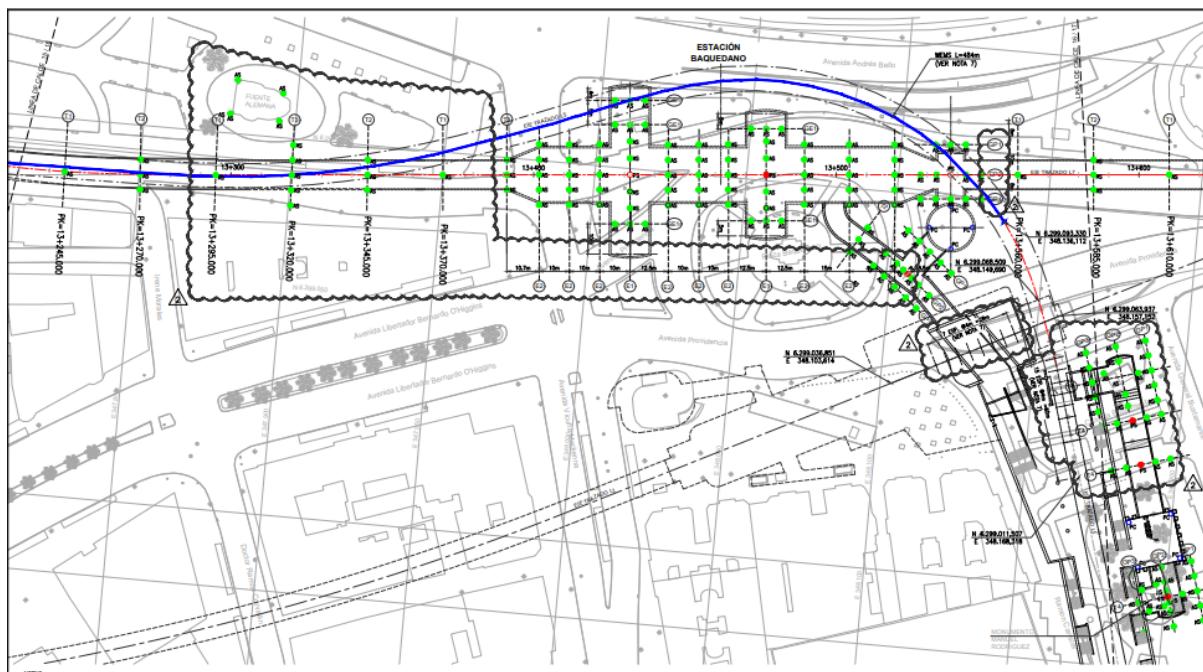
## Ubicación



Anexo 1.3.4



Anexo 1.3.5



Anexo 1.3.6

## Anexo 2: Criterios de Metro

Los criterios que se mostrarán a continuación, fueron obtenidos del documento: L7-C0702-2ID-0-2TU-CRD-0001-R0 el cual corresponde a: “CRITERIOS DE DISEÑO DE TÚNELES GALERÍAS Y PIQUES, INGENIERÍA DE DETALLE PIQUES, GALERÍAS Y TÚNELES TRAMO B LÍNEA 7 METRO DE SANTIAGO”

En el caso de los túneles de Metro, se exponen a continuación los criterios a cumplir para asegurar la continuidad operacional de las líneas:

- Se debe limitar el asentamiento relativo de los túneles en sentido longitudinal, a 1mm/m, medido en el hormigón de vías o en el radier de los túneles.
- Independientemente del valor máximo de los asentamientos verticales esperados los descensos longitudinales que se le provoquen a la vía, en toda su extensión deben constituir perfiles más leves que aquel asociado a una curva de radio 2.500 m. Lo anterior tanto para deformaciones temporales como permanentes.
- En sentido transversal, para sectores en recta, la cota de un riel respecto del otro, de una misma vía, no puede exceder los +2 mm.
- La variación del peralte en las curvas no debe exceder de +20 mm.
- La variación del peralte en el desarrollo de las clotoides quedará limitada a 0.25 mm/m.

Para efectos prácticos se considerarán solamente los criterios 1 y 3, ya que, por un tema de magnitudes, esos son los que representan un límite efectivo, el cual se debe resguardar que no se sobrepase.

La razón por la cual no se considera el resto de los criterios se explicará a continuación:

**Criterio 2:** Para calcular la pendiente longitudinal equivalente asociada a un radio de 2500 [m] se puede utilizar la representación cartesiana de una circunferencia descrita por  $X^2 + Y^2 = R^2$

Si calculamos con una distancia longitudinal de 4 [m] (distancia entre los puntos AS) la pendiente equivalente es de unos 14.15 [mm/m]. Lo cual es muy superior a los 1 [mm/m] establecido por Metro.

**Criterio 4:** La pendiente transversal asociada al peralte descrito, (de 20 [mm]) respecto a los 5.8 [m] que tiene la losa radier de las vías, se calcula dividiendo estas dos distancias, resultando 3.42 [mm/m], lo cual es casi el doble de la pendiente transversal que establece el criterio 3. (1.33 [mm/m] explicado en el Desarrollo de este informe).

### Anexo 3: Matriz de Riesgo

A continuación se explica en detalle, los cálculos y supuestos realizados para elaborar la Matriz de Riesgos, además, se explican también las medidas de mitigación.

a) El costo estimado del primer caso, tiene relación con lo dicho por Louis De Grange, presidente de Metro en radio Pauta (100.5) dando una cifra aproximada del costo asociado a 1 kilómetro de túnel intersección. “*el costo por cada kilómetro bordea los US \$100 millones*” (De Grange). Es por esto que se aproxima a esa cifra el costo que se piense que se estén cumpliendo los parámetros de seguridad en un tramo estudiado cuando en la realidad no es así. Si bien las extensiones de los tramos que se estudian no son de 1 [km], es necesario contemplar que de ser el caso en que no se esté realmente dentro de los umbrales de seguridad, será necesario rehacer parte del túnel ya fortificado en una extensión superior a la del tramo estudiado, además, se tendrá paralizada la obra por un periodo no menor, lo cual tiene un costo asociado, lo que llevaría a aproximar en un costo de 100 millones de dólares ese evento desfavorable. Es necesario destacar que siendo pesimistas podría darse el caso de derrumbe en el túnel y si fuera el caso que además no se respetaran los protocolos de seguridad en obra, podrían perderse vidas humanas, lo cual tiene un costo incalculable e imperdonable.

La medida de mitigación fue explicada anteriormente en este informe cuando se explica la importancia de los gráficos tipo 3 y 4 de la solución propuesta, si bien esta no es la función exclusiva de dichos gráficos, tienen un rol fundamental para evaluar si los gráficos tipo 1 y 2 (los cuales revisan que se esté dentro de los umbrales de seguridad) realmente están mostrando lo que ocurre en la realidad.

b) En el caso de que el dashboard sea poco intuitivo y entorpezca la labor de los ingenieros a cargo de tomar las decisiones sobre el nivel de avance y la magnitud de la fortificación, el costo asociado tendrá relación con las HH que se pierden. Para esta matriz se estimó el costo aproximando un sueldo de ingeniero de 2.500.000 pesos chilenos mensuales. Teniendo en cuenta que la evaluación de los gráficos y la elaboración de un reporte se hace en un día, nos pondremos en la situación desfavorable en que la solución implementada retrase en 4 horas la labor del ingeniero. Esto se puede aproximar a que tiene un costo de 248 dólares.

La medida de mitigación está fuertemente relacionada con el KPI que evalúa con una nota del 1 al 7 la eficacia del dashboard teniendo en cuenta diversos factores, se elaborarán encuestas a distintos colaboradores lo que permitirá tener una retroalimentación que abarque puntos de vistas de personas de diversas especialidades.

c) En el caso de que el proceso de obtención de datos y procesamiento para obtener los gráficos sea más lenta que sin la implementación de la solución, el costo asociado está asociado a las HH que requieren. Para este caso, se estimó un sueldo de un ingeniero con poca experiencia que gane un sueldo mensual de 1.200.000 pesos chilenos. Teniendo en cuenta que sin la implementación de la solución propuesta el tiempo de demora requiere todo un día laboral, aquí se estimará con el caso desfavorable en que tome 10 horas poder obtener los datos entregados por la unidad de monitoreo para luego elaborar los gráficos solicitados, por esta razón se approximó a un costo de 296 dólares.

La medida de mitigación está relacionada con el KPI que compara los tiempos involucrados antes y después de la implementación, y en el caso de que esta medida de desempeño muestre que la solución propuesta no representa un aporte, no se implementará en la empresa, por lo que no se hará efectivo este costo estimado.

#### Anexo 4: Obtención Datos Tiltmeter

##### Anexo 4.1: Formato de Entrega Tiltmeter

A continuación se presentan las imágenes para un mejor entendimiento del formato en el que son enviadas las mediciones obtenidas de los Tiltmeters por parte de la Unidad de Monitoreo.

20231018\_Database Tilt Meters.rar (copia de evaluación)

Archivo Órdenes Herramientas Favoritos Opciones Ayuda

Nombre	Tamaño	Comprimido	Tipo	Modificado	CRC32
..			Carpeta de a...		
Tilt Baquedano Línea 1	183,892	32,776	Carpeta de a...	18-10-2023 11:...	
Tilt Baquedano Linea 5	1,807,810	241,455	Carpeta de a...	18-10-2023 11:...	
Tilt Salvador Linea 1 (PC11)	1,012,194	139,297	Carpeta de a...	18-10-2023 11:...	

#### Anexo 4.1.1

20231018\_Database Tilt Meters.rar (copia de evaluación)

Archivo Órdenes Herramientas Favoritos Opciones Ayuda

Nombre	Tamaño	Comprimido	Tipo	Modificado	CRC32
Carpeta de a...					
C_L5VBA-03729-TILT17.csv	76,676	4,832	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	8FA804...
C_L5VBA-03739-TILT16.csv	102,124	13,478	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	DBEFC...
C_L5VBA-03741-TILT15.csv	102,356	13,506	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	18ABA3...
C_L5VBA-03743-TILT14.csv	102,440	13,475	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	E83EE6...
C_L5VBA-03745-TILT13.csv	101,976	13,816	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	6AC9D...
C_L5VBA-03747-TILT12.csv	102,106	14,115	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	07C9F...
C_L5VBA-03749-TILT11.csv	101,410	13,567	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	FCF403...
C_L5VBA-03751-TILT10.csv	101,332	14,037	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	84F667...
C_L5VBA-03753-TILT09.csv	101,846	14,210	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	9EAF6C...
C_L5VBA-03755-TILT08.csv	101,750	13,668	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	829FCE...
C_L5VBA-03757-TILT07.csv	101,632	14,066	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	643121...
C_L5VBA-03759-TILT06.csv	101,636	14,029	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	0722B6...
C_L5VBA-03761-TILT05.csv	101,842	13,686	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	83E5D9...
C_L5VBA-03763-TILT04.csv	101,866	14,009	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	53F3F4...
C_L5VBA-03765-TILT03.csv	101,730	13,945	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	894542...
C_L5VBA-03767-TILT02.csv	101,668	14,138	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	D00AF2...
C_L5VBA-03769-TILT01.csv	101,786	14,336	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	546082...
C_L5VBA-03779-TILT00.csv	101,634	14,542	Archivo de v...	18-10-2023 11:...	328B9E...

#### Anexo 4.1.2

```

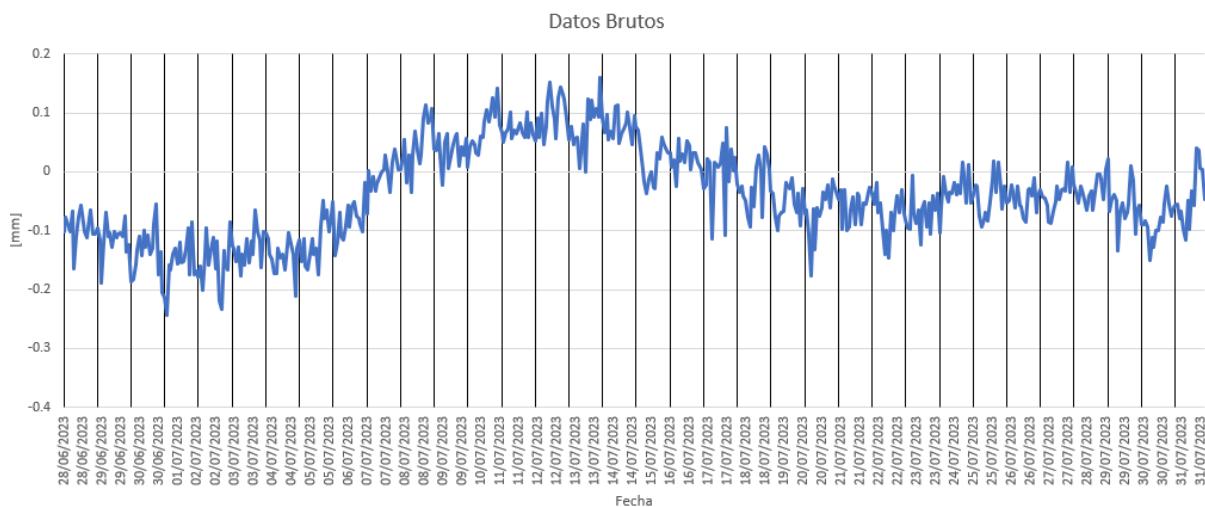
Instrumento seleccionado : C_L1BQ-8877_TILT00
N, Fecha, Asentamiento [mm]
1,12/10/2023 18:30:00, 0
2,12/10/2023 20:00:00, 0.01925881
3,12/10/2023 21:30:00, -0.02332121
4,12/10/2023 23:00:00, -0.01393254
5,13/10/2023 00:30:00, -0.00213652
6,13/10/2023 02:00:00, 0.03547833
7,13/10/2023 03:30:00, 0.04793637
8,13/10/2023 05:00:00, 0.06427626
9,13/10/2023 06:30:00, 0.03917963
10,13/10/2023 08:00:00, 0.02184671
11,13/10/2023 09:30:00, 0.05895
12,13/10/2023 11:00:00, 0.02362213
13,13/10/2023 12:30:00, 0.05539916
14,13/10/2023 14:00:00, 0.04471654
15,13/10/2023 15:30:00, -0.01164556

```

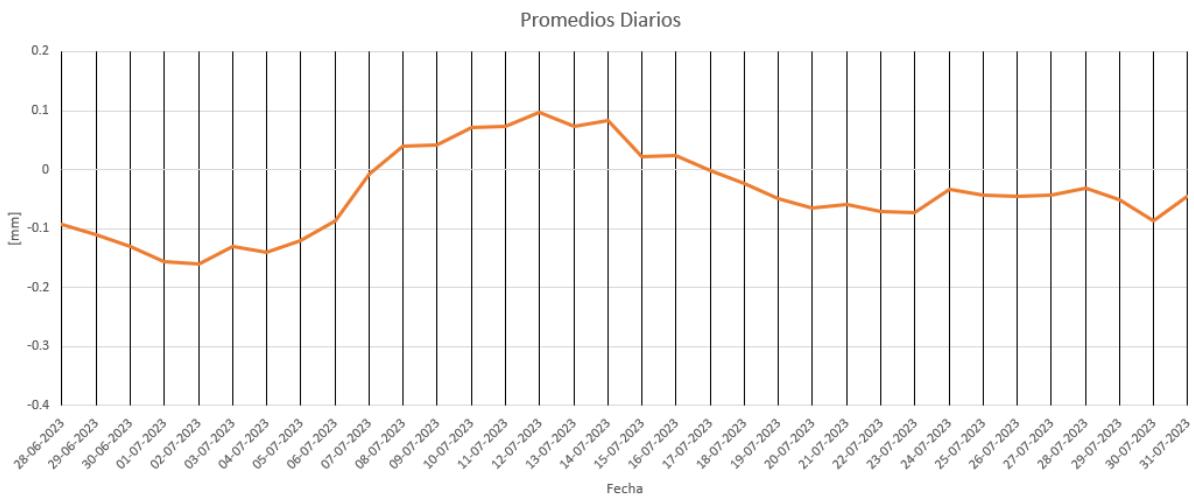
Anexo 4.1.3

#### Anexo 4.2: Comparación Datos Brutos vs Promedios Diarios

A continuación se muestra el comportamiento de los Datos Brutos obtenidos, los cuales tienen 16 mediciones por día (generalmente) y los comparamos con los promedios diarios calculados como se explica en este informe. En esta ocasión se muestran los datos del tramo L5 Baquedano - Bellas Artes, en el PK 3743. Las mediciones van del 28-06-2023 hasta el 31-07-2023, para ambos casos.



Anexo 4.2.1



Anexo 4.2.2

Como se puede apreciar, el comportamiento que se tiene en ambos casos es similar, y el gráfico de los promedios funciona como una “amortiguación” de los Datos Brutos.

PK	3743	3745	Diferencia [mm/m]
Promedio	-0.11130973	-0.07911005	-0.016099843
Max	-0.06966728	-0.03083473	-0.019416275
Mínimo	-0.1892223	-0.1711398	-0.00904125
DV	0.02589705	0.03079374	0.004326451

Anexo 4.2.3

En esta tabla se compara el cálculo de la diferencia relativa en el sentido longitudinal entre dos PK contiguos, utilizando la misma fórmula que se utiliza para elaborar el *gráfico 1 (Anexo 7.1)*. Se utilizó los promedios diarios del día 29-06-2023 para los PK señalados del sector L5 Baquedano - Bellas Artes, además de los valores máximos y mínimos de esa misma fecha. Como se puede observar la diferencia existente dependiendo del método utilizado es leve, con una desviación estándar de 0.004 aproximadamente.

Hora	3743	3745	Diferencia [mm/m]
0:10:00	-0.1047193	-0.07795861	-0.013380345
1:40:00	-0.09541088	-0.06671094	-0.01434997
3:10:00	-0.1163548	-0.05856607	-0.028894365
4:40:00	-0.1892223	-0.1711398	-0.00904125
6:10:00	-0.1212999	-0.08668526	-0.01730732
7:40:00	-0.06966728	-0.03936745	-0.015149915
9:10:00	-0.1096644	-0.08687919	-0.011392605
10:40:00	-0.104283	-0.07854039	-0.012871305
12:10:00	-0.1271177	-0.1113138	-0.00790195
13:40:00	-0.1015195	-0.07369225	-0.013913625
15:10:00	-0.11111188	-0.07311048	-0.01900416
16:40:00	-0.1064646	-0.0610871	-0.02268875
18:10:00	-0.1032649	-0.06729271	-0.017986095
19:40:00	-0.1101007	-0.08047964	-0.01481053
21:10:00	-0.07417604	-0.03083473	-0.021670655
22:40:00	-0.1365716	-0.1021023	-0.01723465
DV	0.02589705	0.03079374	0.005125298

#### Anexo 4.2.4

En este caso se calcula la diferencia relativa longitudinal entre los PK contiguos para las distintas mediciones del día 29-06-2023 para los mismos PK del anexo anterior, en este caso se identifican por la hora en que se midió. Como se puede observar las diferencias entre ellas son leves, teniendo una desviación estándar de 0.005 aproximadamente.

#### Anexo 5: Código Python

A continuación se mostrará y explicará el código python elaborado para poder leer los distintos archivos de mediciones de Tiltmeters.

```
import pandas as pd
import os
import re
```

código 1

En el comienzo del código se debe “llamar” a las distintas librerías que se utilizarán en el código.

```
# Ruta de la carpeta que deseas explorar, copiar y pegar textualmente la ubicación
#Ejemplo de una ruta: "C:/Users/tatan/OneDrive/Documentos/Codigos/Tilt Baquedano Línea 5 (geosinergia)"
ruta_carpeta = " "
# Obtener la lista de archivos en la carpeta
archivos = os.listdir(ruta_carpeta)
# Crear una serie de pandas con los nombres de los archivos
archivos_csv = pd.Series(archivos)
```

código 2

Se define la ruta de la carpeta de la cual se obtendrán los archivos csv. El usuario debe tipar la ruta y escribir textual el nombre de la carpeta, dentro de la variable “ruta\_carpeta”.

Además, se utiliza la librería “os” para leer todos los nombres de los archivos que contiene dicha carpeta. Luego se guardan como un Data Frame.

```
#Utilizamos una expresión regular para buscar un número de 4 dígitos después de “-” que nos entrega el PK.  
patron = re.compile(r'[A-Z]+-(\d+)[-]*\.csv')  
  
#Se definen las columnas deseadas  
Columnas = ["Fecha" , "Asentamiento"]  
#Se crean los Data Frames  
df_temporal = pd.DataFrame()  
df_resultado = pd.DataFrame()  
archivo = pd.DataFrame()
```

código 3

Se definen variables que se utilizarán en el código. Se utiliza la librería “re” para definir cómo se encontrará el respectivo PK de cada archivo. Se asume que el formato del nombre de cada archivo tiene la forma: C\_AAAA-XXXX\_TILT.csv.

```
#Función que lee los distintos archivos csv  
for archivo in archivos_csv:  
    #Obtención del PK para cada archivo  
    resultado = patron.search(archivo)  
    pk = resultado.group(1)  
    #agrego con esa fecha para mantener el formato del Data Frame  
    agregar = pd.DataFrame({'Fecha':["01-01-1900"], 'Asentamiento': [pk]})  
    #Lectura de cada archivo csv  
    df_temporal = pd.read_csv(archivo, sep='[;,:\\s+]', engine = "python", encoding="UTF-16 LE", skiprows=2, names=[["I  
    #Selecciona las columnas deseadas de cada archivo csv  
    df_temporal = df_temporal[Columnas]  
    #Agregamos los PK en la primera fila del Data Frame de cada archivo  
    df_temporal = pd.concat([agregar, df_temporal], axis = 0, ignore_index=True)  
    #Une los distintos archivos hacia la derecha  
    df_resultado = pd.concat([df_resultado, df_temporal], axis=1)
```

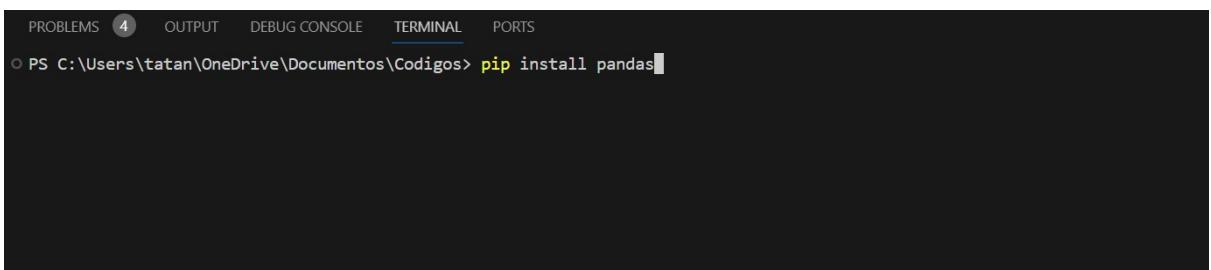
código 4

En el ciclo “for” se hace la lectura de todos los archivos que contiene la carpeta. Se puede apreciar que primero se obtiene el PK del archivo, y luego utilizando la librería “pandas” se lee el csv de cada archivo, para luego ir agrupándolos hacia la derecha.

```
#Convertir a Excel, elegir nombre del archivo  
df_resultado.to_excel("Datos.xlsx", index = False, engine = "openpyxl")  
  
#Muestra en la cosa las primeras 5 filas del archivo para verificar que esté todo en orden  
print(df_resultado.head())
```

código 5

Luego de obtener el Data Frame deseado, se exporta como archivo excel utilizando la librería pandas. El usuario debe escoger el nombre del archivo según como se explica en el Manual.



```
PROBLEMS 4 OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS  
○ PS C:\Users\tatan\OneDrive\Documentos\Codigos> pip install pandas
```

código 6

En el caso de que sea primera vez que se utiliza el código en el computador, se deben instalar las librerías en la consola, como se muestra en la en la imagen.

## Anexo 6: Archivos Excel

### Anexo 6.1 Datos

A continuación se mostrará a modo de ejemplo, el archivo generado por el código python ya descrito, del tramo L5 Baquedano - Bellas Artes con el nombre “DatosL5B”.

1	Fecha	sentamien										
2	01-01-1900	03739	01-01-1900	03741	01-01-1900	03743	01-01-1900	03745	01-01-1900	03747	01-01-1900	03749
3	28/06/2022	-0.01163	28/06/2022	-0.05556	28/06/2022	-0.1021	28/06/2022	-0.09279	28/06/2022	-0.11228	28/06/2022	-0.15883
4	28/06/2022	0.008922	28/06/2022	-0.03452	28/06/2022	-0.07796	28/06/2022	-0.05682	28/06/2022	-0.06361	28/06/2022	-0.10705
5	28/06/2022	0.045186	28/06/2022	-0.03006	28/06/2022	-0.08959	28/06/2022	-0.07757	28/06/2022	-0.10395	28/06/2022	-0.16348
6	28/06/2022	0.061185	28/06/2022	-0.03122	28/06/2022	-0.10094	28/06/2022	-0.07641	28/06/2022	-0.10598	28/06/2022	-0.1757
7	28/06/2022	0.028509	28/06/2022	-0.01716	28/06/2022	-0.06719	28/06/2022	-0.04131	28/06/2022	-0.05992	28/06/2022	-0.10996
8	28/06/2022	-0.00504	28/06/2022	-0.09037	28/06/2022	-0.16522	28/06/2022	-0.17725	28/06/2022	-0.22592	28/06/2022	-0.30078
9	28/06/2022	0.000341	28/06/2022	-0.05779	28/06/2022	-0.10981	28/06/2022	-0.10162	28/06/2022	-0.13531	28/06/2022	-0.18733
10	28/06/2022	0.012413	28/06/2022	-0.03626	28/06/2022	-0.07621	28/06/2022	-0.05333	28/06/2022	-0.07234	28/06/2022	-0.11228
11	28/06/2022	-0.03122	28/06/2022	-0.04324	28/06/2022	-0.05701	28/06/2022	-0.02104	28/06/2022	-0.02172	28/06/2022	-0.03549
12	28/06/2022	-0.04761	28/06/2022	-0.05856	28/06/2022	-0.07127	28/06/2022	-0.05255	28/06/2022	-0.06351	28/06/2022	-0.07621
13	28/06/2022	-0.06938	28/06/2022	-0.08727	28/06/2022	-0.10167	28/06/2022	-0.08465	28/06/2022	-0.09469	28/06/2022	-0.1117
14	28/06/2022	-0.09163	28/06/2022	-0.09948	28/06/2022	-0.11083	28/06/2022	-0.09774	28/06/2022	-0.1021	28/06/2022	-0.12043
15	28/06/2022	-0.09754	28/06/2022	-0.08251	28/06/2022	-0.07883	28/06/2022	-0.03588	28/06/2022	-0.03045	28/06/2022	-0.02676
16	28/06/2022	-0.0925	28/06/2022	-0.0733	28/06/2022	-0.06458	28/06/2022	-0.03491	28/06/2022	-0.04014	28/06/2022	-0.03491
17	28/06/2022	-0.10792	28/06/2022	-0.10326	28/06/2022	-0.10472	28/06/2022	-0.06952	28/06/2022	-0.06836	28/06/2022	-0.0733
18	29/06/2022	-0.06748	29/06/2022	-0.0861	29/06/2022	-0.10472	29/06/2022	-0.07796	29/06/2022	-0.07563	29/06/2022	-0.10647
19	29/06/2022	-0.02977	29/06/2022	-0.06041	29/06/2022	-0.09541	29/06/2022	-0.06671	29/06/2022	-0.08164	29/06/2022	-0.12014
20	29/06/2022	0.012413	29/06/2022	-0.06419	29/06/2022	-0.11635	29/06/2022	-0.05857	29/06/2022	-0.08106	29/06/2022	-0.1437

Anexo 6.1.1

### Anexo 6.2 TiltMeter Diario

A continuación se mostrará a modo de ejemplo el archivo excel que calcula los promedios diarios de las mediciones de los Tiltmeters, en este caso se ocupará el sector L5 Baquedano - Bellas Artes. El archivo se llama “Tiltmeter Diario L5 Baquedano”.

Hoja “Calculo Promedio”

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2	Última medición				3739		3741		3743
3	04-11-2023		Fecha	Cantidad por día	Suma misma fe	Cantidad por día	Suma misma	Cantidad por	Suma misma
4			28-06-2023	15	-0.397911757	15	-0.90057434	15	-1.37792543
5	Primera medición		29-06-2023	16	-1.253655068	16	-1.50290597	16	-1.7809557
6	28-06-2023		30-06-2023	16	-2.260079526	16	-2.05927817	16	-2.094097
7			01-07-2023	16	-2.08864948	16	-2.13966005	16	-2.50395859
8			02-07-2023	16	-1.404140967	16	-1.87107351	16	-2.54395566
9			03-07-2023	16	-1.115385943	16	-1.50736622	16	-2.06951692
10			04-07-2023	16	-2.62708339	16	-2.25747004	16	-2.2404138
11			05-07-2023	16	-2.34201303	16	-1.9482558	16	-1.92363659
12			06-07-2023	16	-2.638525	16	-1.74279178	16	-1.37763934
13			07-07-2023	16	-1.526701923	16	-0.57506948	16	-0.10863953

### Anexo 6.2.1

#### Hoja “Promedios diarios”

1	TiltMeter	Tilt	Tilt	Tilt	Tilt	Tilt	Tilt	Tilt
2	PK	3739	3741	3743	3745	3747	3749	
3	Última medición	28-06-2023	-0.02652745	-0.06003829	-0.0918617	-0.07155872	-0.08668608	-0.11961445
4	04-11-2023	29-06-2023	-0.07835344	-0.09393162	-0.11130973	-0.07911005	-0.09305264	-0.11861078
5		30-06-2023	-0.14125497	-0.12870489	-0.13088106	-0.09280603	-0.09901889	-0.1021756
6		01-07-2023	-0.13054059	-0.13372875	-0.15649741	-0.12330688	-0.14062197	-0.1601169
7		02-07-2023	-0.08775881	-0.11694209	-0.15899723	-0.11247735	-0.13702525	-0.17842468
8		03-07-2023	-0.06971162	-0.09421039	-0.12934481	-0.078904	-0.10318526	-0.14551794
9		04-07-2023	-0.16419271	-0.14109188	-0.14002586	-0.07465582	-0.07124512	-0.06974157
10		05-07-2023	-0.14637581	-0.12176599	-0.12022729	-0.0482759	-0.04052006	-0.04541604
11		06-07-2023	0.15400781	0.10802440	0.08510245	0.00107812	0.01025252	0.02052205

#### Anexo 6.2.2

#### Anexo 6.3 Gráficos

A continuación se mostrarán algunas de las hojas del archivo Excel que genera los gráficos. Para seguir con el ejemplo utilizado en otras ocasiones, se ocupará el sector L5 Baquedano Bellas Artes. El archivo se llama “Gráficos L5 Baquedano”.

PUNTO	0	3650	3650	3654	3654	3658		
	S01	S01	S02	S01	S02	S01		
		0.1		0.1		0.0		
		-0.1	0.0	-0.2	-0.1	0.0		
		3	4	5	4	5		
		asen 1	asen 2	asen 1	asen 2	asen 1		
DATE	Absoluto	Asentamiento	Absoluto	Asentamiento	Absoluto	Asentamiento	Absoluto	Asentamiento
20-01-2023								
03-02-2023								
07-03-2023								
21-04-2023								
26-05-2023								
02-06-2023								
11-08-2023								
18-08-2023	558.5857	0.0	558.5332	0.0	558.5737	0.0	558.5202	0.0
25-08-2023	558.5858	0.1	558.5333	0.1	558.5737	0.0	558.5201	-0.1
26-09-2023	558.5857	0.0	558.5334	0.2	558.5735	-0.2	558.5203	0.1
03-10-2023	558.5856	-0.1	558.5333	0.1	558.5737	0.0	558.5203	0.1
17-10-2023	558.5859	0.2	558.5335	0.3	558.5740	0.3	558.5202	0.0
20-10-2023	558.5860	0.3	558.5336	0.4	558.5741	0.4	558.5205	0.3
24-10-2023	558.5858	0.1	558.5334	0.2	558.5738	0.1	558.5203	0.1
31-10-2023	558.5858	0.1	558.5334	0.2	558.5740	0.3	558.5203	0.1
04-11-2023	558.5856	-0.1	558.5332	0.0	558.5738	0.1	558.5202	0.0

#### Datos Brutos AS

En esta hoja se deben ingresar los datos entregados por la UM en cuanto a los AS, se deben copiar los PK y también los distintos valores. En el Manual se encuentra disponible mayor detalle.

TiltMeter	Tilt	Tilt	Tilt	Tilt	Tilt										
PK	3719	3721	3723	3725	3727	3729	3731	3733	3735	3737	3739	3741	3743		
28-06-2023											-0.02652745	-0.06003829	-0.0918617		
29-06-2023											-0.07835344	-0.09393162	-0.11130973		
30-06-2023											-0.14125497	-0.12870489	-0.13088106		
01-07-2023											-0.13054059	-0.13372875	-0.15649741		
02-07-2023											-0.08775881	-0.11694209	-0.15899723		
03-07-2023											-0.06971162	-0.09421039	-0.12934481		
04-07-2023											-0.16419271	-0.14109188	-0.14002586		
05-07-2023											-0.14637581	-0.12176599	-0.12022729		
06-07-2023											-0.16490781	-0.10892449	-0.08610246		
07-07-2023											-0.09541887	-0.03594184	-0.00678997		

#### Tiltmeters

En esta hoja se deben copiar los valores directamente del archivo Excel que calcula los promedios diarios de los Titmeter. En este caso, los datos se obtuvieron desde el archivo “Titmeter Diario L5 Baquedano”.

PK				FECHA			
Copiar PK Titimeters	Copiar PK AS	Copiar ambos y ordenar	Copiar y filtrar duplicados	Copiar Fecha Titimeters	Copiar Fecha AS	Copiar ambos y ordenar	Copiar y filtrar duplicados
3719	3650	3650	3650	28-06-2023	20-01-2023	20-01-2023	20-01-2023
3721	3654	3654	3654	29-06-2023	03-02-2023	03-02-2023	03-02-2023
3723	3658	3658	3658	30-06-2023	07-03-2023	07-03-2023	07-03-2023
3725	3662	3662	3662	01-07-2023	21-04-2023	21-04-2023	21-04-2023
3727	3666	3666	3666	02-07-2023	26-05-2023	26-05-2023	26-05-2023

Matriz

En la hoja “Matriz” se deben seguir algunos pasos adicionales. En esta sección de la hoja se deben copiar los PK y las fechas de los dos instrumentos de medición. Así se obtienen el compilado de PK y fechas en orden (de menor a mayor) y sin repetir. Esto se utiliza en otras funciones del archivo.

Tiltmeter	Tilt						
	3719	3721	3723	3725	3727	3729	3731
AS 1	AS 1	AS 1	AS 1	AS 1	AS 1	AS 1	AS 1
	3650	3654	3658	3662	3666	3670	3674
AS 2	AS 2	AS 2	AS 2	AS 2	AS 2	AS 2	AS 2
	3650	3654	3658	3662	3666	3670	3674
Compilado PK	Tilt						
	3719	3721	3723	3725	3727	3729	3731

Matriz

Aquí se deben copiar el compilado de los PK para todos los instrumentos. Solo la fila que tiene color es la que debe pegarse los datos sin dejar espacios, el resto se genera automáticamente.

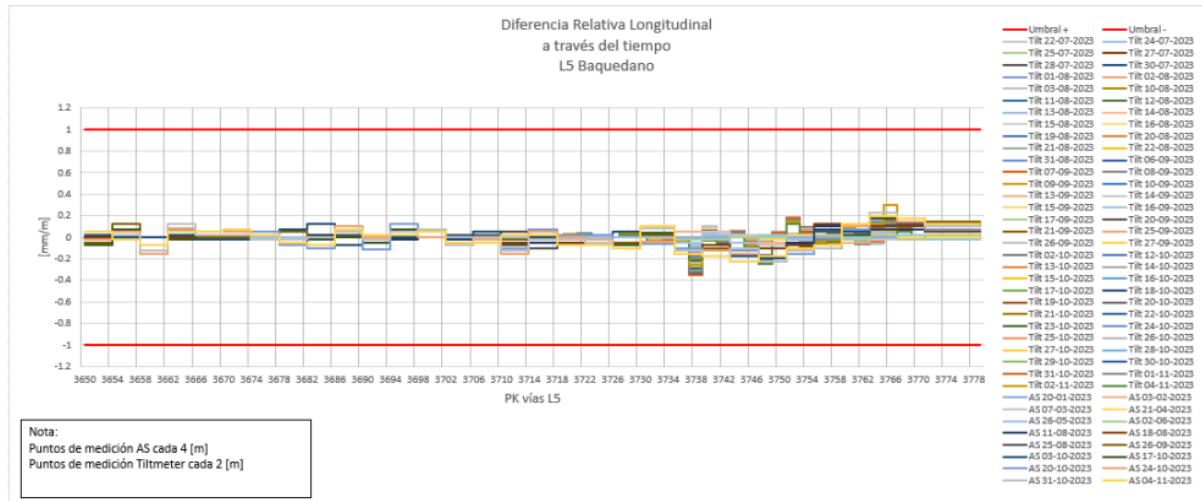
Se debe repetir este proceso para las fechas. Estas filas se usan para los gráficos tipo 3 y 4.

Línea metro	L5
Sector Estudiado	Baquedano

Matriz

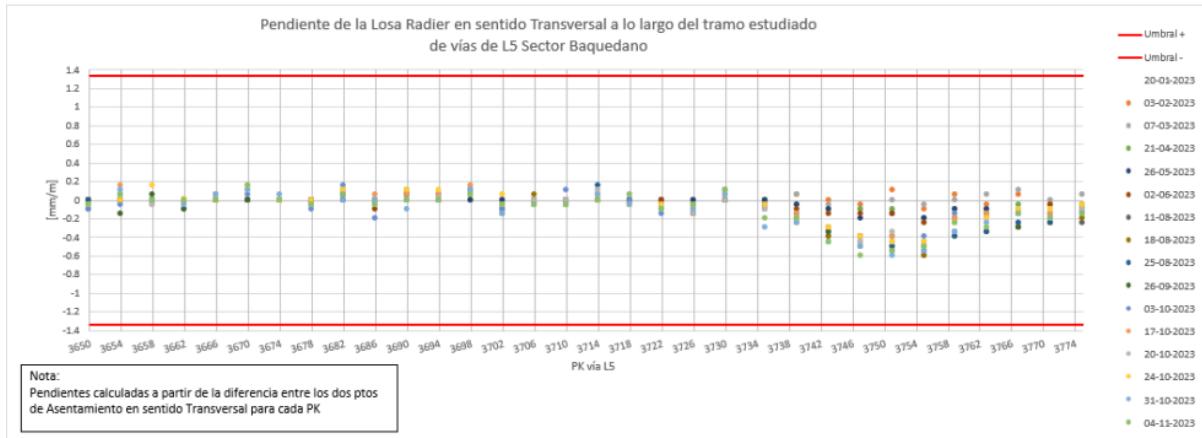
El último paso que debe ser rellenado es el sector estudiado que corresponda. Esto se utiliza para cambiar automáticamente los títulos de los distintos gráficos.

## Anexo 7: Gráficos



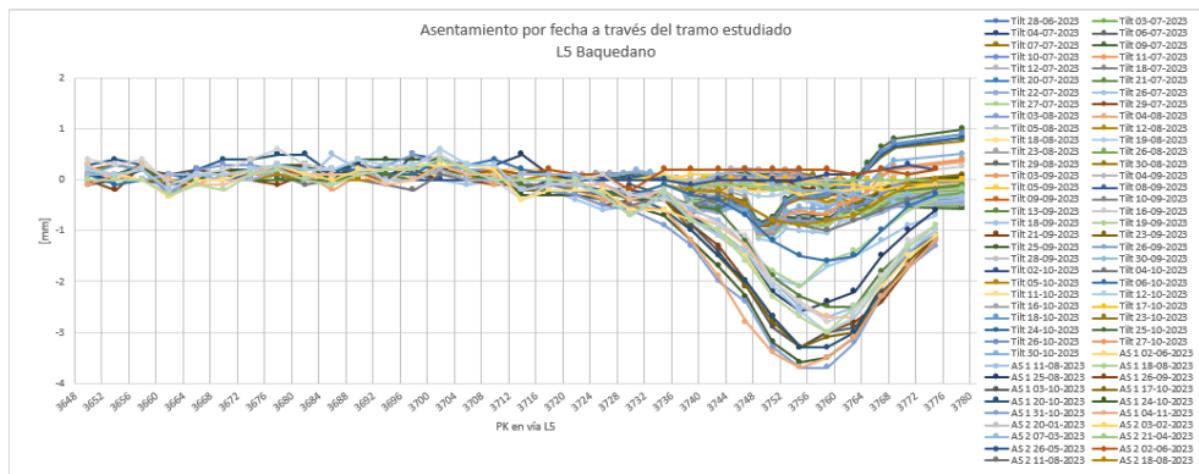
### Anexo 7.1

Se muestran las diferencias relativas longitudinales a lo largo del tramo estudiado para distintas fechas e instrumentos de medición. Además, se muestran los umbrales definidos según los criterios de metro.



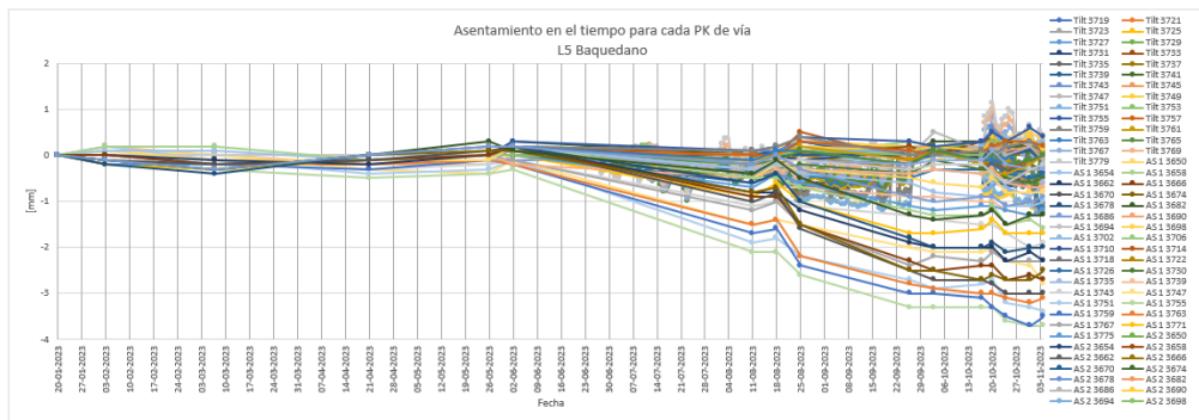
### Anexo 7.2

Se muestran las pendientes transversales de la losa radier para cada PK a lo largo del tramo estudiado para distintas fechas de medición. Además, se muestran los umbrales definidos según los criterios de metro.



## Anexo 7.3

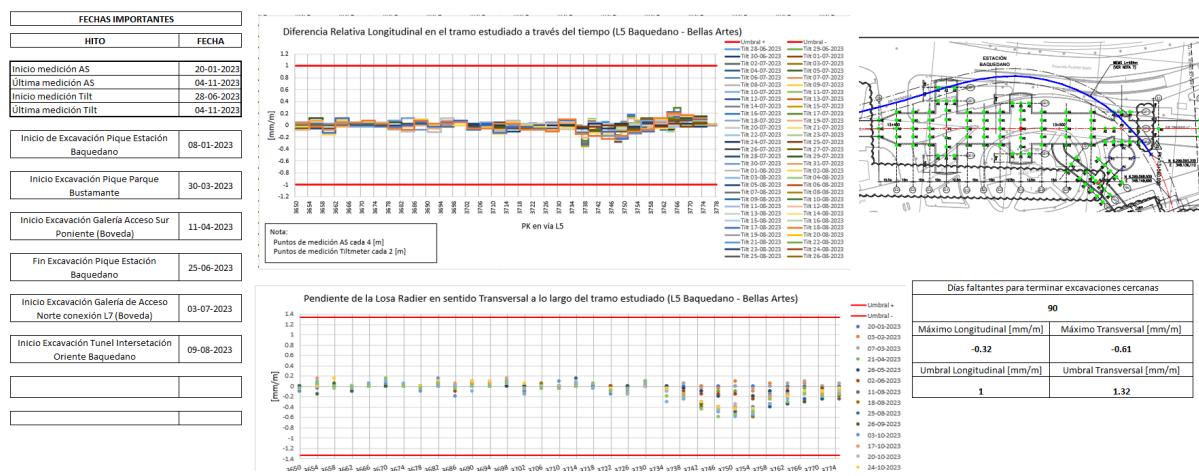
Se muestra el asentamiento a lo largo del tramo estudiado para las distintas fechas e instrumentos de medición.



Anexo 7.4

Se muestran los asentamientos a través del tiempo para los distintos PKs medidos con su respectivo instrumento.

## Anexo 8: Dashboard



Anexo 8.1

Este es un ejemplo de lo que se visualiza para cada tramo estudiado

FECHAS IMPORTANTES	
HITO	FECHA
Inicio medición AS	20-01-2023
Última medición AS	04-11-2023
Inicio medición Tilt	28-06-2023
Última medición Tilt	04-11-2023
Inicio de Excavación Pique Estación Baquedano	08-01-2023
Inicio Excavación Pique Parque Bustamante	30-03-2023
Inicio Excavación Galería Acceso Sur Poniente (Boveda)	11-04-2023
Fin Excavación Pique Estación Baquedano	25-06-2023
Inicio Excavación Galería de Acceso Norte conexión L7 (Boveda)	03-07-2023
Inicio Excavación Tunel Intersetación Oriente Baquedano	09-08-2023

#### Anexo 8.2

Aquí se ve la forma de presentar los hitos importantes de excavación. Los primeros 4 enmarcados en línea gruesa se rellenan automáticamente.

Días faltantes para terminar excavaciones cercanas	
<b>90</b>	
Máximo Longitudinal [mm/m]	Máximo Transversal [mm/m]
-0.32	-0.61
Umbral Longitudinal [mm/m]	Umbral Transversal [mm/m]
<b>1</b>	<b>1.32</b>

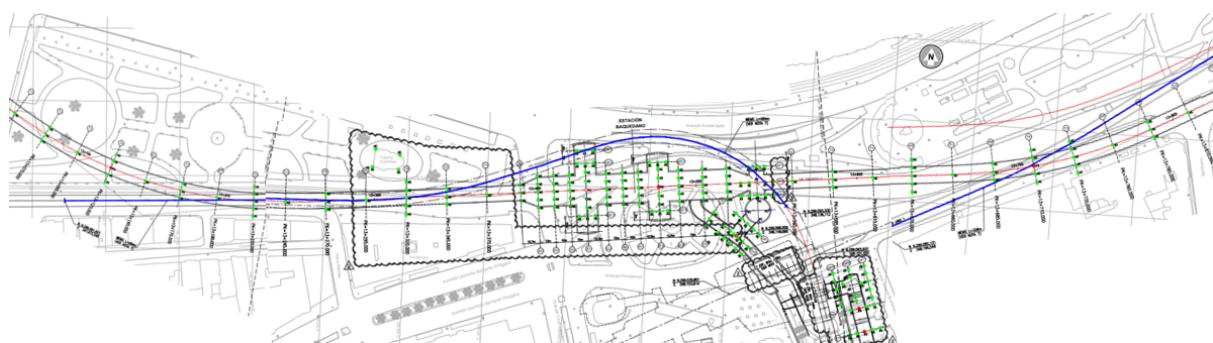
#### Anexo 8.3

En esta parte del Dashboard se muestran las pendientes máxima encontradas en el tramo y sus respectivos umbrales, además se muestra los días teóricos restantes de excavación de la L7 en ese tramo, para poder anticiparse y ver que tan cerca se está de superar el umbral antes de que se encuentre el nuevo equilibrio.

Mapa | **L5 Baquedano - Bellas Artes** | L1 Baquedano - Bellas Artes | L1 Salvador - Manuel Montt |

Anexo 8.4

Aquí se muestra la disposición de las hojas con las que cuenta de momento el Dashboard, a medida que avanza el proyecto se agregarán más sectores.



Anexo 8.5

Aquí se muestra la hoja “Mapa” del Dashboard. La línea de color rojo representa el trazado de la Línea 7, mientras que la línea azul, representa los tramos de los túneles existentes que están instrumentados. A partir de este mapa es que se puede acceder de forma rápida a las distintas hojas del Dashboard mostradas en el anexo anterior.

## Anexo 9: Manual de uso del producto

### ***Manual para el buen uso de la herramienta de automatización de los gráficos que representan el asentamiento en líneas en funcionamiento del Metro de Santiago***

#### **Introducción**

En este informe se explica cómo se utiliza el sistema de automatización del procesamiento de datos entregados por la Unidad de Monitoreo (UM). Este sistema se puede separar en dos. La primera parte consiste en obtener los datos brutos e insertarlos en el archivo excel de la manera que se indicará posteriormente y la segunda parte consiste en resguardar que las columnas y filas con funciones abarquen todos los datos necesarios, además, de ingresar los títulos de los gráficos y verificar algunos parámetros.

En la carpeta que contiene los distintos archivos requeridos, se trabajarán 3 excel “tipo”:

1. Datos \_\_\_\_\_
2. TiltMeter Diario \_\_\_\_\_
3. Gráficos \_\_\_\_\_

El primero es el generado por un código python que cumple la función de leer los distintos archivos csv y juntarlos todos en un archivo Excel. Guardar como: Datos (Línea y sector estudiado).

El segundo nace a partir de TiltMeter Diario Base, se debe guardar una copia con el nombre: TiltMeter Diario (Línea y sector estudiado). En él se insertan los datos guardados en el archivo “Datos” que corresponda y luego éste calcula los promedios diarios para cada PK.

El tercero es el archivo excel que genera los gráficos de forma automática, éste nace a partir de Gráficos Base y se debe guardar una copia como: Gráficos (Línea y sector estudiado) y luego insertar los datos de “TiltMeter Diarios” que corresponda y los datos AS obtenido del archivo excel entregado por la UM.

En las distintas hojas del Excel base hay tablas (o matrices) que están marcadas con distintos colores. Dichos colores indican que corresponden a una matriz que se utiliza en distintas funciones parte de la automatización, por lo que el usuario debe resguardar que las distintas matrices que tengan esos colores abarquen todos los datos de interés. En el caso de que esto no se cumpla se debe ir a la pestaña de “Fórmulas”, luego al “Administrador de nombres”, seleccionar la matriz que debe cambiar de tamaño y seleccionar un rango apropiado.

A continuación, se explica con mayor detalle los pasos a seguir para el correcto uso de esta herramienta.

## Obtención Datos Tiltmeters Diarios

El primer paso es hacer la lectura de los distintos archivos csv que envía la Unidad de Monitoreo. Para ello utilizaremos un código python, a través de Visual Studio. Lo que se debe hacer es arrastrar la carpeta con las mediciones de un sector de la UM a la carpeta “Códigos”. Además, se debe descomprimir la carpeta dentro de la carpeta “Códigos”.

Una vez hecho esto, se debe modificar en el código python la variable “ruta\_carpeta”. Para lograr esto accede a la carpeta donde esté el código python desde el Explorador de Archivos, haz click derecho en la carpeta y selecciona “Propiedades”, en la pestaña aparece la Ubicación de la carpeta, copia y pegala en la variable, además, colocar el nombre textual de la carpeta con los archivos csv de interés, luego de la ubicación de la carpeta con un “\” entre medio.

Por último, cambiar el nombre del archivo excel que se creará y hacer correr el código.

El archivo excel contendrá las distintas mediciones solo con las columnas de Fecha y Asentamiento, y se agruparán hacia la derecha con los PK en orden ascendente.

Los PK correspondientes se encuentran en la segunda fila.

Después es necesario crear un archivo excel con el nombre adecuado a partir de “TiltMeter Diario Base”, en él, importar los datos del archivo excel creado con python. Una vez hecho esto copiar todos los datos en la hoja “Sheet 1” en la celda A1. Se calcularán los promedios por día automáticamente. Resguardar que estén todas las columnas y filas necesarias con sus respectivas funciones.

Los PK también se modifican automáticamente. Para que funcione correctamente esa función es necesario que los distintos archivos csv tengan el formato : C\_AAAA-XXXX\_TILT.csv. En estricto rigor el archivo debe tener el número del PK luego de un “-”.

Si es la primera vez que se está utilizando python en el computador, será necesario instalar las librerías que utiliza el código. En este caso son las siguientes:

- pandas
- os
- re

Para lograr esto se debe escribir en la consola, el comando “pip install” y luego escribir el nombre de la librería a descargar. (Anexo 6). Este proceso se debe realizar solo una vez.

## Datos AS

En la hoja “Datos Brutos AS” pegar en la celda D3 los distintos PK con su respectivo “S0\_” (1 o 2).

Pegar en la celda D11 (marcada con amarillo) todos los datos de asentamiento (Fechas, columnas de Asoluto y las columnas de Asentamiento) desde el archivo correspondiente de la UM.

En la columna A se deben pegar todos los PK de la fila 3, de manera traspuesta (y solo valores). Para luego quitar los Datos duplicados, con la función de Excel “Quitar duplicados” en la pestaña Datos.

Luego pegar los PK en la columna B donde está indicado con color verde.

Revisar las hojas “AS 1”, “Pend. AS 1”, “AS 2”, “Pend. AS 2” y “Selec. AS” que tengan todas las filas y columnas con funciones dentro del rango necesario.

En cuanto a las hojas “Pend. AS \_”, los Tramos se generan automáticamente a partir de los PK que se tienen en las hojas AS1 y AS2. Lo mismo ocurre con las fechas. Resguardar que en la fila superior esté el instrumento que corresponda. El proceso matemático para las pendientes es restar los asentamientos de los PK contiguos y dividirlos por la distancia entre ellos, a partir de la hoja “AS \_”

El proceso termina cuando en la columna de los PK el valor se hace 0.

En cuanto a la hoja “Selec. AS”, los Tramos se generan automáticamente a partir de los PK que se tienen en las hojas AS1 y AS2. Lo mismo ocurre con las fechas. El proceso matemático es escoger la pendiente longitudinal máxima (en valor absoluto) entre AS 1 y AS 2, para la coordenada que corresponda (Tramo/Fecha). El proceso termina cuando en la columna de los PK el valor se hace 0.

## Tiltmeters

En la hoja “Tiltmeters” se debe copiar en la celda A1 (destacada en amarillo) los valores de la hoja “Promedios diarios” del archivo Excel correspondiente creado previamente “TiltMeter Diario \_\_\_\_”. Se debe incluir la fila de los TiltMeter y la del PK.

A continuación, revisar que la hoja “Tras. Tilt” tenga todas las filas y columnas adecuadas.

Repetir para la hoja “Pend.Tilt”.

El proceso matemático para las pendientes es restar los asentamientos de los PK contiguos y dividirlos por la distancia entre ellos, a partir de la hoja “Tras. Tilt”

El proceso termina cuando en la columna de los PK el valor se hace 0.

## Matriz

La hoja “matriz” tiene la finalidad de encontrar los PK y las fechas medidas a lo largo del tramo estudiado, combinando los AS con los Tiltmeter.

Los PK y las fechas son extraídas automáticamente desde los datos brutos.

Se deben copiar en una misma columna los AS y los Tiltmeter, para luego utilizar la función ordenar de excel.

Luego de ordenar de menor a mayor se copia en otra columna los datos (marcadas con amarillo y verde), para luego utilizar la función “Quitar duplicados” (en la pestaña Datos).

Para los PK traspuestos con su respectivo instrumento de medición (a partir de la columna N), estos se generan automáticamente. Se deben juntar todos en una fila (marcada con color) sin dejar espacios en blanco.

Las columnas y filas marcadas con colores son las que se utilizan en el resto de procesos para los gráficos. Estas se deben llenar manualmente como se indicó.

En las casillas que estén en blanco seleccionarlas y suprimirlas, para que en el gráfico no se confunda los valores “0” con los datos vacíos. También se debe llenar las celdas P1 y P2 (marcadas en celeste) con la línea de Metro estudiada (Ej. L1 )y con el Sector estudiado. (Ej. Baquedano - Salvador)

## **Gráficos**

Ahora que ya tenemos los datos actualizados, falta revisar que la selección de datos de los gráficos sea la adecuada, resguardar que en las hojas descritas a continuación, estén todas las filas y columnas necesarias con sus respectivas funciones Precaución al momento de definir los valores máximos y mínimos de los ejes. Se recomienda tenerlos en valores automáticos y luego modificar agregando “espacio” al gráfico.

El título del gráfico se actualiza automáticamente según lo ingresado en la hoja “Matriz”

## **Longitudinal**

Esta tabla se genera automáticamente. Para poder hacer el gráfico en excel se separan los tramos cada 1 metro a lo largo de la distancia estudiada. Entrega su respectivo valor (para cada fecha) buscando en las hojas “Pend. Tilt” y “Selec. AS”. Cabe destacar que no se está haciendo una aproximación o proceso matemático, esto se realiza simplemente por requerimientos de excel.

El siguiente paso se realiza en la hoja “Graf. Long.”

Para completar la tabla 2, de la cual obtiene los datos el gráfico, se debe realizar el siguiente algoritmo:

Se debe representar los tramos en una sola columna. Para lograr esto, primero se copian los PK de la columna A exceptuando el primer dato y el último. Por otro lado se deben copiar todos los valores de la tabla 1 (incluyendo los instrumentos de medición y sus fechas), exceptuando la última fila.

Por último se copian todos los PK de la columna A (exceptuando el último valor) y todos los valores de la Tabla 1 debajo de los datos ya ingresados.

Para los umbrales estos tienen un valor de 1[mm/m] acorde a lo establecido en los criterios de operabilidad de metro. Rellenar todas las filas necesarias en la tabla 2 con los valores 1 y -1

En las casillas que estén en blanco seleccionarlas y suprimirlas, para que en el gráfico no se confunda los valores “0” con los datos vacíos.

## **Transversal**

Para el uso de este gráfico se deben ingresar en las celdas C3 y C4 la distancia entre los puntos AS de un mismo PK, y la distancia entre los rieles de una misma vía. Se deben revisar los planos de los gálibos correspondientes.

Para el cálculo de la pendiente transversal de cada PK se resta el asentamiento de AS1 menos AS2 y se divide por la distancia entre AS [m]. A partir de esta pendiente podemos estimar la diferencia entre las cotas de los rieles de una misma vía. Se tiene como supuesto que la losa es rígida en comparación al suelo, por lo que podemos asumir que la losa rota y tiene una pendiente constante en el sentido transversal. Por lo tanto podemos estimar su deformación a partir de estos dos puntos de monitoreo.

La diferencia de las cotas de los rieles es la misma para ambas vías.

El umbral se calcula dividiendo los 2 [mm] establecidos en el criterio de metro, dividido por la distancia entre los rieles [m]. Este umbral se requiere positivo y negativo. Rellenar en todas las filas necesarias para el gráfico.

### **Asentamiento en el Tiempo**

Esta hoja no realiza ninguna operación matemática o tratamiento de los datos, simplemente junta los datos de los Tiltmeters con los AS. Se indica para un mismo PK el asentamiento a lo largo del tiempo en que hayan mediciones por parte de la UM. Dar “espacio” a las fechas cosa que se note desde cuando hay mediciones y hasta cuando hay mediciones representadas en el gráfico.

### **Asentamiento por PK**

Esta hoja no realiza ninguna operación matemática o tratamiento de los datos, simplemente junta los datos de los Tiltmeters con los AS. Se indica para una misma fecha el asentamiento de todos los PK que tengan mediciones según el instrumento respectivo.

Dar “espacio” al tramo estudiado cosa de que se note cual es el tramo que efectivamente tiene mediciones. Precaución que en los ajustes los PK están representados por su equivalente en fecha.

### **Dashboard**

Para la elaboración del Dashboard se debe hacer click en el botón “Guardar Gráficos en Dashboard” que se encuentra en la hoja “Gráficos”, se creará una hoja en el archivo “Dashboard” con el nombre que esté en la casilla que indica el sector estudiado. En el caso de que ya exista una hoja con ese nombre, se actualizarán los gráficos. En la hoja se debe llenar las casillas de los hitos importantes relacionados con los inicios y términos de excavaciones cercanas al tramo estudiado, al igual que el tiempo teórico restante para que terminen las excavaciones cercanas. Se recomienda agregar foto del mapa del sector estudiado.

El resto de la información se rellena automáticamente a partir de los datos respectivos de su archivo “Gráficos \_ \_\_\_\_”

### Anexo 10: Carta Gantt

Proyecto de Pasantía	Mes					Agosto					Septiembre					Octubre					Noviembre					Diciembre						
	Semana		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Estudio de los Datos entregados por la UM	30/08/23	30/09/23	100 %																													
Entrega de los 4 gráficos tipo	02/10/23	11/10/23	100 %																													
Entrega del Archivo Excel que genera los gráficos	12/10/23	31/10/23	100 %																													
Entrega Archivo Excel automatizado	01/11/23	06/11/23	100 %																													
Determinar información contenida en Dashboard	07/11/23	16/11/23	70 %																													
Entrega Dashboard automático	17/11/23	04/12/23	0 %																													
Informe final	02/11/23	06/12/23	50 %																													
Presentación Empresa	06/12/23	12/12/23	0 %																													

*Carta Gantt*

## Anexo 11: Encuestas

### Anexo 11.1 Evaluando Gráficos

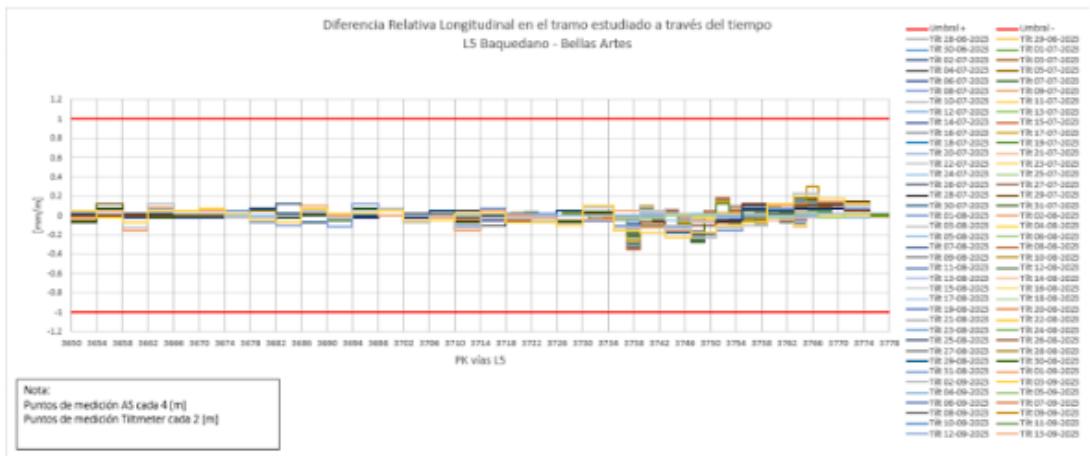
La encuesta que será respondida para evaluar el formato de los gráficos tipo se mostrará a continuación. Se muestra la introducción de la encuesta, y las 4 preguntas para cada uno de los gráficos.

## Gráficos

Esta encuesta tiene como finalidad evaluar los 4 gráficos tipo, que muestran el fenómeno de Asentamiento en las líneas existentes estudiadas y el cumplimiento de los siguientes criterios establecidos por Metro:

1. Se debe limitar el asentamiento relativo de los túneles en sentido longitudinal, a 1 [mm/m], medido en el hormigón de vías o en el radier de los túneles
2. En sentido transversal, para sectores en recta, la cota de un riel respecto del otro, de una misma vía, no puede exceder los +2mm

## Evaluación 1er criterio de Metro (Longitudinal) \*



1    2    3    4    5    6    7

Poco claro, no se entiende que es lo que se quiere graficar



Intuitivo, se entiende que es lo que se quiere mostrar

Nº de Encuestas realizadas	10
Promedio Gráfico	7.0

## Evaluación 2do criterio de Metro (Transversal) \*



1 2 3 4 5 6 7

Poco claro, no se entiende  
que es lo que se quiere  
graficar



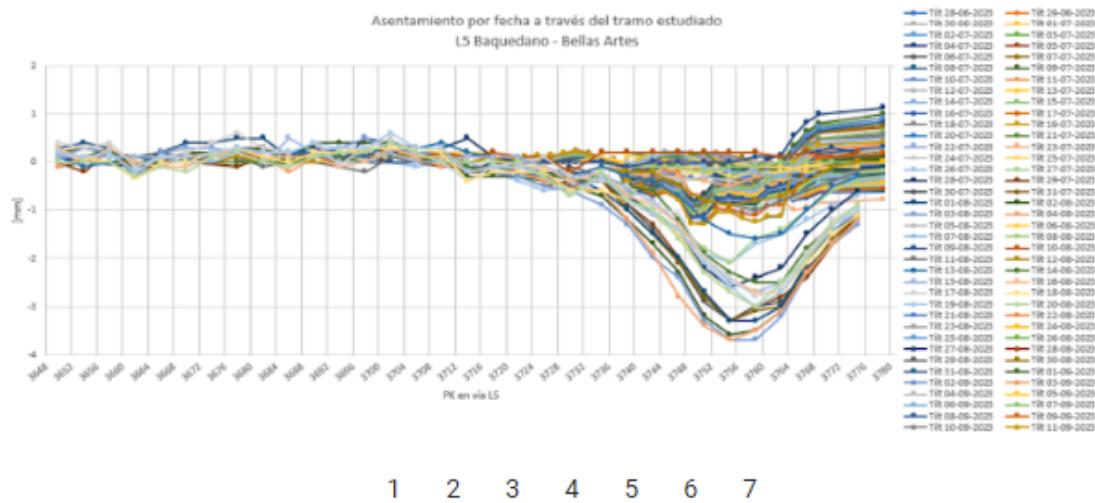
Intuitivo, se entiende que  
es lo que se quiere  
mostrar

Nº de Encuestas realizadas	10
Promedio Gráfico	6.2

Gráfico 3

\*

(Tiene el fin de evaluar si los datos entregados por la UM son congruentes con lo esperado)



1 2 3 4 5 6 7

Poco claro, no se entiende  
que es lo que se quiere  
graficar

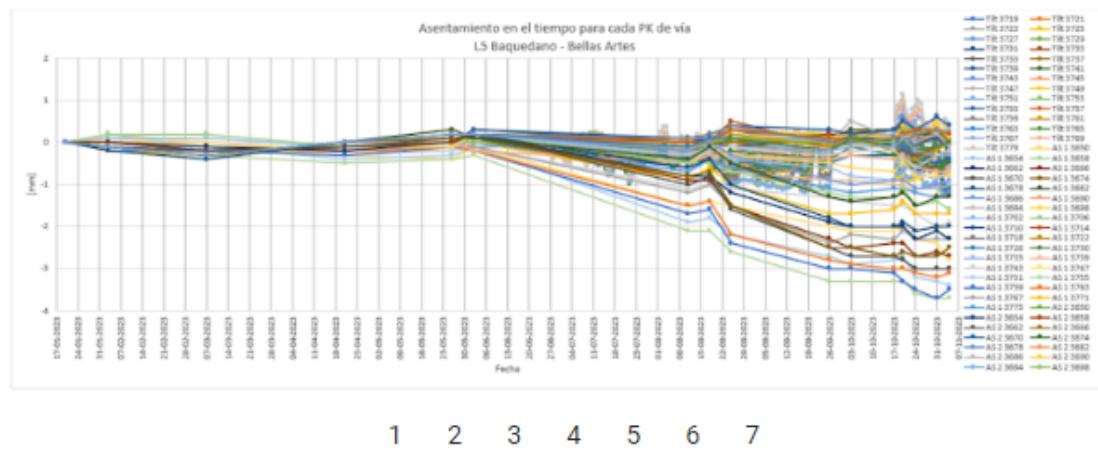


Intuitivo, se entiende que  
es lo que se quiere  
mostrar

Nº de Encuestas realizadas	10
Promedio Gráfico	7.0

Gráfico 4

(Tiene el fin de evaluar si los datos entregados por la UM son congruentes con lo esperado)



Poco claro, no se entiende que es lo que se quiere graficar



Intuitivo, se entiende que es lo que se quiere mostrar

Nº de Encuestas realizadas	10
Promedio Gráfico	7.0

## Anexo 11.2 Evaluando Dashboard

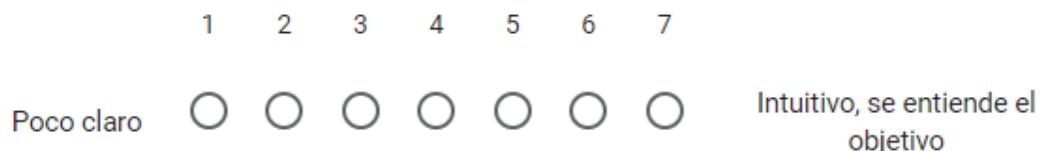
La encuesta que será respondida para evaluar el formato del Dashboard se muestra a continuación, con sus respectivas notas:

## Dashboard

Esta encuesta tiene como finalidad evaluar el Dashboard que recopila la información de los distintos sectores en el cual la excavación de la L7, afecta las líneas existentes de Metro.

En cada pregunta se describirá el criterio con el cual usted debe evaluar con una nota del 1 al 7

¿Le parece intuitiva la lectura del Dashboard? ¿entiende que es lo que se quiere transmitir?



Nº de Encuestas realizadas	10
Promedio Pregunta	7.0

¿Considera que la información entregada es suficiente para entender el fenómeno estudiado?



Nº de Encuestas realizadas	10
Promedio Pregunta	7.0

¿Cree que este Dashboard aporta a una mejor toma de decisiones?



Nº de Encuestas realizadas	10
Promedio Pregunta	7.0

## Anexo 12: Evaluación Económica

A continuación se muestra la información obtenida a través de la página web del INE, en la sección de Cuadros estadísticos de Metro.

NÚMERO DE PASAJEROS TRANSPORTADOS EN METRO DE SANTIAGO, OCTUBRE 2023											
Mes y año / <sup>P</sup>	Total Red	Pasajeros comunes	Escolares Total	Escolares Pagados <sup>1</sup>	Escolares Básicos (Gratuitos)	Total Línea 1	Pasajeros comunes	Escolares Total	Escolares Pagados <sup>1</sup>	Escolares Básicos (Gratuitos)	To
oct-22	48,253,058	33,424,899	14,828,159	12,958,835	1,869,324	16,463,522	11,639,435	4,824,087	4,286,474	537,613	
nov-22	49,437,359	33,396,699	16,040,660	13,962,428	2,078,232	17,112,357	11,790,526	5,321,831	4,715,487	606,344	
dic-22	47,005,899	33,251,439	13,754,460	11,739,368	2,015,092	16,026,925	11,634,867	4,392,058	3,801,675	590,383	
ene-23	41,085,677	29,692,429	11,393,248	9,660,458	1,732,790	14,158,726	10,568,922	3,589,804	3,080,455	509,349	
feb-23	34,606,344	25,317,083	9,289,261	7,803,023	1,486,238	11,920,992	9,006,388	2,914,604	2,478,510	436,094	
mar-23	53,606,469	35,866,343	17,740,126	15,442,318	2,297,808	18,615,401	12,722,544	5,892,857	5,230,031	662,826	
abr-23	49,637,585	31,990,585	17,647,000	15,538,188	2,108,812	17,221,273	11,329,150	5,892,123	5,278,205	613,918	
may-23	55,181,712	35,186,554	19,995,158	17,463,217	2,531,941	19,190,204	12,469,642	6,720,562	5,983,205	737,357	
jun-23	49,740,680	33,614,485	16,126,195	14,104,703	2,021,492	17,320,269	11,898,824	5,421,445	4,818,857	602,588	
jul-23	49,584,032	34,940,007	14,644,025	12,485,119	2,158,906	17,173,124	12,432,510	4,740,614	4,105,350	635,264	
ago-23	53,893,786	35,994,624	17,899,162	15,455,956	2,443,206	18,649,671	12,757,782	5,891,889	5,177,743	714,146	
sept-23	49,675,843	32,940,071	16,735,772	14,478,299	2,257,473	17,072,550	11,517,807	5,554,743	4,893,991	660,752	
oct-23	54,628,462	35,819,047	18,809,415	16,280,500	2,528,915	18,800,121	12,563,496	6,236,625	5,502,019	734,606	

### Anexo 12.1

Este es el formato en que se entrega la información, existe un desglose para todas las líneas del Metro de Santiago. Cabe destacar que se hace la distinción entre los pasajeros comunes, los Escolares Pagados y los Escolares Básicos (gratuitos).

A partir de esta información (octubre 2023) es que se realizan los siguientes cálculos.

	Línea 1		Línea 5	
	Pasajeros comunes	Escolares Pagados	Pasajeros comunes	Escolares Pagados
Personas mensual	12,563,496	5,502,019	6,015,986	2,961,189
Personas diario	418,783	183,401	200,533	98,706
Pago (\$ CLP)	\$ 790	\$ 230	\$ 790	\$ 230
Ingreso Metro	330,838,728	42,182,146	158,420,965	22,702,449
<b>Total Ingreso</b>	<b>\$ 554,144,287</b>			

### Anexo 12.2

Como se puede apreciar el dinero que perdería Metro por un día de suspensión de servicio de la Línea 1 y 5, es de 554 millones de pesos aproximadamente. Cabe destacar que se utilizó un costo de \$790 a los usuarios comunes, ponderando las distintas tarifas que hay a lo largo del día.

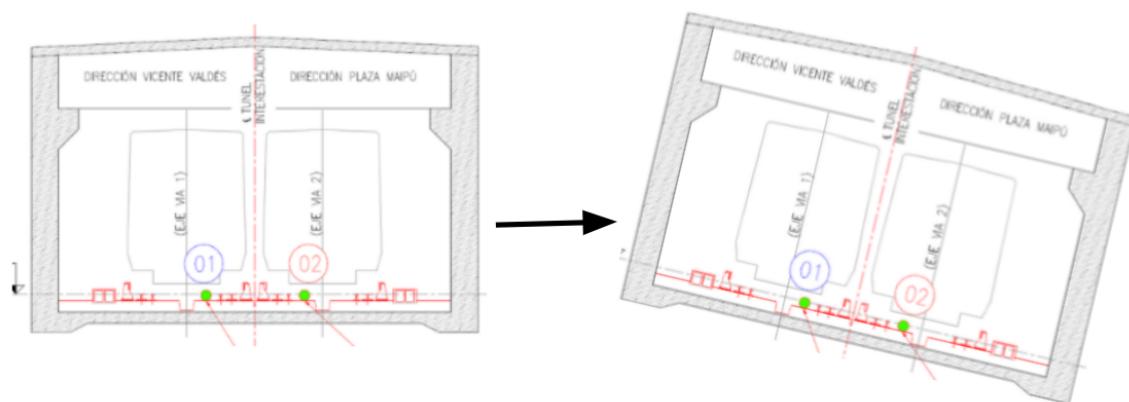
## Anexo 13: Diferencia Relativa Transversal

En el Anexo 1.3.2 se puede observar el bosquejo que entrega la UM para entender cómo se realiza la medición de los puntos AS. A continuación se muestra el efecto que tiene la deformación de la losa de forma rígida en comparación con el suelo.

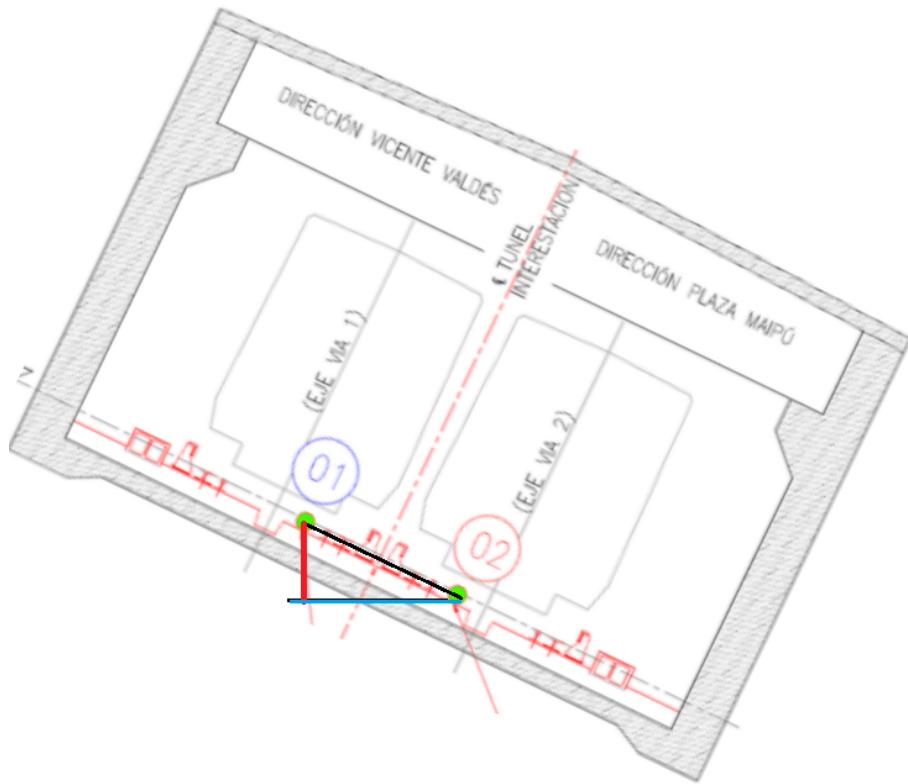
Como se puede observar en el Anexo 13.1 se produce una rotación con eje en el sentido longitudinal de la vía y a partir de eso es que se estima la pendiente de la losa, y cual es la diferencia relativa entre las cotas de los rieles de una misma vía. A continuación se dibujan los triángulos comprendidos en los esquemas del gálibo para un mejor entendimiento de los cálculos realizados.

La distancia que está identificada con color rojo la calculamos directamente restando el asentamiento medido en AS1 y AS2. La distancia identificada con color negro se conoce según los planos del gálibo y los datos entregados por la UM. Dividiendo la distancia identificada en rojo con la identificada en negro obtenemos el valor de la pendiente de la losa.

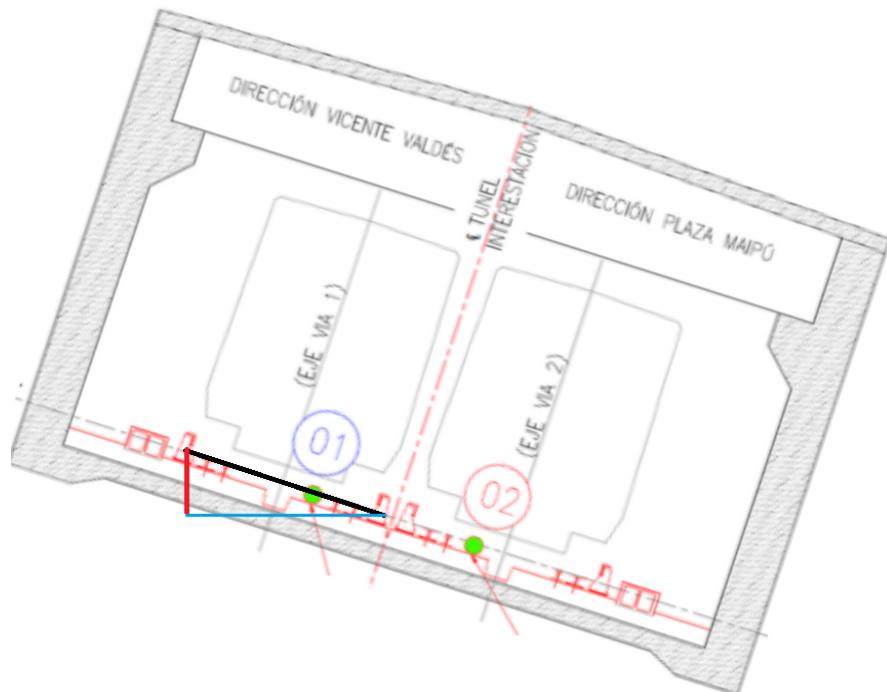
En el Anexo 13.3 se observa la relación que se hace con el triángulo comprendido en los rieles. Como la pendiente es la misma en ambos triángulos, se puede calcular la distancia identificada con color rojo. La distancia identificada con negro también es conocida según los planos. Si bien esa distancia es la que según el umbral no puede superar los 2 [mm], en el gráfico se reporta la pendiente medida en [mm/m]. A su vez, el umbral debe ser transformado para expresarlo en términos de pendiente, este se calcula dividiendo el umbral establecido por metro (2 [mm]), por la distancia entre los rieles, expresada en [m]. Para el ejemplo mostrado en el Anexo 7.2 el valor es 1,333 [mm/m].



Anexo 13.1



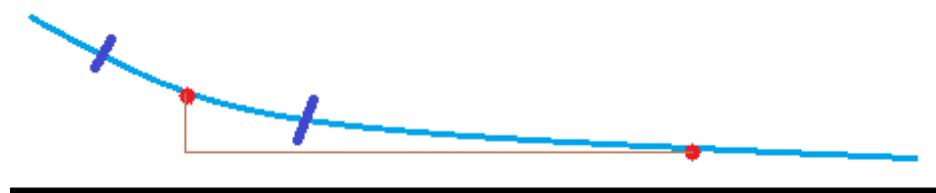
Anexo 13.2



Anexo 13.3

En el caso en que no se utilice el supuesto ya mencionado, se deberá asumir que la losa se comporta como una viga. Por lo que a partir de los dos datos de los puntos AS se podría estimar la deformada de la viga y por lo tanto la distancia relativa entre las cotas de los rieles de una misma vía.

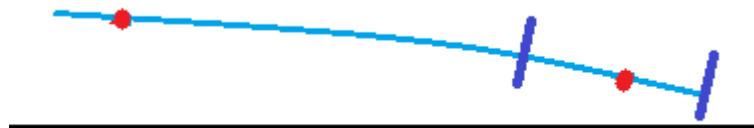
En el Anexo 13.4 se muestra un ejemplo de este caso.



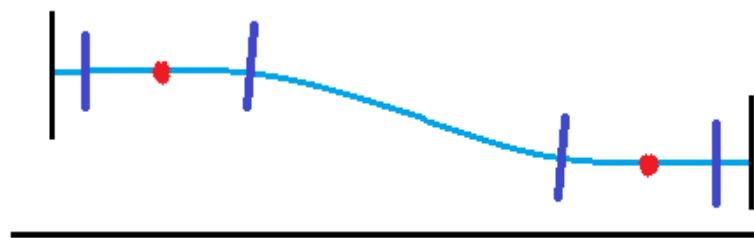
Anexo 13.4

Se representa la losa radier en el sentido transversal con color celeste, los puntos rojos representan los AS 1 y 2, y en azul se representan los rieles de una vía. Según los conocimientos de la Ingeniería Civil se puede estimar la diferencia entre las cotas de los rieles, conociendo la deformada de la losa, y otros parámetros, por lo que se podría discutir si es que la decisión tomada es correcta o no.

El problema ocurre en que esta es una de las posibles deformadas, pero se podría dar otros casos como se muestran en las siguientes imágenes.



Anexo 13.5



Anexo 13.6

Como se puede observar conociendo solamente dos puntos (los AS), no se puede conocer con exactitud cuál es la diferencia entre las cotas de los rieles. En el caso de los anexos 13.4 y 13.5 se puede estimar esa diferencia, pero se podría presentar cualquiera de los dos casos. En el anexo 13.6 se asume que la losa está empotrada en ambos extremos, y uno de ellos se desliza, por lo que se ve que a pesar de existir una gran diferencia entre los puntos AS la diferencia entre los rieles de una misma vía es casi imperceptible. Estos tipos de deformada se presentan dependiendo del método

constructivo con el que se trabajó en las líneas estudiadas, el cual no es constante a lo largo de los tramos y tampoco es conocido con exactitud.

Considerando lo anterior, y tomando en cuenta que es coherente asumir que la losa radier es rígida en comparación al suelo blando, se optó por tomar ese supuesto.