



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE LA INSTRUMENTACIÓN Y DEL MONITOREO GEOTÉCNICO EN  
TÚNELES ESTACIÓN E INTERESTACIÓN DEL METRO DE SANTIAGO.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MAURICIO ANDRES REY GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA:

ROBERTO GESCHE SCHULER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA

JUAN CARLOS ULLOA CORTÉS

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil.  
**POR:** Mauricio Andrés Rey González  
**FECHA:** 24/10/2016  
**PROFESOR GUÍA:** Roberto Gesche Schüler

## **ANÁLISIS DE LA INSTRUMENTACIÓN Y DEL MONITOREO GEOTÉCNICO EN TÚNELES ESTACIÓN E INTERESTACIÓN DEL METRO DE SANTIAGO.**

La instrumentación y el monitoreo son aspectos claves para la seguridad y el control de grandes obras subterráneas, en particular si se trata de túneles urbanos de poca profundidad, ya que estos pueden afectar a los entornos en la superficie.

Actualmente se están construyendo nuevas del Metro de Santiago, proyecto que involucra la excavación de 37 km de túneles y 28 estaciones. En estos proyectos se realizan grandes excavaciones, algunas en zonas densamente pobladas.

Durante la construcción de éstas obras subterráneas, se implementó un plan de monitoreo geotécnico y estructural basado en mediciones geodésicas, cuyo objetivo fue controlar los movimientos de las obras en ejecución, verificar hipótesis de diseño y proveer seguridad.

El presente documento tiene por objeto estudiar y analizar en detalle los resultados obtenidos por el monitoreo geodésico de desplazamientos, tanto a nivel de superficie como en profundidad, para así evaluar el comportamiento del terreno frente a este tipo de excavaciones y el desempeño de los métodos de medición empleados. Los datos medidos provienen de dos “túneles estación” y del “túnel interestación” entre ambos, todos construidos en suelos granulares gruesos y emplazados bajo la Avenida Carlos Valdovinos, en la comuna de Pedro Aguirre Cerda.

De este trabajo se obtienen lecciones respecto al diseño, implementación y ejecución de un proyecto de instrumentación y monitoreo. Finalmente, se realizan recomendaciones y se proponen metodologías complementarias, con el fin de introducir mejoras en proyectos futuros.

## Dedicatoria

*Para mi familia y amigos.*

## **Agradecimientos**

A mis padres, Rodrigo y Myrna. Gracias por apoyarme durante todos estos años de esfuerzo y sacrificio, sin ustedes esto hubiera sido imposible.

A Susana, quien me acompañó durante estos últimos años de carrera y brindó un apoyo incondicional en todo momento. Gracias por creer en mí.

A mis grandes amigos y compañeros universitarios de generación, Lu, Iván, Toño, Chico Mark, Warri, Sven, Andrés y Nacho. Gracias por todos los momentos que compartimos juntos durante este largo período.

A mis compañeros y amigos de civil, Camilo, Juan, Sereno, Caichas, Alan, Ulloa, Nacho y Walter. Nunca olvidaré esas sesiones maratónicas de estudio que tuvimos juntos.

A mis compañeros de la geopequera, Nacho, Miguel, José, Emilia, Natalia, Rodrigo, Felipe y Nicolás. Gracias por la buena onda que siempre tuvieron.

A mi profesor guía Roberto Gesche, por apoyarme incondicionalmente en todo momento. Gracias por darme la oportunidad de trabajar con usted. Siempre tuvo un buen consejo para darme. Agradezco también a los demás miembros de mi comisión Edgardo González y Juan Carlos Ulloa, quienes tuvieron buena disposición para apoyarme y darme buenos comentarios en todo momento.

Finalmente, agradecer a toda persona que de una u otra forma me ha ayudado en todo este proceso.

## Tabla de contenido

Dedicatoria .....	II
Agradecimientos.....	III
1 Introducción.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Desarrollo de la Memoria.....	3
2 Revisión Bibliográfica.....	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Métodos de Construcción de Túneles.....	4
2.2.1 Nuevo Método Austriaco para la Construcción de Túneles (NATM).....	6
2.3 Patrones de Deformación del Suelo en torno a la excavación de un Túnel.....	11
2.3.1 Desplazamientos de Convergencia.....	12
2.3.2 Propagación de las Convergencias hacia la Superficie.....	14
2.3.3 Movimientos en Superficie - Subsistencia.....	14
2.4 Instrumentación y Monitoreo de Túneles Urbanos.....	19
2.4.1 Monitoreo Geodésico Subterráneo para la medición de Convergencias.....	21
2.4.2 Monitoreo Geodésico para la medición de Movimientos Superficiales y Sub-superficiales.....	23

2.4.3	Errores en los Sistemas de Medición. ....	25
3	Antecedentes Generales de la Construcción de las nuevas líneas del Metro de Santiago. ....	33
3.1	Introducción.....	33
3.2	Túneles estudiados. ....	35
3.2.1	Túnel Estación 1. ....	36
3.2.2	Túnel Estación 2. ....	37
3.3	Métodos Constructivos de las Obras Subterráneas. ....	38
3.3.1	Obras Subterráneas a Construir en las Estaciones. ....	38
3.3.2	Concepto del Nuevo Método Constructivo. ....	41
3.3.3	Paraguas de Protección. ....	42
3.3.4	Elementos de Revestimiento. ....	43
3.3.5	Secuencia Constructiva de las Obras Subterráneas. ....	43
3.4	Condiciones del Subsuelo: Caracterización y Perfil Estratigráfico de los Túneles Estudiados. ....	49
3.4.1	Unidades geotécnicas identificadas.....	49
3.4.2	Estratigrafía del Túnel Estación 1. ....	50
3.4.3	Estratigrafía del Túnel Estación 2. ....	51
3.4.4	Riesgos geológico-geotécnicos. ....	52
4	Plan de Instrumentación y Monitoreo Geotécnico de las Obras Subterráneas en estudio.....	53

4.1.1	Objetivos.....	53
4.1.2	Variables y Dispositivos de Medición.....	54
4.1.3	Plan de Instrumentación y Monitoreo para la Medición de Convergencias.....	54
4.1.4	Plan de Instrumentación y Monitoreo para las mediciones de Subsistencia.....	58
4.1.5	Disposición espacial en planta de los Hitos de Nivelación y Secciones de Convergencia.....	59
4.1.6	Valores Umbrales de Control.....	61
4.1.7	Valores admisibles en Edificaciones y Estructuras.....	63
4.1.8	Almacenamiento y Administración de los Datos de Monitoreo.....	64
4.1.9	Responsabilidades.....	65
5	Resultados Obtenidos por el Monitoreo.....	66
5.1	Monitoreo de Subsistencias.....	66
5.1.1	Evolución de la Subsistencia en el tiempo.....	66
5.1.2	Cubetas Transversales de Subsistencia.....	79
5.2	Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave del Túnel.....	81
5.2.1	Túnel Estación 1.....	81
5.2.2	Túnel Estación 2.....	84
5.2.3	Túnel Interestación.....	87
5.3	Comparación entre los Movimientos Sub-Superficiales del Suelo (HNP) y el Descenso de la Clave del Túnel (PCO).....	89
6	Discusión y Análisis.....	93

6.1	Monitoreo de Subsidiencias. ....	93
6.1.1	Túneles Estación. ....	93
6.1.2	Túneles Interestación (entre los Túneles Estación 1 y 2). ....	99
6.2	Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave. ....	100
6.3	Fluctuaciones (ruido) en las Curvas. ....	103
6.4	Precisión Teórica de los Sistemas de Medición. ....	104
6.4.1	Monitoreo de Subsidiencias.....	104
6.4.2	Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave.....	107
6.5	Plan de Instrumentación y Monitoreo Geotécnico. ....	111
6.5.1	Dispositivos instalados y Secciones de Monitoreo. ....	111
6.5.2	Características y Requerimientos Generales de Medición. ....	113
6.5.3	Frecuencias de Medición. ....	115
6.5.4	Valores Umbrales de Control. ....	117
7	Propuestas y Recomendaciones. ....	118
7.1	Instrumentación y Monitoreo. ....	118
7.1.1	Subsidencia. ....	118
7.1.2	Convergencia: Descenso de la Clave del Túnel. ....	123
7.2	Propuestas específicas para obras subterráneas similares a las estudiadas. ....	126
7.3	Recomendaciones Generales. ....	128
8	Conclusiones .....	130

Bibliografía .....	133
Anexos .....	I
Anexo A: Fotografías. ....	I

## Índice de figuras

Figura 1: Máquina Tunneladora TBM (Gomes, A. (A) 2014).....	5
Figura 2: Excavación Manual Secuencial en Suelos Granulares, Metro de Santiago Línea 5 (Gomes, A. (A) 2014). ....	5
Figura 3: Secuencia cíclica típica del método NATM (Gacitúa, J. M, 2012).....	7
Figura 4: Secciones típicas para túneles Pequeños, (a) Sección Completa, (b) Sección dividida en Bóveda y Banco (Gacitúa, J. M, 2012).....	8
Figura 5: Secuencia de avance de un túnel pequeño a sección completa (Gomes, A. (A) 2014). ....	8
Figura 6: Sección típica de un Túnel Mediano (Gacitúa, J. M, 2012). ....	8
Figura 7: Secuencia de avance del sistema "Bóveda-Banco-Contrabóveda (Gomes, A. (A) 2014). ....	9
Figura 8: Sección típica de un túnel grande. Los números romanos definen la secuencia típica de excavación para esta configuración (Gacitúa, J. M, 2012). ....	10
Figura 9: "Paraguas". Sistema de soporte anticipado del frente/techo (Gomes, A. 2014).	10
Figura 10: Desarrollo típico de los desplazamientos de Convergencia (ASG, 2014). ....	13
Figura 11: Representación de la subsidencia inducida por la excavación de un túnel (Attewell y Yeates et al 1986).....	15

Figura 12: Cubeta de Subsistencia o de Attewell (Oteo. C & Rodríguez. J. M).....	16
Figura 13: Método de Peck (1969). Estimación de los asentamientos en superficie mediante la utilización de una Campana de Gauss invertida (Pino. D).....	17
Figura 14: Ley Semi-empírica de distribución de asentamientos superficiales en la dirección longitudinal sobre el eje del túnel (Oteo. C & Rodríguez. J. M).....	18
Figura 15: Definición Semi-Empírica de la cubeta de Attewell (Oteo. C & Rodríguez. J. M).....	18
Figura 16: Equipos principalmente utilizados en Instrumentación y Monitoreo de Túneles (Rodríguez, J, M. 2008).....	20
Figura 17: Esquema de una sección transversal de un túnel completamente instrumentada (Pérez, E & Álvarez, M, 2010). ....	21
Figura 18: (a) Estación Total Leica TM30, (b) Puntos de control para el monitoreo geodésico de convergencias, (1) diana reflectante BIRREFLEX y (2) prisma de alta precisión (ASG, 2014). ....	22
Figura 19: Esquemas típicos para Secciones de Monitoreo (Invías, 2015).....	23
Figura 20: Ley Especial de Propagación de Errores (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006).....	27
Figura 21: Errores típicos del Nivel de Ingeniero. (a) Error de Colimación. (b) Error de Nivelación (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006). ....	29
Figura 22: Esquema de Nivelación Trigonométrica (web).....	30
Figura 23: Errores por No Ortogonalidad de los ejes principales de una Estación Total (Leica Geosystems, 2005).....	31
Figura 24: Red Actual del Metro de Santiago (2015). ....	33

Figura 25: Futura red del Metro de Santiago, con la inclusión de las nuevas Líneas 3 y 6 (Paredes. F). .....	34
Figura 26: Ubicación y disposición espacial del Túnel Estación 1 en el mapa satelital de Santiago (Google Earth).....	36
Figura 27: Ubicación en planta del Túnel Estación 1, detalle (Metro. 2013. B). .....	36
Figura 28: Ubicación y disposición espacial del Túnel Estación 2 en el mapa satelital de Santiago (Google Earth).....	37
Figura 29: Ubicación en planta del Túnel Estación 2, detalle (Metro. 2013. B). .....	37
Figura 30: Modelo tridimensional de las obras subterráneas a construir en las estaciones (Metro. 2013. G). .....	39
Figura 31: Secciones Transversales de las Obras Subterráneas a construir en las estaciones (propio). .....	39
Figura 32: Perfil Longitudinal de las Obras Subterráneas del Túnel Estación 1 (Metro. 2013. A). .....	40
Figura 33: Método de las galerías laterales (Metro.2013. B). .....	41
Figura 35: Aplicación del Método de la Bóveda Auto-Portante a la Construcción del Túnel Estación Valledor (Metro.2013. A). .....	42
Figura 36: Paraguas a Construir en las Obras Subterráneas del Túnel Estación 1 (Metro.2013. A). .....	42
Figura 37: Proceso Constructivo de la Bóveda de la Galería Principal y del Túnel Estación - Secciones (Metro. 2013. A). .....	45
Figura 38: Esquema de Secciones con Banco excavado de la Galería Principal (Metro. 2013. A). .....	46
Figura 39: Sección Transversal del Túnel Interestación (Metro. 2013. A). .....	47

Figura 41: Perfil Estratigráfico del Túnel Estación 1 (Metro. 2013. A).....	51
Figura 42: Perfil Estratigráfico del Túnel Estación 2 (Metro. 2013. B).....	52
Figura 43: Cinta Extensométrica de invar (web).....	56
Figura 44: Secciones de Convergencia de los túneles Estación (izquierda) e Interestación (derecha) (Metro. 2013. D).....	57
Figura 45: Precisiones Instrumentales del Nivel Electrónico Leica DNA 10 (Leica). ....	59
Figura 46: Disposición Espacial de las Secciones de Convergencia y Subsistencia. Túnel Estación 1.....	60
Figura 47: Disposición Espacial de las Secciones de Convergencia y Subsistencia. Túnel Estación 2.....	60
Figura 48: Disposición Espacial de las Secciones de Monitoreo. Túnel Interestación (elaboración propia). ....	61
Figura 49: Resultados del Monitoreo de Subsistencia. Túnel Estación 1. Túnel Estación Poniente. Secciones 1962 y 1964 (Galería Secundaria). ....	67
Figura 50: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 1. Túnel Estación Poniente. Sección 1981. ....	70
Figura 51: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 1. Galería Principal. Sección GP2 (18m). ....	73
Figura 52: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 2. Túnel Estación Poniente. Sección 3450. ....	74
Figura 53: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 2. Túnel Estación Oriente. Secciones 3545 y 3550. ....	76
Figura 54: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Interestación. ....	77

Figura 55: Resultaos obtenidos por el Monitoreo de Subsidiencias. Cubetas Transversales.....	79
Figura 56: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 1.....	81
Figura 57: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 1.....	82
Figura 58: Vista ampliada de la Sección 2041.....	82
Figura 59: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 2.....	84
Figura 60: Vista ampliada de la Sección 3530.....	84
Figura 61: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 2.....	85
Figura 62: Vista ampliada de la Sección 3545.....	85
Figura 63: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave. Túnel Interestación.....	87
Figura 64: Gráficos de comparación entre el monitoreo Sub-superficial (HNP) y el Descenso de la Clave del Túnel (PCO).....	89
Figura 65: Resultados del Monitoreo de Subsidiencias, sección 1946. Porcentaje de desplazamiento en la fase de bóveda.....	97
Figura 66: Resultados del Monitoreo de Subsidiencias, sección 24 GP, Túnel Estación 2. Porcentajes de desplazamiento en la fase de bóveda.....	97
Figura 67: Segmentos escogidos para el cálculo empírico de la precisión del Sistema de Medición de Subsidiencias.....	106
Figura 68: Esquema Nivelación Trigonométrica.....	107

Figura 69: Magnitudes de las oscilaciones presentes en las curvas del descenso de la clave.....	110
Figura 70: Resultado del Monitoreo del Descenso de la Clave. T. Estación 2. Sección 3545. ....	110
Figura 71: Comparación entre las Frecuencias ejecutadas y propuestas en las Curvas de Subsistencia. Sección 1981. Túnel Estación 1.....	115
Figura 72: Esquema de áreas con distintas frecuencias para un túnel superficial; arriba vista en perfil longitudinal y abajo vista en planta (ASG, 2014).....	120
Figura 73: Diferenciación espacial de los rangos de monitoreo relacionado a las distintas fases constructivas y Frecuencias mínimas típicas para los respectivos rangos de monitoreo (modificación de ASG, 2014).....	121
Figura 74: Esquema Transversal preliminar típico para el posicionamiento de Hitos de Nivelación (ITA, 2011).....	122
Figura 75: Esquema de medición para el método de Estación Libre interconectada (ASG, 2014). ....	125
Figura 76: Esquema de Interconexión Asimétrico (ASG, 2014). ....	125
Figura 77: Construcción del Pique e Inicio de la Bóveda de la Galería Principal. (Velazco, Eduardo).....	I
Figura 78: Revestimiento Primario (izquierda) y Secundario (derecha) de la GP (Velazco, Eduardo).....	I
Figura 79: Entronque con el Túnel Estación (Velazco, Eduardo).....	II
Figura 80: Avance en Fases del Túnel Estación (Velazco, Eduardo).....	II
Figura 81: Excavación de los Banco de las Obras Subterráneas (Velazco, Eduardo)....	II

Figura 82: Construcción en retirada de la Contra-Bóveda de la Galería Principal (Velazco, Eduardo).....III

Figura 83: Monitoreo superficial mediante Hitos de Nivelación Superficial (HNS) y Profunda (HNP) (elaboración propia). .....III

Figura 84: Monitoreo subterráneo tridimensional de desplazamientos absolutas, para la mediciones de Convergencias, (1) Estación Total Leica TM30 y (2) Punto de Control Óptico PCO (elaboración propia). ..... IV

### **Índice de Cuadros.**

Cuadro 2: Organización jerárquica de las entidades presentes en el proyecto de Construcción y Monitoreo de las Obras Subterráneas estudiadas (elaboración propia).35

Cuadro 5: Criterios de definición de Frecuencia para las mediciones de Convergencia (Metro. 2013. C). .....56

Cuadro 6: Criterios de definición de Frecuencia para las mediciones de Subsistencia (Metro. 2013. C). .....59

Cuadro 7: Valores Umbrales de Control de las Obras Subterráneas (Contacto SDO)...62

Cuadro 8: Niveles de Alerta y actuaciones previstas (Metro.2013.C). .....62

Cuadro 9: Valores admisibles de Asentamientos y Distorsiones Angulares (Metro. 2013. E).....63

Cuadro 10: Cuadro de responsabilidades del Proyecto de Instrumentación y Monitoreo (elaboración propia). .....65

# 1 Introducción.

## 1.1 Motivación.

La extensión y construcción de nuevas líneas de metro es clave para el continuo mejoramiento del sistema de transporte en las ciudades. Este tipo de proyectos generan la necesidad de construir extensos tramos de túneles, que desde el punto de vista ingenieril son obras complejas, y desde la perspectiva medio ambiental son preferibles para proveer infraestructura de transporte en áreas densamente pobladas y con un bajo impacto ambiental.

Los más recientes planes de desarrollo de la red del Metro de Santiago son la construcción de las nuevas Líneas 3 y 6, los que contemplan la construcción de túneles siguiendo los criterios del Nuevo Método Austriaco (NATM: “New Austrian Tunneling Method”), que si bien permite importantes ahorros en las estructuras de soporte, requiere como condición necesaria un monitoreo intensivo y ojalá en tiempo real del comportamiento del terreno y estructura durante dichas excavaciones.

La utilización de un plan de instrumentación y monitoreo puede resultar en obras más económicas y seguras. La totalidad de estos beneficios solo se va a obtener si se siguen de manera adecuada todos los pasos durante las etapas de planificación y ejecución de una propuesta de instrumentación y monitoreo.

Es por lo anterior que en este trabajo se realiza un análisis del plan de instrumentación y monitoreo geotécnico implementado en túneles “estación y “interestación” del Metro de Santiago. Su objetivo es “controlar los movimientos de las obras en ejecución para comprobar y verificar las hipótesis y modelos de cálculo adoptados en el diseño y para el aseguramiento de la seguridad de la construcción”<sup>1</sup>. Para cumplir con dicho objetivo se definieron secciones de control, denominadas Secciones de Monitoreo. Estas secciones son transversales al eje longitudinal de los túneles, sobre los que se instala un conjunto de elementos o dispositivos de medición de desplazamientos, tanto al interior del túnel como en la superficie. Las magnitudes controladas son principalmente

---

<sup>1</sup> Metro. 2013. C

asentamientos del terreno y desplazamientos del revestimiento de las obras subterráneas.

Las obras subterráneas estudiadas son dos túneles “estación” y el túnel “interestación” entre ambos, y están emplazadas bajo el eje de la Avenida Carlos Valdovinos, una de las más importantes del sector. Los túneles “estación” tienen aproximadamente un área de 160 metros cuadrados (diámetro promedio de 13,3 metros) y una tapada sobre la clave del túnel de 11 metros, mientras que el túnel “interestación” tiene un área de 70 metros cuadrados (diámetro promedio de 8,6 metros) y tapadas sobre la clave mínima y máximas de 14,9 metros y 16,8 metros respectivamente. La estratigrafía del sector en estudio está particularmente compuesta por suelos granulares gruesos.

Conocer los desplazamientos reales, tanto en superficie como al interior de las obras subterráneas, permite validar las hipótesis de diseño (al comparar los movimientos reales con los previstos), y tomar acción frente a movimientos excesivos. Esta metodología se conoce como Diseño Estructural Activo (DEA).

La revisión bibliográfica y el análisis, tanto de la propuesta de instrumentación como de los resultados del monitoreo de desplazamientos, permitirán evaluar el comportamiento del suelo ante este tipo de excavaciones y el desempeño de los métodos de medición empleados. Adicionalmente, se podrán identificar aspectos a corregir, con el objetivo de realizar recomendaciones y proponer alternativas que apunten a introducir mejoras.

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo General.**

Analizar el plan de instrumentación y monitoreo geotécnico de desplazamientos implementado para un tramo de la construcción de túneles “estación” e “interestación”.

### **1.2.2 Objetivos Específicos.**

1. Realizar una revisión bibliográfica referente a los siguientes temas:
  - a. Nuevo Método Austriaco para la Construcción de Túneles.
  - b. Patrones de Deformación del Suelo en torno a la excavación de Túneles.

- c. Instrumentación y Monitoreo Geodésico de Túneles Urbanos.
2. Revisar e interpretar los resultados del monitoreo.
3. Evaluar la efectividad del plan de instrumentación y monitoreo, en base a lo que se ejecuta actualmente para las líneas en construcción.
4. Verificar que el plan de instrumentación y monitoreo cumpla total y eficientemente, sus objetivos.
5. Realizar recomendaciones y proponer alternativas, con el fin de introducir mejoras en proyectos futuros.

### **1.3 Desarrollo de la Memoria.**

Este trabajo consta de ocho capítulos. El Capítulo 1 es la introducción a este trabajo. En el Capítulo 2, se presenta una revisión bibliográfica sobre la construcción de túneles, los movimientos que se producen en el suelo producto de estas excavaciones y los sistemas de monitoreo geodésico. Luego, en el Capítulo 3, se presentan los antecedentes de la construcción de las obras en estudio, en donde se describen las principales características del proyecto, los túneles estudiados, el método constructivo utilizado y las características del suelo en que están emplazadas las obras subterráneas.

Posteriormente, y finalizando la fase inicial de este trabajo, en el Capítulo 4 se describe por completo la propuesta de instrumentación y monitoreo geotécnico implementada para la construcción de las obras en estudio. En el Capítulo 5 se presentan y comentan los resultados del monitoreo de desplazamientos, tanto en superficie como dentro del túnel, los que fueron preparados para una correcta interpretación. Luego, en el Capítulo 6, se realiza un procedimiento de discusión y análisis de los resultados, y del plan de instrumentación y monitoreo. En base a lo anterior, en el Capítulo 7 se realizan recomendaciones y propuestas de mejora de la metodología actual. Finalmente, en el Capítulo 8 se realizan las conclusiones de este trabajo.

## **2 Revisión Bibliográfica.**

### **2.1 Introducción.**

La excavación de túneles se ha hecho cada vez más frecuente, y por ello ha tomado gran importancia la necesidad de estudiar y mejorar los sistemas de instrumentación y monitoreo que se utilizan, en conjunto con los métodos constructivos a los que se les asocia, ya que en áreas urbanas la excavación de túneles puede generar daños en edificios y estructuras.

En este capítulo se presentan los conceptos más importantes de la construcción de túneles. En particular se hace referencia al Nuevo Método Austriaco para la construcción de túneles (NATM, por sus siglas en inglés), en el cual el monitoreo de las excavaciones es fundamental. Se describen los tipos de desplazamientos y deformaciones producidos en los entornos de los túneles, y su distribución espacial producto de la excavación misma. Finalmente se hace referencia a los métodos de instrumentación y monitoreo geodésico de túneles que se suelen utilizar.

### **2.2 Métodos de Construcción de Túneles.**

Actualmente existen dos principales técnicas de construcción de túneles. La primera, totalmente mecanizada, y la segunda es una combinación de máquinas de menor envergadura con excavación manual.

La excavación totalmente mecanizada se caracteriza por utilizar máquinas tuneladoras o TBM (Tunneling Boring Machines), las que se dividen en distintos tipos dependiendo de la naturaleza del terreno (i.e. figura 1).

Este método se identifica por tener elevados rendimientos en comparación con los métodos convencionales, pero suele tener una inversión inicial elevada, por lo que en túneles de longitud menor a 1.5 km no resulta económicamente viable su utilización. Otras limitaciones que tiene éste método es que la sección transversal queda limitada a formas circulares, y los radios de curvatura y pendientes de los trazados longitudinales del túnel quedan limitados por la gran dimensión de las TBM.



**Figura 1: Maquina Tuneladora TBM (Gomes, A. (A) 2014).**

A diferencia de lo anterior, la excavación manual, que utiliza máquinas de menor envergadura, usa como principio básico la excavación incremental en pequeños tramos después de los cuales se instala algún tipo de revestimiento, que típicamente se compone de hormigón proyectado en conjunto con mallas y marcos metálicos, el que va a variar en función de la longitud libre de avance y de las características del terreno.

La excavación manual en rocas de dureza alta a media, se realiza mediante explosivos. En suelos blandos, por otro lado, se utilizan excavaciones secuenciales (figura 2) que dividen la sección del túnel, utilizando para esto maquina excavadoras y rozadoras.



**Figura 2: Excavación Manual Secuencial en Suelos Granulares, Metro de Santiago Línea 5 (Gomes, A. (A) 2014).**

## 2.2.1 Nuevo Método Austriaco para la Construcción de Túneles (NATM).

Uno de los métodos de excavación manual más aceptados a nivel mundial es el Nuevo Método Austriaco de Excavación de Túneles (NATM: New Austrian Tunneling Method). Fue desarrollado en Austria entre 1857 y 1965 y sus principios fueron elaborados por Ladislaus Von Rabcewicz, Leopold Muller y Franz Pacher.

Una vez que el NATM fue reconocido internacionalmente surgieron muchas interrogantes respecto de si es una técnica o más bien una filosofía, ya que como dice su nombre, al traducirlo al español, debiera ser un método.

El NATM es más bien una filosofía o concepto de diseño basado en ciertos principios o criterios, y no debe ser entendido estrictamente como un método constructivo (Karakus, M. & Fowell, R. J. 2004).

A partir de varias referencias acopladas en un mismo artículo (Karakus, M. & Fowell, R. J. 2004) se logra derivar que el principio fundamental de éste método es considerar el terreno como parte del sistema de soporte, en otras palabras, debe ser considerado como un componente estructural del sistema. Lo que se traduce en los siguientes criterios:

1. **Aprovechar al máximo la resistencia del terreno.** Esto implica conservar al máximo la integridad del terreno intervenido, lo que se logra mediante una excavación cuidadosa y aplicando de forma inmediata una primera capa de hormigón proyectado, para así evitar posible sobre-excavación, degradación del terreno y pérdida de humedad.
2. **Minimizar las deformaciones del terreno.** El avance del frente del túnel produce deformaciones, las que deben ser restringidas al máximo mediante la excavación secuencial de la sección del túnel y la aplicación de hormigón proyectado, mallas y marcos metálicos, y pernos de anclaje entre otros.
3. **Revestimiento flexible.** El revestimiento debe ser flexible ante las deformaciones del terreno, para permitirle alcanzar un estado de equilibrio.
4. **Seguimiento y control de las deformaciones del terreno.** Para que éste método sea efectivo se debe contar con un plan de instrumentación y monitoreo

geotécnico que confirme el equilibrio del túnel dentro de los rangos esperados, en término de desplazamientos tanto en el interior del túnel (convergencia) como también a nivel de superficie (subsistencia). Éste control es muy importante ya se utiliza para validar los criterios de diseño adoptados, y para la seguridad de la obra misma.

Según éstos criterios el método se transforma en una secuencia cíclica, tal como se muestra a modo general en la siguiente figura:

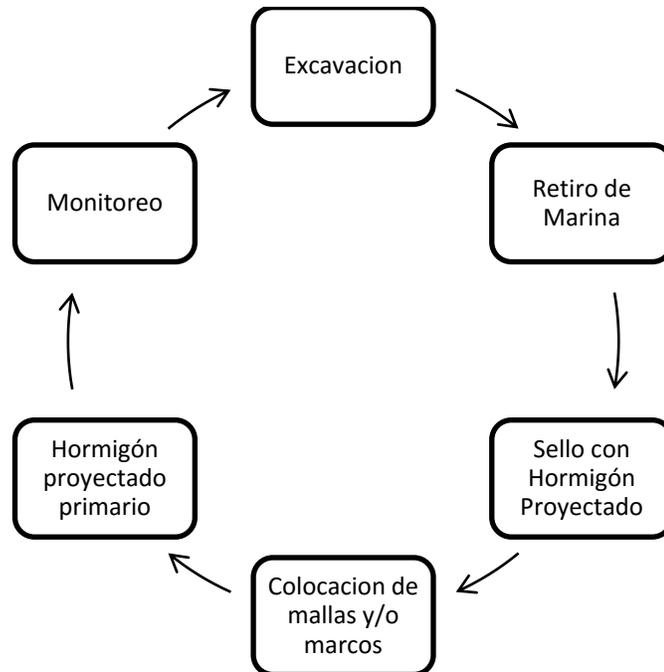


Figura 3: Secuencia cíclica típica del método NATM (Gacitúa, J. M, 2012).

El ciclo varía en función de la secuencia con que se excava la sección del túnel. Esta secuencia depende en gran medida, del tamaño de la sección transversal.

Para efectos prácticos, los túneles pueden caer dentro de tres categorías según el tamaño de su sección; Pequeños (secciones hasta  $50 \text{ m}^2$ ), medianos (secciones entre  $50$  y  $100 \text{ m}^2$ ) y grandes (secciones mayores a  $100 \text{ m}^2$ ), (Gacitúa, J. M, 2012).

Los túneles pequeños se pueden ejecutar a sección completa más un núcleo de soporte (gravas) o dividida en bóveda y banco (suelos finos), como se muestra en las figuras 4 (perfil transversal de la excavación) y 5 (perfil longitudinal de la excavación).

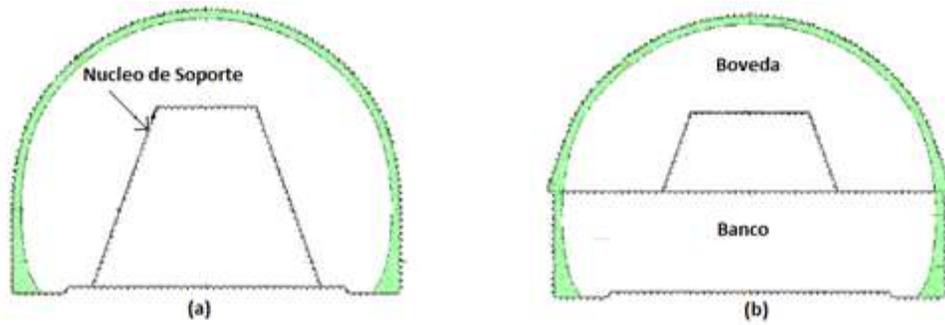


Figura 4: Secciones típicas para túneles Pequeños, (a) Sección Completa, (b) Sección dividida en Bóveda y Banco (Gacitúa, J. M, 2012).

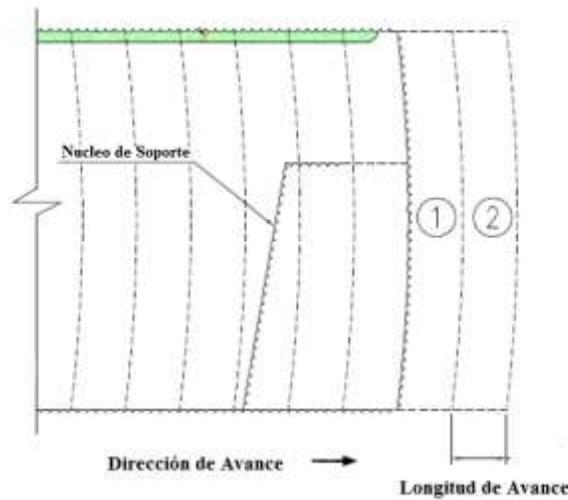


Figura 5: Secuencia de avance de un túnel pequeño a sección completa (Gomes, A. (A) 2014).

Los túneles medianos suelen dividirse en las fases típicas de bóveda, banco y contra bóveda. Adicionalmente se ponen “patas de elefante”, las que ayudan a estabilizar la bóveda (figura 6).

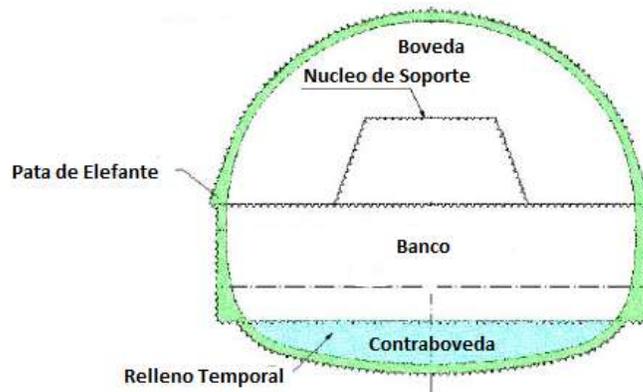


Figura 6: Sección típica de un Túnel Mediano (Gacitúa, J. M, 2012).

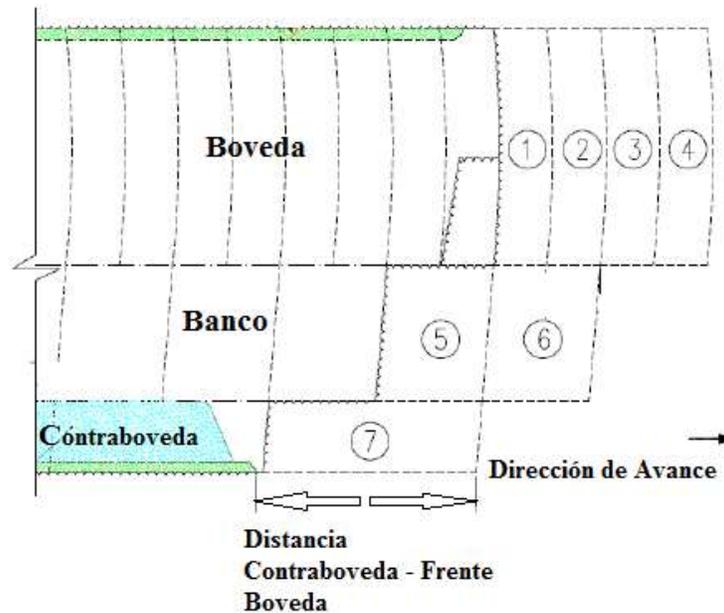
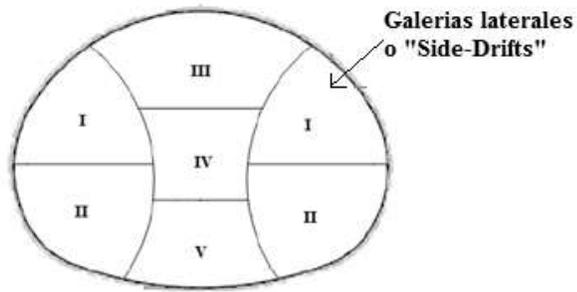


Figura 7: Secuencia de avance del sistema "Bóveda-Banco-Contra bóveda (Gomes, A. (A) 2014).

En la figura 7 se ilustra la secuencia de avance para el sistema de bóveda, banco y contra-bóveda. Las líneas segmentadas representan las longitudes libres de avance típicas de la excavación (longitud máxima que queda sin refuerzo durante un periodo de tiempo), las que dependen fuertemente de las características geotécnicas del suelo, y las condiciones bajo las que se excava (Gomes, A. 2014). Los números representan la secuencia, de manera general, con que se ejecutan las distintas fases.

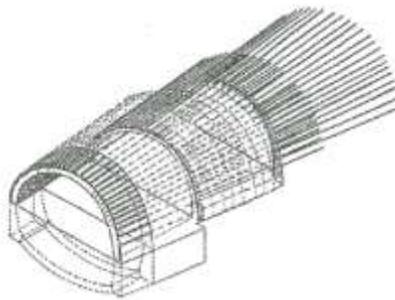
Para secciones de túneles grandes se suelen utilizar "side-drifts" (galerías laterales) simples y dobles, dividiendo la sección en diferentes zonas, cada una con bóveda, banco y contra-bóveda, con el objetivo de mantener controlados los desplazamientos (Gacitúa, J. M, 2012). En la figura 8 se muestra un ejemplo, en donde los números romanos representan la secuencia típica con que se excava la sección. Se comienza por la bóveda y banco de ambas galerías laterales, para luego seguir con la bóveda, banco y contra-bóveda del núcleo central. En la figura 2 se ilustra un caso real de galerías laterales durante la construcción de la Línea 5 del Metro de Santiago.



**Figura 8: Sección típica de un túnel grande. Los números romanos definen la secuencia típica de excavación para esta configuración (Gacitúa, J. M, 2012).**

Cuando los túneles no tienen salida a la superficie (i.e. tramos del Metro de Santiago), con la ayuda de una excavadora se deben realizar excavaciones verticales denominadas “piques”, que sirven para llegar hasta la cota del túnel o galería principal. También se utilizan para el ingreso de materiales y extracción de marina. Estos piques en general tienen forma circular, y diámetros que varían en función del propósito para el cual fue construido.

Cuando la excavación del pique se encuentra a cierta profundidad se realizan a veces labores de pre-sostenimiento de la bóveda del túnel, mediante la aplicación de “paraguas” de protección, que son tubos de acero de largo variable que se hincan en el terreno de manera horizontal levemente inclinados hacia arriba en la dirección del túnel (figura 9). Estos “paraguas” se utilizan con el objetivo de controlar las sobre-excavaciones en la clave del túnel.



**Figura 9: “Paraguas”. Sistema de soporte anticipado del frente/techo (Gomes, A. 2014).**

### **2.3 Patrones de Deformación del Suelo en torno a la excavación de un Túnel.**

Las excavaciones subterráneas producen una alteración en el estado inicial de esfuerzos del suelo, lo que se traduce en la generación de movimientos del mismo en las zonas próximas a la excavación y en ocasiones hasta la superficie, con el fin de restablecer el equilibrio tensional (Otero, M, 2004). Esto se ha comprobado en diversas ocasiones en la construcción de túneles alrededor del mundo, midiendo los movimientos tanto en superficie como dentro del túnel.

Esta movilización de la resistencia del suelo tiene como consecuencia la inducción de un campo de deformaciones en el terreno que tiende a cerrarse en torno a la excavación (con extensión entre la superficie y la clave del túnel). Se tienden a producir desplazamientos radiales hacia el interior del túnel, los que se denominan convergencias, y en ocasiones, habrá movimientos en la superficie con componentes verticales (asentamientos) y horizontales (los que a menudo se olvidan). Este fenómeno que produce asentamientos en superficie se denomina subsidencia (Otero, M, 2004).

La magnitud, orientación y localización de estos movimientos finales van a ser función de una serie de factores (Otero, M, 2004):

- Geometría del problema (profundidad del túnel, espesor del recubrimiento y diámetro del túnel entre otros).
- Condiciones geotécnicas y presencia de agua.
- Proceso constructivo (método constructivo, tipo de elemento excavador, huecos que quedan entre zonas excavadas y el recubrimiento, velocidades de avance y secuencia de excavación del frente, entre otros).
- Cargas presentes en la superficie.

La estimación de estos movimientos es de suma importancia en el diseño de los túneles, y se deben utilizar métodos fiables, con el fin de obtener movimientos similares a aquellos medidos. Para lo anterior, se utilizan diversas metodologías de estimación.

Los métodos utilizados para estimar y analizar las deformaciones esperadas del suelo, debido a la construcción de túneles, se pueden dividir en tres grupos: métodos empíricos, soluciones analíticas y métodos numéricos. Los métodos empíricos, se caracterizan por tener procedimientos de cálculo relativamente simples, y proveen en general buenos resultados cuando las condiciones del subsuelo son bien conocidas. Los métodos analíticos proporcionan soluciones en base a comportamientos elásticos o elasto-plásticos sencillas, pero las críticas dicen que su uso se limita a análisis en 2 dimensiones de secciones circulares en ambientes homogéneos (Snežana Maraš-Dragojević, 2012). Por otra parte los métodos numéricos, como por ejemplo el método con elementos finitos (FEM), son capaces de tomar en cuenta la heterogeneidad del medio ambiente, el comportamiento no lineal del suelo, problemas geométricos complejos, la interacción entre la estructura y el suelo y los métodos constructivos, por lo que suelen ser convenientes para problemas complejos (Snežana Maraš-Dragojević, 2012).

### **2.3.1 Desplazamientos de Convergencia.**

Se llaman convergencias a los movimientos relativos producidos entre dos puntos del interior del túnel. Estos movimientos tienen un carácter radial debido a las direcciones de las presiones del suelo ejercidas. La medida de convergencia de una sección es la medida más simple y a la vez más representativa cuando se desea evaluar el desempeño del revestimiento.

Para las mediciones de convergencia se colocan, inmediatamente después de la excavación una serie de pernos de referencia sobre el revestimiento del túnel, dispuestos de manera sistemática, a los que se les mide tanto desplazamientos absolutos como relativos entre ellos. Según la importancia y tamaño de la sección del túnel estos puntos pueden ser tres o más. Luego se miden sus desplazamientos, ya sea a través de mediciones geodésicas, o mediante la utilización de cinta extensométrica retráctil.

La figura 10 representa de manera gráfica el desarrollo típico de los desplazamientos radiales en un túnel. En esta se identifican diferentes componentes, cuya comprensión es muy importante para una adecuada interpretación de los datos de monitoreo. La línea  $Z_o$  representa los desplazamientos totales inducidos por la excavación. Estos desplazamientos totales se subdividen en aquellos producidos antes de que el frente llegue a la sección de monitoreo observada ( $Z_{p0}$ ), los que ocurren entre la llegada del frente y la lectura “cero” de convergencia dentro del túnel ( $Z_{p1}$ ) (ya que no es posible instalar de manera inmediata los pernos de referencia a la llegada del frente a dicha sección de monitoreo), y finalmente los que son “medibles” después de esta lectura “cero” ( $Z_m$ ). Los desplazamientos medibles forman entonces la línea punteada  $Z_1$ .

La línea  $Z_o$  solo se puede registrar a través de mediciones realizadas en superficie, mientras que la  $Z_1$  rescata solo una fracción de dicha historia de desplazamiento. Mientras mayor sea el tiempo entre que el frente llega a la sección de monitoreo y se instala y registra la lectura “cero”, menor es el desplazamiento registrado dentro del túnel.

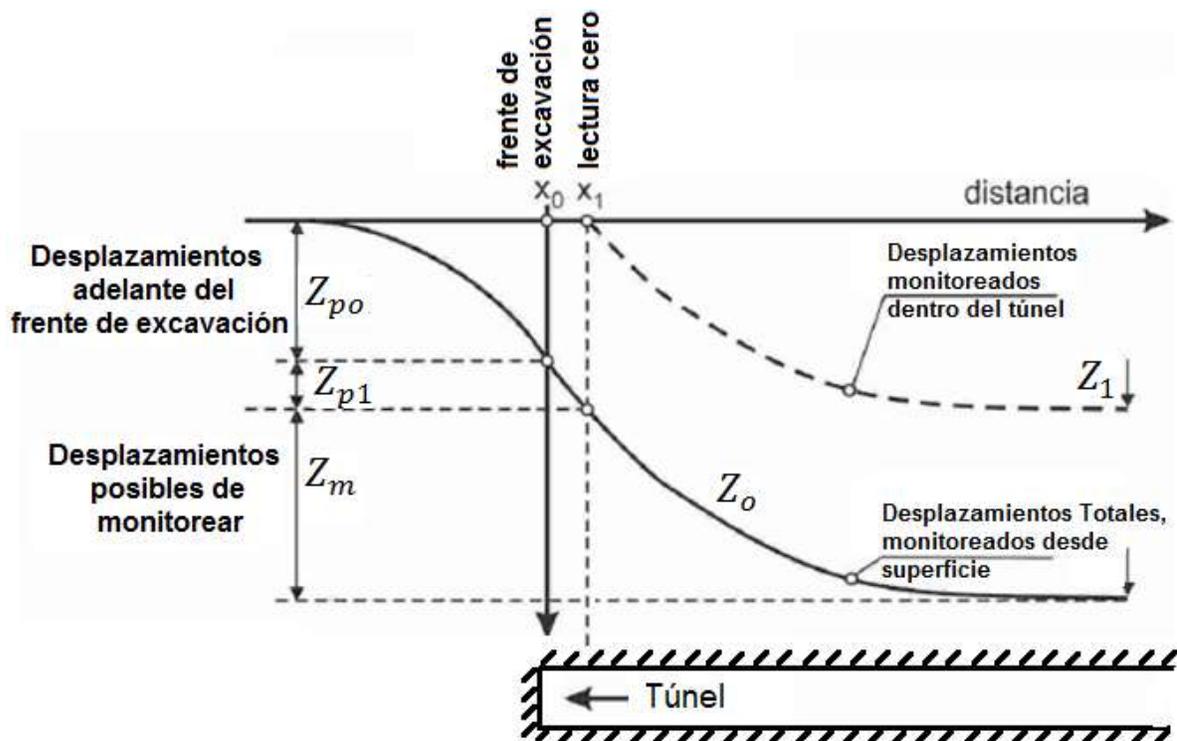


Figura 10: Desarrollo típico de los desplazamientos de Convergencia (ASG, 2014).

### **2.3.2 Propagación de las Convergencias hacia la Superficie.**

Los movimientos del suelo iniciados en el túnel (convergencias) van a tender a propagarse hacia la superficie, provocando el fenómeno conocido como “subsistencia”. El alcance y la escala temporal de esta de propagación típicamente dependen de las condiciones geotécnicas y geométricas, como también del método constructivo (ITA, 2006).

En general, se habla de túneles superficiales cuando la relación  $\frac{H}{D}$  (“H”: tapada del terreno sobre la clave del túnel y “D”: diámetro promedio del túnel) es menor o igual a 1. Lo ideal es que para túneles urbanos, este valor sea al menos 2 (Ulloa. J. C. 2016).

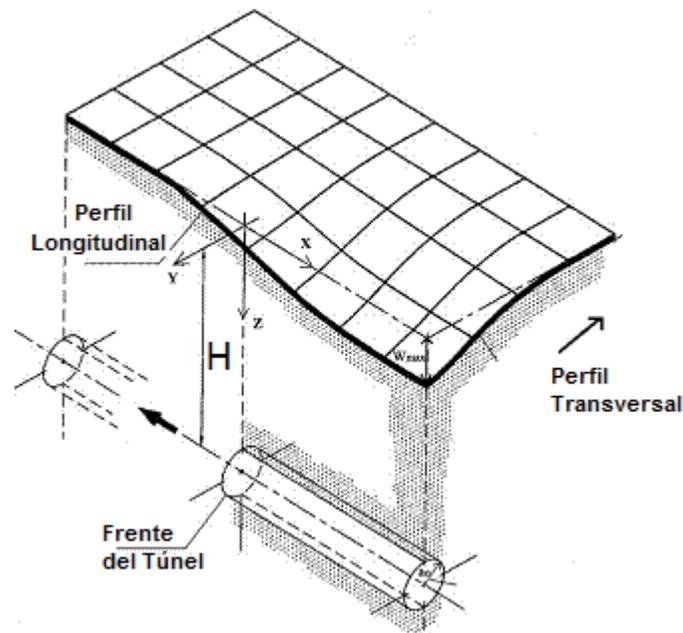
Una investigación llevada a cabo por la ITA (International Tunneling and Underground Space Association) identificó dos modos de propagación basados en conclusiones de observaciones y mediciones in situ, en donde se aprecian distintos modos de falla del suelo. En el artículo se establece que para túneles con  $\frac{H}{D} < 2.5$ , como es el caso de los túneles del Metro de Santiago, los desplazamientos en la superficie debieran ser similares o del mismo orden de magnitud que aquellos observados en profundidad. Mientras que cuando  $\frac{H}{D} > 2.5$ , el impacto observado en superficie debiera ser en general, más limitado (ITA, 2006). Sin embargo, es importante mencionar que dicha tendencia es de carácter general, y puede no siempre representar la realidad, ya que hay diversos factores adicionales que podrían alterar el comportamiento del suelo.

### **2.3.3 Movimientos en Superficie - Subsistencia.**

La subsistencia es un fenómeno que implica el asentamiento de la superficie terrestre en un área extensa (cubeta de subsistencia) debido a varios factores. Estos pueden ser naturales, o causados por el impacto de actividad humana, como es el caso de la excavación de túneles.

Normalmente se le presta mucha atención a este tipo de deformaciones debido a los daños que puede causar en las estructuras.

En la figura 11 se puede ver una representación típica de la subsidencia producto de la excavación de un túnel.



**Figura 11: Representación de la subsidencia inducida por la excavación de un túnel (Attewell y Yeates et al 1986).**

De la figura se observa que la subsidencia es un problema tridimensional, no solo existe una distribución de asentamientos en la dirección longitudinal, sino que también en la dirección transversal. Al igual que en el caso de las convergencias, los asentamientos se producen a lo largo del tiempo y comienzan antes de que el frente de excavación llegue a la vertical del punto observado. Por ejemplo en el Metro de Madrid el asentamiento observado al pasar el frente por debajo de la sección de monitoreo observada era del orden del 20-30% del final (Oteo. C & Rodríguez. J. M, 1997). Estos porcentajes dependen los factores mencionados anteriormente (Sección 2.3), pero sirven para tener una idea del orden de magnitud que pueden llegar a tener.

En definitiva, deben tenerse en cuenta las tres dimensiones geométricas que llevan a la generación de una cubeta de subsidencia como la de la figura 12, llamada por algunos “cubeta de Attewell”, más una cuarta variable, que es el tiempo (Oteo. C & Rodríguez. J. M, 1997).

La estimación teórica de estos movimientos resulta extremadamente difícil por la gran cantidad de variables que intervienen en el fenómeno. Son muchos los métodos empíricos y semi-empíricos que existen para calcular los asentamientos producidos en superficie al paso de un túnel, sin embargo, vale la pena mencionar algunos de ellos debido a la simplicidad que tienen y al éxito que han tenido.

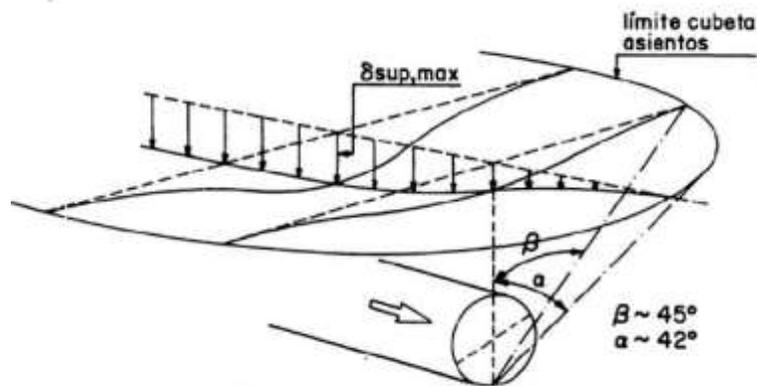


Figura 12: Cubeta de Subsistencia o de Attewell (Oteo. C & Rodríguez. J. M).

El método empírico de Peck (1969) es mencionado en un gran número de artículos científicos. Su simplicidad se debe a que el patrón transversal de subsidencia se puede idealizar como una distribución normal invertida. La ecuación establece que la deformación vertical  $\delta_z$  se puede expresar como la siguiente ecuación:

$$\delta_z = \delta_{max} * e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

Donde  $\delta_{max}$  es el máximo asentamiento sobre el eje del túnel,  $x$  es la distancia transversal al eje del túnel e  $i$  es el punto de inflexión en la curva de distribución normal (figura 13). La determinación del punto de inflexión está relacionada con las propiedades del suelo y la profundidad del túnel.

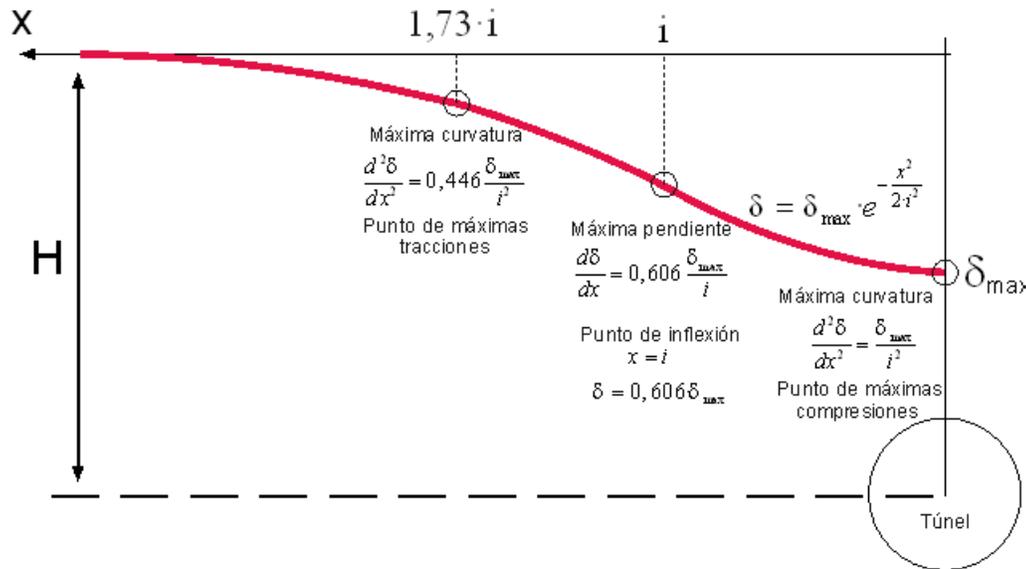


Figura 13: Método de Peck (1969). Estimación de los asentamientos en superficie mediante la utilización de una Campana de Gauss invertida (Pino. D).

Complementariamente, en un artículo de Oteo. C & Rodríguez. J. M (1997), a partir de trabajos teóricos iniciados por Sagaseta y Oteo (1974) se propuso utilizar el siguiente procedimiento semiempírico (ya utilizado con éxito en los Metros de Madrid, Sevilla, Barcelona, Caracas, Toulouse y Londres entre otros), a veces denominado STSM (Semi empirical Tunneling Subsidence Method):

- La ley de asentamiento en el eje transversal al eje del túnel se adopta como una campana de Gauss, utilizando la fórmula (1).
- La posición del punto de inflexión,  $i$ , se determina con la expresión:

$$\frac{i}{D} = \eta \left( \frac{0,52H}{D} - 0,21 \right) \quad (2)$$

Siendo  $\eta$  un coeficiente que varía desde 0,7 (suelos muy cohesivos) a 1,3 (suelos sueltos).

- Para considerar la influencia de la deformabilidad en la dirección longitudinal, puede usarse a curva representada en la figura 14, determinada a partir de cálculos tridimensionales (De la Fuente y Oteo 1997, informe no publicado).

- Para determinar la cubeta de subsidencia o de Attewell, se propuso utilizar la ley simplificada de las figuras 15 y 16.

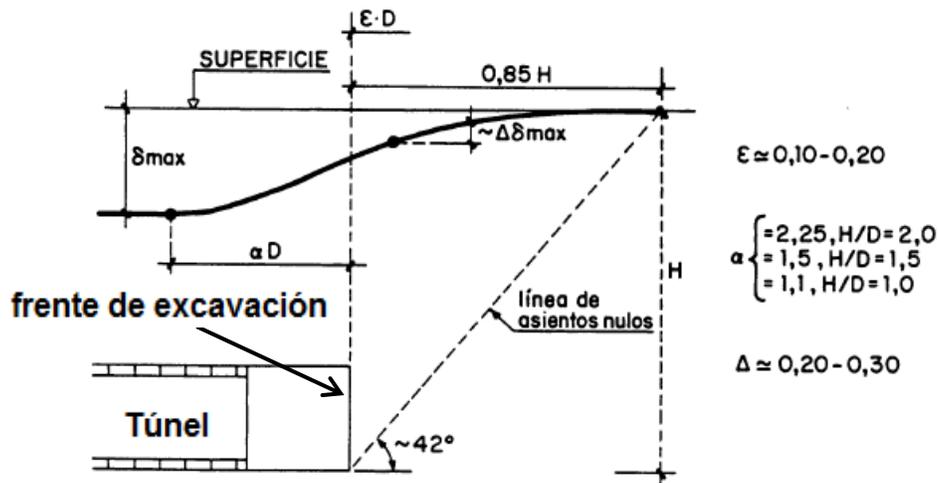


Figura 14: Ley Semi-empírica de distribución de asentamientos superficiales en la dirección longitudinal sobre el eje del túnel (Oteo. C & Rodríguez. J. M).

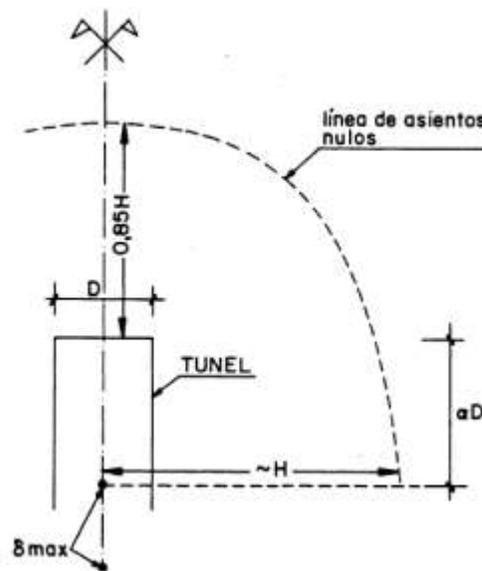


Figura 15: Definición Semi-Empírica de la cubeta de Attewell (Oteo. C & Rodríguez. J. M).

Como se puede apreciar, es un procedimiento relativamente simple, pero su utilización depende mucho de las condiciones geotécnicas y de que tan conocido sea el comportamiento del suelo en donde se construye el túnel, por lo que en primera instancia, le es difícil competir, en términos de fiabilidad, con los modelos numéricos de elementos finitos en tres dimensiones (Snežana Maraš-Dragojević, 2012).

## **2.4 Instrumentación y Monitoreo de Túneles Urbanos.**

La instrumentación y el monitoreo son una parte fundamental en la construcción de túneles, en particular si utilizan en su diseño y construcción, los criterios del NATM. Para poder construir de forma segura y económica se requiere de monitoreo continuo, que en general tiene como objetivos, (1) obtener información de la respuesta del suelo ante la excavación de las obras subterráneas; (2) proveer seguridad durante la construcción; (3) verificar los modelos y parámetros de diseño y (4) monitorear los impactos en superficie (Dunnicliff, J, 1993).

Las magnitudes que se controlan en las obras subterráneas son muy variadas y dependen de las condiciones a las que cada una se ve enfrentada. Sin embargo, en última instancia, las variables que se controlan en la mayoría de los casos son los desplazamientos del revestimiento y los movimientos del suelo alrededor de las excavaciones (Dunnicliff, J, 1993).

El objetivo del monitoreo de desplazamientos dependen en gran medida de la ubicación del túnel y del método constructivo. Por ejemplo, en un túnel ubicado en los Alpes, a una profundidad de 2000 metros dentro del macizo rocoso y sin estructuras en la superficie, el principal objetivo de medir estos desplazamientos es asegurarse de que las presiones de la roca estén adecuadamente controladas y de que exista un margen de seguridad antes el colapso. Por otro lado, en túneles urbanos superficiales, el principal objetivo es monitorear el impacto en superficie, como son los asentamientos del terreno y consecuentemente daños en estructuras cercanas.

El monitoreo de desplazamientos en los túneles, generalmente incluye las siguientes mediciones (Dunnicliff, J. 1993):

1. Convergencias de las paredes del túnel.
2. Desplazamientos alrededor del suelo de la excavación.
3. Desplazamientos verticales (subsistencia) y horizontales en la superficie, ya sea del terreno como de estructuras cercanas.

Estos desplazamientos se pueden monitorear ya sea a través de instrumentación geotécnica o bien geodésica. Los métodos geodésicos (topografía), en general, proporcionan coordenadas absolutas del movimiento de los distintos puntos de referencia que se desean controlar, mientras que la instrumentación geotécnica usualmente proporciona movimientos relativos. En la figura 16 se presentan, de manera general, los distintos dispositivos de monitoreo que se utilizan para controlar las distintas variables.

<b>Función</b>	<b>Aparato o equipo</b>	<b>Utilización</b>
Medida de desplazamientos	Hitos de nivelación	Asientos terreno
	Regletas o clavos	Asientos en estructuras
	Dianas, prismas, etc.	Control topográfico
	Cinta de convergencia	Desplazamientos entre puntos a distancia métrica
	Electroniveles	Registro continuo de asientos
	Inclinómetros	Desplazamientos o flechas
	Extensómetros	Desplazamientos o asientos relativos entre puntos
	Fisurómetros o "crack meters", micrómetros, comparadores, transductores de lectura manual o de registro automático, etc.	Medida de apertura de grietas, movimientos entre partes de una estructura, etc.
	TriVec	Extensómetro múltiple
	Clinómetros	Inclinación de edificios
Medida de deformaciones	Extensímetros o strain-gauges	Medida de deformaciones en elementos estructurales
	Fibra óptica	Id.
Medida de fuerzas o tensiones	Células de presión total	
	Células de carga en anclajes	
	Células de presión intersticial	
	Células tipo Osterberg	
Medida de presión intersticial	Piezómetros de tubo abierto o de Casagrande	
	Piezómetros de cuerda vibrante	
	Manómetros	

Figura 16: Equipos principalmente utilizados en Instrumentación y Monitoreo de Túneles (Rodríguez, J. M.

2008).

En la figura 17 se presenta un posible esquema de cómo podrían estar dispuestos todos estos equipos en una sección transversal de un túnel, entendiéndose que no siempre es necesario instalarlos todos.

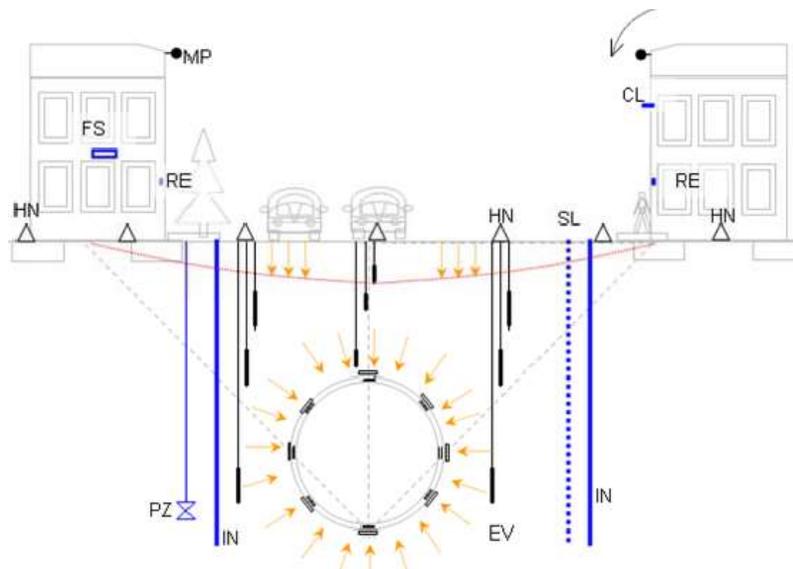


Figura 17: Esquema de una sección transversal de un túnel completamente instrumentada (Pérez, E & Álvarez, M, 2010).

HN: Hito de Nivelación; FS: Control de Fisuras; MP: Prisma topográfico; RE: Regletas para Nivelación; PZ: Piezómetro; IN: Inclinómetro; EV: Extensómetro de varilla; SL: Extensómetro Incremental; CL: Clinómetro.

En este trabajo, los métodos de monitoreo geodésico son de particular importancia, ya que, como se verá el Capítulo 4, forman parte del esqueleto fundamental de la propuesta de instrumentación y monitoreo de desplazamientos de los túneles estudiados. Es por anterior, que en las siguientes secciones se presentan las principales características de estos sistemas de medición.

## 2.4.1 Monitoreo Geodésico Subterráneo para la medición de Convergencias.

### 2.4.1.1 Monitoreo de Desplazamientos Absolutos en 3 Dimensiones.

Desde principios de los años 90 se dio inicio a la implementación del monitoreo de desplazamientos en tres dimensiones en los túneles. A nivel internacional, este método ha ido reemplazando gradualmente las técnicas antiguas para medir convergencias

debido al continuo mejoramiento de los equipos y a la mayor cantidad de información que proporciona.

#### 2.4.1.1.1 Principios Básicos.

Las mediciones son ejecutadas con una estación total, figura 18. Este es un instrumento óptico-electrónico que consiste en la incorporación de un distanciómetro electrónico y un microprocesador, a un teodolito electrónico, lo que le permite al instrumento la medición de ángulos verticales, horizontales y distancias inclinadas. La estación total apunta a objetivos materializados mediante miras con material reflectante o prismas (más costosos y precisos) (figura 18), colocados sobre los pernos. En general, en secciones de monitoreo ubicadas aproximadamente cada 10-15m, para así determinar sus posiciones dentro de un sistema de coordenadas globales y/o coordenadas locales del proyecto. El proceso de nivelación que llevan a cabo es llamado Nivelación Trigonométrica. El desarrollo de los desplazamientos (magnitud y orientación) es calculado mediante la toma sistemática de lecturas en el tiempo. Debido a que el monitoreo de todo el túnel no se puede ejecutar mediante una sola posición instrumental, se requiere de un esquema de observación interconectado, el cual se establece a partir de puntos de referencia fijos. Dado lo anterior, se debe diferenciar entre los puntos que registren desplazamientos y aquellos tomados como “puntos estables”. En general, un punto puede ser tomado como “punto estable” si presenta desplazamientos en el tiempo menores a 1mm/mes (ASG, 2014).

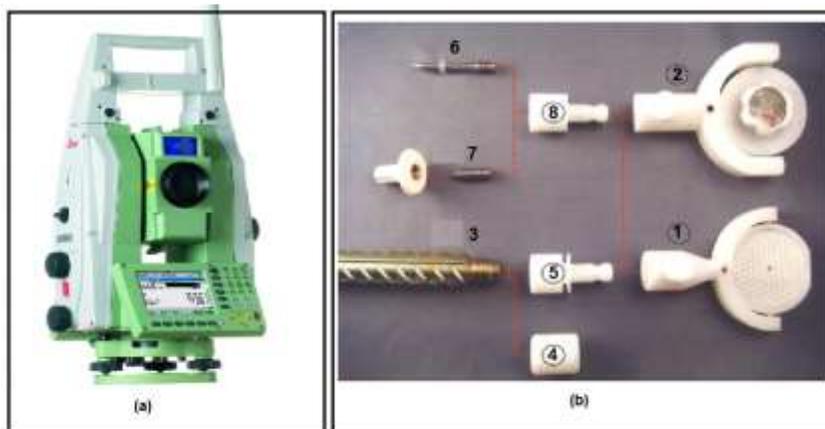


Figura 18: (a) Estación Total Leica TM30, (b) Puntos de control para el monitoreo geodésico de convergencias, (1) diana reflectante BIRREFLEX y (2) prisma de alta precisión (ASG, 2014).

En general se exige que las coordenadas de los puntos de monitoreo deben ser determinadas con una precisión de  $\pm 1\text{mm}$  (desviación estándar) durante el periodo de tiempo que dure el monitoreo, sin embargo se ha visto que la precisión teórica de esta metodología puede llegar a ser del orden de 2-3mm, la que para túneles extensos puede aumentar aún más debido a la mala calidad de la atmosfera y a múltiples posiciones instrumentales (S. T. Liu & Z. W. Wang, 2008).

#### 2.4.1.1.2 Ubicación de los Puntos en las Secciones de Monitoreo.

En la figura 19, a modo de ejemplo, se muestran las disposiciones típicas de los puntos de monitoreo en una misma sección. Estos esquemas representan los requerimientos mínimos, los que pueden adaptarse según las condiciones de cada proyecto.

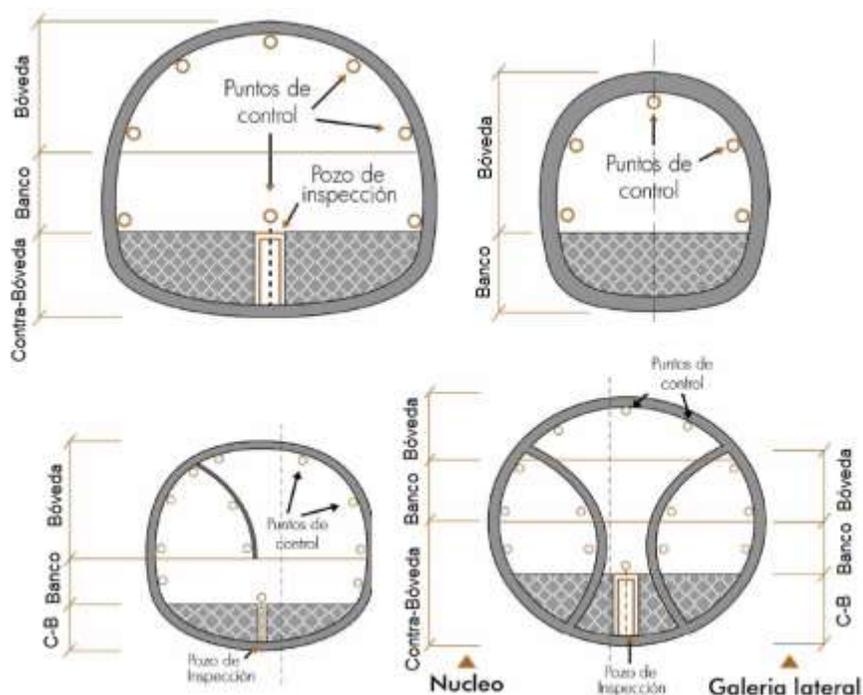


Figura 19: Esquemas típicos para Secciones de Monitoreo (Invías, 2015).

#### 2.4.2 Monitoreo Geodésico para la medición de Movimientos Superficiales y Sub-superficiales.

El monitoreo de superficie generalmente tiene dos objetivos principales; (1) identificar la zona de influencia de los asentamientos (cubeta de subsidencia), y (2) controlar el nivel de asentamientos en estructuras y edificios.

Se controlan los movimientos horizontales y verticales en edificios y estructuras colindantes, en superficie y en el subsuelo.

Los principales dispositivos destinados al control de los parámetros anteriores suelen ser hitos de nivelación y extensómetros de posición múltiple, para el control de movimientos verticales en superficie y en profundidad. Por otro lado, para evaluar los movimientos horizontales del subsuelo se utilizan en ocasiones sondeos inclinométricos, o simplemente inclinómetros.

Finalmente, para medir los movimientos de las estructuras, ya se verticales y horizontales, se utilizan referencias de nivelación o prismas, con el fin de realizar un monitoreo de desplazamientos en tres dimensiones como el del punto 2.4.1.1.

Las referencias de nivelación, los hitos de nivelación y los prismas, corresponden a métodos geodésicos. Los extensómetros e inclinómetros son considerados instrumentación geotécnica. El uso de uno u otro va a depender de las condiciones a las que cada proyecto se ve enfrentado (estructuras delicadas o de gran importancia en las cercanías de las obras subterráneas, presupuesto, precisiones requeridas y condiciones geotécnicas, entre otras), y del criterio y experiencia del ingeniero encargado del diseño y ejecución del plan de instrumentación y monitoreo.

#### ***2.4.2.1 Monitoreo de Subsidiencias y Movimientos Sub-superficiales a través de Hitos de Nivelación.***

Este monitoreo consiste en la medición movimientos del terreno a nivel de superficie (subsidiencias) y profundos mediante nivelaciones geométricas, en distintos puntos de referencia dispuestos sistemáticamente en los entornos de las obras subterráneas, llamados “hitos (o referencias) de nivelación”.

##### **2.4.2.1.1 Principios Básicos.**

La nivelación geométrica es el método altimétrico más preciso y utilizado de todos. Las mediciones se llevan a cabo con un nivel topográfico, ya sea manual o electrónico. Este es un instrumento óptico que tiene como finalidad, la medición de desniveles, mediante lecturas directas a miras topográficas graduadas, ya sea tradicionales o Invar

(para lecturas digitales), las que son ubicadas sobre hitos de nivelación. A diferencia de un nivel manual, un nivel electrónico tiene la ventaja de ser más preciso, de proveer desniveles y distancias de manera automática y de almacenar los datos. Los hitos de nivelación suelen estar materializados mediante barras de acero ancladas al terreno, y dispuestos de manera sistemática con el fin de cubrir toda la cubeta de subsidencia. El desarrollo de los desplazamientos se calcula mediante la toma sistemática de lecturas en el tiempo. Al igual que en el monitoreo subterráneo, la primera lectura se realiza hacia un punto fijo, el cual tiene coordenadas altimétricas conocidas (m.s.n.m), y luego se realiza una combinación de nivelaciones lineales y de superficie. Nivelaciones lineales, debido a que algunos de los puntos a nivelar se encuentran a más de la distancia máxima en que se puede colocar la mira, y por lo tanto, se deben realizar tantas posiciones instrumentales como sea posible, y nivelaciones de superficie debido a que desde una misma posición instrumental se realizan lecturas en varios puntos, los que coinciden con los hitos de nivelación.

### **2.4.3 Errores en los Sistemas de Medición.**

Los sistemas mencionados en las secciones 2.4.1 y 2.4.2 tienen una precisión asociada, debido a que están sujetos a errores de medición que, en muchos casos, son inevitables. Dado lo anterior, es de suma importancia entender de dónde provienen estos errores, qué comportamiento tienen y cómo se deben manejar.

#### **2.4.3.1 Teoría.**

Toda medición está sujeta naturalmente a un error de medición, el que se define como la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero. El problema es, que valor verdadero es más bien hipotético y en la realidad, nunca se conoce su magnitud con absoluta certeza. Es por lo anterior, que en estricto rigor, el error se refiere a la diferencia entre el valor medido y el valor más probable (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006).

#### 2.4.3.1.1 Fuentes de Errores.

Los errores provienen principalmente de tres fuentes (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006):

1. Error Instrumental: Son causados por imperfecciones en los instrumentos, ya sea en su manufactura o configuración.
2. Errores naturales: Asociados a las condiciones en las que se toman las mediciones.
3. Errores personales: Asociado al conocimiento y habilidad de la persona que realiza la medición.

#### 2.4.3.1.2 Tipos de Errores.

Las fuentes anteriores nos dicen de donde proviene el error, pero no dicen nada acerca del comportamiento de estos mismos. Para eso se distinguen los tipos errores, que son principalmente tres (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006):

1. Errores por equivocación: Originados por mal entendimiento y poco cuidado durante el proceso de medición.
2. Errores sistemáticos: Estos errores permanecen constantes en valor absoluto y en el signo, al medir una magnitud en las mismas condiciones. Se conocen las leyes que los causan y suelen estar asociados a principios físicos. Una vez que se detecta la causa, es posible corregirlos, siguiendo los procedimientos de medición correctos.
3. Errores aleatorios: Son errores inevitables, no se conocen ni las leyes ni los mecanismos que los causan. Se contraponen al concepto de error sistemático y son resultado de imperfecciones instrumentales y humanas. Suelen ser pequeños y tener signo positivo y negativo. Según la teoría estadística, repitiendo las mediciones varias veces puede ayudar a cancelar estos errores.

Debido a estos errores, varias observaciones de una misma variable van a tender a arrojar resultados distintos. Cuando existe poca discrepancia entre estos resultados se suele decir que las mediciones son precisas. Sin embargo, mediciones precisas no

necesariamente son exactas. Para entender mejor esto, es necesario dar las siguientes definiciones (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006):

1. Precisión: es el grado de consistencia entre observaciones, basado en el tamaño de las discrepancias de un set de datos. El grado de precisión depende de la estabilidad del ambiente en el que se realizan las mediciones, la calidad del equipo de medición y de la habilidad de la persona que realiza las mediciones y procedimientos observacionales.
2. Exactitud: es la medida de la cercanía que existe entre una magnitud medida y su valor real, o el valor más probable.

#### 2.4.3.1.3 Propagación de Errores.

Muchas veces, la variable que se desea obtener es determinada de manera indirecta a través de otras magnitudes medidas, las que se relacionan con la variable deseada a través de alguna fórmula matemática. Como cada una de estas magnitudes tiene un error asociado, cualquier valor calculado a partir de ellas tendrá un error también. Esto es conocido como propagación de errores, y debe tenerse en consideración cuando se exijan precisiones en procesos de medición que contengan variables calculadas de forma indirecta. La ecuación presente en la figura 20 gobierna la manera en que los errores, de medidas estadísticamente independientes, se propagan en una función. Es conocida como la ley especial de propagación de errores (SLOPOV: Special Law of Propagation of Variances). En esta ecuación, los términos  $\left(\frac{\partial Z}{\partial x_i} \sigma_{x_i}\right)$  representan la contribución individual de cada magnitud al error total (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006).

$$\sigma_Z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2}$$

Figura 20: Ley Especial de Propagación de Errores (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006).

### **2.4.3.2 Fuentes de Error en el cálculo de desniveles mediante Nivelaciones Geométricas/Diferenciales**

#### 2.4.3.2.1 Errores Sistemáticos.

Durante los procesos de nivelación geométrica/diferencial, las distancias de lectura suelen ser cortas e iguales hacia adelante y atrás, para así minimizar los efectos de errores sistemáticos. Aun así, siempre se debe asumir que estos errores están presentes, por lo que se deben realizar las metodologías de campo adecuadas para poder minimizarlos. Los principales errores sistemáticos son:

1. Error de Colimación: El error de colimación (figura 21. a) ocurre cuando, una vez ya ha sido nivelado el instrumento, la línea de visión de este no es realmente horizontal. Este error es minimizado manteniendo las distancias cortas y balanceadas, y se puede determinar siguiendo una metodología especial.
2. Error por Curvatura Terrestre y Refracción: La curvatura terrestre provoca que las lecturas en las miras estén más arriba de lo normal. Al mismo tiempo, la refracción curva la línea de visión hacia la superficie, lo que provoca que las lecturas en las miras estén más abajo. La suma neta de estos dos efectos provoca las lecturas en las miras estén más arriba de lo normal. En general, los instrumentos de última generación tienen opciones para corregir estos efectos de forma automática.

#### 2.4.3.2.2 Errores Aleatorios.

La nivelación diferencial está sujeta a varias fuentes de errores aleatorios. Incluidos, están los errores en la nivelación del instrumento y de lectura en las miras (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006).

1. Errores de Lectura: Son proporcionales a la distancia a la que se encuentra la mira, y generalmente están asociados a la eficiencia con que la persona observa la lectura. Este error es mínimo si se utiliza un nivel digital en conjunto con una mira Invar, y en general está incluido en la precisión instrumental definida por fábrica.

2. Error de Nivelación del Instrumento: Después de nivelar el instrumento utilizando la burbuja de nivelación (manual o digital), aún queda una inclinación mínima (figura 21. b), lo que provoca que la línea de visual este inclinada y genere lecturas erróneas. Los niveles digitales tienen “compensadores automáticos”, que son encargados de corregir esta inclinación. Aun así, estos compensadores tiene una precisión de fábrica asociada, típicamente entre 0.1” y 1”.
3. Error de Nivelación de Mira: Las miras, ya sea manuales o Invar, son niveladas utilizando una burbuja. Esta nivelación no es perfecta, debido a que es realizada manualmente por una persona, por lo que existe un error asociado a este proceso. El error es de carácter aleatorio debido a que posee distintos signos y magnitudes.

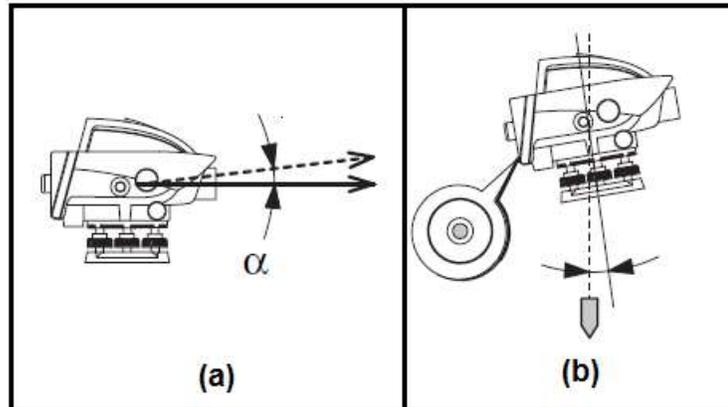


Figura 21: Errores típicos del Nivel de Ingeniero. (a) Error de Colimación. (b) Error de Nivelación (Ghilani, Charles & Wolf, Paul, 2006).

#### **2.4.3.3 Fuentes de Error en el cálculo de desniveles mediante Nivelaciones Trigonométricas.**

Las nivelaciones trigonométricas se utilizan en áreas en donde el terreno, y las actividades que se llevan a cabo en él, dificultan el uso de la nivelación geométrica. Esta nivelación consiste en determinar desniveles de manera indirecta, a través de mediciones directas de ángulos verticales y distancias inclinadas. Los desniveles son calculados mediante identidades trigonométricas básicas, como se observa en la figura 22.

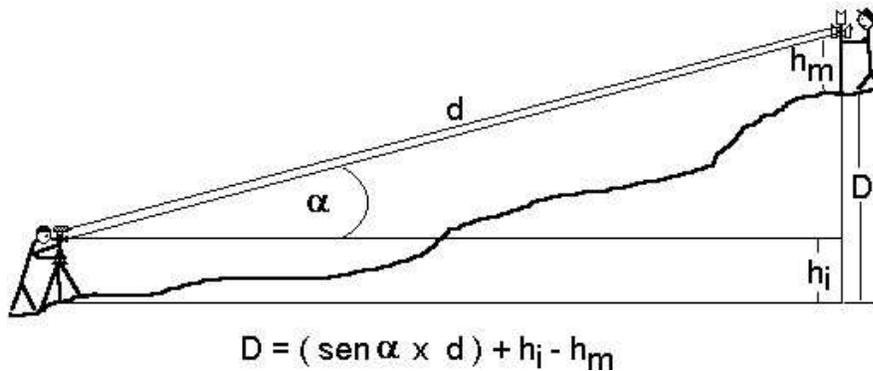


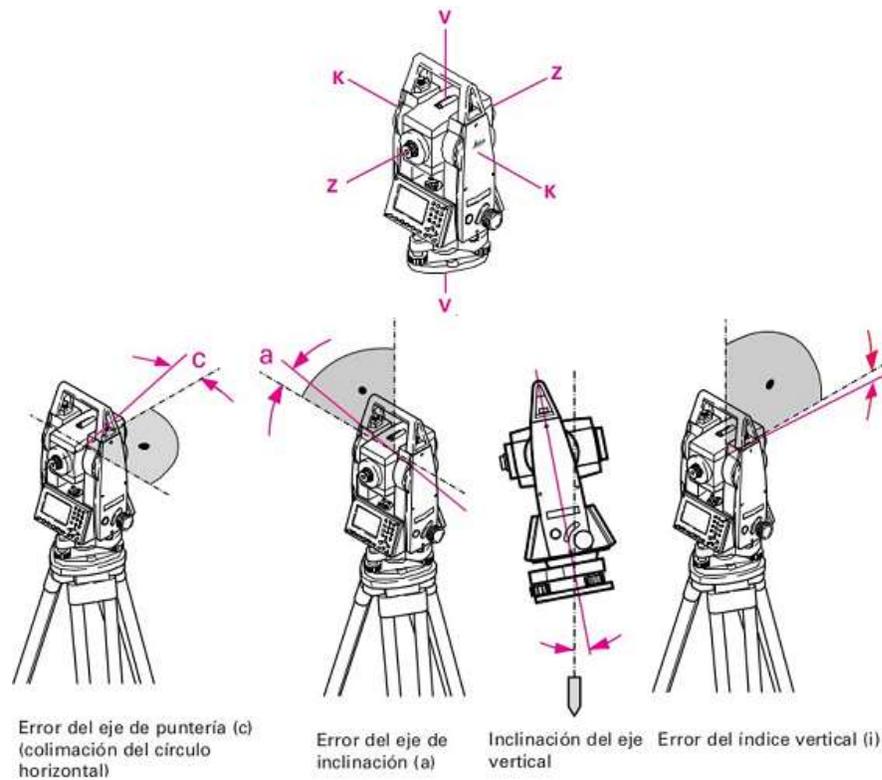
Figura 22: Esquema de Nivelación Trigonométrica (web).

#### 2.4.3.3.1 Errores Sistemáticos.

1. Errores por No Ortogonalidad de los Ejes Principales de la Estación Total: Idealmente, el eje de puntería ZZ (ver figura 23) debe ser perpendicular a la inclinación KK. La inclinación del eje KK debe ser perpendicular al eje vertical VV. El eje vertical VV debe ser absolutamente vertical (alineado con el cenit), y finalmente, la lectura del círculo vertical debe ser exactamente cero al apuntar hacia el cenit. En caso de que estas condiciones no se cumplan, se originan los siguientes errores (ver figura 23) (Leica Geosystems, 2005).
  - a. Error del eje de puntería o error de colimación “c” (desviación con respecto al Angulo recto entre el eje de puntería y el eje de inclinación).
  - b. Error del eje de inclinación “a” (desviación con respecto al ángulo recto entre el eje de inclinación y el eje vertical).
  - c. Inclinación del eje vertical (ángulo formado entre la línea de plomada y el eje vertical).
  - d. Error del índice vertical “i” (ángulo que se forma entre la dirección cenital y la lectura cero del círculo vertical).

En general, estos errores se eliminan tomando mediciones en las dos posiciones del anteojo del instrumento. Adicionalmente, los equipos digitales son capaces de detectarlos y tomarlos en consideración.

2. Error por Curvatura Terrestre y Refracción: Análogo a la Nivelación Geométrica.



**Figura 23: Errores por No Ortogonalidad de los ejes principales de una Estación Total (Leica Geosystems, 2005).**

#### 2.4.3.3.2 Errores Aleatorios.

##### 1. Medición de Ángulos.

- a. Errores de Lectura: Al igual que en la nivelación geométrica, existen errores de lectura, los que dependen de la calidad del instrumentos y de la habilidad de la persona que lo manipula. En las estaciones totales, este error viene dado por la resolución del sistema electrónico de lectura de ángulos y distancias, y viene definido en el manual de fábrica.
- b. Errores de Puntería: La precisión de apuntar hacia una mira depende de una serie de factores; (1) cualidades ópticas del instrumento, (2) tamaño y tipo de mira, (3) habilidad del observador en encontrar la mira y apuntarla correctamente y (4) las condiciones externas en que son tomadas las mediciones.
- c. Errores de Nivelación: Las estaciones totales también tienen compensadores automáticos, los que a su vez tiene una precisión de

fábrica asociada, aplicable después de que el instrumento ha sido nivelado manualmente.

- d. Errores por Vibraciones: En general es posible asumir de que la vibración del terreno es despreciables, sin embargo, cuando el instrumento se debe posicionar en las mismas faenas de construcción, a veces pueden producir que el compensador sea inestable y se produzcan errores.

## 2. Medición de Distancias.

Todas las observaciones de un distanciómetro electrónico están sujetas a un error instrumental de fábrica, el que típicamente tiene la forma de  $\pm(a + b \text{ ppm})$ . En esta expresión, el término “a” es constante y en general está en el rango de 1mm a 10mm, y “b” es la parte del error proporcional a la distancia de observación. Adicionalmente, también existen errores de puntería asociados al tipo de mira utilizada.

En resumen, es de suma importancia tener un total conocimiento de los sistemas de medición que se van a utilizar para llevar a cabo un determinado monitoreo. La entidad a cargo de desarrollar el plan de instrumentación y monitoreo debe entender como son las metodologías de medición, cuales son los errores típicos presentes en ellas y como repercuten los resultados. Lo anterior es importante para poder determinar los sistemas de medición óptimos, en base a las precisiones requeridas, como también para interpretar de manera adecuada los resultados del monitoreo.

### 3 Antecedentes Generales de la Construcción de las nuevas líneas del Metro de Santiago.

#### 3.1 Introducción.

El Metro de Santiago es el medio de transporte subterráneo de la Región Metropolitana, cuya red cubre gran parte de la ciudad de Santiago, capital de la República de Chile. Este sistema de transporte nace debido al crecimiento demográfico y a la densificación de la ciudad. Es administrado por la empresa pública Metro S.A. y es uno de los sistemas de transporte más modernos de Latinoamérica.

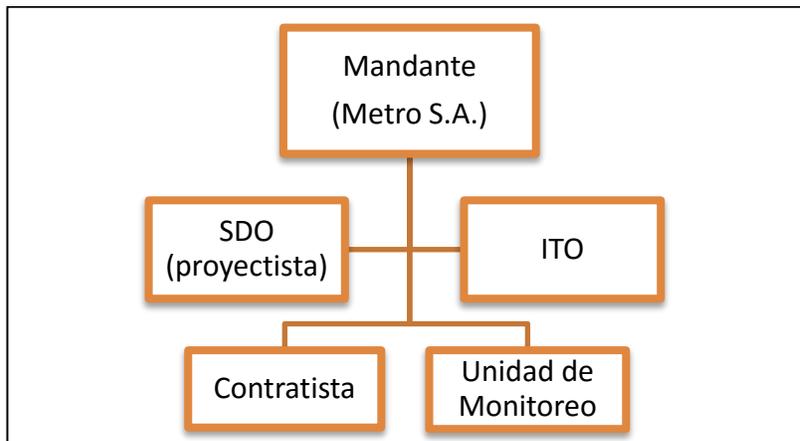
La red actual, consta de 108 estaciones y 103 kilómetros de longitud, en donde 21 comunas son servidas directamente. En la figura 24 se presenta la red actual del Metro de Santiago, donde se observan las líneas existentes 1, 2, 4 y 5.



Figura 24: Red Actual del Metro de Santiago (2015).

El nuevo proyecto que se está ejecutando, es la construcción de las nuevas Líneas 3 y 6 del Metro de Santiago, que consta de 37 kilómetros de líneas y 28 estaciones. Una vez terminado serán incluidas 5 comunas nuevas a su servicio (figura 25).





**Cuadro 1: Organización jerárquica de las entidades presentes en el proyecto de Construcción y Monitoreo de las Obras Subterráneas estudiadas (elaboración propia).**

### **3.2 Túneles estudiados.**

El análisis de este trabajo se realizó en base a dos principales tipos de obras subterráneas, los túneles “estación” y los “interestación”.

Los túneles “estación” tienen aproximadamente un área de 160 metros cuadrados (diámetro promedio de 13,3 metros) y una tapada sobre la clave del túnel de 11 metros, mientras que el túnel “interestación” tiene un área de 70 metros cuadrados (diámetro promedio de 8,6 metros) y tapadas sobre la clave mínima y máximas de 14,9 metros y 16,8 metros respectivamente. La estratigrafía del sector en estudio está particularmente compuesta por suelos granulares gruesos. La razón en la elección de estos túneles y sus características, está asociada a la disponibilidad de los datos de monitoreo de estas obras.

Los dos túneles “estación” están emplazados bajo el eje de la Avenida Alcalde Carlos Valdovinos, una de las más importantes del sector, y el túnel “interestación” se encuentra entre ambos, y tiene una longitud aproximada de 2 kilómetros.

### 3.2.1 Túnel Estación 1.

Se ubica en la intersección de la Avenida Carlos Valdovinos con Avenida Maipú. En la figura 26 se observa su ubicación y orientación, mientras que en la figura 27 se pueden ver con más detalle sus dimensiones, y las principales obras subterráneas que lo componen.



Figura 26: Ubicación y disposición espacial del Túnel Estación 1 en el mapa satelital de Santiago (Google Earth).

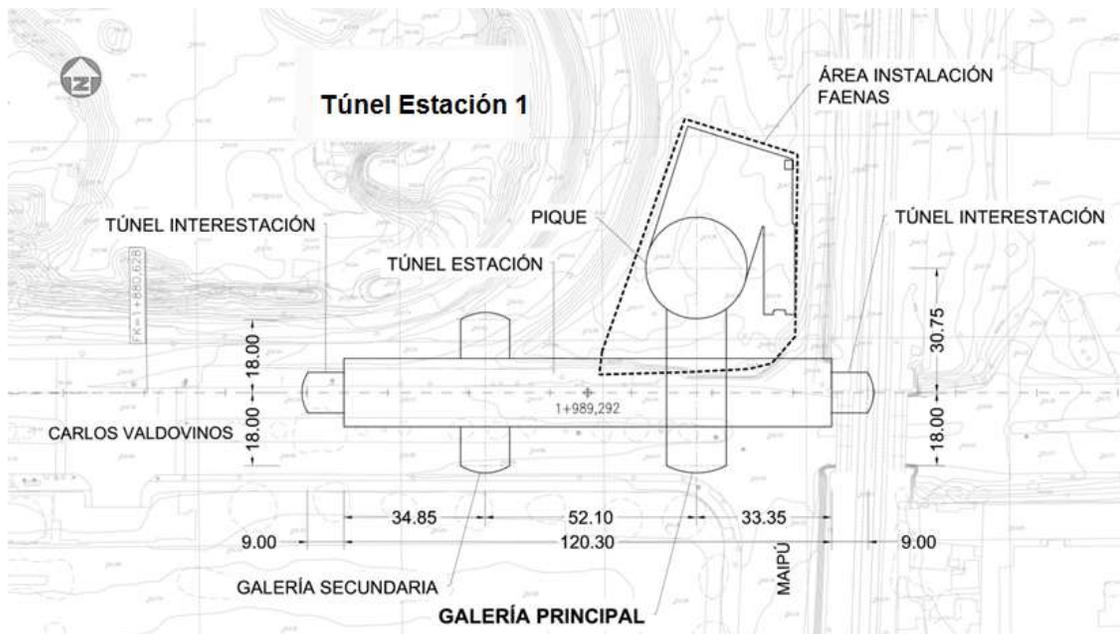


Figura 27: Ubicación en planta del Túnel Estación 1, detalle (Metro. 2013. B).

### 3.2.2 Túnel Estación 2.

Se ubica en la intersección de la Avenida Carlos Valdovinos con la calle Club Hípico. En la figura 28 se observa su ubicación y orientación, mientras que en la figura 29 se pueden ver con más detalle sus dimensiones, y las principales obras subterráneas que lo componen.



Figura 28: Ubicación y disposición espacial del Túnel Estación 2 en el mapa satelital de Santiago (Google Earth).



Figura 29: Ubicación en planta del Túnel Estación 2, detalle (Metro. 2013. B).

### **3.3 Métodos Constructivos de las Obras Subterráneas.**

Los métodos constructivos en las obras del Metro de Santiago han ido evolucionando con el surgimiento de nuevas técnicas a nivel mundial. En los años setenta, para las líneas 1 y 2, la construcción de las interestaciones se realizó mediante excavaciones a tajo abierto, con taludes, o bien paredes entibadas. Los problemas que se generaban debido a este último método de excavación eran evidentes, dado que se ocupaba mucho terreno en avenidas vitales para el transporte de la ciudad, además de que los costos y plazos eran elevados.

El intenso monitoreo llevado a cabo en el periodo de 1997 a 2000 mostro un comportamiento favorable del terreno de gravas de Santiago, con convergencias muy pequeñas y desplazamientos de subsidencia de 8 milímetros. Es por lo anterior que se impulsó la construcción de túneles interestación por “tuneleado”, adoptando así, el NATM. Este método se sigue utilizando para la actual construcción de las nuevas líneas, tanto para los túneles estación como interestación.

En las siguientes secciones se describen las obras subterráneas a construir en las estaciones, en conjunto con el método constructivo propuesto por el proyectista (Metro.2013. A).

#### **3.3.1 Obras Subterráneas a Construir en las Estaciones.**

En general, las obras subterráneas a construir en todas las estaciones son el pique de estación, la galería de acceso principal, el túnel estación, dos estocadas de 9 metros de longitud de los respectivos túneles interestación y dependiendo de la estación, la galería de acceso secundaria, como es el caso del túnel estación 1 (ver figura 30).

El perfil longitudinal del Túnel Estación 1 se muestra en la de la página 40, de donde se puede apreciar que el túnel estación tiene una longitud de 120 m, y una altura de 11,1 m medida desde la cota más baja. El riel se encuentra a 21 m de la superficie y la tapada del terreno sobre la clave del túnel estación es de 11 m.

En la figura 31 se presentan esquemas con las distintas formas y dimensiones interiores de las secciones transversales de las obras subterráneas.

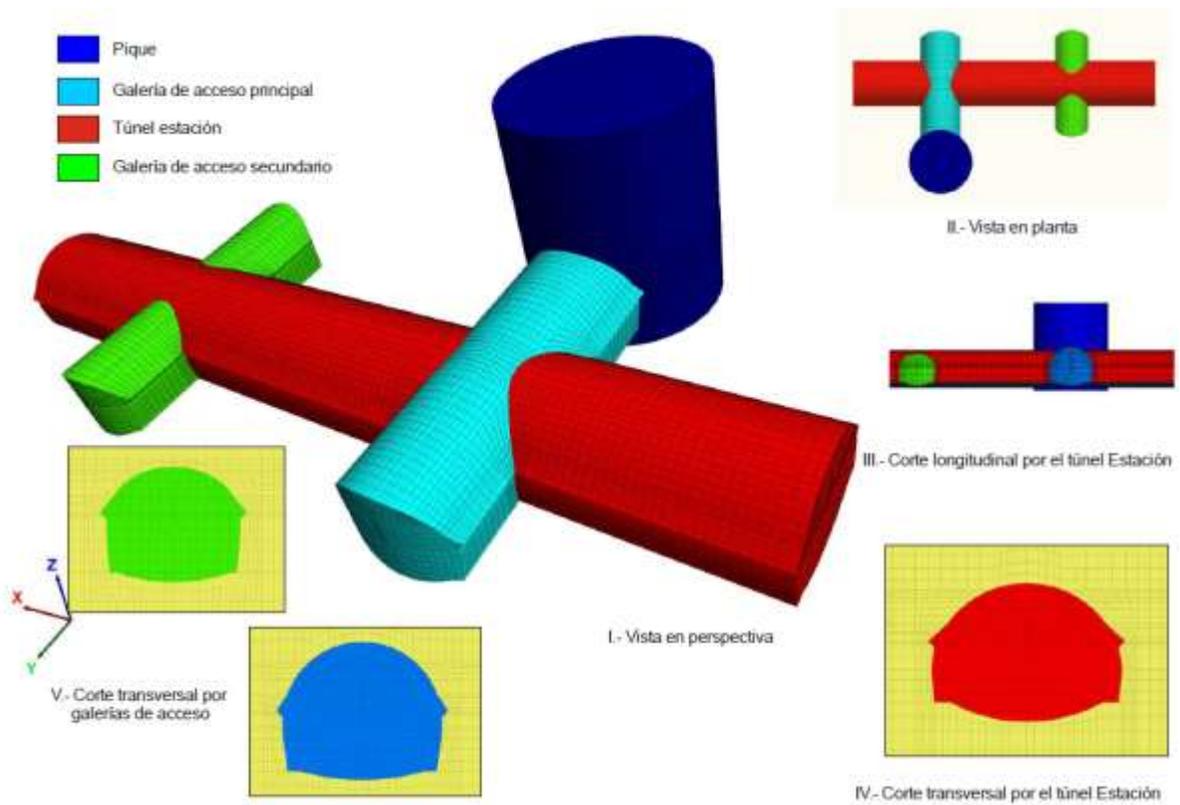


Figura 30: Modelo tridimensional de las obras subterráneas a construir en las estaciones (Metro. 2013. G).

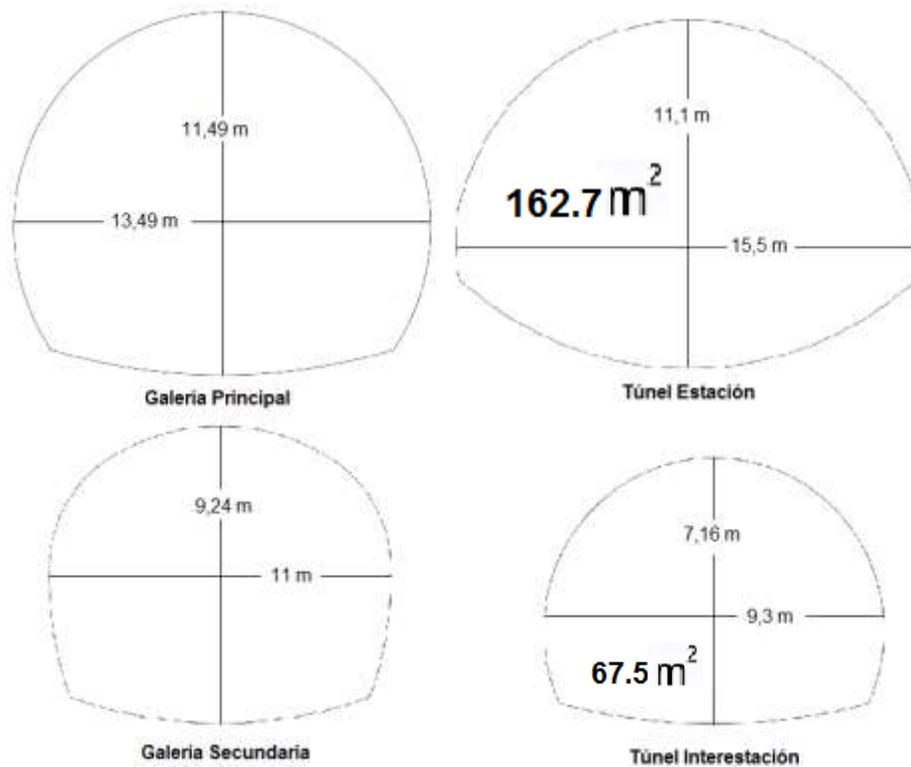


Figura 31: Secciones Transversales de las Obras Subterráneas a construir en las estaciones (propio).

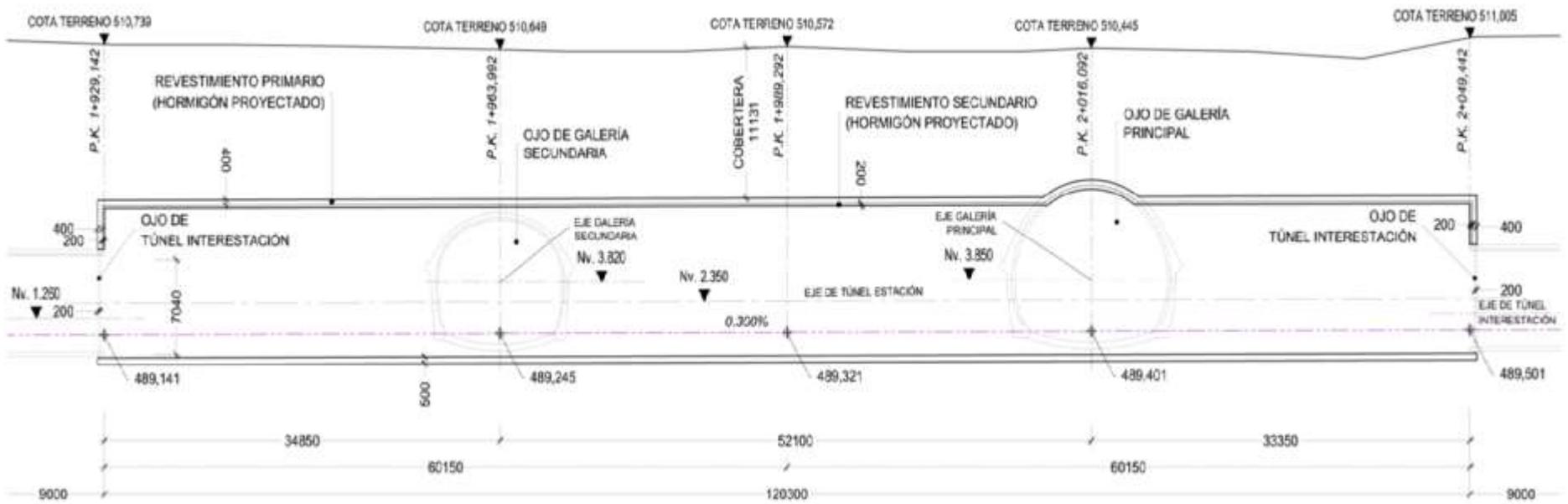


Figura 32: Perfil Longitudinal de las Obras Subterráneas del Túnel Estación 1 (Metro. 2013. A).

### 3.3.2 Concepto del Nuevo Método Constructivo.

Para la construcción de la galería principal y túnel estación el proyectista propuso un método constructivo distinto que el que se venía utilizando.

Tradicionalmente, la construcción de los túneles estación se hacía por el método de galerías laterales (Capítulo 2, sección 2.2), dividiendo la sección en cinco, o tres subsecciones, tal como se ilustra, específicamente, en la figura 33.

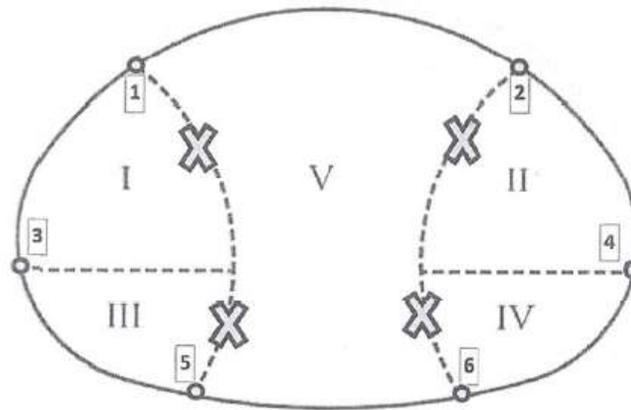


Figura 33: Método de las galerías laterales (Metro.2013. B).

En este proyecto, se propuso un nuevo método llamado “Bóveda Auto-Portante”, el cual fue diseñado y empleado con éxito en la construcción de un tramo de 300 m del Túnel de Archidona, Málaga.

El objetivo principal de este método era mejorar los rendimientos, y la estabilidad, en términos de subsidencia, en cada fase de excavación. Su característica principal, es que se divide la sección sólo de forma vertical, en bóveda, banco y contra-bóveda (figura 35). La bóveda se construye en dos fases, con la resistencia necesaria para conseguir que la excavación de las fases de banco y contra bóveda produzca asentamientos muy pequeños. La forma práctica de hacer esto es hacer que su estructura resistente esté integrada por los revestimientos primario y secundario y que tenga un apoyo suficiente en el terreno para impedir que se hincó al excavar el banco, utilizando para esto, vigas de atado y patas de elefante (Metro.2013. A).

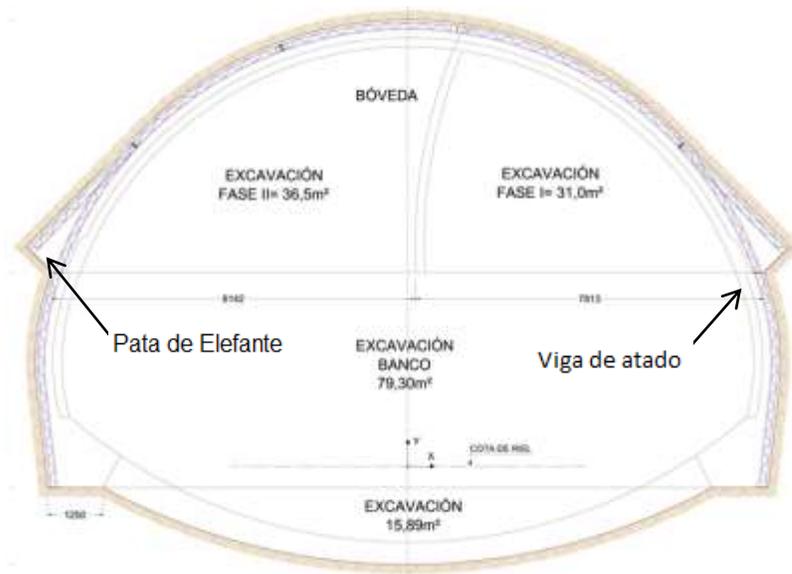


Figura 34: Aplicación del Método de la Bóveda Auto-Portante a la Construcción del Túnel Estación Valledor (Metro.2013. A).

### 3.3.3 Paraguas de Protección.

Los cálculos realizados para las obras subterráneas establecieron que se debían colocar paraguas de forma sistemática en los puntos más críticos. Para tener una mayor claridad, la disposición de los paraguas ejecutados en uno de los túneles “estación” se ilustra en la figura 36, con indicación de los que tenían carácter eventual y los que debían colocarse siempre.

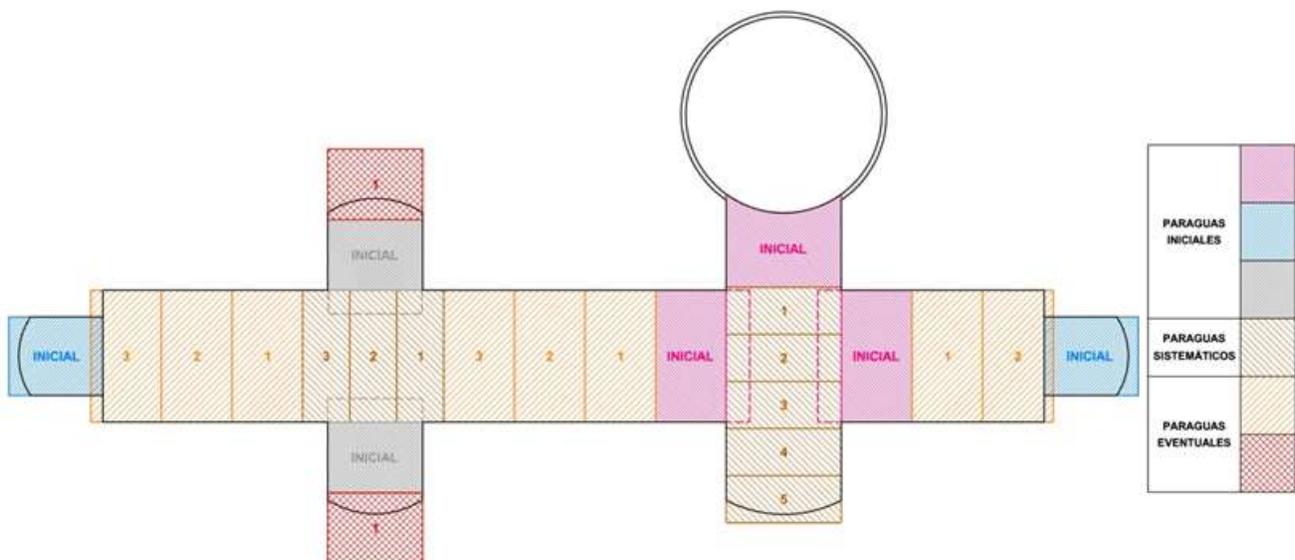


Figura 35: Paraguas a Construir en las Obras Subterráneas del Túnel Estación 1 (Metro.2013. A).

### **3.3.4 Elementos de Revestimiento.**

Los elementos de revestimiento que se emplean en los túneles estación son los habituales usados en la construcción del Metro de Santiago: hormigón proyectado, marcos metálicos y armaduras de acero.

De acuerdo a lo anterior, se identifica lo siguiente:

Revestimiento Primario.

- Capa de sello de 5 cm de hormigón proyectado H-35, sellando también el frente de avance.
- Primera capa de malla electro-soldada.
- Marco reticulado. Colocado a 1 m entre ejes.
- Primera capa de hormigón proyectado H-35 de 20 cm de espesor en el parámetro definitivo y de 13 cm de espesor, en el tabique provisional.
- Segunda capa de malla electro-soldada.
- Segunda capa de hormigón proyectado H-35 de 15 cm de espesor.

Revestimiento Secundario.

- Vigas de atado, situadas en las bases del revestimiento primario de la bóveda, de hormigón armado y espesor de 30 cm.
- Armaduras de barras de acero corrugado.
- Capa de hormigón proyectado H-35 de 20 cm de espesor.

El revestimiento de la Galería Principal es idéntico al del Túnel Estación con la salvedad de que en el revestimiento secundario la última capa de hormigón proyectado es de 30 cm, en vez de 20 cm.

### **3.3.5 Secuencia Constructiva de las Obras Subterráneas.**

En los siguientes apartados se presenta la secuencia constructiva de las obras subterráneas, utilizando como modelo el Túnel Estación 1. Esta secuencia fue aplicada de forma análoga en las demás estaciones.

### **3.3.5.1 Bóvedas de la Galería de Acceso Principal.**

Excavando en avances de 1 m de longitud, se tiene lo siguiente:

- Fase I: Excavación de 36,08  $m^2$  en la bóveda, avanzando en progresos de 1 m y en módulos de 6 m. Se construye el tabique provisional.
- Fase II: Con un desfase mínimo de 6 m, respecto al frente de la Fase I, se excavan los 45,36  $m^2$  restantes de la bóveda, siguiendo el mismo procedimiento que en la Fase I. Demolición del tabique provisional.
- Fase III: Finalizada la excavación completa de la bóveda en una longitud de 6 m, se construyen las dos vigas de atado.
- Fase IV: Desfasado un módulo de 6 m respecto a la Fase III, se terminara la construcción de la bóveda auto-portante, poniendo en obra el revestimiento secundario.

En la figura 37 se ilustra el proceso constructivo descrito en el apartado anterior.

### **3.3.5.2 Bóveda del Entronque de la Galería Principal con el Túnel Estación.**

El entronque de la Galería Principal con el Túnel Estación es la parte en donde se interceptan ambos túneles, y representa la zona más crítica de la construcción de las estaciones. Es por lo anterior, que los avances en esta zona son más pequeños y los marcos metálicos se colocan más juntos de lo habitual. Sumado a lo anterior, se proyectan vigas alabeadas en las aristas de la intersección entre ambos túneles, las que aseguran que se materialice una estructura resistente y estable.

### **3.3.5.3 Bóveda del Túnel Estación y Entronque con la Galería Secundaria.**

La bóveda del túnel estación se construyó avanzando en dos frentes simultáneamente, que partieron desde el entronque de la galería principal. El proceso constructivo en ambos frentes es el mismo utilizado en la galería principal, sola que adaptado a las dimensiones del túnel estación.

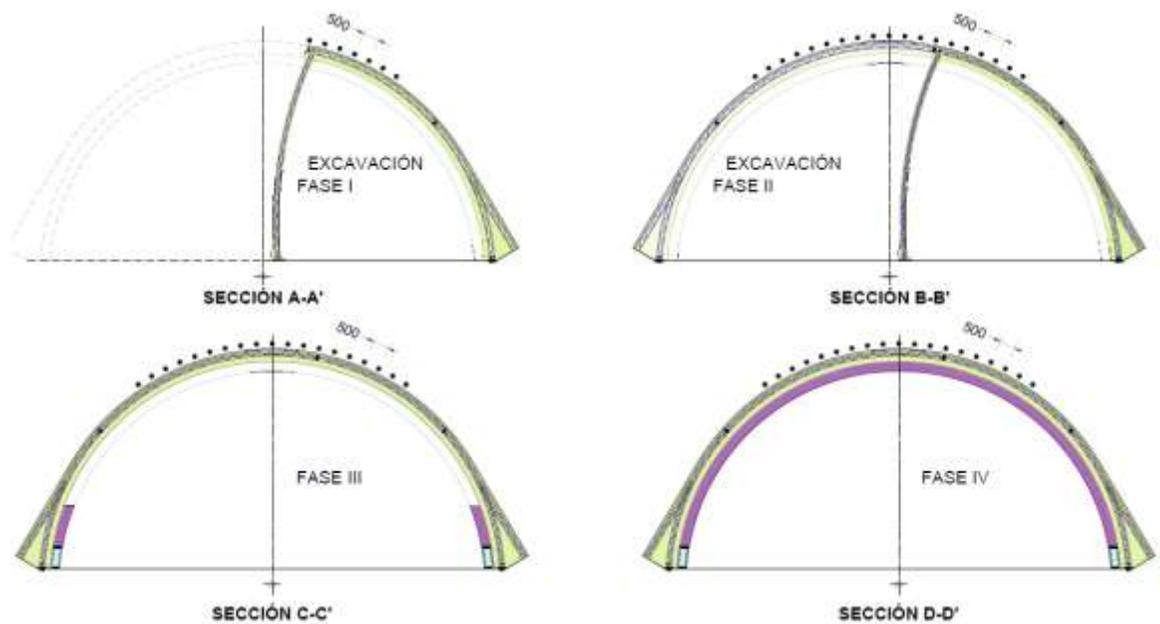


Figura 36: Proceso Constructivo de la Bóveda de la Galería Principal y del Túnel Estación - Secciones (Metro. 2013. A).

De forma análoga, el entronque entre el túnel estación y la galería secundaria se realizó bajo los mismos criterios explicados en la sección 3.3.5.2.

#### **3.3.5.4 Bóveda de la Galería Secundaria.**

Debido a que la Galería Secundaria posee dimensiones menores que las demás obras subterráneas, y en particular una anchura máxima de excavación de 13,31 m, se realizó la excavación de la bóveda en una sola fase, sin tener que construir el muro provisional.

#### **3.3.5.5 Construcción de los Bancos.**

Con respecto a la construcción de los bancos de las obras subterráneas, ésta se llevó a cabo siguiendo los siguientes principios:

- I. La excavación se realiza en un frente único y en avances de 1 a 2 m.
- II. Dentro del revestimiento primario se da continuidad a los marcos metálicos colocados en el revestimiento primario de la bóveda.
- III. En los entronques se da continuidad vertical al poyo de las patas de elefante del revestimiento de la bóveda.

En la figura 38 se observan las secciones del banco ya excavadas y con continuidad en el revestimiento y en los marcos metálicos.

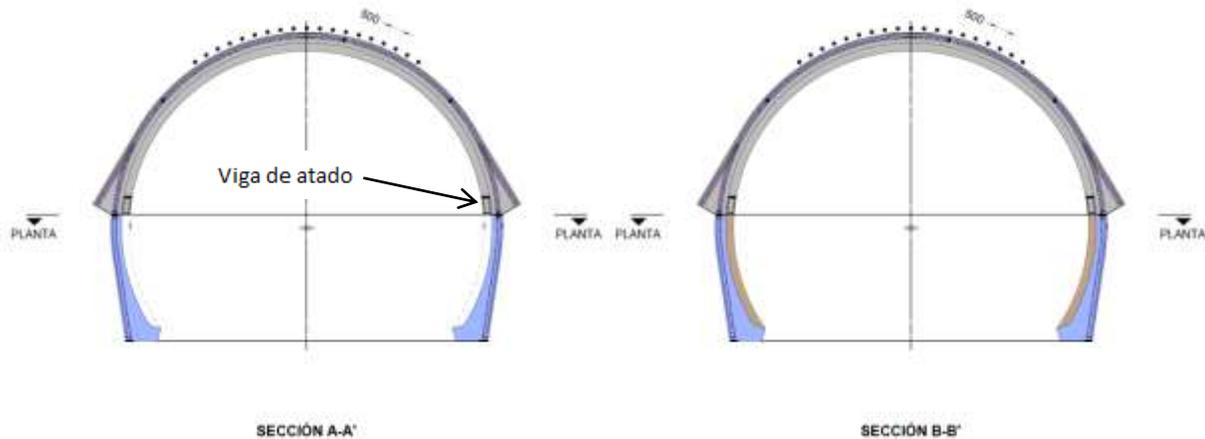


Figura 37: Esquema de Secciones con Banco excavado de la Galería Principal (Metro. 2013. A).

### 3.3.5.6 Estocadas del Túnel Interestación.

Las estocadas del túnel interestación son tramos de 9 m de longitud, y siguen el mismo proceso constructivo que el del túnel interestación mismo, el cual será explicado a continuación.

El procedimiento que se utilizaba hasta antes del comienzo de este proyecto para la construcción de los túneles interestación consistía en excavar el suelo a sección completa, llevando un contrafuerte o núcleo de soporte en el frente para su estabilización, lo que es característico en secciones de “túneles pequeños” (figura 4, Capítulo 2).

En esta ocasión, para mejorar los rendimientos y la movilidad de la maquinaria, el proyectista propuso seguir excavando a sección completa, pero sustituyendo el contrafuerte por un paraguas pesado de extensión limitada a una parte del perímetro de la bóveda, el que permitiría controlar la evolución hacia el exterior de cualquier sobre-excavación que pueda formarse en la clave del túnel (figura 39).

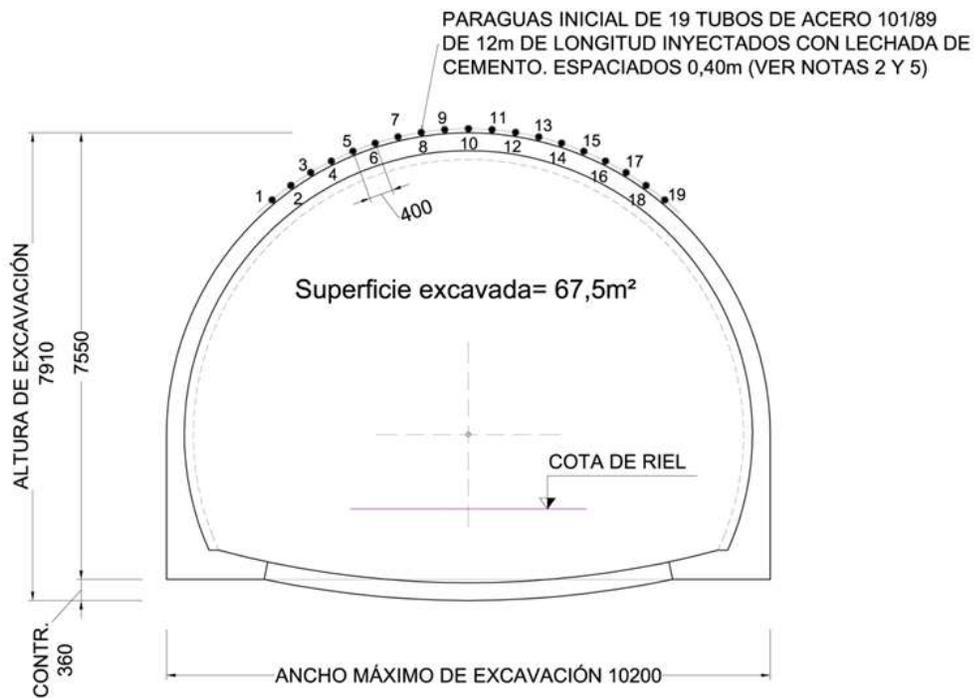


Figura 38: Sección Transversal del Túnel Interestación (Metro. 2013. A).

En la figura 39 se aprecia la disposición del único paraguas pesado, el que está constituido por 19 tubos de acero de 12 metros de longitud, idénticos a los colocados en el Túnel Estación.

Los avances de esta excavación son de 1 metro, distancia a la cual se colocan también los marcos metálicos.

El revestimiento primario del túnel interestación está integrado por los siguientes elementos:

- Capa de sello de 5 cm de hormigón proyectado H35, en el contorno de la excavación y, a criterio de la supervisión de obra.
- Primera malla electro-soldada.
- Marcos metálicos, cada 1 m.
- Primera capa de hormigón proyectado H35 de 15 cm de espesor.
- Segunda malla electro-soldada.
- Segunda capa de hormigón proyectado, de 10 cm de espesor.

El revestimiento secundario está constituido por una capa de 15 cm de espesor de hormigón proyectado H35.

Como es posible darse cuenta, las capas de hormigón proyectado son más delgadas en el túnel interestación.

### ***3.3.5.7 Contra-bóvedas y Radier Civil.***

Finalmente, las contra-bóvedas y radier civil de las obras subterráneas se ejecutan una vez finalizadas las estocadas del túnel interestación, es decir son la última tarea a realizar dentro de lo que son las obras civiles subterráneas de la estación.

Para comprobar la validez de este método propuesto, y de los beneficios que se obtienen, se implementó un intenso monitoreo de desplazamientos (Metro.2013. A). Este monitoreo, midió tanto la subsidencia (a nivel de superficie), como también la convergencia dentro del túnel, para así comparar los valores medidos con aquellos previstos en los cálculos. Este plan de monitoreo es descrito en el Capítulo 4 de éste trabajo.

En el Anexo A, se incluyen fotografías del proceso constructivo anteriormente explicado, aplicado a los túneles del Metro de Santiago.

### **3.4 Condiciones del Subsuelo: Caracterización y Perfil Estratigráfico de los Túneles Estudiados.**

Es esencial que cualquier proyecto de túneles comience con un estudio sobre las condiciones del terreno, el que permitirá definir de forma óptima la maquinaria necesaria, el método de excavación, los sostenimientos a ejecutar, y todos los parámetros necesarios para realizar un diseño seguro.

En esta sección se realiza un resumen del informe mecánica de suelos asociado a las obras en estudio (Metro. 2012. A). En particular, se describe la estratigrafía general de la zona, de acuerdo a las prospecciones realizadas.

Es importante mencionar que el conocimiento de las condiciones geológicas-geotécnicas de los piques y estaciones se basa prácticamente en la exploración realizada, por lo que cuanto más alejadas se encuentren las prospecciones de los lugares de interés, mayor será el grado de incertidumbre. Es por lo anterior, que en el informe de mecánica de suelos, se establece que aquellos piques que se sitúan a más de 200 metros de una prospección plantean incertidumbres estratigráficas relevantes, como es el caso de la Estación Cerrillos y el pique Avenida Dos. Sin embargo, en este mismo informe, se destaca que la estratigrafía del subsuelo de Santiago es bien conocida y que a grandes rasgos, queda bien definida a lo largo del trazado con las prospecciones realizadas (Metro. 2012. A).

#### **3.4.1 Unidades geotécnicas identificadas.**

En base a las exploraciones realizadas a lo largo de todo el trazado de la nueva, se identificaron las siguientes unidades geotécnicas (Metro. 2012. A):

- Rellenos antrópicos. Material heterogéneo a nivel superficial que con frecuencia no se diferencia del terreno natural en la descripción de las calicatas. Se considera la presencia de estos rellenos a nivel superficial a lo largo de todo el trazado de la Línea en estudio.
- Gravas fluviales de las depositaciones distales de los ríos Mapocho y Maipo. Se trata de gravas arenosas correspondientes a la primera y segunda depositación

de ambos sistemas fluviales. Cabe destacar que en gran parte de las calicatas del informe geotécnico original no queda bien definido el límite entre las dos depositaciones.

- Suelos finos limosos y arcillo-limosos. Suelos con plasticidad media a baja cuyo origen corresponde a depositaciones fluvio-lagunares.
- Niveles arenosos. Se constituyen por lentejones de arena limosa con grado de cementación variable. La aparición de niveles arenosos genera cierto grado de incertidumbre, ya que se trata de niveles discontinuos con distribución espacial variable, que pueden no haberse detectado en las calicatas.
- Niveles de arena limosa de origen volcánico (pumicitas). Se constituyen por lentejones de arena limosa con potencia inferior a 5 metros.

#### **3.4.2 Estratigrafía del Túnel Estación 1.**

- De 0 m a 1,2 m: Limo arenoso muy gravoso con estructura heterogénea, interpretado como relleno antrópico.
- De 1,2 m a 16 m: Gravas muy arenosas de la segunda depositación del Río Maipo.
- De 16 m a 25 m: Gravas arenosas con finos arcillosos de la primera depositación.

El nivel freático se encuentra por debajo de la cota rasante, por lo que no afecta a la excavación.

Las gravas de la segunda depositación del Río Maipo se caracterizan por tener un contenido de finos muy bajo, comprendido entre el 1% y el 6%, signo de que podrían existir problemas locales de estabilidad.

En la figura 41 se presenta en detalle el Perfil Estratigráfico Longitudinal proyectado del Túnel Estación 1. La tapada del terreno sobre la clave del túnel es de aproximadamente 11 metros.

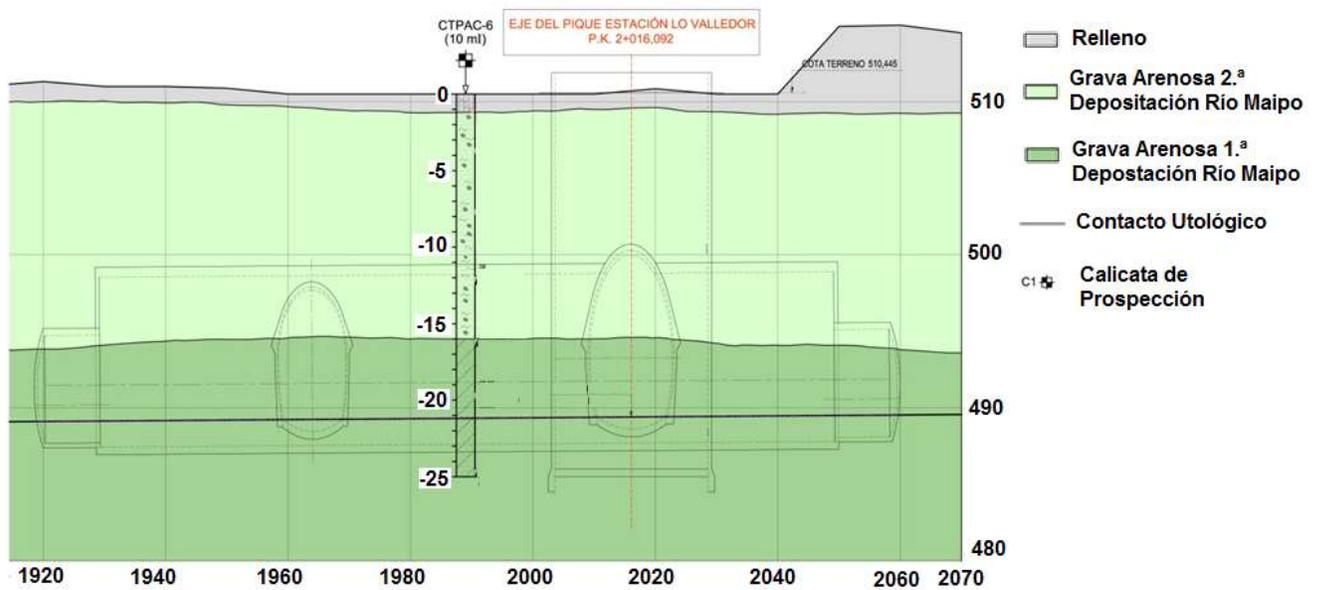


Figura 39: Perfil Estratigráfico del Túnel Estación 1 (Metro. 2013. A).

### 3.4.3 Estratigrafía del Túnel Estación 2.

- De 0 m a 1,5 m: Limo arenoso muy gravoso. Relleno antrópico.
- De 1,5 m a 16 m: Gravas arenosas de la segunda depositación del Río Maipo.
- De 16 m a 25 m: Gravas arenosas con finos arcillosos de la primera depositación del Río Maipo.

La calicata CTPAC-3, ubicada a 132 m del Túnel Estación 2, indica que las gravas de la segunda depositación del Río Maipo se caracterizan por tener un contenido de finos muy bajo, comprendido entre el 1% y el 4%, lo cual puede dar lugar a problemas locales de estabilidad.

En la figura 42 se presenta en detalle el Perfil Estratigráfico Longitudinal proyectado de la estación. La tapada del terreno sobre el túnel es de 11,16 metros.

El túnel interestación, el cual se encuentra entre estas dos estaciones, supone una estratigrafía similar a aquella presente en ambos sectores (Metro. 2013. B). Ésto se valida con la calicata realizada en el Pique Gil Letelier, el cual está ubicado en la mitad de del tramo entre las estaciones estudiadas.

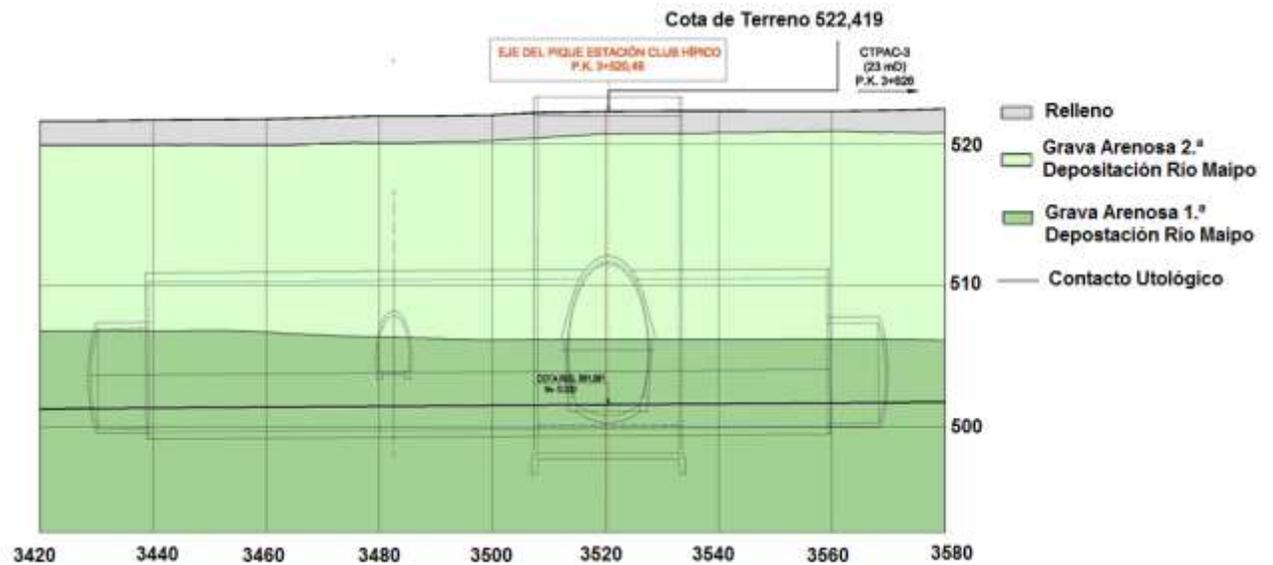


Figura 40: Perfil Estratigráfico del Túnel Estación 2 (Metro. 2013. B).

#### 3.4.4 Riesgos geológico-geotécnicos.

En el sector estudiado, las gravas asociadas al Río Maipo presentan un comportamiento geotécnico algo más desfavorable que las típicas Gravas de Santiago, asociadas al río Mapocho. Las Gravas de Santiago, tienen en general un porcentaje de finos de 3-5%, los que contribuyen a la cohesión del suelo. Por otro lado, las gravas de la primera y segunda depositación del Río Maipo (particularmente la segunda depositación) tienen un menor contenido de finos (1-3%), lo que origina un comportamiento inestable con tendencia a producir sobreexcavaciones. Se suele decir que estos últimos, son suelos “desgranables”, lo que implica utilizar medidas especiales de soporte, como pernos auto perforantes, paraguas de protección y reducción de avances de excavación (Gomes, A. (B). 2014)

En terreno, se encontraron gravas arenosas con intercalaciones de arcilla, en la primera depositación del Río Maipo, dentro de los límites de lo esperado. En el túnel estación 1, el contacto entre ambas estaciones estuvo en promedio a 2.6 metros de la clave del túnel, mientras que en el túnel estación 2, este fue de 3.6 metros.

En algunos sectores del túnel interestación se observó el contacto entre ambas depositaciones del Río Maipo en las cercanías de la clave del túnel, lo que no se esperaba.

## **4 Plan de Instrumentación y Monitoreo Geotécnico de las Obras Subterráneas en estudio.**

En este capítulo se presentan las especificaciones técnicas generales y particulares del plan de instrumentación y monitoreo que el proyectista (Supervisión de Obra también) propuso para la construcción de las obras subterráneas en estudio.

Estas especificaciones establecen los requerimiento mínimos de monitoreo previstos en el diseño de las excavaciones subterráneas. Asimismo, especifica las frecuencias mínimas de medición, los instantes de toma de lectura de los elementos, la tipología y calidad, como también su forma de instalación, control geométrico y topográfico, y cualquier actividad relacionada con el monitoreo de los túneles.

### **4.1.1 Objetivos.**

El objetivo principal definido en el plan de instrumentación y monitoreo es “controlar los movimientos de las obras en ejecución para la verificación de las hipótesis y resultados de cálculo adoptados en el diseño y para el aseguramiento de la seguridad de la construcción” (Metro. 2012. B). Dado lo anterior, los resultados del monitoreo deben proveer la información necesaria para confirmas la integridad y estabilidad de las estructuras y edificaciones en inmediaciones de la obra (Metro. 2012. B).

Adicionalmente se menciona que, en proyectos de túneles urbanos con tapadas reducidas, las mediciones obtenidas a través del monitoreo son de particular importancia para la evaluación de los siguientes aspectos (Metro. 2012. B):

- Confirmar la función portante del suelo que se ubica alrededor del túnel y del sostenimiento que se ha diseñado.
- Validar el método y la secuencia de ejecución de la excavación y revestimiento, comprobando los objetivos de asentamientos previstos en el proyecto.
- Comprobar la necesidad de colocar elementos adicionales en el revestimiento del túnel.

- Comprobar que los desplazamientos convergen a un valor asintótico, y en caso contrario poder tomar las medidas necesarias para poder garantizar la estabilidad del túnel.
- Herramienta para la representación de la evolución de los desplazamientos y asentamientos en terreno a largo plazo, como instrumento de prueba y para el juicio acerca de la garantía de la estabilidad de las estructuras construidas.

Para cumplir los objetivos y aspectos mencionados anteriormente, se definieron “Secciones de Monitoreo”, sobre las que se instaló un conjunto de elementos de medición de desplazamientos, tanto al interior del túnel como en la superficie, lo que se distinguirá en las siguientes secciones.

#### **4.1.2 Variables y Dispositivos de Medición.**

Las variables que fueron controladas en las distintas secciones de monitoreo, en conjunto con los dispositivos que se utilizaron para medir cada una de ellas se presentan a continuación:

1. Movimientos verticales del terreno:
  - a. En superficie (Subsistencia): Hitos de Nivelación Superficial (HNS).
  - b. En profundidad: Hitos de Nivelación Profunda (HNP).
2. Movimientos de Estructuras y Edificios: Prismas de Nivelación.
3. Convergencias:
  - a. Absolutas: Monitoreo Geodésico tridimensional (PCO)
  - b. Relativas: Cinta extensométrica de invar con dispositivos de tensionado automático (PCC: Puntos de Convergencias con Cinta).

#### **4.1.3 Plan de Instrumentación y Monitoreo para la Medición de Convergencias.**

Como se vio en la sección anterior, las medidas de convergencia de las obras subterráneas fueron registradas a través de un método de monitoreo de desplazamientos absolutos en tres dimensiones, sobre la base de un sistema espacial de coordenadas. Complementariamente, se utilizó cinta extensométrica de invar con dispositivo de tensionado automático, la cual tiene una precisión de 0,1 milímetros.

#### **4.1.3.1 Características y Requerimientos Generales para la medición de Convergencias (Metro. 2012. B).**

- Asegurar protección de los puntos de control.
- Lectura 0 de cada punto de control, efectuada inmediatamente después de la instalación del dispositivo o "tan pronto como sea posible, en función de consideraciones prácticas" (Metro. 2012. B). Distancia al frente referente a esta lectura, no superior a 5m. La medición 0 sería el resultado de al menos dos operaciones de lectura independientes que arrojasen resultados consistentes.
- Ejecución de mediciones de monitoreo con la frecuencia especificada.
- Mantener instrumentos calibrados y según recomendaciones de fabricante.
- Realizar mediciones mediante una estación total, con una precisión de 0,3mgon para mediciones de ángulos y 0,5mm para mediciones de distancia.
- Puntos de control materializados mediante miras topográficas, ya sea mediante láminas de reflexión.
- Utilización de prismas ópticos para puntos fijos de referencia.
- Determinación de desplazamientos en un sistema de coordenadas absoluto con una precisión de 0,5mm. (2mm en referencia Metro. 2013. A).
- Compensación de anomalías de refracción y de otros errores de medición detectados durante la toma de lectura.
- Realización de ensayos de aptitud y funcionamiento del sistema de medición por parte de la Unidad de Monitoreo.
- Utilización de un sistema computacional eficaz en la manipulación y administración y almacenamiento de los datos de monitoreo.

#### **4.1.3.2 Dispositivos de Medición Utilizados.**

a. Se utilizó una estación total modelo Leica TM30 (figura 18, Sección 2.4.1). Este dispositivo tiene la capacidad de almacenar información, de calcular coordenadas espaciales y de corregir errores de no ortogonalidad de ejes, entre otras cualidades. Las miras que se utilizaron dentro de las obras subterráneas son de tipo BIRREFLEX (sección 2.4.1.1.1, figura 18a), las que poseen cinta reflectante.

Las precisiones (desviaciones estándar ISO 17123) de la estación total son las siguientes.

- Medición de ángulos (Hz y V): 1" (0,3 mgon).
- Medición de distancias con el dispositivo EDM:
  - Prismas:
    - Modo Preciso: 0,6mm + 1ppm (demora: 7 segundos).
    - Modo Estándar: 1mm + 1ppm (demora: 2,4 segundos).
    - Modo rápido: 3mm + 1ppm (demora: 0,8 segundos).
    - Modo Promedio: 1mm + 1ppm
  - Diana reflectante (BIRREFLEX):
    - Modos Preciso/Normal/Promedio: 1mm + 1ppm.

b. La cinta extensométrica (figura 43) tiene una precisión de 0,01 milímetros.



Figura 41: Cinta Extensométrica de invar (web).

#### 4.1.3.3 Frecuencias de Medición.

La frecuencia inicial propuesta fue una lectura diaria, debiéndose mantener la misma hasta que se cumplieran los criterios para reducir la frecuencia. En el cuadro siguiente se presentan aquellos criterios:

Distancia al frente	Velocidad de convergencia (mm/día)	Frecuencia
<2 Diámetros	Vel. >5	Cada 12 horas
	Vel. < 5	Diaria
>2 Diámetros	Vel. >1	Cada 12 horas
	1>Vel.>0,5	Diaria
	0,5>Vel. >0,2	Dos por semana
	0,2>Vel.>0,1	Semanal
	0,1>Vel.>0,05	Dos por mes
	0,05>Vel.>0,01	Mensual

Cuadro 2: Criterios de definición de Frecuencia para las mediciones de Convergencia (Metro. 2013. C).

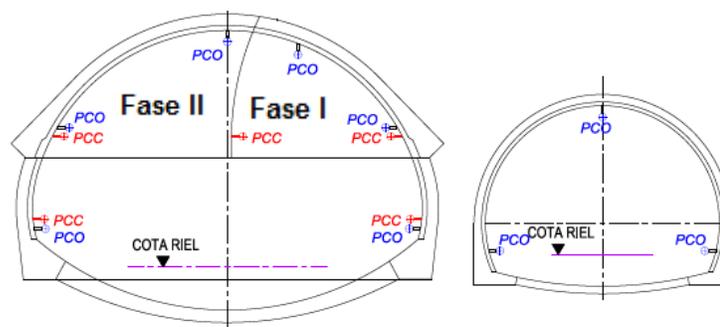
Para reducir la frecuencia de toma de medidas, se debía cumplir el criterio del siguiente nivel por lo menos en dos medidas. Cualquier incidencia en las medidas que provocase un cambio brusco en la tendencia de cualquiera de las magnitudes de las secciones controlada, supondría que la siguiente lectura debía realizarse con frecuencia diaria (Metro. 2013. C).

Independiente de lo anterior, se estableció que las frecuencias podían ser ajustadas a condiciones particulares no previsibles durante el diseño. Estos ajustes lo realizaría la SDO, en conjunto con la ITO.

#### **4.1.3.4 Disposición Espacial de los Puntos de Control de Convergencia.**

Las secciones de convergencia de los túneles estación e interestación se ubican a distancias de 10 m y 20 m respectivamente.

En los túneles estación están constituidas por 5 puntos de convergencia, 2 de ellos colocados a una altura de 1,5 m del piso de la excavación de la bóveda, otros 2 a 1,5 m del piso del banco y el ultimo ubicado en la clave del túnel estación. Cada uno de los 4 primeros puntos de referencia mencionados tiene un espejo reflectante (PCO: Punto de Convergencia Óptica), para poder realizar mediciones geodésicas, y una argolla para la medición de convergencias horizontales mediante cinta extensométrica (PCC: Punto de Convergencia de medición con Cinta) (figura 44). Mientras que en los túneles interestación, hay solo 3 puntos de control. Cabe destacar que inicialmente se propuso medir descenso de la clave tanto en la Fase I, como en la clave central del túnel, pero finalmente solo se trabajó con el PCO ubicado en el centro de la clave.



**Figura 42: Secciones de Convergencia de los túneles Estación (izquierda) e Interestación (derecha) (Metro. 2013. D).**

La vista en planta de estas secciones se presenta en las figuras 46, 47 y 48 de la sección 4.1.4.4, en conjunto con la disposición de los HNS y HNP.

#### **4.1.4 Plan de Instrumentación y Monitoreo para las mediciones de Subsistencia.**

Los hitos de nivelación se usaron para conocer la evolución de las curvas de subsistencia transversal y longitudinal del terreno debido a las excavaciones.

##### **4.1.4.1 Características y Requerimientos Generales para las mediciones de Subsistencia (Metro. 2012. B).**

Complementando aquellos requerimientos (aplicables a estas mediciones) mencionados en la sección 4.1.3, se propuso lo siguiente:

- Efectuar instalación y lectura “cero” de los dispositivos, antes de que el frente llegue a la sección observada. Como referencia, antes de que la distancia al frente sea de 3 veces el diámetro del túnel.
- Realizar medidas mediante un equipo topográfico con una apreciación de 0,1mm y una precisión
- Asegurar una debida protección de los hitos de nivelación, y una distancia entre HNS y HNP, de 0,5m.
- Mediciones y operaciones de los equipos, instrumentos y dispositivos, realizadas por la misma empresa especialista (Unidad de Monitoreo), entidad dependiente del mandante.
- Variables que identifiquen la lectura, así como las condiciones de terreno que puedan afectar las mediciones, como temperatura, humedad y progresión del frente de excavación entre otras, documentadas por Unidad de Monitoreo.

##### **4.1.4.2 Dispositivos de Medición Utilizados.**

Para realizar las mediciones la Unidad de Monitoreo utilizó un nivel electrónico modelo Leica DNA10 (figura 45), en conjunto con miras tipo Invar. El rango de medición de distancias, es desde 1.8 metros a 60 metros para nivelaciones de alta precisión. Este nivel electrónico realiza correcciones del error de colimación de forma automática y

posee la opción de corregir también la curvatura terrestre. Las precisiones de dicho dispositivo se presentan en la figura 45.

<b>Mediciones de Altura</b>		
Desviación Estandar por Nivelacion Doble de 1 kilometro (ISO 17123-2):		
Medicion Electrónica		
con mira Invar	0.9mm	
con mira etandar	1.5mm	
Medición Óptica	2.0mm	
<b>Mediciones de Distancia</b>		
Desviación Estandar	5mm/10m	
<b>Compensador</b>		
Desviación Estandar (presición de centrado)	0.8"	

Figura 43: Precisiones Instrumentales del Nivel Electrónico Leica DNA 10 (Leica).

#### 4.1.4.3 Frecuencias de Medición.

Siguiendo la misma metodología que la del monitoreo de convergencia, el proyectista (o SDO) estableció los siguientes criterios de definición de frecuencia, para las mediciones de subsidencia.

Distancia al frente	Velocidad de asentamiento (mm/día)	Frecuencia
<2 Diámetros	Vel. >5	Cada 12 horas
	Vel. < 5	Diaría
>2 Diámetros	Vel.>1	Diaría
	Vel. < 1	Dos por semana
	Vel. < 0,5	Semanal
	Vel. < 0,2	Dos al mes
	Vel. < 0,1	Mensual

Cuadro 3: Criterios de definición de Frecuencia para las mediciones de Subsidencia (Metro. 2013. C).

#### 4.1.5 Disposición espacial en planta de los Hitos de Nivelación y Secciones de Convergencia.

En los túneles estación, las secciones de monitoreo superficial fueron ubicadas, como regla general, cada 15 metros aproximadamente. Adicionalmente, los hitos de nivelación se ubicaron en zonas establecidas como críticas, con respecto a la

estabilidad de las excavaciones. Estas zonas vienen definidas por el diseño computacional de las obras subterráneas.

En las figuras 46 y 47 se observan vistas en planta de los túneles estación en estudio, con la ubicación de las distintas secciones de monitoreo. Estas se designan mediante el número del kilometraje acumulado (PK) del trazado de la línea.

#### 4.1.5.1.1 Túnel Estación 1.

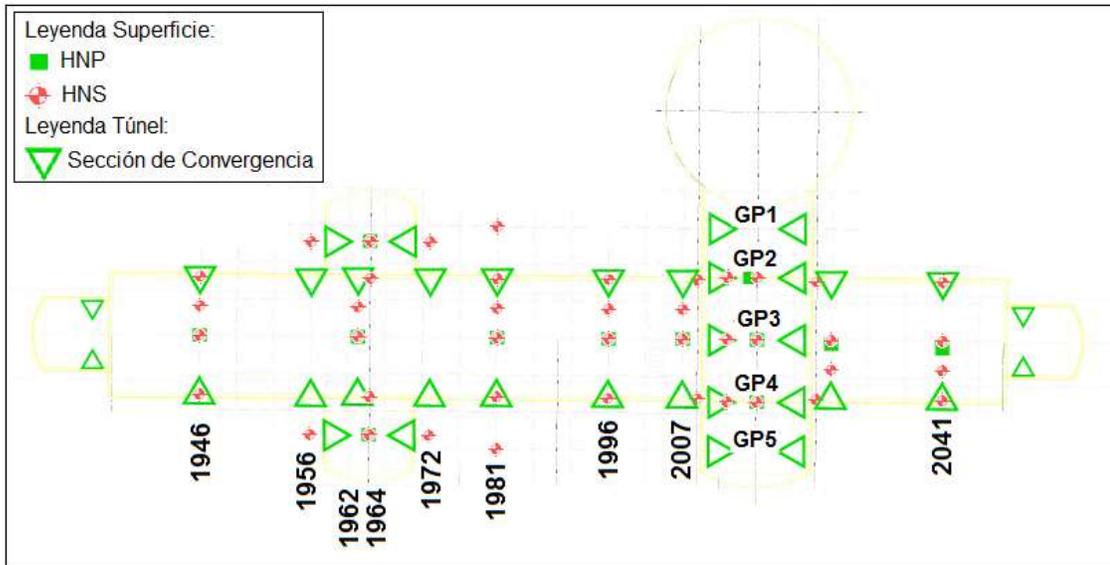


Figura 44: Disposición Espacial de las Secciones de Convergencia y Subsidencia. Túnel Estación 1.

#### 4.1.5.1.2 Túnel Estación 2.

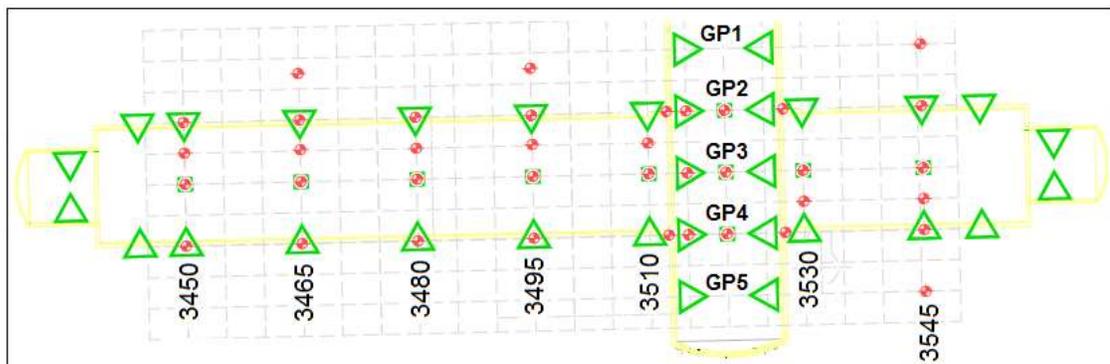


Figura 45: Disposición Espacial de las Secciones de Convergencia y Subsidencia. Túnel Estación 2.

En los túneles interestación, a lo largo de su eje central, se instalaron secciones de monitoreo superficial cada 200 metros aproximadamente y en puntos de interés (críticos), como estocadas para marina o ventilación, puntos singulares o aquellos que

el proyectista (o SDO) considerase importantes. Cabe destacar que las secciones de monitoreo en estos túneles solo poseen Hitos de Nivelación Superficiales.

En la figura 48 se pueden observar las secciones de monitoreo del túnel interestación, con excepción de aquellas que pertenecen al Pique Gil Letelier.

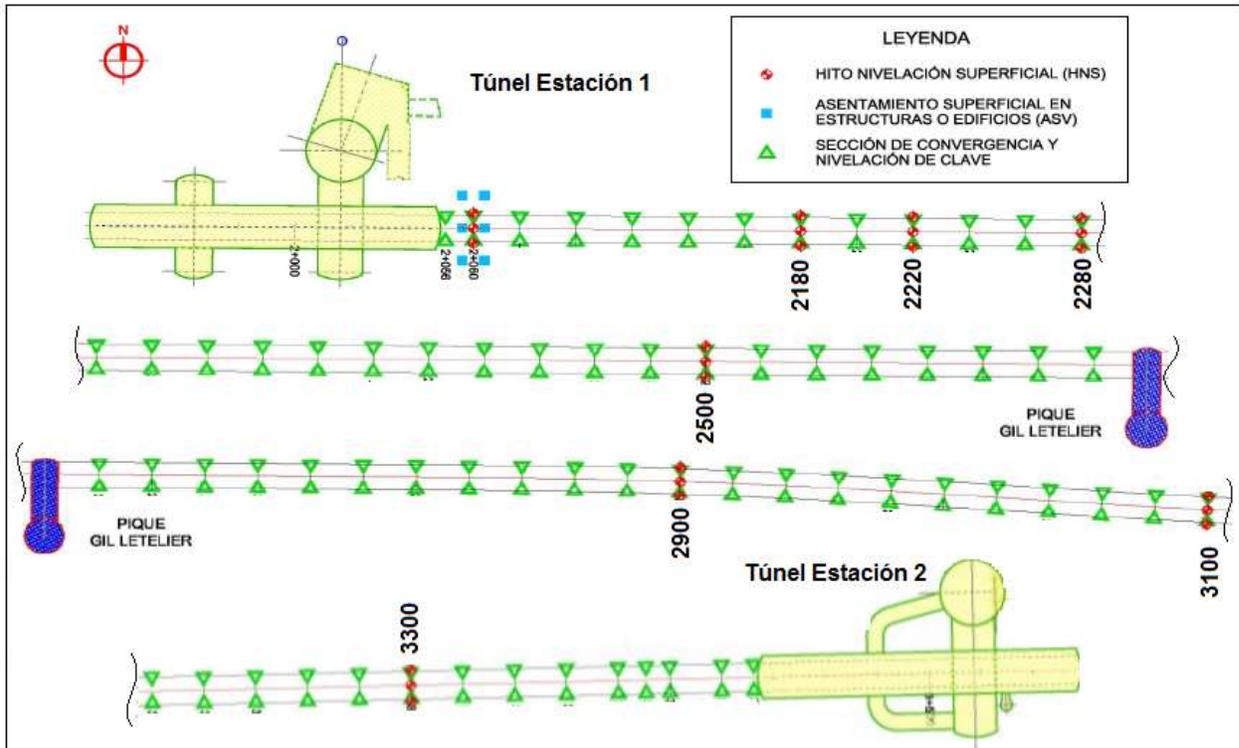


Figura 46: Disposición Espacial de las Secciones de Monitoreo. Túnel Interestación (elaboración propia).

En el Anexo A se incluyen fotografías de algunas de las secciones de monitoreo observadas en terreno, y en el Anexo B se adjuntan los planos originales, con los detalles de instalación de los hitos de nivelación y de las secciones de convergencia.

#### 4.1.6 Valores Umbrales de Control.

Los valores umbrales corresponden a los valores establecidos por el proyectista de los túneles de acuerdo a los resultados obtenidos en la modelación computacional de las obras subterráneas (Metro.2012.B). Aquellos valores correspondientes a los túneles estudiados, se presentan en el cuadro 7.

Con respecto al cuadro 7, la SDO designa como “convergencia” a aquellos valores obtenidos por la medición con cinta extensométrica. El desplazamiento lateral y el descenso de la clave son aquellos valores obtenidos del monitoreo geodésico.

Línea en Estudio		Valores Umbrales de Control							
		Convergencia (mm)		Desp. Lateral (mm)		Descenso Clave (mm)		Subsistencia (mm)	
Obra	Tipo	Alerta	Alarma	Alerta	Alarma	Alerta	Alarma	Alerta	Alarma
T.E 1	GP. Túnel Estación y GS	10	15	8	11	55	65	50	55
Pique Gil Letelier	Galería y Túnel Interestación	10	15	8	11	25	30	25	30
T.E 2	GP. Túnel Estación y GS	10	15	8	11	45	55	50	55

**Cuadro 4: Valores Umbrales de Control de las Obras Subterráneas (Contacto SDO).**

NIVEL	VALOR UMBRAL	ACTUACIÓN
VERDE	Medida < 75% del previsto	Frecuencia de toma de medidas según criterios de velocidad
ÁMBAR	Medidas comprendidas entre el 75% y el 125% de los valores previstos.	<p><b>Si la Aceleración instantánea es negativa:</b> aplicar criterios de velocidad para determinar la frecuencia de medidas</p> <p>Si la Aceleración instantánea es positiva:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Medir cada 12 horas.</li> <li>▪ Análisis específico de la situación</li> <li>▪ Colocación de instrumentación suplementaria</li> </ul>
ROJO	Medidas > 125% Previsto	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Análisis de la necesidad de medidas correctoras o de protección.</li> <li>▪ Revisar el procedimiento constructivo.</li> </ul>

**Cuadro 5: Niveles de Alerta y actuaciones previstas (Metro.2013.C).**

Se establecieron distintos niveles de alerta de acuerdo a la comparación entre los valores umbrales de control con aquellos obtenidos por el monitoreo. Estos niveles se definen en el cuadro 8, en conjunto con las acciones a realizar en caso de alcanzarlos.

Cabe destacar, que se estableció que estos criterios no se debieran aplicar a valores de desplazamiento inferiores a 5 milímetros, “dado que los errores de medición pueden provocar alarmas innecesarias e infundadas” (Metro. 2013. C).

#### 4.1.7 Valores admisibles en Edificaciones y Estructuras.

La presencia de edificaciones u otras infraestructuras en las proximidades de la excavación de un túnel implica analizar los posibles efectos y consecuencias de las subsidencias originadas por la obra ejecutada.

Es por lo anterior que la SDO, en base a una amplia referencia normativa y recopilaciones de distintos autores, referente a asentamientos máximos y diferenciales admisibles, propuso utilizar los siguientes valores admisibles, para efectos de estudios de afección a edificios y puntos singulares importantes.

Umbral de control	Asiento admisible (mm)			Distorsión angular			Deformación horizontal unitaria (%)		
	Verde	Ámbar	Rojó	Verde	Ámbar	Rojó	Verde	Ámbar	Rojó
Zonas sin edificaciones	< 50	50 a 100	> 100	< 1/100	1/100 a 1/50	> 1/50	< 1,5	1,5 a 2,0	> 2,0
Edificios cimentados profundos o con losa, en buen estado. Conducciones no de gas.	< 20	20 a 30	> 30	< 1/1000	1/1000 a 1/500	> 1/500	< 0,15	0,15 a 0,20	> 0,20
Estructura subterránea o túneles existentes.	< 15	15 a 25	> 25	< 1/2000	1/2000 a 1/1000	> 1/1000	< 0,15	0,15 a 0,20	> 0,20
Edificios cimentados superficialmente, sin daños aparentes	< 10	10 a 15	> 15	< 1/2000	1/2000 a 1/1000	> 1/1000	< 0,15	0,15 a 0,20	> 0,20
Edificios cimentados superficialmente con daños. Edificios monumentales. Edificios con más de 10 alturas. Tuberías de gas	< 5	5 a 10	> 10	< 1/3000	1/3000 a 1/2000	> 1/2000	< 0,05	0,05 a 0,10	> 0,10
Túneles existentes	Asiento o levantamiento: 10 mm/10 m								

**Cuadro 6: Valores admisibles de Asentamientos y Distorsiones Angulares (Metro. 2013. E).**

Se establece que esta clasificación se considera conservadora y tiene un carácter orientativo, estando encaminada, en su caso, a la ejecución de actuaciones preventivas de refuerzo o de tratamientos de mejora del terreno para garantizar que, en ningún caso, se excederán los umbrales de control (Metro. 2013. E).

#### **4.1.8 Almacenamiento y Administración de los Datos de Monitoreo.**

Para asegurar una rápida y eficaz gestión del monitoreo se exigió la utilización de un software computacional para el almacenamiento de los datos.

La SDO puso a disposición un sistema que ellos mismo desarrollaron llamado “Electronic Convergence (e-CONV)”, el cual, como su nombre lo indica, está enfocado al análisis de las convergencias. Las magnitudes que fueron almacenadas y administradas a través de este programa son las convergencias medidas con cinta extensométrica y las mediciones geodésicas subterráneas obtenidas por la Unidad de Monitoreo (contacto SDO).

Lo que hace este programa es que, una vez introducidos los datos, se consigue una automatización del estado de los frentes, obteniendo así de manera fácil y rápida informes de estado (nivel de alerta por ejemplo) de cada una de las secciones de los túneles, en función de los parámetros de diseño y de los umbrales de control establecidos. Los informes de estado se pueden enviar de manera automática a aquellas personas autorizadas. Adicionalmente, se utiliza para gestionar las frecuencias con que se deben realizar las mediciones, teniendo presente la velocidad de convergencia (instantánea y a origen), aceleración, distancia al frente, razón de convergencia y tiempo entre otras variables. En el caso en que el programa detecte que alguna sección no se mide con la frecuencia requerida según su nivel de alerta, se emiten mensajes de alerta (contacto SDO). Además tiene la capacidad de presentar los resultados del monitoreo de forma gráfica. Inclusive, si fuese el caso, puede adecuarse a un sistema de recolección de datos automático o directamente a través de dispositivos móviles.

Complementariamente, la Unidad de Monitoreo puso a disposición un software llamado Kronos, mediante el cual se puede ir viendo el estado general de la obra y con el cual se analizaban y presentaban los resultados del monitoreo de subsidencias (contacto SDO).

#### 4.1.9 Responsabilidades.

Para finalizar este capítulo, se confeccionó un cuadro en donde se representan las responsabilidades que tienen las entidades que tienen algún grado de participación dentro del proyecto de instrumentación y monitoreo. Si la entidad tiene un punto negro en la casilla significa que es la principal responsable, mientras que si tiene uno sin rellenar, significa que participa en dicha tarea de manera auxiliar o secundaria.

Tarea	Entidad Responsable				
	Mandante	SDO	ITO	Unidad de Monitoreo	Contratista
Elaboración del Plan de I&M		•			
Suministro de Instrumentos y elementos de Monitoreo			○	•	
Instalación de Instrumentos y Elementos de Monitoreo				○	•
Dar continuidad a los pernos y/o puntos de convergencia tras colocación de capas de revestimiento.				○	•
Proveer Personal para Instalación de Elementos de Monitoreo.					•
Mantenimiento y Protección Instrumentos y Elementos de Monitoreo					•
Materializar Modificaciones de ubicación y/o Cantidad de Secciones			○	○	•
Garantizar las condiciones de trabajo para la Unidad de Monitoreo					•
Realizar las mediciones con las frecuencias especificadas				•	
Procesar, evaluar, administrar y presentar los datos		•		•	
Mantener Instrumentos calibrados y según recomendaciones de Fabricante.				•	
Propuesta sobre procedimientos de ensayos de aptitud, funcionamientos y calibración de Instrumentos.				•	
Recibir y Analizar diariamente información emitida por la Unidad de Monitoreo		•	•		•
Coordinar Trabajo entre Unidad de Monitoreo y Contratista			•		
Interpretación y Análisis de los datos de Monitoreo.		•			

**Cuadro 7: Cuadro de responsabilidades del Proyecto de Instrumentación y Monitoreo (elaboración propia).**

## **5 Resultados Obtenidos por el Monitoreo.**

A continuación se presentan los resultados más representativos obtenidos por el monitoreo geodésico de los túneles en estudio. En primera instancia se muestran los resultados del monitoreo superficial y sub-superficial de subsidencias, y a continuación, aquellos obtenidos por el monitoreo subterráneo de convergencias, en particular, del descenso de la clave del túnel.

### **5.1 Monitoreo de Subsidencias.**

La subsidencia fue graficada de dos formas. La primera de ellas y la más importante; es la típica curva de desplazamiento versus tiempo, la cual tiene como objetivo conocer la evolución temporal de las subsidencias frente a las distintas etapas constructivas. Lo anterior, a lo largo del eje longitudinal del túnel. La segunda es el desplazamiento máximo con respecto a la distancia transversal al eje del túnel, con el fin de identificar cubetas transversales.

#### **5.1.1 Evolución de la Subsidencia en el tiempo.**

Las curvas que se muestran a continuación ilustran la evolución de la subsidencia con respecto al tiempo. En los gráficos, se pueden observar tres ejes distintos. El eje horizontal representa el tiempo en días. El eje vertical izquierdo representa la subsidencia en milímetros, lo que genera las curvas de asentamiento (líneas segmentadas), mientras que el eje derecho representa el avance del túnel correspondiente a la sección observada, lo que genera las curvas de avance (líneas continuas). El día 1 de cada grafico representa el día en que se comenzó a excavar el túnel, por lo que cada obra subterránea (túnel estación poniente u oriente, galería principal y galería secundaria) tiene un set de gráficos con ejes horizontales idénticos. En cada grafico se advierten los hitos constructivos más importantes. Adicionalmente, debajo de cada grafico se ilustran la frecuencia con que fueron ejecutadas las mediciones de subsidencia de la sección observada. Cabe destacar que se decidió no escalar los gráficos de igual forma, con tal de poder observar con más detalle las curvas.

5.1.1.1 Túnel Estación 1.

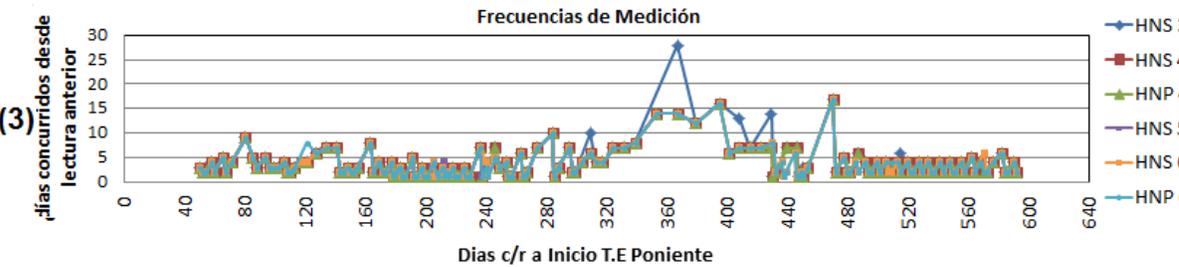
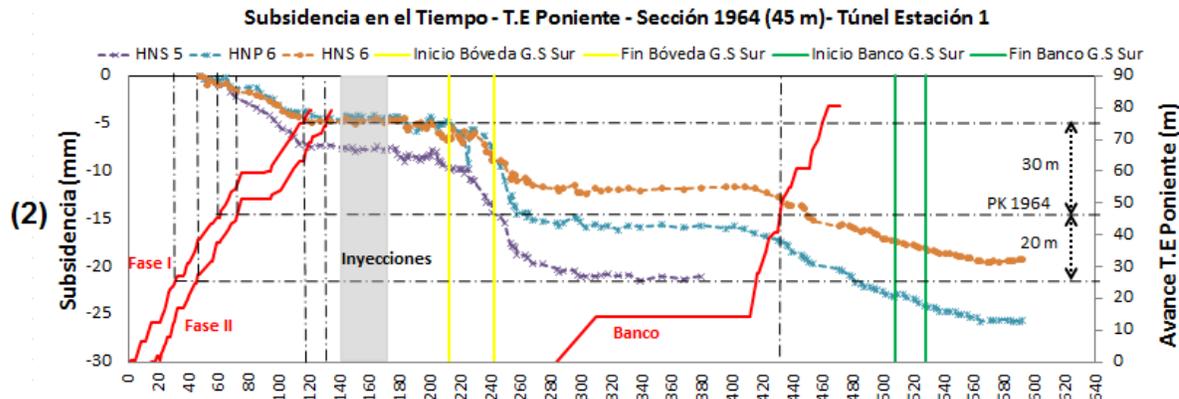
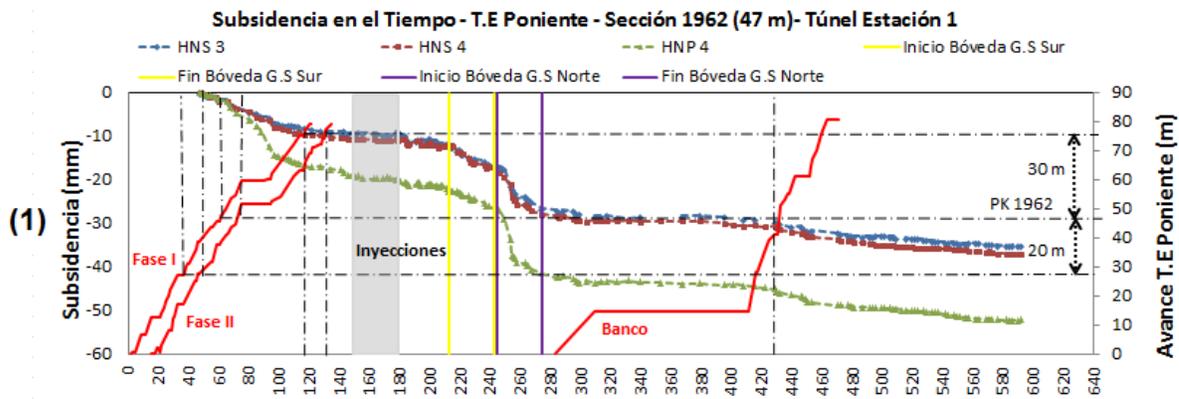
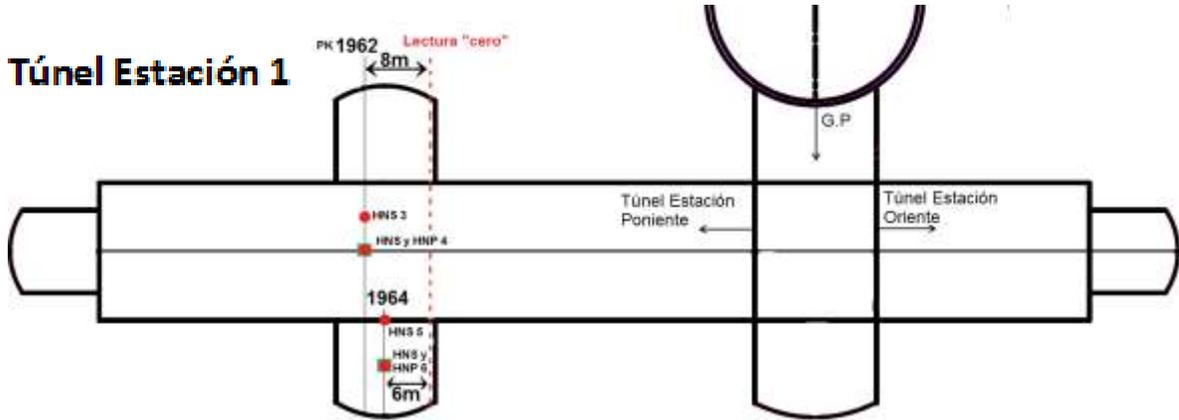


Figura 47: Resultados del Monitoreo de Subsistencia. Túnel Estación 1. Túnel Estación Poniente. Secciones 1962 y 1964 (Galería Secundaria).

En la figura 49 se presentan los resultados del monitoreo de subsidencias de las secciones adyacentes 1962 (HNS 3, HNS 4 y HNP 4) y 1964 (HNS 5, HNS 6 y HNP 6). Los valores umbrales de control para el Túnel Estación 1 son de 50 milímetros para el nivel de alerta y 55 milímetros para el nivel de alarma, y son aplicados a los HNS.

En la parte superior de la figura se muestra un esquema del túnel con las ubicación de las secciones de monitoreo que se analizan. En el mismo esquema, es posible observar la distancia al frente de excavación con que fue realizada la lectura “cero”, la que en este caso es de 8 metros (línea punteada roja).

Posteriormente, en el grafico (1) es posible observar la evolución de la subsidencia de los hitos de nivelación de la sección 1962. Las líneas rectas segmentadas de color negro ayudan a distinguir los niveles de subsidencia cuando las distintas fases de excavación están a 20 metros delante de la sección, cuando están sobre la sección y cuando están a 30 metros por detrás. La historia de desplazamiento tiene una duración de 550 días (18 meses) aproximadamente. En este grafico es posible distinguir distintos períodos de desplazamiento (observables en los tres hitos de nivelación), en base a las distintas pendientes que presentan las curvas. No se logra observar un período inicial de subsidencias con pendiente nula, que confirme un registro completo de la historia de desplazamientos, si no que más bien se observa una pendiente (-0,14 mm/día), inmediatamente después de la lectura “cero”. Cuando los frentes de excavación de Fase I y II llegan a la sección analizada (intersección de la línea recta segmentada negra del medio con las curvas de avance) es posible apreciar un aumento drástico de la pendiente de las curvas, alcanzando valores de -0,5 mm/día y -0,68 mm/día para los HNS y HNP respectivamente, en particular para la llegada de la Fase II. Esta pendiente se estabiliza cuando estos frentes ya están a 30 metros por detrás. Esta primera etapa de se presenta durante aproximadamente los primeros 100 días, y constituye un descenso de -10 milímetros para los HNS 3 y 4 (27% del desplazamiento total máximo) y de -17,17 milímetros (32% del desplazamiento total máximo) para el HNP. Luego se observa un período de pendientes nulas, durante 90 días aproximadamente, período durante el cual no se realizaron avances en las excavaciones y en el que se efectuaron las inyecciones (horizonte de color gris) con el

objetivo de mejorar la calidad el suelo y rellenar posibles vacíos producidos por sobreexcavaciones accidentales. Posterior a esto, entre los días 212 (15/07/14) y 274 (15/09/14) se realizaron las excavaciones en fase de Bóveda de la Galería Secundaria Sur (entre las rectas verticales amarillas) y Norte (entre las rectas verticales moradas). Estas fueron excavadas en una sola fase, (sección 3.4, Capítulo 3), período que viene marcado por aumentos de pendiente importantes, particularmente para el caso de la Galería Secundaria Norte, el cual presenta pendientes de -0,7 mm/día para los HNS y de -1,3 mm/día para los HNP, y constituye un desplazamiento de -18,68 milímetros (50% del desplazamiento total máximo) para los HNS y de -22,3 milímetros (43% del desplazamiento total máximo) para los HN P. Finalizando las etapas anteriores se observa un período de estabilización, caracterizado por una pendiente casi horizontal, cuya duración es de 140 días, coincidente con la paralización de las excavaciones en las obras subterráneas. Finalmente, en el último período, con la llegada de la excavación de la Fase de Banco se observa un leve aumento en la pendiente de desplazamiento a -0,03 mm/día, la cual se mantiene hasta el día 592, día en el que se realizó la última medición de subsidencia de la sección 1962, en el que se alcanza un desplazamiento máximo de -37 milímetros para HNS 2 y HNS 4 y de -52,4 milímetros para el HNP.

En el gráfico (2) de la figura 49, se observa la evolución de la subsidencia de los hitos de nivelación de la Galería Secundaria Sur, pertenecientes a la sección 1964. Este grafico presenta los mismos patrones de desplazamiento que el anterior, marcado por aproximadamente, los mismo cambios de pendiente en las distintas fases de excavación. La diferencia radica en que los desplazamientos de subsidencia alcanzadas son de -19,5 milímetros para los HNS y de -25,8 milímetros para los HNP. Se destaca además, que el HNS 5 desciende más que HNP en este caso, el cual coincide con la rotura del manto en esa zona, el día 141 (05/05/14).

En el grafico (3) se observan frecuencias de toma de lecturas que varían entre 1 y 28 días. En los períodos con mayores pendientes de subsidencia, se observan frecuencias que varían en torno a los 2 y 7 días. Se observan “peaks” de frecuencias por sobre la tendencia normal en algunas mediciones.

# Túnel Estación 1

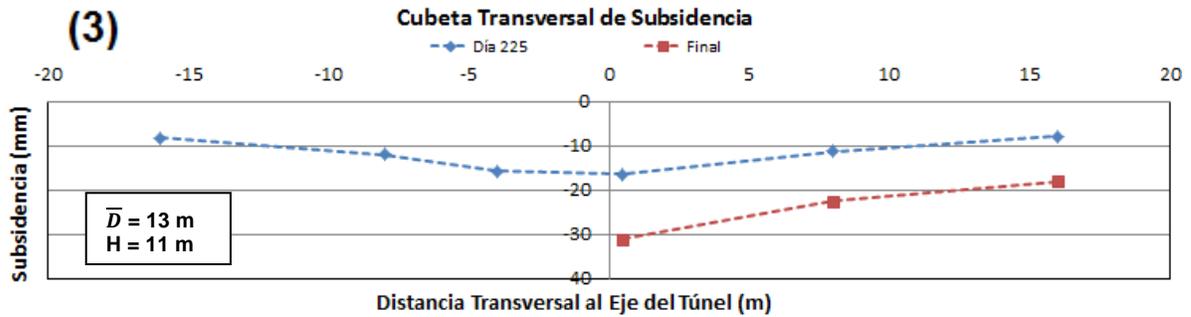
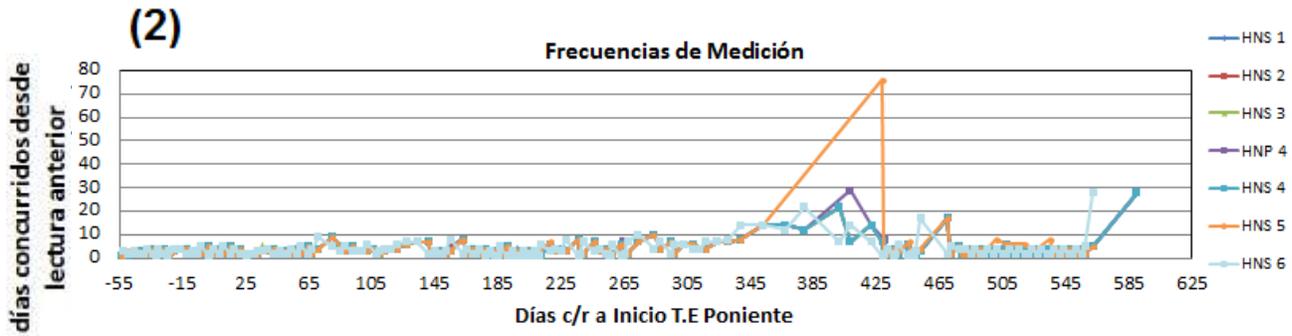
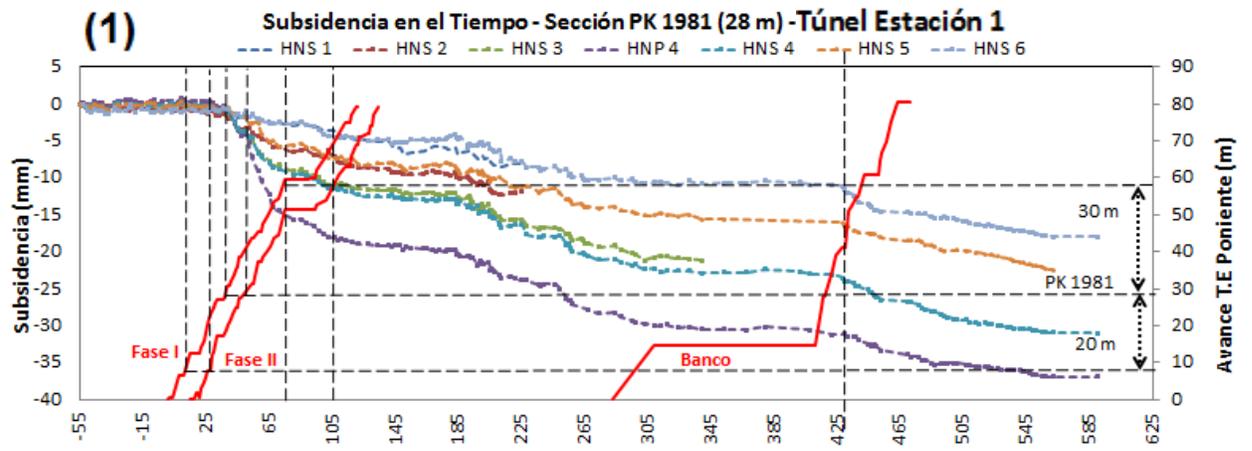
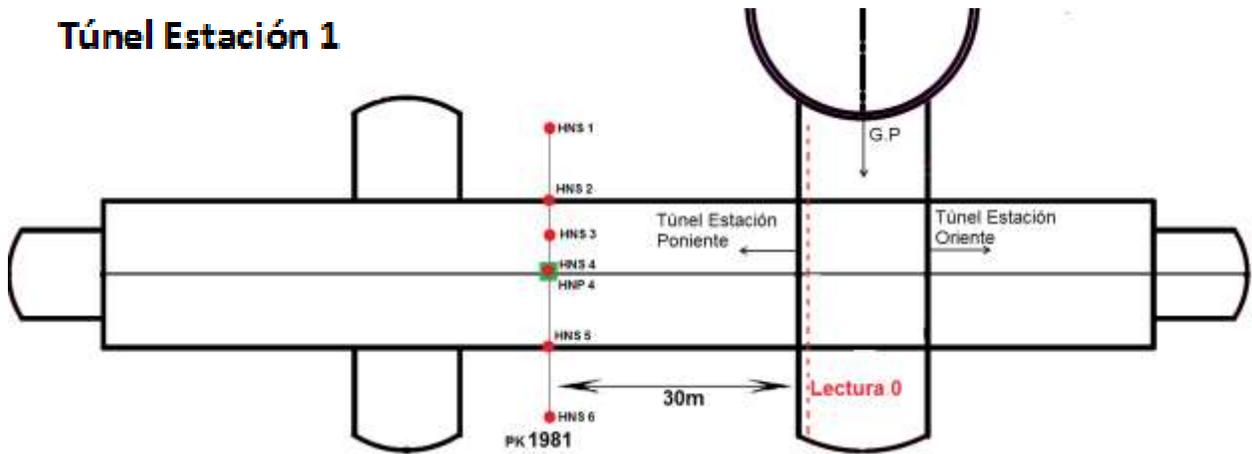


Figura 48: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 1. Túnel Estación Poniente. Sección 1981.

En la figura 50 se observan los resultados del monitoreo de subsidencias de la sección 1981. Esta sección es probablemente la sección más representativa con respecto al comportamiento que exhiben las secciones del Túnel Estación.

En la parte superior de la figura se observa el esquema del Túnel Estación 1 con la sección 1981 y sus respectivos HNS y HNP. Se puede observar que la lectura “cero” se realizó a una distancia de 30 metros del frente.

En el gráfico (1) se observa la evolución de la subsidencia en el tiempo de los HNS y HNP. El desplazamiento total se produce en un período de 560 días aproximadamente. Se logra identificar un período de 30 lecturas iniciales que no exhiben descenso alguno. Posteriormente, ante la llegada de las Fases I y II se observa un aumento drástico en la pendiente de las curvas, a  $-0,43$  mm/día para el HNP y a  $-0,03$  mm/día,  $-0,1$  mm/día,  $-0,17$  mm/día,  $-0,19$  mm/día,  $-0,32$  mm/día y  $-0,08$  mm/día para los HNS 1, 2, 4, 4, 5 y 6 respectivamente, lo que resulta muy variado. Este período dura hasta que los frentes de excavación se encuentran a más de 30 metros de distancia por detrás de la sección, hasta el día 100 aproximadamente. El desplazamiento alcanzado en el eje del túnel hasta que los frentes llegan a la sección observada es de aproximadamente  $-3,66$  milímetros (11,8% del desplazamiento final) para el HNS 4 y de  $-4,06$  milímetros (11% del desplazamiento final). El día 225, se dejaron de medir los HNS 1 y 2 (rojo y azul). Luego se observa una estabilización en las subsidencias de todos los puntos de control, de aproximadamente 80 días, período en el cual no se realizaron avances de excavaciones. A partir del día 180 aproximadamente se observa un aumento en las pendientes de todos los hitos, en promedio de  $-0,07$  mm/día, período que coincide con la demolición del tabique central entre las Fases I y II. Luego, análogo a lo observado en la figura 52, se aprecia un período de desplazamientos nulos, coincidente con que no se realizaron avances en esas fechas y con la paralización de las actividades. El día 339 se dejó de medir el HNS 3 (en verde). Finalizada la Fase de Bóveda (Fases I y II), los desplazamientos de subsidencia alcanzadas en el eje del túnel fueron de  $-22,91$  milímetros (74% del desplazamiento final) para el HNS 4 y de  $-30,57$  (83% del desplazamiento final) para el HNP. El día 425, ante la reanudación de los avances, se observa en todos los puntos de control, un cambio de pendiente, en promedio a  $0,045$

mm/día, asociado a la llegada de la Fase Banco a la sección 1981. Se observa una estabilización final en los desplazamientos de subsidencia en todos los puntos de control, salvo en el HNS 5.

En el gráfico (2) de la figura 50 se observan las frecuencia de medición de la sección 1981. Constante en casi toda la historia desplazamientos de subsidencia, se observan frecuencias que varían entre 1 y 7 días, con un promedio de 2,85 días. Entre los días 345 y 430 se observa un aumento en algunas frecuencias de medicino, alcanzando valores de entre 14 y 76 días.

Finalmente, en el tercer grafico se aprecia la cubeta transversal de subsidencia de la sección 1981, del Túnel Estación, el cual posee una tapada sobre el túnel de 11 metros y unos diámetros promedio de 13 metros. En azul se observa la cubeta transversal al día 225, y en rojo la cubeta final. En el eje se alcanza una desplazamiento de subsidencia máximo de -31 milímetros, mientras que a 16 metros del eje se alcanza un valor de -18 milímetros.

Finalmente, en la figura 51 se presenta la evolución de la subsidencia de la sección GP2 de la galería principal, ubicada a 18 metros del Pique de estación. Según el diseño, esta es la sección más crítica de la estación, en términos de subsidencia.

En la parte superior de la figura 51 se presenta el esquema de la sección GP2. La lectura “cero” se realizó antes del comienzo de las excavaciones de la galería principal. Sin embargo, del gráfico de frecuencias se observa que la segunda lectura se realizó 59 días después, 49 días después del inicio de la excavación de la Galería Principal.

En el primer grafico se observa el desarrollo de desplazamientos de subsidencia. Se logran identificar claramente los distintos cambios de pendientes asociados a los avances de las obras subterráneas. Los avances de las Fases de excavación I y II de la galería principal (curvas de avance negras) son los primeros en generar cambios visibles en las curvas, entre los días 50 y 80 aproximadamente, generando una pendiente abrupta de -0,3 mm/día. Seguidamente, se produce una disminución de la pendiente, lo que coincide con el inicio de la excavación del Túnel estación Poniente (curvas de avance de color rojo).

## Túnel Estación 1

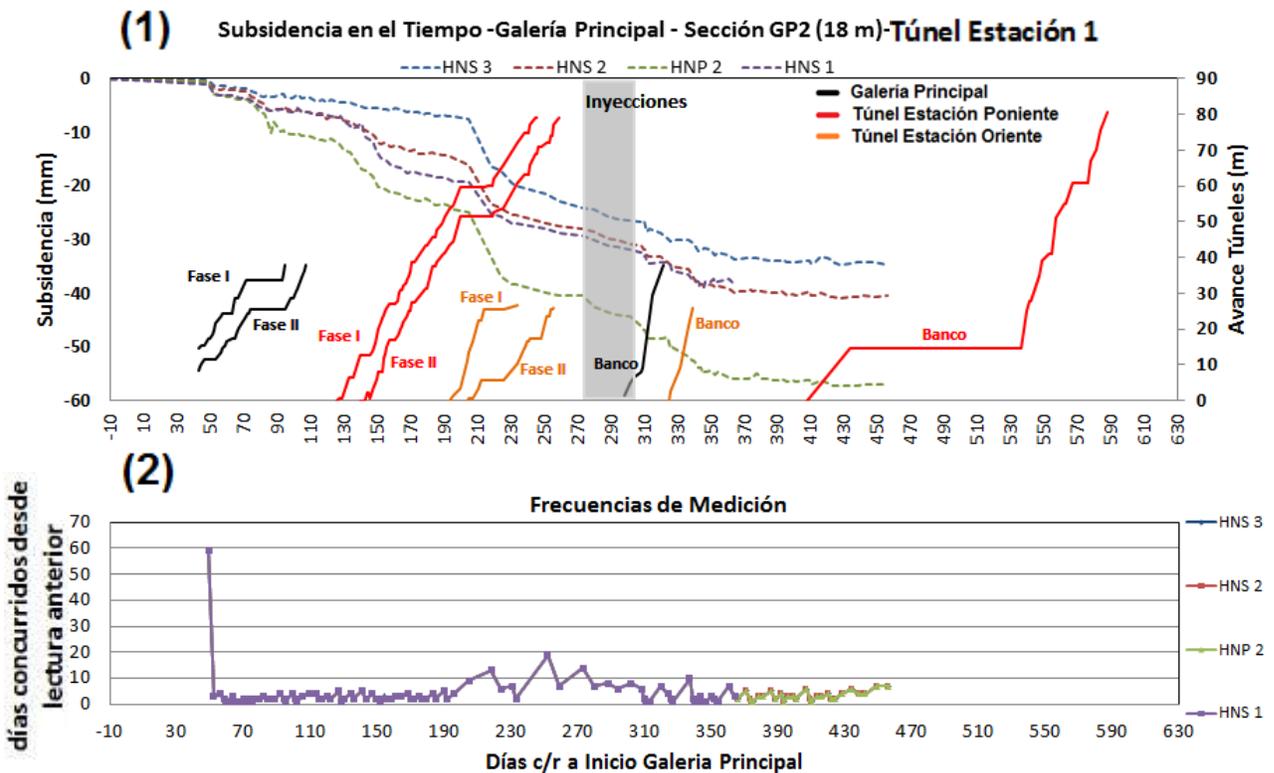
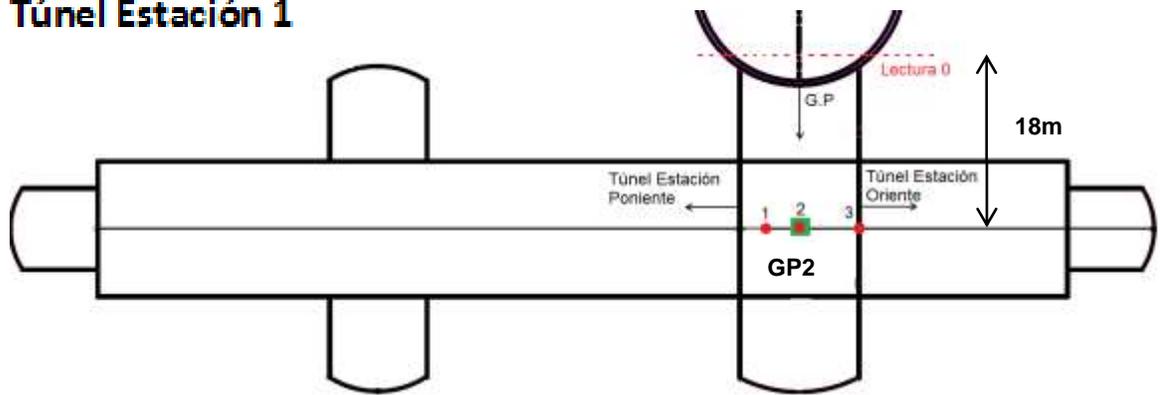


Figura 49: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 1. Galería Principal. Sección GP2 (18m).

Seguidamente, a partir del día 193, día en que se comenzó a excavar el Túnel estación Oriente (curvas de avance de color naranja) se observa un aumento abrupto de la pendiente de desplazamiento, a 0,58 mm/día, llegando a su “peak”. Posteriormente se siguen observando distintos cambios coincidentes con las excavaciones en Fase de Banco de las obras subterráneas de la estación. Finalmente, se alcanza un desplazamiento de subsistencia máximo, en el eje de la galería principal, de -57,3 milímetros para el HNP 2 y de -40,3 milímetros para el HNS 2.

### 5.1.1.2 Túnel Estación 2.

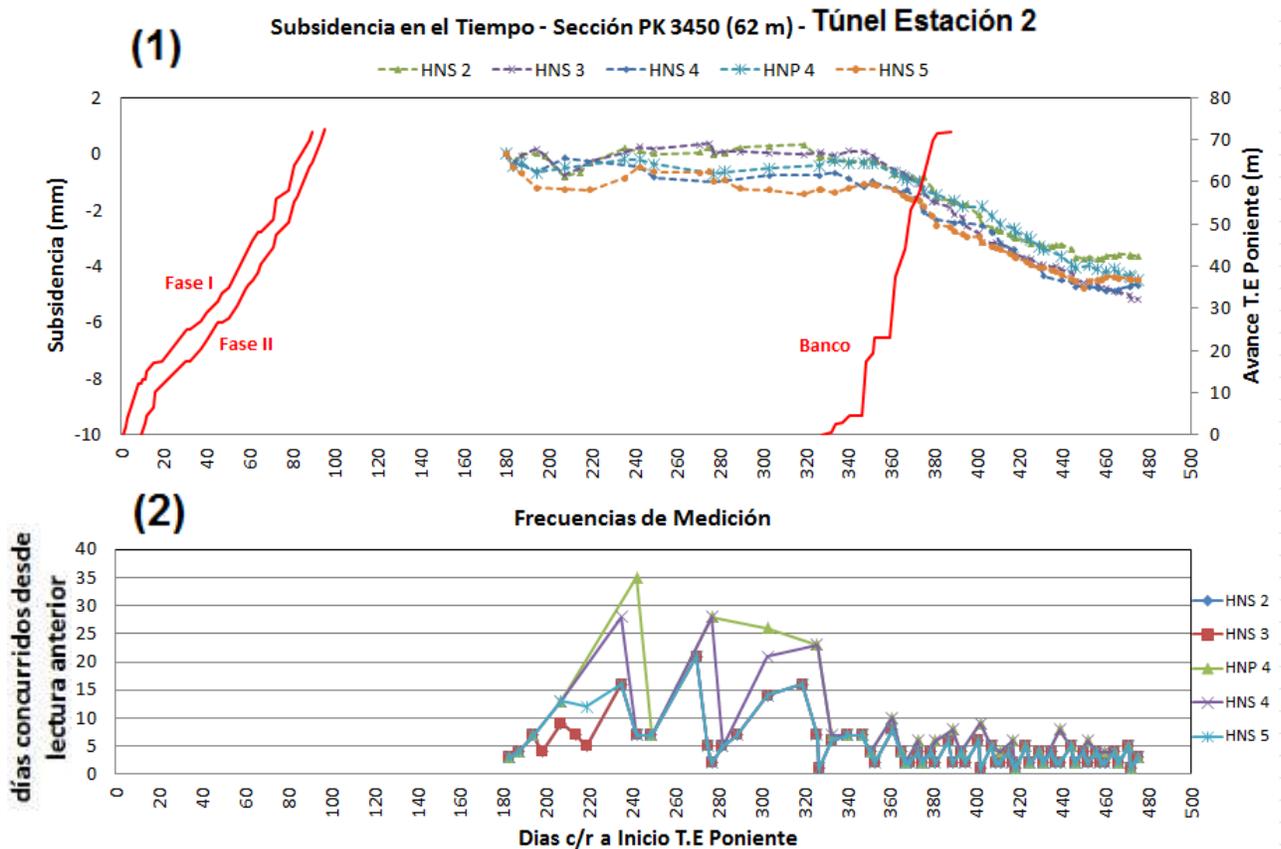
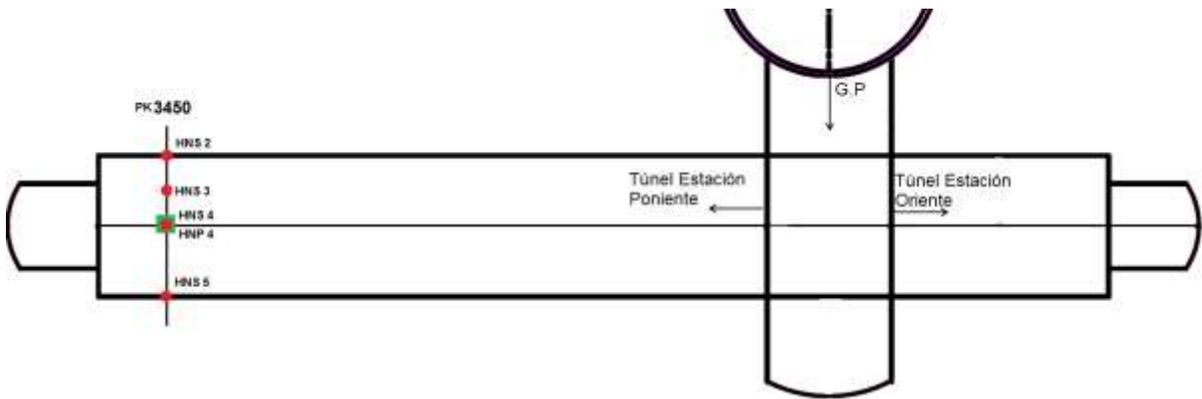


Figura 50: Resultados del Monitoreo de Subsistencias. Túnel Estación 2. Túnel Estación Poniente. Sección 3450.

En la parte superior de la figura 52 se puede observar la sección 3450, la última del Túnel Estación Poniente del Túnel Estación 2. Del gráfico (1) es posible observar que las primeras mediciones se realizaron después de las excavaciones de las Fases I y II, cuando el frente ya se encontraba excavando el Túnel Interestación. En un inicio, se observa un período estable, con desplazamientos prácticamente nulos entre los días

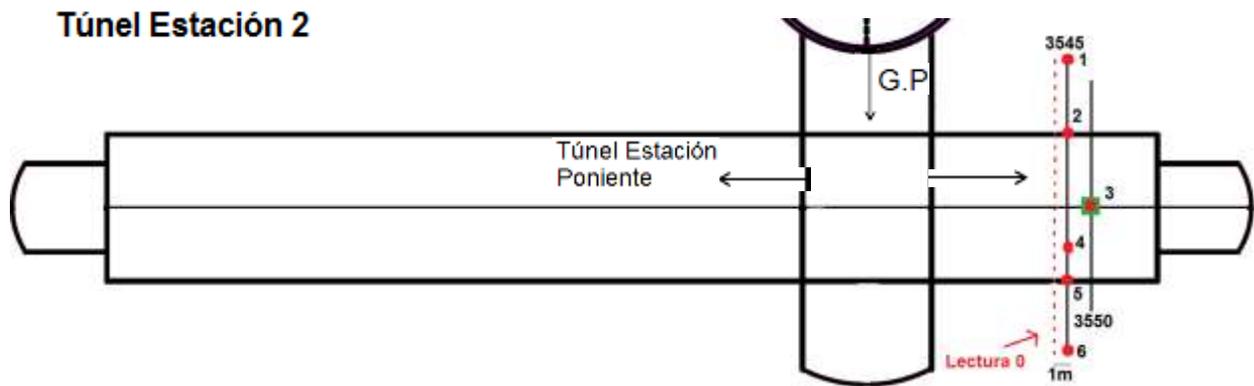
180 y 340 aproximadamente, con frecuencias de toma de lectura (días concurridos entre una lectura y otra) que varían entre los 3 y 35 días. El día 325 aproximadamente comienza la excavación de la Fase de Banco y en el día 350 se comienza a observar un nuevo período de desplazamientos, coincidente con el avance de la excavación de la Fase de Banco, la cual llega a la sección observada el día 380 aproximadamente. Este período mantiene una pendiente constante de desplazamientos, hasta el día 450, en donde se alcanzan a ver 9 mediciones que indican una posible estabilización de los desplazamientos. Se alcanza a ver un desplazamiento total máximo (promediando todos los hitos de nivelación) de 4,5 milímetros.

Con la figura 53 de la siguiente página se finalizan las observaciones de los desplazamientos de subsidencia de los Túneles Estación. En esta figura se presentan los resultados de las secciones 3545 y 3550 del Túnel Estación 2, cuyo esquema se puede ver en la parte superior de esta misma. Como se observó la lectura “cero” se realizó cuando el frente de excavación se ubicaba a 1 metro de distancia de la sección 3545, y por ende a 6 metros de la 3550.

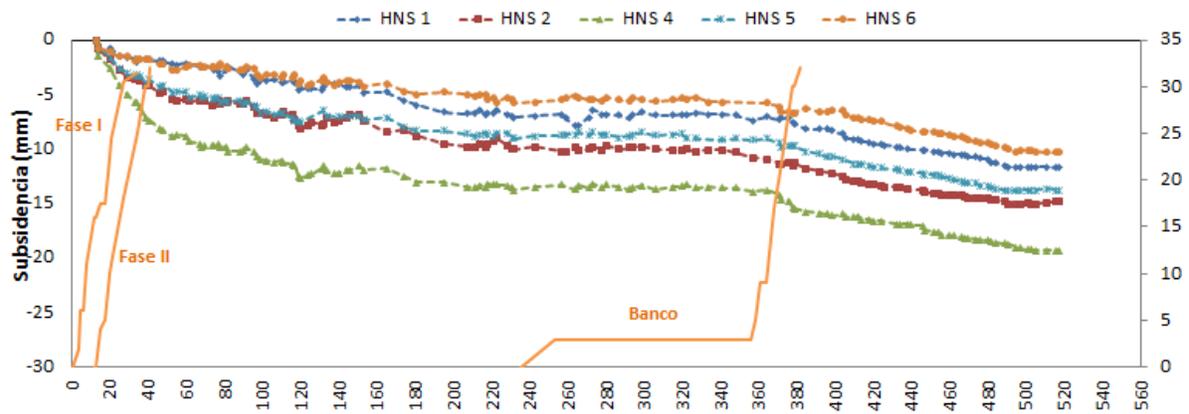
Inmediatamente después de la lectura “cero”, no es posible ver un período con pendiente nula que confirme un registro completo de la historia de desplazamiento, por el contrario, se observa en ambos gráficos una pendiente abrupta.

Adicionalmente, de ambos gráficos (1 y 2) se pueden observar los patrones típicos identificados en las figuras 49, 50, 51 y 52. Aumentos de pendiente críticos ante la llegada de las Fases I y II de la excavación de la bóveda, posterior estabilización y luego leves aumentos de pendiente en la Fase de Banco. Después de la Fase de bóveda, se alcanzan desplazamientos en el eje del túnel de -14,4 milímetros (75% del desplazamiento total) para el HNS 3 y de -25,4 milímetros (79% de desplazamiento final) para el HNP 3, y finalmente se alcanza una subsidencia máxima de -19,1 milímetros y -25,4 milímetros para el HNS 3 y HNP 3 respectivamente, ambas debajo de los niveles de alerta (50 milímetros) y alarma (55 milímetros).

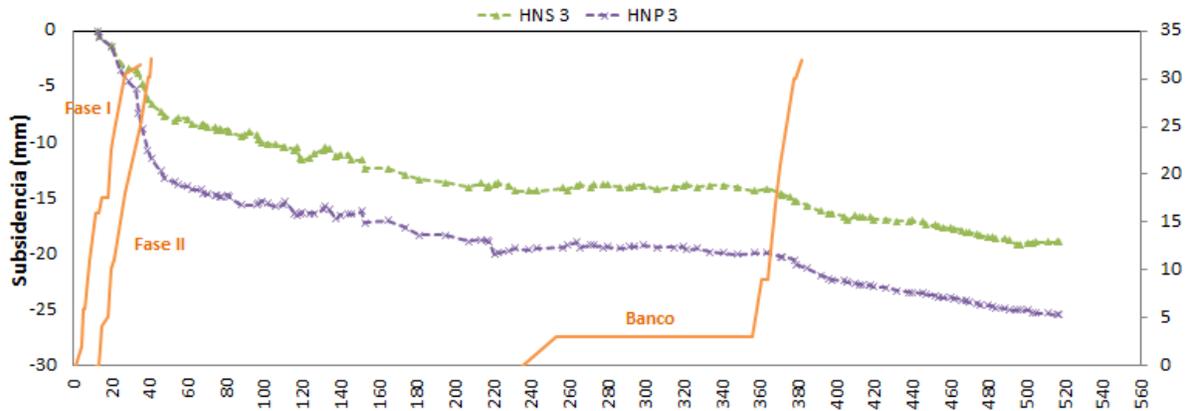
Del gráfico (3) se observan frecuencias que varían entre 1 día y 14 días, con un promedio de 3,79 días.



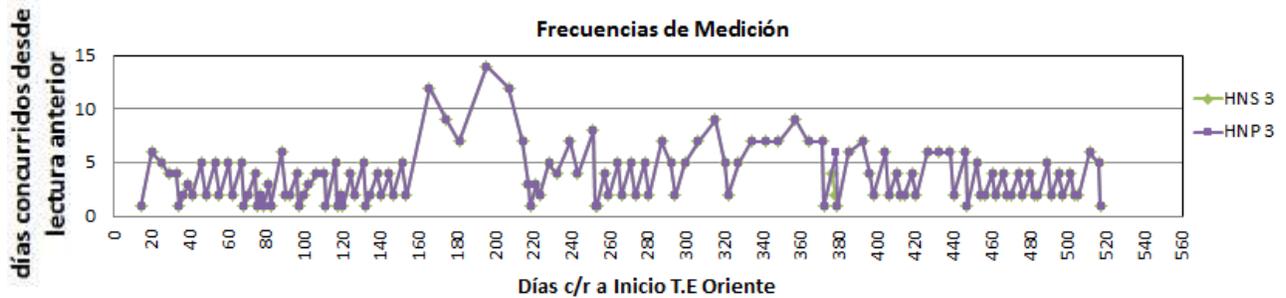
**Subsidencia en el Tiempo - Sección 3545-Túnel Estación 2**



**Subsidencia en el Tiempo - Sección 3550- Túnel Estación 2**

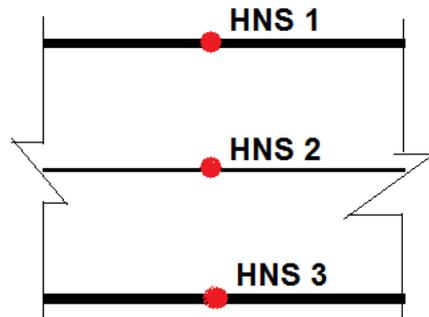


**Frecuencias de Medición**



**Figura 51: Resultados del Monitoreo de Subsidiencias. Túnel Estación 2. Túnel Estación Oriente. Secciones 3545 y 3550.**

### 5.1.1.3 Túnel Interestación (entre Túneles Estación 1 y 2).



#### Subsistencia Túnel Interestación

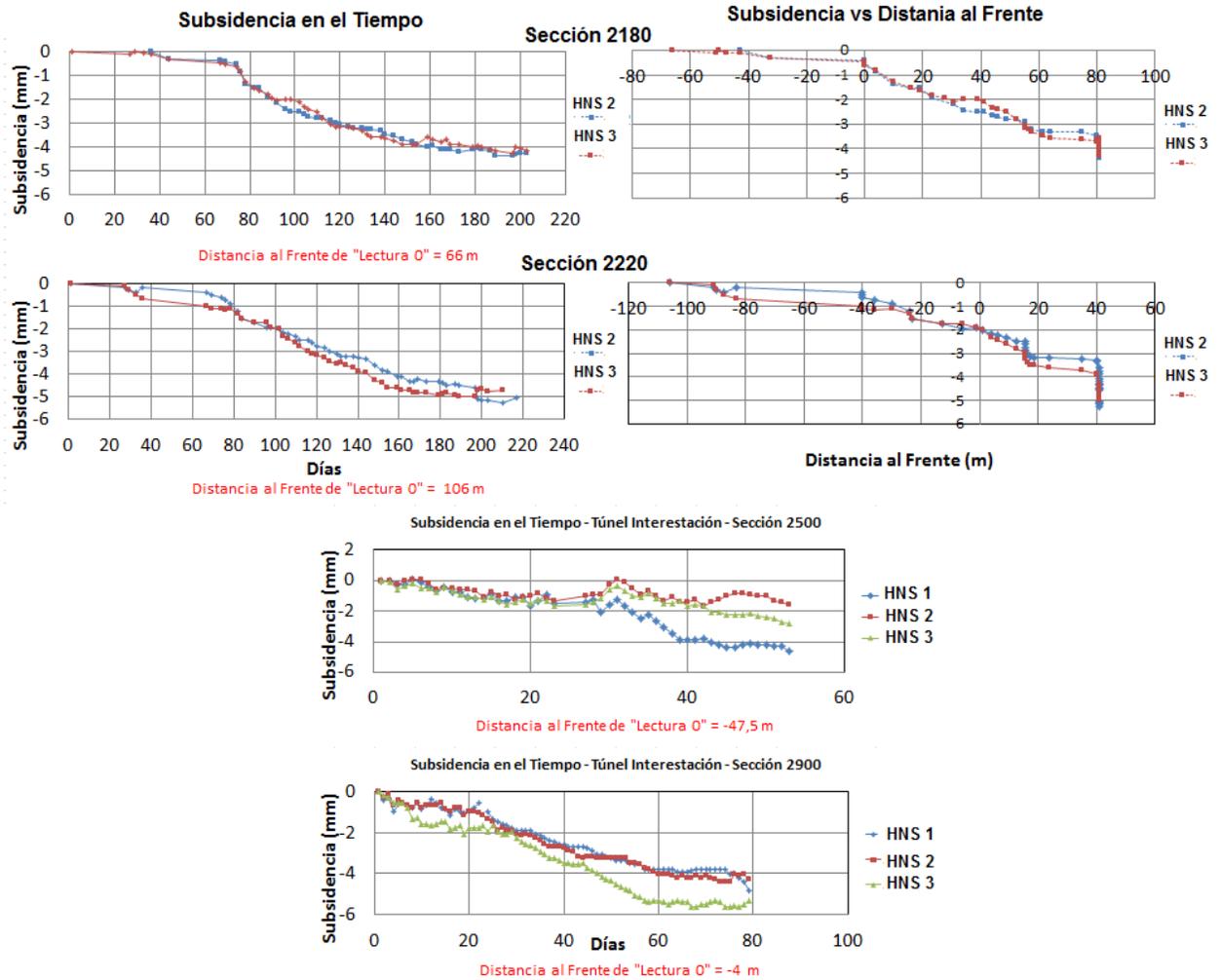


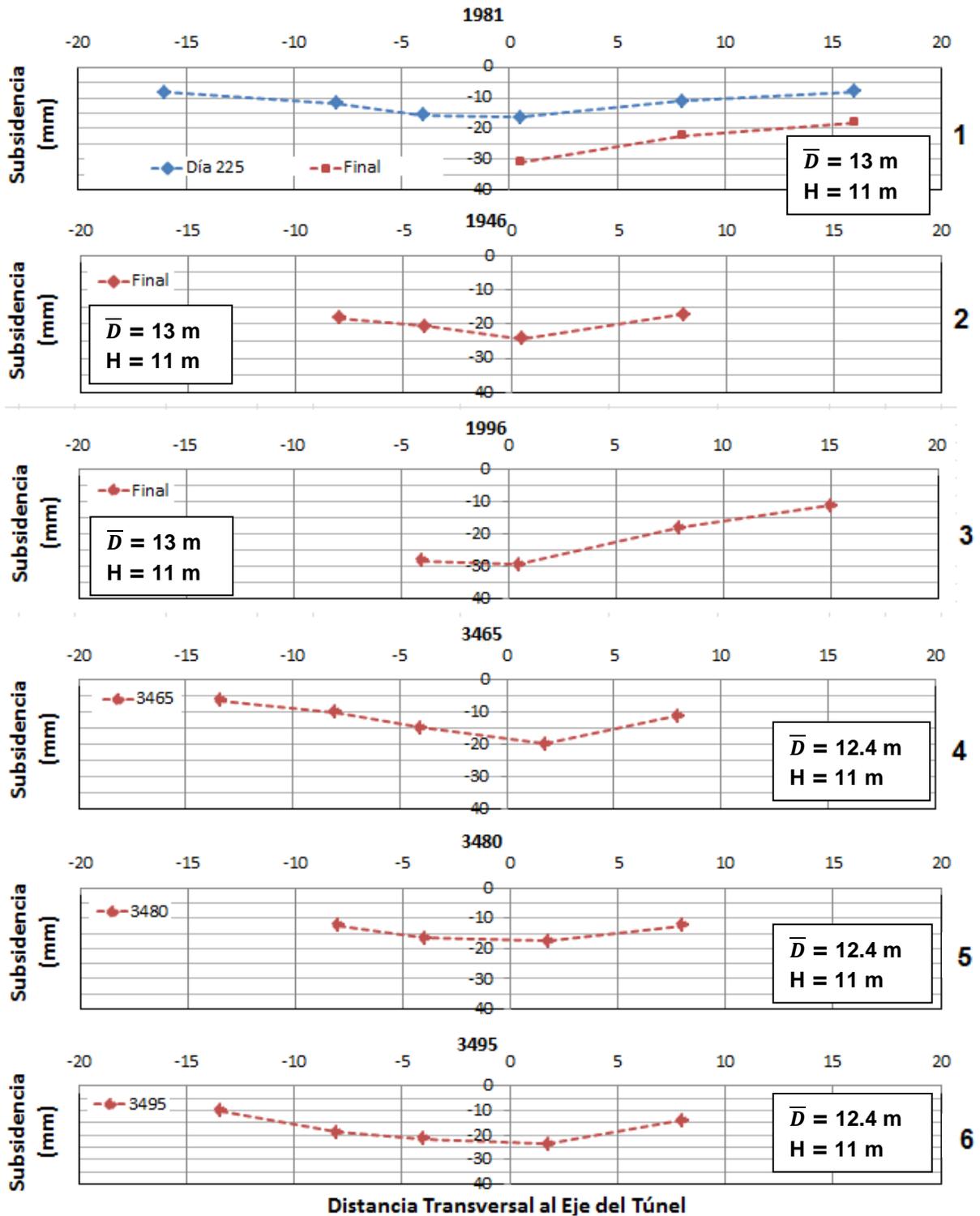
Figura 52: Resultados del Monitoreo de Subsidiencias. Túnel Interestación.

En la figura 54 se presentan los resultados más representativos del monitoreo de subsidencias de los Túneles Interestación. Los primeros cuatro gráficos muestran los resultados de las secciones 2180 y 2220, los que exhiben comportamientos bastantes similares entre sí. A la izquierda se exhibe el comportamiento en el tiempo que tiene la subsidencia en estos túneles con diámetros de 8,6 metros, cuyas tapadas mínimas y máximas sobre la clave del túnel son de 14,9 y 16,8 metros respectivamente. Su estratigrafía está compuesta por las gravas de la primera y segunda depositación del Río Maipo. Mientras que a la derecha se ilustra la evolución de la subsidencia en función de la distancia al frente. En últimos dos gráficos de la figura 54 se exhiben los comportamientos en el tiempo que tuvieron las secciones 2500 y 2900. En todos estos gráficos no se logra apreciar una diferencia tanto en evolución como en magnitud entre los HNS 1, HNS 2 y HNS 3, y por ende no se logra apreciar una cubeta transversal de subsidencia como es el caso de los Túneles Estación. En todos los casos se obtuvieron subsidencias máximas de entre 4 milímetros y 6 milímetros. En los gráficos de subsidencia versus distancia al frente se observan desplazamientos casi imperceptibles, de aproximadamente 40 metros de distancia al frente. Finalmente, en los últimos dos gráficos, a pesar de que muestren un comportamiento similar (en magnitud y forma) a los primeros dos, se puede observar (en letra roja) que tanto en la sección 2500 como 2900, las mediciones comenzaron una vez que el frente ya había pasado.

Al finalizar con las observaciones de los resultados de subsidencia de Túneles Estación e Interestación es posible identificar los siguientes aspectos de manera general:

- En todos los gráficos se pueden distinguir con facilidad las reacciones del suelo antes los distintos hitos constructivos y avances de obras subterráneas.
- Las curvas observadas exhiben pocas oscilaciones en torno a su propia tendencia.
- En todas las graficas se observan frecuencias de toma de lectura (días entre mediciones sucesivas) relativamente constantes, o dentro de un rango, con “peaks” de carácter eventual en algunas zonas. No se logra identificar un patrón de frecuencias a seguir entre los distintos gráficos.

### 5.1.2 Cubetas Transversales de Subsistencia.



$\bar{D}$ : diametro promedio del túnel.

H: tapada del terreno sobre la clave del túnel

Figura 53: Resultados obtenidos por el Monitoreo de Subsistencias. Cubetas Transversales.

En la figura 55 se presentan las cubetas transversales aproximadas que pudieron graficarse a partir de los datos del monitoreo de subsidencias, correspondientes a túneles de diámetro promedio de 13 metros, tapadas de 11 metros y emplazados en las gravas del Río Maipo.

Los gráficos 1, 2 y 3 corresponden a las secciones 1981, 1996 y 1946 del Túnel Estación 1. De ellos, se puede ver que la cubeta se extiende hasta más allá de los 15 metros, y probablemente hasta más allá de los 20 metros hacia cada costado. En el eje central se aprecia un desplazamiento máximo de aproximadamente 30 milímetros para las secciones adyacentes 1981 y 1996, y de 25 milímetros para la sección 1946. En estas tres secciones se aprecia una forma parecida a la de una curva de distribución normal invertida.

Los gráficos 4, 5 y 6 corresponden a las secciones 3465, 3480 y 3495 del Túnel Estación 2. De ellos, se puede ver que la cubeta se extiende hasta más allá de los 10 metros y posiblemente hasta más allá de los 15 metros. No es posible observar los desplazamientos que se producen en el eje, debido a que el hito de nivelación correspondiente está a aproximadamente 2 metros de este. No obstante a lo anterior, en estos hitos de nivelación se observan desplazamientos máximos de aproximadamente 20 milímetros en promedio. En estas tres secciones se aprecian formas distintas a aquellas observadas en los primeros tres gráficos.

## 5.2 Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave del Túnel.

En las siguientes figuras se presentan los resultados del monitoreo geodésico del descenso de la clave del túnel en los distintos túneles y secciones.

### 5.2.1 Túnel Estación 1.

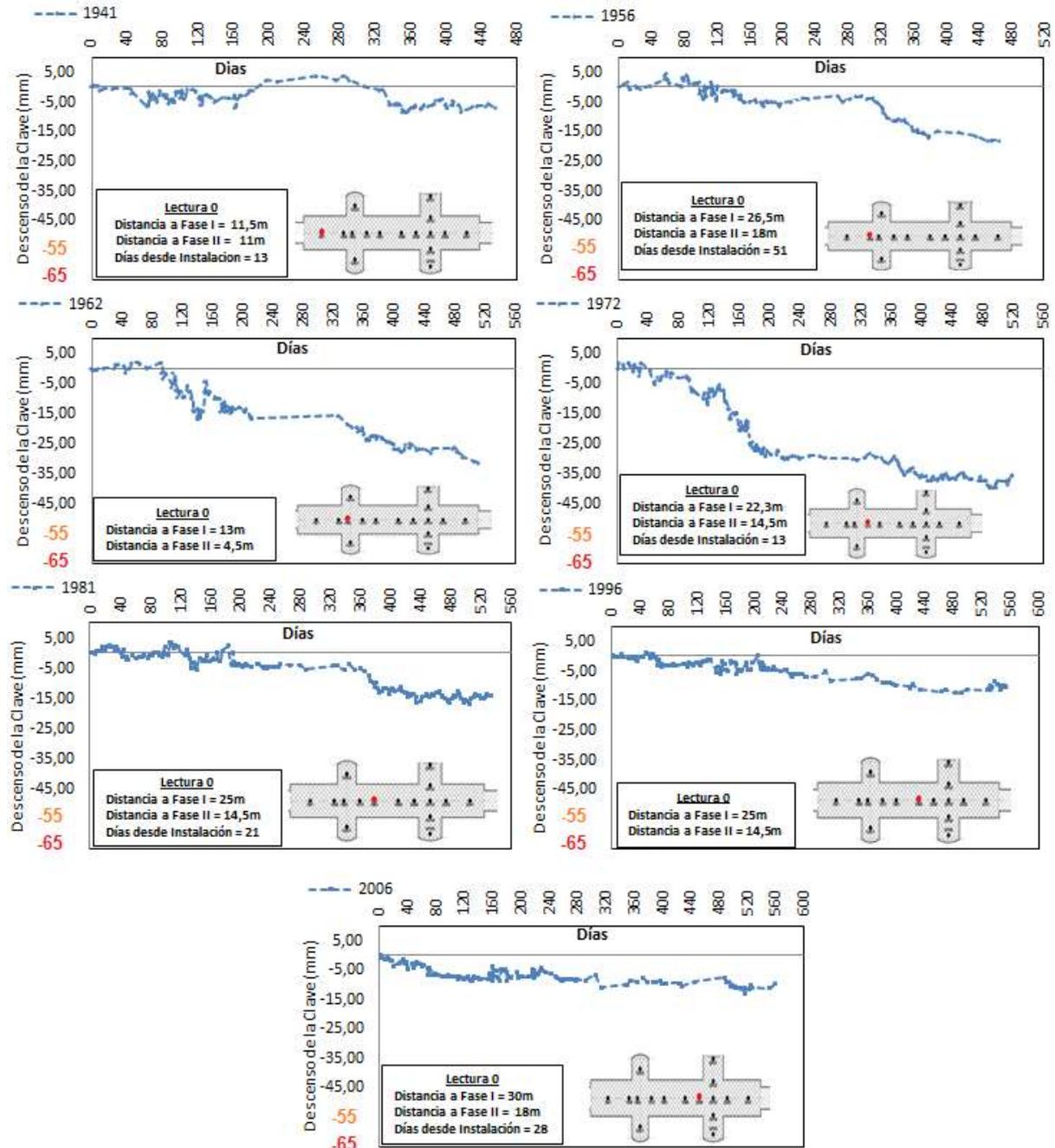


Figura 54: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 1.

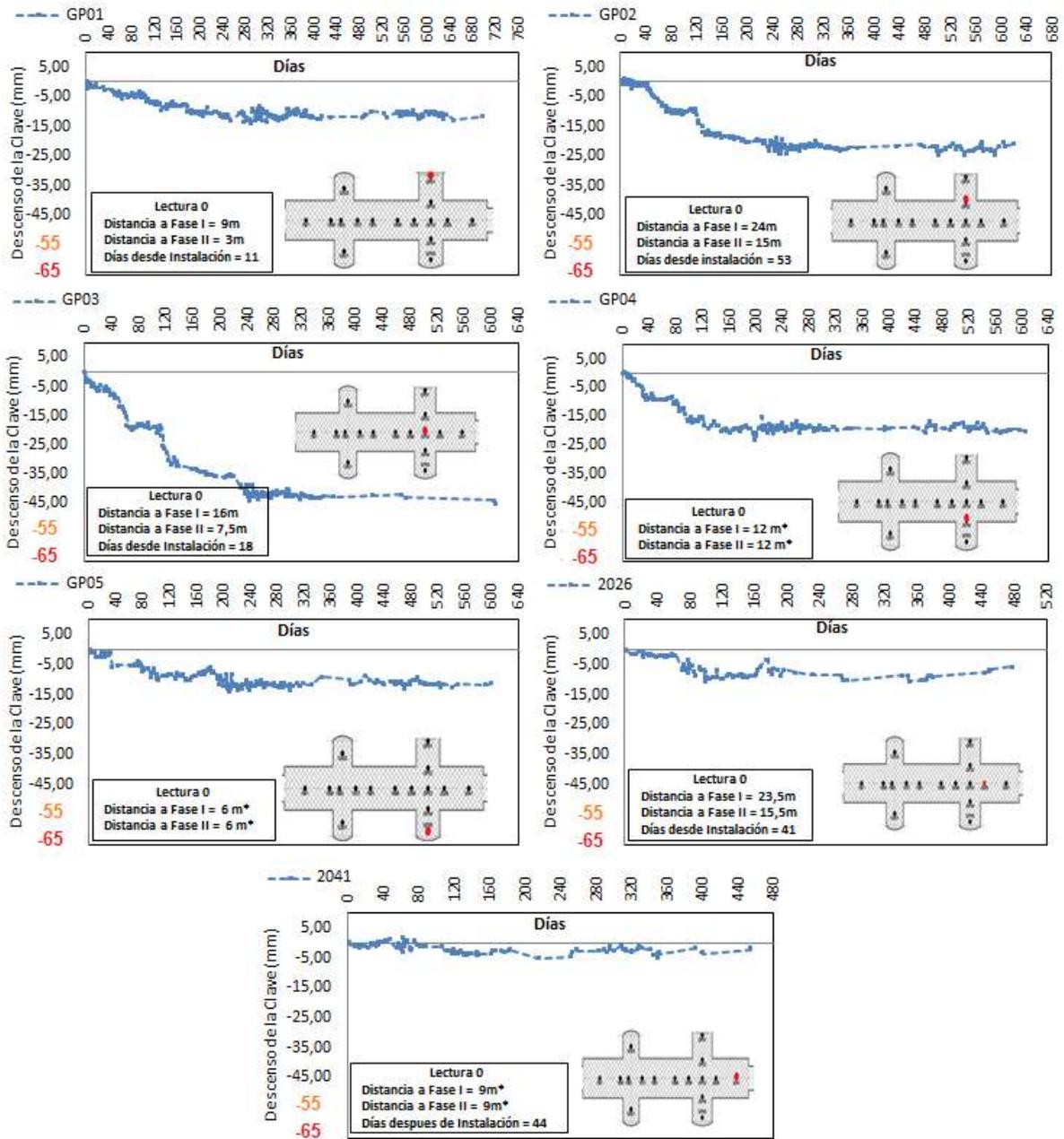


Figura 55: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 1.

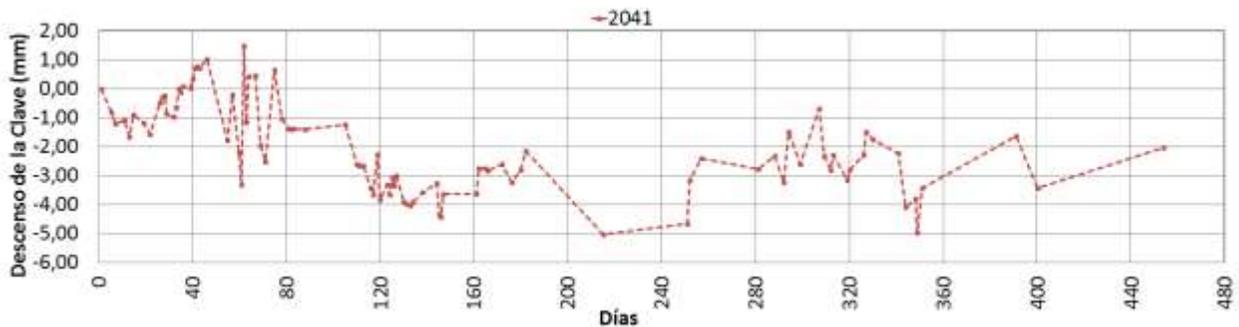


Figura 56: Vista ampliada de la Sección 2041.

En las figuras 56, 57 y 58 se presentan los resultados del monitoreo geodésico del descenso de la clave del Túnel Estación 1. Todos los gráficos están escalados de igual manera. Los valores umbrales de control son de 55 milímetros y de 65 milímetros (límite inferior del gráfico) para los niveles de alerta y alarma respectivamente.

Con respecto al comportamiento general de las curvas del descenso de la clave, se pueden apreciar bastantes fluctuaciones en torno a su tendencia principal. En la figura 58 se aprecia desde más cerca este comportamiento, en donde se pueden ver saltos repentinos, que varían desde  $\pm 1$  milímetro hasta  $\pm 4,5$  milímetros (entre los días 40 días y 80 días) aproximadamente. Estas fluctuaciones se presentan a lo largo de toda la historia de desplazamiento. Adicionalmente, en cada gráfico se puede observar la distancia al frente de excavación como que se realizaron las lecturas “cero” de las dianas reflectantes hacia las Fases I y II, en conjunto con los días concurrencios entre la instalación y esta lectura. Estas tres variables cambian mucho entre una sección y otra. Por ejemplo, para la sección 1956, la lectura “cero” se realizó a 26,6 metros de la Fase I y a 18 metros de la Fase II, y se realizó 51 días después de la instalación de la diana reflectante. Por otro lado, en la sección GP01, adyacente al Pique de estación, estas variables fueron de 9 metros, 3 metros y 11 días. En promedio, la distancias a Fase I y Fase II de las lecturas 0 fueron de 18 metros y 12 metros respectivamente. Al final de estas observaciones se adjunta un resumen respecto a la instalación y lecturas 0 de estas mediciones.

En la figura 56 se observan la mayoría de las secciones de monitoreo del Túnel Estación Poniente. En estas secciones, no se alcanzan valores de descenso de clave mayores a 15 milímetros, salvo en las secciones 1962 y 1972, que son aquellas ubicadas en el entronque con la Galería Secundaria.

En la figura 57 se observan las secciones correspondientes a la Galería Principal. Estas presentan un mayor grado de desplazamiento y poseen menores fluctuaciones en torno a su tendencia principal que todas las demás del Túnel Estación 1. Mientras que las secciones 2026 y 2041 parecieran no presentar desplazamiento alguno, o al menos no es posible diferenciarlos con las fluctuaciones que presentan.

## 5.2.2 Túnel Estación 2.

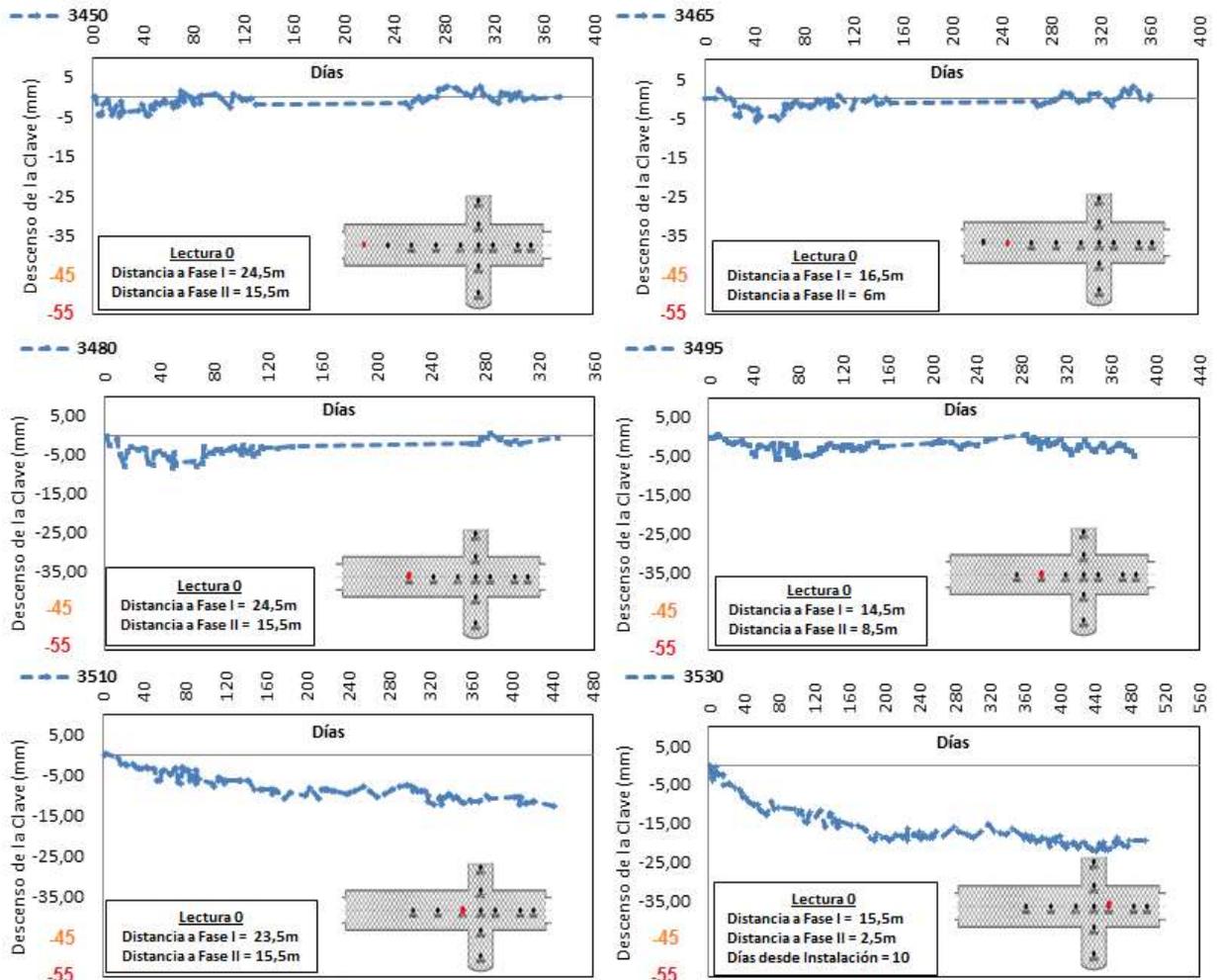


Figura 57: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 2.



Figura 58: Vista ampliada de la Sección 3530.

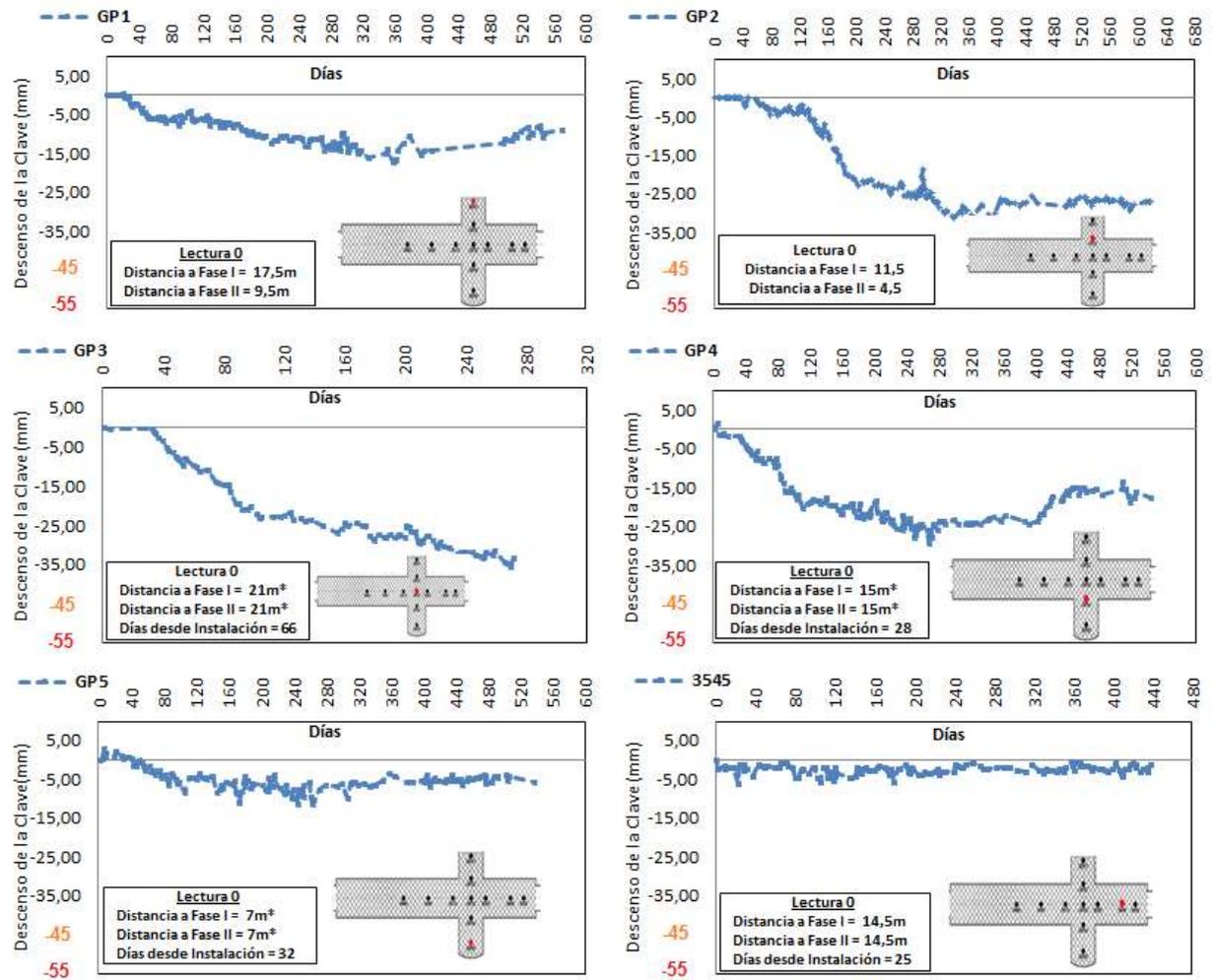


Figura 59: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave del Túnel. Túnel Estación 2.

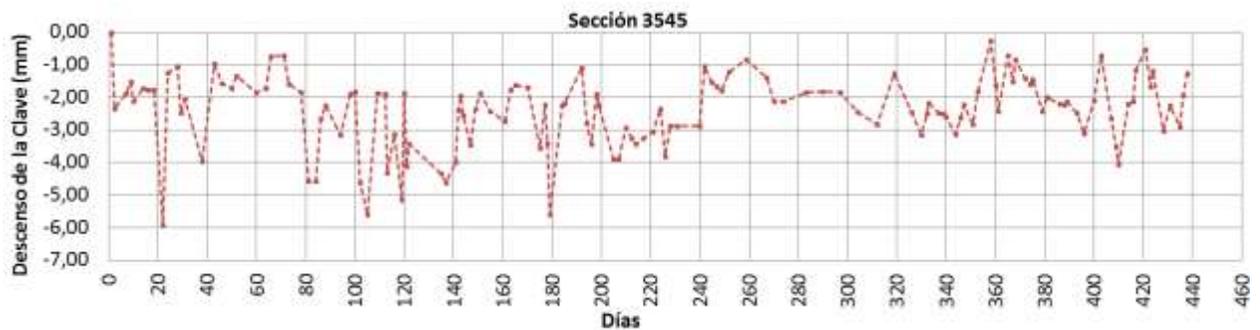


Figura 60: Vista ampliada de la Sección 3545.

En las figuras 59, 60, 61 y 62 se presentan los resultados del monitoreo geodésico del descenso de la clave del Túnel Estación 2. Todos los gráficos están escalados de igual manera. Los valores umbrales de control son de 45 milímetros y 55 milímetros para los niveles de alerta y alarma respectivamente.

Con respecto al comportamiento general de las curvas, se pueden identificar las mismas características observadas en los gráficos correspondientes al Túnel Estación 1, en relación a las fluctuaciones que presentan las curvas y las distancias al frente de las lecturas “cero”. Adicionalmente, en algunas graficas se observan frecuencias de medición (días concurridos entre mediciones consecutivas) extremadamente altas, como en las secciones 3450, 3465 y 3480 en donde se observa una diferencia de 119 días entre dos lecturas consecutivas, entre los días 120 y 250 aproximadamente. En este lapso se produjo un ascenso en las lecturas, el cual afecto a todas las secciones ubicadas en este sector.

En la figura 59 se observan los resultados de las secciones de convergencia del Túnel Estación Poniente. Las secciones 3450, 3465, 3480 y 3495 parecen no presentar tendencia alguna, o al menos no son visibles debido a la magnitud de las fluctuaciones que presentan las curvas. Las secciones 3510 y 3530, adyacentes al entronque entre el Túnel Estación y Galería Principal, si presentan descensos observables, de -12 milímetros y -21 milímetros respectivamente, y poseen un nivel de fluctuaciones menor que aquellas secciones ubicadas a mayor distancia desde el eje de la Galería Principal, lo que puede rectificarse comparando las figuras 60 y 62, que son las vistas ampliadas de las secciones 3530 y 3545 respectivamente.

En la figura 61 se observan los resultados de las secciones correspondientes a la Galería Principal. Estas presentan un mayor grado de desplazamiento y poseen menores fluctuaciones si se comparan con los resultados de las demás secciones. En la sección GP1 se observa una frecuencia de 90 días, entre los días 408 y 498. En la sección GP4, a partir del día 250 la curva comienza un ascenso hasta el final de su desarrollo, de aproximadamente 6,9 milímetros.

### 5.2.3 Túnel Interestación.

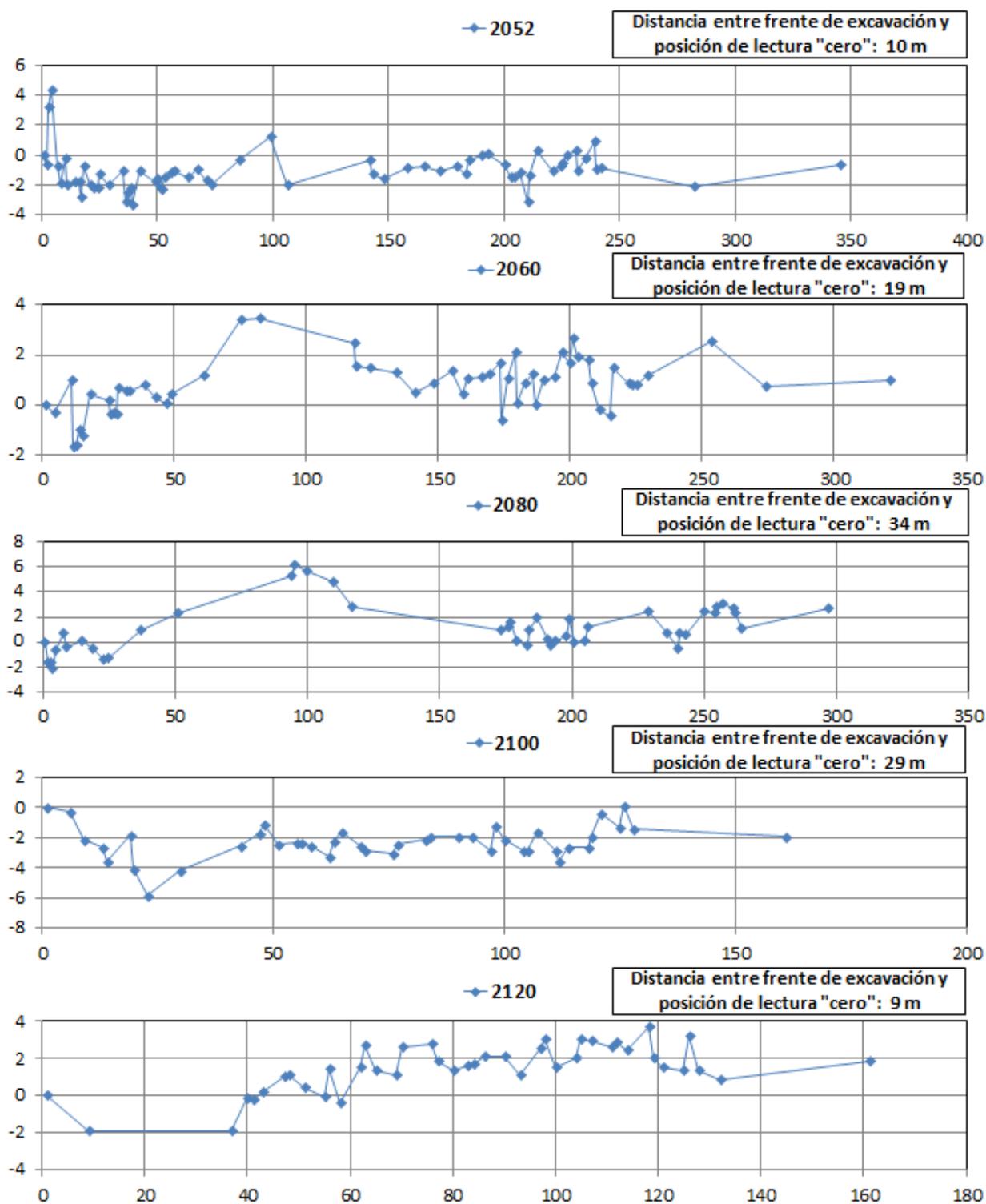


Figura 61: Resultados del Monitoreo Geodésico del Descenso de la Clave. Túnel Interestación.

Para finalizar con las observaciones de las mediciones geodésicas del descenso de la clave, en la figura 63 se presentan los resultados del Túnel Interestación, de 5 secciones adyacentes, que continúan el Túnel Estación 1 hacia el oriente. Se estimó que no era necesario escalar los gráficos para fines comparativos.

En los 5 gráficos presentes, no se logra apreciar con claridad un descenso de la clave, incluso, en las secciones 2060, 2080 y 2120, si se traza una tendencia, esta radicaría en un ascenso de ésta. Se producen variaciones de  $\pm 2$  milímetros en torno a las tendencias lineales que se podrían trazar, valores que representan, en algunos casos el 50% del desplazamiento total final que se puede observar al final de cada período de medición.

Por otro lado, se pueden observar nuevamente variaciones con respecto a las distancias entre frente de excavación y la posición de las lecturas “cero”, desde 9 metros a 34 metros. No se observan diferencias apreciables entre las curvas que presentan mayores o menores distancias.

En cuanto al comportamiento general observable en todas las curvas del descenso de la clave, es posible distinguir los siguientes aspectos:

- Se observan mayores desplazamientos en las secciones críticas, cercanas a los entronques.
- Se observan importantes fluctuaciones respecto a las tendencias de las curvas. Estas fluctuaciones son mayores en las secciones más alejadas del eje de la Galería Principal.
- Las distancias al frente de las lecturas “cero”, tanto en lo Túneles Estación como Interestación son muy variadas y general bastante mayores de lo esperado. Lo mismo con respecto a los días concurrentes entre la instalación del dispositivo reflectante y la primera medición.
- En algunas secciones, se observan frecuencias de toma de lectura (días entre mediciones consecutivas) extremadamente altas, del orden de 100 días.

### 5.3 Comparación entre los Movimientos Sub-Superficiales del Suelo (HNP) y el Descenso de la Clave del Túnel (PCO).

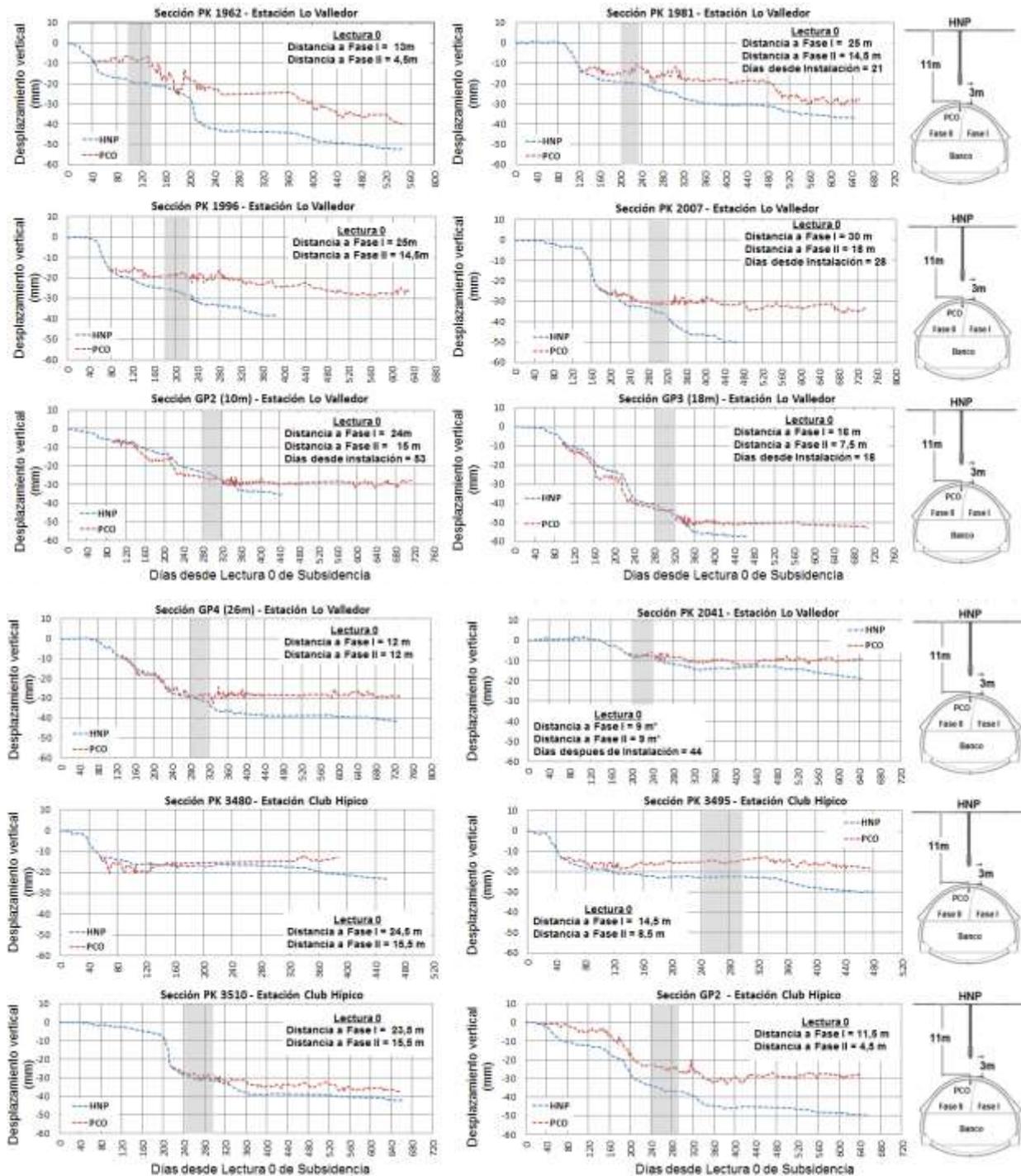
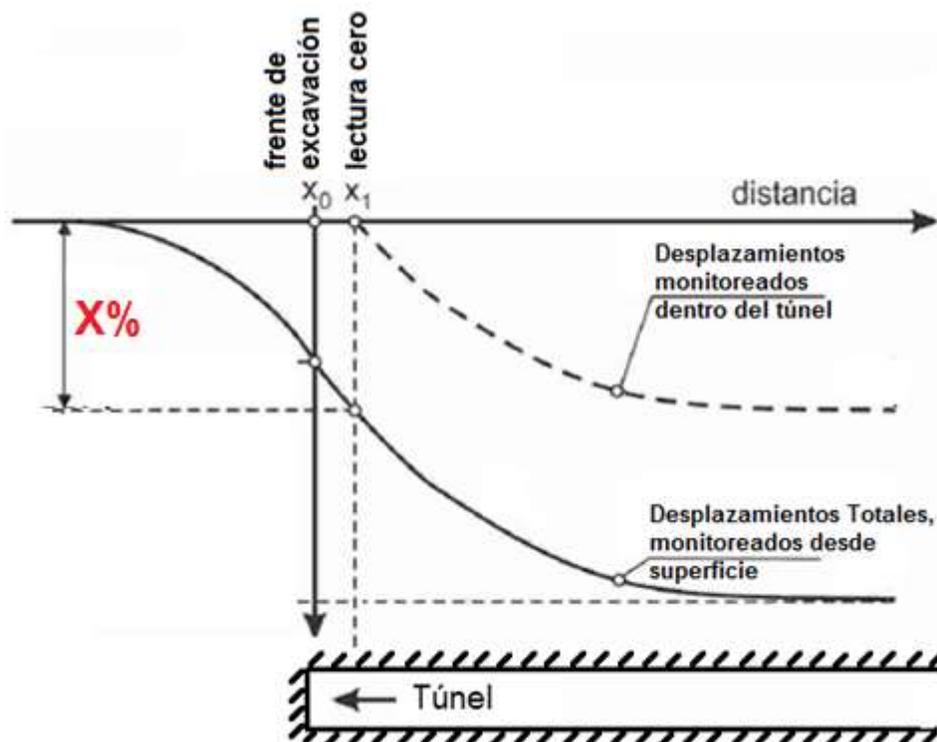


Figura 62: Gráficos de comparación entre el monitoreo Sub-superficial (HNP) y el Descenso de la Clave del Túnel (PCO).

En la figura 64 se exhibe el comportamiento que tuvieron las distintas secciones de monitoreo en relación a la diferencia que presentan entre los movimientos sub-superficiales del suelo (HNP) y el descenso de la clave del túnel (PCO). Es importante recalcar, que los HNP se extienden de manera vertical hasta llegar a una profundidad tal, que quedan a 3 metros sobre el PCO, aproximadamente.

Para poder realizar la comparación, se llevó la medición inicial del PCO al nivel de desplazamiento que exhibía el HNP al instante de realizar dicha lectura.

Como se puede observar, el descenso de la clave del túnel se comienza a medir una vez que el HNP ya ha descendido en un porcentaje, lo que es evidente debido a que la colocación del dispositivo se realiza una vez que esta excavada y reforzada la clave del túnel, incluso, como se vio en la sección 5.2 de este capítulo, se realiza a distancias al frente de excavación muy variadas. Estas diferencias porcentuales se presentan en la tabla 1, y representan al valor X (en rojo) de la figura que se muestra a continuación. Los valores en rojo son aquellas secciones en que la lectura “cero” de subsidencia fue realizada muy cerca de la sección, y que por lo tanto pueden ser poco fiables y no representativas.



**Tabla 1: Porcentajes de Desplazamiento de los Hitos de Nivelacion Profundos (HNP), respecto al desplazamiento total, en el momento de "Lectura Cero" del Descenso de la Clave del Tunel (elaboracion propia).**

Sección PK	Lectura "Cero" de Nivelación de Clave		
	Porcentaje de Desplazamiento del HNP (X%)	Distancia a Fase I	Distancia a Fase II
GP2 (T.E.2)	0,02%	11,5	4,5
GP3 (T.E.1)	16,8%	16	7,5
GP2 (T.E.1)	16,9%	24	15
4	17,0%	12	4
GP3 (T.E.2)	21,60%	21	21
GP4 (T.E.2)	22,9%	12	12
2041	32,9%	9	9
1981	38%	25	15
1996	42,9%	25	13
3495	45,9%	14,5	8,5
2007	48,9%	30	18
3550	52%	10	6
3480	54,3%	24,5	15,5
3510	59%	23,5	15,5

De la tabla, se pueden observar porcentajes de desplazamientos muy variados, entre 16,8% y 59%, con un promedio de 36%. Lo anterior, sin contar las secciones en rojo y la GP2 cuyo comportamiento, difiere fuertemente con las demás.

Particularmente, la sección GP2 (T.E.2), que es la segunda que se comienza a medir, presenta un desplazamiento del 0,02% respecto a su desplazamiento final, y su lectura "cero" presenta las menores distancias al frente en Fase II, de 4,5 metros.

De los gráficos de la figura 64, es posible observar que las curvas azules y rojas no descienden en la misma magnitud. Se observan diferencias finales de entre -5 milímetros y -22 milímetros, con un promedio de -11,5 milímetros aproximadamente. En la zona del entronque entre la galería principal y el Túnel Estación 1, lugar donde se realizaron las inyecciones, este promedio es de 12,1 milímetros, mientras que en el Túnel Estación 2, es de -12,6 milímetros. La diferencia entre ambas curvas, tiende a aumentar con el tiempo.

Con respecto a la forma de las curvas, en algunas de ellas es posible percibir un movimiento conjunto entre ambas variables, en relación a la velocidad de desplazamiento que presentan (pendiente). Esto se ve con mejor claridad en las secciones 1962, GP2, GP3 y GP4 del Túnel Estación 1 y GP2 del Túnel Estación 2, las que en su mayoría, son secciones cercanas al Pique de Estación.

En estos gráficos se puede ver también con más claridad la diferencia en las fluctuaciones entre las mediciones en superficie y las mediciones subterráneas. Mientras que las mediciones de subsidencia presentan poco o nada de fluctuaciones, con algunas de ellas presentes de manera eventual en el desarrollo de las curvas, las mediciones de convergencia del descenso de la clave del túnel exhiben oscilaciones frecuentes en torno a su tendencia y de gran magnitud porcentual respecto al desplazamiento final que tienen.

No se observan cambios significativos en las curvas durante y después de las inyecciones de lechada, sin embargo, se logran distinguir pequeñas fluctuaciones en las curvas del descenso de la clave, por sobre lo normal después de realizados estos procedimientos.

## **6 Discusión y Análisis.**

En este capítulo se realiza primero un análisis de los resultados observados en el Capítulo 5, y luego un análisis de la propuesta de instrumentación y monitoreo.

### **6.1 Monitoreo de Subsidiencias.**

#### **6.1.1 Túneles Estación.**

El primer análisis hace referencia a las lecturas “cero” de las mediciones. Como fue posible observar en la sección 5.1.1 del capítulo anterior, éstas fueron realizadas a distintas distancias entre el frente de excavación y la sección observada. Este comportamiento se replica, incluso en aquellas secciones que no fueron presentadas en el capítulo 5. Por ejemplo, en la figura 49, se observa que las lecturas “cero” de las secciones 1962 y 1964, del Túnel Estación 1, fueron realizada a 8 metros y 6 metros respectivamente, lo que equivale a 0,6 veces el diámetro del túnel, mientras que en las secciones 3545 y 3550 del Túnel Estación 2, estas distancias fueron de 1 metro y 6 metros respectivamente (0,076 veces el diámetro del túnel). En ambos casos, las curvas presentan pendientes negativas inmediatamente después de la lectura “cero”, particularmente abruptas en las secciones 3545 y 3550, dando a entender que se vendría desplazando de antes. Lo anterior es indicativo que posiblemente se haya perdido parte de la historia de desplazamientos, y el movimiento final sea en realidad, un porcentaje de la real. Por otro lado, en la sección 3450, la “lectura cero” fue realizada una vez excavada la bóveda en ese sector, por lo que solo se registra el desplazamiento posterior, correspondiente a la Fase de Banco. Este último comportamiento se observa solo en la sección señalada, por lo que posiblemente hubo un problema particular en su medición. Aun así, no hay registro de lo anterior. Por el contrario, en la sección 1981 (figura 48, Capítulo 5), la distancia al frente con que fue realizada la lectura “cero” fue de 30 metros (2,3 veces el diámetro del túnel), y en esta, efectivamente se logran ver una serie de desplazamientos neutros que confirman un registro total de la historia de deformación de la sección respectiva. La siguiente tabla representa un resumen de las distancias al frente con que fueron realizadas las lecturas “cero” en las distintas secciones.

**Tabla 2: Distancias al frente de “lecturas 0”. Monitoreo de Subsidiencias. Túnel Estación 1.**

<b>Túnel Estación 1</b>			
<b>Sección PK</b>	<b>Fecha de Lectura 0</b>	<b>Ubicación del Frente Fase I (PK)</b>	<b>Distancia al Frente</b>
1946	31/01/2014	1970	24
1956	31/01/2014	1970	14
1962	31/01/2014	1970	8
1964	31/01/2014	1970	6
1972	05/02/2014	1968	-4
1981	21/10/2013	Galería Principal (32 m)	28
1996	14/11/2013	Galería Principal (35,5 m)	13
2007	02/08/2013	Previo al Inicio de la GP	Pique ya Excavado
GP2 (10)	02/08/2013	Previo al Inicio de la GP	Pique ya Excavado
GP3 (18)	02/08/2013	Previo al Inicio de la GP	Pique ya Excavado
GP4 (26)	02/08/2013	Previo al Inicio de la GP	Pique ya Excavado
2041	21/10/2013	2010	31

**Tabla 3: Distancias al frente de “lecturas 0”. Monitoreo de Subsidiencias. Túnel Estación 2.**

<b>Túnel Estación 2</b>			
<b>Sección PK</b>	<b>Fecha de Lectura 0</b>	<b>Ubicación del Frente Fase I (PK)</b>	<b>Distancia al Frente</b>
3450	10/10/2014	Pasado	Negativa
3465	04/06/2014	3475	10
3480	30/04/2014	3498,5	18,5
3495	10/04/2014	3512	17
3510	08/10/2013	Inicio GP	-
GP2 (10)	08/10/2013	Inicio GP	10
GP3 (20)	08/10/2013	Inicio GP	20
GP4 (26)	08/10/2013	Inicio GP	26
3530	08/10/2013	Inicio GP	-
3545	12/03/2014	3544	1
3550	12/03/2014	3544	6

Las secciones en rojo son aquellas secciones que exhiben distancias al frente de excavación, muy pequeñas, y por ende, no logran registrar toda la historia de desplazamiento. En otras palabras, corresponden a mediciones relativas. Las secciones en verde son aquellas que tienen distancias al frente de excavación adecuadas y/o exhiben desplazamientos iniciales neutros. Estas mediciones corresponden a mediciones absolutas.

Adicionalmente, de las tablas anteriores es posible observar que las secciones de la galería principal (GP) de ambas estaciones se comenzaron a medir después de la

excavación del Pique de Estación. De aquí surge la interrogante de si hubo desplazamientos de subsidencias durante la excavación de este mismo, o si estas comenzaron cuando se inició la excavación de las obras subterráneas.

Con respecto a las curvas mismas, es posible identificar las siguientes particularidades.

Las curvas exhiben pocas oscilaciones respecto a la tendencia que tienen. Adicionalmente, se logran medir descensos consecutivos muy pequeños, por lo que a priori, la precisión es buena. En la sección 6.2 se realiza un análisis más detallado de las fluctuaciones que presentan las curvas y de la precisión del sistema de medición.

Todas las secciones presentan historias de desplazamiento entre los 400 y 700 días, coincidentes con la duración y paralización de las distintas fases constructivas de las obras subterráneas.

Los desplazamientos observados en las curvas están asociados a los avances de las distintas fases de construcción, lo que se observa en los distintos cambios de pendiente mencionados en el Capítulo 5. Dado lo anterior, se puede inferir la ausencia de otros procesos que pudieran provocar desplazamientos adicionales de subsidencia, como son las deformaciones por “creep”, por ejemplo. Lo anterior, debido principalmente a las características del suelo (gravas de Santiago) en donde se emplazan las obras, el cual es muy rígido.

Los cambios de pendiente más abruptos que se observan en todas las secciones se asocian a la llegada de las Fase I y II, particularmente de la Fase II, sin embargo en la sección 1962 de la figura 49 se aprecian cambios aún mayores asociados a los períodos de excavación de las Galerías Secundarias Norte y Sur. Lo anterior, es posible que se deba a que la bóveda de estas galerías se excava, a diferencia del Túnel Estación, en una sola fase, por lo que provocan una reacción del suelo distinta. Estos cambios de pendiente se producen por la excavación de galerías transversales al eje del T.E. Lo que ocurre es que el suelo ya ha tenido algo de relajación, y es una zona de mayor desconfinamiento, lo que se traduce en un mayor movimiento del suelo (Ulloa, J, C. 2016).

Con respecto al método constructivo de los Túneles Estación, propuesto por la SDO (Método de “bóveda Auto-Portante”), es posible validarlo si se calculan los porcentajes de desplazamiento, con respecto a la total, de las fases de bóveda y Banco, en aquellas secciones que fueron capaces de registrar la historia completa de deformación.

Como se vio en el Capítulo 3 (sección 3.4.2 Concepto del Nuevo Método Constructivo), una de las características principales de adoptar este método era la de minimizar las subsidencias producidas después de la excavación de la bóveda, la cual debía presentar el 80% del desplazamiento final, según el diseño (Metro. 2013. G).

En los siguientes apartados se presentan algunos de estos porcentajes, sin considerar las secciones que exhiben desplazamientos relativos.

Las secciones 1946, 1981, 1996 y 2041 del Túnel Estación 1, y las secciones 3465, 3480 y 3495 del T. Estación 2 no son afectadas por los eventos de avance de la Galerías Principal y Secundaria, es decir, solo descienden debido al avance del Túnel Estación, y los porcentajes de desplazamiento que presentan en las fases de bóveda, Banco y Contra-bóveda (CB) se ilustran en la siguiente tabla:

**Tabla 4: Porcentajes de Desplazamiento de las Fases de Bóveda, Banco y Contra-Bóveda c/r a la final (elaboración propia).**

Porcentaje c/r a Desplazamiento Final										
T. Estación	Sección PK	Bóveda								Banco y CB
		HNS 1	HNS 2	HNS 3	HNP 4	HNS 4	HNS 5	HNS 6	Promedio	Promedio
T. Estación 1	1946	-	64%	70%	73%	66%	63%	-	<b>67%</b>	<b>33%</b>
	1981	-	-	-	81%	74%	67%	60%	<b>71%</b>	<b>29%</b>
	1996	-	-	84%	86%	84%	82%	77%	<b>82%</b>	<b>18%</b>
	2041	-	-	56%	36%	38%	27%	-	<b>39%</b>	<b>61%</b>
T. Estación 2	3465	59%	61%	67%	73%	66%	61%	-	<b>64%</b>	<b>36%</b>
	3480	-	69%	69%	74%	70%	60%	-	<b>68%</b>	<b>32%</b>
	3495	-	71%	74%	77%	73%	64%	-	<b>72%</b>	<b>28%</b>

A excepción de la sección 2041, se pueden observar porcentajes de desplazamiento en la fase de bóveda muy similares, entre el 64% y el 82%, con un promedio de 71%. Lo anterior implica que si bien, un gran porcentaje estos desplazamiento ocurren durante la fase de bóveda, la estabilidad total no es alcanzada sino hasta que se finalizan las fases de Banco y Contra-bóveda. Un ejemplo de dicho comportamiento se observa en la figura 65, en la sección 1946 ubicada al final del T.E Poniente del T. Estación 1.

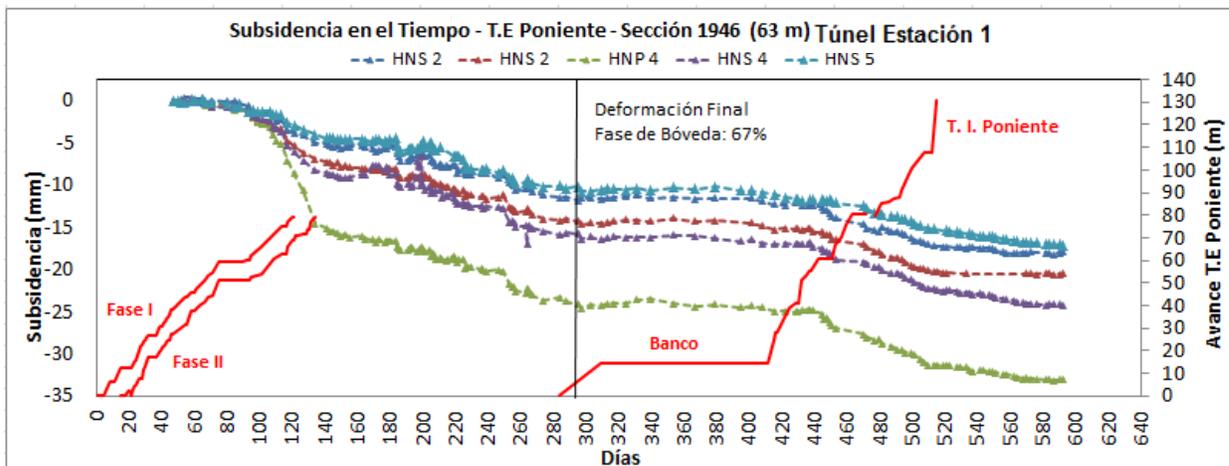


Figura 63: Resultados del Monitoreo de Subsidiencias, sección 1946. Porcentaje de desplazamiento en la fase de bóveda.

Por otro lado, en aquellas secciones que se ven afectadas por los avances de las galerías transversales, los porcentajes son distintos, y la estabilización se alcanza de manera progresiva, lo que se ve particularmente en la sección a 24 metros de la Galería Principal del Túnel Estación 2, en la intersección con eje el túnel estación.

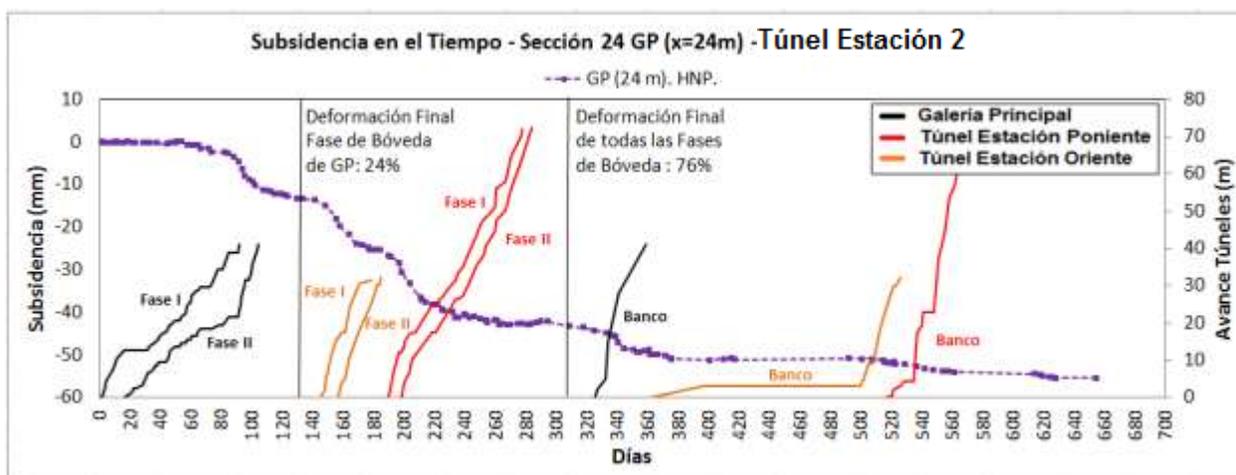


Figura 64: Resultados del Monitoreo de Subsidiencias, sección 24 GP, Túnel Estación 2. Porcentajes de desplazamiento en la fase de bóveda.

Como se puede ver en la figura 64, el porcentaje de desplazamiento una vez finalizada la fase de bóveda de la Galería Principal es de un 24%, es decir, solamente un cuarto del desplazamiento final se produce en esta etapa. Sin embargo, si se toma en cuenta la fase de bóveda completa de toda la estación, este porcentaje llega a un 76%, valor similar a aquellos observados en la tabla 5, por lo que desde ese punto de vista, la estabilización se produce en su mayoría en dicha fase, y se acerca al valor esperado del método constructivo, de 80%.

Con respecto a los desplazamientos transversales al eje del túnel de la figura 53, se logra observar el desarrollo de cubeta de subsidencias, similares a aquellas estudiadas en la revisión bibliográfica, en el caso del Túnel Estación 1, con extensiones que superan los 10 metros, hasta aproximadamente 15 metros. Mientras que para el Túnel Estación 2, a pesar de exhibir aproximadamente las mismas magnitudes en los desplazamientos finales, no se logran observar las mismas formas en las curvas, debido a que los hitos de nivelación que deberían haber estado en el eje central del túnel, se encuentran en realidad a 2 metros de distancia de este, alterando así la forma de las cubetas transversales. En la tabla 5, se adjunta un breve resumen con estos desplazamientos, los que fueron extraídos de los gráficos de la figura 53, a través de las interpolaciones hechas por programa mismo.

**Tabla 5: Desplazamientos transversales al eje del Túnel Estación (elaboración propia).**

Distancia	Túnel Estación 1			Túnel Estación 2			Promedio (mm)
	1981	1946	1996	3465	3480	3495	
<b>Transversal al Eje</b>							
<b>5 metros</b>	25 mm	20 mm	22 mm	15 mm	15 mm	18 mm	19,2
<b>10 metros</b>	21mm	16 mm	16 mm	9 mm	18 mm	15 mm	15,8
<b>15 metros</b>	18 mm	-	12 mm	5 mm	-	5 mm	10

Tomando en cuenta los valores admisibles utilizados para los estudios de afección a edificios y puntos singulares importantes que se presentaron en la sección 4.1.6 del Capítulo 4, y considerando que ambos túneles estación están emplazados en zonas sin edificaciones, es posible afirmar que los valores de la tabla se encuentran dentro del rango considerado como seguro (rango "Verde").

### **6.1.2 Túneles Interestación (entre los Túneles Estación 1 y 2).**

Con respecto a los resultados del monitoreo de subsidencias del Túnel Interestación en estudio, es posible hacer el siguiente análisis:

En lo referente a las lecturas “cero”, se pueden ver características parecidas a aquellas vistas en los túneles estación. En algunas secciones es posible apreciar distancias entre el frente de excavación lecturas “cero” positivas, que debiesen asegurar el registro total de la historia de desplazamiento, sin embargo también es posible observar algunas que son negativas, es decir, con el frente de excavación ya pasado. En la figura 54 se puede ver que las secciones 2180 y 2220 presentan distancias al frente de excavación (en lo referente a las lecturas “cero”) de 66 metros y 106 metros respectivamente, mientras que las secciones 2500 y 2900 presentan -47,5 metros y -4 metros respectivamente. Estas últimas dos posiblemente hayan perdido parte de la historia de desplazamiento. En la sección 2500 se observan una serie de desplazamientos cercanos a 0, por lo que no queda claro si hay pérdida de historia de desplazamiento o no, mientras que en la 2900, se observa una pendiente al inicio, lo que posiblemente es indicativo de que son mediciones relativas.

Con respecto a las curvas, en todos los gráficos se observan desplazamientos finales de aproximadamente -6 milímetros, que en magnitud son considerablemente menores que aquellas observadas en los Túneles Estación, incluso en aquellas secciones que exhiben desplazamientos relativos. De aquí surge la duda de si esas distancias al frente de excavación con que se efectuaron las lecturas “cero” (de las secciones 2500 y 2900) son efectivamente negativas, sin embargo no hay registro disponible que pueda confirmar lo anterior.

Adicionalmente, de los gráficos de desplazamiento v/s distancia al frente se logra apreciar que las secciones 2180 y 2220 se comienzan a desplazar cuando el frente está a 50 metros y 90 metros respectivamente, distancias que son extremadamente grandes. Lo anterior es atribuible probablemente a que los frentes se excavan a sección completa y a velocidad de avance mayores que en los Túneles Estación, sin embargo, la poca cantidad de secciones que se pueden observar no permiten

generalizar este comportamiento, por lo que no queda claro cuánto pueden ser estas distancias, y solo sirven como valores de referencia.

De la misma figura se puede ver que no se alcanzan a generar cubetas de subsidencia transversales, o al menos no son apreciables con los datos de monitoreo y gráficos disponibles. Lo anterior podría deberse a que los túneles interestación tienen un diámetro promedio de 8,6 metros (0,6 veces el diámetro del T. Estación) y tapadas mínimas y máximas sobre la clave de 14,9 metros y 16,8 metros respectivamente, las cuales son mayores que las de los Túneles Estación. Como se vio en la revisión bibliográfica (sección 2.3 “Patrones de Deformación del Suelo en torno a la excavación de un túnel”) mientras mayores son las tapadas y menores son los diámetros de excavación, mayor es el factor  $\frac{H}{D}$  y por ende menor debiera ser la propagación hacia la superficie de los movimientos en profundidad. Cabe mencionar, que existen otros factores que podrían afectar estos movimientos, y que esta tendencia se da de manera general, pero no se debe asumir que se da para todos los casos.

Es importante mencionar también, que el número de secciones disponibles a analizar, es considerablemente menor que en los Túneles Estación, ya que idealmente, estas secciones se ubican cada 200 metros o en puntos singulares importantes.

## **6.2 Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave.**

Como primer análisis, se hace referencia a la instalación y lecturas “cero” de los puntos de control en las obras subterráneas, para las mediciones de convergencia.

Tal como se describió en la sección 5.2 y lo que se vio en las figuras 56 a 63, las distancias de instalación de los puntos de control óptico, y de lectura “cero”, con respecto a la ubicación de los frentes son extremadamente variadas. Esto se puede observar de manera más resumida en la tabla 6, de la siguiente página. En rojo, se resaltan aquellas secciones que exhiben tiempos entre la instalación y la lectura “cero” de los puntos de control óptico, de más de 20 días. Como se puede ver, la mayoría de las secciones en los túneles estación presentan esta característica.

**Tabla 6: Fechas y Distancias al frente de la instalación y correspondiente lectura “cero” de cada dispositivo.**

	Instalación			Lectura 0				
	PK	Fecha	Distancia a Fase I (m)	Fecha	Días c/r a Instalación	Distancia a Fase I (m)	Distancia a Fase II (m)	Avance c/r a Instalación (m)
<b>Túnel Estación 1</b>	1941	16/04/2014	11,5	29/04/2014	13	11,5	11	0
	1956	24/02/2014	2	16/04/2014	51	26,5	18	24,5
	1962	11/03/2014	12,3	11/03/2014	0	13	4,5	0,7
	1972	20/02/2014	16	05/03/2014	13	22,3	14,5	6,3
	1981	30/01/2014	10	20/02/2014	21	25	14,5	15
	1996	17/01/2014	13	30/01/2014	13	25	14,5	12
	2006	27/12/2013	8	24/01/2014	28	30	18	22
	GP1	29/08/2013	4	09/09/2013	11	9	3	5
	GP2 (10m)	12/09/2013	2	04/11/2013	53	24	15	22
	GP3(18m)	22/10/2013	16	09/11/2013	18	16	7,5	0
	GP4(26m)	09/11/2013	8	10/12/2013	31	12	12	4
	GP5	21/11/2013	2	16/12/2013	25	6	6	4
	2026	06/03/2014	11	16/04/2014	41	23,5	15,5	12,5
	2041	19/03/2014	9	02/05/2014	44	9	9	0
	<b>Túnel Interestación</b>	2052	19/08/2014	10	19/08/2014	0	10	NA
2060		12/09/2014	19	12/09/2014	0	19	NA	0
2080		06/10/2014	34	06/10/2014	0	34	NA	0
2100		19/02/2015	29	19/02/2015	0	29	NA	0
2120		19/02/2015	9	19/02/2015	0	9	NA	0
2140		24/03/2015	37	24/03/2015	0	37	NA	0
2160		27/03/2015	20	27/03/2015	0	20	NA	0
2180		14/04/2015	16	14/04/2015	0	16	NA	0
2200		24/04/2015	10,5	24/04/2015	0	10,5	NA	0
2220	13/05/2015	11,5	13/05/2015	0	11,5	NA	0	
<b>Túnel Estación 2</b>	3450	11/07/2014	9,5	21/07/2014	10	10,5	NA	1
	3465	01/07/2014	16,5	01/07/2014	0	16,5	6	0
	3480	03/06/2014	5,5	24/06/2014	21	24,5	15,5	19
	3495	02/05/2014	1,5	27/05/2014	25	14,5	8,5	13
	3510	21/04/2014	10,5	13/05/2014	22	23,5	15,5	13
	GP1	29/10/2013	9,8	16/11/2013	18	17,5	9,5	7,7
	GP2 (10m)	30/10/2013	2,8	29/11/2013	30	11,5	4,5	8,7
	GP3 (20m)	26/11/2013	2	31/01/2014	66	21	21	19
	GP4 (26m)	03/01/2014	15	31/01/2014	28	15	15	0
	GP5	03/01/2014	7	04/02/2014	32	7	7	0
	3530	07/03/2014	9	17/03/2014	10	15,5	2,5	6,5
	3545	21/03/2014	8,5	15/04/2014	25	14,5	14,5	6
	3550	15/04/2014	6,5	15/04/2014	0	9,5	6,5	3

Lo anterior es perjudicial para el monitoreo, debido a que mientras mayor sean estos tiempos, menor es el registro de desplazamiento que se tiene y es más pobre la comparación que se puede hacer.

El comportamiento anterior, no ocurre en los túneles interestación, ya que como se ve en la tabla 6, la instalación y posterior lectura “cero” coinciden en el día. Probablemente, se debe a que la secuencia de excavación de los túneles interestación se realiza a sección completa, lo que permite una instalación rápida y más fácil de los puntos de control óptico, mientras que en los túneles estación la secuencia se realiza en varias fases, lo que impide la colocación y medición inmediata de los dispositivos, debido a que el método mismo es mucho más invasivo desde el punto de vista de las labores constructivas que demanda.

Por otro lado, en la misma tabla 6 se pueden observar las distancias al frente con que se efectuaron las lecturas “cero” en cada sección de monitoreo del descenso de la clave. Entendiendo que estas distancias, a diferencias de las mediciones de subsidencia, están por detrás del frente. Con respecto a los túneles estación, las distancias mínimas y máximas observadas a Fase I son de 6 metros y 30 metros, con un promedio de 16,8 metros, mientras que a Fase II son de 2,5 metros y 21 metros, con un promedio de 11,11 metros. Estas distancias son mayores que las recomendadas y perjudican las mediciones y su interpretación, debido a que, mientras mayor es la distancia al frente con que se realiza la primera lectura, menor es el registro de desplazamiento que se obtiene y nuevamente, más pobre es la comparación que se puede hacer con los resultados obtenidos por las memorias de cálculo, que en general solo arrojan los desplazamientos finales en cada fase. Sumado a lo anterior, se dificulta también la comparación que es posible hacer entre secciones adyacentes, dado que las mediciones no se realizan en igualdad de condiciones.

El cumplimiento o no de los requerimientos para la instalación y lectura “cero” de los puntos de control óptico (4.1.3.1), con respecto a las especificaciones técnicas del monitoreo, se analiza en la sección 6.5 de este capítulo.

Con respecto a las curvas mismas del descenso de la clave, observadas en la sección 5.2 se pueden identificar las siguientes particularidades.

Los valores de alerta (55 mm) y alarma (65 mm), correspondientes al Túnel Estación 1 y de 45 mm y 55 mm en el Túnel Estación 2 no son alcanzados en ninguna sección, sin embargo estos valores no consideran lo visto en la tabla 6, respecto a las entre el frente de excavación y la lectura “cero”, o al menos no hay registro de aquello, por lo que hay cierta incertidumbre respecto a si efectivamente se cumplen.

Como se dijo en la sección 5.2, estas curvas del descenso de la clave presentan considerablemente mayores fluctuaciones que las de subsidencia, con valores que representan porcentajes importantes con respecto al descenso final de algunas secciones. El motivo de estas fluctuaciones se estudia con mayor esmero en la sección 6.3.

No obstante a lo anterior, estas oscilaciones perjudican considerablemente a la interpretación inmediata de los resultados, ya que se requiere un número mayor de mediciones para observar tendencias reales. Inclusive, en algunas se observan tendencias positivas, que aluden a que el punto de control subió, lo que es poco probable, debido a que las presiones del suelo son ejercidas hacia abajo.

### **6.3 Fluctuaciones (ruido) en las Curvas.**

Como se mencionó en las secciones anteriores, las curvas de subsidencia y las del descenso de la clave del túnel presentan comportamientos distintos con respecto a las fluctuaciones que exhiben en torno a su tendencia.

Estas variaciones se generan principalmente debido a tres efectos, ordenados con respecto al nivel de influencia que pueden tener en las mediciones:

1. La primera, es que estén asociadas a una alteración del punto de control óptico, del punto fijo de referencia o de la metodología de medición (error por equivocación, sección 2.5.3.1.2). Por ejemplo, el movimiento (o reposición) accidental de un punto de control óptico puede generar movimientos instantáneos de órdenes de magnitud mayores que aquellos exhibidos por las

deformaciones de convergencia. Estas alteraciones pueden repetirse, pero no exhiben una frecuencia constante, por lo tanto, son de carácter eventual.

2. La segunda, es que estén asociadas a la precisión del sistema de medición, y que las fluctuaciones que se observan sean efectivamente errores aleatorios (sección 2.5.3.1.2). Este tipo de fluctuaciones se presentan durante todo el proceso de medición y en general, si la metodología de medición es más o menos siempre la misma, mantienen su orden de magnitud.
3. Finalmente, pueden representar la vibración natural del punto de control, sin embargo esta debiera ser de un orden de magnitud menor a los efectos de los puntos anteriores.

Como se mencionó en el capítulo 5, las curvas de subsidencia presentan fluctuaciones pequeñas, poco frecuentes y aleatorias, con respecto a su tendencia. Lo anterior es indicativo de que están más asociadas al punto 1 anterior (página 102).

Por otro lado, en las mediciones subterráneas (convergencias), las fluctuaciones son de carácter frecuente y tienen aproximadamente el mismo orden de magnitud a lo largo de su historia. Adicionalmente, se observan desviaciones de carácter eventual por sobre el promedio en algunas curvas. Dado lo anterior es posible concluir que estas oscilaciones representan la suma de todos los puntos anteriores.

En la siguiente sección se realiza un análisis de la precisión de cada sistema de medición, con el fin de entender mejor estas fluctuaciones y poder distinguirlos de mejor manera.

## **6.4 Precisión Teórica de los Sistemas de Medición.**

### **6.4.1 Monitoreo de Subsidencias.**

En la figura 45, capítulo 4, se definió que para las mediciones de altura, la precisión del Nivel Leica DNA10 era de 0,9 mm por nivelada doble de un kilómetro (one kilometer double-run leveling), con mira Invar, la cual está definida mediante la norma ISO 17123-2. Esta norma define los procedimientos de campo para la determinación y

evaluación de la incertidumbre en las mediciones obtenidas por instrumentos geodésicos y sus dispositivos auxiliares.

La precisión especificada se mide en función de la desviación estándar que presenta una serie de 40 mediciones entre dos puntos ubicados a 60 metros entre ellos, y con el Nivel a mitad de distancia, de acuerdo a la siguiente fórmula (ISO 17123-2):

$$s_{ISO-LEV} = \frac{s}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1000 \text{ m}}{60 \text{ m}}} = s * 2.89$$

Donde:

$s_{ISO-LEV}$ : *Desviación Estándar por nivelada doble de 1 km (Presición Instrumental).*

$s$ : *Desviación estándar experimental válida para 1 diferencia de nivel a una distancia de 60 m.*

Evaluando la fórmula anterior para una  $s_{ISO-LEV} = 0.9 \text{ mm}$ , da como resultado:

$$s = \pm 0.311 \text{ mm}$$

Esta desviación estándar debiera estar, aproximadamente, dentro del orden de magnitud del error real en la determinación de desniveles de hitos de nivelación mediante nivelaciones geométricas abiertas, con una posición instrumental. Si se utilizan dos posiciones instrumentales, aplicando la fórmula de la ley especial de propagación de errores para una operación de resta entre desniveles, da lo siguiente:

$$s = \pm \sqrt{0.311^2 + 0.311^2} = \pm 0.44 \text{ mm}$$

Es posible realizar una comparación entre estas precisiones teóricas con aquellas determinadas a partir de las mediciones reales, utilizando segmentos de curvas de subsidencia que aún no presentan desplazamiento alguno y que poseen un número considerable de lecturas que oscilan en torno cero. Dado lo anterior, es razonable suponer que en estos tramos las curvas se aproximan de mejor manera mediante una línea recta, y que la precisión viene dada por el “error estándar” de dicha estimación.

En la figura 65 se observan los segmentos de las 11 curvas de subsidencia que se utilizaron (no todas presentadas en este trabajo).

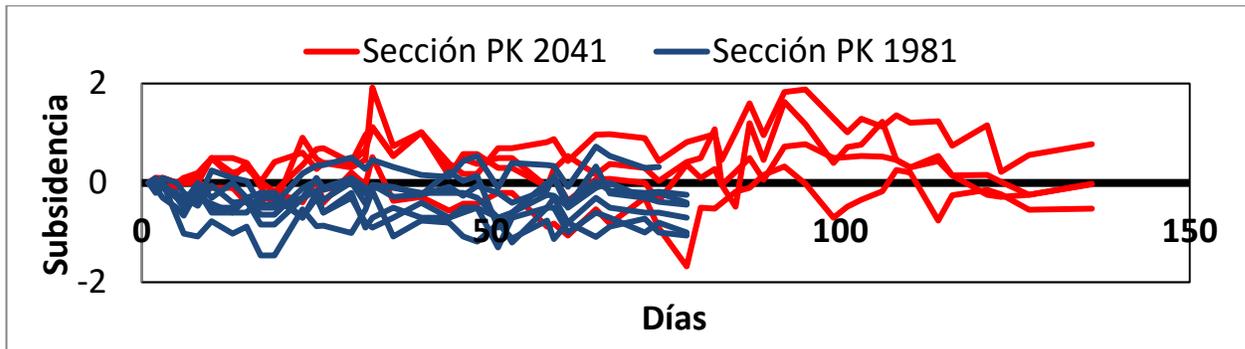


Figura 65: Segmentos escogidos para el cálculo empírico de la precisión del Sistema de Medición de Subsidencias.

El error estándar de una estimación, es una medida de la precisión de una estimación hecha a partir de una regresión lineal. La fórmula viene dada a continuación:

$$S_r = \sum_{i=1}^N [y_i - (a_0 + a_1 x_i)]^2$$

$$S_{y/x} = \sqrt{\left(\frac{S_r}{N-2}\right)} \rightarrow \text{Error Estándar}$$

Aplicando esta fórmula a cada una de las curvas, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 7: Errores Estándar de las curvas de Subsidencia de la figura 52.

0,32	0,49	0,37	0,39	0,25	0,38	0,43	0,24	0,33	0,29	0,32
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Lo que finalmente da un error estándar promedio de 0,35 mm. Este resultado arroja un valor similar a aquel calculado a partir de la precisión instrumental del nivel electrónico Leica DNA10, o al menos del orden de magnitud esperado.

Es evidente que los cálculos efectuados no arrojen resultados exactos, dado que en las mediciones de campo no se cumplen idealmente los supuestos que se hicieron para el cálculo de la precisión teórica (se cumplen en promedio), no obstante, es válido aprobar la aptitud de la metodología de medición, ya que existe coherencia entre el rango de medición y la precisión del sistema.

#### 6.4.2 Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave.

En la nivelación trigonométrica participan muchas más variables que en la nivelación geométrica, por lo que en esta metodología hay considerablemente más errores presentes, muchos de ellos difíciles de identificar, ya que en estricto rigor una estación total es la fusión de dos instrumentos, los cuales tienen precisiones instrumentales independientes. Es por lo anterior que un cálculo teórico de la precisión de dicho sistema es menos fiable que aquel realizado en la sección anterior, sin embargo, si se asume que los errores sistemáticos son eliminados, un cálculo como este puede ser de utilidad para ver el potencial de medición que tiene el sistema.

Las precisiones (desviaciones estándar ISO 17123) de la estación total Leica TM30 son las siguientes.

- Medición de ángulos (Hz y V): 1" (0,3 mgon).
- Medición de distancias con el dispositivo EDM:
  - Prismas:
    - Modo Preciso: 0,6mm + 1ppm (demora: 7 segundos).
    - Modo Estándar: 1mm + 1ppm (demora: 2,4 segundos).
    - Modo rápido: 3mm + 1ppm (demora: 0,8 segundos).
    - Modo Promedio: 1mm + 1ppm
  - Diana reflectante:
    - Modos Preciso/Normal/Promedio: 1mm + 1ppm.
    - Modo Rápido: 5mm + 1ppm.

A continuación se presenta el cálculo de la precisión teórica. Se utilizó como hoja de cálculo el programa MATHCAD y como esquema, el de la figura 68.

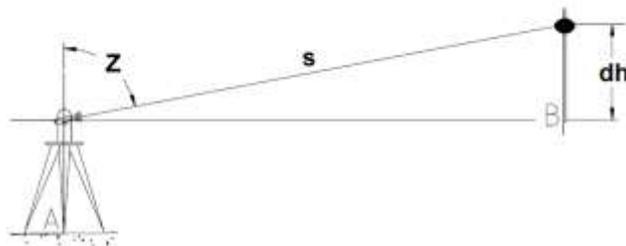


Figura 66: Esquema Nivelación Trigonométrica.

Considerando que S1 es la distancia inclinada hacia punto de referencia fijo, y S2 es la distancia hacia adelante, y que la coordenada del punto fijo de referencia ya es conocida y es constante en un tiempo determinado (no tiene error asociado).

$$S1 := 50000 \text{ mm} \quad S2 := 50000 \text{ mm}$$

'Angulo Z:

$$Z := 75$$

Precisiones Instrumental de lectura de ángulos (Leica TM30), del compensador (Leica TM30) y la precisión en apuntar (Charles. D & Paul. R):

$$\sigma_{IN} := 1 \quad \sigma_B := 0.2 \quad \sigma_p := 0.2 \text{ mm}$$

Precisión final del ángulo Z y conversión a radianes:

$$\sigma_Z := \sqrt{(2 \sigma_{IN}^2 + \sigma_B^2)} = 1.428$$

$$\sigma_{Zdeg} := \frac{\sigma_Z}{3600} = 3.967 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma_{Zrad} := \sigma_{Zdeg} \cdot \frac{\pi}{180} = 6.925 \cdot 10^{-6}$$

Precisión final de las distancias inclinadas S, asumiendo la utilización del modo Preciso/Normal/Promedio:

$$\sigma_{S1} := \sqrt{1 \text{ mm}^2 + (1 \cdot 10^{-6} \cdot S1)^2} = 1.001 \text{ mm}$$

$$\sigma_{S2} := \sqrt{1 \text{ mm}^2 + (1 \cdot 10^{-6} \cdot S2)^2} = 1.001 \text{ mm}$$

Asumiendo que los Errores Sistemáticos fueron eliminados, y aplicando la Ley de Propagación de Errores presentada en la sección 2.5.3 para la fórmula de la nivelación trigonométrica, el error en el cálculo de cada desnivel dH es:

$$\sigma_{dh1} := \sqrt{(\sigma_p)^2 + (\cos(Z \cdot \text{deg}) \cdot \sigma_{S1})^2 + (S1 \cdot \sin(Z \cdot \text{deg}) \cdot \sigma_{Zrad})^2} = 0.468 \text{ mm}$$

$$\sigma_{dh2} := \sqrt{(\sigma_p)^2 + (\cos(Z \cdot \text{deg}) \cdot \sigma_{S2})^2 + (S^2 \cdot \sin(Z \cdot \text{deg}) \cdot \sigma_{Zrad})^2} = 0.468 \text{ mm}$$

Finalmente, para una sola posición instrumental, el error en el cálculo de la diferencia de cota entre el punto fijo y el punto en observación, que es el mismo error en calcular el descenso de la clave con respecto a un período anterior, es:

$$\sigma_{dZ} := \sqrt{\sigma_{dh1}^2 + \sigma_{dh2}^2} = 0.662 \text{ mm}$$

Para dos posiciones instrumentales:

$$\sigma_{dZ2} := \sqrt{\sigma_{dZ}^2 + \sigma_{dZ}^2} = 0.936 \text{ mm}$$

Como es posible observar, la precisión teórica en determinar el descenso de la clave es de casi 1 milímetros. Lo anterior, asumiendo que los errores tanto sistemáticos como por equivocación fueron eliminados, lo que es un caso hipotético. Otros supuestos que se hacen son con respecto a las distancias inclinadas S y el ángulo Z, sin embargo en promedio, estos valores debieran andar parecidos con los reales.

Lo importante del cálculo anterior, es tener en cuenta el orden de magnitud de la precisión potencial que tiene el sistema de medición, en condiciones idóneas. Considerando que una fracción de los errores sistemáticos siempre está presente (errores por refracción, curvatura, nivelación del instrumento, error de apuntar en la mira, entre otros) y que las distancias máximas permitidas para realizar una nivelación de alta precisión no siempre son respetadas, perfectamente se podría tener una precisión del orden de 2 o 4 milímetros, o aún más, si se aumenta el número de posiciones instrumentales dentro del túnel.

Es importante mencionar también que se asumió la utilización de los modos Normal/Preciso/Promedio en la determinación de las distancias S, por parte del dispositivo EDM. Si por algún motivo se utilizase el modo rápido, la precisión, en la determinación del descenso de la clave, para dos posiciones instrumentales pasaría a ser del orden de 1,4 milímetros.

Teniendo en cuenta el orden de magnitud que tiene la precisión teórica del sistema utilizado en la medición de convergencias absolutas, se pasa a hacer un pequeño análisis con respecto a los saltos que tienen algunas de las curvas presentadas en el capítulo 5.

La figura 69, da cuenta de los saltos presentes en la mayoría de las curvas del descenso de la clave, tanto para los túneles estación como interestación. Se observan saltos positivos y negativos desde 2,3 milímetros hasta 4,8 milímetros. Adicionalmente, en la figura 70, se observa la curva correspondiente a la sección 3545 del Túnel Estación 2, con su línea de tendencia. La desviación estándar de las mediciones, con respecto a la línea de tendencia es de 1,1 milímetros, resultado que representa el promedio de las oscilaciones en torno a la línea recta y la precisión empírica de dichas mediciones, asumiendo que esa sección no exhibe desplazamientos.

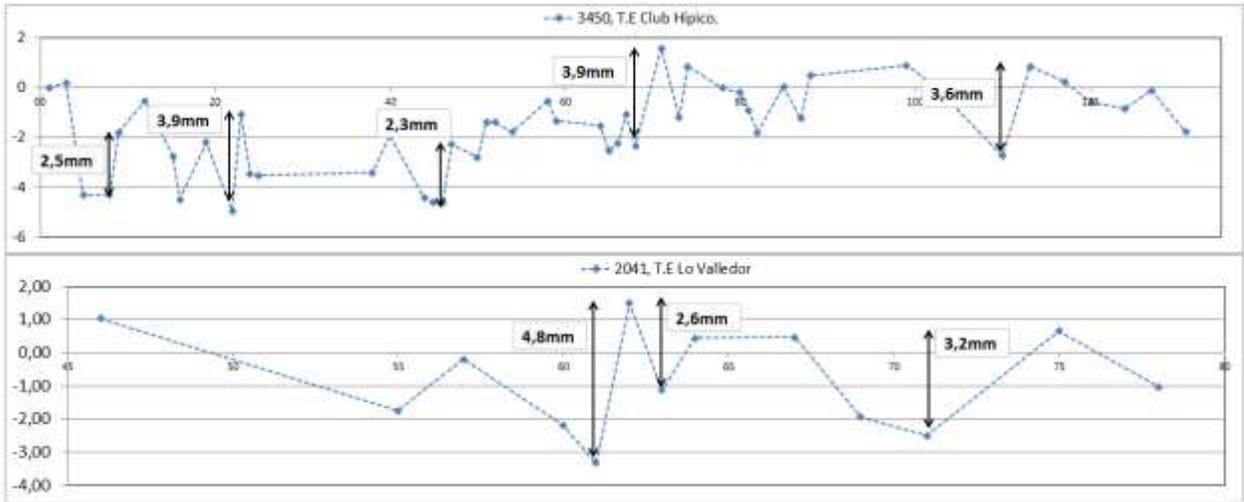


Figura 67: Magnitudes de las oscilaciones presentes en las curvas del descenso de la clave.



Figura 68: Resultado del Monitoreo del Descenso de la Clave. T. Estación 2. Sección 3545.

Como resumen del análisis de los resultados es posible señalar que existe una importante diferencia entre los resultados del monitoreo de subsidencias y los del descenso de la clave del túnel. Mientras que los primeros muestran curvas más suaves y son aparentemente capaces de representar todas las fases de excavación e hitos importantes, entregando así mucha información, los segundos muestran excesivas fluctuaciones e incertidumbre con respecto a sus desplazamientos totales.

## **6.5 Plan de Instrumentación y Monitoreo Geotécnico.**

En esta sección se analiza la propuesta de instrumentación y monitoreo empleada, acorde a todo lo observado en secciones y capítulos anteriores. Es importante mencionar que una parte de este análisis se hace en base observaciones acerca de los documentos que se adquirieron y que fueron mencionados en capítulos anteriores (ver bibliografía), por lo que se asume que son suficientemente completos en describir la propuesta ya ejecutada. Al menos no hay registros de que existan otros documentos que complementen aquellos recibidos.

### **6.5.1 Dispositivos instalados y Secciones de Monitoreo.**

#### **6.5.1.1 Monitoreo de Subsidencias.**

El conjunto de dispositivos que se utilizan en la medición de subsidencias, compuesto por niveles electrónicos, miras Invar e hitos de nivelación, presenta un correcto funcionamiento, y demuestran ser aptos en la medición de estas variables, pues efectivamente logra registrar con gran precisión el descenso de la superficie debido a cada fase de excavación. Existe coherencia entre el rango de medición y la precisión del sistema.

La comparación entre el descenso de los hitos de nivelación superficial y profunda logra monitorear la descompresión del terreno, sin embargo surge la interrogante de si los HNP son efectivos en representar el movimiento del suelo alrededor de la clave del túnel, sobre todo en estos suelos granulares con características de “desgranabilidad” importantes. A la anterior incertidumbre, se suma la distancia (de proyecto) de 3 metros

que existe entre el HNP y la clave del túnel, cuya magnitud es considerable si se toma en cuenta que la tapada es de 11 metros.

Teniendo en cuenta que los “túneles estación” estudiados se encuentran en zonas urbanas sin edificaciones grandes, y considerando las cubetas transversales observadas en los resultados del monitoreo, se estiman adecuadas las extensiones y disposiciones de los hitos de nivelación superficial, tanto en los túneles estación como interestación. Sin embargo, en los túneles estación existe poca prolijidad con respecto a la ubicación de los HNS, ya que no hay consistencia en las separaciones y extensiones de las distintas secciones de monitoreo. Si bien, inicialmente se propuso una disposición más armoniosa de los dispositivos, estos fueron desplazados debido a la imposibilidad de su colocación (Metro. 2013. F). No obstante a lo anterior, faltaron algunos HNS por colocar. Es importante mencionar que una disposición geométricamente eficiente de los HNS permite interpretar los resultados de manera más fácil.

#### **6.5.1.2 Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave.**

El conjunto de dispositivos que se utilizan para monitorear las convergencias absolutas en las obras subterráneas, en particular de la clave del túnel, compuesto por estaciones totales, prismas y miras reflectantes, presenta un comportamiento distinto que aquel esperado.

Hay dos puntos de vista con que se pueden analizar los resultados de este monitoreo. El primero de ellos alude a que es posible que los dispositivos tengan un funcionamiento adecuado, acorde a las especificaciones del fabricante, pero considerando las excesivas oscilaciones de las que se habló, se concluye que este sistema, en la manera que fue ejecutado no es del todo útil, debido a que no hay concordancia entre el rango de medición y la precisión del sistema en algunas de las secciones. Esto no es debido a los instrumentos y dispositivos utilizados, sino más bien a la metodología de medición y al método constructivo empleado en los túneles estación, el cual no permite medir de manera temprana.

El segundo punto de vista alude a que la precisión del sistema es la adecuada, sin embargo los desplazamientos esperados del revestimiento eran mucho mayores que aquellas medidas, lo que indica un desempeño del revestimiento, por sobre lo esperado, y que eventualmente se podría disminuir su espesor y refuerzo. Lo anterior podría tener mucho sentido, pero es incierto, nuevamente debido al problema con las distancias al frente que fueron empujadas las lecturas “cero”, lo que genera incertidumbre respecto a la magnitud del desplazamiento total.

Las ubicación de las secciones de monitoreo y la disposición de los puntos de control coincide con lo estudiado en la revisión bibliográfica, sin embargo, surge la interrogante de si hubiera sido más provechoso utilizar el PCO ubicado en la clave de la Fase I, en vez del central, debido a que es posible registrar más historia de desplazamiento en él. Finalmente se estimó que este PCO no se utilizaría.

## **6.5.2 Características y Requerimientos Generales de Medición.**

### **6.5.2.1 Monitoreo de Subsidiencias.**

Los requerimientos generales del monitoreo de subsidencia mencionados en la sección 4.1.4 se efectuaron en su totalidad. Se realizaron las medidas con un equipo acorde a lo solicitado y los hitos de nivelación quedaron debidamente protegidos. El principal problema radica en las lecturas “cero” tardías de algunas secciones de monitoreo. Lo anterior tiene como consecuencia que las secciones que se comenzaron a medir cuando el frente estaba muy cerca exhibieron desplazamientos relativos, y aparentemente no pudieron registrar toda la historia de desplazamiento.

### **6.5.2.2 Monitoreo Subterráneo del Descenso de la Clave.**

Las medidas se realizaron con los equipos y miras topográficas que fueron exigidos en un principio y se utilizó un software aparentemente adecuado en la manipulación y administración de los datos, de acuerdo a lo solicitado.

Los resultados reflejan por si solos la dificultad de realizar las lecturas “cero” a la distancia propuesta (5 metros), respecto al frente de excavación. En los túneles estación, el promedio de estas distancias fue de 16,8 metros a la Fase I y de 11,1 metros a la Fase II, mientras que para el túnel interestación en estudio, el promedio fue de 20,5 metro.

Aparentemente, los 5 metros propuestos son un tanto exigentes, ante un método constructivo que dificulta dicho proceso.

Con respecto a los túneles interestación, las fechas de instalación y lectura “cero” coinciden, sin embargo nuevamente las distancias al frente de estas lecturas son mayores de lo esperado. Sin embargo, se podrían mejorar, debido a que la instalación fue realizada acorde a lo propuesto.

En alguna de las mediciones se observan comentarios que apuntan a posibles extensiones de los pernos de convergencia hacia el revestimiento secundario, lo que no debiera ocurrir. Lo anterior significa que no se están instalando bien estos pernos y que al momento de extenderlos, se pierden las lecturas previas, y se reinicia su medición.

Finalmente, es importante mencionar que inicialmente se propuso como requerimiento general, la determinación de desplazamientos en un sistema de coordenadas absoluto con una precisión de 0,5 milímetros (Metro.2012. B). Sin embargo en otro documento (Metro. 2013. A) se propusieron 2 milímetros, por lo que existe una contradicción respecto de cuál es la precisión efectivamente exigida. Si fuera 0,5 milímetros, se estaría exigiendo una precisión menor que la que permite el sistema en condiciones idóneas. Si fueran 2 milímetros, probablemente estaría dentro del orden de magnitud de la precisión real del sistema.

### 6.5.3 Frecuencias de Medición.

De los resultados del monitoreo se pudo observar que las frecuencias de medición no seguían un patrón lógico, en algunos tramos eran constantes y en general mayores de lo esperado. En el afán de estudiar con mayor detalle lo observado, a partir de los desplazamientos se calculó las frecuencias de medición con que se debió haber medido, en base a los criterios propuestos por las especificaciones técnicas de monitoreo. En la figura 71 se presenta una comparación.

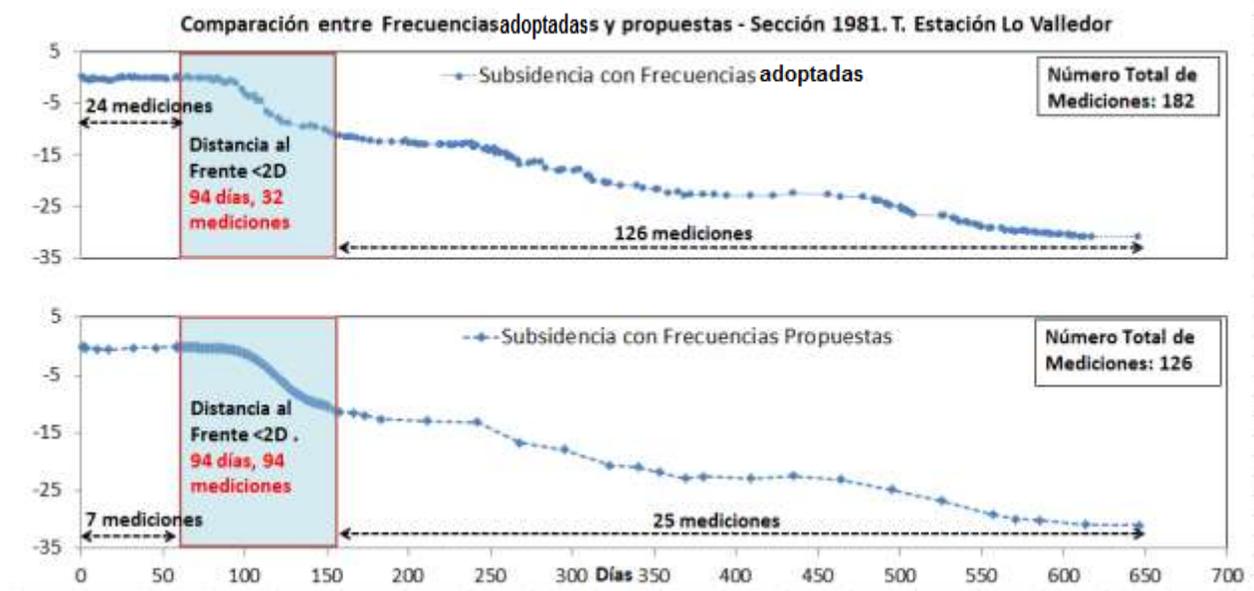


Figura 69: Comparación entre las Frecuencias ejecutadas y propuestas en las Curvas de Subsistencia. Sección 1981. Túnel Estación 1.

Como se puede observar en la figura, las frecuencias de medición no siguieron los criterios basados en las velocidades de desplazamiento. Antes de que el túnel llegara a una distancia de 2 diámetros (25 metros aproximadamente) se realizaron 24 mediciones en vez de 7. En el lapso en que el túnel se encontraba a menos de 2 diámetros de la sección se debiera haber medido diariamente según los criterios expuestos en el Capítulo 4, sin embargo de los 94 días, se midieron solo 32, con frecuencias máximas y mínimas de 9 días, y 1 día respectivamente y un promedio de 3 días. Posterior a este período se realizaron 126 mediciones en vez de 25, asumiendo que en el avance de la fase de Banco no se toma en cuenta el criterio de los 2 diámetros.

El apartado anterior da cuenta por un lado que, antes y después del período en que el túnel se encontraba a menos de 2 diámetros, el número de mediciones fue hasta 3 y 5 veces más de lo esperado, respectivamente. Lo anterior, significa que se utilizaron más HH durante todo el monitoreo de las obras subterráneas.

Por otro lado, en el período crítico ocurrió lo contrario, y el número de lecturas fue menor que el propuesto.

Es importante mencionar también que en las secciones 10, 18 y 26 de la Galería Principal la segunda lectura se realizó después de 60 días, cuando ya había un avance de 18 metros. Lo anterior, es una mala práctica.

En las mediciones subterráneas de convergencia se detectaron los mismos patrones mencionados en los apartados anteriores, sin embargo, resulta evidente que las frecuencias de medición sean mayores, debido a que las fluctuaciones excesivas generan incertidumbre en cada lectura, lo que probablemente se tradujo en tener que medir mucho más seguido, de acuerdo a lo estipulado en el informe de monitoreo, en donde se estableció que cualquier cambio brusco en la tendencia de cualquier de las magnitudes, supondría una frecuencia diaria en la siguiente lectura.

El análisis anterior, apunta a una mala ejecución de las frecuencias propuestas, o bien a que las frecuencias y sus criterios de definición propuestos en un inicio no fueron los adecuados, y durante los proyectos debieron ser ajustados debido a condiciones particulares no previsible durante el diseño, como se menciona en las especificaciones técnicas (Metro. 2012. B).

#### **6.5.4 Valores Umbrales de Control.**

Los valores umbrales de control se definen a partir de los estudios números realizados y a partir del criterio del proyectista. Dado lo anterior no es posible hacer un juicio directo respecto a las magnitudes mismas de estos valores, sin embargo, hay ciertos aspectos que vale la pena mencionar.

Estos valores admisibles no consideran (o al menos no hay registro de ello) la variabilidad en las distancias al frente de excavación con que se realizaron las lecturas “cero”, ya que estos son únicos y constantes. La consecuencia de lo anterior es que se están comparando valores que tiene un grado de incertidumbre respecto a sus desplazamientos finales reales, con los valores umbrales de control.

Desde otro punto de vista, si se toma en cuenta la precisión del sistema de medición de convergencias subterráneas, los valores umbrales de desplazamiento lateral parecen ser muy pequeños, teniendo en cuenta los saltos de casi 5 milímetros que se observaron en la sección 6.4.2 de este capítulo y considerando que la precisión de dicho sistema puede ser del orden de 1 a 3 milímetros. Lo anterior, comparado con los valores de alerta y alarma de 8 milímetros y 11 milímetros respectivamente (ver cuadro 7, página 62), establecidos para los desplazamientos laterales de los puntos de control. Esto apunta a que el sistema de medición, en la manera que está siendo ejecutado, no es apto si se quieren medir valores de desplazamiento menores a 10 o 15 milímetros aproximadamente, dado que resultaría muy difícil la interpretación de dichas mediciones.

## **7 Propuestas y Recomendaciones.**

Este capítulo tiene como fin proponer metodologías complementarias y realizar recomendaciones, en relación a la propuesta actual de instrumentación y monitoreo que se analizó, con el fin de introducir mejoras en proyectos futuros.

Con respecto al monitoreo de túneles y a los instrumentos que se destinan para esta tarea, es importante mencionar que no es necesario reinventar la rueda o proponer sistemas extremadamente sofisticados para obtener resultados fiables, sino que a veces basta con pulir o perfeccionar sistemas ya existente e incluir algunas metodologías alternativas, en caso de ser necesario.

Adicionalmente, es de suma importancia mencionar que las propuestas y recomendaciones que se presenten, ya sea en este trabajo o en cualquier otro, deben ser racionales y juiciosas, entendiendo que hay una diferencia entre lo “ideal” y lo “ejecutable”, por lo que no basta solo con exponer mejoras y escribir recomendaciones teóricas, sino que deben estar acorde a lo que realmente se puede implementar en terreno.

### **7.1 Instrumentación y Monitoreo.**

#### **7.1.1 Subsistencia.**

El sistema de medición de subsidencia resultó ser apto y fiable en las condiciones en las que se ejecutó, por lo que se propone apoyarse más en estas mediciones.

El monitoreo de los movimientos sub-superficiales del suelo mediante hitos de nivelación profunda, permitió evaluar de manera eficiente el movimiento del subsuelo, y eventualmente, si se extiende su instalación hasta el nivel de la clave del túnel (a un metro de separación por ejemplo) permitiría advertir los movimientos de esta, previo a la llegada del frente de excavación con una mayor precisión. Sin embargo, si se le da más confianza a estas mediciones, se debe asegurar una correcta ejecución. Dado lo anterior, se proponen los siguientes requerimientos mínimos de instalación y medición, los cuales tiene carácter orientativo y debieran ser incluidos explícitamente en la propuesta de instrumentación y monitoreo.

### **7.1.1.1 Requerimientos de Instalación y Medición de Subsistencia (ASG, 2014).**

La entidad a cargo del monitoreo debe tener experiencia en dichos labores e idealmente contar con la certificación ISO 9001 (Sistemas de Control de Calidad). Además, las precisiones de sus instrumentos deben ser acorde a aquellas especificadas por fábrica, lo que se verifica mediante la norma ISO 17123 (Procedimientos de Campo para la comprobación de Instrumentos Geodésicos y de Topografía).

Para cumplir con la precisión y los estándares exigidos se debe tener en consideración lo siguiente:

- Con respecto a los puntos de referencia fijos:
  - Su ubicación debe escogerse de manera estratégica, teniendo en cuenta de que se van a utilizar durante un gran período de tiempo y que van a estar sometidos a actividad humana cotidiana y a condiciones climáticas variables.
  - Se debe escoger un número adecuado, con tal de asegurar de que todas las medidas se realicen en dos o menos posiciones instrumentales.
  - Se debe asegurar de que sean efectivamente inmóviles y no estén afectados por las obras de excavación y construcción.
- Para nivelaciones de alta precisión, se recomienda utilizar un nivel electrónico combinado con miras tipo Invar.
- Como regla general, mantener las distancias hacia adelante y hacia atrás, iguales y constantes.
- Para nivelaciones de alta precisión: Distancia máxima de lectura: 30m (ASG, 2014).
- Chequear y ajustar los errores presentes en el proceso de medición, antes y durante la ejecución, en la medida que sea posible.
- Verificar las precisiones de los instrumentos cada ciertos intervalos de tiempo, largos períodos sin usar y después de ser transportados largas distancias.
- Aclimatar el instrumento a la temperatura ambiental, antes de comenzar a usarlo.

- En general, las lecturas cercanas a las excavaciones son tomadas diariamente. La frecuencia de toma de lecturas es reducida a medida que aumenta la distancia al frente y disminuye las tasas de desplazamiento. En la figura 72 se ilustra un posible esquema de frecuencias de medición y distancias mínimas para las mediciones tanto superficiales como subterráneas, para una secuencia de excavación de bóveda, banco y contrabóveda, en conjunto con el resumen de estas en la figura 73. Dicho esquema proviene del manual “Geotechnical Monitoring in Conventional Tunneling” (ASG, 2014), elaborado por la sociedad austriaca de geomecánica, y cuyo objetivo principal es mostrar el estado del arte en monitoreo de túneles, y evaluación e interpretación de sus resultados.

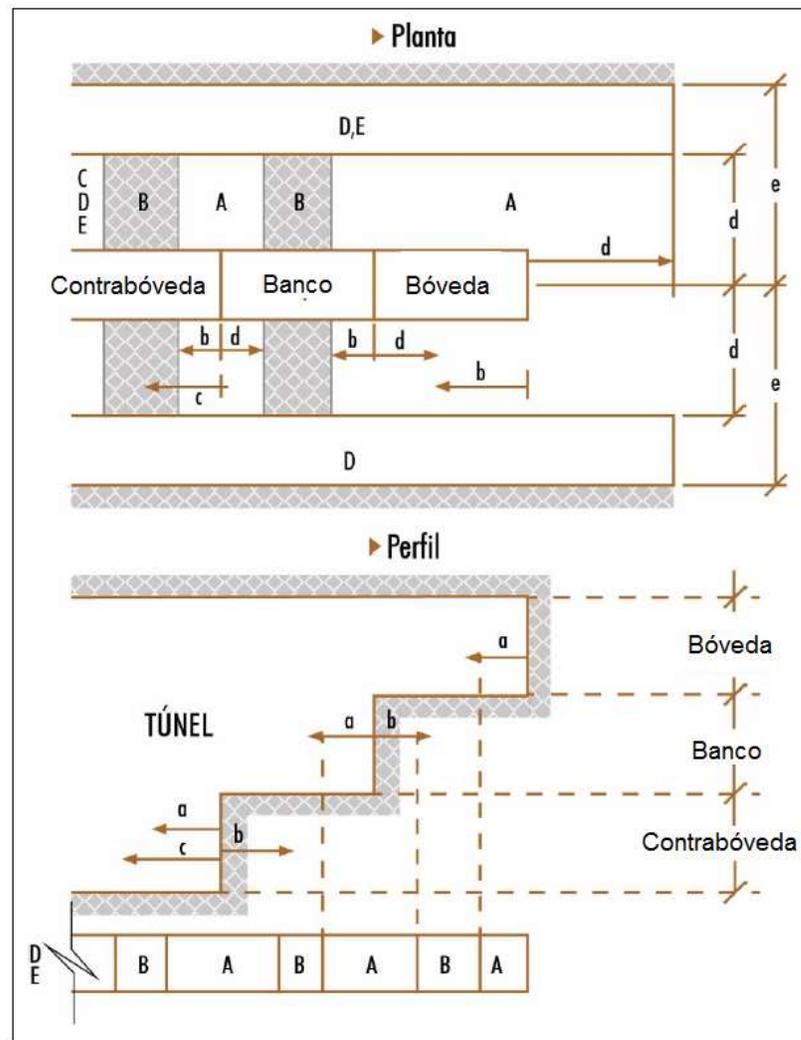


Figura 70: Esquema de áreas con distintas frecuencias para un túnel superficial; arriba vista en perfil longitudinal y abajo vista en planta (ASG, 2014).

ZONA	FRECUENCIA	DISTANCIA	RANGO <sup>3</sup>
A	1 por día	a	3 x Diámetro
B	2 por semana	b	2 x Diámetro
C <sup>1</sup>	1 por semana	c	4 - 5 x Diámetro
D	2 por mes	d	1 - 1.5 x Diámetro + Cob.
E <sup>2</sup>	Según se requiera	e	3 x Diámetro + Cob.

**Figura 71: Diferenciación espacial de los rangos de monitoreo relacionado a las distintas fases constructivas y Frecuencias mínimas típicas para los respectivos rangos de monitoreo (modificación de ASG, 2014).**

En el esquema de la figura 72 se distinguen las distintas zonas influencias por la excavación. Los valores corresponden a requerimientos mínimos, los que son incrementados por los parámetros “Xi” (longitud variable), para considerar condiciones especiales, y deben ser determinados en cada proyecto.

La metodología presentada en las figuras 72 y 73 es similar a la de la propuesta analizada en este trabajo, sin embargo, ésta no poseía esquemas ilustrativos con dichos criterios. Es importante incorporar estos esquemas en la propuesta de instrumentación, ya que puede resultar más fácil entender la metodología de medición, a diferencia de solo escribirlo con palabras y recuadros con valores.

Adicionalmente, se recomienda utilizar los criterios basado en velocidades de desplazamientos, solo cuando el túnel se encuentra fuera de la zona más crítica. El argumento de lo anterior, radica en que la frecuencia de medición, en lo óptimo, no debiera alterarse cuando el frente de excavación se encuentra posicionalmente, dentro del rango más crítico, y simplemente debiera ser de un día en dicha zona. Una vez que el frente de excavación se encuentre fuera del rango crítico, se recomienda adoptar dichos criterios, con el objetivo de optimizar recursos, y utilización de HH:

Los hitos de nivelación deben cubrir toda la zona afectada por las excavaciones, para así poder identificar totalmente la cubeta de subsidencia. Para poder fijar su ubicación y espaciamiento de manera óptima se debe tener en consideración lo siguiente:

- Información del proyecto actual: Método de excavación, velocidad de avance promedio (de proyecto), condiciones geotécnicas y características de las estructuras presentes en superficie.
- Información de proyectos o experiencias anteriores: Si ya se conoce el comportamiento del suelo frente a este tipo de obras, independientemente de si son obras idénticas o si tienen algunas características en común, es posible tener una idea de cómo se va a comportar en el proyecto actual.
- Información bibliográfica: Actualmente existe mucha información (teórica y empírica) respecto al comportamiento de muchos suelos frente a este tipo de obras alrededor del mundo (sección 2.3), por lo que siempre es útil verificar si existe información que pueda ayudar a definir de manera óptima el diseño.

En la figura 74 se presenta un arreglo típico de hitos de nivelación en el sentido transversal al eje del túnel. Se hace hincapié que dicho esquema representa, de manera general, la forma en cómo deben distribuirse los hitos de nivelación, en conjunto con las variables que ayudan a definir los parámetros vistos en la figura, tales como la geometría de excavación, condiciones geotécnicas y características de las estructuras en superficie, entre otros.

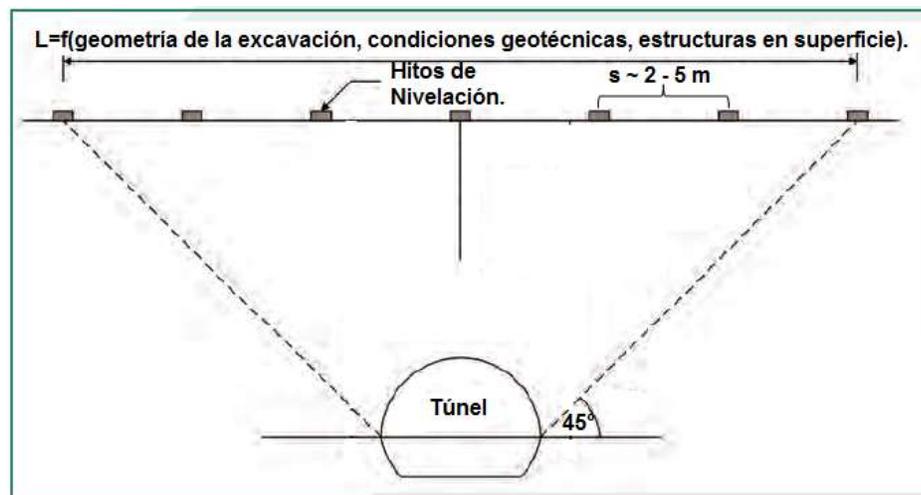


Figura 72: Esquema Transversal preliminar típico para el posicionamiento de Hitos de Nivelación (ITA, 2011).

### **7.1.1.2 Nueva propuesta de Instrumentación - Extensómetro.**

Para finalizar esta parte de la propuesta, se plantea la utilización de extensómetros de posición múltiple, para la evaluación de los movimientos sub-superficiales del suelo. Este instrumento, instalado desde superficie, tiene la capacidad de medir los movimientos verticales relativos del suelo a distintos niveles de profundidad con respecto a su extremo superior, con una gran precisión, posiblemente mejor o igual que aquella mostrada por la nivelación de los hitos de nivelación profunda. La ventaja de utilizar este instrumento radica en que se pueden monitorear movimientos a distintos niveles, y así comprobar de mejor manera la descompresión del suelo en diferentes estratos. Inclusive, un punto podría llegar a estar a 1 metro sobre la clave, para así monitorear el movimiento preciso de esta. Adicionalmente, este instrumento serviría para detectar posibles espacios vacíos entre el revestimiento en la clave y el suelo, y por ende evitar posibles socavones o subsidencias excesivas. El movimiento absoluto de la parte superior del extensómetro se mediría mediante nivelaciones geométricas de superficie.

### **7.1.2 Convergencia: Descenso de la Clave del Túnel.**

La exitosa utilización de sistemas de monitoreo de desplazamientos absolutos en 3 dimensiones alrededor del mundo apunta a que, en general, están dando buenos resultados y son fiables.

El análisis realizado en secciones anteriores da cuenta de que no se está utilizando el sistema en su máximo potencial. Lo anterior podría deberse a malas prácticas en las metodologías de medición y a otros factores externos. En el afán de maximizar el potencial del sistema, se mencionan a continuación una serie de aspectos mínimos a considerar, para poder así mejorar la precisión y calidad de los resultados. Estos aspectos debieran de ser mencionados explícitamente en la propuesta de instrumentación.

### **7.1.2.1 Requerimientos Mínimos de Instalación y Medición (ASG, 2014).**

- Distancia entre la estación total y el punto de referencia fijo más cercano: 10-30m.
- Máxima distancia entre la estación hacia un punto de monitoreo: 80m.
- Máxima distancia entre posiciones instrumentales de la estación total: 110m.
- Se deben usar, en lo posible y aproximadamente, las mismas posiciones instrumentales para medidas consecutivas.
- La estación total debe ser posicionada sobre terreno estable.
- Distancia mínima entre la estación total y las paredes de excavación: 1m.
- Comenzar el esquema de medición desde los puntos más cercanos y terminar en los puntos más alejados.
- Las interconexiones entre distintas posiciones instrumentales deben realizarse de forma simétrica al eje del túnel (figura 75). Se deben evitar las interconexiones asimétricas (figura 76).
- Verificaciones intermedias de cierre y de orientación del instrumento.
- Medición de la “lectura cero” inmediatamente después de la instalación del punto de monitoreo y antes del siguiente avance de excavación. Ejecutar esta lectura en todos los puntos de monitoreo de la sección.
- Registro de condiciones meteorológicas para considerarlas en la evaluación o correcciones de las medidas.
- Aclimatación de los instrumentos para evitar desviaciones por cambios de temperatura.
- La posición final de la estación total debe estar conectada o “amarrada” a puntos que presenten desplazamientos menores a 1mm/mes.
- Las frecuencias de medición deben, al menos, ejecutarse de acuerdo a lo estipulado en el plan de instrumentación y monitoreo, e idealmente corresponder a lo sugerido en el punto 7.1.1.1.

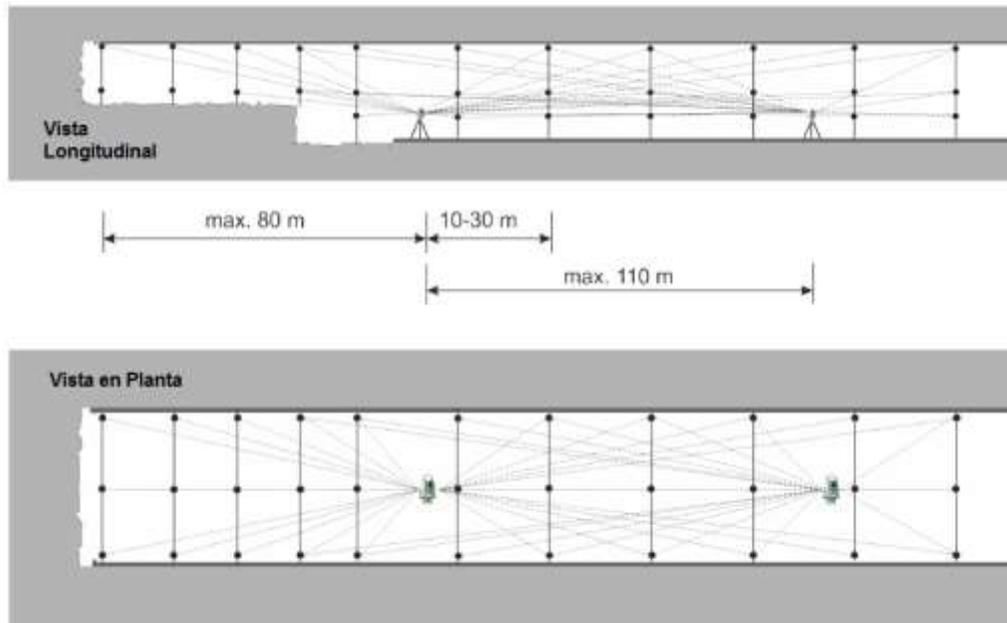


Figura 73: Esquema de medición para el método de Estación Libre interconectada (ASG, 2014).

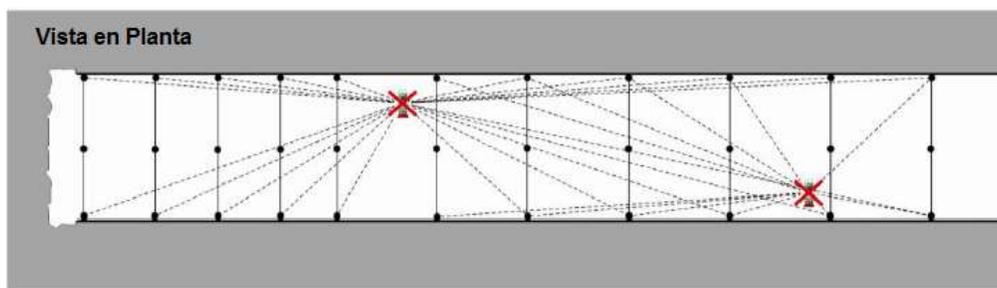


Figura 74: Esquema de Interconexión Asimétrico (ASG, 2014).

Las siguientes fuentes de error deben ser evitadas (ASG, 2014):

- Posición instrumental muy cerca de las paredes de excavación.
- Línea de visión muy cerca a las paredes de excavación.
- Mediciones realizadas en ambientes con mucho polvo (lanzamiento de hormigón proyectado por ejemplo) o durante vibraciones fuerte (causadas por maquinaria pesada). Las vibraciones se pueden atenuar tocando el tercio superior del trípode.
- Mediciones realizadas en presencia o cercanas a fuente de calor, para evitar desviaciones por refracción.
- Que el “Punto de Referencia Fijo” no sea efectivamente inmóvil.
- No respetar las especificaciones técnicas de los equipos y miras.

La/s personas a cargo de realizar las mediciones en terreno, debiesen registrar los siguientes ítems después de cada campaña de medición (ASG, 2014 y Producción Propia):

- Secuencia de medición con que se realizó la campaña.
- Puntos que no fueron medidos y su justificación (destruido, no visible, etc.).
- Lectura “cero”.
- Condiciones durante la campaña de monitoreo (calidad del aire, visibilidad, vibraciones, fuentes de calor, etc.).

## **7.2 Propuestas específicas para obras subterráneas similares a las estudiadas.**

Con respecto a proyectos similares, en relación a las características constructivas, geométricas y geotécnicas, se propone lo siguiente:

- La secuencia constructiva de bóveda en dos fases, banco y contrabóveda, y sus actividades constructivas asociadas, no permite la instalación inmediata del perno de convergencia para medir el descenso de la clave. Dado lo anterior, se recomienda medir el PCO ubicado en la clave de la Fase I, ya sea de manera complementaria o alternativa, ya que este es capaz de registrar una mayor historia de desplazamiento que el central, cuya instalación se realiza después de excavadas ambas fases.
- Considerando el análisis realizado en lo referente a las distancias entre las lecturas “cero” y el frente de excavación en las mediciones de convergencia, se propone que éstas estén dentro del rango de 15-20 metros con respecto a la Fase II y 8-12 metros respecto a la Fase I. Para el túnel interestación (excavado a sección completa) deben ser como máximo, de 10 metros. En lo posible estas distancias debieran de mantenerse constantes. Es mejor que todas se ejecuten a distancias mayores pero iguales a que sean todas distintas. Lo anterior, facilita la interpretación y permite realizar análisis más completos. Lo anterior, debe ser considerado en los umbrales de control.

- En la medida que las curvas sigan exhibiendo el nivel de oscilaciones observadas, y en la medida que se esperen desplazamientos muy pequeños en algunas secciones, ya sea puntos de control vertical u horizontal, se podría considerar no medir en aquellas secciones, a menos que se pueda asegurar una capacidad de lectura de estas magnitudes, por parte del sistema de medición.
- Considerando lo analizado respecto a las “lecturas cero” se recomienda tener por escrito los procedimientos de instalación de los pernos de convergencia, con un gran nivel de detalle, con el objetivo de impedir las extensiones de estos mismo, y así evitar lecturas perdidas.
- En la medida que las curvas sigan exhibiendo el nivel de oscilaciones observadas, se recomienda que la definición de las frecuencias se en base a velocidades de desplazamiento promedio, respecto a un numero de al menos 3 lecturas previas (pendiente de la tendencia lineal). Alternativamente, se podría eliminar este criterio y basarlas en otro más simple o efectivo.
- Los umbrales de control, deben ser capaces de moldearse frente a cualquier evento que pudiera afectar a su comparación con los valores medidos, por ejemplo las distancias al frente de las lecturas “cero”, ya que mientras mayores son estas, menor es la historia de desplazamiento que se puede registrar.

### 7.3 Recomendaciones Generales.

La utilización de instrumentación geotécnica no es simplemente la elección de instrumentos de medición, sino que más bien un proceso “paso a paso” de ingeniería. Este comienza con la definición de un objetivo y termina con la presentación de las mediciones y eventuales planes de contingencia. Cada paso es crítico para el éxito o falla del programa. “Cada instrumento instalado en el proyecto debe ser seleccionado y posicionado para asistir en responder una pregunta en particular”<sup>2</sup>

Planificar un programa de monitoreo utilizando instrumentación geotécnica es similar a cualquier otro esfuerzo ingenieril. Un diseño en ingeniería parte con la definición de un objetivo y luego prosigue con una serie de pasos. Desafortunadamente, hay casos en que se sigue la tendencia de escoger primero los instrumentos, para luego medir, y finalmente ver qué hacer con las medidas, lo que es totalmente erróneo. Como referencia, los aspectos mínimos a considerar en un proyecto de esta índole, deben seguir el enfoque sistemático en la planificación de un programa de instrumentación y monitoreo geotécnico propuesto por John Dunnycliff (Dunnycliff, J), el cual está compuesto por 20 puntos fundamentales, desarrollados con un alto nivel de detalle. Adicionalmente, en base al análisis de este trabajo, se resaltan los siguientes puntos:

- Antes de decidir qué tipo de instrumentación utilizar se deben conocer de manera aproximada la magnitud de las variables a medir, con el fin de determinar los valores máximos (rango del instrumento) y mínimos (apreciación y precisión del instrumento) que se desean registrar.
- Las precisiones exigidas en las propuestas de instrumentación deben ser acorde a las teóricamente posibles, considerando todos los factores que pudieran influir en esta, ya se instrumentos, metodologías de medición, propagación de errores y condiciones externas.
- En el caso que se utilice un software computacional para almacenar, gestionar y presentar los datos de monitoreo, es deseable que este sea el mismo, tanto para las mediciones de subsidencia, como de convergencia. La existencia de dos

---

<sup>2</sup> Dunnycliff, J

sistemas independientes por parte de dos entidades distintas para ambas mediciones puede generar confusión, incompatibilidad de formatos y en general una administración más complicada.

- Se recomienda tener almacenado un set de datos factuales, sin modificación alguna, con el fin de tener un respaldo original de estos mismo. Independiente de que estos registros no se utilicen, siempre es importante tenerlo, a modo de respaldo.
- Durante la fase de instalación de los instrumentos, se recomienda registrar una serie de lecturas (al menos 5 lecturas), distintas a las lecturas “cero”, que confirmen el correcto funcionamiento del sistema y que sirvan para detectar cualquier tipo de anomalía, por ejemplo el nivel de ruido (oscilaciones) o variaciones por temperatura entre otros, antes de que comiencen las excavaciones u otro procesos que pudiera afectar estas mediciones preliminares. Lo anterior es conocido como “línea base”.
- Aparentemente, el gran problema respecto a la instalación y posterior lectura “cero” en las mediciones dentro del túnel, radica en que la responsabilidad de instalar los dispositivos la tiene el constructor. Se podría implementar un mecanismo de acción, que separe el monitoreo y la construcción.

## 8 Conclusiones

En base a los resultados y análisis del monitoreo de los túneles estudiados, y considerando sus condiciones geométricas y geotécnicas, es posible realizar las siguientes conclusiones:

- El sistema de medición de subsidencias registró con gran precisión el descenso de la superficie debido a cada fase de excavación, y por lo tanto, resultó ser apto y fiable en las condiciones en las que se ejecutó. No obstante a lo anterior, debido a que en algunas (la minoría) secciones la lectura “cero” se realizó de manera tardía, no se logró registrar toda la historia de desplazamientos en ellas.
- Los hitos de nivelación profunda son efectivos para monitorear la descompresión del terreno, al ser comparados con el descenso de los hitos de nivelación superficial, sin embargo es incierto si representan con precisión los movimientos de la clave del túnel, al llegar a una distancia de 3 metros sobre esta. Para poder obtener información más completa respecto a los movimientos de la clave y a la transmisión de estos hacia la superficie, se podría implementar, como opción alternativa, la utilización de extensómetros de posición múltiple.
- Los resultados del monitoreo de subsidencias validan el método constructivo empleado en los túneles estación (“bóveda Auto-Portante), debido a que las distintas secciones presentan en promedio un 74% de su desplazamiento final en las fase de bóveda, comparado con el 80% esperado. Lo anterior, es solo aplicable a las condiciones en las cuales se estudiaron las obras.
- La comparación entre el descenso de los HNP y de la clave apunta a que podrían existir espacios vacíos entre el revestimiento y el suelo, sin embargo no es posible afirmarlo con total seguridad, y se debe verificar a través de una metodología directa.
- El número de secciones de monitoreo en superficie en los túneles interestación es considerablemente menor que en los estación, y por ende, los resultados del monitoreo en los primeros, son menos representativos.

- La metodología de monitoreo geodésico de convergencias a presenta un comportamiento distinto que aquel esperado. Las excesivas oscilaciones que presentan las curvas del descenso de la clave, apuntan a que la precisión del sistema no logra alcanzar la que fue especificada en la propuesta de instrumentación y monitoreo. Estas oscilaciones dificultan la interpretación de las mediciones, debido a que se requiere de un mayor número de mediciones para poder apreciar tendencias en las curvas. Adicionalmente, para descensos de la clave menor a 20 milímetros, esta metodología de medición aparentemente no es la ideal, debido a que su precisión no está acorde al rango de medición.
- Aparentemente, el gran problema respecto a la instalación y posterior lectura “cero” en las mediciones dentro del túnel, radica en que la responsabilidad de instalar los dispositivos la tiene el constructor. Se podría implementar un mecanismo de acción, que separe el monitoreo y la construcción.
- El análisis respecto a la frecuencia de toma de lecturas adoptadas (días entre mediciones consecutivas) apunta a que no pudieron efectuarse acorde a lo propuesto. Se recomienda utilizar un criterio distinto en su definición, o bien adherirse más a lo propuesto. Éstos cambio, buscan optimizar recursos.
- Es clara la diferencia que existe entre las mediciones realizadas desde la superficie, y las subterráneas. Las mediciones de subsidencia representan desplazamientos totales, mientras que las medidas de convergencia son relativas, y aportan menos en la medida que las lecturas “cero” se realicen tarde. Por lo tanto, se propone apoyarse más en mediciones realizadas desde la superficie, ya que suelen ser más ricas en información.
- Considerando el punto anterior, los umbrales de control, no debiesen estar referidos a mediciones relativas. De ser así, debiesen tener la capacidad de moldearse ante situaciones variantes, tal como fueron las distancias al frente de excavación con que se efectuaron las lecturas “cero” en las mediciones de convergencia. Con lo anterior, se podrían realizar comparaciones más representativas entre las mediciones y los umbrales de control.

- La propuesta de instrumentación y monitoreo podría ser más detallada en cuanto a los requerimientos y exigencias en las metodologías de medición. Es de suma importancia tener un total conocimiento de los sistemas de medición que se van a utilizar. En ese sentido, se debe entender como son las metodologías de medición, cuales son los errores típicos presentes en ellas y como repercuten a los resultados del monitoreo.

A medida que se densifica la ciudad, surgirán nuevas necesidades de extender y construir nuevas líneas de metro, y con ello la construcción de túneles. En la medida que estos túneles comiencen a pasar por debajo de estructuras más importantes, va a surgir la necesidad de implementar planes de instrumentación y monitoreo más complejos y estrictos. Al respecto, este trabajo representa el primer paso, y apunta a mejorar estos sistemas de monitoreo, e invita a evaluar nuevas metodologías de medición, con el objetivo de avanzar en el estado del arte de la instrumentación y del monitoreo geotécnico de túneles.

Sería interesante estudiar con más detalle, métodos alternativos para de monitoreo en túneles, como instrumentación geodésica automatizada, fotogrametrías y sistema en base a fibra óptica entre otros, en conjunto con una comparación económica y técnica de dichos sistemas con el actual.

Por otro lado, sería interesante reunir antecedentes respecto a asentamientos finales y cubetas de subsidencia en función de una serie de parámetros, tales como el tipo de suelo, geometría de excavación y método constructivo, entre otros.

## Bibliografía

1. **AETOS**. Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas.
2. **ASG**. (2014). Austrian Society for Geomechanics. "*Geotechnical Monitoring in Conventional Tunneling*".
3. **Contacto SDO**. Ingeniero participante del proyecto de Instrumentación y Monitoreo, a cargo de la Supervisión de Obra.
4. **Dunnicliff, J.** (1993). "*Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. Chapter 4: Systematic Approach to Planning Monitoring Programs using Geotechnical Instrumentation*". Ed. John Wiley & Sons, New York, 37- 44.
5. **Gacitúa, J, M.** (2012). "*Análisis Cualitativo y Jerárquico de Incertezas en la Construcción de Túneles*", Anexo B: Método NATM para Suelos. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Mención Estructuras-Construcción-Geotecnia. Universidad de Chile.
6. **Ghilani, Charles (1) & Wolf, Paul (2).** (2006). (1) Ph.D. Professor of Engineering. Surveying Engineering Program. Pennsylvania State University. (2) Ph.D. Professor Emeritus. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Wisconsin-Madison. "*Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*". Ed. John Wiley & Sons.
7. **Gomes, A. (A)** (Otoño 2014). Apuntes del curso de "*Construcción de Túneles*", CI5534
8. **Gomes, A. (B)** (2014) Presentación. "Experiencia en la aplicación del NATM en Metro de Santiago". International NATM Seminar, Santiago Chile. CEO Geoconsult Latinoamérica S.A / Presidente CTES-Chile.
9. **Hernández. R.** (2013). "*Instrumentación para la Auscultación de Túneles en Suelos Blandos*". Tesis para optar por el grado de Especialista en Geotecnia. Universidad Nacional Autónoma de México.

10. **Invías.** (2015). "*Manual para el Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera*". Subdirección de Estudios e Innovación. Instituto Nacional de Vías. Ministerio de Transporte. República de Colombia.
11. **ISO 17123-2.** Optics and optical instruments. Field procedures for testing geodetic and surveying instruments. Part 2: Levels.
12. **ITA.** (2006). "*Settlements induced by tunneling in Soft Ground*". International Tunneling and Underground Space Association. Tunneling and Underground Space Technology, International Journal.
13. **ITA.** (2011). "*Monitoring and Control in Tunnel Construction*". International Tunneling and Underground Space Association. ITA Report N°009/ Nov 2011.
14. **Karakus (1), M & Fowell (2), R. J.** (2004). "*An insight into the New Austrian Tunneling Method (NATM)*". (1) Department of Mining Engineering Inonu University, Malatya. (2) Department of Mining & Mineral Engineering Leeds University, UK. Regional Rock Mechanic Symposium. Artículo publicado.
15. **Leica Geosystems.** (2005). "Principios básicos de Topografía". Documento técnico.
16. **López, Macarena.** (2014) "*Estudio de Instrumentación y Monitoreo Geotécnico-Estructural en Piques Circulares durante la Construcción de la Línea 3 del Metro de Santiago*". Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
17. **Mercado, C.** (2003). "*Evolución de Métodos Constructivos en el Metro: Tecnología sobre Rieles*". Gerente de Proyectos de Extensión METRO S.A. Revista BIT. Septiembre.
18. **Metro.** (2012). A. Mecánica de Suelos. Validación y Complementación de la Mecánica de Suelos para la Ingeniería de Detalle de Piques y Galerías L6.

19. **Metro.** (2012). B. Especificaciones Técnicas Generales. Monitoreo Obras Subterráneas. Emitido por la SDO.
20. **Metro.** (2013). A. Informe. Estación Lo Valledor. Definición de Métodos Constructivos de las Obras Subterráneas. Emitido por la SDO.
21. **Metro.** (2013). B. Informe. Estación Club Hípico. Definición de Métodos Constructivos de las Obras Subterráneas. Emitido por la SDO.
22. **Metro.** (2013). C. Túnel Interestación. Tramo 1. Informe de Monitoreo. Emitido por la SDO.
23. **Metro.** (2013). D. Estación Lo Valledor. Dispositivos y disposición de Monitoreo. Plano N° L6-ID-03-PLA-555-CM-033-R03. Emitido por la SDO.
24. **Metro.** (2013). E. Informe. Túnel Interestación Tramo1. Estudio de afección a edificios y puntos singulares importantes. Emitido por la SDO.
25. **Metro.** (2013). F. Instrucción de Ingeniería. Ubicación dispositivos de monitoreo. Emitido por la SDO.
26. **Metro.** (2013). G. Memoria de Cálculo. Estación Lo Valledor. Armaduras de Estación. Emitido por el proyectista.
27. **Oteo, C & Rodríguez, J, M.** (1997). “*Subsidencia y Auscultación en los Túneles del Metro de Madrid*”. Revista de obras públicas. Octubre.
28. **Otero, M** (2004). “*Movimientos Inducidos por Túneles*”. Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Publicación.
29. **Paredes, F.** (2013). “*Proyecto de Infraestructura-Metro*”. Gerente de Proyecto Línea 6 del Metro de Santiago. Congreso Latinoamericano de Túneles y Espacios Subterráneos.
30. **Pasten, C.** (2013). Documento no publicado. “*Resumen Extendido de Túneles*”.

31. **Pérez, E & Álvarez, M.** (2010). *“Instrumentación de Túneles y Excavaciones”*. Empresa Paymacotas, Ingeniera de Túneles. Jornada Técnica. Barcelona.
32. **Pino, D.** (2008). *“Recomendación de Bases para el Diseño Constructivo de Túneles. Capítulo II: Fundamentos Teóricos”*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Mención Minería. Universidad de Chile.
33. **Rey, M.** (2015). Fotografías de visita a terreno a Estación Conchalí.
34. **Rodríguez, J. M.** (2008) Dr. Ingeniero de Caminos. Catedrático de Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Universidad Politécnica de Madrid. *“Auscultación de Túneles”*.
35. **S. T. Liu & Z. W. Wang.** (2008) *“Deformation monitoring during construction of subway tunnels in soft ground”*. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground.
36. **Snežana Maraš-Dragojević.** (2012). *“Analysis of ground settlement caused by tunnel construction”*. MSc. CE University of Belgrade Faculty of Civil Engineering. Revista GRADEVINAR. Julio.
37. **Ulloa, J. C.** (2016). Ingeniero Civil. (1) Diplomado en Construcción de Obra Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. (2) Magister en Ingeniería Civil – Área Geotecnia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá, Colombia.
38. **Velasco, Eduardo.** (2015) *“Proyecto y Construcción de la Estación Inés de Suárez de la Línea 6 del Metro de Santiago”*. Geocontrol, S. A. Gerente de Ingeniería.

## Anexos

### Anexo A: Fotografías.

#### 1. Método Constructivo.

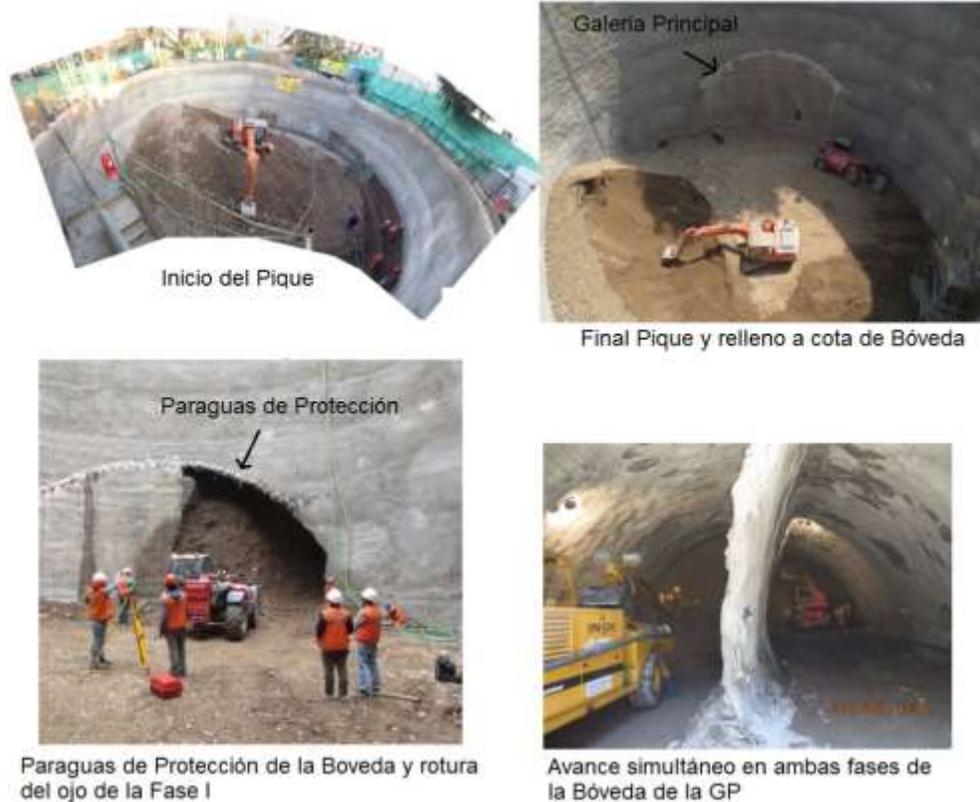


Figura 75: Construcción del Pique e Inicio de la Bóveda de la Galería Principal. (Velazco, Eduardo).



Figura 76: Revestimiento Primario (izquierda) y Secundario (derecha) de la GP (Velazco, Eduardo).



**Figura 77: Entronque con el Túnel Estación (Velazco, Eduardo).**



**Figura 78: Avance en Fases del Túnel Estación (Velazco, Eduardo).**



**Inicio del Banco en Galería Principal**



**Excavación de los Bancos Túnel Estación**

**Figura 79: Excavación de los Banco de las Obras Subterráneas (Velazco, Eduardo).**



Figura 80: Construcción en retirada de la Contra-Bóveda de la Galería Principal (Velazco, Eduardo).

## 2. Instrumentación y Monitoreo.



Figura 81: Monitoreo superficial mediante Hitos de Nivelación Superficial (HNS) y Profunda (HNP) (elaboración propia).



Figura 82: Monitoreo subterráneo tridimensional de desplazamientos absolutos, para la mediciones de Convergencias, (1) Estación Total Leica TM30 y (2) Punto de Control Óptico PCO (elaboración propia).