

**Comparación del proceso constructivo de la Línea 12 del Metro
de la Ciudad de México con la Segunda Línea del Metro de
Bogotá: Aplicabilidad de Tecnologías TBM y Métodos
Convencionales.**
Línea metro

La expansión de infraestructuras de transporte masivo subterráneo en contextos urbanos densos representa un desafío técnico y estratégico de alta complejidad. La Línea 12 del Metro de la Ciudad de México y la Segunda Línea del Metro de Bogotá constituyen dos proyectos emblemáticos en América Latina,

Juan Diego Espitia Zambrano, James Velasco Gutiérrez, Matthew David Miranda Romero, Ever Felipe Calderón Palacios, y Juan Leonardo Rojas.

**Comparación del proceso constructivo de la Línea 12 del Metro de la Ciudad
de México con la Segunda Línea del Metro de Bogotá: Aplicabilidad de
Tecnologías TBM y Métodos Convencionales.**

Presentado por:

Juan Diego Espitia Zambrano, James Velasco Gutiérrez, Matthew David Miranda Romero, Ever
Felipe Calderón Palacios, y Juan Leonardo Rojas.

Tesis de Grado

Tutor del proyecto de investigación

Henry Giovanni Martínez Mendoza

Ingeniero Civil

Universidad Piloto de Colombia

Facultad de Ingeniería Civil

Bogotá D. C.

Agosto 2025

TABLA DE CONTENIDO:

INTRODUCCIÓN:	4
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:	6
JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO:	7
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN:	8
Objetivo General:	8
Objetivos Específicos:	8
LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO:	10
Línea 12 del Metro de la Ciudad de México:	10
Segunda Línea del Metro de Bogotá:	12
.....	17
Justificación del Estudio	17
IDENTIFICACIÓN DEL CONTEXTO – PROBLEMÁTICA Y PREGUNTA PROBLEMA...	19
Identificación del Contexto:	19
Problemática:	19
Pregunta Problema:	20
Hipótesis de Investigación	20
Hipótesis General:	20
Matriz Comparativa Técnica: Línea 12 CDMX vs Línea 2 Bogotá	21
Gradiente (G)	22
Segunda Línea del Metro de Bogotá (en ejecución)	22
Puntos Kilométricos (PK)	22
Gradiente (G)	23
Importancia técnica del G y PK	23
Línea 12 del Metro de la Ciudad de México – Datos para perfil longitudinal	24
Ejemplo de PKs principales – Línea 12 CDMX	24
Segunda Línea del Metro de Bogotá – Datos para perfil longitudinal	26
Ejemplo de PKs principales – Línea 2 Bogotá	26
Consideraciones para el perfil longitudinal:	27
Comparativo Técnico: Línea 12 CDMX vs Segunda Línea Bogotá	28
Análisis técnico y constructivo	28
Análisis de Referentes	31
1. <i>Línea 9 del Metro de Barcelona (España)</i>	31
2. <i>Crossrail – Elizabeth Line (Londres, Reino Unido)</i>	32

3. Metro de Santiago de Chile – Línea 3	33
4. Metro de Quito	34
5. Metro de Lima – Línea 2.....	34
Comparativo Técnico (Tabla).....	36
Gráficas Comparativas.....	36
Discusión Crítica:.....	36
Recomendaciones Estratégicas:	37
CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS:	37
RESULTADOS ESPERADOS:.....	40
CRONOGRAMA:.....	40
Enfoque Estratégico del Proyecto Comparativo	40
2. Ejes Estratégicos de Análisis	41
3. Justificación Estratégica.....	42
4. Resultado Esperado.....	42
3.1 Zonificación geotécnica	64
3.2 Zonificación sísmica	64
5.1 Cimentaciones superficiales.....	66
5.2 Cimentaciones profundas.....	67
5.3 Cimentaciones adaptadas a la subsidencia.....	68
6.1 Riesgo sísmico general	69
6.2 Análisis de respuesta del suelo	70
7.1 Instrumentación y monitoreo geotécnico permanente	71
7.2 Plan de mantenimiento preventivo y correctivo	72
7.3 Recomendaciones de resiliencia estructural	73
1. Del enfoque reactivo al enfoque preventivo	73
2. Planeación integral y visión sistémica	74
3. Innovación tecnológica vs adaptabilidad local	74
4. Sostenibilidad urbana como eje transversal.....	74
5. Recomendación estratégica para Bogotá	75
CONCLUSIONES:	76
ANEXOS:	77
Anexo 1. Perfil longitudinal esquemático – Línea 12 del Metro de Ciudad de México.....	77
Anexo 2. Perfil longitudinal esquemático – Segunda Línea del Metro de Bogotá.....	77
Anexo 3. Tabla comparativa técnica.....	78

Anexo 4. Estudios de suelos (resumen técnico).....	78
Anexo 5. Fotografías técnicas.....	78
Anexo 6. Entrevistas a expertos.....	78
AGRADECIMIENTOS.....	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	80

INTRODUCCIÓN:

La expansión de infraestructuras de transporte masivo subterráneo en contextos urbanos densos representa un desafío técnico y estratégico de alta complejidad. La Línea 12 del Metro de la Ciudad de México y la Segunda Línea del Metro de Bogotá constituyen dos proyectos emblemáticos en América Latina, cada uno con enfoques técnicos diferenciados frente a condiciones geológicas, urbanísticas y socioeconómicas particulares. La comparación entre ambos casos permite evaluar la aplicabilidad de tecnologías de excavación como la Tunnel Boring Machine (TBM) frente a métodos convencionales como el Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles (NATM). La Línea 12, ejecutada en un entorno urbano consolidado con suelos altamente compresibles, combinó tramos superficiales, elevados y subterráneos, enfrentando retos estructurales y geotécnicos significativos. Por su parte, la Segunda Línea del Metro de Bogotá, aún en etapa de implementación, ha apostado por el uso extensivo de tuneladoras (TBM) ante un subsuelo con mayor homogeneidad y una planificación más centralizada. Esta investigación analiza de forma crítica los procesos constructivos, el rendimiento técnico, la eficiencia operativa y la adaptabilidad de ambas metodologías en relación con el contexto urbano y geotécnico de cada ciudad, con el objetivo de aportar criterios para la toma de decisiones en futuros proyectos de movilidad subterránea en la región.

ABSTRAC:

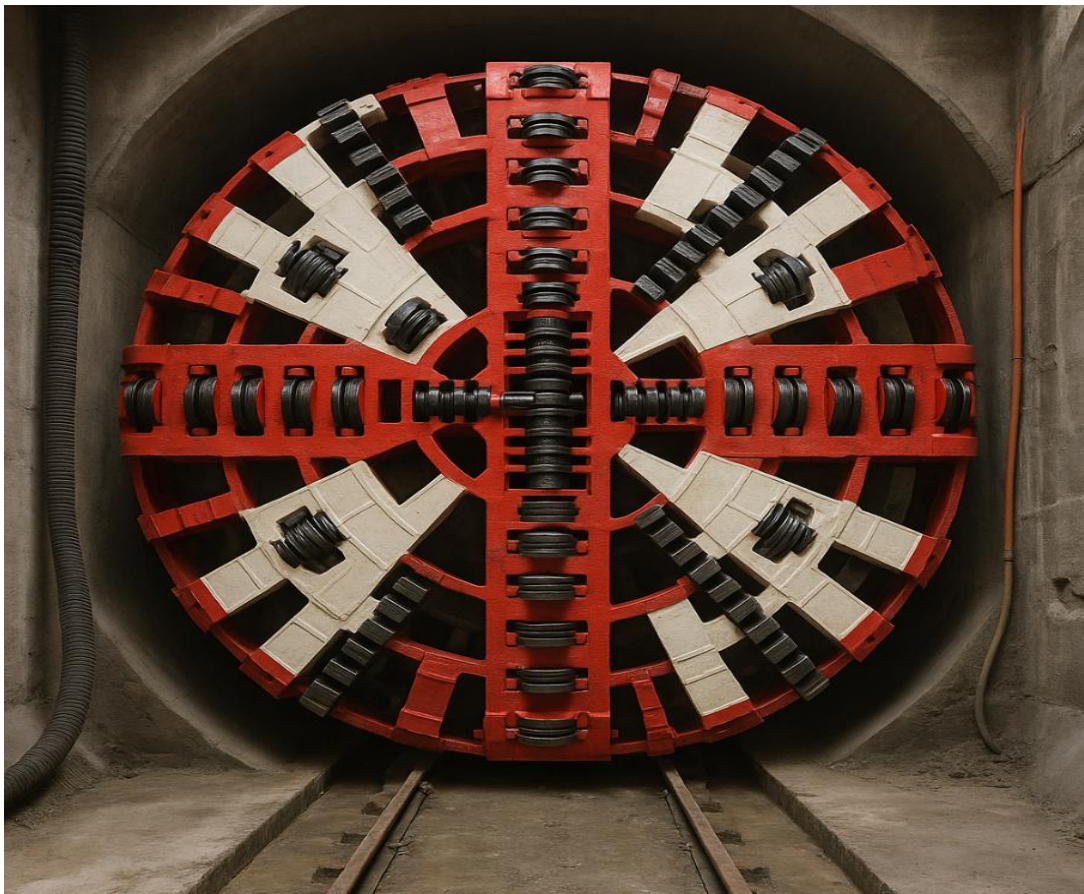
The expansion of underground mass transit infrastructure in dense urban contexts represents a highly complex technical and strategic challenge. Line 12 of the Mexico City Metro and Line 2 of the Bogotá Metro are two emblematic projects in Latin America, each with distinct technical approaches in response to specific geological, urban planning, and socioeconomic conditions. A comparison between the two cases allows for an assessment of the applicability of excavation technologies such as the Tunnel Boring Machine (TBM) versus conventional methods such as the New Austrian Tunneling Method (NATM). Line 12, built in a consolidated urban environment with highly compressible soils, combined surface, elevated, and underground sections, facing significant structural and geotechnical challenges. Meanwhile, Line 2 of the Bogotá Metro, still in the implementation phase, has opted for the extensive use of tunnel boring machines (TBM) in response to a more homogeneous subsoil and more centralized planning. This research critically analyzes the construction processes, technical performance, operational efficiency, and adaptability of both methodologies in relation to the urban and geotechnical context of each city, with the aim of providing decision-making criteria for future underground mobility projects in the region.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DEL TRABAJO:

Desarrollo urbano regional, con una infraestructura del transporte urbano subterráneo y análisis comparativo de tecnologías constructivas aplicadas a sistemas de metro en contextos latinoamericanos.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA:

El crecimiento urbano acelerado en ciudades latinoamericanas ha obligado a replantear el diseño de los sistemas de transporte masivo. Ciudades como México D.F. y Bogotá D.C; han apostado por el metro como solución estructural, pero sus condiciones geotécnicas, sociales y económicas varían significativamente. La construcción de la Línea 12 del Metro de Ciudad de México se realizó utilizando tecnologías avanzadas como la Tunnel Boring Machine (TBM) tipo EPB, mientras que en Bogotá apenas se proyecta la Segunda Línea con sistemas parcialmente subterráneos. El problema radica en determinar si los sistemas constructivos empleados en México pueden ser aplicados eficientemente en Bogotá, dadas sus condiciones locales.



(ImagenN° 1 ChatGPT, imagen generada por IA, 2025)

JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO:

El presente trabajo permite evaluar la transferibilidad de tecnologías de excavación masiva en contextos urbanos complejos y su aplicabilidad a la infraestructura de transporte en Bogotá. Asimismo, se propone identificar las ventajas técnicas, económicas y ambientales del uso de TBM y de métodos convencionales en tramos específicos. Este análisis podría apoyar futuras decisiones técnicas y de política pública en la planificación urbana y de movilidad sostenible.



(ImagenN° 2 ChatGPT, imagen generada por IA, 2025)

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN:

Objetivo General:

- Comparar los sistemas constructivos utilizados en la Línea 12 del Metro de Ciudad de México con los proyectados para la Segunda Línea del Metro de Bogotá, evaluando la viabilidad de implementar TBM y métodos convencionales en los tramos subterráneos bogotanos.

Objetivos Específicos:

- Describir el proceso constructivo de la Línea 12 del Metro de Ciudad de México, incluyendo el uso de TBM tipo EPB y sistemas convencionales.
- Caracterizar las condiciones geotécnicas y urbanas de los tramos subterráneos proyectados en la Segunda Línea del Metro de Bogotá.
- Analizar la viabilidad técnica y operativa de utilizar TBM en el contexto bogotano.
- Proponer criterios para seleccionar métodos constructivos adecuados a las condiciones locales.

MARCO TEORICO:

La construcción de sistemas de transporte masivo subterráneo implica un conjunto complejo de decisiones tecnológicas, logísticas y geotécnicas que deben responder tanto a las características del entorno urbano como a las condiciones del subsuelo. En este contexto, la elección entre tecnologías como la Tunnel Boring Machine (TBM) y métodos convencionales como el Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles (NATM) resulta crítica para la eficiencia, seguridad y sostenibilidad del proyecto. El uso de TBM ha revolucionado la excavación mecanizada en zonas urbanas densas, gracias a su capacidad para reducir vibraciones, minimizar afectaciones a la superficie y optimizar los tiempos de ejecución (Lovat, 2011). Este sistema ha sido implementado con éxito en proyectos como la Segunda Línea del Metro de Bogotá, donde las condiciones geotécnicas y la planificación del trazado favorecen su uso continuo. Por el contrario, el método NATM, basado en la adaptación progresiva del sostenimiento según las condiciones del terreno, fue utilizado en varios tramos subterráneos de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, en combinación con excavaciones a cielo abierto y cortes profundos. Este enfoque permite mayor flexibilidad ante suelos heterogéneos o poco predecibles, pero requiere una supervisión técnica más intensiva y un manejo cuidadoso de la seguridad (Bieniawski, 1984). Ambos métodos representan enfoques válidos según las características técnicas del proyecto. Mientras que la TBM se asocia a mayor inversión inicial, su eficiencia a largo plazo y menores riesgos de intervención urbana la hacen ideal para trazados continuos en suelos estables. El NATM, en cambio, sigue siendo idóneo para tramos cortos, zonas con geometría variable o con restricciones de espacio en superficie.

Desde una perspectiva comparativa, es fundamental integrar criterios de geotecnia, planificación urbana y sostenibilidad en la elección del método constructivo. Además, debe considerarse la capacidad técnica local, los costos de operación, la gestión de riesgos y el impacto ambiental como elementos claves en el diseño e implementación de sistemas de transporte subterráneo (ITACET Foundation, 2019).

LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO:

Línea 12 del Metro de la Ciudad de México

- **Ubicación geográfica:** Ciudad de México, México
- **Extensión:** Abarca las alcaldías **Tláhuac**, **Iztapalapa**, **Benito Juárez**, y parte de **Coyoacán**.
- **Recorrido:** Inicia en **Mixcoac** (poniente) y termina en **Tláhuac** (oriente), con una longitud total de **24.5 km**.
- **Tipo de infraestructura:** Combinación de tramos **subterráneos**, **elevados** y **a nivel de superficie**.
- **Coordenadas aproximadas (Mixcoac a Tláhuac):**
 - Inicio: 19.3824° N, 99.1871° W (Mixcoac)
 - Fin: 19.2875° N, 98.9454° W (Tláhuac)



Fotografía N° 1 Velasco, J. (2025). [Línea 12 del metro México D.F] [Fotografía original]. Archivo personal.



Fotografía N° 2 Miranda, M. (2025). [Mapa Guía, Línea 12 del metro México D.F] [Fotografía original]. Archivo personal.



Fotografía N° 3 Calderón, F (2025). [Mapa de Ruta, Línea 12 del metro México D.F] [Fotografía original]. Archivo personal.

Segunda Línea del Metro de Bogotá

- **Ubicación geográfica:** Bogotá, Colombia
- **Extensión:** Conectará las localidades de **Chapinero, Barrios Unidos, Engativá, y Suba**, atravesando el noroccidente de la ciudad.
- **Recorrido proyectado:** Desde la estación de la **Carrera 11 con Calle 72** hasta el sector de **Fontanar del Río**, en Suba. Tendrá una longitud estimada de **15.5 km**, completamente subterránea.
- **Tipo de infraestructura:** 100% **subterránea** con excavación mecanizada mediante **TBM**.
- **Coordenadas aproximadas (inicio a fin):**
 - Inicio: 4.6567° N, 74.0583° W (Calle 72)
 - Fin: 4.7425° N, 74.0987° W (Fontanar del Río)



Fotografía N° 4 Velasco, J. (2025). [Línea 2 del metro Bogotá D.C] [Fotografía original]. Archivo personal.



Fotografía N° 5 Velasco, J. (2025). [Línea 2 del metro Bogotá D.C] [Fotografía original]. Archivo personal.



ImagenN°3 Google. (2025). [Captura del trazado del Metro de Bogotá en Google Maps] [Imagen].

ANTECEDENTES – ESTADO DEL ARTE:

La Línea 12 del Metro de la Ciudad de México representó un hito en la ingeniería subterránea del país al incorporar una Tunnel Boring Machine (TBM) tipo EPB (Escudo de Presión de Tierra) de 10.2 metros de diámetro, la más grande utilizada en México hasta ese momento, ensamblada directamente en el sitio de obra. Esta TBM fue responsable de la excavación de aproximadamente 7.7 kilómetros del túnel, instalando simultáneamente anillos de dovelas de concreto para formar el revestimiento primario. El sistema EPB permitió controlar la estabilidad del frente de excavación, equilibrando la presión del terreno con lodos o espumas inyectadas, siendo ideal para suelos blandos y entornos urbanos al minimizar los asentamientos superficiales. Además, el proyecto combinó el uso de métodos convencionales de excavación en secciones específicas, como patios de maniobras y andenes de depósito. Entre estos métodos destacan:

- Cut-and-Cover: Excavación a cielo abierto, construcción de la estructura del túnel y posterior recubrimiento del terreno.
- Método Austriaco de Túneles (NATM): Excavación en fases, con soporte inmediato mediante concreto lanzado (shotcrete), pernos de anclaje y malla metálica.
- Excavación con pilotes: Utilizados principalmente para contención en zonas urbanas de alta complejidad.

Esta combinación de técnicas respondió a los retos geotécnicos y logísticos que impuso el trazado urbano de la Línea 12.

Aplicación en los Tramos Subterráneos de la Línea del Metro de Bogotá:

La experiencia de la Línea 12 de la Ciudad de México ofrece valiosas lecciones para los tramos subterráneos de la segunda línea del Metro de Bogotá:

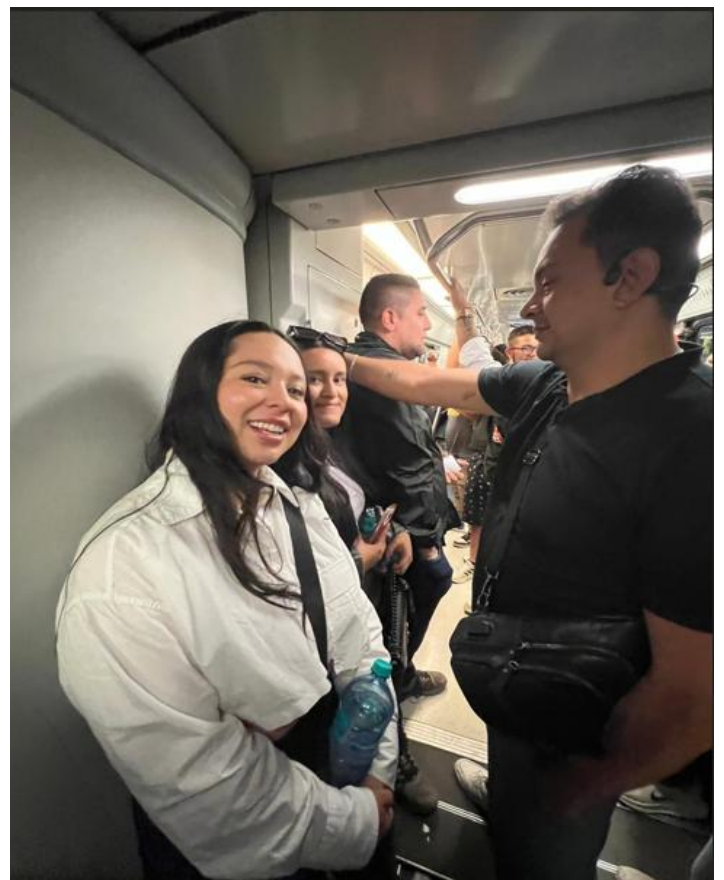
- Terreno y Geología: Bogotá se asienta sobre un terreno con características geológicas y geotécnicas variadas, incluyendo suelos blandos y con presencia de agua subterránea. La experiencia con la TBM-EPB en suelos similares en la Ciudad de México demuestra su idoneidad para minimizar afectaciones superficiales en zonas urbanas densamente pobladas, lo cual es crucial para Bogotá.
- Densidad Urbana: Dada la alta densidad urbana de Bogotá en los corredores donde se proyecta la línea subterránea, el uso de TBMs es altamente recomendable. Permite la construcción con mínima alteración de la superficie, reduciendo la interrupción del tráfico, la actividad comercial y la vida cotidiana de los ciudadanos.
- Longitud de Tramos Subterráneos: Si los tramos subterráneos de la segunda línea de Bogotá son extensos, el uso de TBMs puede acelerar significativamente el proceso de excavación en comparación con métodos convencionales, aunque la logística de transporte y ensamblaje de la TBM debe ser cuidadosamente planificada.
- Costos y Riesgos: Es fundamental realizar estudios geotécnicos exhaustivos en Bogotá para determinar la viabilidad y los costos asociados con el uso de TBMs versus métodos convencionales en cada segmento. La Línea 12 de México demostró la complejidad y los posibles sobrecostos asociados a los problemas de diseño y construcción, independientemente del método. La implementación de TBMs requiere una alta inversión inicial y personal especializado.
- Flexibilidad en Métodos: Al igual que en la Línea 12, una combinación de TBM para los tramos largos y profundos del túnel principal, y métodos convencionales (como "cut-and-cover" o NATM) para estaciones, pozos de ventilación y secciones de menor longitud o profundidad, podría ser la estrategia más eficiente y económica para Bogotá.

- Monitoreo y Control: La experiencia de la Línea 12 subraya la importancia crítica de un monitoreo geotécnico continuo y riguroso durante la excavación, independientemente del método. Esto es esencial para detectar y mitigar riesgos de asentamientos, filtraciones o deformaciones en la estructura del túnel y en las edificaciones aledañas.

Este estado del arte permite argumentar la pertinencia de considerar soluciones mixtas de excavación para la infraestructura subterránea de Bogotá, basándose en evidencia técnica y operativa comprobada en el contexto latinoamericano.



Fotografía N° 6 Palacios, F. (2025). [Línea 12 del metro México D.F] [Fotografía original]. Archivo personal.



Fotografía N° 7 Miranda, M. (2025). metro México



Fotografía N° 8 Espitia, J. (2025). [Línea 12 del metro México D.F] [Fotografía original]. Archivo personal.

Justificación del Estudio

El presente estudio es relevante dado el crecimiento sostenido de la demanda de transporte masivo en las principales ciudades de América Latina, donde la ejecución de sistemas de metro subterráneo se convierte en una necesidad crítica para garantizar movilidad eficiente, segura y sostenible. Sin embargo, la elección de los métodos constructivos aún no responde en muchos casos a evaluaciones integrales que consideren tanto la **viabilidad técnica y estructural**, como las condiciones **geotécnicas, urbanas y sociales** de cada entorno.

Comparar el caso de la **Línea 12 del Metro de la Ciudad de México**, que ha sido objeto de fallos estructurales y análisis post-desastre, con la **Segunda Línea del Metro de Bogotá**, que incorpora una solución tecnológicamente avanzada como la TBM, ofrece una oportunidad única para generar conocimiento técnico aplicado. Esta comparación permitirá identificar ventajas, limitaciones y condiciones de aplicabilidad de cada método constructivo, fortaleciendo la **toma de decisiones en proyectos futuros de ingeniería civil subterránea** y reduciendo el riesgo de errores críticos en la planificación y ejecución.



Fotografía N° 9 Espitia, J. (2025). [Línea 12 del metro México D.F] [Fotografía original]. Archivo personal

IDENTIFICACIÓN DEL CONTEXTO – PROBLEMÁTICA Y PREGUNTA PROBLEMA

Identificación del Contexto:

En América Latina, las principales capitales enfrentan una presión creciente sobre su sistema de movilidad urbana debido al crecimiento demográfico, la expansión desordenada de la ciudad y la saturación del transporte superficial. La implementación de sistemas de metro subterráneo se ha consolidado como una respuesta estratégica para mejorar la conectividad, reducir la congestión vehicular y disminuir los impactos ambientales del transporte tradicional. En este contexto, la construcción de líneas de metro en ciudades como Ciudad de México y Bogotá plantea importantes desafíos de ingeniería, debido a la diversidad geotécnica, las condiciones sísmicas, la alta densidad urbana y las restricciones presupuestales.

La Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, ejecutada con métodos constructivos convencionales y tramos elevados, ha enfrentado fallas estructurales que han puesto en duda la idoneidad de las tecnologías empleadas frente al entorno geotécnico de la capital. En contraste, la Segunda Línea del Metro de Bogotá, aún en etapa de ejecución, propone el uso de tuneladoras (TBM) como una alternativa más segura, eficiente y adaptable al entorno urbano denso del noroccidente de la ciudad.

Problemática:

La selección del método constructivo para obras de metro subterráneo en entornos urbanos densos no siempre responde a criterios técnicos integrales. En muchos casos, se toman decisiones influenciadas por factores económicos, políticos o de tiempo, sin considerar plenamente la interacción entre condiciones del subsuelo, entorno urbano, riesgos sísmicos, sostenibilidad y mantenibilidad de la infraestructura.

En el caso de la Línea 12 de Ciudad de México, las decisiones de diseño y construcción generaron vulnerabilidades estructurales que derivaron en fallos operativos y colapsos. En cambio, Bogotá se enfrenta al reto de implementar una tecnología altamente especializada como la TBM en una ciudad que aún está en proceso de consolidar capacidades técnicas y normativas en este campo. Esto plantea la necesidad de evaluar cuándo es técnicamente más viable emplear métodos mecanizados como la TBM y cuándo los métodos convencionales siguen siendo pertinentes.

Pregunta Problema:

¿Cómo influye la elección entre métodos constructivos mecanizados (TBM) y convencionales (NATM/u otros) en la seguridad estructural, eficiencia operativa y adaptabilidad urbana de los proyectos de metro subterráneo en contextos latinoamericanos, a partir del análisis comparativo entre la Línea 12 del Metro de Ciudad de México y la Segunda Línea del Metro de Bogotá?

Hipótesis de Investigación

Hipótesis General:

La aplicación del método constructivo mediante tuneladoras (TBM) en la Segunda Línea del Metro de Bogotá ofrece mayores ventajas en términos de seguridad estructural, eficiencia operativa y menor impacto urbano que los métodos convencionales (como NATM y tramos elevados) empleados en la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México, siempre que las condiciones geotécnicas y de planificación urbana sean adecuadamente gestionadas.

Matriz Comparativa Técnica: Línea 12 CDMX vs Línea 2 Bogotá

Criterio Técnico	Línea 12 – Ciudad de México	Línea 2 – Bogotá
Longitud total del trazado	24.5 km	15.5 km
Tipo de trazado	Mixto: subterráneo (NATM), elevado (prefabricado)	100% subterráneo (TBM)
Método constructivo	NATM, Cut & Cover, tramos elevados con vigas prefabricadas	TBM (Tunnel Boring Machine)
Tipo de suelo	Limos blandos, suelo lacustre, alta sismicidad	Arcillas arenosas y depósitos aluviales más homogéneos
Pendiente (G)	2.5%–3.5%	2%–3%
Riesgo estructural	Alto (colapso 2021, asentamientos diferenciales)	Bajo (planificación controlada y tecnología mecanizada)
Afectación urbana	Alta en tramos elevados y superficiales	Mínima (túnel profundo sin interrupción superficial significativa)
Costo estimado por km	Menor inversión inicial, altos costos por fallas posteriores	Mayor inversión inicial, menor mantenimiento proyectado
Tiempo de ejecución	5 años (2007–2012), con cierres posteriores	6 años estimados (2024–2030)
Nivel tecnológico	Medio (convencional y parcialmente mecanizado)	Alto (automatización y TBM de última generación)
Sostenibilidad urbana	Baja (estructuras visualmente invasivas, afectaciones viales)	Alta (mínima ocupación superficial, planificación integrada)

[Tabla N° 1]. Elaboración propia. (2025). *Matriz comparativa técnica entre la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México y la Segunda Línea del Metro de Bogotá*

Línea 12 del Metro de la Ciudad de México

Puntos Kilométricos (PK)

La línea tiene una longitud total de 24.5 km, desde Mixcoac hasta Tláhuac.

Línea 12 del Metro de la Ciudad de México	
Puntos Kilométricos (PK)	
Estación	PK aproximado (km)
Mixcoac	PK 0+000
Ermita	PK 2+800
Atlalilco	PK 4+000
Mexicaltzingo	PK 5+200
Culhuacán	PK 6+400
Calle 11	PK 8+000
Periférico Oriente	PK 10+000
Tezonco	PK 15+500
Nopalera	PK 20+000
Tláhuac	PK 24+500

[Tabla N° 2]. Elaboración propia. (2025).

Nota: Tramo subterráneo de Mixcoac a Periférico Oriente, luego tramo elevado hasta Tláhuac.

Gradiente (G)

- Pendiente máxima permitida en la línea: **3.5%**
- Promedio operativo estimado: **2.5% a 3%**
- *Normativa STC: $\leq 4\%$ en subterráneo, $\leq 5\%$ en tramos elevados*

Segunda Línea del Metro de Bogotá (en ejecución)

Puntos Kilométricos (PK)

Longitud estimada: **15.5 km**, desde la Calle 72 (Chapinero) hasta Fontanar del Río (Suba). Estos son PK estimados de estaciones clave:

Segunda Línea del Metro de Bogotá (en ejecución)	
Puntos Kilométricos (PK)	
Estación Proyectada	PK Aproximado (Km)
Calle 72	PK 0+000
Calle 80	PK 2+800
Avenida Boyacá	PK 5+200
Engativá	PK 8+000
Suba - Avenida Ciudad de Cali	PK 12+500
Fontanar del Río	PK 15+500

[Tabla N° 3]. Elaboración propia. (2025).

Nota: Todo el trazado es subterráneo y ejecutado con **TBM**.

Gradiente (G)

- Pendiente máxima proyectada: **3.0%**
- Promedio general estimado: **2% a 2.5%**
- Normativa metro Bogotá: $\leq 4\%$ para operación subterránea con trenes de tracción convencional.

Importancia técnica del G y PK

- El **G (gradiente)** es clave en el diseño del perfil longitudinal: valores altos pueden afectar el frenado, la aceleración y el consumo energético.
- Las **PK** son fundamentales para ubicar obras de acceso, pozos de ventilación, estaciones y salidas de emergencia.

Línea 12 del Metro de la Ciudad de México – Datos para perfil longitudinal

- **Longitud total:** 24.5 km
- **Inicio del trazado (PK 0+000):** Mixcoac
 - Altitud aprox.: 2,240 msnm
- **Fin del trazado (PK 24+500):** Tláhuac
 - Altitud aprox.: 2,240 msnm
- **Trazado:** Mixto
 - **Subterráneo** (Mixcoac - Atlalilco, -7.4 km) – Método NATM
 - **Elevado** (Atlalilco - Tláhuac, -17.1 km) – Vigas prefabricadas
- **Pendientes máximas (G):**
 - Entre 2.5% y 3.5%, con transiciones suaves en zonas elevadas
- **Cotas estimadas del túnel (subterráneo):**
 - Profundidad media: 18–25 metros
- **Altura en viaducto elevado:**
 - Entre 6 y 12 metros sobre nivel de calle

Ejemplo de PKs principales – Línea 12 CDMX

Estación	PK aprox.	Altitud (msnm)	Método
Mixcoac	0+000	2,240	NATM (Sub)
Ermita	3+400	2,235	NATM (Sub)
Atlalilco	7+400	2,230	Transición
Calle 11	8+600	2,230	Elevado
Periférico Oriente	13+000	2,225	Elevado
Nopalera	18+500	2,220	Elevado
Tláhuac	24+500	2,240	Elevado

[Tabla N° 4]. Elaboración propia. (2025).



Fotografía N° 10 Espitia, J. (2025). [Línea 12 del metro México D.F] [Fotografía original]. Archivo personal



Fotografía N° 11 Velasco, J. (2025). [Línea 12 del metro México D.F Estación TLAHUAC] [Fotografía original]. Archivo personal

Segunda Línea del Metro de Bogotá – Datos para perfil longitudinal

- **Longitud total:** 15.5 km
- **Inicio del trazado (PK 0+000):** Calle 72 con Av. Caracas
 - Altitud aprox.: 2,600 msnm
- **Fin del trazado (PK 15+500):** Calle 100 con Av. Boyacá
 - Altitud aprox.: 2,620 msnm
- **Trazado:** 100% subterráneo
 - Método: **TBM (Tunnel Boring Machine)**
- **Pendiente promedio (G):**
 - Entre 2.0% y 3.0%
- **Profundidad del túnel (cota invertida):**
 - Media: 18–28 metros bajo nivel de calle
- **Cobertura del terreno:**
 - 10–15 m de sobrecarga

Ejemplo de PKs principales – Línea 2 Bogotá

Estación	PK aprox.	Altitud (msnm)	Método
Calle 72	0+000	2,600	TBM
Calle 80	4+000	2,605	TBM
Av. NQS	7+800	2,610	TBM
Calle 92	11+000	2,615	TBM
Calle 100	15+500	2,620	TBM

[Tabla N° 5]. Elaboración propia. (2025).

Consideraciones para el perfil longitudinal:

- Representa altitud del terreno (línea base), trazado del túnel (línea continua subterránea o elevada), y estaciones señaladas por PK.
- Usa escalas proporcionales en X (longitud) e Y (altitud/profundidad).
- Señala los cambios de método constructivo (NATM ↔ Viaducto ↔ TBM).
- Opcional: muestra la cobertura del terreno (espesor desde la superficie al túnel) y los radios de curvatura si aplica.



Fotografía N° 12 Rojas, L. (2025). [Línea 2 del metro Bogotá D.C] [Fotografía original]. Archivo personal

Comparativo Técnico: Línea 12 CDMX vs Segunda Línea Bogotá

CRITERIO	LÍNEA 12 - CDMX	SEGUNDA LÍNEA - BOGOTÁ
Tecnología Constructiva	Mixta: TBM (en túnel profundo) + método NATM (Nuevo Método Austriaco) + viaducto	TBM (Tunnel Boring Machine) a gran escala en casi todo el trazado subterráneo
Número de Vagones por Tren	7 vagones tipo FE-10 (CAF), trenes de rodadura férrea	6 vagones (se estima rodadura férrea o neumática según licitación final)
Número de Viajes por Día	Aprox. 350 viajes (en hora pico: cada 4-5 min)	Estimado: 300 a 320 viajes por día (proyección 2030)
Altura de los Vagones	3.9 metros (altura exterior)	3.8 a 4.0 metros (en desarrollo, valores similares a estándar internacional)
Velocidad Promedio de Operación	35 km/h (con máximas de 80 km/h en tramos largos)	37 km/h (máxima estimada: 80-90 km/h)
Longitud Total de la Línea	24.5 km (subterráneo + elevado)	15.5 km (completamente subterráneo con 11 estaciones)
Profundidad Media del Túnel	25 m aprox. (zona subterránea)	28-30 m aprox. (excavación con TBM)

[Tabla N° 6]. Elaboración propia. (2025).

Análisis técnico y constructivo

- **CDMX Línea 12** usó una solución mixta: túnel profundo con TBM, método NATM en zonas geológicamente complejas y viaducto elevado en la periferia. Esto generó desafíos estructurales y asentamientos diferenciales que derivaron en ajustes post-inauguración.
- **Segunda Línea de Bogotá** opta por **TBM de escudo presurizado**, dada la alta densidad urbana y los suelos blandos. Se prioriza una construcción **subterránea continua** para minimizar afectaciones urbanas y optimizar tiempos.

Tabla Comparativa de Gálibo – Línea 12 (CDMX) vs Línea 2 (Bogotá)

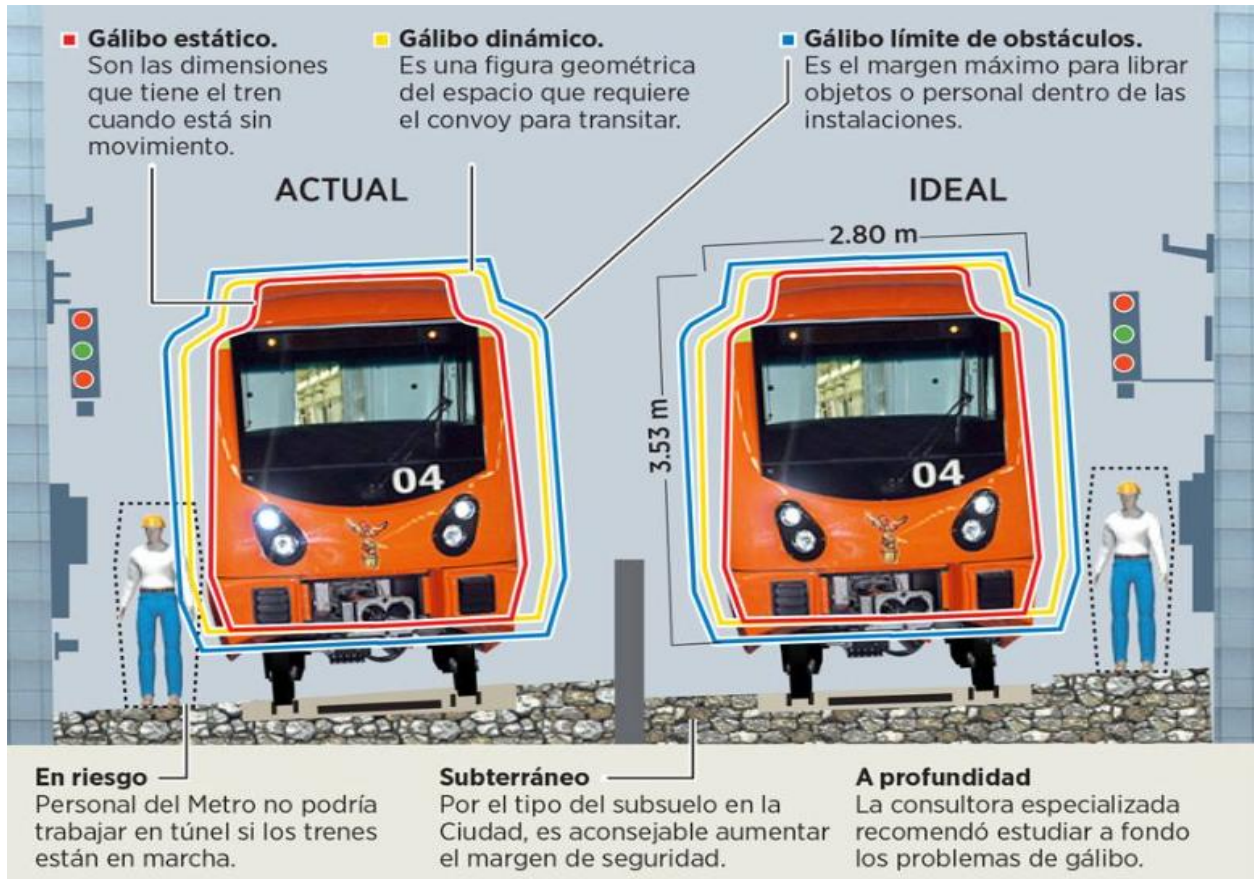
Criterio Técnico	Línea 12 – Metro de Ciudad de México	Línea 2 – Metro de Bogotá (Proyectado)	Comentario Técnico
Tipo de gálibo	Gálibo férreo (tren convencional)	Gálibo férreo (metro pesado subterráneo)	Ambos usan gálibo ancho, apto para sistemas de alta capacidad
Ancho del tren	2.8 m	2.9 m aprox.	Diferencia mínima, ambos adaptados a túneles tipo TBM
Altura del tren	3.5 m aprox.	3.8 m aprox.	Línea 2 de Bogotá proyecta gálibo mayor para ventilación y servicios superiores
Longitud de vagón	15–20 m por vagón	16–20 m por vagón	Composición flexible según demanda y tracción
Número de vagones por tren	7 vagones	6–7 vagones proyectados	Dependerá de capacidad instalada en estaciones
Altura de plataforma (andén)	1.1 m aprox. sobre riel	1.1 m (estándar internacional)	Compatible con gálibo europeo
Radio mínimo de curvatura	90 m	100 m aprox.	Mayor radio mejora estabilidad a velocidad
Pendiente máxima permitida	4%	3.5% proyectada	Afecta tracción, drenaje y frenado en túneles
Espacio libre lateral (gálibo)	0.3 m aprox. por lado en túnel	0.35 m en TBM proyectado	Según norma técnica EN o AASHTO adaptada
Velocidad de diseño	80 km/h	80–90 km/h	Compatible con gálibo amplio
Tecnología constructiva	Mixta: viaducto elevado + túnel NATM y cut & cover	TBM proyectado para túnel completo	Gálibo adaptado a sección circular TBM Ø ~10.5 m

[Tabla N° 7]. Elaboración propia. (2025).

Observaciones Técnicas:

- **Línea 12 CDMX** utilizó gálibo convencional ferroviario con dimensiones adaptadas al sistema híbrido (viaducto elevado y túnel).
- **Línea 2 Bogotá** proyecta usar TBM (Tunnel Boring Machine) con sección circular, lo que condiciona el gálibo al diámetro del escudo (~10.5 m), permitiendo mayor altura útil.

- El gálibo también depende del sistema de ventilación, electrificación (por catenaria o tercer riel), y de normativas locales e internacionales.



ImagenN°4 Google. (2025). [Captura del Gálibo metro Ciudad de México en Google Maps] [Imagen].

El término "galibo" en el contexto de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México se refiere a las dimensiones o gálibo de la estructura del tren y la vía. Específicamente, se refiere a la altura y ancho máximos que puede tener un tren para poder circular por la línea, así como las dimensiones del espacio por donde pasa el tren.

En la Línea 12, el gálibo ha sido un tema importante debido a problemas estructurales que se manifestaron tras su inauguración, como el colapso de un tramo elevado en 2021. Estos problemas llevaron a revisar y modificar el diseño y construcción de la línea, incluyendo aspectos relacionados con el gálibo.

• ANÁLISIS DE REFERENTES

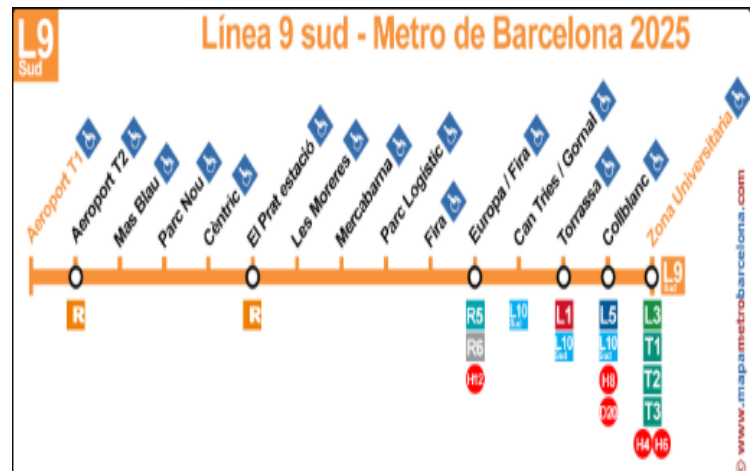
Análisis de Referentes

1. Línea 9 del Metro de Barcelona (España)

- **Método Constructivo:** TBM (Tunnel Boring Machine)
- **Contexto:** Alta densidad urbana con restricciones patrimoniales.
- **Relevancia:** Integra grandes estaciones profundas en espacios urbanos consolidados, usando estaciones tipo pozo y soluciones logísticas para gestión de escombros.
- **Aprendizaje para Bogotá:** Gestión integral de logística subterránea, ventilación y accesos en suelos arcillosos.



ImagenN°5 Google. (2025). [Captura del trazado del Metro de Barcelona en Google] [Imagen].



ImagenN°6 Google. (2025). [Captura del trazado del Metro de Barcelona en Google] [Imagen].

2. Crossrail – Elizabeth Line (Londres, Reino Unido)

- **Método Constructivo:** TBM – escudos EPB y escudos mixtos.
- **Características:** Trazado de más de 42 km subterráneos en terreno mixto (arcillas, arenas, grava, y zonas saturadas).
- **Relevancia:** Implementación simultánea de varias TBM con seguimiento geotécnico en tiempo real.
- **Aplicabilidad a México y Bogotá:** Control automatizado de presiones de cara del túnel y monitoreo en zonas de riesgo (hundimientos y subsidencias).



ImagenNº7 Google. (2025). [Captura del trazado del Metro Reino unido en Google] [Imagen].



ImagenNº8 Google. (2025). [Captura del trazado del Metro Reino Unido en Google] [Imagen].

3. Metro de Santiago de Chile – Línea 3

- **Método Constructivo:** NATM (New Austrian Tunneling Method)
- **Características:** Suelo volcánico de baja cohesión, con presencia de fallas geológicas.
- **Relevancia:** Uso de sostenimiento primario adaptativo y soporte flexible.
- **Aprendizaje para la Línea 12 (México):** La adaptación del NATM a contextos sísmicos y suelos complejos.



ImagenN°9 Google. (2025). [Captura del trazado del Metro Santiago de Chile en Google] [Imagen].



ImagenN°10 Google. (2025). [Captura del trazado del Mapa de Ruta, Metro Santiago de Chile en Google]

4. Metro de Quito

- **Método Constructivo:** TBM – EPB
- **Relevancia:** Terreno volcánico con importantes variaciones altitudinales.
- **Aplicación para Bogotá:** Alta similitud geotécnica. Experiencia clave para logística de intervención urbana sin afectar movilidad superficial.



ImagenN°11 Google. (2025). [Captura del trazado del Metro Quito en Google] [Imagen].



ImagenN°12Google. (2025). [Captura del trazado del Metro Quito]

5. Metro de Lima – Línea 2

- **Método Constructivo:** TBM y NATM en tramos específicos
- **Relevancia:** Ejecución en contextos de informalidad urbana, presencia de infraestructura preexistente no mapeada, y alta densidad poblacional.
- **Lecciones aplicables:** Necesidad de mapeo tridimensional previo, uso de BIM y sistemas de auscultación estructural urbana.



ImagenN°13 Google. (2025). [Captura del trazado del Metro Lima – Línea 2 en Google] [Imagen].



ImagenN°14 Google. (2025). [Captura del trazado de la Ruta Metro Lima – Línea 2 en Google] [Imagen].

Comparativo Técnico (Tabla)

Criterio	Línea 12 - CDMX	Segunda Línea - Bogotá
Tecnología Constructiva	Mixta: TBM + NATM + viaducto	TBM (Tunnel Boring Machine)
Número de Vagones por Tren	7 vagones (CAF FE-10)	6 vagones (en desarrollo)
Número de Viajes por Día	Aprox. 350	Estimado: 300-320
Altura de los Vagones	3.9 m	3.8 - 4.0 m
Velocidad Promedio	35 km/h	37 km/h
Longitud Total de la Línea	24.5 km	15.5 km
Profundidad Media del Túnel	25 m	28 - 30 m

[Tabla N° 8]. Elaboración propia. (2025).

Gráficas Comparativas

1. Número de Vagones por Tren

CDMX: 7 | Bogotá: 6

2. Velocidad Promedio de Operación (km/h)

CDMX: 35 | Bogotá: 37

3. Profundidad Media del Túnel (m)

CDMX: 25 | Bogotá: 30

4. Número de Viajes por Día

CDMX: 350 | Bogotá: 310 aprox.

Discusión Crítica:

- La TBM ofrece mayor precisión y menor impacto superficial en ciudades densas como Bogotá.
- La experiencia de CDMX resalta los riesgos de soluciones mixtas en suelos inestables.
- La planificación integral en Bogotá marca un avance frente al enfoque fragmentado de CDMX.

Recomendaciones Estratégicas:

- Consolidar monitoreo post-constructivo.
- Formar personal local en operación de TBMs.
- Vincular el metro a planes urbanos integrales.
- Crear base de datos geotécnica urbana.

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS:

- **La elección del método constructivo** no puede ser replicada sin adaptación al contexto local. Mientras la **Línea 12 de CDMX** combinó NATM y tramos elevados para minimizar costos, Bogotá apuesta por una ejecución 100% subterránea mediante TBM para reducir afectación urbana.
- Los referentes internacionales **confirman la viabilidad técnica** de grandes túneles urbanos mediante TBM siempre que haya estudios geotécnicos precisos, control ambiental, y una planificación de obra estricta.
- Los **modelos de gestión de riesgos** y de coordinación institucional en Londres o Barcelona son claves para proyectos de gran escala como el de Bogotá.

DISEÑO METODOLÓGICO:

Tipo de estudio: Comparativo y aplicado.

Técnicas e Instrumentos de Investigación:

- Revisión documental de informes técnicos, estudios de factibilidad, contratos de obra, noticias y artículos de prensa relacionados con la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México y la segunda línea del Metro de Bogotá.

- Análisis de datos públicos sobre el rendimiento de la Línea 12 (ej. incidentes, costos de operación, afluencia).
- Entrevistas semiestructuradas con expertos en ingeniería de transporte, planificación urbana y gestión de proyectos (si es posible y pertinente).

ESTRUCTURA DE TRABAJO DE CAMPO:

- Análisis de documentos públicos y bases de datos.

Método de Análisis de Información:

- Análisis cualitativo de la información recopilada, identificación de patrones, comparación de casos, y síntesis de hallazgos para la formulación de recomendaciones.

Cuadro Integral / Diagrama de Flujo:

Se desarrollará un diagrama de flujo que ilustrará las fases del proyecto de investigación:

Fase 1. Recopilación de información:

- Recopilación de datos sobre la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México (aspectos técnicos, económicos, sociales, ambientales, métodos constructivos) y la información disponible sobre la segunda línea del Metro de Bogotá (estudios de prefactibilidad, diseños preliminares).

Fase 2. Estructuración de la Matriz de Riesgos:

- Identificación y categorización de riesgos potenciales y reales experimentados en la Línea 12, adaptándolos a un formato de matriz.

Fase 3. Mapa de Riesgos:

- Visualización de los riesgos identificados, su probabilidad e impacto en el contexto de la Línea 12 y su proyección a la segunda línea del Metro de Bogotá.

Fase 4. Análisis de resultados:

- Comparación de los datos y los riesgos entre ambos proyectos, extrayendo lecciones aprendidas y oportunidades de mejora.

Fase 5. Entregables:

- Redacción del informe final, incluyendo las recomendaciones estratégicas.

RESULTADOS ESPERADOS:

- Un análisis detallado de los factores clave que influyeron en el éxito y los desafíos de la construcción y operación de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México.
- Una matriz de riesgos y lecciones aprendidas, adaptable a futuros proyectos de metro en América Latina, con enfoque específico en la segunda línea del Metro de Bogotá.
- Recomendaciones estratégicas y operativas para los tomadores de decisiones en Bogotá, orientadas a optimizar la planificación, diseño, construcción y gestión de la segunda línea del metro, mitigando riesgos y maximizando beneficios.
- Un aporte significativo al cuerpo de conocimiento en ingeniería civil y planificación de infraestructura urbana, con énfasis en la construcción de sistemas de transporte masivo.

Tipo de estudio: Comparativo y aplicado

Técnica: Revisión documental, entrevistas técnicas y análisis de viabilidad técnico-económica

FASES:

1. Recopilación técnica y bibliográfica de proyectos de metro con TBM y métodos tradicionales
2. Revisión geotécnica de la zona de la Segunda Línea del Metro de Bogotá
3. Comparación técnica y de costos entre TBM y excavación convencional
4. Redacción de recomendaciones para aplicabilidad

RESULTADOS ESPERADOS:

- Diagnóstico comparativo entre Línea 12 y Segunda Línea de Bogotá
- Criterios para selección de métodos de excavación
- Recomendaciones para entidades contratistas y de planificación

CRONOGRAMA:

6 meses estimados.

Enfoque estratégico

Enfoque Estratégico del Proyecto Comparativo

1. Objetivo Central

Comparar de manera técnica, contextual y operativa los métodos constructivos empleados en dos grandes obras de infraestructura subterránea en América Latina, con el fin de identificar oportunidades de mejora, replicabilidad y mitigación de riesgos para futuras implementaciones en contextos urbanos densos y complejos.

2. Ejes Estratégicos de Análisis

❖ Tecnología Constructiva

- Evaluar la aplicabilidad de métodos como **TBM (Tunnel Boring Machine)** y **NATM (New Austrian Tunneling Method)** según las características geológicas, topográficas y urbanas de cada ciudad.
- Determinar ventajas, limitaciones y adaptaciones requeridas para garantizar seguridad estructural y eficiencia operativa.

❖ Gestión del Territorio y Mitigación de Impacto

- Analizar el nivel de planificación urbana previa, gestión del riesgo geotécnico y social.
- Comparar cómo se abordó la **afectación a la infraestructura existente**, movilidad urbana y gestión del entorno inmediato durante la obra.

❖ Eficiencia Técnico-Económica

- Comparar los costos de ejecución por kilómetro, tiempos de entrega, desviaciones presupuestales, y eficiencia de obra.
- Relacionar el rendimiento constructivo con los retos técnicos asumidos.

❖ Sostenibilidad y Proyección Metropolitana

- Considerar el papel de cada línea en la articulación con otros modos de transporte masivo.
- Evaluar el aporte a la reducción de emisiones, descongestión urbana y crecimiento planificado.

3. Justificación Estratégica

Ambas obras constituyen hitos de infraestructura subterránea en sus países. Su análisis comparativo permitirá:

- Transferir conocimientos técnicos a futuros proyectos similares.
- Fortalecer procesos de toma de decisión en ingeniería de transporte subterráneo.
- Generar lineamientos para la planificación de líneas férreas en ciudades emergentes de América Latina.

4. Resultado Esperado

El enfoque estratégico busca establecer una **hoja de ruta comparativa** que oriente decisiones técnicas, financieras y urbanísticas para futuras líneas de metro en Latinoamérica, especialmente en contextos de alta densidad urbana, condiciones geológicas desafiantes y limitaciones presupuestarias.

1. EXPLORACIONES DE CAMPO GEOTÉCNICAS (SPT, CPTU, MASW) LÍNEA 2 METRO BOGOTÁ COLOMBIA

Para la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB), se realizó una extensa campaña de exploración geotécnica con el objetivo de caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del subsuelo a lo largo del trazado. Estas investigaciones incluyeron técnicas directas (mecánicas) e indirectas (geofísicas), ejecutadas entre 2017 y 2019, principalmente en el eje de la Avenida Caracas y zonas adyacentes.

- Sondeos SPT (Standard Penetration Test)

Se llevaron a cabo más de 60 sondeos SPT (ensayo de penetración estándar) en profundidades que varían entre 9 m y 50 m, a lo largo del trazado proyectado para las estaciones y túneles de la línea

elevada y subterránea. El ensayo SPT permitió determinar la resistencia a la penetración del suelo, lo cual es un parámetro crucial para la estimación de capacidad portante, asentamientos, y diseño de cimentaciones superficiales y profundas.

Cada sondeo estuvo acompañado de la extracción de muestras inalteradas y remoldeadas, que fueron sometidas a ensayos de laboratorio para determinar los límites de Atterberg, humedad natural, peso específico y contenido orgánico.

- Ensayos CPTU (Cone Penetration Test con medición de presión de poros)

En sectores clave, se emplearon ensayos de piezocono (CPTU), que consisten en introducir un cono instrumentado en el suelo y registrar tres parámetros fundamentales: resistencia de punta (q_c), fricción lateral (f_s) y presión de poros (u_2). Esta técnica proporcionó una evaluación continua y de alta resolución del perfil estratigráfico, permitiendo delimitar capas blandas, definir el nivel freático y evaluar el comportamiento drenado/no drenado del terreno.

El uso de CPTU fue especialmente importante en zonas de arcillas lacustres blandas con alta susceptibilidad a deformaciones, típicas de la Sabana de Bogotá.

- Exploración geofísica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Complementariamente, se realizaron ensayos MASW para obtener perfiles de velocidad de onda de corte (V_s), los cuales permiten clasificar el suelo conforme a la normativa sísmica colombiana (NSR-10) y generar espectros de diseño sísmico. Esta información fue crítica para definir zonas geotécnicas y calcular el periodo fundamental del suelo (T).

- Ubicación y distribución

Las investigaciones se distribuyeron de forma estratégica a lo largo de los 24 kilómetros de trazado, con una frecuencia promedio de un punto de exploración cada 300 metros lineales, tanto en las áreas de estaciones como en los tramos elevados y en el sector sur del trazado subterráneo.

También se incluyeron puntos en intersecciones críticas (ejes viales principales) y zonas de transición.

2. PERFIL ESTRATIGRÁFICO PROMEDIO



ImagenN°15 Google. (2025). [Captura Zonificación Metro Bogotá en Google] [Imagen].

El conocimiento detallado del perfil estratigráfico a lo largo del trazado de la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB) ha sido fundamental para el análisis estructural, el diseño de cimentaciones y la evaluación de riesgos asociados al comportamiento del suelo. Este perfil se construyó con base en los datos obtenidos de más de 60 puntos de exploración distribuidos estratégicamente en el eje de la avenida Caracas, mediante técnicas como SPT, CPTU, MASW, y ensayos de laboratorio.

a) Descripción litológica por profundidad

El perfil típico parte en superficie con una capa de relleno antrópico, de entre 1 y 1.5 metros de espesor. Se trata de un material heterogéneo compuesto por escombros de construcción,

fragmentos de concreto, gravas y residuos orgánicos. Este estrato presenta baja compactación y comportamiento inestable, por lo que no es apto para soportar cargas estructurales sin intervención. Por debajo del relleno, entre los 1.5 y 6 metros, aparecen arcillas limosas estratificadas, de color gris claro, con comportamiento cohesivo, plasticidad media y alta humedad natural. Estas arcillas muestran baja resistencia mecánica y una permeabilidad que dificulta el drenaje.

El estrato más relevante y problemático del perfil se extiende aproximadamente entre los 6 y 25 metros de profundidad: las arcillas lacustres blandas. Son suelos típicos de la Sabana de Bogotá, con alta plasticidad, elevada humedad (frecuentemente superior al 50 %) y presencia significativa de material orgánico. Su capacidad portante es muy baja, y su alta compresibilidad los hace susceptibles a asentamientos diferenciales. El nivel freático se encuentra usualmente dentro de este estrato, generando condiciones de saturación que disminuyen aún más la resistencia al corte.

A mayores profundidades, entre los 25 y 40 metros, se identificaron arcillas limosas densas y margas, parcialmente cementadas, con mejor comportamiento geomecánico, mayor resistencia al corte y menor contenido de agua. Estas capas son menos deformables y con mejor capacidad de carga.

Finalmente, a partir de los 40 metros de profundidad, se encontraron depósitos aluviales densos: gravas y arenas compactas con baja presencia de finos. Este estrato representa la base competente para fundaciones profundas, con condiciones adecuadas para transferir cargas estructurales y ofrecer estabilidad a largo plazo.

b) Propiedades físico-mecánicas del perfil

Las propiedades de los suelos lacustres intermedios —los más problemáticos del perfil— fueron determinadas a partir de ensayos de laboratorio y de campo. El límite líquido de estas arcillas se ubicó entre el 60 % y el 80 %, mientras que el límite plástico osciló entre 30 % y 40 %, lo que

resultó en un índice de plasticidad elevado. Estos valores son típicos de suelos altamente compresibles y sensibles al agua.

El contenido de humedad natural estuvo generalmente entre 35 % y 55 %, lo que indica una saturación significativa. Su permeabilidad fue extremadamente baja, en el orden de 10^{-7} a 10^{-9} metros por segundo, lo cual impide un drenaje eficiente y prolonga el tiempo de consolidación.

La resistencia al corte no drenado (S_u), determinada mediante ensayos triaxiales UU y correlaciones con el ensayo CPTU, presentó valores entre 15 y 40 kilopascales. El módulo dinámico de corte (G_{max}) fue estimado entre 30 y 60 megapascals, con base en la velocidad de onda de corte obtenida en ensayos MASW. La densidad húmeda promedio fue de 16 a 18 kilonewtons por metro cúbico.

Estas características mecánicas confirman que las arcillas lacustres tienen una capacidad portante muy limitada y un comportamiento deformable, lo cual condiciona la elección de sistemas de cimentación y el diseño de medidas de mitigación de asentamientos.

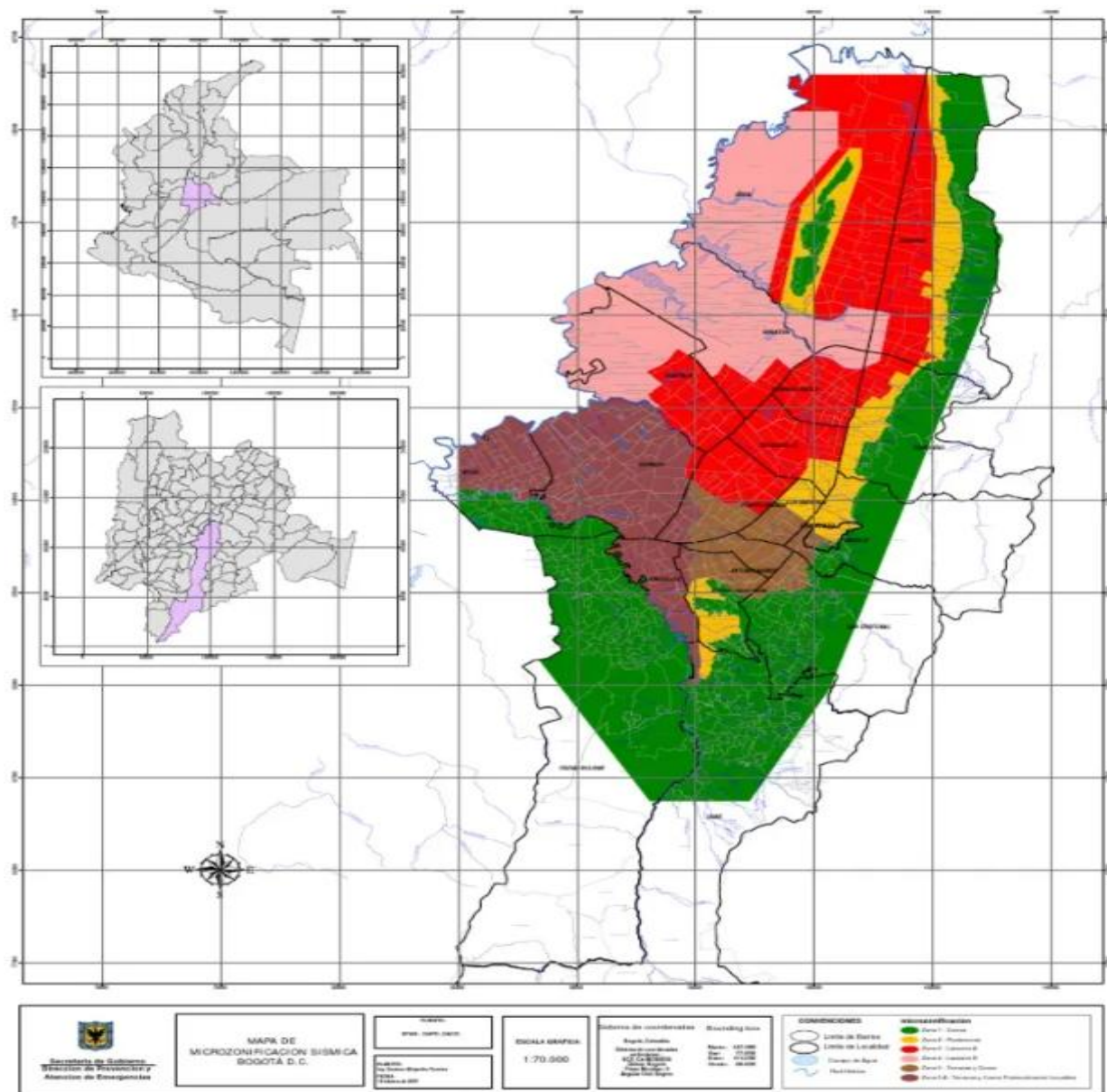
c) Importancia del perfil en el diseño del proyecto

Este perfil estratigráfico permitió identificar las condiciones reales del subsuelo y representó una herramienta clave para las decisiones de ingeniería del proyecto. En especial, se identificaron zonas de alto riesgo por asentamientos diferenciales y subsidencia, lo cual llevó a descartar cimentaciones superficiales en la mayoría del trazado. Las fundaciones fueron diseñadas para anclarse en los estratos profundos competentes, más allá de los 35 metros de profundidad, donde se hallan gravas densas o materiales cementados con mayor resistencia y rigidez.

Asimismo, el perfil ayudó a definir las condiciones de interacción suelo-estructura, los modelos numéricos para simulaciones dinámicas y la necesidad de control del nivel freático mediante

En definitiva, el perfil estratigráfico no solo reveló la naturaleza compleja del subsuelo bogotano, sino que fue un insumo imprescindible para cumplir con las exigencias de la NSR-10, garantizar la estabilidad del sistema y anticipar riesgos constructivos.

3. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA Y SÍSMICA



ImagenN°16 Google. (2025). [Captura Parámetros Indicativos Actividad Sísmica Bogotá en Google][Imagen].

La zonificación geotécnica y sísmica aplicada al diseño de la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB) fue una de las etapas clave para garantizar la estabilidad, seguridad estructural y desempeño sísmico de la obra, considerando que esta infraestructura se emplaza en una zona con suelos blandos, nivel freático alto y actividad sísmica moderada.

Este proceso permitió dividir el trazado en zonas homogéneas desde el punto de vista geotécnico, clasificarlas según su respuesta ante sismos, y definir las condiciones dinámicas que cada tipo de suelo impone al diseño de estructuras como estaciones, viaductos y túneles.

a) Zonificación geotécnica: criterios y aplicación.

La zonificación geotécnica consistió en agrupar los diferentes sectores del trazado en unidades con comportamientos similares en términos de estratigrafía, tipo de material predominante, profundidad del nivel freático, resistencia al corte y rigidez. Para ello, se utilizaron los resultados obtenidos en los más de 60 puntos de exploración (SPT, CPTU), ensayos geofísicos (MASW) y mapas geológicos regionales del Servicio Geológico Colombiano.

A lo largo del eje de la Avenida Caracas y zonas transversales, se identificaron principalmente tres unidades geotécnicas:

- La primera, ubicada en el norte del trazado (Usaquén y Chapinero), corresponde a depósitos aluviales densos, con suelos granulares bien compactados, menores contenidos de humedad y mejor capacidad portante.
- La segunda unidad, de mayor extensión, se ubica en el centro y sur de la ciudad, y está compuesta por arcillas lacustres blandas, altamente compresibles y saturadas, con baja resistencia y plasticidad elevada.
- La tercera unidad corresponde a los depósitos de transición entre arcillas y materiales más cementados o parcialmente consolidados, presentes a partir de los 25 o 30 metros de

profundidad, y que son utilizados como soporte estructural mediante cimentaciones profundas.

Esta clasificación geotécnica fue fundamental para seleccionar el tipo de fundación más adecuado en cada tramo, definir zonas críticas por asentamientos, y establecer parámetros de entrada para los modelos dinámicos.

b) Zonificación sísmica: respuesta dinámica del suelo

Desde el punto de vista sísmico, el trazado del Metro de Bogotá se encuentra en una región catalogada como de amenaza sísmica intermedia, según el mapa de zonificación sísmica del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Sin embargo, debido a la naturaleza blanda y poco consolidada de muchos suelos en Bogotá, la amplificación sísmica local puede ser significativa, lo que obliga a realizar estudios de microzonificación más detallados.

Para ello, el proyecto adoptó la metodología del IDIGER (FOPAE, 2010), que incorpora la evaluación de la respuesta dinámica del suelo a partir del cálculo de los isoperíodos, es decir, los periodos fundamentales de vibración que caracterizan a cada perfil de suelo. Dichos periodos se estimaron con datos de velocidad de onda de corte (V_s) obtenidos mediante MASW, ensayos de laboratorio, correlaciones con CPTU, y registros de la Red de Acelerógrafos de Bogotá (RAB).

Los resultados mostraron que los suelos de la zona norte tienen isoperíodos bajos, entre 0.2 y 0.5 segundos, lo que indica una respuesta sísmica más rígida. Por el contrario, los suelos blandos del centro y sur de Bogotá presentaron isoperíodos de entre 2 y 6 segundos, lo que implica una amplificación sísmica considerable, especialmente para estructuras con periodos similares.

Con base en estos datos, se asignaron perfiles tipo B, C, D y E según la NSR-10, siendo los perfiles tipo E los de mayor riesgo sísmico local, por encontrarse sobre suelos muy blandos, saturados y con baja velocidad de onda de corte (< 180 m/s).

c) Aplicaciones en el diseño estructural

La zonificación geotécnica y sísmica tuvo implicaciones directas en el diseño estructural del proyecto. En primer lugar, definió los espectros de diseño sísmico que debían utilizarse en cada sector del trazado. Estos espectros, exigidos por la NSR-10, incorporan factores de amplificación sísmica local (F_a y F_v), el período característico del suelo (T_l) y la aceleración pico esperada (PGA o A_o), adaptados a cada perfil del subsuelo.

En segundo lugar, permitió ajustar los modelos numéricos utilizados en el diseño estructural, especialmente los modelos dinámicos de interacción suelo-estructura. Esto fue especialmente importante en zonas donde el período fundamental del suelo coincidía con el período natural de ciertas estructuras elevadas, como viaductos o estaciones elevadas, situación que podría generar efectos de resonancia.

Además, la zonificación contribuyó a optimizar las soluciones de cimentación en función del tipo de suelo: pilotes en estratos competentes, muros pantalla anclados, o losas de fundación reforzadas con mejoramiento del terreno. En algunos tramos se contemplaron medidas adicionales como drenajes profundos, inyecciones, o preconsolidación, para mitigar riesgos por licuación o subsidencia.

Finalmente, esta zonificación sirvió como base para la planificación del monitoreo de subsidencia y deformaciones a largo plazo, incorporando sensores geotécnicos e instrumentos topográficos en los tramos más vulnerables del subsuelo.

4. MODELACIÓN DINÁMICA DEL SUBSUELO

Estrato	Profundidad (m)	Densidad (kg/m³)	Velocidad de onda de corte Vs (m/s)
Relleno superficial	0 – 1.5	1,631	124
Costra superficial	1.5 – 6.5	1,325	124
CH-1 (arcilla superior)	6.5 – 10	1,213	53
CH-2 (arcilla media)	10 – 15.5	1,193	66
CH-3 (arcilla inferior)	15.5 – 24	1,213	78
Depósitos profundos (DAL)	24 – 30+	1,631	436

Imagen N°17 Google. (2025). [Captura Parámetros Indicativos de las Capas del Suelo México en Google][Imagen].

Una vez establecida la zonificación sísmica y los parámetros físico-mecánicos del perfil estratigráfico, se procedió a realizar la modelación dinámica del comportamiento del subsuelo. Esta etapa fue crucial para entender cómo respondería el terreno ante solicitaciones sísmicas reales, especialmente considerando la alta variabilidad del suelo en la Sabana de Bogotá y los periodos de vibración identificados en los estratos blandos.

a) Modelos unidimensionales calibrados con registros reales

La primera aproximación se hizo mediante modelos unidimensionales (1D) de columna de suelo, en los que se simula cómo viajan las ondas sísmicas verticalmente a través de las capas del terreno. Para estos modelos se usaron datos reales provenientes de la Red de Acelerógrafos de Bogotá (RAB), así como parámetros de rigidez dinámica (módulo de corte G_{max}), amortiguamiento, y densidad seca y húmeda.

Cada columna se modeló tomando en cuenta la estratigrafía local, diferenciando capas por sus propiedades mecánicas y dinámica de propagación de ondas. Los modelos consideraron un

amortiguamiento del 5 % y se aplicaron señales sísmicas reales grabadas en Bogotá, con magnitudes y espectros representativos.

Los resultados de estas simulaciones permitieron calcular los espectros de respuesta sísmica en superficie para cada perfil, ajustados a la normativa NSR-10. Este procedimiento también sirvió para validar la asignación de los perfiles tipo B, C, D o E, y para definir el período característico T_l de cada zona. En perfiles tipo E, por ejemplo, se confirmó una amplificación significativa en frecuencias bajas (mayores a 2 segundos), lo cual afecta directamente el diseño de estructuras flexibles como viaductos.

b) Modelos bidimensionales en zonas críticas

En sectores donde la geometría del terreno o las condiciones del subsuelo eran más complejas, se desarrollaron modelos bidimensionales (2D) mediante métodos numéricos avanzados, como elementos finitos y diferencias finitas. Para ello se utilizó el software especializado QUAD4M, entre otros, que permite representar de manera más precisa la interacción entre capas, los límites laterales del terreno y las condiciones de contorno reales.

Estos modelos 2D se aplicaron en zonas como el tramo subterráneo al sur del trazado, donde el espesor de arcillas lacustres blandas alcanza su mayor desarrollo y se requería analizar posibles efectos de acumulación de energía sísmica o resonancia local. También se aplicaron en sectores donde las estructuras del metro (como estaciones de transferencia o cambios de nivel) se encontraban próximas a interfaces litológicas importantes o a zonas de transición entre perfiles sísmicos diferentes.

La modelación bidimensional permitió simular el comportamiento lateral del suelo, incluyendo efectos topográficos, reflexión de ondas y deformaciones diferenciales. Esto aportó insumos

fundamentales para definir juntas estructurales, espesor de losa de fundación y profundidad de anclaje de pilotes o pantallas en condiciones sísmicas.

c) Resultados y aplicación en el diseño estructural

Los resultados de los modelos 1D y 2D se utilizaron como insumo directo para la generación de espectros sísmicos de diseño específicos para cada estación o tramo, en vez de aplicar únicamente espectros generalizados. Esto permitió adaptar las estructuras del metro a las condiciones reales del suelo y prevenir efectos de amplificación local no previstos en modelos simplificados.

Además, la modelación dinámica permitió identificar zonas de resonancia estructural, es decir, sectores donde el período natural del suelo coincidía con el período fundamental de estructuras elevadas o subterráneas. En estos casos se recomendaron ajustes de rigidez, modificación de la configuración estructural o inclusión de disipadores sísmicos.

Asimismo, estos análisis sirvieron para establecer criterios técnicos para la selección del tipo de fundación, estimación de deformaciones en condiciones sísmicas, y diseño de medidas de mitigación como mejoramiento de suelos, inclusiones rígidas o control de licuación.

5. ESPECTROS DE DISEÑO SÍSMICO CONFORME A LA NSR-10

Los espectros de diseño sísmico son herramientas fundamentales para el cálculo estructural de edificaciones e infraestructuras, ya que representan la aceleración máxima que una estructura experimentaría en función de su período natural de vibración, bajo diferentes condiciones de suelo. En el caso de la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB), estos espectros fueron determinados con base en las condiciones locales del terreno, la amenaza sísmica regional y los resultados de la modelación dinámica, siguiendo lo establecido por la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente – NSR-10.

a) Parámetros sísmicos definidos por la NSR-10

La NSR-10 establece que los espectros deben adaptarse a la microzonificación del suelo, incorporando factores de amplificación local y datos de amenaza sísmica regional. Para el caso de Bogotá, se utilizó una aceleración pico efectiva (A_o) en roca de referencia de aproximadamente 0.20 g, valor que corresponde a una zona de amenaza sísmica intermedia.

A partir de este valor, se calcularon los espectros de respuesta sísmica en superficie mediante la fórmula espectral básica:

$$S_a(T) = A_o \times F_a \times F_v \times \text{función espectral}$$

Donde:

- F_a es el factor de amplificación para periodos cortos, relacionado con la velocidad de onda de corte del perfil.
- F_v es el factor de amplificación para periodos largos.
- T es el período estructural de la edificación o infraestructura en segundos.
- T_I es el período característico del suelo, que separa la respuesta entre periodos cortos y largos.

Estos factores fueron determinados para cada zona geotécnica del trazado, basados en los perfiles tipo definidos (B, C, D o E). Por ejemplo, en zonas tipo E (suelos muy blandos), los valores de F_a alcanzaron 2.5 y los de F_v superaron 3.0, lo cual implica una amplificación sísmica significativa, que debe considerarse en el diseño de estructuras flexibles o elevadas.

b) Aplicación de espectros según tipo de retorno y nivel de desempeño

La NSR-10 exige que el diseño estructural contemple diferentes niveles de sismo, en función del tipo de estructura y su nivel de riesgo. En el caso del Metro de Bogotá, como sistema de transporte masivo crítico, se utilizaron espectros correspondientes a tres niveles de amenaza:

- Sismo de diseño (SD): asociado a un período de retorno de 475 años, es el evento base para el dimensionamiento estructural principal.
- Sismo de seguridad limitada (SL): con retorno de 225 años, se utiliza para verificar que la estructura no sufra daño severo ante eventos más frecuentes.
- Sismo de umbral de daño (UD): de 31 años de retorno, se aplica para evaluar el comportamiento funcional ante sismos menores, y asegurar la operatividad sin interrupciones.

Los espectros correspondientes a cada uno de estos niveles se graficaron para cada estación y tramo del proyecto, diferenciando entre tramos elevados, túneles, estaciones superficiales, centros de control y otras estructuras sensibles. Esto permitió ajustar las demandas sísmicas de forma realista y precisa, superando el enfoque tradicional que usa un único espectro genérico para toda la ciudad.

c) Implicaciones en el diseño y la toma de decisiones

La definición de espectros específicos permitió a los ingenieros adoptar decisiones estructurales más adecuadas a cada contexto del trazado. Por ejemplo, en zonas con espectros amplificados en periodos largos ($T > 2$ s), se evitó el uso de estructuras muy flexibles o altas sin disipación sísmica adicional. En estos casos, se implementaron diseños con rigidez mejorada, refuerzos estructurales y dispositivos de control de energía, como amortiguadores sísmicos o juntas de expansión especiales.

En el diseño de cimentaciones, los espectros permitieron estimar con mayor precisión las fuerzas de corte y momentos inducidos en los elementos estructurales bajo eventos sísmicos. Esto fue crucial en tramos con suelos blandos, donde el movimiento amplificado del terreno podría generar esfuerzos significativos en pilotes o pantallas.

Además, los espectros diferenciados permitieron cumplir con los criterios de desempeño funcional post-sismo, exigidos para sistemas de transporte estratégico. Esto implica que, incluso tras un evento sísmico severo, el sistema metro debe conservar su integridad estructural y capacidad operativa sin poner en riesgo la vida de los usuarios.

En síntesis, la construcción de espectros de diseño específicos por tramo, ajustados a los perfiles de suelo y a la amenaza local, representó una medida de ingeniería avanzada que mejora significativamente la seguridad sísmica y la resiliencia de la infraestructura ferroviaria.

6. MONITOREO DE SUBSIDENCIA Y CONTROL DE DEFORMACIONES

Dado que una parte significativa del trazado de la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB) atraviesa zonas con suelos blandos, de alta compresibilidad y saturación, se consideró indispensable implementar un sistema robusto de monitoreo de subsidencia. Esta estrategia no solo permite anticipar riesgos asociados a asentamientos diferenciales, sino también validar los modelos de predicción geotécnica y controlar el comportamiento del terreno durante y después de la construcción.

a) Riesgo de subsidencia en suelos de la Sabana de Bogotá

La Sabana de Bogotá presenta condiciones geológicas que la hacen vulnerable a la subsidencia natural y a la inducida por cargas estructurales. En particular, los depósitos lacustres arcillosos, que se extienden ampliamente en la zona central y sur del trazado del metro, poseen características como alta plasticidad, baja resistencia al corte, y permeabilidad extremadamente baja. Estas condiciones generan asentamientos significativos y prolongados, especialmente cuando el suelo es sometido a cargas nuevas o alteraciones hidráulicas. Además, la presencia de un nivel freático alto, comúnmente entre 5 y 10 metros de profundidad, incrementa el riesgo de deformaciones

verticales debido a procesos de consolidación lenta. El tránsito de trenes, la excavación de estaciones subterráneas, la ejecución de pilotes y la redistribución de esfuerzos pueden activar desplazamientos que comprometan la funcionalidad de la infraestructura si no se detectan y gestionan oportunamente.

b) Instrumentación y técnicas de monitoreo utilizadas

Para controlar estos riesgos, se diseñó e implementó un sistema de instrumentación geotécnica permanente, distribuido a lo largo del trazado, con especial énfasis en zonas con suelos blandos y en estructuras críticas como viaductos, estaciones, pasos deprimidos y zonas de transición.

Entre los instrumentos más relevantes se encuentran:

- Inclínómetros: instalados en perforaciones profundas, permiten detectar desplazamientos laterales del terreno y evaluar la estabilidad de muros de contención o pantallas.
- Celdas de carga y extensómetros: colocados en pilotes y losas de cimentación para medir esfuerzos inducidos y deformaciones en tiempo real.
- Niveles de asentamiento y prismas topográficos: utilizados para monitorear subsidencia superficial de forma precisa mediante estaciones totales automatizadas y sistemas GNSS.
- Piezómetros de cuerda vibrante: empleados para registrar cambios en la presión intersticial y nivel freático, lo cual es clave para evaluar el comportamiento drenado o no drenado del suelo durante las fases de carga.

Además de la instrumentación directa, se aplicaron técnicas de detección remota, en particular la tecnología DInSAR (Interferometría Diferencial con Radar de Apertura Sintética). Esta herramienta satelital permite detectar desplazamientos milimétricos del terreno a lo largo del

tiempo, con cobertura espacial amplia. El análisis DInSAR fue especialmente útil en zonas urbanas densamente construidas, donde el acceso físico a ciertos puntos de medición es limitado.

c) Aplicación del monitoreo en el control de obra y operación futura

La información obtenida mediante el monitoreo se integró en un sistema de gestión geotécnica que permitió:

- Validar las predicciones de asentamiento realizadas durante la fase de diseño. Esto fue fundamental para ajustar modelos de consolidación y actualizar parámetros de diseño estructural en tiempo real.
- Tomar decisiones preventivas durante la construcción, como modificar secuencias de excavación, limitar el ritmo de avance en ciertos tramos o aplicar medidas de estabilización acelerada.
- Asegurar la integridad estructural a largo plazo, al establecer umbrales de alarma para deformaciones diferenciales o movimientos inesperados del terreno que pudieran comprometer la operación del metro.

Además, se proyectó la continuidad del sistema de monitoreo durante la etapa operativa del metro, especialmente en zonas críticas, con el objetivo de realizar mantenimiento predictivo y garantizar que la infraestructura se mantenga estable a lo largo de su vida útil.

En conclusión, el monitoreo de subsidencia en el PLMB no solo cumplió una función de control y mitigación de riesgos, sino que se constituyó en una herramienta de validación científica y soporte para la toma de decisiones técnicas estratégicas.

2. PERFIL ESTRATIGRÁFICO PROMEDIO Y PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS DEL SUBSUELO DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

PERFIL ESTRATIGRÁFICO PROMEDIO

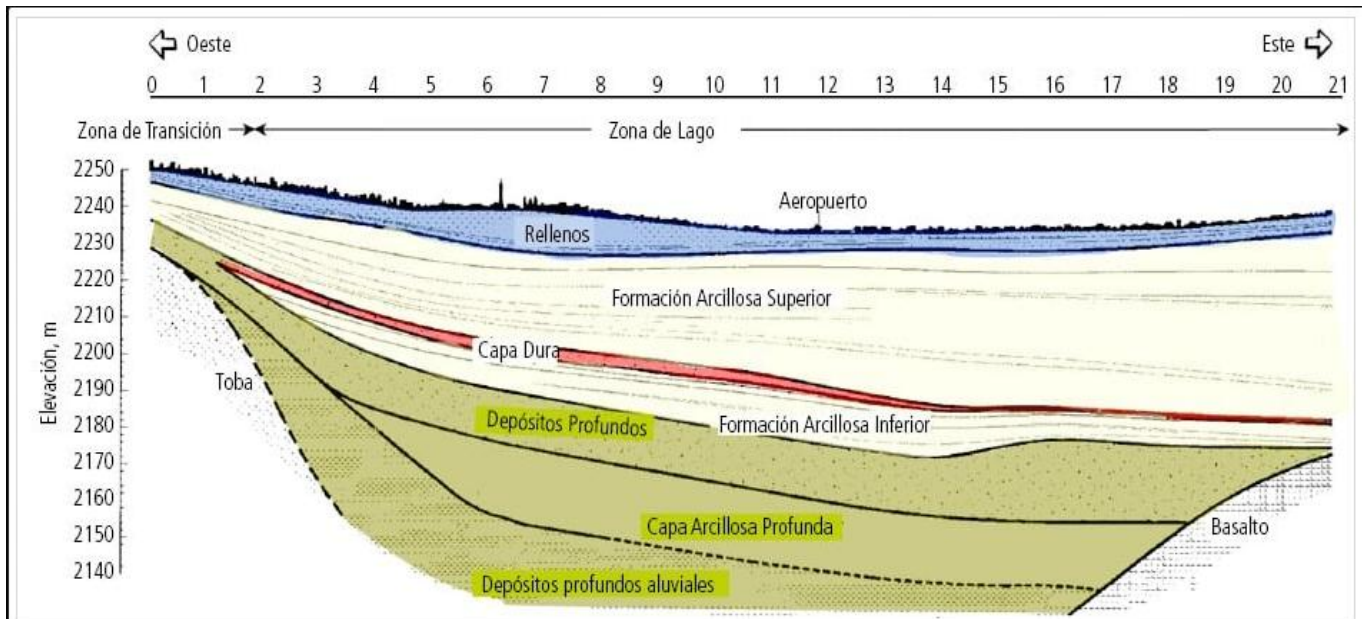


Figura 2. Modelo estratigráfico O-E al centro de la Ciudad de México (Gutiérrez, 1996).

ImagenN°18 Google. (2025). [Captura Modelo estratigráfico México en Google] [Imagen].

El perfil estratigráfico típico encontrado a lo largo del trazo del Metro de la Ciudad de México refleja la compleja evolución geológica de la antigua Cuenca de México, formada por una combinación de procesos lacustres, volcánicos y tectónicos. El subsuelo está dominado por suelos altamente compresibles y deformables, lo cual representa un gran reto para el diseño estructural y geotécnico de la infraestructura ferroviaria subterránea y elevada.

De manera general, el perfil estratigráfico promedio se compone de las siguientes unidades, de arriba hacia abajo:

1. Rellenos artificiales: materiales de baja compactación y alta heterogeneidad granulométrica, con espesores variables entre 0.5 y 3 metros, compuestos por escombros, arenas, limos y arcillas mezcladas.

2. Arcillas lacustres blandas (formación del Lago de Texcoco): esta unidad constituye la mayor parte del perfil y tiene espesores que oscilan entre 20 y 40 metros. Son de color gris oscuro a negro, con estructura masiva, alta plasticidad y contenido de humedad superior al 100 %. Presentan baja resistencia al corte, alta compresibilidad y una capacidad portante muy reducida (Ovando-Shelley et al., 2007; Romo, 1995).

3. Estratos intercalados de limos y arenas: se presentan de forma esporádica en la secuencia lacustre, actuando como niveles de permeabilidad relativamente mayor. Su presencia es clave para el análisis del flujo de agua subterránea y el comportamiento sísmico del suelo (Díaz-Rodríguez, 2009).

4. Arcillas rígidas y suelos volcánicos alterados: a profundidades mayores a los 30–50 metros se encuentran materiales con mayor competencia mecánica, como tobas volcánicas alteradas o suelos residuales endurecidos que funcionan como horizonte de cimentación para pilotes y otras estructuras profundas.

Desde el punto de vista físico-mecánico, los suelos lacustres presentan las siguientes características típicas (Romo, 1995; Juárez-Camarena et al., 2016):

- Contenido de humedad natural (wn): 100 % a 400 %
- Límite líquido (LL): 90 % a 180 %
- Índice de plasticidad (IP): 40 % a 100 %
- Densidad seca (γ_d): 0.6 a 1.0 g/cm³
- Coeficiente de consolidación (cv): 0.02 a 0.3 cm²/min
- Resistencia al corte no drenado (S_u): 5 a 20 kPa
- Módulo de elasticidad (E): 250 a 1500 kPa

Este comportamiento mecánico refleja una estructura edáfica altamente sensible a la carga, con asentamientos diferenciales considerables y tiempos de consolidación muy prolongados. De hecho, en diversas zonas del trazo del metro, los hundimientos post-construcción han superado los 0.5 metros en pocos años, lo cual ha generado desalineaciones en vías y afectaciones en viaductos (Solano-Rojas et al., 2024).

Para cuantificar las propiedades dinámicas, estudios sísmicos han reportado velocidades de onda de corte (V_s) entre 30 y 150 m/s para los primeros 30 metros de suelo, lo que clasifica a estas arcillas blandas como suelos tipo “E” según la clasificación de la NEHRP y la NSR-10 colombiana adaptada al contexto mexicano (StructureMag, 2020).

En consecuencia, el diseño de estructuras del metro en estos terrenos requiere una cimentación profunda (pilotes de fricción o punta), losas flotantes, sistemas de preconsolidación o inclusiones rígidas, y monitoreo de deformaciones a lo largo del tiempo para prevenir fallas estructurales o funcionales.

1. Exploraciones de campo y caracterización del subsuelo del Metro de la Ciudad de México

La construcción y operación del Metro de la Ciudad de México se enfrenta a una de las condiciones geotécnicas más desafiantes del mundo. El trazado del sistema atraviesa en su mayoría antiguos lechos lacustres del Valle de México, donde predominan suelos de origen sedimentario, blandos, saturados y de elevada compresibilidad. La exploración del subsuelo ha sido fundamental para el diseño estructural, la estabilidad a largo plazo y la operación segura de la infraestructura del metro. Las campañas iniciales de exploración de suelos se desarrollaron desde la planeación de la Línea 1 en la década de 1960. Estas incluyeron sondeos a rotación, muestreo inalterado, pruebas de penetración estándar (SPT), pruebas de laboratorio (límites de Atterberg, contenido de humedad, consolidación unidimensional, compresión triaxial y corte directo), así como levantamientos

topográficos y geodésicos. Si bien los métodos de campo evolucionaron a lo largo del tiempo, en muchas zonas se reutilizó información histórica, generando disparidad en la calidad de los datos disponibles entre líneas del sistema (Ovando-Shelley, 2007).

En estudios más recientes se ha incorporado la tecnología de interferometría diferencial por radar de apertura sintética (DInSAR) y PS-InSAR (Permanent Scatterer Interferometry), que permiten identificar movimientos del terreno con resolución milimétrica. Estas técnicas han evidenciado subsidencia en segmentos del metro, especialmente en las líneas elevadas y superficiales, donde se han registrado hundimientos diferenciales superiores a los 30 mm/año en zonas críticas (Solano-Rojas et al., 2024; Osmanoğlu et al., 2011).

Además, la modelación geoestadística de más de 12 000 perfiles de sondeos ha permitido generar un sistema de información geotécnica que proporciona información espacial continua sobre estratigrafía, propiedades índice y mecánicas del suelo. Esta base de datos, desarrollada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y otros centros de investigación, ha sido clave para planear mantenimientos, refuerzos estructurales y ampliaciones del sistema metro (Juárez-Camarena et al., 2016).

Uno de los principales hallazgos de estas exploraciones es que el suelo predominante en la cuenca de México presenta valores de resistencia al corte no drenado muy bajos (<15 kPa), baja permeabilidad, alta relación vacíos, y elevados índices de colapsabilidad. En algunos sectores se documenta también presencia de materiales volcánicos de mayor competencia, así como estratos limo-arenosos intercalados, lo que genera un comportamiento heterogéneo que dificulta el modelado de la deformación diferencial en el tiempo (Ovando-Shelley, 2007; Díaz-Rodríguez, 2009).

Estas condiciones exigen sistemas de cimentación especiales, como pilotes prefabricados, losas flotantes, rellenos controlados y refuerzos mediante inyecciones. Sin embargo, el mantenimiento de estas estructuras sigue siendo complejo debido a la subsidencia continua provocada por la sobreexplotación del acuífero del Valle de México.



Fotografía N° 13 Rojas, L. (2025). [Línea 2 del metro Bogotá D.C] [Fotografía original]. Archivo personal

3. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA Y SÍSMICA DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

La zonificación geotécnica y sísmica del subsuelo de la Ciudad de México es un elemento clave para entender la vulnerabilidad estructural del sistema Metro. Dada la heterogeneidad del terreno y su origen lacustre, se ha requerido integrar múltiples herramientas de análisis geotécnico, sísmico y geoespacial para segmentar el valle en regiones con características similares desde el punto de vista ingenieril.

3.1 Zonificación geotécnica

Desde la década de 1990, el Instituto de Ingeniería de la UNAM y otras entidades han desarrollado modelos de zonificación geotécnica mediante el análisis de más de 12 000 perfiles de sondeos (Juárez-Camarena et al., 2016). Estas investigaciones, complementadas con técnicas geoestadísticas como el kriging y herramientas GIS, han permitido dividir el Valle de México en tres zonas principales:

- Zona I (lacustre): Se caracteriza por arcillas blandas, saturadas y de alta plasticidad, con profundidades de más de 30 metros, contenidos de humedad mayores al 100 % y resistencia al corte muy baja. Presenta los mayores índices de subsidencia y vulnerabilidad sísmica.
- Zona II (de transición): Conformada por depósitos alternados de limos, arenas y arcillas menos compresibles. Aquí, la subsidencia y la amplificación sísmica son moderadas, aunque aún relevantes para estructuras elevadas.
- Zona III (de lomas): Compuesta por suelos derivados de tobas volcánicas alteradas, cenizas compactadas y depósitos piroclásticos. Esta zona es mucho más estable y corresponde generalmente a áreas del poniente de la ciudad.

Estas zonas son fundamentales para el diseño de cimentaciones, elección de sistemas constructivos y la estimación de asentamientos diferenciales que afectan tanto a túneles como a viaductos elevados.

3.2 Zonificación sísmica

El efecto de sitio en la Ciudad de México es uno de los más documentados a nivel mundial. Las características dinámicas del suelo, como la baja velocidad de propagación de ondas de corte (V_s)

< 150 m/s) en las arcillas blandas, hacen que la energía sísmica se amplifique y prolongue (Ovando-Shelley et al., 2007; Díaz-Rodríguez, 2009).

Los estudios de microzonificación sísmica realizados por el Servicio Sismológico Nacional y la Secretaría de Obras han establecido los siguientes dominios sísmicos:

- Zona de periodo largo (lacustre): Isoperíodos de resonancia entre 1 y 3 segundos, compatibles con las frecuencias naturales de estructuras elevadas. Altamente sensible a sismos de subducción como el de 1985.
- Zona de periodo intermedio (transición): Isoperíodos entre 0.5 y 1.5 segundos.
- Zona de periodo corto (lomas): Isoperíodos menores a 0.5 segundos, con baja amplificación sísmica.

La ubicación del sistema Metro en su mayoría dentro de zonas de periodo largo implica una necesidad crítica de considerar estos valores en el diseño estructural y en la definición de espectros de respuesta. Por ejemplo, la frecuencia natural de viaductos elevados del metro (1 a 2 segundos) puede coincidir con la frecuencia amplificada del suelo, lo que eleva el riesgo de colapso por resonancia.

La zonificación sísmica también ha sido integrada a los códigos de diseño estructural de la Ciudad de México (Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones), los cuales especifican espectros de diseño diferenciados por tipo de suelo.

5. MÉTODOS DE CIMENTACIÓN UTILIZADOS EN LAS DISTINTAS LÍNEAS DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Estrato	Profundidad (m)	Densidad (kg/m ³)	Velocidad de onda de corte Vs (m/s)
Relleno superficial	0 – 1.5	1,631	124
Costra superficial	1.5 – 6.5	1,325	124
CH-1 (arcilla superior)	6.5 – 10	1,213	53
CH-2 (arcilla media)	10 – 15.5	1,193	66
CH-3 (arcilla inferior)	15.5 – 24	1,213	78
Depósitos profundos (DAL)	24 – 30+	1,631	436

ImagenN°19 Google. (2025). [Captura Parámetros Indicativos de las Capas del Suelo México en Google][Imagen].

El diseño y ejecución de las cimentaciones para el Metro de la Ciudad de México ha sido un reto geotécnico sin precedentes en América Latina, debido a las condiciones extremadamente compresibles del subsuelo lacustre. La elección del método de cimentación ha dependido directamente del tipo de estructura (túnel, viaducto, estación), del perfil estratigráfico y de los riesgos asociados a la subsidencia y la sismicidad.

5.1 Cimentaciones superficiales

En zonas con mejor calidad del terreno (como las Lomas en el poniente de la ciudad), se han utilizado zapatas corridas y losas de cimentación apoyadas sobre suelos volcánicos endurecidos o sobre estratos granulares densos. Estas cimentaciones superficiales han sido viables en líneas como la Línea 9 (Tacubaya – Pantitlán) o tramos elevados de la Línea 7.

Sin embargo, en suelos lacustres, las cimentaciones superficiales están prácticamente descartadas por su baja capacidad portante, excesiva deformabilidad y alta vulnerabilidad a la subsidencia (Juárez-Camarena et al., 2016).

5.2 Cimentaciones profundas

La mayor parte de la infraestructura del metro (especialmente túneles, estaciones profundas y viaductos elevados) ha requerido cimentaciones profundas. Entre los sistemas más usados destacan:

- Pilotes perforados de gran diámetro: Son los más comunes. Tienen diámetros entre 0.80 y 1.50 m y longitudes de hasta 35 m, apoyados en las capas más rígidas del subsuelo. Se utilizan especialmente en estaciones subterráneas, como las de la Línea 3 (Universidad–Indios Verdes) y en tramos de la Línea 8.
- Pilotes hincados de acero (HP o sección H): Utilizados principalmente en viaductos elevados, como los de la Línea 12. Son más rápidos de instalar, pero menos adecuados en suelos blandos profundos debido al riesgo de pérdida de verticalidad.
- Muros pantalla (diaphragm walls): Aplicados en las estaciones profundas o en excavaciones en trazo urbano denso. Son elementos de concreto armado de entre 60 cm y 1.2 m de espesor, excavados con lodo bentonítico, y que cumplen doble función: contención y cimentación. Se utilizaron ampliamente en la construcción de la Línea 2 (Taxqueña–Cuatro Caminos) y en la extensión de la Línea 1.
- Cajones de cimentación rígidos: Algunos tramos del metro cuentan con estructuras tipo caja construidas en sitio con concreto armado, donde las paredes y el fondo actúan conjuntamente para resistir empujes y cargas. Son eficaces en suelos saturados donde se requieren estructuras semirrígidas e impermeables.

- Pilas de fricción y pilotes tipo Franki o de desplazamiento: Aunque menos comunes, se han ensayado en tramos donde el suelo permite una instalación más eficiente y menor perturbación del entorno.

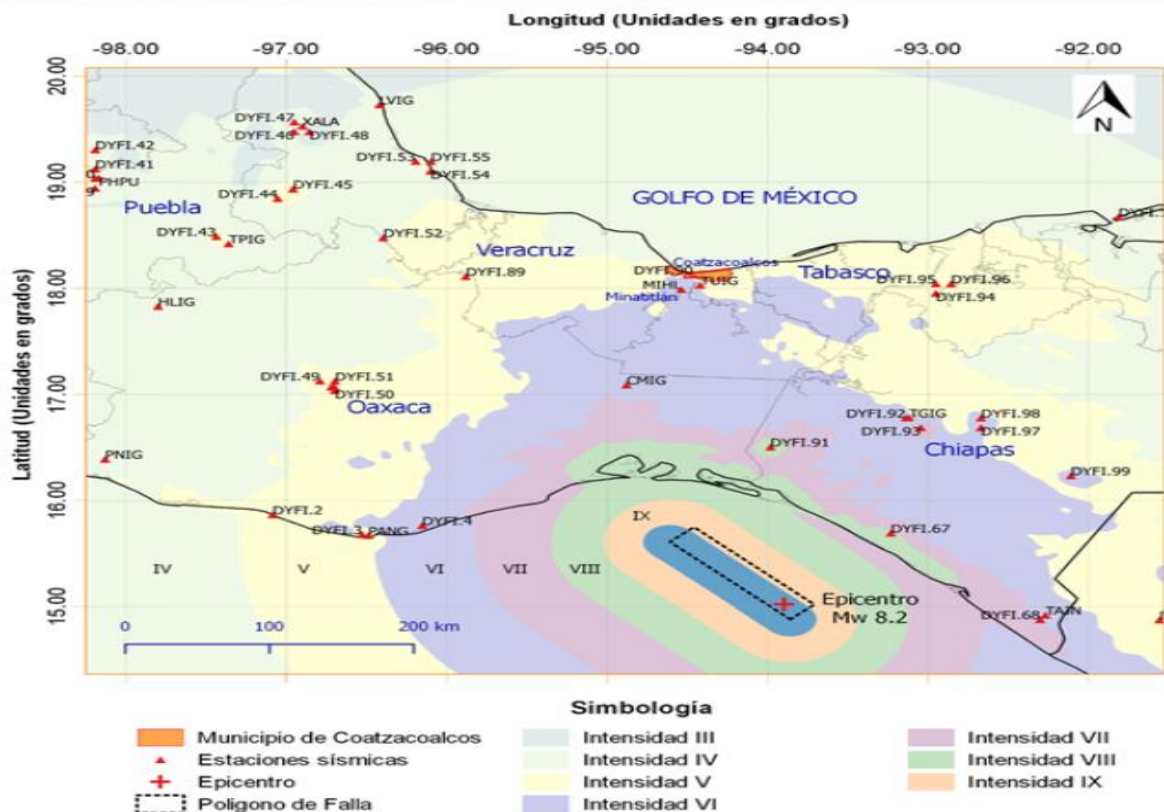
5.3 Cimentaciones adaptadas a la subsidencia

La evolución tecnológica ha llevado a implementar soluciones específicas para mitigar el impacto de la subsidencia sobre las cimentaciones:

- Cabezales con neoprenos móviles, que permiten movimientos verticales sin dañar la superestructura.
- Pilas adaptativas, con sobrecimentación deliberada para compensar asentamientos futuros.
- Monitoreo geotécnico, que permite implementar ajustes a lo largo del tiempo y planificar mantenimiento predictivo.

Estas soluciones han sido especialmente críticas en viaductos como los de la Línea B (Ciudad Azteca–Buenavista), donde la subsidencia ha provocado ajustes estructurales continuos desde su inauguración.

6. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO Y ANÁLISIS DE RESPUESTA DEL SUELO EN EL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO



ImagenN°20 Google. (2025). [Captura Zonificación Geotécnica y Sísmica México en Google] [Imagen].

La vulnerabilidad sísmica del sistema Metro de la Ciudad de México está directamente relacionada con la peculiaridad del subsuelo del Valle de México y la frecuencia de eventos sísmicos asociados a la subducción de las placas de Cocos y Norteamérica. La combinación entre frecuencias naturales del suelo blandas, estructuras largas y rigidez reducida ha generado un contexto de amplificación sísmica severa, particularmente en líneas que atraviesan zonas lacustres.

6.1 Riesgo sísmico general

El riesgo sísmico para la infraestructura del Metro se evalúa integrando los siguientes componentes:

- Peligrosidad sísmica: Está bien documentada por el Servicio Sismológico Nacional.

La ciudad ha experimentado múltiples eventos de gran magnitud, siendo el más crítico el sismo del 19 de septiembre de 1985 (M8.1), el cual causó el colapso de túneles, agrietamientos estructurales y fallas en vías (Ovando-Shelley et al., 2007).

- Exposición de la infraestructura: Más del 60 % del trazado del Metro se encuentra en zonas de alta amplificación sísmica, especialmente en líneas como la Línea 1, 2, 3 y 8, que recorren el centro y sur del valle.

- Vulnerabilidad estructural: La respuesta de estructuras del metro ante movimientos sísmicos depende de la interacción suelo-estructura, la rigidez de las cimentaciones, la edad de las construcciones (muchas de las cuales fueron diseñadas antes de la NSR actual) y el tipo de suelo subyacente.

El índice de riesgo sísmico estructural ha sido evaluado por la UNAM y la Secretaría de Protección Civil mediante modelos probabilísticos, obteniéndose una mayor vulnerabilidad en los viaductos elevados y estaciones profundas localizadas en suelos tipo E según la clasificación de la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo (NTC-DS, 2020).

6.2 Análisis de respuesta del suelo

El análisis de respuesta sísmica en el Valle de México ha demostrado una fuerte amplificación de ondas sísmicas en suelos blandos, tanto en aceleración como en duración. Se han realizado estudios detallados de respuesta sísmica utilizando:

- Modelos 1D (equivalentes lineales y no lineales), con códigos como SHAKE2000 y DEEPSOIL, para calcular espectros de respuesta en superficie a partir de registros sísmicos reales.

- Modelos 2D y 3D para simular condiciones geológicas complejas, fallas de borde y efectos de cuenca. Estos han sido utilizados especialmente para líneas subterráneas profundas como la Línea 3 y Línea 8 (Díaz-Rodríguez, 2009).

- Mapas de isoperíodos del suelo basados en registros acelerográficos, estudios MASW y microtemores, para identificar zonas con riesgo de resonancia estructural.

Los resultados han mostrado que el periodo fundamental del suelo puede llegar hasta 6 segundos en zonas lacustres, lo cual coincide con la frecuencia natural de estructuras elevadas de gran longitud, creando condiciones de resonancia (Juárez-Camarena et al., 2016).

Además, el análisis de movimientos de masa, licuación potencial y deslizamientos ha sido prioritario en zonas de transición, como Mixcoac o Tacuba, donde la interfase entre materiales granulares y arcillosos puede generar fenómenos de inestabilidad durante eventos sísmicos.

7. RECOMENDACIONES PARA MANTENIMIENTO Y MONITOREO GEOTÉCNICO DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El envejecimiento de la infraestructura del Metro, la constante subsidencia del suelo, y la amenaza sísmica hacen imprescindible la implementación de un programa robusto de mantenimiento y monitoreo geotécnico. Las recomendaciones a continuación se estructuran en tres niveles: instrumentación, mantenimiento preventivo y estrategias de resiliencia.

7.1 Instrumentación y monitoreo geotécnico permanente

Se recomienda la instalación de sistemas de monitoreo estructural y geotécnico que incluyan:

- Inclínómetros y piezómetros automáticos en estaciones subterráneas, para controlar desplazamientos laterales y presiones intersticiales en tiempo real.
- Extensómetros de profundidad y sensores de asentamiento diferencial, instalados en pilotes y columnas, particularmente en zonas afectadas por subsidencia (líneas 8, 12 y B).

- Estaciones GNSS de alta precisión y medición con interferometría radar (InSAR), para cartografiar movimientos milimétricos del terreno y correlacionarlos con deformaciones estructurales (Osmanoğlu et al., 2011).
- Sensores de vibración y acelerómetros, integrados a una red sísmica que permita correlacionar daños con intensidad de eventos sísmicos.

El monitoreo continuo permitiría la creación de un sistema de alerta temprana para suspender operaciones en tramos comprometidos y planear intervenciones preventivas.

7.2 Plan de mantenimiento preventivo y correctivo

Basado en estudios de vulnerabilidad estructural (StructureMag, 2020; UNAM, 2023), se recomienda:

- Revisión estructural anual de estaciones, columnas y túneles mediante inspección visual y pruebas no destructivas (ultrasonido, georradar, escáner láser).
- Nivelación y recalibración geométrica de vías cada 6 meses en zonas de asentamientos diferenciales.
- Revisión del sistema de drenaje subterráneo, con limpieza de rejillas, revisión de cárcamos y corrección de pendientes alteradas por subsidencia.
- Cambio y recalce de neoprenos en apoyos de viaductos cada 5 años, o antes si hay evidencia de deformación.
- Implementación de mantenimiento predictivo, usando datos históricos de subsidencia, vibración y humedad para anticipar fallas.

7.3 Recomendaciones de resiliencia estructural

Para incrementar la resiliencia del sistema Metro ante fenómenos geotécnicos y sísmicos se recomienda:

- Diseñar estructuras nuevas con sobrecimentación programada, permitiendo ajustar altura de apoyos conforme al avance de la subsidencia.
- Reforzar estructuras existentes con fibras de carbono y materiales compuestos, como ya se ha hecho en algunos tramos de la Línea 12.
- Actualizar los espectros de diseño sísmico según microzonificación y características dinámicas locales de cada línea.
- Capacitar continuamente al personal técnico en geotecnia aplicada al mantenimiento ferroviario.

Estas medidas son coherentes con prácticas internacionales de ciudades que enfrentan condiciones similares, como Bangkok, Yakarta o Nueva Orleans.

PROYECCIÓN ESTRATÉGICA

La comparación entre la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México y la Segunda Línea del Metro de Bogotá no solo revela diferencias técnicas en la elección de métodos constructivos (TBM vs NATM), sino que también expone un cambio de paradigma en cómo se abordan los megaproyectos de infraestructura urbana en América Latina.

1. Del enfoque reactivo al enfoque preventivo

Mientras que la Línea 12 de CDMX evidenció problemas de planeación y gestión post-constructiva. Derivados en parte por una implementación fragmentada del sistema constructivo el metro de Bogotá busca anticiparse a estos riesgos. El uso exclusivo de TBM refleja una visión más

preventiva, priorizando la **reducción de impactos urbanos, precisión constructiva y seguridad operativa** a largo plazo.

2. Planeación integral y visión sistémica

El caso de Bogotá representa un avance en la aplicación de una **metodología proyectual integral**, donde los estudios geotécnicos, el modelado BIM, la gestión de riesgos y los cronogramas de ejecución están alineados desde las fases iniciales. Esta coordinación interinstitucional contrasta con lo ocurrido en CDMX, donde múltiples entidades operaron con criterios dispares, generando sobrecostos y conflictos técnicos.

3. Innovación tecnológica vs adaptabilidad local

Si bien la TBM representa un salto tecnológico relevante, no se debe asumir que esta es la solución universal para todos los contextos. La experiencia latinoamericana sugiere que **la innovación debe ir acompañada de adaptabilidad territorial y comprensión del suelo urbano**, considerando factores como humedad, plasticidad, sismicidad y afectaciones sociales. Bogotá parece aplicar este criterio al diseñar trazados y profundidades alineadas con su realidad geotécnica.

4. Sostenibilidad urbana como eje transversal

Los nuevos sistemas de metro no solo deben atender la movilidad, sino integrarse como ejes de desarrollo sostenible urbano. La Segunda Línea de Bogotá proyecta estaciones intermodales, eficiencia energética y accesibilidad universal. Este enfoque contrasta con modelos anteriores que veían el metro solo como infraestructura de transporte, sin articulación con el tejido urbano ni su entorno social.

5. Recomendación estratégica para Bogotá

Bogotá debe mantener su enfoque técnico riguroso, pero también aprender de la flexibilidad de CDMX. La clave está en **consolidar un sistema de monitoreo post-constructivo**, mantener actualizados los análisis de riesgos y asegurar un marco legal que exija responsabilidad técnica compartida entre Estado, contratistas y supervisores. Además, se sugiere:

- Desarrollar una base de datos abierta de geotecnia urbana para futuros proyectos.
- Impulsar la formación local en operación de TBMs para reducir dependencia de proveedores externos.
- Vincular el trazado del metro con planes urbanos, vivienda social y polos de desarrollo productivo.

✓ **IMPACTOS DEL PROYECTO:**

- **Ambiental:** Reducción de consumo energético, reutilización de aguas lluvias y manejo de la temperatura mediante diseño pasivo.
- **Arquitectónico:** Modularidad funcional, adaptabilidad espacial y confort climático.
- **Económico:** Inversión escalable, reducción de costos operativos y valorización del entorno.
- **Social:** Generación de empleo, fortalecimiento de alianzas empresariales y apropiación del espacio productivo.

CONCLUSIONES:

- La elección del método constructivo responde al entorno urbano y geotécnico, no a una solución universal.

La experiencia de la Línea 12 de CDMX, que combinó túneles con NATM y viaductos, evidenció vulnerabilidades cuando se aplican soluciones convencionales en suelos altamente compresibles y con riesgos de asentamientos diferenciales. En contraste, Bogotá apuesta por una solución subterránea integral con TBM para minimizar riesgos en una ciudad con una morfología urbana densa y un subsuelo de complejidad media a alta.

- La tecnología TBM se consolida como la opción más eficiente y segura para trazados subterráneos en zonas metropolitanas densas.

Su capacidad de excavación continua, precisión en el control de asentamientos y menor impacto superficial la hacen ideal para sistemas de transporte urbano como el de Bogotá. Su implementación, aunque de alto costo inicial, garantiza una mayor eficiencia operativa y menor interferencia con las dinámicas de la ciudad durante la construcción.

- La experiencia mexicana proporciona aprendizajes valiosos sobre planificación, mantenimiento y gestión del riesgo post-constructivo.

La Línea 12 enfrentó problemas de diseño estructural, asentamientos y fallas constructivas derivadas de una planificación acelerada y decisiones de ingeniería fragmentadas. Estos errores resaltan la necesidad de integrar criterios geotécnicos, estructurales y de mantenimiento desde las fases iniciales del proyecto, lo cual está siendo considerado en la planificación técnica del metro de Bogotá.

- Los indicadores técnicos como número de vagones, velocidad promedio y profundidad de túnel reflejan estándares similares, pero la diferencia radica en la gestión del proceso constructivo.

Aunque ambas líneas tienen configuraciones de tren comparables y velocidades promedio de operación alrededor de los 35-37 km/h, la Línea 12 aplicó decisiones fragmentadas en cuanto a trazado y tecnología, mientras Bogotá está priorizando una solución integral, secuencial y sostenida en estudios técnicos actualizados.

- La evolución de la ingeniería del transporte urbano subterráneo en Latinoamérica depende de la transferencia de conocimiento y la adaptación tecnológica a cada contexto.

Este estudio comparativo resalta la importancia de no replicar modelos de manera literal, sino de analizar sus resultados, adaptarlos a condiciones locales y proyectar soluciones que equilibren eficiencia constructiva, seguridad estructural y sostenibilidad urbana.

ANEXOS:

Anexo 1. Perfil longitudinal esquemático – Línea 12 del Metro de Ciudad de México

- Alturas y profundidades por tramo
- Tipología de suelo
- Tramos elevados, superficiales y subterráneos
- Identificación de estaciones clave
- Cotas de desplante de túneles y estaciones

Anexo 2. Perfil longitudinal esquemático – Segunda Línea del Metro de Bogotá

- Altura sobre nivel del mar por tramo

- Condiciones geotécnicas y geológicas
- Proyecciones de túnel TBM y NATM
- Distribución estimada de estaciones
- Criterios de diseño aplicados

Anexo 3. Tabla comparativa técnica

- Comparación entre TBM y método convencional (NATM o cut & cover)
- Tiempos de ejecución por tramo
- Impacto urbano y afectación vial
- Emisiones, ruido y huella ambiental

Anexo 4. Estudios de suelos (resumen técnico)

- Resultados de estudios de mecánica de suelos en ambas ciudades
- Estratigrafía, niveles freáticos, cohesión y resistencia
- Análisis de riesgos geotécnicos en cada tramo

Anexo 5. Fotografías técnicas

- Documentación fotográfica de campo en Ciudad de México, Puebla y Taxco
- Registros de visitas a obras o estaciones representativas
- Evidencias visuales de métodos constructivos empleados

Anexo 6. Entrevistas a expertos

- Transcripciones o resúmenes de entrevistas con ingenieros de campo
- Opiniones sobre aplicabilidad de tecnologías TBM en Bogotá
- Evaluaciones sobre ventajas y desventajas según contexto urbano.

AGRADECIMIENTOS:

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos al **Ingeniero Henry Giovanny Martínez Mendoza**, cuyo acompañamiento, orientación y compromiso académico fueron fundamentales para el desarrollo de esta tesis. Su experiencia, exigencia y generosidad intelectual han sido una guía valiosa durante todo el proceso investigativo.

Agradecemos profundamente a la **Universidad Piloto de Colombia**, institución que nos ha brindado las herramientas académicas, humanas y profesionales necesarias para consolidar nuestra formación como Ingenieros. Su respaldo y entorno educativo hicieron posible la ejecución rigurosa de esta investigación.

Asimismo, extendemos nuestra gratitud a las ciudades de **México, Puebla y Taxco**, cuya riqueza urbana, cultural y técnica permitió observar y analizar de cerca los contextos reales de aplicación de tecnologías como la TBM y los métodos constructivos convencionales. Estas experiencias territoriales enriquecieron de manera significativa la visión comparativa y el enfoque proyectual de este trabajo.

En particular, agradecemos a la **Ciudad de México**, por facilitar el acceso a información clave sobre la Línea 12 del Metro, y a los profesionales y expertos de la universidad UNAM, que compartieron generosamente sus conocimientos sobre la obra. Finalmente, a todos quienes, desde lo técnico o lo humano, aportaron directa o indirectamente en la realización de este estudio titulado; **“Comparación del proceso constructivo de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México con la Segunda Línea del Metro de Bogotá: Aplicabilidad de Tecnologías TBM y Métodos Convencionales”**, les extendemos nuestros más profundos reconocimientos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Bieniawski, Z. T. (1984). *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*. A.A. Balkema.
- ITACET Foundation. (2019). *Guidelines for Tunneling Projects in Urban Environments*. International Tunneling and Underground Space Association.
- Lovat, T. (2011). *The Use of Tunnel Boring Machines in Urban Environments*. Proceedings of the International Tunneling Conference, 24(3), 112–127.
- ChatGPT. (2025). *Tunnel Boring Machine (TBM)* [Imagen generada por inteligencia artificial]. OpenAI.
- ChatGPT. (2025). *Método constructivo con TBM en la Segunda Línea del Metro de Bogotá* [Imagen generada por inteligencia artificial]. OpenAI. <https://chat.openai.com>
- Google. (2025). [Imagen del Metro de Bogotá – vista Street View o fotografía] [Imagen]. Google. <https://www.google.com>
- Empresa Metro de Bogotá. (2023). *Proyecto Segunda Línea del Metro: información general y avances*. <https://www.metrodebogota.gov.co/>
- García, J. A., & Mendoza, D. F. (2016). Comparación entre métodos constructivos de túneles en medios urbanos. *Revista de Ingeniería Civil y Geotecnia*, 12(2), 85–98.
- Gobierno de la Ciudad de México. (2012). *Informe técnico de la construcción de la Línea 12 del Metro*. Secretaría de Obras y Servicios.
- ITACET Foundation. (2019). *Guidelines for tunneling projects in urban environments*. International Tunnelling and Underground Space Association (ITA-AITES).
- Lovat, T. (2011). The use of tunnel boring machines in urban environments. In *Proceedings of the International Tunneling Conference*, 24(3), 112–127.
- Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2013). *Mechanised shield tunnelling*. Ernst & Sohn.

- Sánchez, L. A. (2015). Desafíos geotécnicos en la construcción de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ingeniería Civil*, 23(1), 34–46.
- Secretaría de Movilidad de Bogotá. (2024). *Documento técnico de soporte: Segunda Línea del Metro Subterráneo*. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.
<https://www.movilidadbogota.gov.co>
- Zhao, J., Gong, Q., & Hefny, A. (2014). TBM tunneling in difficult ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 44, 104–114.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.08.001>
- ImagenN°5 Google. (2025). *[Captura del trazado del Metro de Barcelona en Google]* [Imagen].
- Gobierno de la Ciudad de México (2022). Informe de Rehabilitación Línea 12.
- STC Metro CDMX. "Proceso constructivo de la Línea 12". www.metro.cdmx.gob.mx
- Herrenknecht AG. (2010). Earth Pressure Balance TBMs: Application in Urban Tunneling.
- Ingerop, IDOM, Metro de Bogotá. (2023). Informe de estudios de ingeniería avanzada Segunda Línea.
- Río, R. del. (2015). Técnicas de tunelación urbana. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sacyr Infraestructura. (2012). Avances constructivos TBM Línea 12 Metro DF.
- El Tiempo (2024). "Segunda Línea del Metro de Bogotá: avances y retos técnicos."
- Sistema de Transporte Colectivo (STC). (2012). *Ficha técnica de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México*. Gobierno de la Ciudad de México.
- Empresa Metro de Bogotá. (2023). *Avance técnico de la Segunda Línea del Metro de Bogotá*. <https://www.metrodebogota.gov.co>

- CAF. (2012). *Trenes FE-10 para la Línea Dorada*. Construcción y Transporte Ferroviario.
- IDU (Instituto de Desarrollo Urbano). (2024). *Estudios técnicos para la segunda línea del metro*. Bogotá D.C.
- Empresa Metro de Bogotá S.A. (2019). Estudio geotécnico del proyecto de la Primera Línea del Metro de Bogotá. Bogotá: EMB – IDU. Recuperado de https://www.metrodebogota.gov.co/sites/default/files/proyecto/2.2.10_Geotecnia_y_Pavimentos.pdf
- Instituto de Desarrollo Urbano – IDU. (2017). Informe técnico de estudios geotécnicos en la avenida Caracas y zonas adyacentes – Etapa de factibilidad. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- SOCOTEC Colombia. (2019). Campaña de caracterización geotécnica para el proyecto PLMB: Informes de campo y laboratorio. Bogotá: EMB – SOCOTEC. Recuperado de <https://www.socotec.es/proyectos/caracterizacion-geotecnica-metro-bogota>
- FOPAE – IDIGER. (2010). Zonificación de respuesta sísmica para Bogotá. Informe técnico final. Bogotá: Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático. Recuperado de https://www.idiger.gov.co/documents/20182/112614/Zonificacion_Respuesta_Sismica-FOPAE-2010.pdf
- Ingeominas. (2009). Mapa geotécnico y geológico de la Sabana de Bogotá: Memoria técnica. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

- Díaz-Rodríguez, J. A. (2009). Strain-Rate Effects in Mexico City Soil. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, 135(2), 300–310.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2009\)135:2\(300\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:2(300))
-
- Juárez-Camarena, M., González-Naranjo, M., & Ovando-Shelley, E. (2016). Geotechnical zoning of Mexico Valley subsoil using a geostatistical approach. *Engineering Geology*, 202, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.012>
-
- Ovando-Shelley, E., Ossa, A., & Santoyo, E. (2007). The sinking of Mexico City: Its effects on soil properties and seismic response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(4), 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2006.10.008>
-
- Romo, M. P. (1995). Clay behavior, ground response and soil-structure interaction in Mexico City. *Proceedings of the International Conference on Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Missouri University of Science and Technology.
-
- Solano-Rojas, D., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Osmanoğlu, B. (2024). Geohazard assessment of Mexico City’s Metro system derived from SAR interferometry observations. *Scientific Reports*, 14, 6035. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53525-y>
-
- StructureMag. (2020). Geoseismic Design Challenges in Mexico City. *Structure Magazine*. <https://www.structuremag.org/article/geoseismic-design-challenges-in-mexico-city/>