

RECOMENDACIONES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED BÁSICA DEL METRO DE LIMA (RBML) Y BENCHMARKING CON CHINA

Ing. Jorge Coll Calderón, M.Sc. U. Texas-Austin, MBA-ESAN, CIP, CICCP

Octubre 2024

AGENDA

- 1) BENCHMARKING, FINANCIAMIENTO Y PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DE LA RBML - BTR - TRENES DE CERCANIA**
- 2) EXPERIENCIA CON LOS MÉTODOS DE CONSTRUCCIÓN USADOS**
- 3) ALGUNAS PROPUESTAS EN EL TRAZO DE LA RBML**
- 4) INGENIERIA DE VALOR - L4 DEL METRO Y AUTOPISTA EN LA AV. JAVIER PRADO Y OTRAS SOLUCIONES**
- 5) PROPUESTA PARA LA INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA Y UN DISEÑO OPTIMO DE LAS ESTACIONES EN CAVERNA EN EL CONGLOMERADO DE LIMA**

BENCHMARKING, FINANCIAMIENTO Y PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DE LA RBML - BTR - TRENES DE CERCANIA

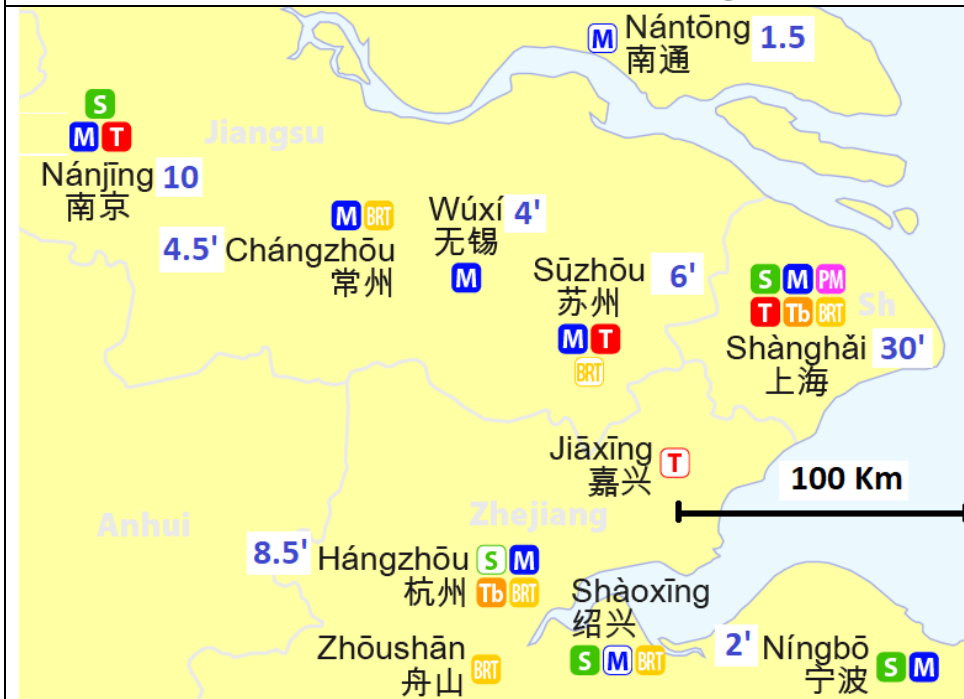
Benchmarking Metro y Tren Interurbano

	Lima	Santiago	Quito	Sta Domingo	Mexico DF	Caracas
Línea de Metro (Km)	39	149	22	31	226	106
Población (millones)	11	7	2.9	4	22	5
Km / Millón hab.	3.5	21.3	7.6	7.8	10.3	21.2
	Lima	El Cairo	New Dehli	Bangkok	Shanghai	Shenzen
Línea de Metro (Km)	39	101	350	136	816	555
Población (millones)	11	20	32	15	25	17.7
Km / Millón hab.	3.5	5.1	10.9	9.1	32.6	31.4

	Shanghai	Beijing	Chongqing	Canton	Tianjin	Shenzen	Chengdu	Nankin	Wuhan	Xian
Línea de Metro (Km)	816	836	520	653	310	555	561	428	486	379
Población (millones)	30	22	18	14.5	14.5	14.5	13	10	9	9
Km / Millón hab.	27.2	38.0	28.9	45.0	21.4	38.3	43.2	42.8	54.0	42.1
	Hangzhou	Dongguan	Shenyang	Foshan	Hong Kong	Zhengzho	Harbin	Quanzhou	Qingdao	Suzhou
Línea de Metro (Km)	516	38	164	135	175	344	32		312	286
Población (millones)	8.5	8	8	8	8	7.5	7	7	6.5	6
Km / Millón hab.	60.7	4.8	20.5	16.9	21.9	45.9	4.6	0.0	48.0	47.7

Las 2 Conurbaciones más densas y pobladas de China

Desembocadura rio Yangtze



Estuario rio de Las Perlas



S S Suburban Railways
 M M Metro
 PM PM People Mover / Monorail
 BRT BRT Bus Rapid Transit
 T T light rail / tramway
 Tb Tb Trolleybus

Benchmarking de Tren de Alta Velocidad y Red Ferroviaria

	China	España	Alemania	Francia	Italia	EEUU	Perú
Población mill	1408	49	85	66	59	337	33
Tren AV Km	40000	4000	1700	2700	1000	740	0
TAV Km / millon	28.4	81.6	20.0	40.9	16.9	2.2	0
Red Ferrov Km	146000	33600	33600	29600	20200	293600	1850
RF Km/millon	104	686	395	448	342	871	56

Lineas	Km de Metro	US\$ millones
Linea 1 existente	35	0
Linea 2 subte	15	1800
Linea 2 existente	11	
Linea 3 Subte	26	2340
Linea 3 Elev	13	585
Linea 4 Subte	23	2070
L4 concesionada Subte	8	960
Linea 6 subte	24	2160
Linea 6 Elev	5	225
Total	160	10140
Km / millon	14.5	4.1%

Propuesta

Red de Metro de Lima + BTR

5% PBI aprox. -

RML=14.5Km/millón < 21.3 Santiago

Propuesta TAV:

Lima - Ica 300 Km

Lima - Barranca 200 Km

15Km/millón como Italia aprox.

Por el momento solo ejecutar:

Callao - Chancay 60 Km

Trujillo - Chiclayo 200 km para
promover descentralización

En China: \$ 20 mill/Km

¿En Perú? > 260x20=\$5200 mill

> 2.1% PBI

Recomendación: priorizar la RBML respecto al Tren Lima - Ica

Según PNIC: L2 y L3 para corto plazo y Tren Lima-Ica para largo plazo

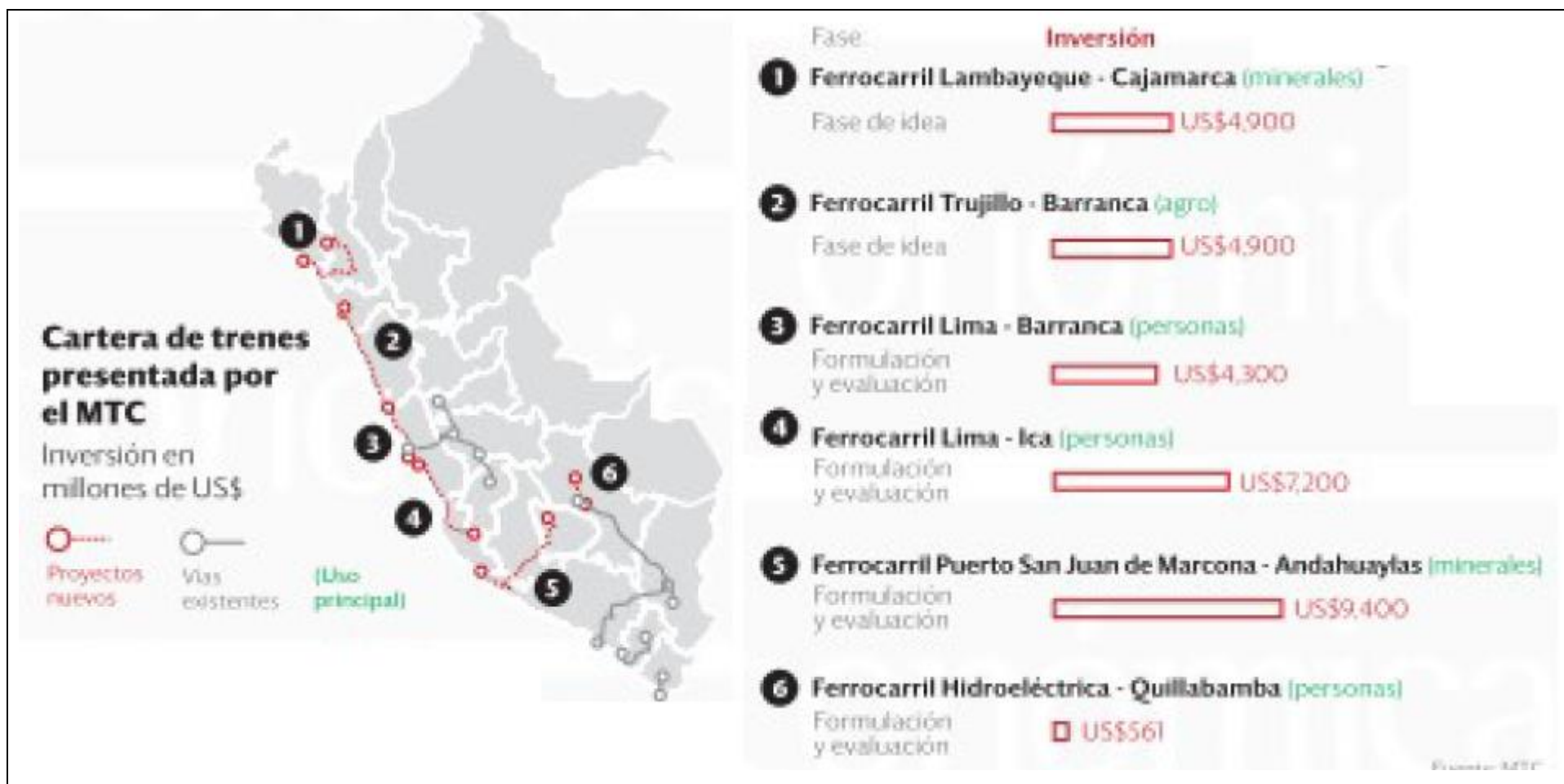
Tiempo y Costo de Construcción de Sistemas de Metro

Ciudad - Linea	Longitud	Periodo construcción	Años	Km/año
Shanghai	816 Km	1992 - 2024	32	25.5
Madrid	200 Km	1997 – 2007	10	20
Santiago L6	15 Km	2014 – 2017	3	5
Santiago L3	22 Km	2013 – 2019	6	3.7
Quito L1	22 Km	2013 – 2023	10	2.2
Lima - L2-Ramal L4	5Km	Abr-2014 – Oct 2024	10	0.5

Ciudad - Metro	Costo US\$ mill/Km	Costo relativo			Túnel equivalente
		4	2	1	US\$mill/Km
		Túnel	Elevado	Superficie	
Madrid-Ext 95-99	31	68%		32%	41
Santiago L5	91	100%			91
México LB	51	25%	20%	55%	105
Caracas L3	115	100%			115
Lima L2-RL4	152	100%			152

Sin considerar IGV-IVA / Inflación 2002-2014, 35% en US\$

Recomendación: elevar calidad profesional y experiencia de staff profesionales de la PMO a cargo de la implementación de la RML-BTR-Tren Cercanías.



Con motivo del reciente viaje a China, el gobierno actual pretende impulsar 6 proyectos de ferrocarriles con inversiones de más \$ 30,000 millones, que no están en el PNIC, y que requieren altísimo nivel de subsidio. Sin embargo, no mencionan para nada la implementación de la L3 y L4 de la RBML. Por lo tanto, aunque es obvio:

Se recomienda al MEF-MTC no cometa nuevamente errores en la correcta priorización de los proyectos, según su rentabilidad social.

Reformas Necesarias - Reforma del Sistema de Transporte

Es necesario eliminar los microbuses y reemplazarlos por buses grande, así como limitar el número de taxis; sin embargo esto no se hace (¿mafias lavando dinero ilegal?)



Espacio que ocupan autos y buses para transportar el mismo número de personas



SHANGHAI

Tráfico ordenado con ayuda de Metro + BTR + buses grandes + cantidad moderada de taxis + bicis en carriles separados y anchos. En Nueva Delhi tienen 350 Km de Metro, pero de poco sirve con los vehículos inapropiados en superficie



LIMA



NUEVA DELHI

Ciudad	Vehículos x 1000 hab.	Tiempo Prom. x 10 km
Lima	216	24 min 20 seg
Bogotá	276	23 min 30 seg
Ciudad de México	262	20 min 10 seg
Sao Paulo	396	18 min
Montevideo	368	17 min 50 seg
Santiago de Chile	305	17 min 20 seg
Buenos Aires	496	16 min

Reforma de la Vivienda y Planificación

Si seguimos permitiendo la expansión urbana de muy baja densidad y por terrenos difíciles, siempre habrá problemas de transporte, aun con una extensa RML - BTR



CHINA

Mayor parte de expansión urbana es por tráfico de tierras en colusión con autoridades.

Comunidades agrarias venden a mafias a pesar q están prohibido para fines urbanos



PERU



INDIA

Monto de la Brecha de Infraestructura y su Financiamiento

Según AFIN, \$ 200B o 80% PBI, según PNIC, \$ 135B o 54% PBI

Según AFIN, el Estado debiera aportar \$ 75B o **30%PBI**

Para RBML-BTR, el Estado debiera aportar 5%PBI.

¿A qué velocidad vamos en inversión de Infraestructura?

En periodo 1992-2011:

Latam 2.3%PBI/año / China 8.5%PBI/año / India 4.7%PBI/año

En Perú se ejecutó 0.3%PBI/año entre 2019-2021

¿Nos endeudamos para que el Estado pueda aportar 30% PBI?

MEF dice NO, por no incrementar riesgo-país. Sin embargo:

- México-Colombia tienen más deuda pública y menos reservas que Perú
- México-Colombia tienen peores parámetros de criminalidad, sistema de justicia, desigualdad social y corrupción que Perú; pero mejor infraestructura
- Los países desarrollados tienen menos riesgo país, pero mucha más deuda pública que Perú

Consecuencias de no invertir en Infraestructura para resolver el problema del Tráfico en Lima Metropolitana

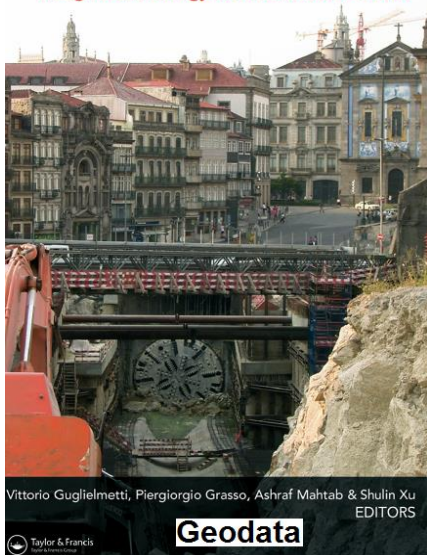
- Lima siempre está en el grupo de 5 ciudades con peor tráfico en el mundo
- Se pierde por caos en el tráfico, >> \$ 3000 millones
- Continuaremos con una baja competitividad

Tipo de Contrato para la Implementación de la RBML

Caso de Metros Subterráneos en Europa

MECHANIZED TUNNELLING IN URBAN AREAS

design methodology and construction control



Contract and construction aspects

Gianni Alberto Arrigoni, FICE, FCI Arb, DRBFM
(Englaw/Ladiniabau – Italy)

"No construction project is risk free. Risk can be managed, minimised, shared, transferred or accepted. It cannot be ignored."

Sir Michael Latham, 1994

A.1 INTRODUCTION

The title of this chapter refers to a subject – "contract" – that, in the mind of the "technical" reader of this book, immediately relates with legalistic aspects and it is thus subconsciously shunned by most "engineers and scientists". But it refers also to "construction aspects", with which then many, if not most, should be decidedly familiar. The author's intention is to refer to specifics of "construction by contract", by which procedure the majority of infrastructure works (including tunnels in urban areas) are actually built, and it purposely avoids the "legalese phraseology" which irks the technical mind.

The principal Actors in any contract are essentially three: Employer (Owner/Promoter), Engineer (Designer), Contractor (Constructor). But also several others come into relevance, at different times with different implications: Government, Administrators, Politicians, Authorities/Agencies (of various kinds), Banks/Financiers, Insurers, Suppliers ("in primis" TBM Manufacturers), specialist Sub-contractors.

The "quantum leap" in technical, risk management and interactive and collaborative terms between all actors, advocated by the "technical" substance of this book, will have become evident to the reader who has come thus far. Compared with the present "one-on-one" (often "adversarial" as to individual interests) contractual situation, this ideal procedure is far from being sought and implemented by the types of contract, with which construction is actually achieved at present.

The quotation introducing this chapter will appear to the technical reader as the "summa" of an eminent Engineer with vast experience in construction and its problems. Actually it is not! It will come as a surprise to all those not versed in the contractual world that Sir Michael Latham is indeed one of the most enlightened English judges, to whom the UK government had assigned the task of reviewing the contractual situation and in particular to recommend ways and means to reduce the adversarial atmosphere and the recourse too often to judicial and arbitration procedures. The adjudication process introduced since then has helped to reduce the loads of the

De acuerdo a experiencias de casos históricos en Europa, los casos de APP terminaron costando al Estado, más de 2 veces las Obras Públicas.

Los Metros subterráneos de Santiago y Madrid construidos como obra pública, han costado mucho menos por Km, que la L2 de Lima, concesionada como APP

Rentabilidad Social vs Rentabilidad Económica - Caso L3 del Metro	
Rentabilidad (US\$ millones) - sin valor residual	
Social	Económica
S/. 6.50 = valor hora-hombre	S/. 1.50 = valor pasaje
VAN = 2262	VAN = - 4323
Cofinanciamiento requerido en términos del VAN → 64% → Requiere subsidio de toda la Obra Civil. Por tanto es mejor implementar la Obra Civil licitándolo como OP	

De acuerdo a la experiencia de Santiago y Madrid, se recomienda:

- Licitar las Obras Civiles, como obras públicas, y además licitarlos, digamos, en tramos de no más de 5 a 7 Km, para que haya más competencia.
- Licitar las instalaciones (escaleras mecánicas, ascensores, etc.), como obra pública, para toda la línea de metro.
- Si se quiere concesionar, solo hacerlo para la etapa de operación y mantenimiento, de tal manera que el concesionario invierta en los trenes. Sería conveniente concesionar varias líneas con un solo operador
- **También se recomienda explorar la posibilidad de financiar la RBML con la plusvalía inmobiliaria**

EXPERIENCIA CON LOS METODOS DE CONSTRUCCIÓN USADOS

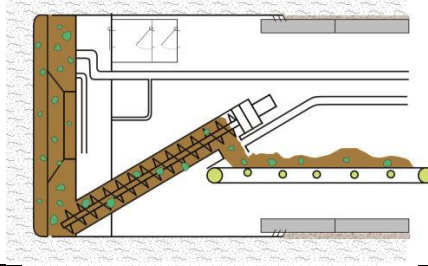
TUNELES – D=10.2m en L2 – L4 METRO DE LIMA



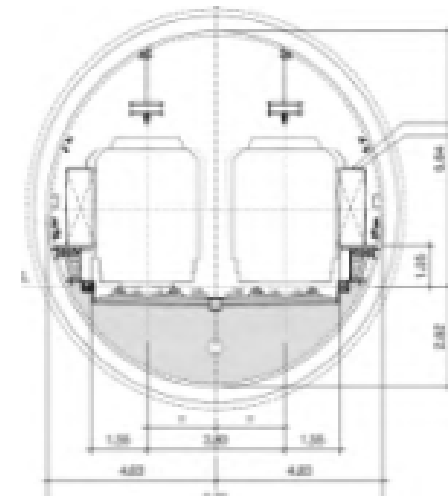
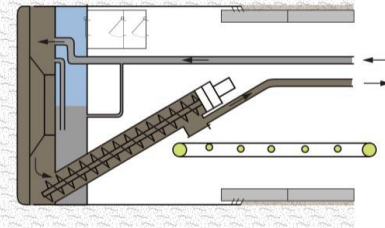
TBM: EPB: Earth Pressure Balance / Multimodo: Slurry Shield + EPB Shield
NATM: New Austrian Tunneling Method → SEM: Sequential Excavation Method

Tipo de Tuneladoras

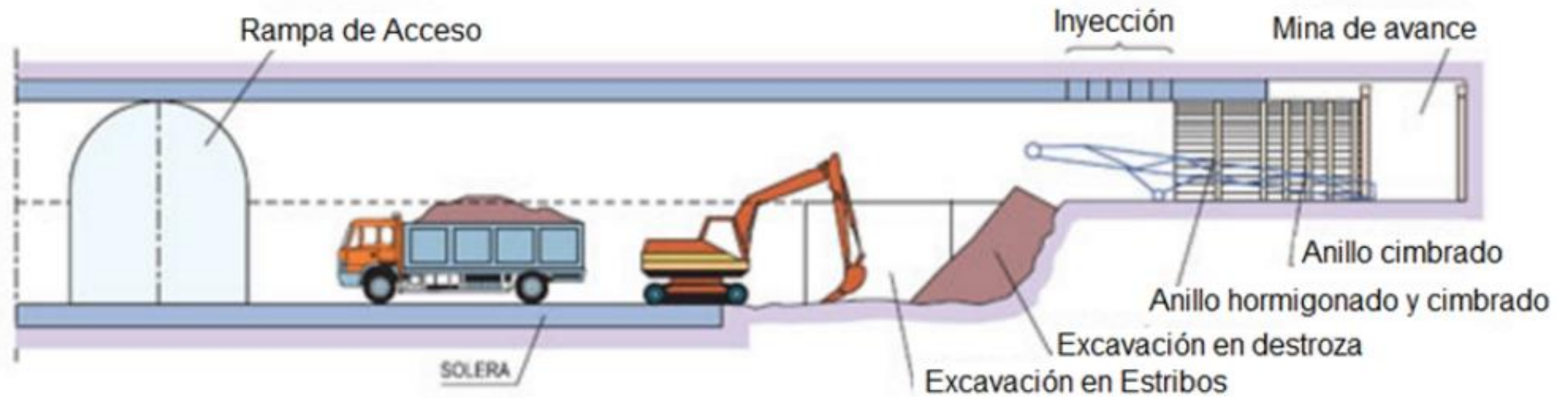
EPB: Earth Pressure Balance



Multimodo: Slurry Shield + EPB Shield

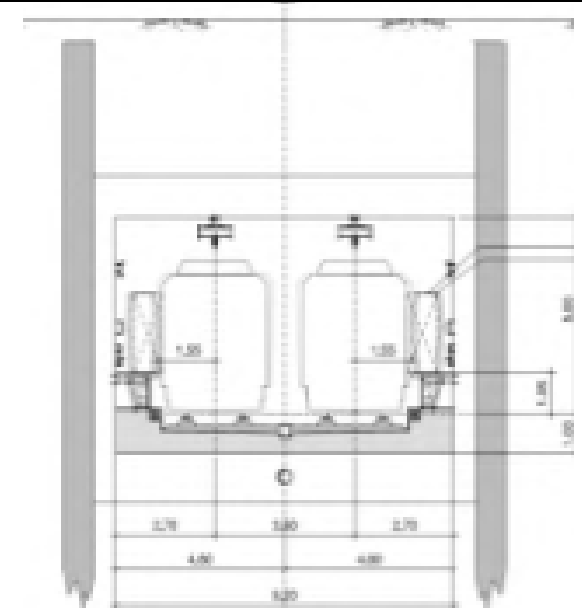
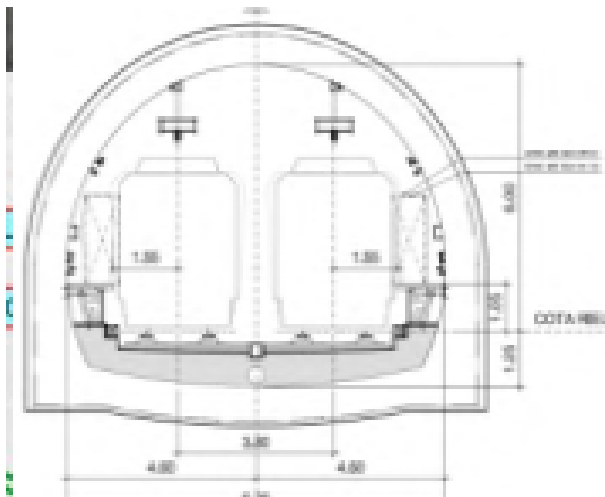


NATM: New Austrian Tunneling Method



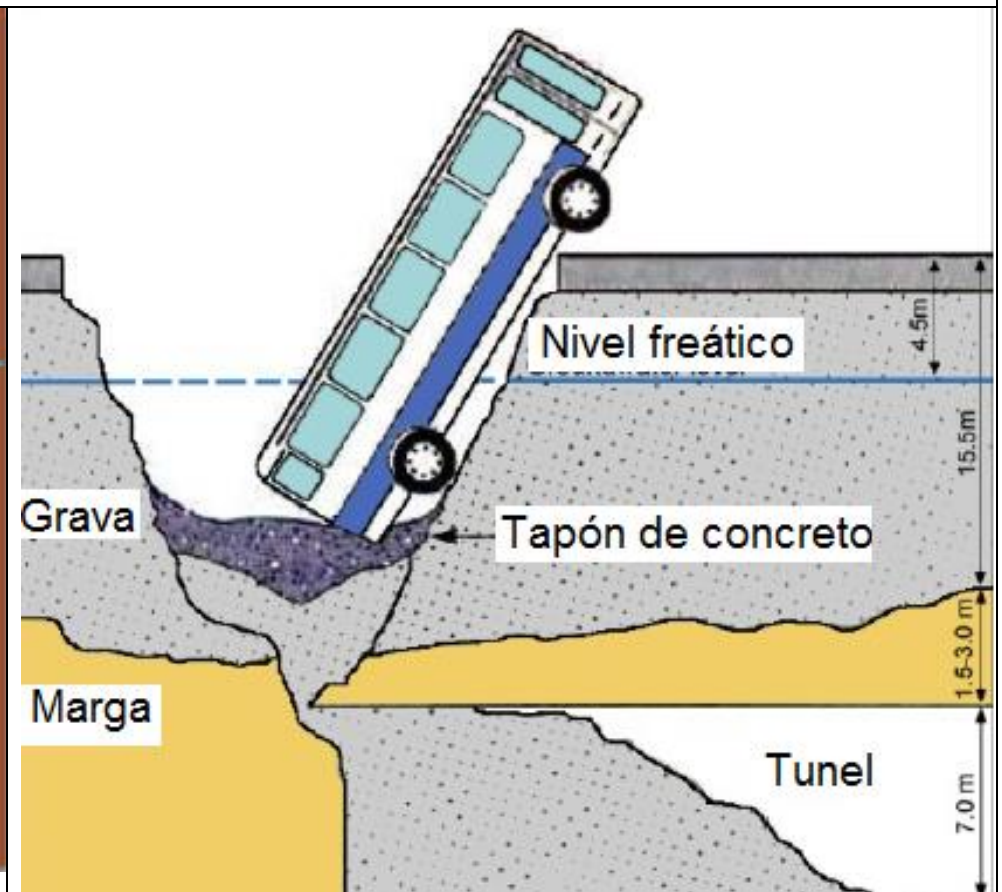
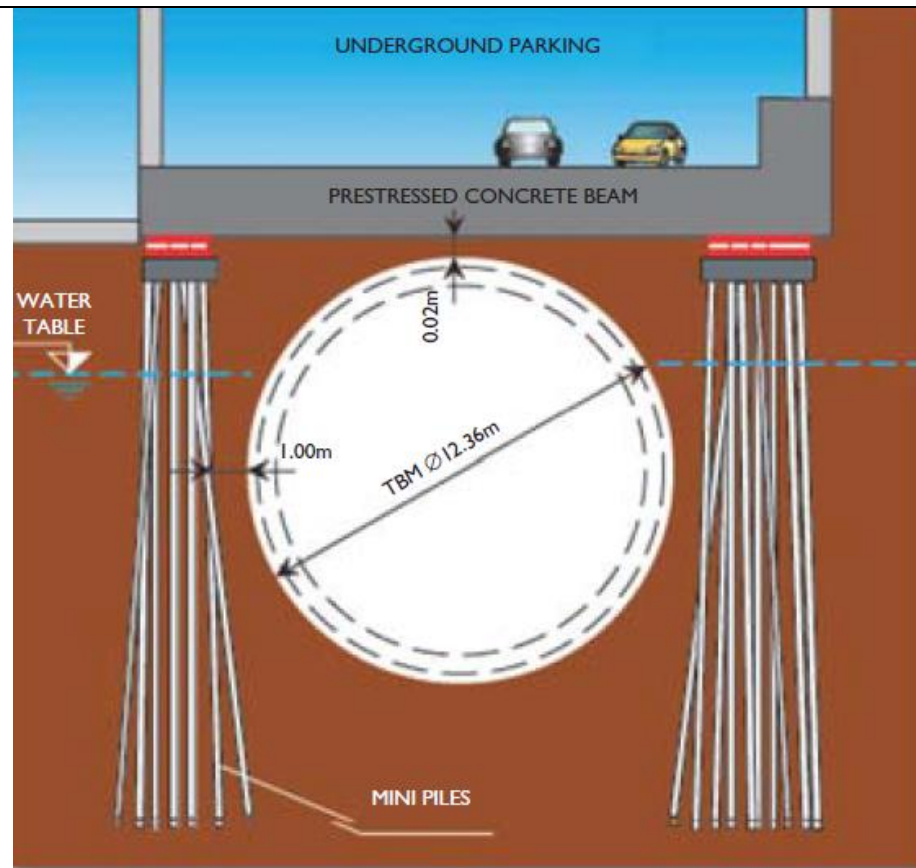
NATM

Túnel Cut / Cover



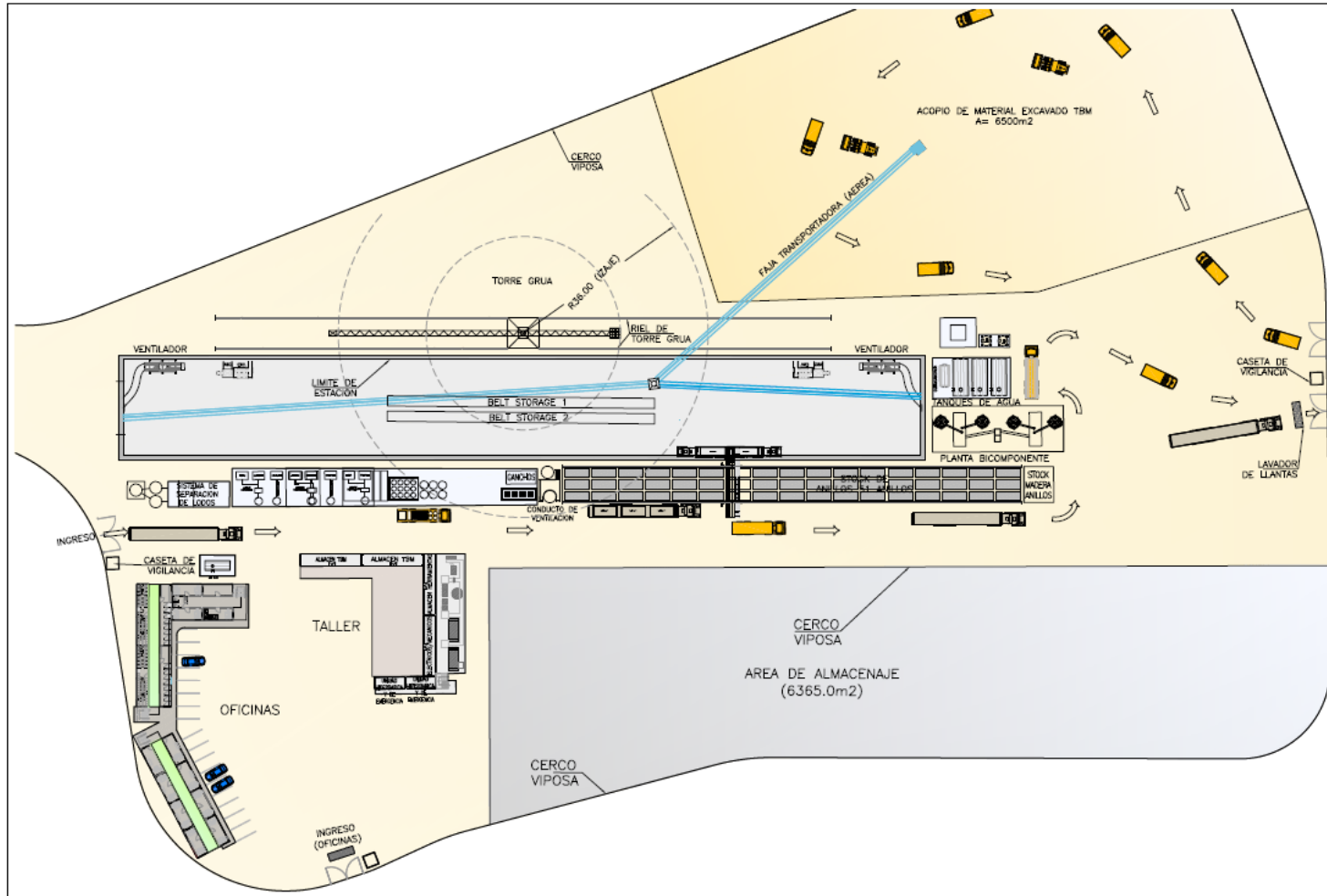
Túneles con Tuneladora vs Mina (TBM vs NATM)

- La TBM requiere menos frentes de trabajo, pero de área mayor.
- La TBM tiene mucho menos riesgo que ocurran fallas, y por ello, con el debido refuerzo del terreno, se puede construir en situaciones difíciles, como por ejemplo, cercano y debajo de edificios.



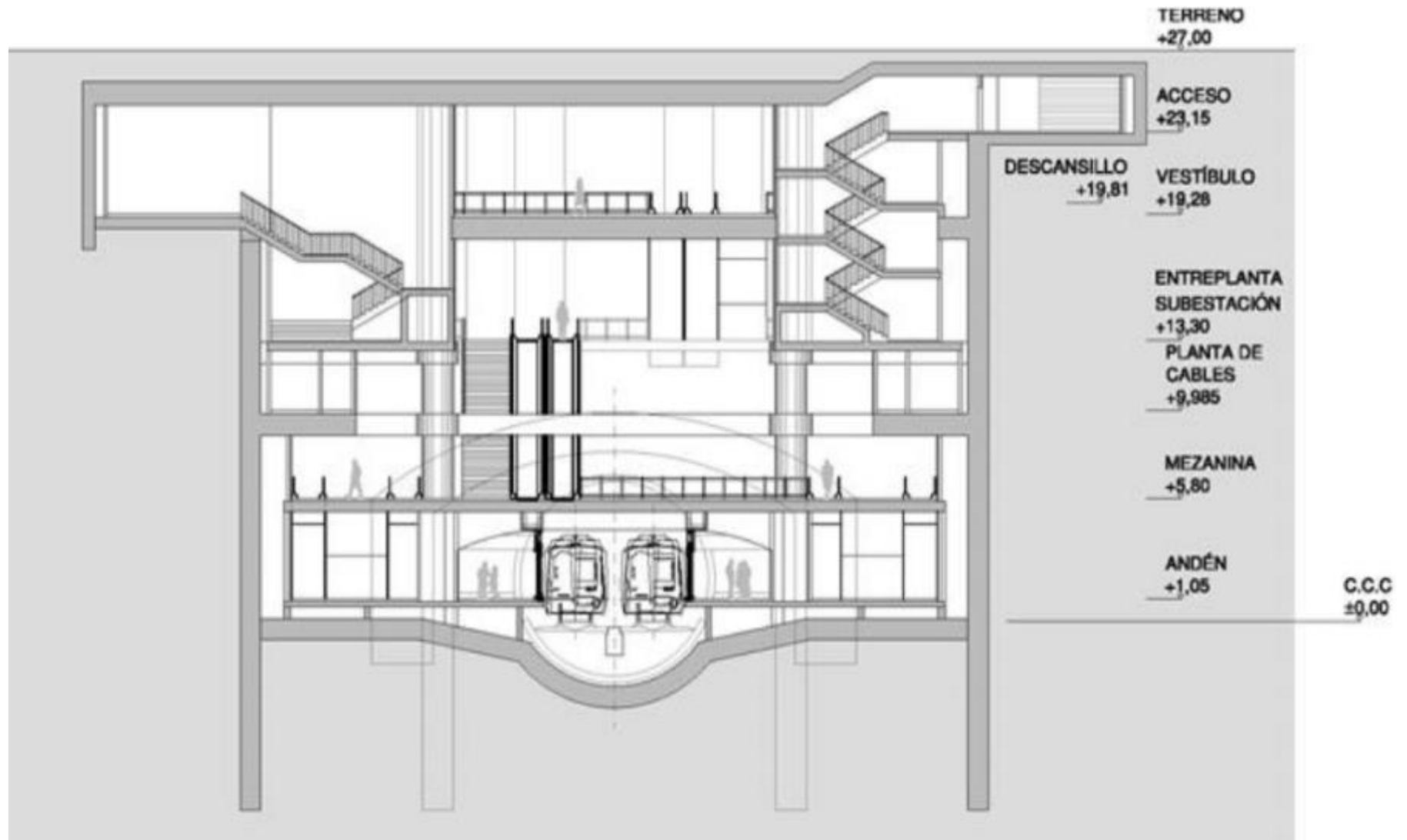
Elección de los sitios de ataque de las Tuneladoras TBM

Para cumplir con las necesidades de espacio, se requiere 8,000 m², para 1 TBM y para 2 TBMs, más de 15,000 m² aprox. Cada campamento tiene un diseño único considerando que las áreas libres de estos son dispuestas de acuerdo a la ubicación de los pozos de ataque y el número de TBMs a ser montadas.

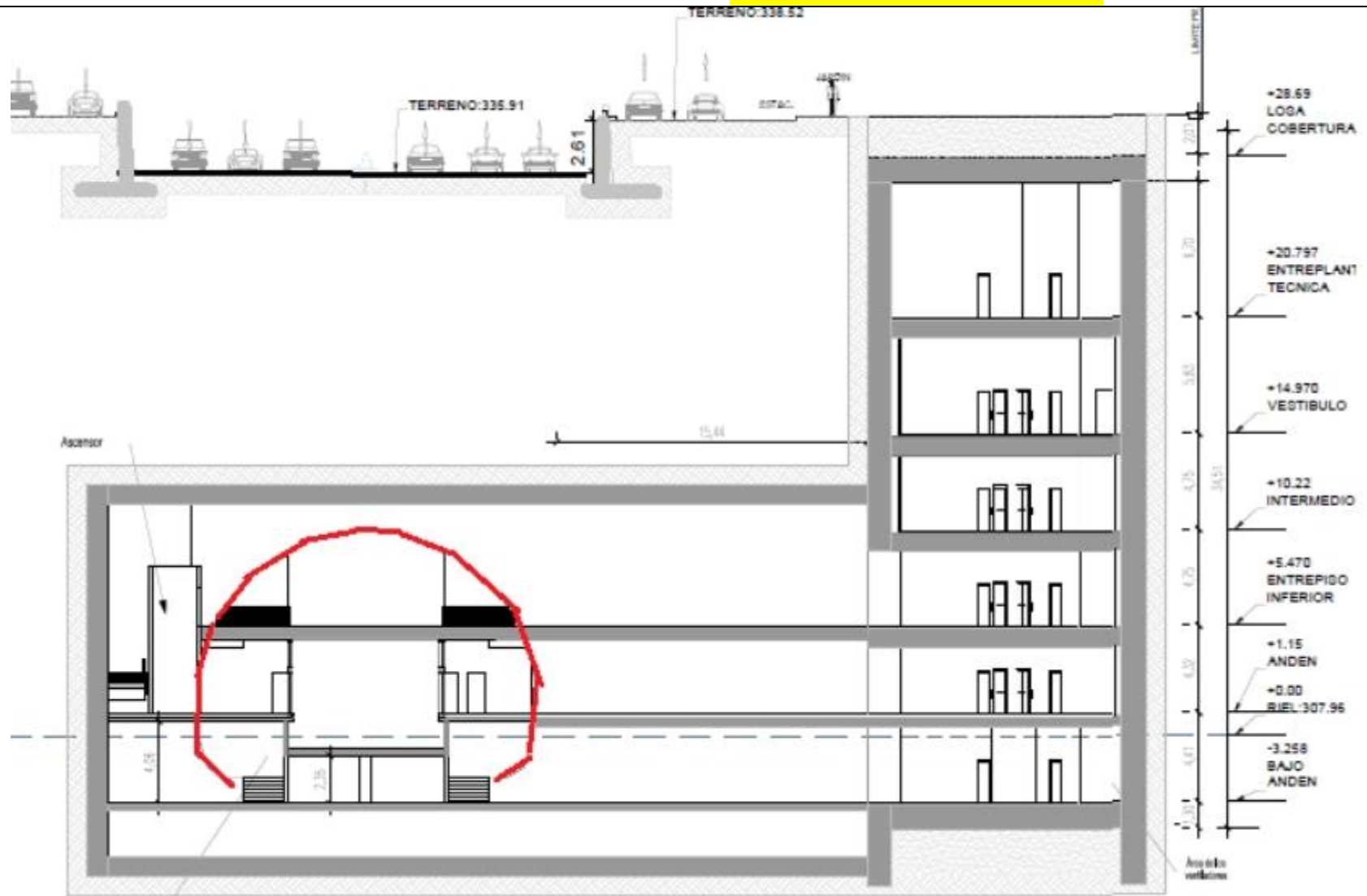


METODOS DE CONSTRUCCIÓN USADOS EN LAS ESTACIONES - L2 – L4

Estaciones en Trinchera



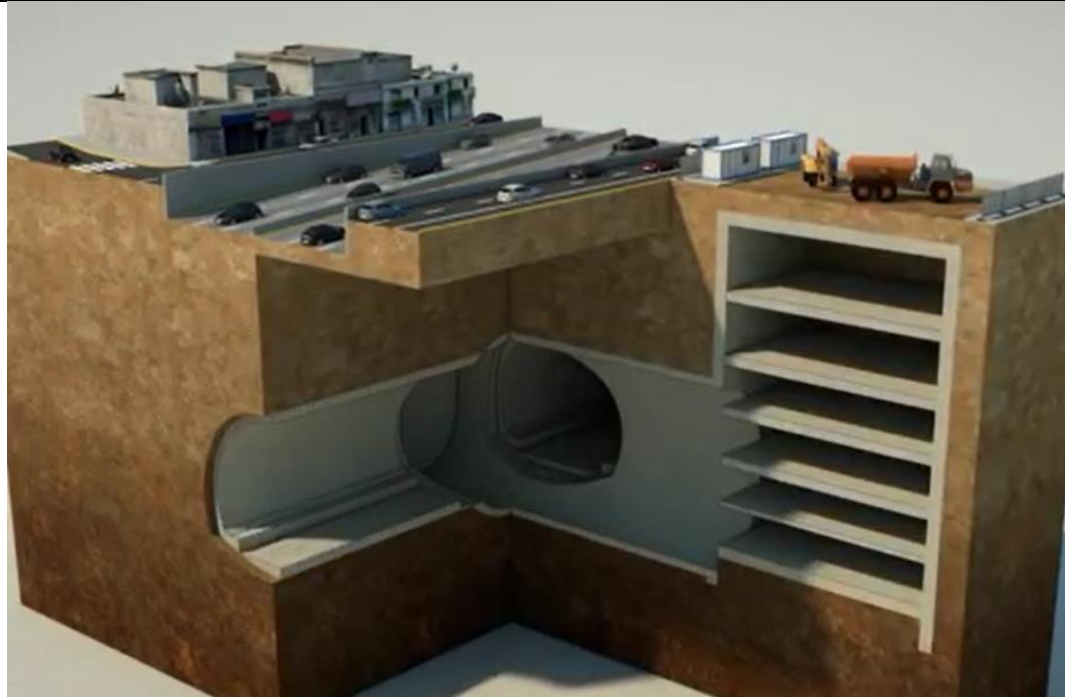
Estaciones en Caverna ¿solo una en la L2?



Etapas de Construcción Simplificada de una Estación en Trinchera



Etapas de Construcción Simplificada de una Estación en Caverna



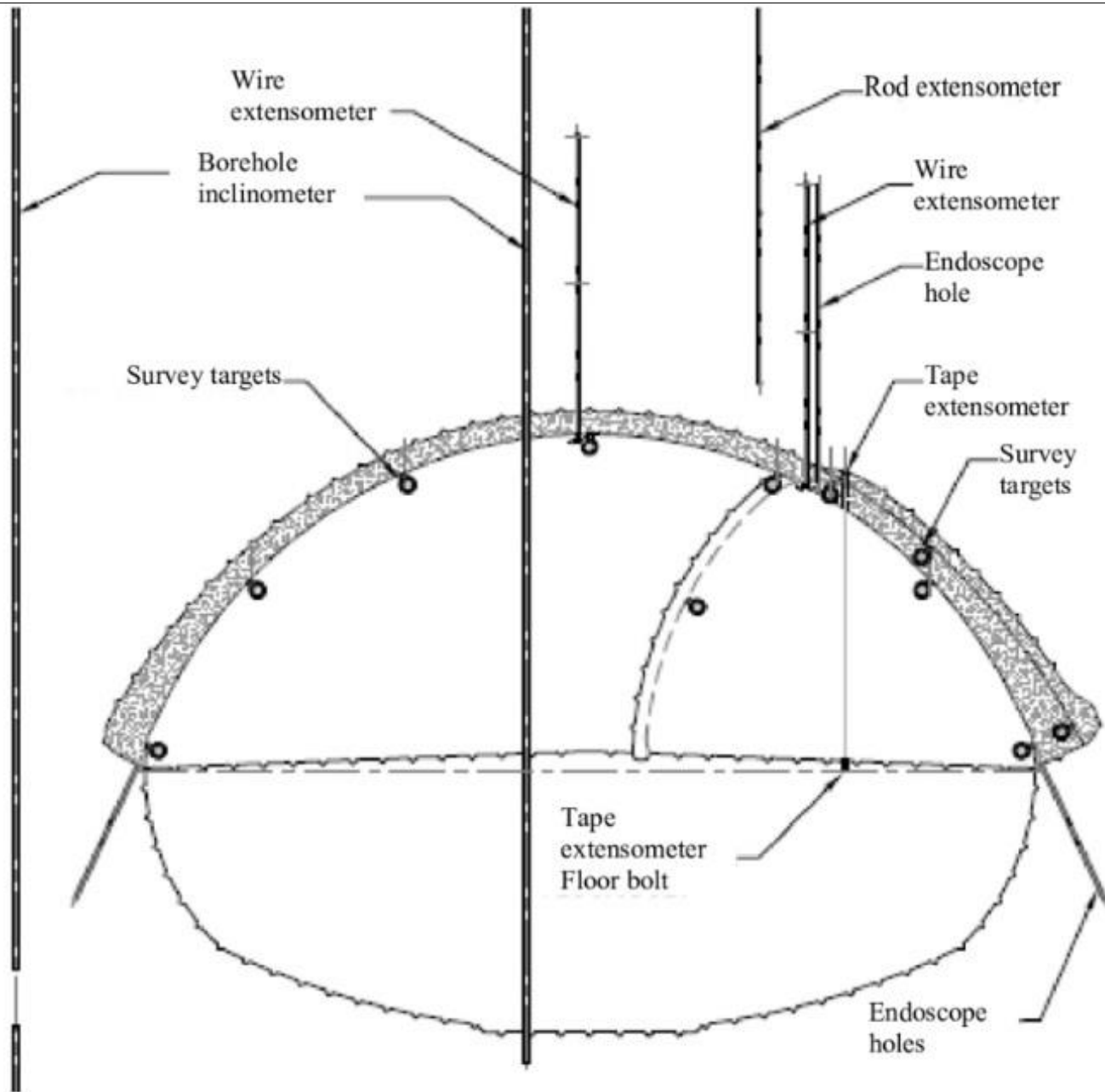
Estaciones en Trinchera vs Caverna (ET vs EC)

- Las ETs son menos costosas y toman menos tiempo en construirse.
- Las ETs se puede construir de manera más superficial, lo que mejoraría la accesibilidad para los pasajeros y los costos de los accesos.
- En las ETs hay menos peligro que se produzcan asentamientos durante su construcción y que, en consecuencia, afecte a las pistas y estructuras vecinas
- En las ETs son mucho más controlables con todos los riesgos que ocurrirían, en caso se presenten bolsones de suelos más débiles, por ejemplo.
- En las ECs se generan menos problemas con la interferencia de los servicios públicos (agua, desagüe, luz teléfono, etc.). Este puede ser un diferencial importante pues grandes afectaciones urbanas tienen trámites largos y complejos de aprobación y construcción.
- Las ECs afectan menos el tráfico en superficie.
- No hay experiencia en ECs en Lima; y para su diseño optimo, se requiere precisar las propiedades mecánicas del conglomerado.

Recomendación:

Procurar construcción lo más pronto posible una o más Estaciones en Caverna, debidamente monitoreadas, y que no están en la ruta crítica de la construcción; de tal manera que con los resultados del monitoreo y la investigación geotécnica especial, se pueda diseñar las próximas Estaciones en Caverna, de manera más óptima.

Las estaciones caverna piloto, requieren un monitoreo intenso durante su construcción



TIEMPOS CONSTRUCCION DE ELEMENTOS DEL METRO SUBTERRANEO

Rendimiento TBM grava - bolones - cantos rodados (Herrenknecht)			
Rendimiento metros	Día	Semana	Mes
R. Promedio	19	88	350?
R. Máximo	39	178	643

Montaje / Desmontaje TBM = 2 meses

Rendimiento NATM = **50m / mes aprox**

Rendimiento túnel cut / cover = **170m / mes aprox**

Montaje vías = 1200 m / mes aprox

Instalaciones túnel = 1050 m / mes aprox

Talleres y Cocheras > 18 meses

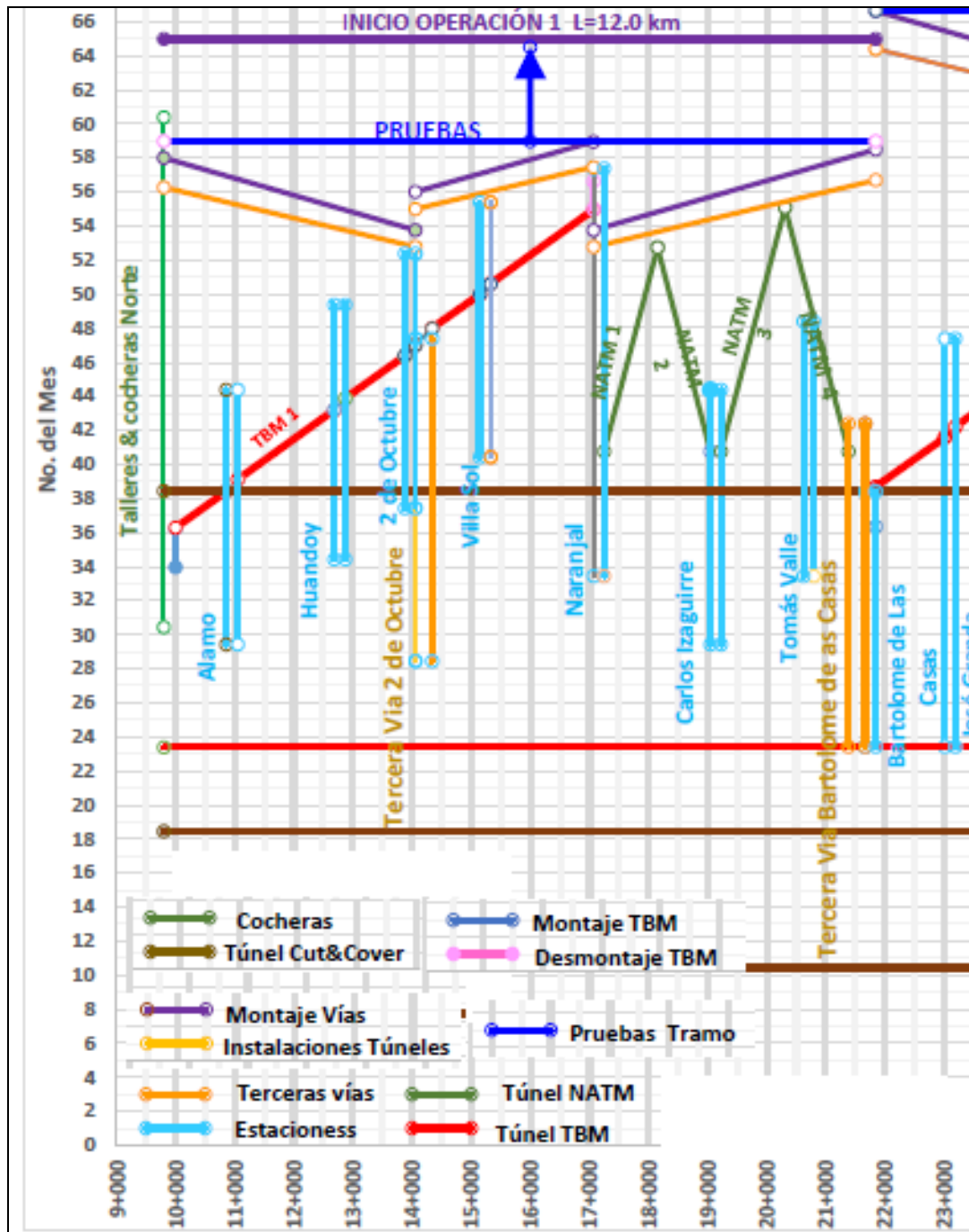
Estaciones tipo Trinchera (L=140m) = **Mínimo 14 meses**

Estaciones tipo Trinchera para que pase la TBM = **Mínimo 8 meses**

Terceras vías tipo Trinchera construcción y pase TBM = **18 meses**

Estaciones tipo Caverna construcción y pase TBM > **¿¿30 meses??**

Pozos de ventilación: 4 a 6 meses.



Recomendación:

Planificar la construcción de los túneles principalmente con TBM, e incorporar NATM/SEM en otros frentes para ayudar a cumplir el cronograma, en caso la TBM se retrase, o en caso se tenga problemas con la disposición de terreno para ataque de la TBM. En la licitación se debiera permitir las 2 metodologías.

ALGUNAS PROPUESTAS EN EL TRAZO DE LA RBML

Red Básica del Metro de Lima



REQUISITOS PARA EL TRAZO DE LA RED DE METRO

- 1) Buscar las zonas de mayor demanda origen/destino, y cuando no se pueda, densificar las zonas de densidad insuficiente.
- 2) Buscar minimizar la interrupción del tráfico durante la construcción.
- 3) Facilitar la solución de un tren pasante para el transporte de pasajeros. (Génesis de las Redes Ferroviarias Metropolitanas: Londres, N.York, Paris, Berlín)
- 4) Procurar una solución en elevado, antes que, en subterráneo, puesto que cuesta del orden de la mitad por Km.
- 5) En el metro subterráneo, hacer el trazo, procurando que las estaciones no estén muy profundas. Al respecto, las estaciones en caverna requieren estar más profundas que las estaciones en trinchera, toman más tiempo en construirse y son más caras.
- 6) Financiar parcialmente la RML, con la plusvalía inmobiliaria.
- 7) Buscar tejer una red, con la ayuda de la red de BTR.

CONDICIONES DE TRAZO DE LA RED DE METRO

- 1) Estaciones espaciadas del orden de 1 Km, con velocidad de crucero de 35 Km/h y velocidad de diseño de 80 Km/h.
- 2) ¿Velocidad de crucero para el tren pasante? Tren Lima-Ica tendrá una velocidad de $V=200$ Km/h
- 3) Radios mínimos de 250m (y 90m, en los patios), pendiente máxima de 3.5% en el trazo, pendiente máxima en estaciones 0.5%.
- 4) Si $V=200$ Km/h $\rightarrow R_{200} \approx (V_{200}/V_{80})^2 \cdot R_{80} = 1500m$
- 5) Radio mínimo en curva vertical 3000m
- 6) Área del Patio-Taller, mínimo 25 Has.

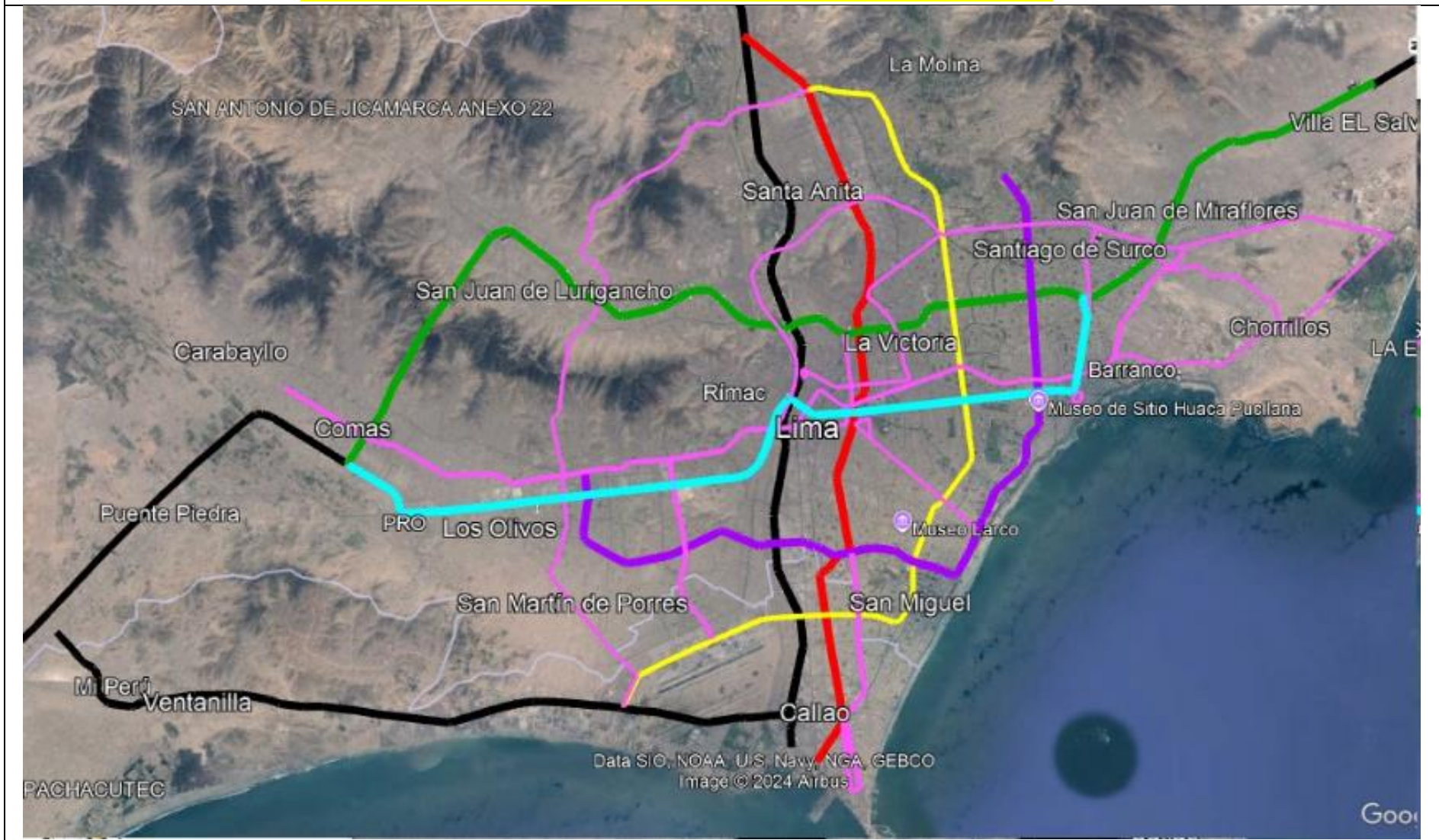
CORRECCIONES A LA RED BASICA DEL METRO DE LIMA

- 1) El tramo al norte del río Rímac de la L3, podría ser viaducto elevado (Ingerop-Systra-2011)
- 2) La Línea 5 no tiene sentido, pues prácticamente se superpone con la línea BTR-1 y no tiene suficiente demanda que lo justifique.
- 3) La Línea 3, entre T.Marsano y Panamericana Sur, sirve a zona de poca demanda; y el tramo entre Benavides y Pte. Atocongo, podría estar servido por un BTR a lo largo de la Panamericana.

Propuesta de la L3 como tren pasante con trazo más directo en el tramo sur. Tendría que estudiarse las consecuencias de la casi superposición con la BTR-1 en el tramo de Barranco-Chorrillos. **Se puede diseñar trazo de L3 para $V > 80$ Km/h.**



Propuesta de la L1 como tren pasante. Se tendría que construir un túnel de 6Km al norte, y la velocidad estaría limitada a $V < 80$ Km/h

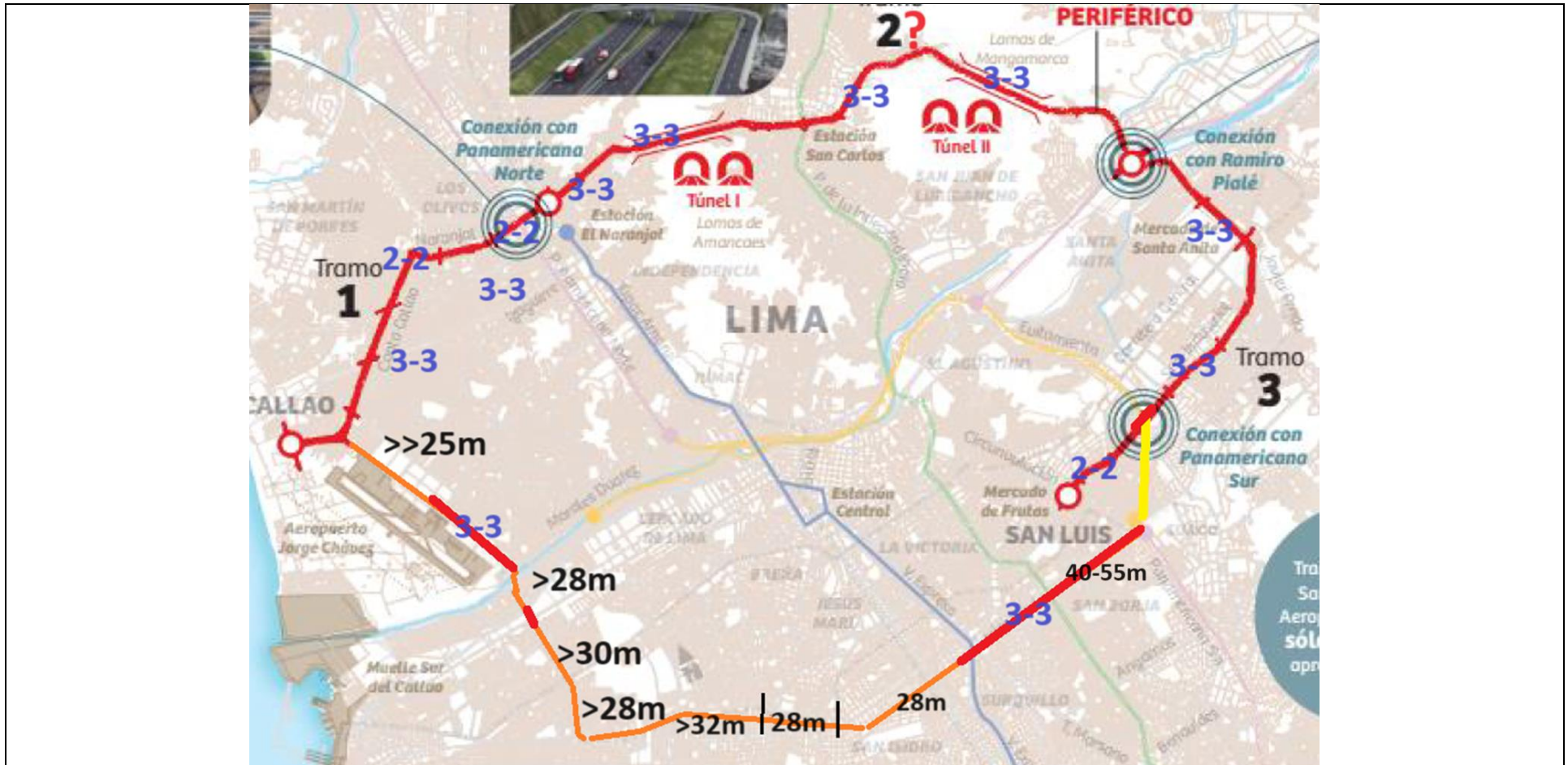


Recomendaciones

- 1) Considerar tren pasante Sur-Norte para la RBML, y estudiar cual podría ser el más conveniente, si la L1 o la L3. Cualquiera que se escoja, tendría que definir un horario para que trabaje como tren pasante (antes de la hora punta en la mañana, y después de la hora punta en la tarde), y como metro normal (horario laboral).
- 2) Adaptar el ferrocarril central como tren pasante Este-Oeste;
- 3) Implementar ramal Pte Piedra-Ventanilla-Callao como tren de carga principalmente (80 Km/h) y también como tren de pasajeros, que se uniría al tren de cercanía a Chancay
- 4) Verificar las propuestas con un análisis en red de la RBML, la red de BTR y los trenes de cercanía.

INGENIERIA DE VALOR

L4 DEL METRO Y AUTOPISTA EN LA AV. J.PRADO Y OTRAS SOLUCIONES



Tiene que cerrarse el anillo de la autopista recientemente concesionada, y construir la L4. El problema está en cómo construir ambos sin interrumpir el tráfico, sobre todo, en algunos tramos. Por otro lado, hay unas propuestas de “fly overs” en la Av. J.Prado, recientemente propuestas por la MML. **ES IMPORTANTE COORDINAR MML-ATU**



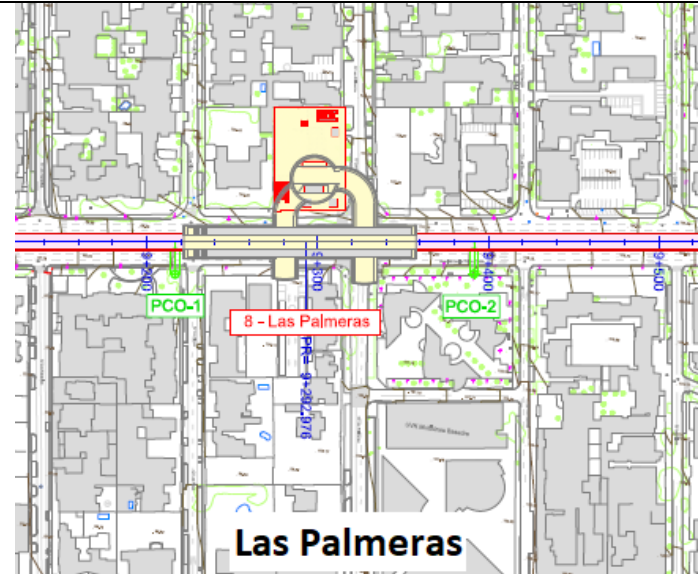
Propuesta de “Fly Overs” (en rojo) de la MML, en la Av. J.Prado.
Sería preferible que la Autopista cruce con un puente a la Av. La Molina



Propuesta de “Fly Overs” (en rojo) de la MML, en la Av. J.Prado
Los tramos entre “Fly Overs” tendrán que conectarse con una autopista
en superficie

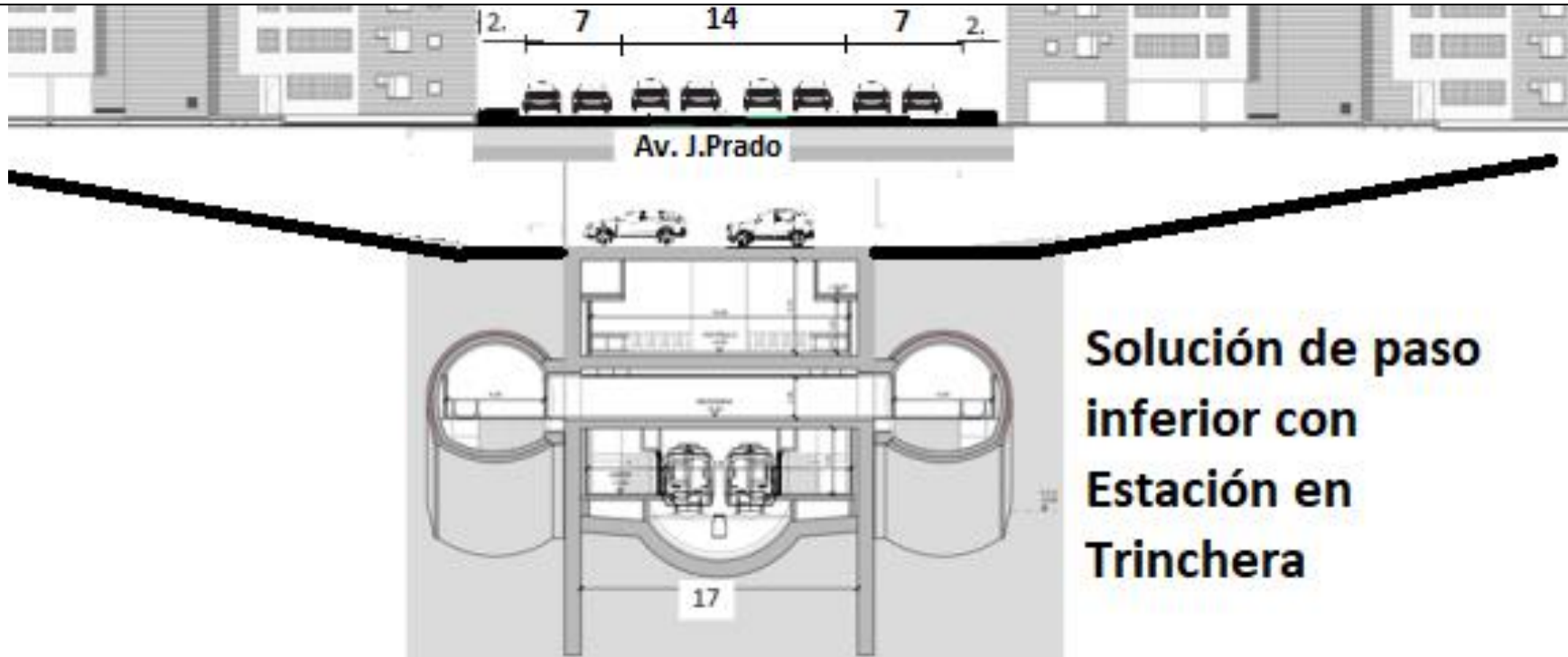


Prescott



Las Palmeras

Estaciones en Caverna debajo de Autopista en Superficie

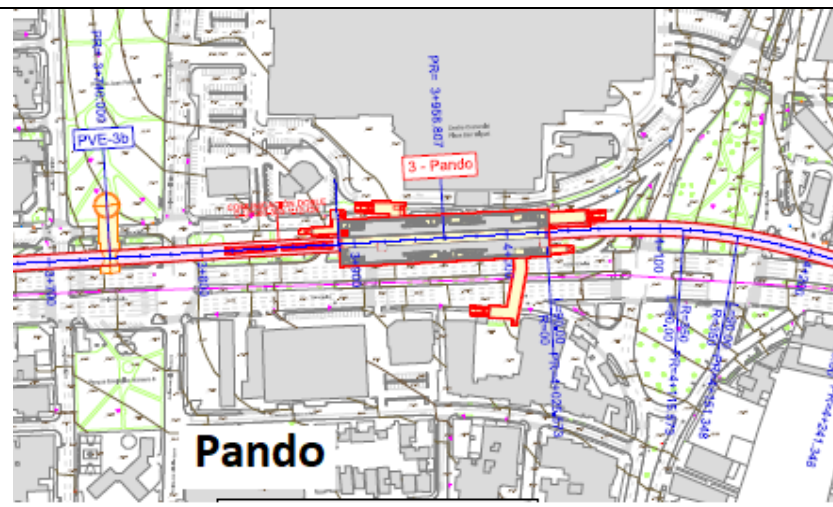


Solución de paso inferior con Estación en Trinchera

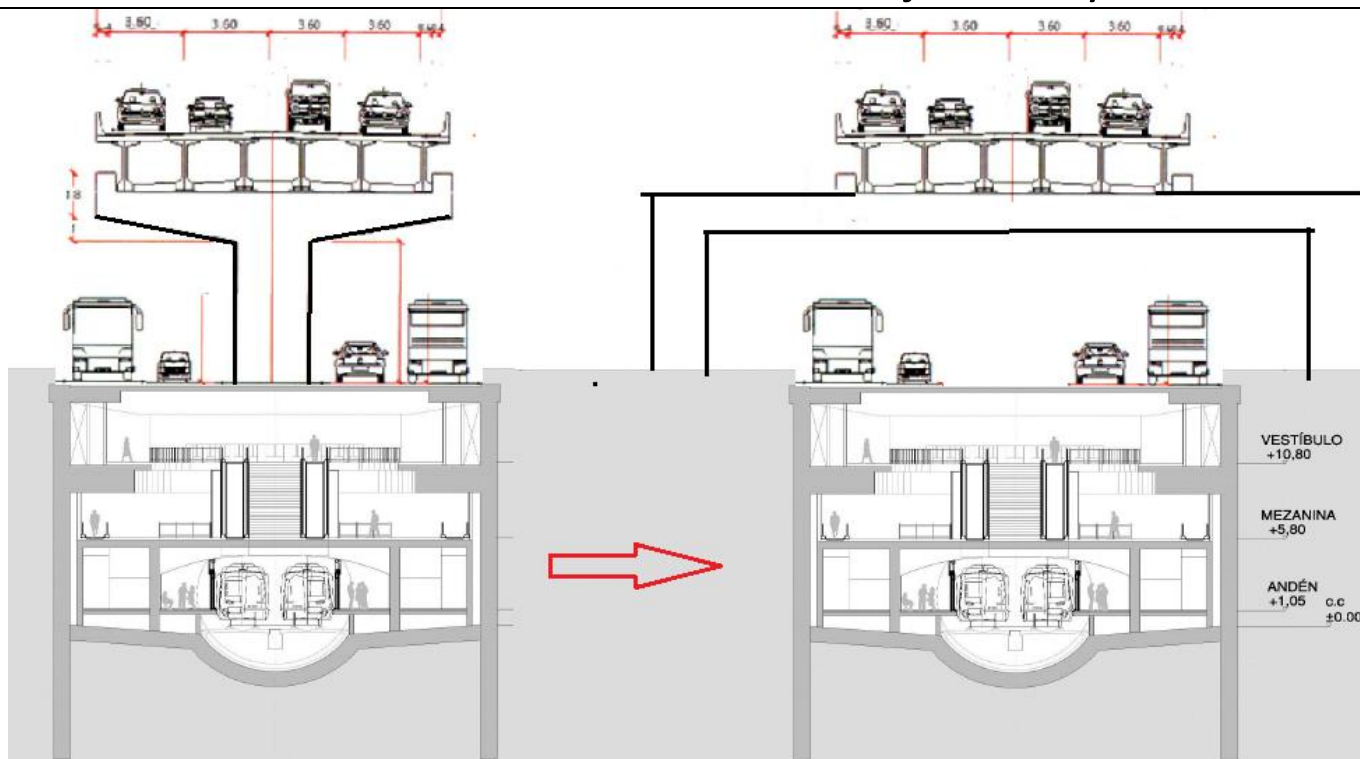


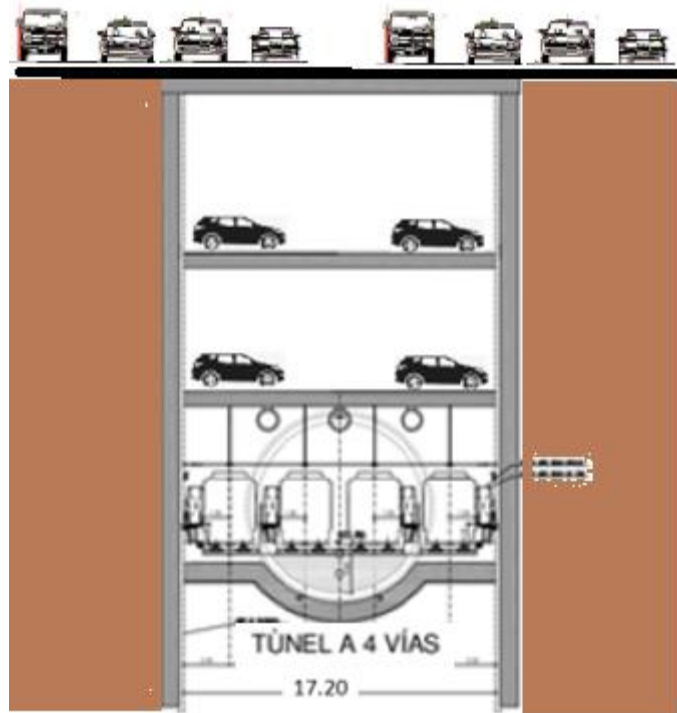
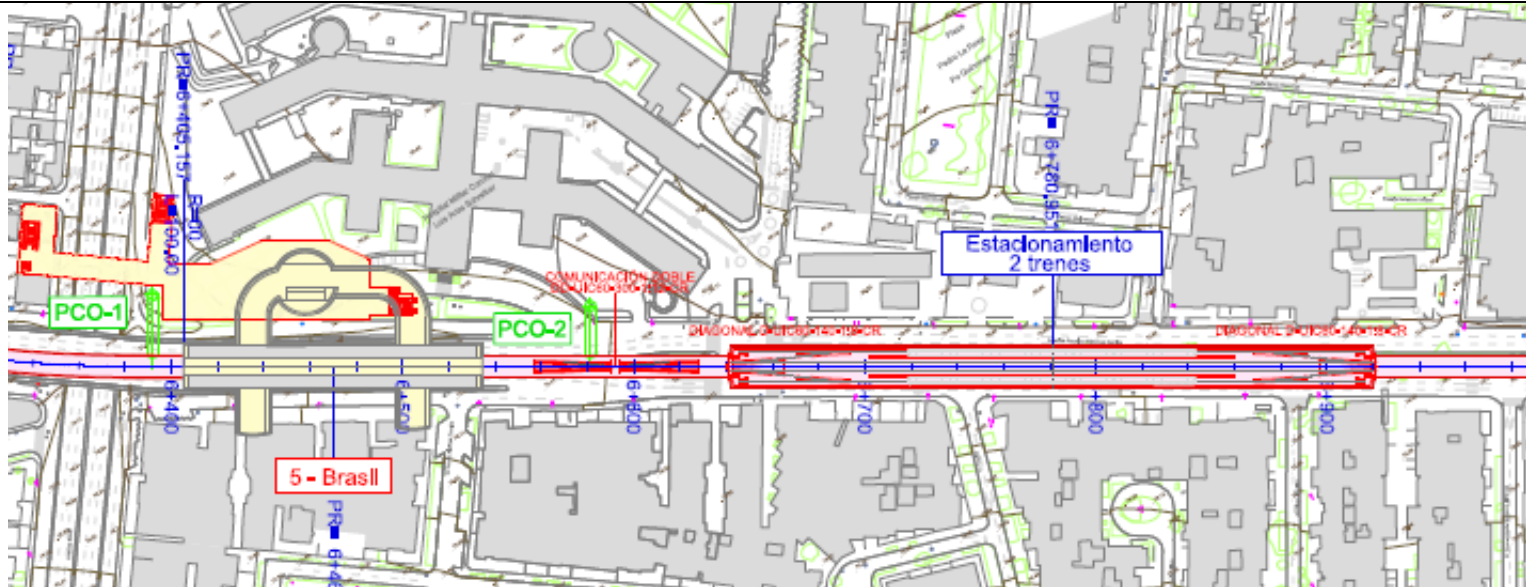
Propuesta de “Fly Overs” (en rojo) de la MML, en la Av. La Marina

- Tramos entre “Fly Overs” tendrán que conectarse con una autopista en superficie
- Sería mejor que la Autopista de la Av. La Marina, continúe hacia la Av. Faucett.
- A lo largo de la Av. Universitaria y la Av. Faucett discurrirán las futuras L4 y L6, por lo que tienen que coordinar la MML y la AATE



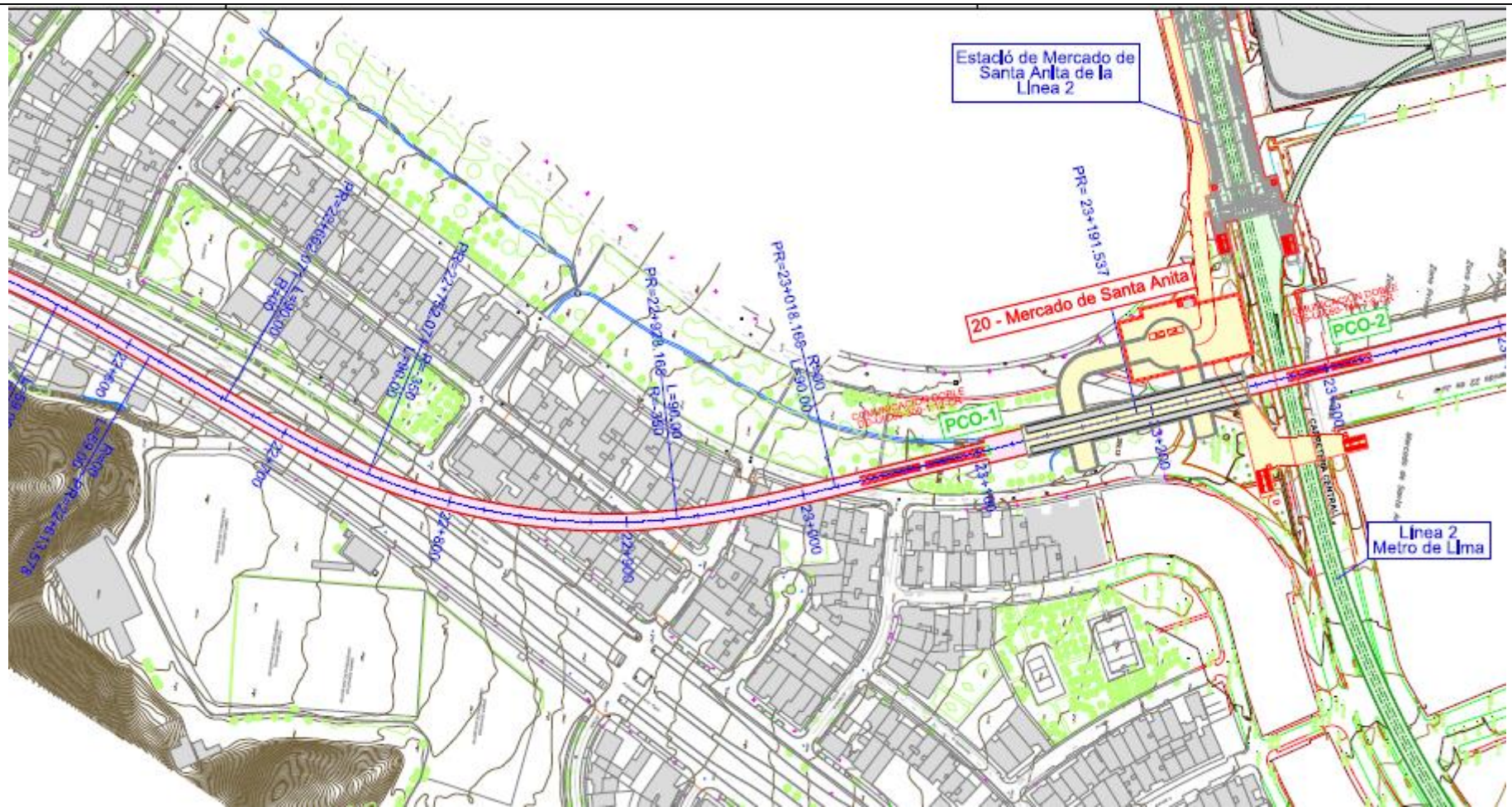
Estacionamientos en Trinchera debajo de “Fly Overs”



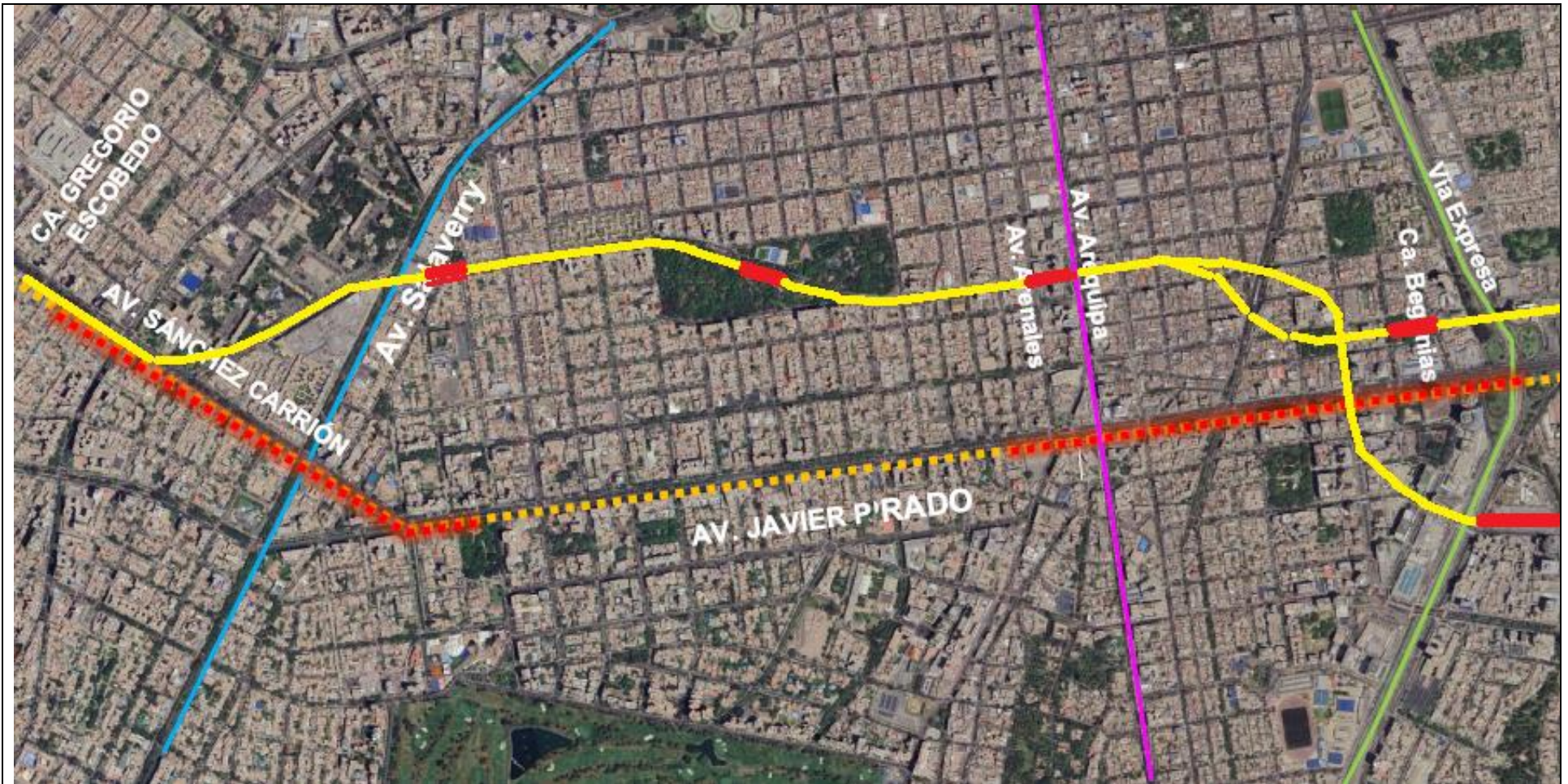


Estacionamiento de trenes debajo de
Autopista en Superficie en Av.
Pershing

Se puede aprovechar para
estacionamientos en los niveles
superiores, y en la superficie correría
la Autopista con 4 carriles.

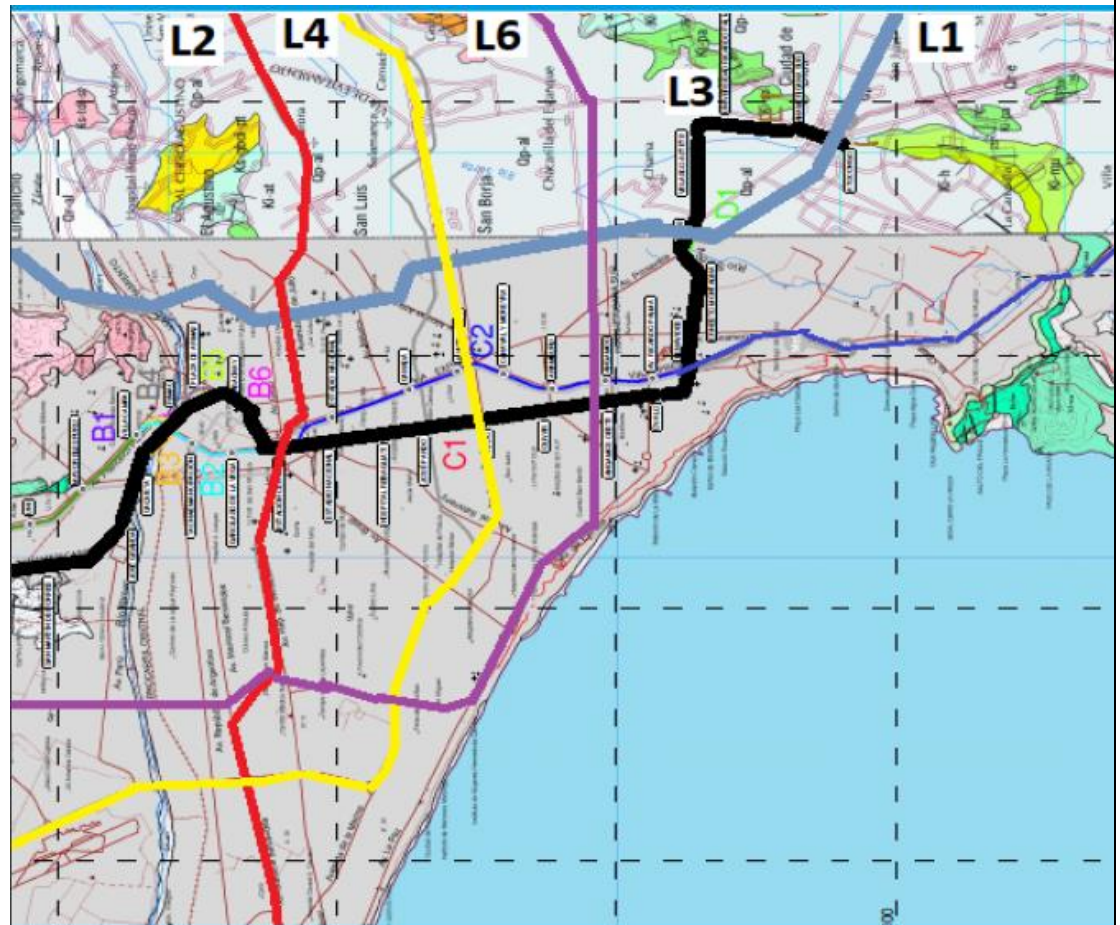
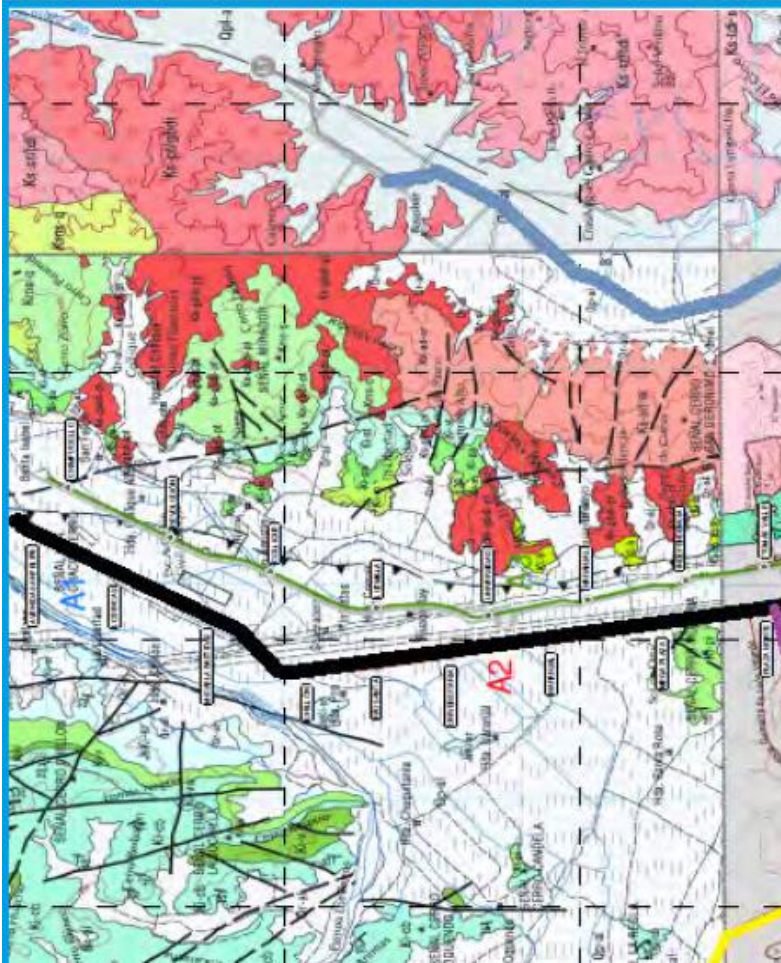


Propuesta para que la Autopista del Anillo Vial Periférico se dirija hacia la Av. J.Prado, en vez de la Av. Separadora Industrial. De esta manera seguiría un eje muy cercano al de la L4. La ventaja es que ya no se afecta el bosque de la Av. Separadora Industrial, pero habría expropiaciones adicionales.



Si las Estaciones en Caverna son muy caras y toman mucho tiempo construirse, se puede intentar otra ruta para la L4, para construir las Estaciones en Trinchera, sin causar tanto problema en la interrupción del tráfico, como causaría en la Av. Javier Prado.

PROPUESTA PARA LA INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA Y PARA UN DISEÑO OPTIMO DE LAS ESTACIONES EN CAVERNA EN EL CONGLOMERADO DE LIMA

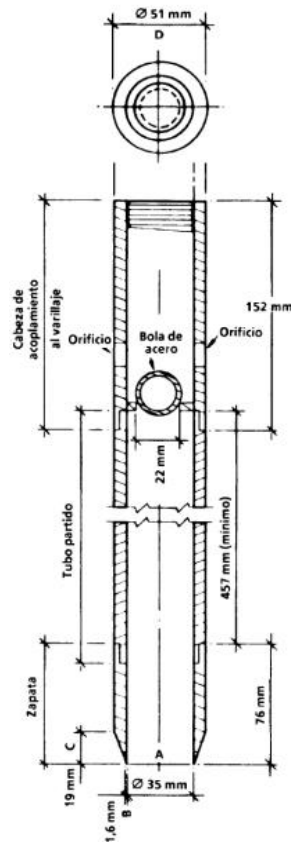


Casi toda la RBML que falta construir, está ubicado dentro del Conglomerado de Lima, cuyas propiedades mecánicas son difíciles y costosas de determinar.

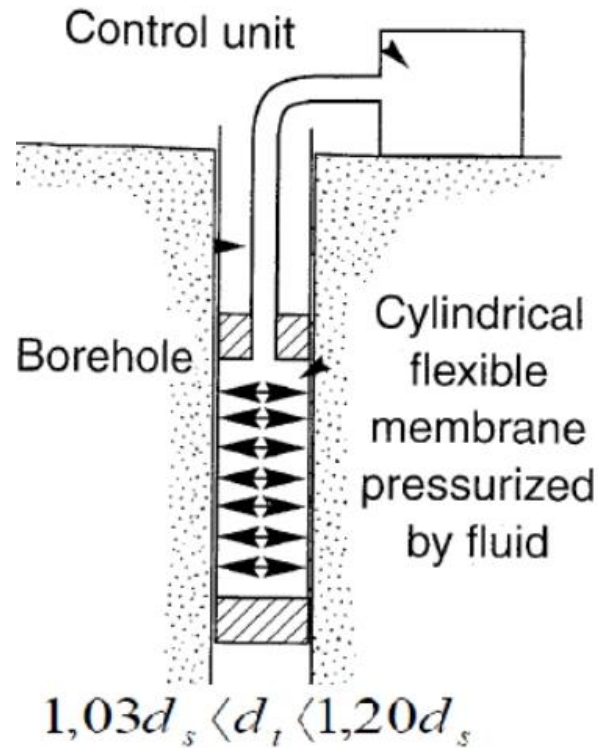


Vista del acantilado costero de Lima, en la zona del conglomerado muy compacto. El Conglomerado tiene comportamiento “frágil”, lo que quiere decir que tiene resistencia pico alta, que le permite tener taludes muy altos y empinados, pero resistencia residual mucho menor que la resistencia pico, según se puede ver en el coluvial al pie de los acantilados.

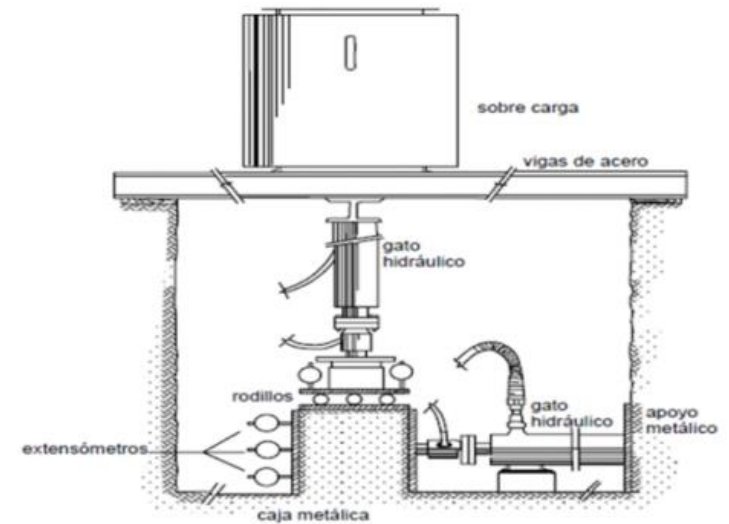
Se han intentado varios ensayos, pero ninguno ha dado resultados confiables, principalmente por la relación del tamaño máximo de la partícula y el tamaño de la muestra; aun en el de corte directo in-situ, que parecería ser el más apropiado



SPT



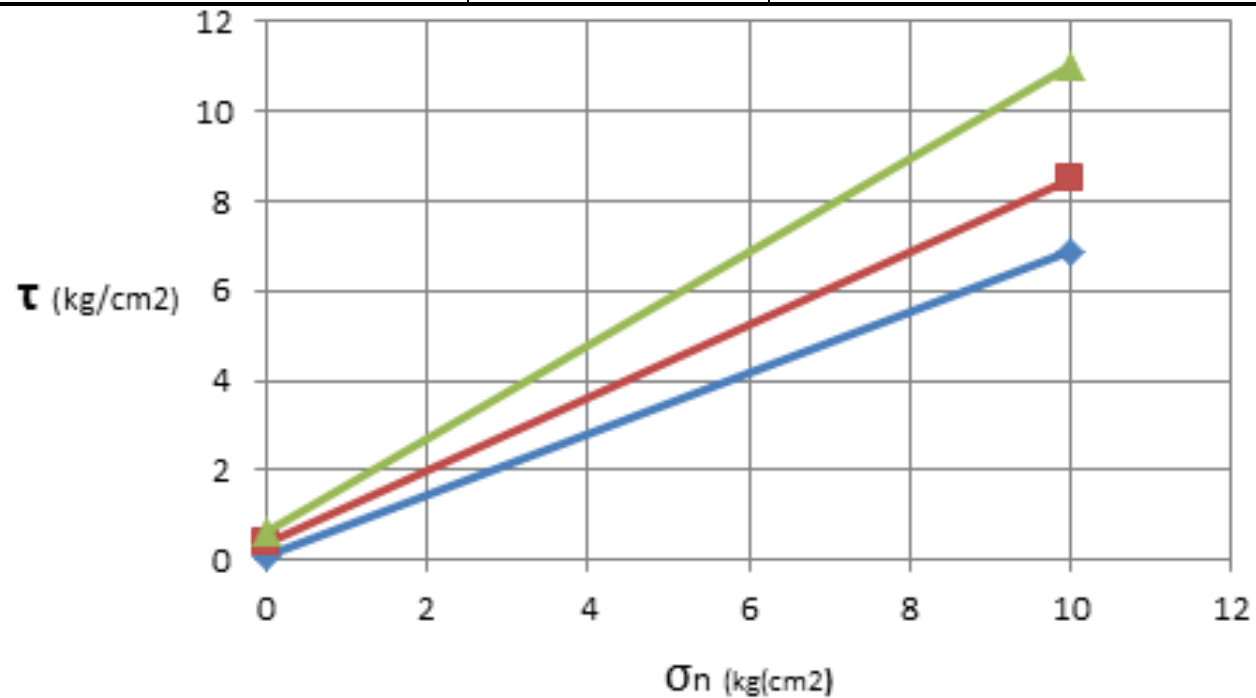
Presuometro



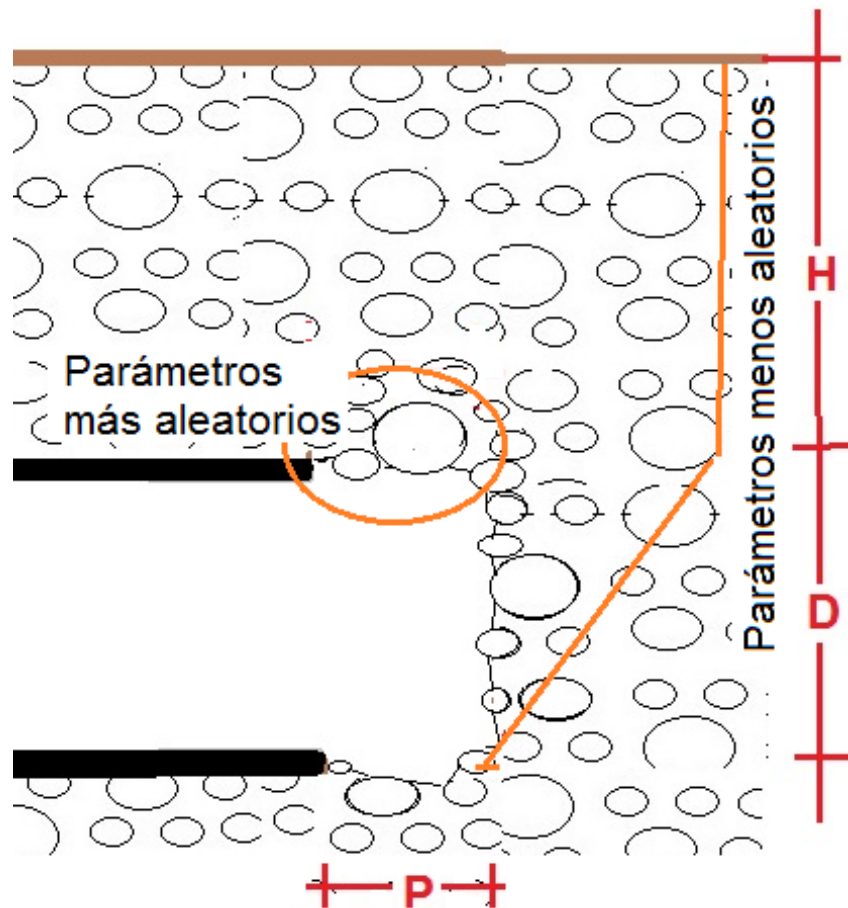
Corte Directo In-Situ con Caja de 70cm por lado

Rango de valores de la resistencia al corte in-situ obtenidas para la grava compacta de Lima, en base a 15 ensayos

	$\tau_{\max}$	τ_{promedio}	$\tau_{\min}$
Angulo de fricción (°)	46°	39°	34°
Cohesión (kPa)	64	38	10



El gran rango de valores de resistencia al corte implica varios posibles diseños, tal como se ve a continuación, para el caso de túneles excavados tipo mina



Usando el método de equilibrio límite de cuña y silo de Agnagnostou y Kovari, y asumiendo:

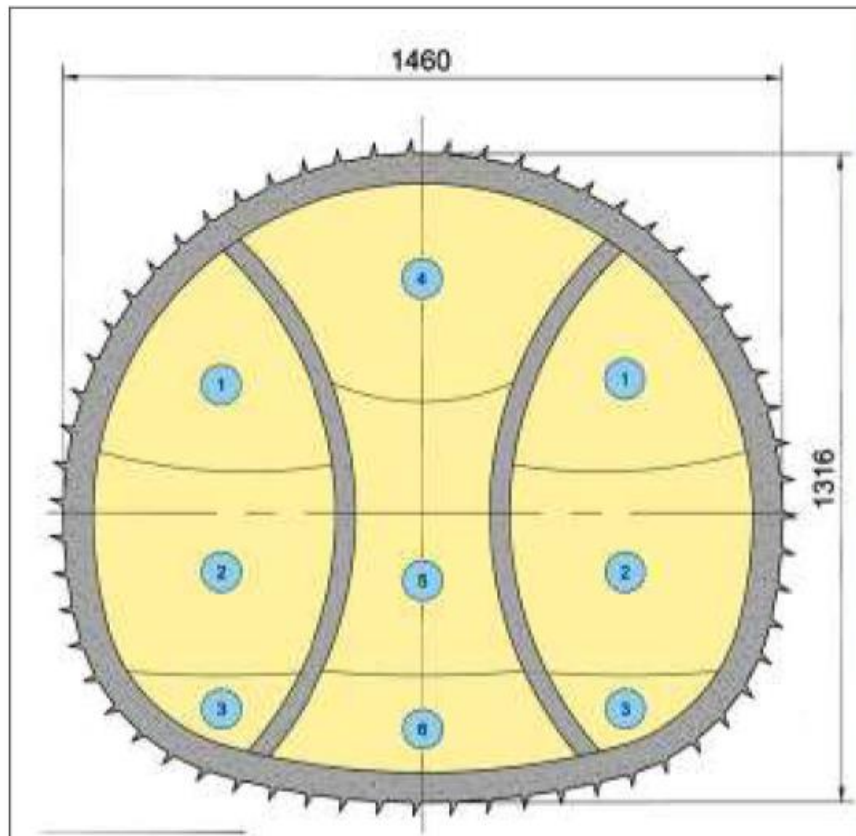
$$H=20\text{m}, \gamma=2.2 \text{ ton/m}^3, P=0$$

Según Eurocódigo E7:

$$FS\phi=1.25, FS_c=1.6$$

Φ°	C (kg/cm ²)	D (m)
46.1°	0.64	28
39°	0.38	12
34.2°	0.10	2.6

Si consideramos la resistencia promedio para una estación en Caverna ($D>20\text{m}$), su construcción tendría que ejecutarse por partes, como se ve a continuación

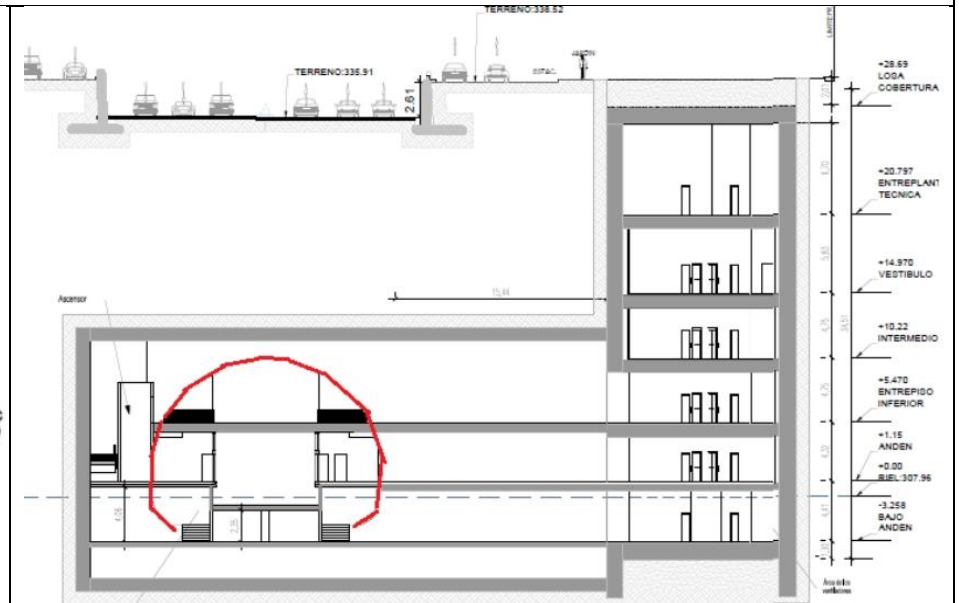
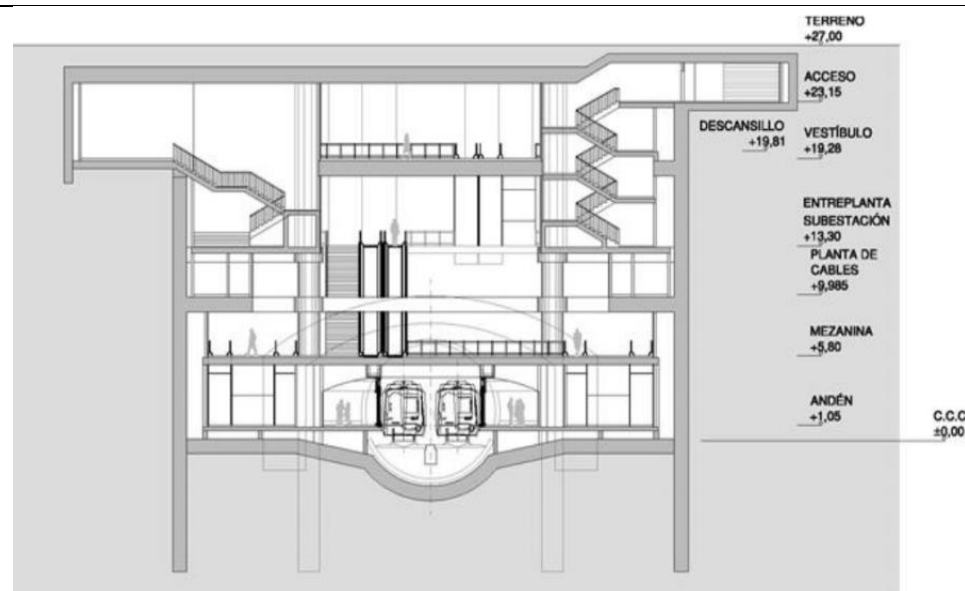


Para el caso de estaciones en trinchera entre muros-pantalla, tenemos:

Angulo de fricción	46.1°	39°	34.2°
Cohesión (Kg/cm ²)	0.64	0.38	0.10
Momento máximo (Ton-m/m)	106	119	250
Espesor pantalla (m)	≈ 0.7m	≈ 0.7m	≈ 1m
Empotramiento D (m)	2.6	4.1	8.4



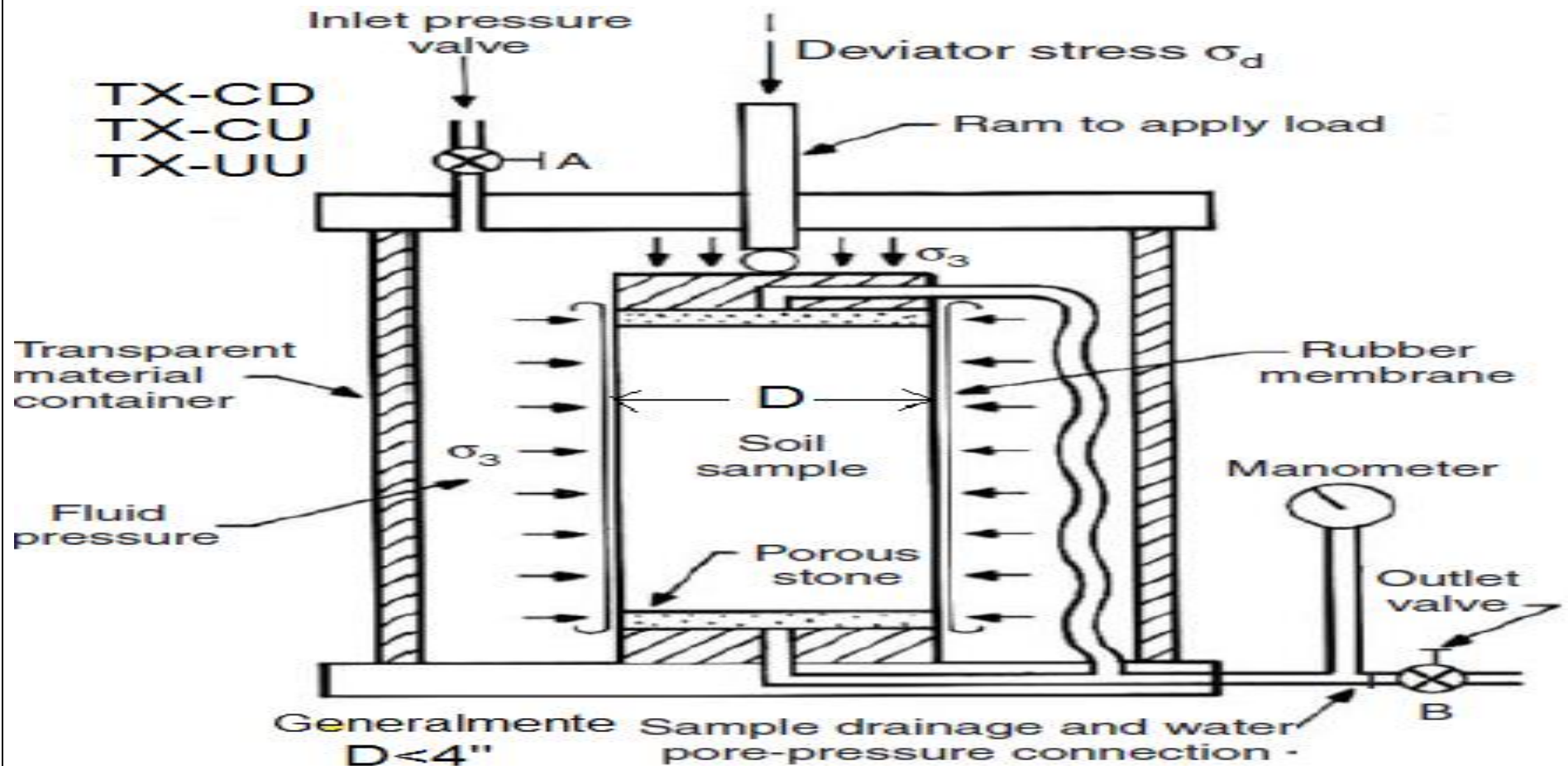
Quizás por la incertidumbre en las propiedades mecánicas del conglomerado de Lima, es que los 2 Consorcios consultores que elaboraron el Estudio de Preinversión de la L3 y L4 del Metro, llegaron a recomendar diferentes soluciones. Sin embargo, cabe mencionar que el Consultor de la L4 que ha propuesto la solución en Caverna, ha dicho que se basa en su experiencia en Santiago; pero se advierte que el Conglomerado de Santiago tiene mucho más contenido de finos que el Conglomerado de Lima, y por tanto, tiene más cohesión, lo que facilita la construcción de las Estaciones en Caverna.



Solución Trinchera entre muros-pantalla, propuesta en mayoría de Estaciones de L3

Solución en Caverna propuesta para la mayoría de las Estaciones de la L4

Lo que corresponde es realizar ensayos Compresión Triaxial en cámara grande, para determinar la resistencia al corte y las propiedades deformacionales.



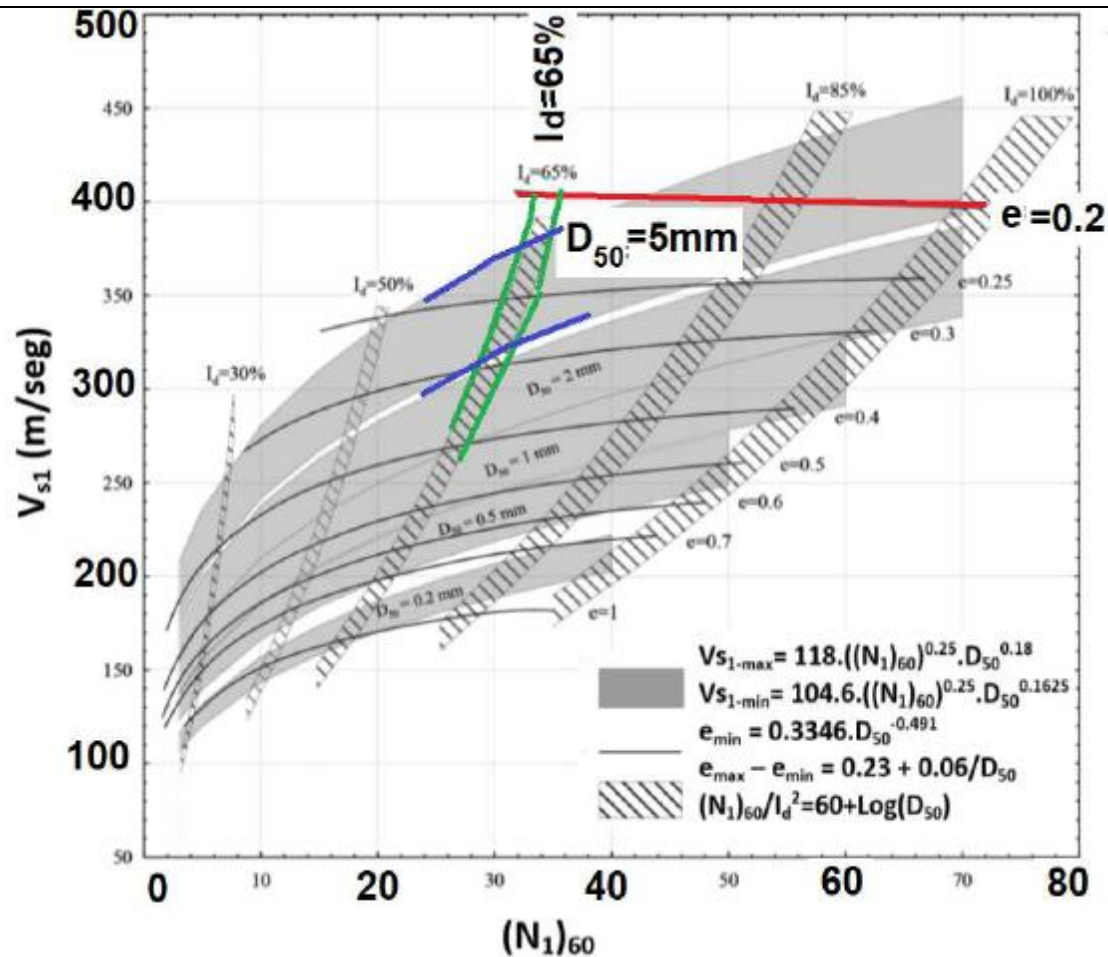
Equipo Triaxial $D=1\text{m} / H=2\text{m}$ - Universidad de Chile 2001 $\rightarrow \sigma_{3,\text{max}}=3\text{MPa} - P_{1,\text{max}}=2000\text{ Ton}$

Procedimiento para la Investigación Geotécnica Especial y General

- Los ensayos del Conglomerado en Compresión Triaxial (TX) deberán realizarse en cámara grande, y, además, deberá cumplirse $D_{\text{max-particula}}/D_{\text{camaraTX}} < 1/10$. El material más grande se reemplazará en peso, con material de $D_{\text{max}}/2 < D < D_{\text{max}}$, de tal manera de mantener el valor D_{50} , de la curva granulométrica original.
- En Perú aun no disponemos de Cámaras grandes para ensayos TX, por lo que se puede ir avanzando con ensayos de corte directo en caja grande (CD), pero que solo permitirá determinar la resistencia al corte. Las propiedades deformacionales se podría obtener por el momento, indirectamente con los datos de las velocidades de onda, aunque con menos precisión que lo obtenido de TX. Los criterios para la granulometría a usarse en la caja grande, son los mismos que para los ensayos TX.
- Las propiedades mecánicas del Conglomerado de Lima dependen de las siguientes propiedades índice: Principalmente de la Densidad seca (γ_d) y Tamaño de las partículas (representado por D_{50}), y secundariamente, del Coeficiente de Uniformidad (CU). Por tanto, conviene que los ensayos TX y CD se realicen en laboratorio para controlar estas variables y buscar las correspondientes correlaciones con las propiedades índice.

- Para determinar las propiedades índice in-situ, es necesario realizar calicatas grandes y profundas, de tal manera de poder determinar la real granulometría (en los sondeos, la bolonería se rompe con la broca de perforación) y la densidad con ensayos de reemplazo (tipo cono de arena ASTM D5030 – $D=36''=91.5\text{cm}$). Estas calicatas se pueden realizar en parques cercanos o terrenos vacíos cercanos al eje de las líneas de Metro.
- Los ensayos en laboratorio TXs y CDs en cámara grande y la ejecución de calicatas grandes y profundas, son caros, por lo que, en el plan de **INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA ESPECIAL**, se podría buscar las siguientes correlaciones:
 - Propiedades índice en las calicatas grandes y profundas, con las velocidades de ondas de corte (V_s) previamente determinadas con los ensayos MASW-1D (ver siguiente lámina)
 - Propiedades mecánicas obtenidas con los ensayos TXs y CDs en cámara grande, con las propiedades índice.
- Para la **INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA GENERAL** y masiva, se puede primero, sectorizar el Conglomerado, según su calidad y extensión, con la ayuda de varios ensayos MASW-1D y unos pocos sondeos. Luego, para cada sector previamente determinado, se podría ejecutar unas pocas calicatas profundas y grandes en los parques cercanos, para verificar las propiedades índice previamente obtenidas por correlación con V_s ; y en consecuencia, se podría obtener las propiedades mecánicas, indirectamente por correlación.

Esta misma forma de correlación obtenida para arenas, con un muestreo grande; se pudo obtener de manera regular, con un muestreo pequeño, para el Conglomerado del AIJCh. Se espera que un muestreo amplio y cuidadoso, se mejore las correlaciones.



Velocidad onda de corte normalizada V_{s1} ($V_s/(\sigma'_v/\rho)^{0.25}$) como función de $(N_1)_{60}$, e , I_d (D_r) y D_{50} para suelo no cementado del Holoceno (arenas)

M. Hussein, M. Karray, "Shear wave velocity as a geotechnical parameter: an overview", Can. Geotechnical J. 53: 256-272 (2016)

D_r es más complicado obtener que D_{50} .

Por tanto, se trabaja con:

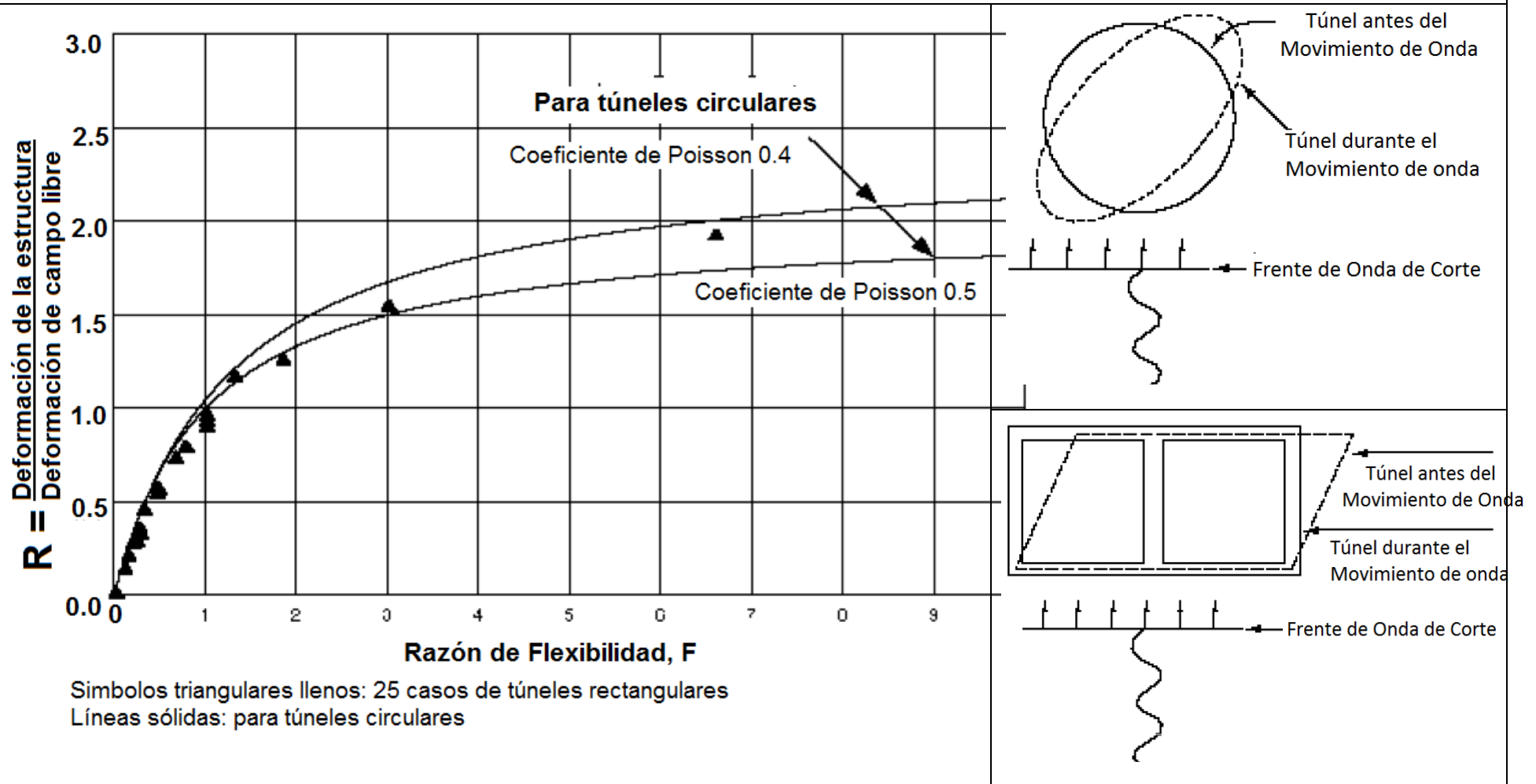
V_{s1} , D_{50} y Y_d

$$Y_d = G \cdot Y_w / (1 + e)$$

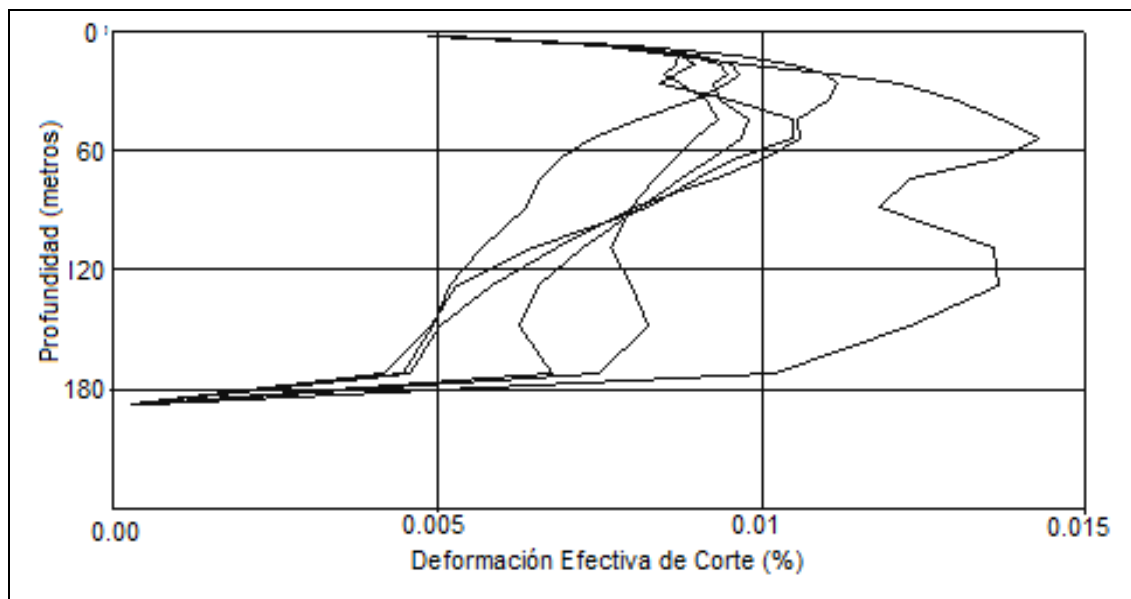
RECOMENDACIONES PARA LA INVESTIGACION GEOTECNICA

- Desde el inicio, ejecutar el programa de Investigación Geotécnica Especial (IGE) que permitirá obtener en laboratorio, correlaciones de las propiedades mecánicas del conglomerado (que son caras de obtener) con las propiedades índice (que son baratas de obtener); así mismo, se deberá ejecutar calicatas profundas y grandes (que son caras) que permitirá obtener correlaciones de las propiedades índice con la geofísica. Este programa de IGE, probablemente tome varios meses para obtener correlaciones abundantes y confiables.
- Seleccionar las Estaciones de Metro que necesariamente tenga que construirse con una solución en Caverna, asumiendo parámetros conservadores para la estimación del costo y tiempo de construcción. Estas Estaciones tendrán que diseñarse con parámetros mecánicos conservadores, y, además, deberán monitorearse intensamente, los asentamientos y deformaciones del terreno y la estructura que ocurran durante su construcción; de tal manera que los resultados permitan calibrar los resultados a obtenerse con la IGE.
- Una vez que las correlaciones obtenidas con la IGE sean confiables, y hayan sido calibradas con los resultados obtenidos del monitoreo durante la construcción de las Cavernas Piloto; entonces, con la Investigación Geotécnica General (IGG) se podrá diseñar las Estaciones en Caverna, de manera óptima (predicción acertada del costo y tiempo de construcción). Este diseño requiere un análisis de FEM-3D.

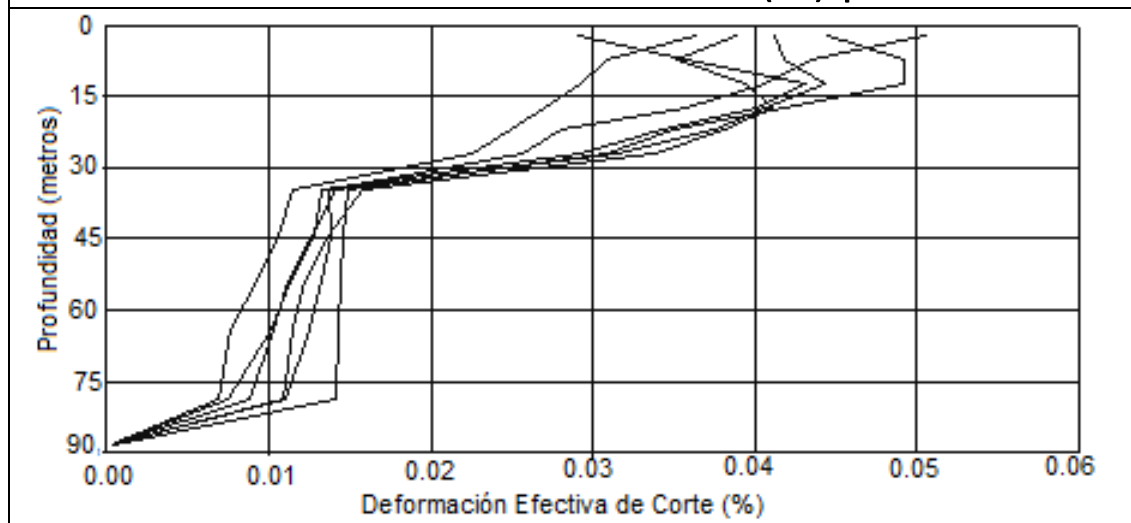
- Las estructuras subterráneas suelen estar entre las más seguras por sismo; quizás por esto es que, en el pasado, el aspecto sísmico no se ha tenido en cuenta.
- **Se recomienda implementar una Norma nacional en base al procedimiento simple y racional de interacción suelo-estructura de Jaw-Wang, Parsons-Brinckerhoff, Jun-1993.**



- El análisis sísmico de las estructuras subterráneas, requiere de la determinación de la deformación en campo libre para el sismo de diseño, y la determinación de la Flexibilidad/Rigidez relativa del suelo y la estructura.
- Se obtuvo los siguientes valores de Flexibilidad, para estructuras típicas del Metro subterráneo: Para túneles circulares: $F=35$ a 55 (Callao), y $F=90$ a 150 (Lima); para estructuras rectangulares como la Estación de Metro: $F=7$ (Callao), y $F=18$ (Lima). Por tanto, y según el gráfico de interacción suelo-estructura, se puede aceptar que: R (deformación estructura / deformación campo libre), $R \rightarrow 2$.
- La deformación de campo libre se puede obtener con modelos no-lineales equivalente 1D (software SHAKE) para sismos medianos ($A_{max} < 0.4g$) y con modelos no-lineales 1D (Quake/W por ejemplo) para sismos fuertes ($A_{max} > 0.4g$). Para estos alimentar estos modelos se requiere definir el perfil de velocidades de ondas de corte, hasta el basamento rocoso, o hasta un nivel suficientemente rígido ($V_s > 1000m/seg$), y además, partir desde la Aceleración de diseño en la superficie. Con estos softwares se determina la deformación del subsuelo, velocidades, aceleraciones, a diferentes niveles.



Deformación efectiva de corte (%) para Lima



Deformación efectiva de corte (%) para Callao