

ANEJO 6. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

TÍTULO DEL PROYECTO	
ESTUDIO INFORMATIVO DE AMPLIACIÓN DE LA RED DE METRO DE MADRID AL BARRIO DE VALDEBEBAS	

DOCUMENTO	
TÍTULO	ANEJO 6. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA
FICHERO	A06_GEOLOGÍA Y GEOTECNIA.docx

CONTROL DE EDICIONES		
ED.	FECHA	OBSERVACIONES / MOTIVO
02	JUN 2024	2ª EDICIÓN (TRAS SUPERVISION)
EDICIONES PREVIAS		
01	JUN 2024	1ª EDICIÓN (TRAS SUPERVISION)
00	ABRIL 2024	1ª EDICIÓN

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA Y ANTECEDENTES	1
3. GEOLOGÍA	2
3.1. ENCUADRE REGIONAL.....	2
3.2. UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	3
3.2.1. Marco regional.....	3
3.2.2. Terciario	4
3.2.3. Mineralogía de las unidades miocenas	6
3.2.4. Cuaternario.....	7
4. GEOMORFOLOGÍA	10
5. TECTÓNICA.....	11
6. SISMICIDAD	11
7. HIDROGEOLOGÍA	12
7.1. GENERALIDADES.....	12
7.2. EL ACUÍFERO DETRÍTICO DE MADRID	12
7.3. DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO.....	13
7.4. HIDROGEOLOGÍA DEL TRAZADO	14
8. RIESGOS GEOLÓGICOS	16
8.1. AGUAS COLGADAS.....	16
8.2. RIESGOS ASOCIADOS A LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN ARENA DE MIGA.....	17
8.3. RELLENOS ANTRÓPICOS	17
8.4. EXPANSIVIDAD.....	17
8.5. AGRESIVIDAD	17
8.6. CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS.....	18
9. INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA	18
9.1. PROYECTOS Y ESTUDIOS PREVIOS	18

9.2. CAMPAÑA GEOTÉCNICA EJECUTADA	19
9.2.1. Sondeos mecánicos.....	19
9.2.2. Penetrómetros	19
9.2.3. Ensayos presiométricos	20
9.2.4. Ensayos Lefranc	21
9.3. INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA	21
9.3.1. Sísmica pasiva y MASW	21
9.3.2. Tomografía eléctrica	21
9.4. ENSAYOS DE LABORATORIO	22
10. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS UNIDADES DIFERENCIADAS	22
10.1. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE ENSAYOS	22
10.2. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS INDICADOS EN LA BIBLIOGRAFÍA	23
10.3. RELLENOS SUPERFICIALES	24
10.4. ALUVIAL	25
10.5. ARENA DE MIGA.....	27
10.6. ARENAS TOSQUIZAS	30
10.7. TOSCO ARENOSO.....	32
10.8. TOSCO	36
11. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE LAS ALTERNATIVAS.....	39
11.1. ALTERNATIVA 1	39
11.2. ALTERNATIVA 2.....	39
11.3. ALTERNATIVA 3.....	39
11.4. ALTERNATIVA 4.....	39
12. RESUMEN Y CONCLUSIONES	40

PLANOS

1. Planta geológica 1:5000
2. Perfil geológico geotécnico de las alternativas EH 1:5000 EV 1:500

APÉNDICES

- APÉNDICE 1. Campaña geotécnica. Registros de sondeos.
 APÉNDICE 2. Campaña geotécnica. Registros de penetrómetros.
 APÉNDICE 3. Campaña geotécnica. Registros de presiómetros.
 APÉNDICE 4. Campaña geotécnica. Registros de ensayos Lefranc.
 APÉNDICE 5. Campaña geotécnica. Cuadros resumen de ensayos.
 APÉNDICE 6. Campaña geotécnica. Certificados de ensayos de laboratorio.
 APÉNDICE 7. Campaña geotécnica. Geofísica.
 APÉNDICE 8. Registros de investigaciones en proyectos anteriores.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema geológico de la Cuenca de Madrid. (Geología de España. Vera et al.,2004)	2
Figura 2. Esquemmatización de modelo morfológico y sedimentario de la Cuenca de Madrid. (Pedraza, 1996).....	3
Figura 3. Esquema de un abanico aluvial, con la segregación de materiales por tamaños a lo largo del mismo. (McGowen y Groat, 1971).....	3
Figura 4. Distribución espacial de facies en la Cuenca de Madrid (Diez Rubio 2010)	4
Figura 5. Cartografía geológica de la zona de estudio. Magna 1:50.000. Hoja nº 559, Madrid. (IGME, 1989)	5
Figura 6. Mineralogía de la zona de estudio según difracción de Rayos X.	7
Figura 7. Tipos de arcillas detectados en difracción de Rayos X dentro de la fracción arcillosa.	7
Figura 8. Trazado del arroyo de Quinto. Comparador PNOA IGN.....	7
Figura 9. Trazado del arroyo de Quinto. Cartografía geológica https://idem.madrid.org/visor	8
Figura 10. Escombreras identificadas en el PGOUM 1997	8
Figura 11. Mapa de usos del suelo, con situación de escombreras (en amarillo) (https://idem.madrid.org/visor)	8
Figura 12. Escombreras en el actual parque Felipe VI (Imagen de marzo de 2005, visor Google Earth).....	9
Figura 13. Escombreras en el actual parque Princesa Leonor y zona de ampliación de IFEMA. Foto aérea 2007. Visor Carto Madrid.....	9

Figura 14. Plano Geomorfológico 1:50.000, hoja 559, Madrid. (Goy, J. L., Pérez-González, A. y Zazo C. 1989).....	10
Figura 15. Principales estructuras tectónicas de la Cuenca de Madrid. (Andeweg et al., 1999).	11
Figura 16. Corte geológico esquemático de la Cuenca de Madrid (De Vicente,1996; Andeweg, 1999).	11
Figura 17. Mapa de Peligrosidad Sísmica de España (versión revisada octubre 2015); IGN. ...	12
Figura 18. Zona de estudio en el Atlas Hidrogeológico de Madrid (IGME, 1982).	13
Figura 19. Zona de estudio en el mapa de isotransmisividades del Atlas Hidrogeológico de Madrid (IGME, 1982). Curvas en m ² /día.	14
Figura 20. Puntos de agua (https://miteco.maps.arcgis.com).....	15
Figura 21. Cotas de agua en los sondeos ejecutados.....	15
Figura 22. Usos granulométricos de los litotipos de la facies Madrid (Oteo, 1995).....	23
Figura 23. Plasticidad de los litotipos de la facies Madrid (Oteo, 1995).....	23
Figura 24. Características geotécnicas de los materiales de Madrid (Oteo; R. Ortiz y Mendaña, 2003).	23
Figura 25. Unidad Rellenos: clasificación USCS y AASHTO.	24
Figura 26. Unidad Rellenos: granulometría y carta de plasticidad.....	24
Figura 27. Unidad Rellenos: golpeo SPT en relación a la profundidad.....	25
Figura 28. Unidad Rellenos: potencial expansivo (Reese y O'Neill, 1988).	25
Figura 29. Unidad Aluvial: clasificación USCS y AASHTO.....	26
Figura 30. Unidad Aluvial: golpeo SPT en relación a la profundidad.....	26
Figura 31. Unidad Aluvial: granulometría y carta de plasticidad.....	26
Figura 32. Unidad Arena de miga: clasificación USCS y AASHTO.	27
Figura 33. Unidad Arena de miga: granulometría y carta de plasticidad.	28
Figura 34. Unidad Arena de miga: golpeo SPT en relación a la profundidad.	28
Figura 35. Unidad Arena de miga: potencial expansivo (Reese y O'Neill, 1988).....	28
Figura 36. Unidad Arenas de miga: módulo presiométrico en relación a la profundidad.	29
Figura 37. Unidad Arena tosquiza: clasificación USCS y AASHTO.....	30
Figura 38. Unidad Arena tosquiza: granulometría y carta de plasticidad.....	30
Figura 39. Unidad Arena tosquiza: golpeo SPT en relación a la profundidad.....	31
Figura 40. Unidad Arena tosquiza: resistencia a compresión simple en relación a la profundidad.	31
Figura 41. Unidad Arena tosquiza: potencial expansivo (Reese y O'Neill, 1988).	31
Figura 42. Unidad Arenas tosquizas: módulo presiométrico en relación a la profundidad.	32
Figura 43. Unidad Tosco arenoso: clasificación USCS y AASHTO.....	33

Figura 44. Unidad Tosco arenoso: granulometría y carta de plasticidad.....	33
Figura 45. Unidad Tosco arenoso: golpeo SPT en relación a la profundidad.....	34
Figura 46. Unidad Tosco arenoso: resistencia a compresión simple en relación a la profundidad.	34
Figura 47. Unidad Tosco arenoso: potencial expansivo (Reese y O'Neill, 1988).	34
Figura 48. Unidad Tosco arenoso: módulo presiométrico en relación a la profundidad.	35
Figura 49. Unidad Tosco: clasificación USCS y AASHTO.	36
Figura 50. Unidad Tosco: granulometría y carta de plasticidad.....	36
Figura 51. Unidad Tosco: golpeo SPT en relación a la profundidad.....	37
Figura 52. Unidad Tosco: resistencia a compresión simple en relación a la profundidad.....	37
Figura 53. Unidad Tosco: potencial expansivo (Reese y O'Neill, 1988).	37
Figura 54. Unidad Tosco: módulo presiométrico en relación a la profundidad.	38
Figura 54. Características geotécnicas de los materiales de Madrid (Oteo; R. Ortiz y Mendaña, 2003).	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Litotipos de la facies Madrid (Escario, 1985).....	4
Tabla 2. Resultados de ensayos de difracción de Rayos X en la zona de estudio.	6
Tabla 3. Profundidades de agua en sondeos de campañas previas.	14
Tabla 4.. Profundidades de agua en sondeos de la campaña ejecutada.	15
Tabla 5. Resumen ensayos permeabilidad Lefranc 16	16
Tabla 6. Resumen ensayos de hidroquímica en sondeos para determinación de agresividad.	16
Tabla 7. Grado de agresividad para aguas según el Código Estructural (RD 470/2021).....	16
Tabla 8. Grado de agresividad para suelos según el Código Estructural (RD 470/2021).	18
Tabla 9. Investigaciones en campañas geotécnicas previas.....	18
Tabla 10. Resumen sondeos.....	19
Tabla 11: Resumen penetrómetros.....	19
Tabla 12. Resumen presiómetros.....	20
Tabla 13. Ensayos de sísmica pasiva y MASW 21	21
Tabla 14. Ensayos de tomografía eléctrica.....	21
Tabla 15: Resumen ensayos de laboratorio en suelos.....	22
Tabla 16: Parámetros geotécnicos para los proyectos de ampliación del Metro de Madrid (1999-2003).....	24

Tabla 17: Rellenos: resumen de ensayos de laboratorio.....	25
Tabla 18: Aluvial: resumen de ensayos de laboratorio	27
Tabla 19: Arena de miga: resumen de ensayos de laboratorio	29
Tabla 20: Arena de miga: resumen de ensayos presiométricos	29
Tabla 21: Arena tosquiza: resumen de ensayos de laboratorio.....	31
Tabla 22: Arena tosquiza: resumen de ensayos presiométricos	32
Tabla 23: Tosco arenoso: resumen de ensayos de laboratorio	34
Tabla 24: Tosco arenoso: resumen de ensayos presiométricos.....	35
Tabla 25: Tosco: resumen de ensayos de laboratorio.....	37
Tabla 26: Tosco: resumen de ensayos presiométricos	38
Tabla 27. Litotipos de la facies Madrid (Escario, 1985)	40
Tabla 28: Resumen ensayos de laboratorio en suelos.....	41
Tabla 29: Parámetros geotécnicos para los proyectos de ampliación del Metro de Madrid (1999-2003)	42

1. INTRODUCCIÓN

El presente anejo recoge el estudio geológico geotécnico de la futura Prolongación de la Línea 11 de Metro de Madrid al barrio de Valdebebas.

Dentro de la fase de Estudio Informativo, en este anejo se describen las características geológicas e hidrogeológicas y se analizan las características geotécnicas de las unidades reconocidas en las distintas alternativas propuestas.

La línea de Metro entre Mar de Cristal y el barrio de Valdebebas será soterrada en toda su longitud; se prevé que cuente con 5 ó 6 estaciones según las alternativas planteadas y su longitud total varía entre los 8,27 y 9,3 km, dependiendo de las alternativas que se proponen. El proyecto incluye también el diseño del inicio de un ramal de conexión desde la línea 11 a unas futuras cocheras de Metro previstas al norte del barrio de Barajas que tendrían otro acceso directo por el lado este desde la L8, entre las estaciones T1/2/3 y T4. En total se analizan un total de 4 alternativas de trazado.

2. METODOLOGÍA Y ANTECEDENTES

Para la elaboración de este anejo se han realizado las siguientes tareas:

- I. Recopilación y análisis de información geológico-geotécnica existente.
- II. Reconocimientos de campo y cartografía geológica.
- III. Planteamiento y ejecución de la campaña geotécnica, consistente en sondeos mecánicos con ensayos in situ, penetrómetros dinámicos y exploración geofísica.
- IV. Ensayos de laboratorio sobre las muestras obtenidas en los sondeos.
- V. Análisis de la información. Elaboración de perfiles geotécnicos de las alternativas.

En cuanto a estudios geotécnicos en la zona, se cuenta con la información que se enumera a continuación, que ha sido tenido en cuenta en la elaboración de los perfiles.

- Proyecto de construcción de infraestructura de Prolongación de la línea 4 del metro de Madrid. Tramo Esperanza-Gran vía de Hortaleza. INTECSA. 1994
- Proyecto de liquidación Prolongación de la línea 4 del metro de Madrid. Tramo Esperanza-Gran vía de Hortaleza. TYPESA 1997
- Proyecto de Construcción y Proyecto modificado nº 1 del Proyecto de construcción del Ramal a recintos feriales del metro de Madrid. IBERINSA 1996

- Proyecto de construcción de infraestructura de prolongación de la línea 4 del metro de Madrid. Tramo Esperanza-Gran vía de Hortaleza. Solución variante. INTECSA. 1996
- Proyecto de construcción del tramo Barajas-Nuevas terminales de la línea 8 del Metro de Madrid. EUROESTUDIOS. 2002
- Proyecto complementario nº 3 al Proyecto de construcción de prolongación de la línea 8 del Metro de Madrid a nuevas terminales aeropuerto. FCC 2007
- Proyecto Complementario nº 1 al Proyecto de construcción de prolongación de la línea 8 del Metro de Madrid a nuevas terminales aeropuerto. Adecuación de la estación de metro de la terminal Barajas-T4, obra civil y arquitectura para la ubicación de una subestación eléctrica en el tramo de prolongación Barajas – T4 y tratamientos del terreno. FCC. 2007
- Proyecto de Construcción “Cercanías de Madrid. Acceso ferroviario al Aeropuerto de Barajas” INTECSA-INARSA 2006

Otros datos de interés son los recogidos en los siguientes sitios e informes:

- Datos recogidos en la base de datos Geomadrid, del GEOPORTAL del Ayuntamiento de Madrid (https://geoportal.madrid.es/IDEAM_WBGEOPORTAL/index.iam).
- Proyecto básico y de ejecución del Intercambiador de Valdebebas-Ciudad de la Justicia-Hospital Isabel Zendal. Estudio geotécnico para intercambiador de transportes en Avd de las Fuerzas armadas esquina con C Juan Antonio Samaranch del término Municipal de Madrid. CRESSA INGENIEROS. 2021.
- Estudio geotécnico en la parcela de Valdebebas, Madrid. Ampliación IFEMA. G.O.C 2019.

Por otra parte, entre la bibliografía general regional, puede citarse la siguiente:

- ITGE (1989) “Mapa Geológico de España”. Serie Magna. Escala 1:50.000. Hoja nº 559 (Madrid).
- ITGE (1972) “Mapa Geotécnico General”. Escala 1:200.000. Hoja 5-6 nº 45 (Madrid).
- ITGE. (1997) “Mapa Hidrogeológico de España”. Escala 1:200.000. Hoja 5-6 nº 45 (Madrid).
- Página web de la Confederación Hidrográfica del Tajo y de la Comunidad de Madrid.

- Escario V. (1985) "Síntesis Geotécnica de los suelos de Madrid y su Alfoz". MTC, D.G. Infraestructuras del Transporte
- Vera J.A. (Editor) (2004) "Geología de España" Sociedad Geológica de España.
- De la Fuente, P. y Oteo, C (1984) "Deformabilidad de los suelos tosquizos de Madrid". CEDEX, Cuadernos de investigación. Monografía nº11.
- Rodríguez Ortiz, J.Mª; (1992) "Túneles a cielo abierto".. Cursos sobre "Túneles urbanos y suburbanos". Tomo I. Capítulo 3. CEDEX, Madrid.
- De Melis, M.; Oteo, C. y Rodríguez Ortiz, J.Mª (2000) "Estrategia geotécnica aplicada a la Ampliación del Metro de Madrid 1995-99". Capítulo del Libro Homenaje a J.A Jiménez Salas, editado por CEDEX y SEMSIG, Madrid.
- Rodríguez Ortiz, J.Mª (2000) "Propiedades geotécnicas de los suelos de Madrid". R.O.P nº 3405, diciembre 2000
- Oteo, C; Rodríguez Ortiz, J.Mª. y Mendaña Saavedra, F. (2003) "Sobre los sistemas y parámetros geotécnicos de diseño en la Ampliación del Metro de Madrid". R.O:P nº 3429, enero 2003.
- De la Fuente Martín, P; Oteo, C (1984): "Estudio de la deformabilidad de los suelos arcillosos de Madrid".

3. GEOLOGÍA

3.1. ENCUADRE REGIONAL

Desde el punto de vista geológico, Madrid y su entorno se sitúan en la Cuenca Terciaria del Tajo, también denominada Cuenca de Madrid. Ésta es una cuenca intramontañosa de contorno triangular, limitada por zonas elevadas mediante fallas inversas, geológicamente estructuras compresivas *pop-up*, de naturaleza fundamentalmente granítica y metamórfica, como son el Sistema Central al NO y los Montes de Toledo al S; hacia el este cierran la cuenca los relieves de la Cordillera Ibérica y Sierra de Altomira, con rocas mesozoicas (calizas, margas, areniscas, etc).

La formación de los relieves y, consecuentemente, el relleno sedimentario de la cuenca a partir de la erosión de éstos se inicia en el Oligoceno, teniendo su mayor desarrollo en el Mioceno, llegándose a la colmatación de la cuenca en el Plioceno. El espesor de sedimentos en la cuenca llega a superar los 2.000 m.

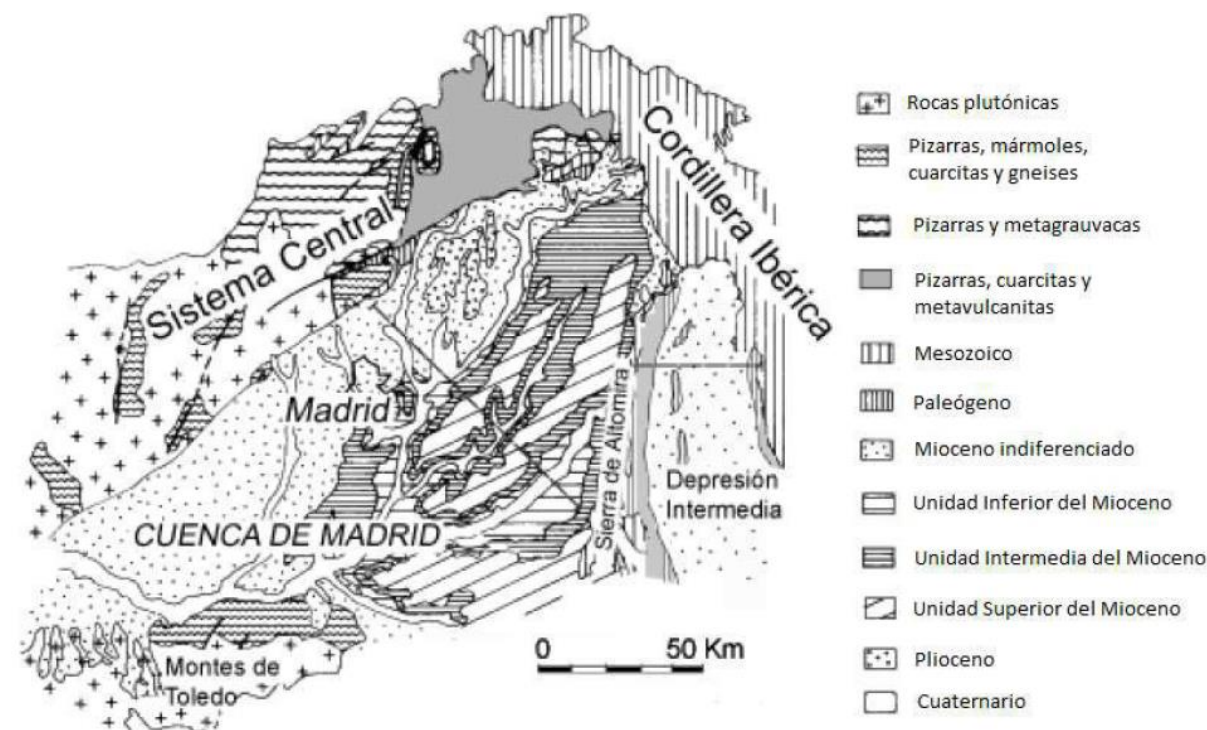


Figura 1. Esquema geológico de la Cuenca de Madrid. (Geología de España. Vera et al., 2004)

Como es habitual en las cuencas intramontañosas, el relleno en las mismas tiene lugar mediante abanicos aluviales coalescentes, que rodean una zona endorreica. En estos sistemas de sedimentación los depósitos se organizan mediante un esquema proximal-distal, situándose depósitos detríticos gruesos (gravas, areniscas) junto a las zonas de borde de la cuenca, detríticos finos (arcillas) en las zonas intermedias y depósitos lacustres con formación de sales y carbonatos en las zonas centrales, sucediéndose espacialmente mediante cambios de facies. Como es también habitual en estas cuencas, los diferentes ciclos sedimentarios son sucesivamente más extensivos, por lo que la sucesión de depósitos proximales-distales puede verse tanto en la horizontal como en la vertical, disponiéndose unidades proximales suprayacentes a unidades más distales.

La naturaleza fundamentalmente granítica de las áreas fuente hace que en la zona de Madrid y el extremo occidental de la cuenca predominen las arcosas, areniscas feldespáticas, en los depósitos proximales. La alteración de estos silicatos, y la posterior sedimentación lacustre de los productos de alteración en las zonas centrales de la cuenca, da lugar a depósitos de sílex y neoformación de arcillas (sepiolita, montmorillonita...). Por otro lado, el borde oriental de la cuenca proporciona carbonatos y sales que dan lugar a depósitos salinos (yesos fundamentalmente) y carbonáticos (margas y calizas) también en las zonas centrales de la cuenca.

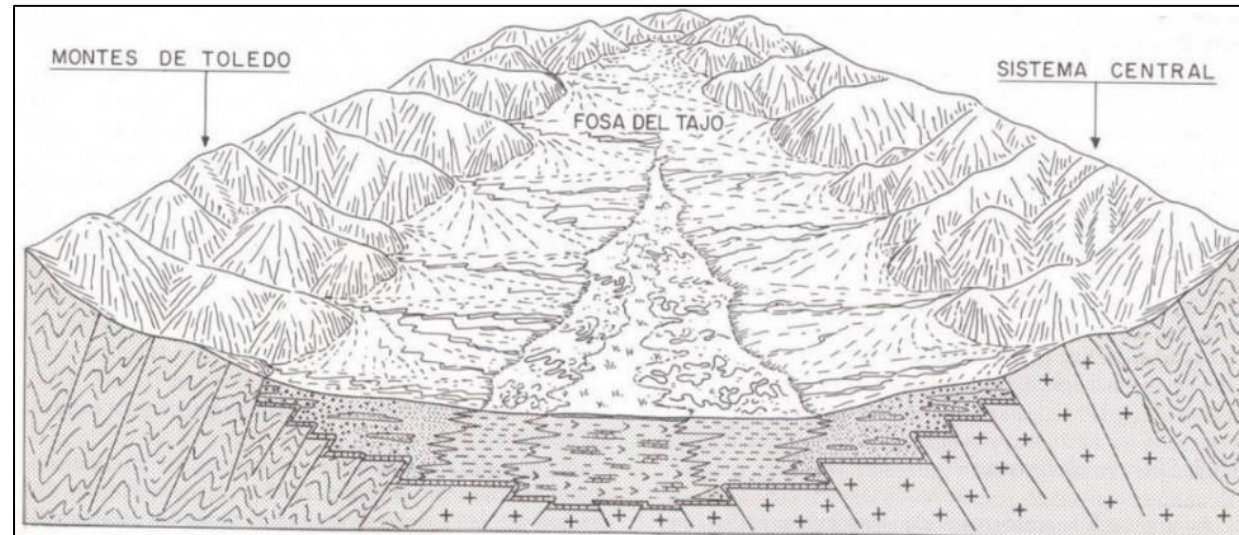


Figura 2. Esquemática de modelo morfológico y sedimentario de la Cuenca de Madrid. (Pedraza, 1996)

3.2. UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS

3.2.1. Marco regional

Como ya se ha indicado, la Cuenca de Madrid es una cuenca intramontañosa endorreica donde los sedimentos se distribuyen con un esquema proximal-distal. Como resultado de esta disposición, se genera una distribución de facies sedimentarias en función de proximidad o lejanía al área fuente, depositándose progresivamente los sedimentos más finos hacia las zonas más interiores de la cuenca, terminando con los evaporíticos en el centro de ésta. De esta manera, en los depósitos miocenos de la Cuenca de Madrid se puede establecer una división de facies, distinguiéndose tres tipos: facies marginales de cuenca (o de borde), de transición (o intermedias) y de interior de cuenca (o centrales). A estos depósitos se superponen los depósitos fluviales correspondientes al Plioceno y Cuaternario.

La separación entre unas y otras litofacies puede hacerse a grandes rasgos dentro de la Cuenca del Tajo, de forma paralela a los bordes de la cuenca. Así, se reconocen las facies de borde hacia el noroeste y las centrales hacia el Sudeste de la capital. No obstante, son frecuentes cambios de facies entre depósitos dentro de un mismo plano, debido al carácter de la sedimentación en abanicos aluviales, en los que los depósitos se segregan por tamaños entre la cabecera y el pie del abanico y en los que, además, se superponen lateralmente abanicos adyacentes.

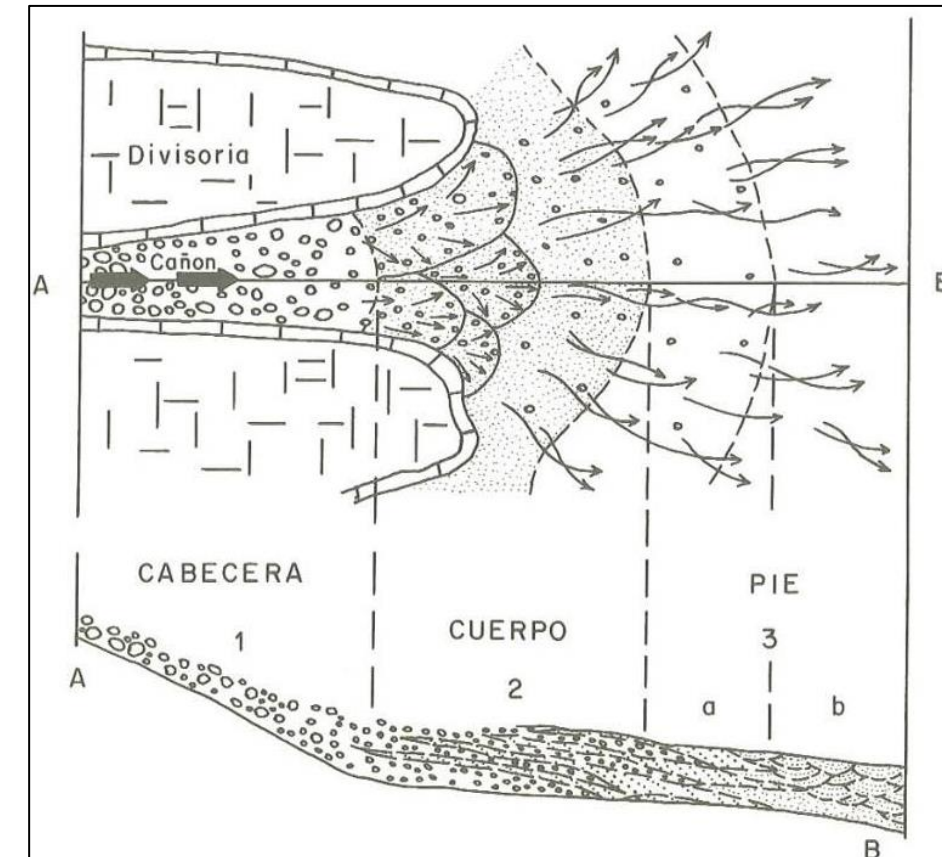


Figura 3. Esquema de un abanico aluvial, con la segregación de materiales por tamaños a lo largo del mismo. (McGowen y Groat, 1971)

Dentro del entorno de Madrid se pueden diferenciar cuatro conjuntos de depósitos sedimentarios o facies:

- Facies Madrid, caracterizada por areniscas feldespáticas (arcosas) que se intercalan con arcillas, que se hacen predominantes en zonas distales.
- Facies Guadalajara, similares a las anteriores si bien con presencia de areniscas líticas, como corresponde a áreas fuente con pizarras y esquistos.
- Facies de transición, con predominio de arcillas, tanto detríticas como autigénicas, así como de margas.
- Facies central, caracterizada por depósitos evaporíticos formado en un ambiente lacustre restringido. Está compuesta por margas yesíferas negras, yesos masivos y calizas.

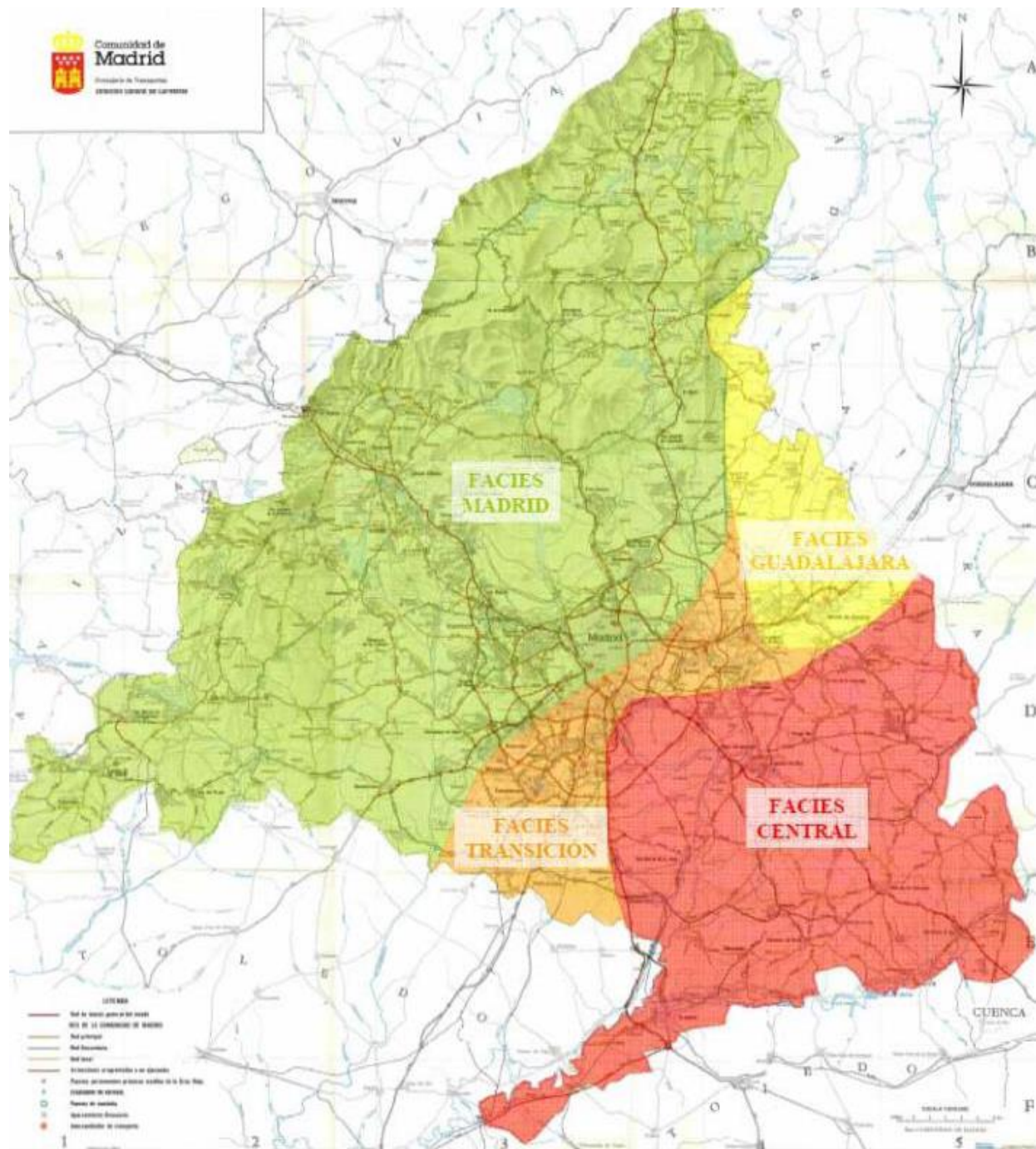


Figura 4. Distribución espacial de facies en la Cuenca de Madrid (Diez Rubio 2010)

Suprayacentes se encuentran formaciones superficiales pliocenas y cuaternarias representadas principalmente por depósitos aluviales vinculados a la red fluvial, como las terrazas del Jarama o arroyos como el de Valdebebas. También se encuentran importantes rellenos debido a la actividad urbanística de la ciudad.

3.2.2. Terciario

En los materiales que constituyen las facies Madrid se diferencian varias unidades litoestratigráficas con sentido geotécnico. El criterio para diferenciarlas es su contenido en finos, concretamente el porcentaje de material pasante por el tamiz # 0,08 mm, que incluye arenas y limos.

Tabla 1. Litotipos de la facies Madrid (Escario, 1985)

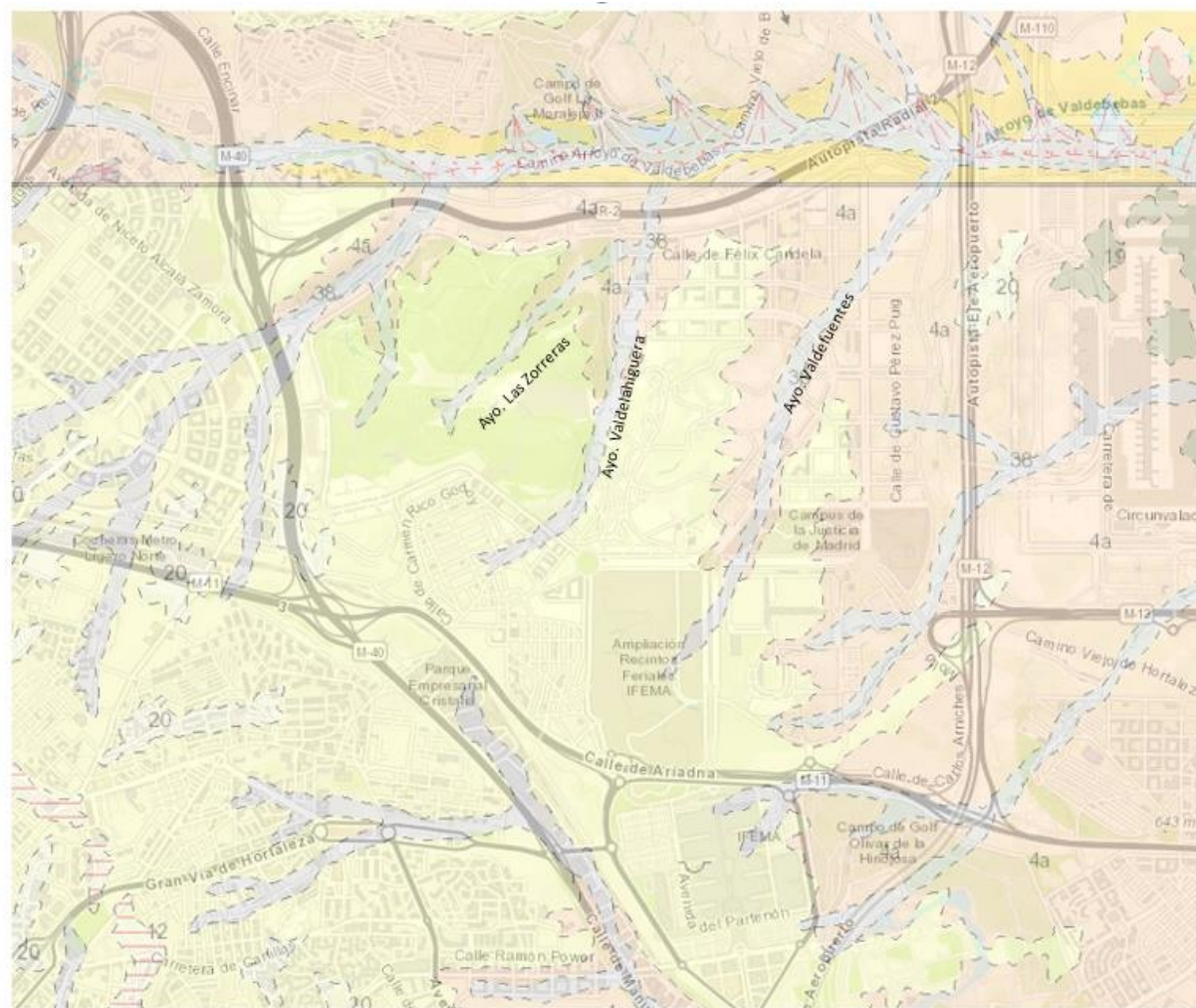
DENOMINACIÓN	% FINOS (pasa #0,08 mm)
AM- Arena de miga	< 25
AT- Arena tosquiza	25-40
TA- Tosco arenoso	40-60
T - Tosco	> 60

También puede denominarse tosco arcilloso a los materiales con más del 85% de finos.

Entre estos litotipos hay una variación continua, presentando habitualmente cambios de facies entre ellos e intercalaciones de unos en otros. La disposición secuencial de los depósitos de abanico aluvial es de carácter granodecreciente, por lo que es frecuente encontrar secuencias métricas con arenas de miga o tosquizas a la base que pasan gradualmente a toscos hacia techo. Por ello, a la hora de separar conjuntos litológicos a mayor escala se considera el litotipo predominante, pudiendo presentarse intercalaciones de otros.

Mineralógicamente, los tramos arenosos de la facies Madrid ofrecen contenidos de feldespatos entre el 20 y el 60%. Dentro de la fracción arcillosa predomina la esmectita, con un contenido medio del 70% del total arcilloso; la illita alcanza el 27% y el resto corresponde prácticamente a caolinita y clorita. No se ha detectado montmorillonita.

Dentro de la hoja geológica MAGNA 1:50.000 se diferencian en el entorno de la zona de estudio dos grupos litológicos diferentes (4a y 11), que se han discretizado en el magna en base a diferenciaciones cronoestratigráficas, siendo su separación a nivel geotécnico de escaso interés, por ser composicionalmente materiales muy parecidos y con las mismas características geotécnicas.






	38.- Arenas cuarzo-feldespáticas, arcillas y limos arenosos con gravas dispersas (fondos de valle)
	11.- Arenas arcósicas de grano grueso y arcillas pardas y rojizas
	4 a.- Arcosas gruesas con cantos, lechos de cantos, fangos y arenas arcósicas

Figura 5. Cartografía geológica de la zona de estudio. Magna 1:50.000. Hoja nº 559, Madrid. (IGME, 1989)

De acuerdo a la información suministrada por la cartografía geológica-geotécnica y la campaña de investigación de campo, principalmente de los sondeos mecánicos realizados, en la zona de estudio se pueden diferenciar las siguientes unidades:

Arena de miga:

Este litotipo incluye las arcosas superiores del Aragoniense Superior. Se corresponden con depósitos detríticos caracterizados por su proporción de finos (<25%), con arenas y areniscas arcósicas con cantos aislados y lentejones de cantos redondeados y alterados de cuarcita, gneis y granito, apareciendo intercalaciones e indentaciones de conjuntos arcillosos compactos, de

índole diversa, aunque con predominio de los filosilicatos procedentes de la alteración de los feldespatos. Suelen presentar coloración de blanquecina a pardo-anaranjado.

Es frecuente la alternancia de tramos de granulometría más gruesa con otros más arcillosos e incluso calcáreos, aunque siempre muy subordinados, lo cual favorece la aparición de acuíferos colgados de extensión limitada, aislados por niveles arcillosos impermeables. Estas características granulométricas les confieren una elevada permeabilidad, lo cual facilita la formación de encostramientos y exudaciones calcáreas por la removilización de las sales disueltas.

La transición de arena de miga a materiales con mayor contenido en finos se produce de forma gradual, observándose en estas transiciones un aumento de la presencia de intercalaciones arcillosas.

Arena tosquiza:

Este litotipo forma parte de la transición entre la arena de miga y el tosco. Son depósitos con geometría lenticular y con presencia de arenas arcósicas de grano medio a grueso con mayor contenido de niveles arcillosos, en comparación con la arena de miga, presentando también secuencias granodecrecientes. Suelen presentar coloraciones claras a pardo-anaranjadas, con tonos verdosos a marrones en los niveles más arcillosos del techo de las secuencias.

Tosco arenoso:

Al igual que la arena tosquiza se trata de un litotipo intermedio entre las facies de arena de miga y las facies tosco, con proporciones similares de arenas y finos. Se presentan frecuentemente como niveles centimétricos alternantes y laminados. Generalmente, se trata de materiales de plasticidad media. Son prácticamente impermeables y suelen presentar alto contenido de humedad.

El origen de este tipo de depósitos se relaciona con zonas más distales de los abanicos aluviales que las facies arenosas con predominio de la inundación sobre las corrientes tractivas, ya en claro tránsito hacia las denominadas facies intermedias.

Tosco:

Formado por arcillas y limos de coloración ocre y marrón, de baja plasticidad, aunque en ocasiones puede ser alta. Su estructura interna es masiva, con carácter lenticular e intercalaciones subhorizontales de composición variable. Su compacidad es dura. Al igual que el tosco arenoso, intercala niveles centimétricos de arena tosquiza y tosco arenoso de grano fino, que le confieren un laminado característico.

Su origen se asocia a zonas distales de abanicos aluviales en las que se produce casi exclusivamente sedimentación por inundación y decantación, con escasos episodios de corrientes tractivas de baja energía.

Distribución espacial en el área de estudio:

A partir de los registros de los sondeos y los perfiles sísmicos ejecutados, podemos diferenciar dos tramos en el sustrato de la zona de estudio. En el tramo superior se encuentran predominantemente arenas de miga y arenas tosquizas, mientras que en el tramo inferior predominan el tosco arenoso y el tosco.

El límite entre estos dos tramos se encuentra en torno a la cota 660 en la zona situada más al oeste, en torno a Mar de Cristal, bajando progresivamente hasta el entorno de la cota 630 en la zona situada más al este, próxima a la T4.

La mayor parte del trazado propuesto se prevé en materiales del tosco arenoso o tosco, aunque la clave del túnel se sitúa siempre muy próxima o casi tangente al contacto con el conjunto superior de arenas de miga y tosquizas. No obstante, hay tramos previstos de túnel que se desarrollarán en arenas de miga o tosquizas, como los que se citan a continuación, referidos a la Alternativa 1:

- 2+600 a 3+350
- 5+950 a 6+450, incluyendo la Estación Valdebebas Norte.
- 7+850 a 8+450, incluyendo la Estación Barajas-T4.

3.2.3. Mineralogía de las unidades miocenas

Se han realizado 18 ensayos de difracción de Rayos X, con el objetivo de detectar arcillas posiblemente expansivas, por lo que 8 ensayos se hicieron en el tosco, 9 en el tosco arenoso y uno en las arenas tosquizas. Los resultados obtenidos en la muestra total indican una composición típica de arenas arcóscas, con un 26% de cuarzo y un 45% de feldespatos en sentido amplio (feldespato potásico+plagioclasas). Los filosilicatos (arcillas *sensu stricto*), que incluye tanto detríticos como de neoformación, son un 28% del total. El 1% restante corresponde fundamentalmente a calcita, siendo el yeso testimonial en toda la zona de estudio.

Los resultados de los ensayos se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 2. Resultados de ensayos de difracción de Rayos X en la zona de estudio.

Sondeo	Muestra	Unidad	De (m)	Hasta (m)	Resultado ensayo de Difracción de Rayos - X - Polvo Mineral									Resultados ensayo de difracción de Rayos - X - Agregados Orientativos			
					(%) Cuarzo	(%) Filosilicatos (min. arcilla)	(%) Plagioclasas	(%) Feldespato potásico	(%) Calcita	(%) Yeso	(%) Hematites	(%) Magnetita	(%) Goethita	(%) Esmeclita	(%) Mica-Ilita	(%) Caolinita	(%) Clorita
ST-4.1	TP-8	Tosco	42,30	42,60	26	22	30	20	1	0	1	0	0	90	7	2	1
ST-7.1	TP-5	T.aren.	23,70	24,05	19	36	26	18	1	0	0	0	0	85	12	1	2
ST-8.1	TP-8	Tosco	48,25	48,50	21	29	31	18	1	0	0	0	0	71	27	1	1
ST-C.1	TP-2	T.aren.	20,90	21,10	29	27	24	19	1	0	0	0	0	75	19	5	1
ST-0.1.1	TP-7	T.aren.	32,90	33,20	19	38	23	20	0	0	0	0	0	80	17	3	0
ST-1.1.	TP-4	T.aren.	24,00	24,30	20	36	24	19	1	0	0	0	0	70	27	2	1
ST-1.1.	TP-10	Tosco	48,60	48,90	30	21	29	19	1	0	0	0	0	73	24	2	1
SL-8.1	TP-1	Tosco	20,00	20,60	25	23	31	18	1	0	0	1	1	71	27	2	0
SL-8.1	SPT-9	T.aren.	28,30	28,70	23	40	19	18	0	0	0	0	0	86	12	1	1
ST-1.3	TP-12	T.aren.	49,00	49,30	25	32	22	21	0	0	0	0	0	74	22	2	2
ST-AV-1	TP-4	Tosco	24,29	24,50	19	33	29	18	1	0	0	0	0	60	38	1	1
ST-R-1.2	TP-7	A.tosq.	26,70	27,00	30	20	30	20	0	0	0	0	0	64	33	1	2
ST-3.5	TP-9	T.aren.	41,90	42,20	23	30	24	22	1	0	0	0	0	51	45	3	1
ST-3.2	TP-8	T.aren.	37,00	37,30	44	18	17	19	1	1	0	0	0	59	37	4	0
ST-5.6	TP-3	Tosco	17,80	18,20	27	27	24	21	0	0	0	1	0	82	16	1	1
ST-5.6	TP-5	T.aren.	23,80	24,15	31	22	25	22	0	0	0	0	0	64	33	2	1
ST-6.1	TP-2	Tosco	11,45	11,80	28	22	36	12	2	0	0	0	0	60	37	2	1
ST-6.1	TP-12	Tosco	42,15	42,40	35	21	24	19	1	0	0	0	0	54	44	1	1
Ensayos					18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Promedio					26	27,6	26,0	19,1	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1	70,5	26,5	2,0	1,0
Mediana					26	27,0	24,5	19,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	71,0	27,0	2,0	1,0
Desv. Estandar					6	6,9	4,7	2,2	0,6	0,2	0,2	0,3	0,2	11,3	11,3	1,1	0,6
Máximo					44	40,0	36,0	22,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	90,0	45,0	5,0	2,0
Mínimo					19	18,0	17,0	12,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	51,0	7,0	1,0	0,0

El análisis de la fracción arcillosa muestra un predominio de la esmeclita (71%), dentro del total de minerales de la arcilla. Le sigue la mica-illita (27%), con contenidos menores de caolinita y clorita.

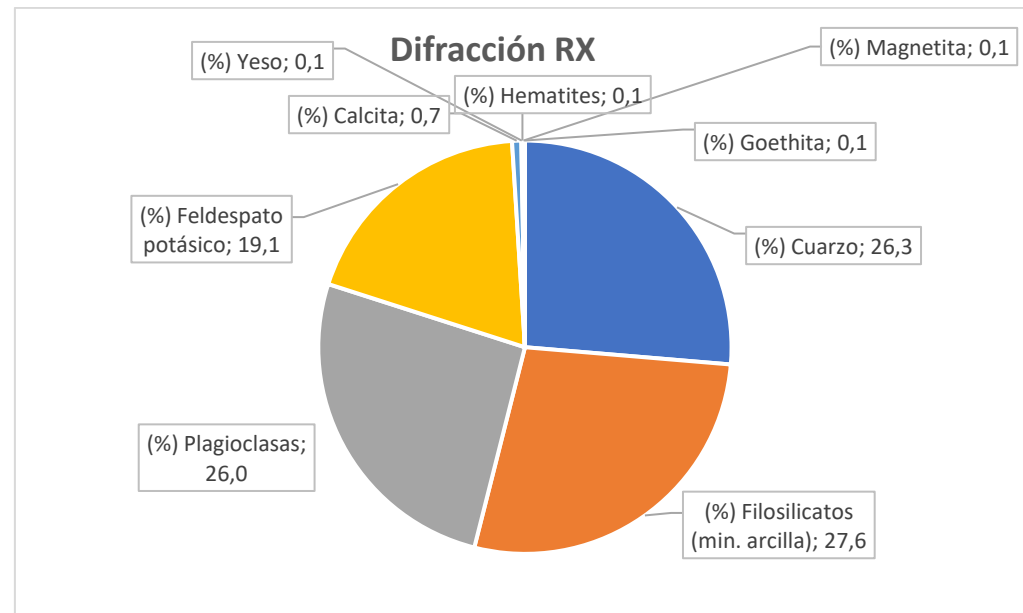


Figura 6. Mineralogía de la zona de estudio según difracción de Rayos X.

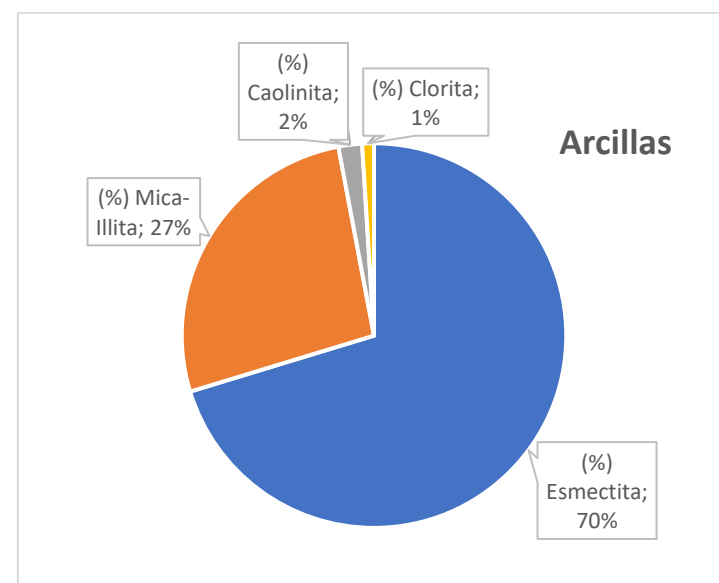


Figura 7. Tipos de arcillas detectados en difracción de Rayos X dentro de la fracción arcillosa.

3.2.4. Cuaternario

Los depósitos cuaternarios de la zona de estudio forman parte de las vertientes asociadas al valle del Jarama, en una zona fuertemente alterada por una intensa actividad antrópica.

El valle del río Jarama presenta una dirección Norte- Sur, con una amplia llanura de inundación. En la margen oeste del valle se observan depósitos de terrazas que recubren de forma discontinua el sustrato mioceno. También se encuentran pequeños depósitos aluviales en los arroyos que forman la red secundaria. Por otra parte, la actividad humana ha originado importantes alteraciones morfológicas en el medio geológico del área de estudio.

Depósitos de terrazas

Se encuentran en el entorno de la terminal T4 del aeropuerto, correspondiendo a terrazas altas, situadas por encima de la cota 610. Presentan arenas de grano grueso a medio, con limos arenosos dispersos, si cementación. Han sido reconocidas en los sondeos ST-6.1 y ST-5.6 con potencias de unos 2,4 a 2,8 m.

Depósitos aluviales

Corresponden a los depósitos de los arroyos que atraviesan la zona de estudio, todos ellos tributarios del Jarama. Presentan arenas con bastante arcilla y, ocasionalmente, indicios de gravas, con espesor pequeño, de hasta 2,5 m. Se trata de materiales permeables.

Normalmente es difícil separarlos en los reconocimientos de los niveles superficiales de naturaleza antrópica. La delimitación de estos depósitos no es fácil, pues el aumento de la urbanización impide la mayoría de la veces la observación directa de estos depósitos superficiales, como en el caso del existente en la zona de la estación de Mar de Cristal (Arroyo de Quinto), cuyo trazado cruzaba la glorieta de Mar de Cristal, y que actualmente solo se puede identificar a partir del relieve y en fotos aéreas antiguas, donde se observa que coincide en parte con la actual Vereda de Quinto.

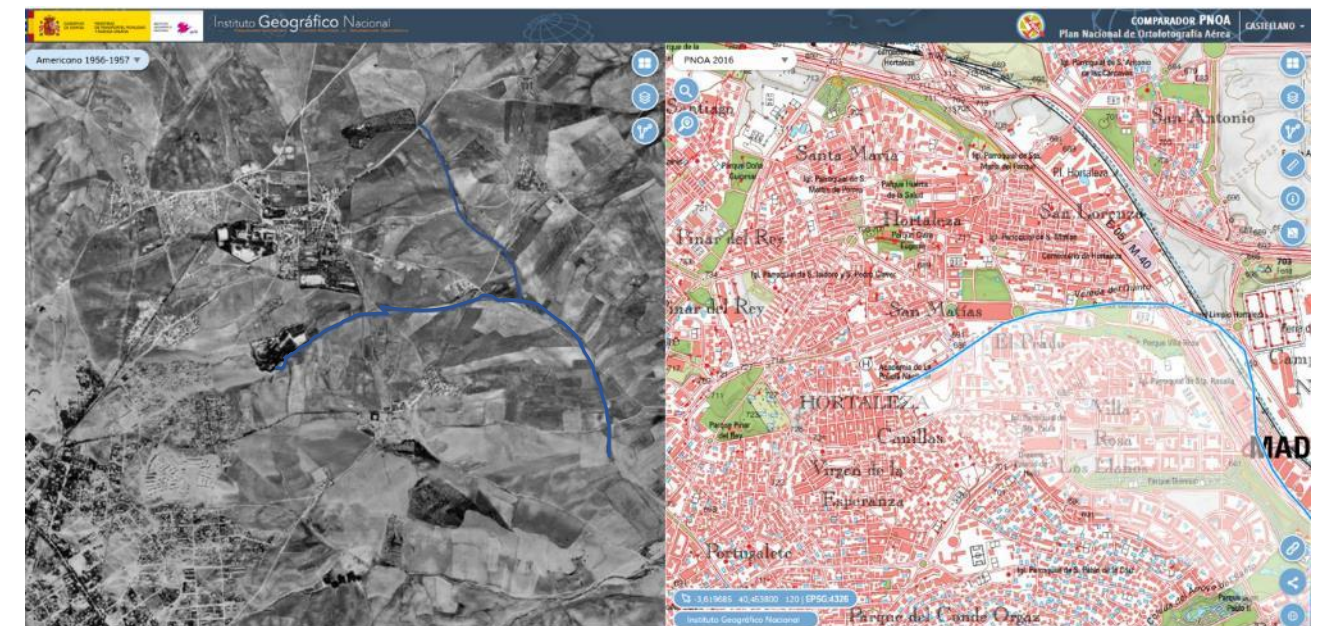


Figura 8. Trazado del arroyo de Quinto. Comparador PNOA IGN.



Figura 9. Trazado del arroyo de Quinto. Cartografía geológica <https://idem.madrid.org/visor>

Rellenos antrópicos

Corresponden a materiales de aportación como consecuencia de actividades constructivas, como vertederos de tierras y escombros, terraplenados controlados, vías de comunicación e instalaciones. Aparecen más o menos compactados con carácter homogéneo y composición arenosa algo gravosa, con diferentes proporciones de arcillas. Entre ellos, cabe destacar la acumulación de potentes y extensos rellenos excedentes de excavación y de obra, que alcanzan los 10 m de espesor y que se encuentran en buena parte del área de estudio, como son el entorno de la M-11, zona de ampliación de Ifema, parques Princesa Leonor y Felipe VI y el entorno de la T4. Estos últimos han sido depositados recientemente. Estos parques se desarrollan en parte sobre las antiguas escombreras de las Cárcavas, que fue el mayor vertedero ilegal de Madrid en la década de los 90. De las cerca de 30 hectáreas de escombreras y vertederos que existían en 1984, en el ámbito UNP 04.01 “Ciudad aeroportuaria y parque de Valdebebas”, han pasado a unas 100 hectáreas en 1995. En ocasiones, estos vertidos han producido variaciones en la red hidrográfica natural.



Figura 10. Escombreras identificadas en el PGOU 1997

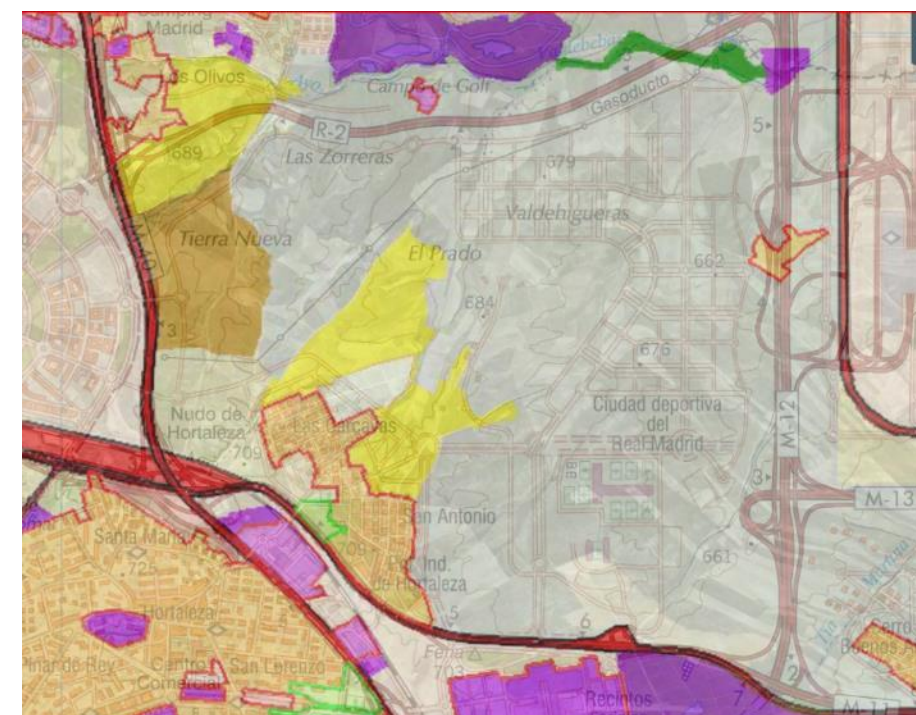


Figura 11. Mapa de usos del suelo, con situación de escombreras (en amarillo) (<https://idem.madrid.org/visor>)



Figura 12. Escombreras en el actual parque Felipe VI (Imagen de marzo de 2005, visor Google Earth)



Figura 13. Escombreras en el actual parque Princesa Leonor y zona de ampliación de IFEMA. Foto aérea 2007. Visor Carto Madrid

Distribución espacial de las formaciones superficiales

Se describen sobre el perfil de la Alternativa 1, por abarcar la mayor parte del área estudiada. Los tramos diferenciados de las Alternativas 2 y 3 se describen más adelante. La Alternativa 4 coincide por completo con la 2.

Alternativa 1:

Inicio – M40 (0+000 a 1+350): La zona de Mar de Cristal se emplaza en el antiguo arroyo de Quinto, por lo que presenta rellenos superficiales de 2 a 5 m de espesor, encontrándose los mayores en torno al p.k. 0+700, en la zona donde se cruza el antiguo arroyo. En esa zona, entre los p.k. 0+520 y 0+840, también se encuentran depósitos aluviales infrayacente a los rellenos, de hasta 3 m de espesor.

M-40 – Avenida de las Fuerzas Armadas (1+350 a 3+250): La M40 discurre por el fondo de la continuación del antiguo arroyo de Quinto. Si bien la autovía discurre en desmonte (p.k. 1+400) alcanzando el sustrato, en su margen este se ha encontrado mayor espesor de depósitos, en torno a la línea de F.C. (p.k. 1+550), alcanzando de 3 a 5 m entre rellenos superficiales y aluvial. En la zona más baja del Parque del Campo de las Naciones (p.k. 1+650) se ha registrado hasta 10 m de suelos rígidos, pudiendo corresponder parte de ellos a sustrato meteorizado. En el resto de dicho parque, entorno de la M-11 y zona del camino Alto de Hortaleza (p.k. 1+900) solo se registran rellenos superficiales de 2-3 m de espesor que incluso pueden desaparecer, aflorando el sustrato. Siguiendo hacia el norte se bordea la parcela de IFEMA por el oeste y norte (p.k. 2+100 a p.k. 3+200); en esta parcela hay diversos rellenos y vertidos, habiéndose detectado espesores importantes sobre el trazado en su borde sur, con unos 3-5 m junto a la glorieta de Manuel Muñoz Monasterio (p.k. 2+200) y sobre todo en su borde norte (p.k. 2+600 a 2+800) con unos 7 m de rellenos vertidos. En el resto de las áreas el espesor de la capa de rellenos superficiales es de unos 2 m.

Glorieta Antonio Perpiña – Av. J.A. Samaranch – Arroyo Valdefuentes (3+250 a 4+050): El trazado discurre bajo el curso del arroyo Valdefuentes, con un nivel superficial de rellenos más depósito aluvial de entre 1 a 3 m en las zonas de borde, que llega a 5-7 m de espesor en la zona central, entre los p.k. 3+500 a 3+750.

Parque Princesa Leonor – Ayo. Valdelahiguera – Parque Felipe VI (4+050 a 5+730): Los parques se emplazan en zonas de antiguos vertidos, si bien en el Parque Princesa Leonor (p.k. 4+050 a 4+820) el trazado atraviesa por zonas de escasos vertidos, con unos 3-5 m de espesor máximo, en el Parque Felipe VI (p.k. 4+920 a 5+620) se encuentran antiguas escombreras de vertidos de hasta 10 m de espesor. En la zona del arroyo Valdelahiguera (p.k. 4+820 a 4+920 y 5+620 a 5+730) se encuentra un pequeño aluvial de unos 2-3 m de espesor máximo.

Av. Secundino Zuazo – Ayo. Valdefuentes – M12 (5+730 a 7+500): Toda la zona tiene un nivel superficial de rellenos de 3-5 m de espesor, siendo únicamente reseñable el cruce con el arroyo de Valdefuentes (p.k. 6+850 a 6+950) donde aparece subyacente un nivel aluvial de alrededor de 1 m de espesor.

M12 – Zona T4 – M13 (7+500 a 9+000): Aparecen rellenos superficiales discontinuos de entre 0 a 4 m en las superficies afectadas por las obras de la T4 alternando con sustrato aflorante en las zonas de desmonte. El tramo final (p.k. 8+000 a 8+900) se desarrolla sobre una zonas de antiguas terrazas aluviales, presentando un nivel de rellenos superficiales de unos 3 m de espesor sobre un nivel de terrazas también de 3 m. La alternativa termina en el entorno del arroyo de la Plata, con aluvial de escaso espesor.

Alternativa 3:

Inicio – M40 (0+000 a 0+900): La zona de Mar de Cristal en esta alternativa se emplaza algo más al sur de la anterior, evitando la zona central del arroyo de Quinto. Por ello el nivel de rellenos superficiales detectado es ligeramente de menor espesor, con entre 1,5 a 4 m.

Alternativa 2:

Av. J.A. Samaranch – C. Fernando Higuera – Arroyo de la Plata (3+700 a 5+200): Aparecen rellenos superficiales de alrededor de 3 m de espesor. Entre la calle Julio Cano Lasso y la M12 (p.k. 4+650 a 4+800), en la bajada al arroyo de la Plata, donde se encuentra la M12, hay algunos vertidos con espesores de entre 3 a 5 m. En el cruce con el arroyo de la Plata (p.k. 4+970 a 5+030) se encuentra un aluvial de escaso espesor.

4. GEOMORFOLOGÍA

Los principales rasgos morfológicos de la Cuenca de Madrid están condicionados por la naturaleza litológica y la estructura de su relleno mioceno, así como los procesos de erosión y acumulación acaecidos durante el Plioceno y Cuaternario (Royo et al, 1929; Goy et al, 1989). En detalle, la zona de estudio se sitúa en la Cuenca Hidrográfica del Jarama dentro del final de su curso medio. El curso fluvial del río Jarama se genera como resultado de su incisión sobre las altiplanicies o divisorias conocidas también como “Superficie de Madrid” (Riba 1957), desarrolladas sobre las arenas arcósicas.

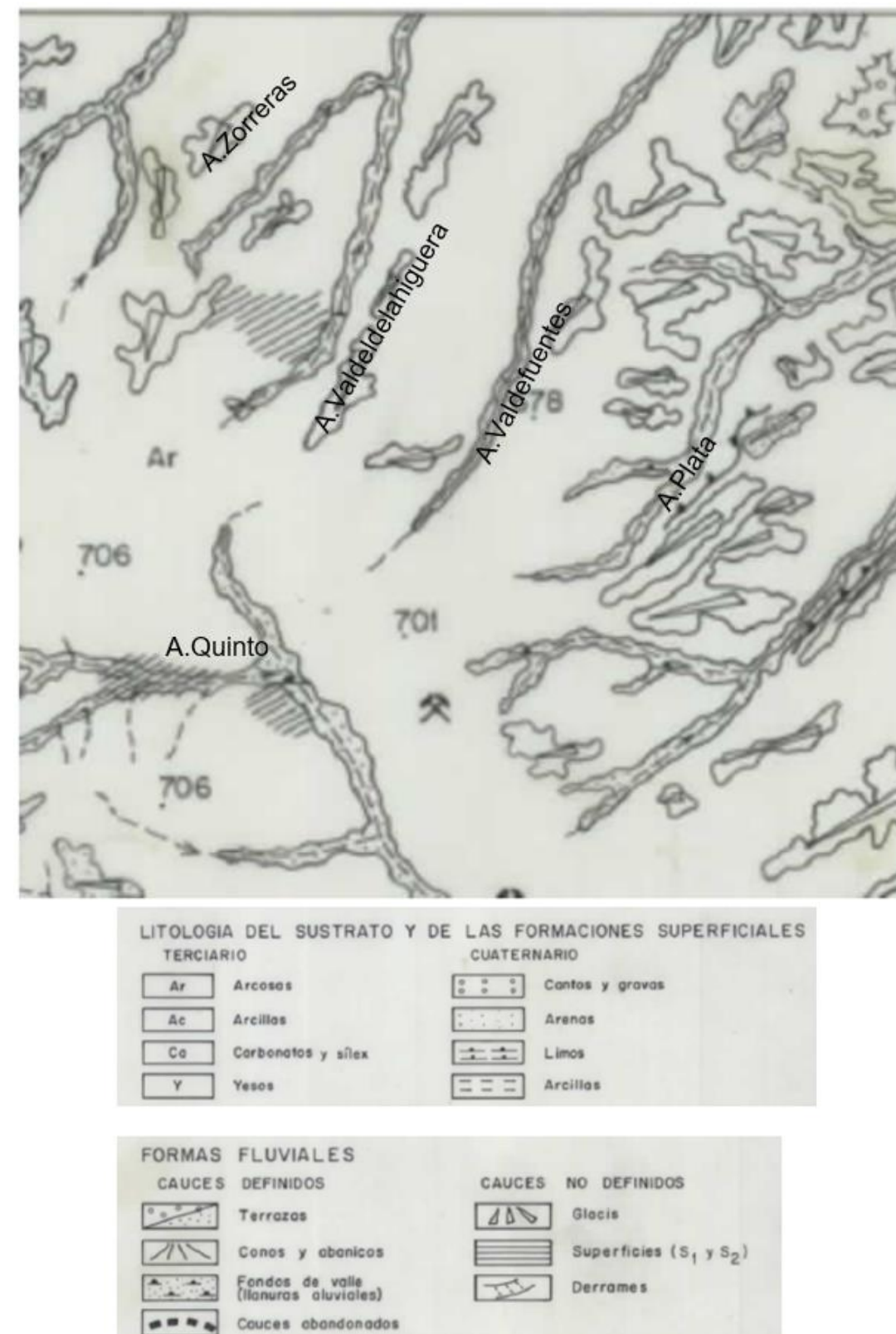


Figura 14. Plano Geomorfológico 1:50.000, hoja 559, Madrid. (Goy, J. L., Pérez-González, A. y Zazo C. 1989).

Es a favor de esta superficie donde se encaja la red de drenaje originando los distintos depósitos asociados a los valles cuaternarios, que forman el marco geomorfológico de la zona de estudio.

5. TECTÓNICA

La Cuenca de Madrid es una de las grandes áreas subsidentes intracontinentales, de edad Terciaria, que ocupan en el interior de la Península Ibérica. Según Vegas y Banda (1982), no representa una verdadera fosa tectónica, ya que su desarrollo coincide con una deformación compresiva global de la Península Ibérica durante el Terciario, cuyo resultado es la estructuración de relieves positivos, como el Sistema Central, y zonas subsidentes como la Cuenca de Madrid.

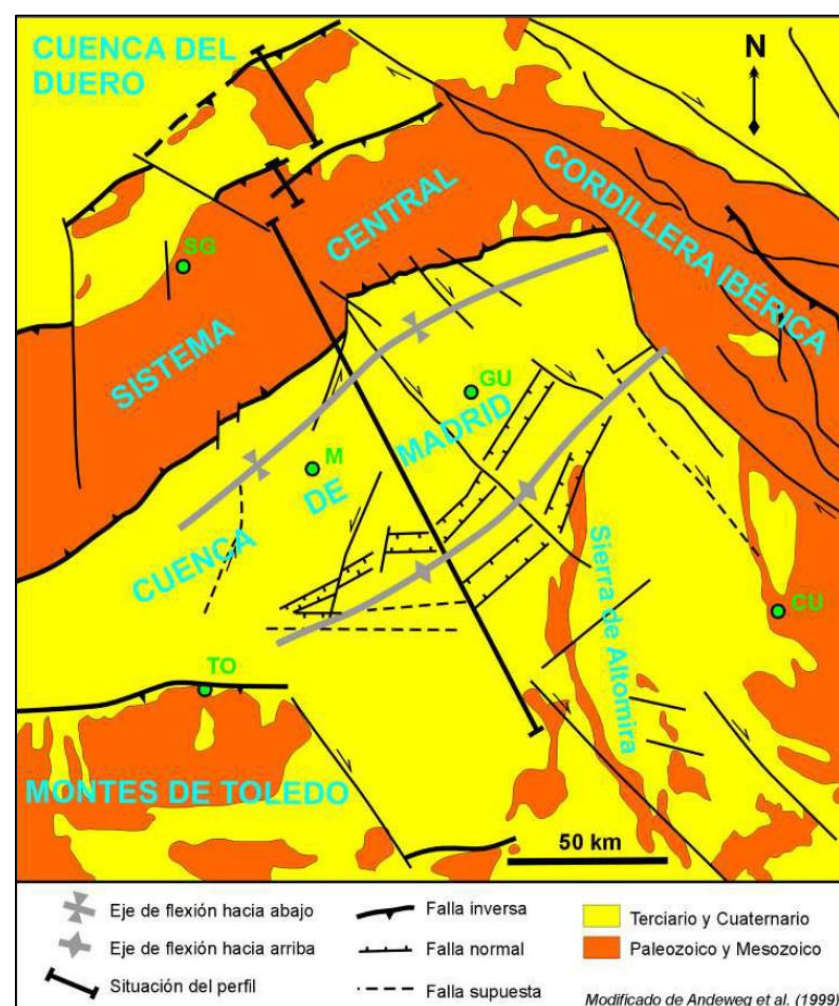


Figura 15. Principales estructuras tectónicas de la Cuenca de Madrid. (Andeweg et al., 1999).

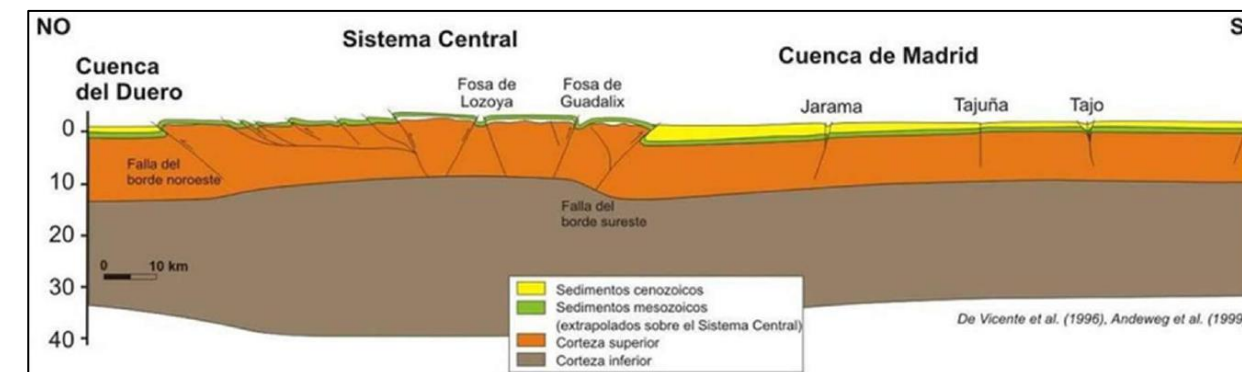


Figura 16. Corte geológico esquemático de la Cuenca de Madrid (De Vicente, 1996; Andeweg, 1999).

Dentro de la cuenca, el área de Madrid está situada cerca de su borde septentrional, donde el Sistema Central aparece como una línea de mayor actividad frente a los esfuerzos tectónicos que produjeron la deformación causante de la elevación de dicho sistema y la subsidencia de la cuenca.

Los relieves son consecuencia de la reactivación durante la orogenia Alpina de fracturas posthercínicas del zócalo, que condujeron a una dinámica de bloques con sedimentación en la cuenca terciaria, que controló la distribución de las facies.

La actividad tectosedimentaria se refleja en el control estructural de los principales corredores, principalmente según direcciones NE-SO y su conjugada o complementaria NO-SE, que corresponden a fallas de desgarre posthercínicas.

Debido a la naturaleza de los sedimentos detríticos del área de Madrid, esta tectónica frágil no se manifiesta en superficie, aunque sí se refleja en la jerarquización de la red fluvial.

Además de esto, la disimetría de los valles del Jarama y sus afluentes puede quedar explicada por las suaves inclinaciones en los materiales terciarios.

6. SISMICIDAD

Para la evaluación y prevención del riesgo sísmico se ha seguido lo indicado en el *Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes*.

De acuerdo con este código, el tipo de terreno presente en el tramo de proyecto es el Tipo B, con predominio de suelos granulares densos o suelos cohesivos duros o presencia de capas delgadas de suelos granulares sueltos o cohesivos blandos.

En cuanto a su ubicación en el mapa de regiones sísmicas, la aceleración horizontal $a_g R$ es inferior a 0.04, en toda la zona.

Estos valores de aceleración son acordes a lo indicado en el Mapa de Peligrosidad Sísmica de España (versión revisada octubre 2015), del IGN, donde se muestra lo siguiente para la zona de estudio:

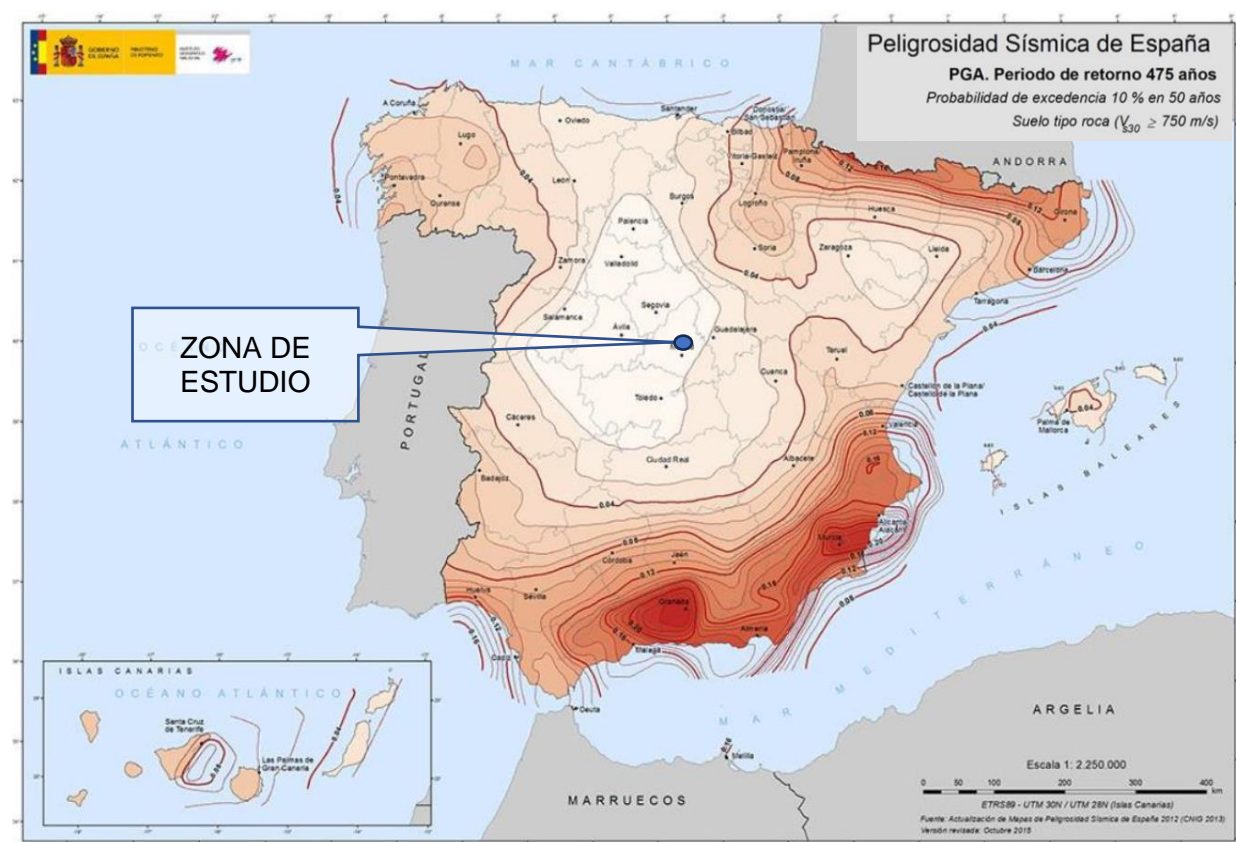


Figura 17. Mapa de Peligrosidad Sísmica de España (versión revisada octubre 2015); IGN.

Por tanto, se trata de una zona en la que no es obligatoria la aplicación de la normativa sismorresistente, al encontrarse por debajo del valor requerido (0,04g) según esta.

7. HIDROGEOLOGÍA

7.1. GENERALIDADES

Desde el punto de vista hidrogeológico, Madrid se localiza dentro de la Cuenca del río Tajo y, dentro de ésta, sobre el denominado acuífero 14, Terciario Detrítico de Madrid-Toledo- Cáceres, limitado, a grandes rasgos, por la Sierra de Guadarrama, el río Tiétar, las estribaciones de los Montes de Toledo y las calizas del Páramo.

Dentro de la cuenca se pueden diferenciar varias Masas de Agua Subterránea, encontrándose la zona de estudio sobre la 3.05d, Madrid Manzanares-Jarama.

De forma regional podemos definir la geometría del acuífero como un conjunto de lentejones areno- arcillosos de diverso tamaño, distribuidos aleatoriamente en una matriz arcillosa,

funcionando a nivel regional como un acuífero heterogéneo y anisótropo, que se recarga por infiltración del agua de lluvia en las zonas topográficamente más elevadas (interfluvios) y se descarga fundamentalmente en las más bajas (valles fluviales). Esto condiciona que, como consecuencia del modelo de flujo regional, los niveles piezométricos varían con la profundidad. Así en los interfluvios el potencial hidráulico disminuye al aumentar la profundidad, es decir, los pozos más profundos tienen sus niveles estáticos más profundos, mientras en las zonas de descarga, el potencial hidráulico aumenta con la profundidad.

Las características químicas de las aguas están muy influenciadas por el sistema de flujo y por la litología del acuífero. En zonas de recarga, durante el paso del agua de lluvia que se infiltra por la zona no saturada se produce la hidrólisis de los silicatos, principalmente, haciendo que aumente su contenido en SiO₂, en elementos alcalinos o alcalinotérreos, dándole una facies química tipo bicarbonatadas cálcicas o magnésicas.

El trazado atraviesa una zona hidrológica de cauces de tercer orden, con cursos intermitentes. La red natural de drenaje está constituida en la zona SO por el arroyo de Quinto, ya desaparecido en la trama urbana, y al NE por el arroyo de Valdebebas, que solo transporta agua en periodos húmedos, si bien cuenta con circulación sub-superficial. Otros arroyos en la zona, tributarios de este último y con carácter semipermanente son los arroyos de Valdefuentes, de La Plata (encauzado en la actualidad), Valdelahiguera, y de Las Zorreras.

Todos los cauces se encuentran bastante alterados por la actividad antrópica, especialmente en la zona de cabecera, debido a los vertidos. Puede decirse que la red hidrográfica ya ha perdido su entidad, debido a la urbanización, los vertidos o los encauzamientos. No obstante, algunos de estos arroyos son afectados por el trazado, pudiendo quedar soterrados actualmente o enmascarados por la urbanización, y en los que la presencia de agua podrá ser un condicionante, sobre todo en los casos en los que el aluvial se encaja en las arenas de miga. Esta situación ocurre en la vaguada de la glorieta de Mar de Cristal que se sitúa en los materiales correspondientes al aluvial del arroyo de Quinto, bajo los que se encuentran arenas de miga, que podría tener recarga por parte del aluvial.

7.2. EL ACUÍFERO DETRÍTICO DE MADRID

Como se ha indicado, puede considerarse como un acuífero único, libre, complejo, heterogéneo y anisótropo. La recarga del acuífero se produce principalmente por la infiltración del agua de lluvia caída directamente sobre los materiales terciarios. Esta infiltración tiene lugar en los interfluvios. La descarga se realiza fundamentalmente en los valles, con sistemas de flujo locales, intermedios y regionales.

En general, la permeabilidad horizontal media de los sedimentos terciarios detríticos es baja (0,05 a 0,20 m/día) y la permeabilidad vertical media unas cien veces menor. En estas condiciones, los tiempos de residencia de las aguas subterráneas son largos, pudiendo ser inferiores a cinco o diez mil años para las aguas que circulan solo en la zona superior del acuífero, y alcanzando los cientos de miles de años si las trayectorias corresponden a flujos intermedios o regionales. Esta circunstancia determina que en las zonas de descarga puedan confluir aguas con tiempos de residencia en el acuífero muy diferentes lo que explicaría la existencia de zonas con aguas de características geoquímicas anómalas que corresponden a tiempos de residencia muy altos, debido a los procesos de cambio iónico en arcillas que modifican la química de las aguas.

Las transmisividades más frecuentes varían entre 5 y 50 m²/ día. Las calidades del agua varían con la situación tanto superficial como en profundidad. El residuo seco en las facies arenosas se sitúa entre 200 y 500 mg/l mientras que en los toscos oscila entre 500 y 1000 mg/l.

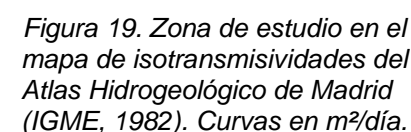
7.3. DINÁMICA DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

Las unidades litológicas granulares superiores de las facies Madrid, compuestas por las arenas de miga y tosquizas, constituyen en principio un acuífero libre de potencia variable. No obstante, la frecuencia de intercalaciones arcillosas hace que se comporte en gran medida como un acuífero multicapa, con niveles de diferente permeabilidad intercalados entre sí, lo que da lugar a horizontes saturados confinados que forman bolsas de agua y niveles colgados.

Las unidades arcillosas, tosco arenoso y tosco, infrayacentes a anteriores, se comportan como un acuitardo, ya que no suponen un límite impermeable estricto. El grado de saturación de estos materiales suele ser medio-bajo y, aunque ocasionalmente pueda ser alto, no presentan carga hidráulica. También dentro de las unidades tosquizas es frecuente encontrar litologías granulares más gruesas, correspondientes a lentejones arenosos. Estas unidades granulares inferiores son acuíferos confinados que, generalmente, presentan carga artesiana debido al peso de los materiales suprayacentes y al límite casi impermeable que suponen los materiales tosquizos.



Figura 18. Zona de estudio en el Atlas Hidrogeológico de Madrid (IGME, 1982).



De este modo, el acuífero de Madrid dentro de ser un acuífero multicapa tiene o presenta ciertas peculiaridades en cuanto a su funcionamiento. En primer lugar, la consideración regional de acuífero en el que existe un flujo de agua subterráneo no es del todo aplicable a las formaciones de las facies Madrid. Las facies detríticas miocenas existentes en el entorno de Madrid se caracterizan por su escasa continuidad lateral que hace imposible el seguimiento de las capas o estratos que continuamente se están acuñando lateralmente y cambiando sus características.

El agua freática existente en las capas detríticas es en buena parte fósil, no existiendo recargas significativas del acuífero y manteniendo éste el nivel dentro de los cuerpos arenosos. En los casos más superficiales en los que las arenas están aflorantes se recargan por escorrentía de manera muy puntual pasando a ser un acuífero superficial.

Como ya se ha indicado, el trazado previsto para el túnel se desarrollará previsiblemente en materiales del tosco arenoso o tosco, aunque la clave del túnel se sitúa siempre muy próxima o casi tangente al contacto con el conjunto superior de arenas de miga y tosquizas, llegando a afectarlas en algunos tramos. Esto supone que se atravesarán materiales predominantemente arcillosos en el túnel, mientras que las estaciones se ejecutarán en sustrato con predominio de arenas.

Se dispone de medidas de la profundidad del agua en los sondeos perforados en campañas previas y en la campaña geotécnica ejecutada para el estudio.

ZONA	SONDEO	Nivel agua (profundidad-m)
ESTACIÓN MAR DE CRISTAL	S-6	15.6
	S-7	6.6 / 15
TRAMO INTERESTACIONES MAR DE CRISTAL-CRISTALIA	S-1	17
	S-2	12
	S-3	9
ESTACIÓN AEROPUERTO	SM-1	4.64 / 10.40
	SM-2	3.75 / 7.20
	SM-3	5.95 / 11.10
	SM-4	5.85 / 7.25 / 10.05
	SM-5	17.88 / 20.85
	S-62	4.90
	S-65	5.10
	S-75	7.20
	S-37	11.90
	S-39	7.20

ZONA	SONDEO	Nivel agua (profundidad-m)
TRAZADO FERROCARRIL CERCANÍAS	SP-3	7.20 / 21.40 / 43.70
	SP-4	17.50 / 31.80
	S-01	20.7
	S-02	10.35
	S-03	16.0
	S-04	15.05
	S-05	14.50
	S-06	17.8
	S-07	5.05
	S-08	9.9/18.7
	S-09	-
	S-10	11.10
	S-11	7.50/29.0
	S-12	-
	S-13	4.15
	S-14	11.40
	S-15	13.75

Existe un punto de agua identificado como surgencia en la zona del parque Juan Carlos I. En cuanto a piezometría, según los datos que constan en la página <https://miteco.maps.arcgis.com> el único piezómetro existente en la zona es el identificado como 03.05.024, en Alcobendas.

En la siguiente figura se sitúan ambos puntos:



Figura 20. Puntos de agua (<https://miteco.maps.arcgis.com>).

Las medidas de profundidad de agua hechas en la campaña geotécnica ejecutada se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 4.. Profundidades de agua en sondeos de la campaña ejecutada.

Sondeo	Cota sondeo	30/11/23 NF (m)	19/12/23 NF (m)	29/01/24 NF (m)	08/03/2024 NF (m)	Cota NF (msnm)
ST-0.1.1	689,2		16,35		17,2	672,0
ST-1.1	682,1		35,37		37,5	644,6
ST-1.3	683,0		43,7		43,5	639,5
SL-8.1	667,6		15,48		15,2	652,4
SO-2-3-2	686,1	17,15			10,43	675,7
SO-2-3-1	695,9	5,32			12,52	683,4
ST-3.5	674,7		26,64		36,41	638,3
ST-3.2	686,8			16,28	25,52	661,3
ST-AV-01	682,7			15,5	15,43	667,3
ST-C-1	668,6	32,92			32,6	636,0
ST-4.1	660,1					
ST-0.8	651,5	9,45			9,75	641,8
ST-8.1	667,6	33,12			24,7	642,9
ST-7.1	631,4	16,4			7,9	623,5
ST-6.1	619,6				9,8	609,8
ST-5.6	623,9				11,9	612,0
ST-R-1	631,6			1,45	1,4	630,2
ST-R-1-2	635,6			11,6	11,2	624,4

En la siguiente gráfica se observa la posición de las profundidades de agua registradas en los sondeos, ordenados de acuerdo a la Alternativa 1.

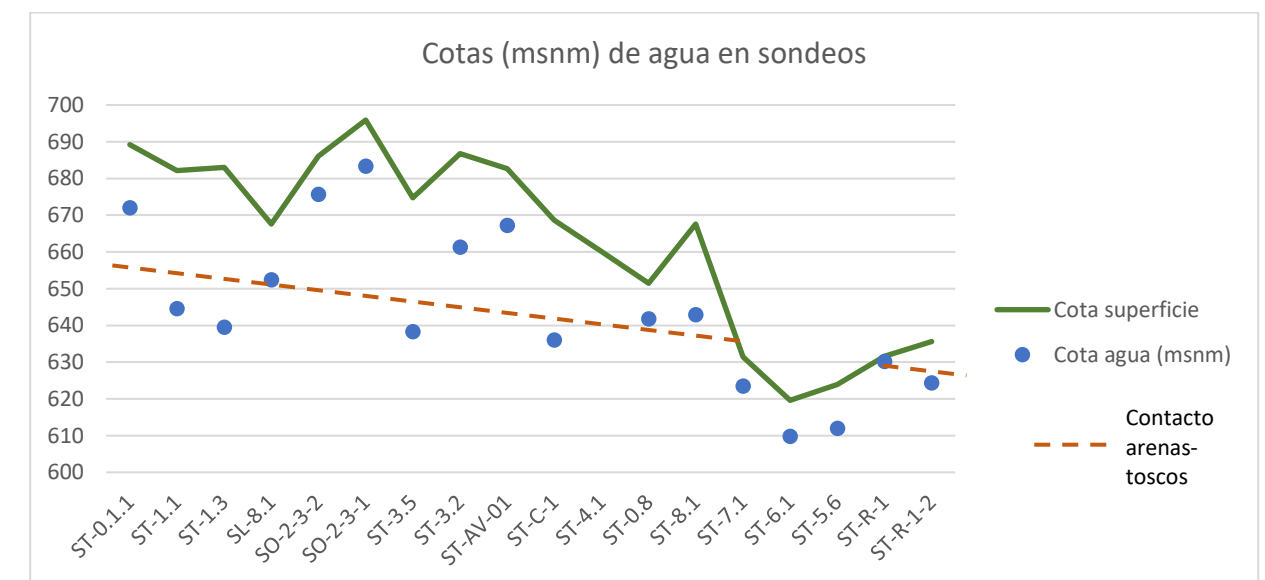


Figura 21. Cotas de agua en los sondeos ejecutados.

Como se observa en el gráfico, la distribución de niveles de agua a lo largo del trazado es bastante errática. No obstante, buena parte de los sondeos presentan un nivel situado en torno al contacto entre los dos conjuntos litológicos del sustrato mioceno citados, el superior de arenas de miga y tosquizas y el inferior de toscos arenosos y toscos, que se ha dibujado en el gráfico

de forma aproximada con una línea. Esta disposición del nivel de agua sobre el contacto de las unidades más arcillosas e impermeables es lógica, ya que corresponde al flujo subterráneo sobre este nivel, que aflora en superficie mediante una zona de descarga. También se observan en otros sondeos niveles de agua más próximos a la superficie, que corresponderán a aguas colgadas.

En los sondeos de la campaña geotécnica ejecutada se ha realizado ensayos de permeabilidad con el fin de estimar la permeabilidad de las unidades perforadas. El tipo de ensayo realizado es el Lefranc de carga variable, midiendo los descensos de la columna de agua en un intervalo de tiempo determinado. La siguiente tabla se resumen los ensayos ejecutados.

Tabla 5. Resumen ensayos permeabilidad Lefranc

Sondeo	Profundidad		Unidad	Permeabilidad		Permeabilidad (cualitativa)
	Inicio	Fin		(cm/s)	(m/día)	
ST-0.8	8,30	10,00	Ar. Tosquiza	1,18E-05	1,02E-02	Moderada a baja
ST-4.1	17,80	20,00	Ar. Tosquiza	2,62E-06	2,26E-03	Baja
ST-7.1	9,00	12,00	Tosco	6,85E-07	5,92E-04	Baja
ST-8.1	25,00	30,00	Ar. Tosquiza	1,70E-07	1,47E-04	Baja
ST-C-1	25,00	30,00	A.miga	9,48E-06	8,19E-03	Baja
ST-1.1	25,00	28,00	T. arenoso	7,55E-07	6,52E-04	Baja
ST-AV-1	23,00	24,10	Tosco	2,09E-06	1,80E-03	Baja
ST-1.3	30,00	32,70	Ar. Tosquiza	5,47E-06	4,73E-03	Baja
ST-6.1	24,00	25,20	Ar. Tosquiza	4,29E-06	3,70E-03	Baja
ST-5.6	19,00	20,00	Tosco	0,00E+00	0,00E+00	Impermeable

En el ensayo del sondeo ST-5.6 no se apreciaron descensos en el ensayo.

Los valores de permeabilidad obtenidos son bastantes bajos, incluso en las unidades arenosas. Así puede adoptarse un valor representativo de 5E-06 cm/s para arenas de miga y tosquizas y de 7E-07 cm/s para toscos arenosos y toscos.

En cuanto a las características hidroquímicas del agua de los sondeos ejecutados, el residuo seco se sitúa habitualmente entre 500 y 1000 mg/l, con promedio de 667, caracterizándose por ello como aguas propias de la facies tosco. El CO₂ libre presenta un promedio de 30 mg/l, el de sulfatos es de 130 mg/l. El tipo de exposición del hormigón, de acuerdo con el código estructural es en general Débil (XA1), pudiendo ser puntualmente Medio XA2. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Resumen ensayos de hidroquímica en sondeos para determinación de agresividad.

Sondeo	pH	Magnesio (Mg2+) mg/l	Amonio (NH4+) (mg/l)	Sulfato (SO4=) (mg/l)	CO2 libre (mg/l)	Residuo seco (mg/l)	Tipo exposición Cód. Estruct.
ST-0.1.1	7,13	8,3	0,3	255	0,0		Débil XA1
ST-0.8	7,93	13,1	<0,2	164	39,6	1225	Débil XA1
ST-1.1	7,3	16,5	<0,2	395	22,0	1085	Débil XA1
ST-1.3	7,31	2,4	<0,2	25	0,0	96	Débil XA1
ST-2.3.1	7,85	5,8	<0,2	132	66,1	846	Medio XA2
ST-2.3.2	7,91	4,9	<0,2	83	66,1	703	Medio XA2
ST-3.5	6,62	0,0	0,3	103	13,2	636	No agresiva
ST-7.1	8,17	21,4	<0,2	83	14,1	732	No agresiva
ST-8.1	7,84	4,4	<0,2	56	22,0	687	Débil XA1
SL-8.1	6,61	14,6	0,7	269	19,4	1354	Débil XA1
ST-C-1	7,98	17,0	<0,2	62	37,0	402	Débil XA1
ST-4.1							
ST-3.2	6,78	23,8	<0,2	104	39,1	585	Débil XA1
ST-R-1	7,11	1,0	0,5	85	32,6	402	Débil XA1
ST-R-1.2	7,31	16,1	<0,2	50	14,8	222	No agresiva
ST-AV-01	6,33	13,6	<0,2	85	39,2	367	Débil XA1

Tabla 7. Grado de agresividad para aguas según el Código Estructural (RD 470/2021).

AGUAS. TIPO DE EXPOSICIÓN. CÓDIGO ESTRUCTURAL (RD 470/2021)			
	ATAQUE DEBIL XA1	ATAQUE MEDIO XA2	ATAQUE FUERTE XA3
pH	5,5-6,5	4,5-5,5	< 4,5
Magnesio (Mg 2+) mg/l	300-1000	1000-3000	> 3000
Amonio (NH4+) (mg/l)	15-30	30-60	> 60
Sulfato (SO 4 =) (mg/l)	200-600	600-3000	> 3000
Dióxido de Carbono libre (CO2) (mg/l)	15-40	40-100	> 100
Residuo seco (mg/l)	75-150	50-75	< 50

8. RIESGOS GEOLÓGICOS

8.1. AGUAS COLGADAS

Como ya se ha descrito al hablar de la hidrogeología, la naturaleza multicapa del acuífero y los cambios laterales de entre facies arenosas y arcillosas da lugar con cierta frecuencia a niveles de agua aislados y confinados entre materiales impermeables. Estas bolsas de agua han supuesto siempre uno de los principales riesgos en la excavación subterránea de los terrenos de Madrid y es uno de los motivos fundamentales por los que se evita el uso de tuneladoras de frente abierto.

Aunque se han detectado posibles niveles colgados, como se indicó anteriormente, en la zona de estudio se prevé que este riesgo sea bajo, ya que la mayor parte del túnel se proyecta en materiales arcillosos, toscos arenosos y toscos, afectándose a las unidades superiores arenosas solo en las estaciones, que serán excavadas entre pantallas.

Respecto a las formaciones superficiales, terrazas y aluviales, pueden preverse aguas colgadas en la excavación de las estaciones previstas en el eje de antiguos cauces; en concreto de las siguientes:

- Mar de Cristal-Parque Alfredo Kraus
- Intercambiador-Ciudad de la Justicia

También afectará en superficie al aluvial del arroyo de Valdelahiguera el pozo de bombeo y salida de emergencia PB-3/SE-6 (referida a la Alternativa 1). En el resto no es previsible, incluso en aquellas que afectan antiguas terrazas, como la de Barajas-T4, ya que se encuentran totalmente desligadas de cualquier recarga.

8.2. RIESGOS ASOCIADOS A LA EXCAVACIÓN DE TÚNELES EN ARENA DE MIGA

Además de la posible presencia de aguas colgadas, hay otros posibles riesgos asociados a la excavación de túneles en arena de miga, como son:

- **Intercepción de arenas con bajo contenido en finos.** La problemática a la hora de excavar arenas sin cohesión es la posibilidad de inestabilidades en el frente o dorsales. En el caso del frente, el riesgo se minimiza mediante la presurización del frente y es la causa principal que hace necesario el uso de tuneladoras EPB en Madrid. Las inestabilidades dorsales se producen cuando los niveles no cohesivos aparecen en la clave del túnel, lo que puede provocar una sobreexcavación difícil de detectar mediante el control del material extraído. Los tramos en los que se prevé la presencia de arena de miga en clave, en el tramo de estudio, son los siguientes:
 - Alternativa 1 y 3: prog. 1+900 a 2+200 y 5+550 a 6+550
 - Alternativa 2 y 4: prog. 1+900 a 2+200 y 7+550 a final
- **Abrasividad en arenas.** El desgaste de los elementos de corte depende de la abrasividad de los terrenos excavados, aunque con un adecuado empleo de aditivos y agua en el frente puede disminuirse el rozamiento entre terreno y frente y disminuir también la abrasión del terreno. En el caso de la arena de miga el contenido en cuarzo está comprendido entre un 40 y un 60 % de la composición, por lo que puede considerarse altamente abrasiva. No se descarta el riesgo de encontrar lentejones con gravillas o gravas también de alta abrasividad.

8.3. RELLENOS ANTRÓPICOS

En las áreas ocupadas por los rellenos de mayor espesor, no se prevén obras superficiales que los afecten, ya que se atravesarán en túnel por el sustrato subyacente. En general, solo se afectará en las obras superficiales al horizonte superficial antropizado, con espesores de hasta 3 m, que podrán llegar a 5 m en la estación de Intercambiador-Ciudad de la Justicia.

8.4. EXPANSIVIDAD

En los 18 ensayos de difracción de Rayos X realizados en muestras de sondeos se ha encontrado mayoritariamente esmectita, con contenidos entre el 51 y el 90%, dentro del 28% de minerales de la arcilla encontrados, en promedio, en las muestras.

En la Figura 7 puede observarse los porcentajes registrados en los ensayos que se muestran en el apartado 3.2.3, Mineralogía de las unidades miocenas.

La esmectita arcilla es potencialmente expansiva, habiéndose realizado distintos ensayos de laboratorio para valorar este riesgo. En los 19 ensayos Lambe realizados, que evalúan el cambio potencial de volumen, se han encontrado un 21% marginales, en facies tosco arenoso y tosco, frente a un 79% no críticos, también en tosco arenoso, tosco y arenas tosquizas. También se han ejecutado 16 ensayos de hinchamiento libre en edómetro, obteniendo valores inferiores a 0,8% en el 88% de las muestras, en tosco arenoso, tosco y arenas tosquizas, y un 12% con valores entre 1 y 2,2%, en tosco arenoso y tosco. Finalmente, se han realizado 19 ensayos de presión máxima de hinchamiento con un 79% de los resultados inferiores a 37 kPa, en tosco arenoso, tosco y arenas tosquizas, y un 21% superiores a 47 Kpa, en tosco arenoso y tosco, con un máximo de 65 kPa.

En conclusión, podemos valorar el riesgo de expansividad en la zona de estudio como bajo a moderado, asociado a las facies tosco arenoso y tosco, en las que se excavarán los túneles previstos, con presiones máximas de hinchamiento moderadas que ocasionalmente pueden alcanzar valores del orden de 50-60 kPa.

8.5. AGRESIVIDAD

El contenido en sulfatos en los suelos de la zona de estudio, en las 49 muestras ensayadas, es bajo, con un promedio de 167 mg/kg y valor máximo de 625 mg/kg.

El índice de acidez Baumann-Guly, que mide el contenido de iones de hidrógeno intercambiables que un suelo es capaz de liberar, es muy bajo, con un promedio de 33 en las 19 muestras ensayadas y un máximo de 65.

En ambos casos quedan claramente por debajo de los límites indicados como agresivos en el Código Estructural, como se ve en la tabla siguiente.

Tabla 8. Grado de agresividad para suelos según el Código Estructural (RD 470/2021).

SUELOS. TIPO DE EXPOSICIÓN. CÓDIGO ESTRUCTURAL (RD 470/2021)			
	ATAQUE DEBIL	ATAQUE MEDIO	ATAQUE FUERTE
	XA1	XA2	XA3
Acidez Baumann Gully (mg/g)	>200	(*)	(*)
Ión Sulfato (SO 4 =) (mg/kg)	2000-3000	3000-12000	>12000

(*) estas condiciones no se dan en la práctica

8.6. CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS

Para evaluar la posible contaminación por hidrocarburos asociada a la gasolinera Shell-Valdebebas, situada en la calle Francisco Umbral, se han realizado análisis por cromatografía CG FID de hidrocarburos totales de petróleo en muestras de suelo tomadas en los sondeos SO-2.3.1 y SO-2.3.2 próximos a esta. En ambos casos el resultado ha sido <25 mg/kg, por lo que se desestima esta posible contaminación.

9. INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA

9.1. PROYECTOS Y ESTUDIOS PREVIOS

En el área de estudio existe numerosa información procedente de los proyectos previos realizados en la zona. En la siguiente tabla se recogen las investigaciones disponibles más próximas a las alternativas propuestas y en el Apéndice 8 de este anejo los registros de los reconocimientos y datos de laboratorio. La situación en planta de los reconocimientos figura en la planta geológica incluida en el documento de planos.

Tabla 9. Investigaciones en campañas geotécnicas previas.

ZONA	CAMPAÑA*	SONDEOS (profundidad alcanzada)	DPSH	CALICATAS
ESTACIÓN MAR DE CRISTAL	g	- S-6 - S-7 (16.25)	P-20 a P-25	
TRAMO INTERESTACIONES MAR DE CRISTAL-CRISTALIA	c	- S-2401 (3.4 m) - S-2402 (3.6 m) - S-2403 (3.4 m) - S-2404 (3.3 m) - S-2405 (11 m) - S-2406 (22 m) - S-2407 (22 m)		
	f	- S-1 (30m) - S-2 (22.5 m)		

ZONA	CAMPAÑA*	SONDEOS (profundidad alcanzada)	DPSH	CALICATAS
		- S-3 (28 m)		
ESTACIÓN AMPLIACIÓN DE IFEMA	a	- S-1 a S-94 (4-26 m)	- P-1 a P-103	C-1 a C-10
ESTACIÓN INTERCAMBIADOR VALDEBEBAS	b	- Sondeo 1 (18.14 m) - Sondeo 2 (27 m)	- DPSH-1 (7.8 m) - DPSH-2 (12 m)	
	h	- S-09 (13.20) - S-10 (12.10)		
ESTACIÓN AEROPUERTO	d	- SM-1 (28.15 m) - SM-2 (31 m) - SM-3 (26 m) - SM-4 (31 m) - SM-5 (40.6 m) - S-2 (33 m) - S-62 (4.90 m) - S-65 (15.15 m) - S-75 (20.7 m) - S-37 (26.10 m) - S-39 (26.85 m)		
	e	- SP-3 (45 m) - SP-4 (45 m)		
TRAZADO CERCANÍAS	h	- S-01 (27.75) - S-02 (17,0) - S-03 (22.0) - S-04 (18,10) - S-05 (25.80) - S-06 (27.90) - S-07 (25.0) - S-08 (33.10) - S-09 (13.20) - S-10 (12.10) - S-11 (30.25) - S-12 (16.0) - S-13 (16.15) - S-14 (33.05) - S-15 (32.0)	- Pc-1 - Pc-2 - Pc-3 - Pc-4	

*Leyenda campañas previas:

- Estudio geotécnico en la parcela de Valdebebas, Madrid. Ampliación IFEMA. GOC. 2019
- Intercambiador de Valdebebas-Ciudad de la Justicia-Isabel Zendal. Proyecto básico y de ejecución. Comunidad de Madrid. Estudio geotécnico. 2021
- Base de datos GEOMADRID. Sondeos para proyecto M-40
- Proyecto de construcción del tramo Barajas-Nuevas terminales de la línea 8 del Metro de Madrid. EUROESTUDIOS. 2002
- Proyecto complementario nº 3 al Proyecto de construcción del tramo Barajas-Nuevas terminales de la línea 8 del metro de Madrid. FCC. 2007.
- Proyecto de Construcción y Proyecto modificado nº 1 del Proyecto de construcción del Ramal a recintos feriales del metro de Madrid. IBERINSA 1996
- Proyecto de construcción de infraestructura de Prolongación de la línea 4 del metro de Madrid. Tramo Esperanza-Gran vía de Hortaleza. INTECSA. 1994
- Proyecto de Construcción "Cercanías de Madrid. Acceso ferroviario al Aeropuerto de Barajas" INTECSA-INARSA 2006

9.2. CAMPAÑA GEOTÉCNICA EJECUTADA

La campaña geotécnica ejecutada consta de los trabajos que se exponen a continuación. Estos se hallan reseñados la planta y perfil geológico-geotécnicos incluidos en el documento de planos,

En el documento de planos y en los apéndices 1 a 4 se incluye la campaña geotécnica ejecutada, si bien hay trabajos que se encuentran en proceso en el momento de redactar este anejo.

9.2.1. Sondeos mecánicos

Se han ejecutado sondeos a rotación con recuperación continua de testigo, utilizando diámetros de Ø101 y Ø86. En ellos se han ejecutado ensayos *in situ* SPT, mediante un penetrómetro automático conforme a la Norma UNE 103-800-92 utilizando cuchara partida tomamuestras, y ensayos presiométricos. Se han tomado muestras inalteradas por golpeo en la zona más superficial y, tras obtener rechazo en los ensayos de penetración, se han plastificado testigos de avance, ambos para su ensayo en laboratorio. También se han ejecutado ensayos de permeabilidad Lefranc y se han tomado muestras de agua para su análisis.

La siguiente tabla resume los sondeos ejecutados y señala los pendientes de autorización. El sondeo ST-3.4 ha sido eliminado por haberse previsto en una alternativa ya desechada.

Tabla 10. Resumen sondeos

Sondeo	X	Y	Z	Ejecutado	Longitud (m)	Presiómetros	Lefranc	Registro
S0.2-3-1	446993	4480594	695,93	Sí	20,60			Final
S0.2-3-2	447096	4480490	686,14	Sí	20,00			Final
SL-8-1	446427	4479957	675,86	Sí	32,05	2		Final
ST-0.1.1	445417	4480143	689,19	Sí	46,60	2		Final
ST-0.1.3	445670	4479998	685,69	Pendiente				
ST-0.8	447302	4482919	651,52	Sí	22,40	2	1	Final
ST-1.1	445785	4480140	682,07	Sí	64,50	5	1	Final
ST-1.3	446023	4480011	683,02	Sí	66,00	5	1	Final
ST-3.2	446994	4481033	686,77	Sí	57,00	5	1	Final
ST-3.4	446864	4481228	684,31	Eliminado				
ST-3.5	447606	4480894	674,7	Sí	57,70	5		Final
ST-4.1	447759	4481603	660,12	Sí	53,00	5	1	Final
ST-5.2	448541	4481895	645,59	Sí	58,00	5	1	Campo
ST-5-6	449423	4482000	623,91	Sí	35,50	2	1	Final
ST-6.1	449486	4482553	619,58	Sí	58,20	5	1	Final
ST-7.1	448403	4482926	631,42	Sí	48,00	5	1	Final
ST-8.1	447611	4482964	667,59	Sí	67,00	5	1	Final
ST-AV-1	447027	4481167	682,69	Sí	40,70	2	1	Final
ST-C-1	447604	4481414	668,57	Sí	39,50	2	1	Final
ST-R-1	448894	4481650	631,57	Sí	27,60	2		Final

Sondeo	X	Y	Z	Ejecutado	Longitud (m)	Presiómetros	Lefranc	Registro
ST-R-1-2	448776	4481295	635,6	Sí	34,70	2		Final
ST-T-1	448712	4481890	643,6	Sí	30,50	2		Campo

En el Apéndice 1 se incluyen los registros de los sondeos, así como los certificados de los ensayos presiométricos y Lefranc realizados. Los trabajos indicados con registro en campo son los realizados más recientemente, cuyos registros y ensayos de laboratorio no se han finalizado en el momento de redactar este anejo.

9.2.2. Penetrómetros

Se han ejecutado ensayos de penetración dinámica tipo DPSH, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 22476-2, con el fin de detectar zonas de rellenos, tanto aluviales como antrópicos y niveles blandos superficiales en general.

La siguiente tabla resume los ensayos ejecutados. El ensayo P7 ha sido eliminado por haberse previsto en una alternativa ya desechada y el P-19-3 por dificultad de acceso, siendo reemplazado por un ensayo MASW.

Tabla 11: Resumen penetrómetros

Codigo	X	Y	Z	Ejecutado	Longitud (m)	Registro
P-01	445484	4480175	687,26	Sí	9,10	Sí
P-02	445621	4480169	684,43	Sí	6,40	Sí
P-03	445780	4479990	684,94	Sí	7,80	Sí
P-04	446212	4480073	676,20	Sí	6,40	Sí
P-05	446642	4480062	668,05	Sí	8,40	Sí
P-06	446731	4480582	690,40	Sí	9,20	Sí
P-07	446665	4480861	706,79	Eliminado		
P-08	447108	4481370	675,71	Sí	6,40	Sí
P-09	447110	4481305	679,09	Sí	9,60	Sí
P-10	447415	4481428	671,58	Sí	9,80	Sí
P-11	447843	4481706	647,20	Sí	6,20	Sí
P-12-1	447980	4481842	648,01	Sí	2,40	Sí
P-12-2	448088	4481890	653,75	Sí	2,20	Sí
P-12-3	448307	4481895	652,62	Sí	1,00	Sí
P-13	448918	4481808	633,83	Sí	7,00	Sí
P-14	449099	4481795	630,11	Sí	7,80	Sí
P-15-1	448875	4481563	632,57	Sí	4,20	Sí
P-15-2	448849	4481495	634,02	Sí	8,00	Sí
P-16	448767	4481359	636,95	Sí	7,20	Sí
P-17-1	449273	4481870	618,54	Sí	5,60	Sí
P-17-2	449469	4482326	621,42	Sí	4,20	Sí
P-18	449647	4483118	622,58	Sí	3,20	Sí
P-19-1	449462	4482756	618,74	Sí	4,00	Sí

Codigo	X	Y	Z	Ejecutado	Longitud (m)	Registro
P-19-2	449145	4483140	636,00	Sí	11,80	Sí
P-19-3	449047	4483056	0,00	Eliminado		
P-20-1	448931	4482962	644,11	Sí	7,20	Sí
P-20-2	448759	4482878	642,92	Sí	12,40	Sí
P-21-1	448273	4482889	634,00	Sí	4,20	Sí
P-21-2	447957	4482971	649,31	Sí	7,40	Sí
P-22	447186	4482977	642,83	Sí	4,60	Sí
P-23	446793	4480292	674,71	Sí	3,60	Sí
P-32	447905	4481909	648,43	Sí	9,00	Sí
P-33	447922	4481954	649,76	Sí	9,00	Sí
P-34	447851	4482059	650,50	Sí	6,40	Sí

En el Apéndice 2 se incluyen registros de los ensayos realizados.

9.2.3. Ensayos presiométricos

Para investigar la deformabilidad in situ del terreno, se han ejecutado ensayos presiométricos en el interior de los sondeos, según la norma ASTM D-4179 / NF P 94-110. Se han realizado dos ciclos de carga, obteniéndose el módulo de deformación (módulo presiométrico) en cada uno de ellos y el módulo de rotura (presión límite).

En la siguiente tabla se resumen los ensayos ejecutados.

Tabla 12. Resumen presiómetros

Sondeo	Profundidad (m)		Unidad	Módulo Presiométrico Ep (MPa)		Presión Límite (MPa)	Presión Fluencia (MPa)
	Inicial	Final		Ciclo 1	Ciclo 2		
SL-8.1	19,90	20,40	Tosco	122,49	687,23	9,44	5,53
SL-8.1	29,50	30,00	Tosco arenoso	182,04	1179,96	>12,130	7,15
ST-0.1.1	31,50	32,00	Tosco arenoso	159,53	351,71	11,9	7,99
ST-0.1.1	40,00	40,50	Tosco arenoso	177,54		12,7	8,21
ST-0.8	7,50	8,00	Arena tosquiza	5,35	198,62	>3,140	0,75
ST-0.8	11,60	12,10	Tosco	73,7	693,49	>7,680	5,11
ST-1.1	13,10	13,60	Arena de miga	30,61	356,57	>7,480	3,39
ST-1.1	25,50	26,00	Tosco arenoso	205,94	222,25	>10,040	6,26
ST-1.1	37,50	38,00	Arena tosquiza	223,38	587,33	>10,750	6,99
ST-1.1	50,70	51,20	Tosco arenoso	99,5	618,34	>12,600	6,37
ST-1.1	64,00	64,50	Tosco arenoso	154,44	3704,53	>16,240	7,82
ST-1.3	16,10	16,60	Arena de miga	70,12	664,57	6,46	4,16
ST-1.3	27,50	28,00	Tosco	543,98	553,85	12,13	6,99
ST-1.3	38,60	39,10	Tosco arenoso	237,89	2010,23	11,17	6,24
ST-1.3	52,00	52,50	Tosco	70,12	590,88	14,76	6,01
ST-1.3	62,50	63,00	Tosco	150,25	644,47	12,13	6,33
ST-3.2	12,50	13,00	Arena tosquiza	78,38	588,25	6,85	3,7
ST-3.2	23,50	24,00	Tosco	115,3	730,06	9,77	5,42
ST-3.2	33,50	34,00	Arena tosquiza	110,37	1046,54	10,89	6,48

Sondeo	Profundidad (m)		Unidad	Módulo Presiométrico Ep (MPa)		Presión Límite (MPa)	Presión Fluencia (MPa)
	Inicial	Final		Ciclo 1	Ciclo 2		
ST-3.2	44,80	45,30	Arena tosquiza	142,7	762,13	9,68	6,48
ST-3.2	56,00	56,50	Tosco	211,46	430	11,07	6,03
ST-3.5	12,30	12,80	Arena tosquiza	122,32	713,63	9,38	5,52
ST-3.5	23,40	23,90	Tosco	229,87	702,05	10,56	7,66
ST-3.5	35,00	35,50	Arena de miga	152,49	1006,97	10,79	6,78
ST-3.5	44,70	45,20	Tosco arenoso	145,79	1016,38	10,17	6,78
ST-3.5	55,50	56,00	Tosco arenoso	331,44		7,64	14,98
ST-4.1	7,60	8,10	Arena tosquiza	51,44	224,18	7,18	3,95
ST-4.1	17,50	18,00	Arena de miga	54,23	213,13	7,53	3,44
ST-4.1	27,50	28,00	Tosco	104,64	1049,63	>8,490	5,11
ST-4.1	38,50	39,00	Tosco arenoso	95,41	302,83		
ST-4.1	52,50	53,00	Tosco arenoso	89,54	8135,15	>15,640	7,95
ST-5.6	17,50	18,00	Tosco	163,9	183,32	6,93	4,33
ST-5.6	24,70	25,30	Tosco arenoso	272,9	361,56	10,18	5,71
ST-6.1	11,40	11,90	Tosco	195,14	1159,38	10,81	6,35
ST-6.1	22,30	22,80	Arena tosquiza	339,37	396,62	>11,390	5,98
ST-6.1	33,00	33,50	Tosco arenoso	145,4	1219,94	>13,650	7
ST-6.1	45,50	46,00	Tosco arenoso	158,6	1241,35	10,62	5,98
ST-6.1	55,50	56,00	Tosco	300,34		>9,6	>9,6
ST-7.1	8,50	9,00	Tosco	46,7	461,36	5,63	3,34
ST-7.1	17,50	18,00	Tosco arenoso	95,15	1914,33	11,1	6,57
ST-7.1	26,50	27,00	Tosco	101,12	805,39	8,42	5,39
ST-7.1	35,50	36,00	Arena tosquiza	148,4			
ST-7.1	46,50	47,00	Arena tosquiza	164,74	752,55	10,52	7,5
ST-8.1	13,50	14,00	Tosco	81,47	581,31	10,66	6,6
ST-8.1	25,50	26,00	Arena tosquiza	113,72	354,1	9,96	6,08
ST-8.1	38,50	39,00	Tosco arenoso	346,9	969,85	>12,000	6,64
ST-8.1	51,50	52,00	Tosco	215,39	595,97	15,36	8,38
ST-8.1	64,50	65,00	Tosco	155,66	663,82	11,75	8,41
ST-AV-01	11,80	12,30	Arena de miga	39,8	396,18	5,73	3,73
ST-AV-01	26,50	27,00	Tosco	176,25	669,19	10,26	4,59
ST-C-1	26,60	27,10	Tosco arenoso	58,62	355,93		
ST-C-1	33,50	34,00	Arena de miga	58,07	443,79	10,92	5,49
ST-R-1	14,70	15,30	Arena tosquiza	55,8	701,97	9,41	4,66
ST-R-1	25,50	26,00	Tosco	225,3	427,1	12,63	5,75
ST-R-1.2	18,50	19,00	Arena de miga	52,37	544,07	9,37	4,75
ST-R-1.2	27,50	28,00	Arena tosquiza	310,59	619,17	>14,920	6,09
ST-T-1	15,50	16,00		76,46	286,51	>7,830	4,64
ST-T-1	24,40	24,90		173,38	202,38	>12,740	8,01
ST-5.2	14,60	15,10		68,28	295,32	>7,060	4,7
ST-5.2	23,70	24,20		40,19	325,94	>3,720	2,1
ST-5.2	32,70	33,20		329,85	667,83	>10,900	7,41
ST-5.2	45,20	45,70		204,22	1125,75	>13,080	8,64
ST-5.2	56,90	57,40		122,16		> 8,99	> 8,99

En el Apéndice 3 se incluyen los certificados de los ensayos realizados. Los sondeos sin unidades asignadas están pendientes de ensayos de laboratorio.

9.2.4. Ensayos Lefranc

Durante la ejecución de los sondeos mecánicos, se han ejecutado ensayos Lefranc con el fin de estimar la permeabilidad de las unidades perforadas. El tipo de ensayo realizado es el de carga variable, midiendo los descensos de la columna de agua en un intervalo de tiempo determinado.

En la Tabla 5 se resumen los ensayos ejecutados y en el Apéndice 4 se incluyen los certificados.

9.3. INVESTIGACIÓN GEOFÍSICA

Como complemento de la campaña geotécnica ejecutada, se ha previsto la exploración geofísica de la zona de estudio, utilizando diversas técnicas, que se indican seguidamente. El objeto fundamental de estos reconocimientos es la localización de formaciones superficiales, bien naturales como aluviales, glacia, o bien antrópicas como rellenos o vertidos.

En el Apéndice 7 se incluyen registros actualmente disponibles de los ensayos realizados.

9.3.1. Sísmica pasiva y MASW

Se han realizado perfiles de sísmica pasiva ReMi para determinar la distribución espacial de velocidades sísmicas de ondas de corte Vs a lo largo de zonas de interés, fundamentalmente aquellas en las que se prevé la presencia de formaciones superficiales, aluviales, glacia, o rellenos antrópicos.

En emplazamientos con limitaciones para el desarrollo horizontal del perfil, como los adyacentes a infraestructuras, se han realizado ensayos MASW (análisis multicanal de ondas superficiales), que determinan la distribución en profundidad de las velocidades sísmicas de ondas de corte Vs referidas a la vertical del punto de implantación.

En la siguiente tabla se resumen los ensayos previstos.

Tabla 13. Ensayos de sísmica pasiva y MASW

Codigo	Tipo	X	Y	Z	Ejecutado	Registro
MASW-1	MASW				Sustituido por PSP-03	
MASW-2	MASW	446811	4480453	690,8	Sí	Sí
MASW-3	MASW	446862	4480422	691,1	Sí	Sí
MASW-4	MASW	446914	4480393	691,8	Sí	Sí
MASW-5	MASW	446801	4480538	694,0	Sí	Sí
MASW-6	MASW	446905	4480493	696,2	Sí	Sí
MASW-7	MASW	447043	4480495	685,8	Sí	Sí
MASW-8	MASW	448971	4481905	641,1	Sí	Sí
MASW-9	MASW	449004	4481900	642,1	Sí	Sí
MASW-10	MASW	449025	4483026	641,4	Sí	Sí
MASW-11	MASW	449079	4481872	638	Sí	Sí
MASW-12	MASW	449110	4481866	635	Sí	Sí

Codigo	Tipo	X	Y	Z	Ejecutado	Registro
PSP-14	SÍSMICA PASIVA	445337 445472	4480085 4480131	693 687	Sí	Sí
PSP-1	SÍSMICA PASIVA	446098 446341	4479968 4479939	680 678	Sí	Sí
PSP-2	SÍSMICA PASIVA	446733 446751	4480204 4480236	671 672	Sí	Sí
PSP-3	SÍSMICA PASIVA	446772 446807	4480274 4480334	672 678	Sí	Sí
PSP-4	SÍSMICA PASIVA	447349 447563	4480510 4480632	691 676	Sí	Sí
PSP-5	SÍSMICA PASIVA	447002 446983	4481098 4480685	688 696	Sí	Sí
PSP-6	SÍSMICA PASIVA	447004 447114	4481120 4481324	688 680	Sí	Sí
PSP-7	SÍSMICA PASIVA	447749 447843	4481616 4481745	658 653	Sí	Sí
PSP-8	SÍSMICA PASIVA	448820 448918	4481881 4481876	643 633	Sí	Sí
PSP-9	SÍSMICA PASIVA	449263 449378	4482927 4482848	626 623	Sí	Sí
PSP-10	SÍSMICA PASIVA	448854 449037	4482884 4482957	642 636	Sí	Sí
PSP-11	SÍSMICA PASIVA	448160 448405	4482896 4482870	638 634	Sí	Sí
PSP-12	SÍSMICA PASIVA	447586 447763	4482942 4482942	668 660	Sí	Sí

9.3.2. Tomografía eléctrica

En zonas donde pueden encontrarse depósitos superficiales posiblemente saturados o bien en perfiles en los que el desnivel es importante y no permite la ejecución de sísmica pasiva ReMi, se ha optado por la ejecución de perfiles de tomografía eléctrica para determinar la distribución de las resistividad aparente del terreno a lo largo del perfil y en profundidad.

En la siguiente tabla se resumen los ensayos previstos. El perfil TE-6 ha sido sustituido por el PSP-9.

Tabla 14. Ensayos de tomografía eléctrica

Codigo	Tipo	X	Y	Z	Ejecutado	Registro
TE-1+2	TOMOG. ELÉC.	445624 445831	4480128 4480124	685 682	Sí	Sí
TE-3.1	TOMOG. ELÉC.				Pendiente	
TE-3.2	TOMOG. ELÉC.	445711 445912	4479995 4479991	686 682	Sí	Sí
TE-4	TOMOG. ELÉC.	448892 448764	4481609 4481879	633 644	Sí	SI
TE-5	TOMOG. ELÉC.	448897 448922	4481615 4481856	633 633	Sí	SI
TE-6	TOMOG. ELÉC.				Sustituido por PSP-09	

Codigo	Tipo	X	Y	Z	Ejecutado	Registro
TE-7	TOMOG. ELÉC.	447146	4482368	655	Sí	SI
		447293	4482341	672		
TE-8	TOMOG. ELÉC.	446940	4482496	686	Sí	SI
		447089	4482396	655		

9.4. ENSAYOS DE LABORATORIO

A fin de completar la caracterización de cada una de las unidades comprometidas en los trazados propuestos, se han seleccionado muestras obtenidas en las perforaciones para la realización de ensayos de laboratorio

La siguiente tabla se resumen el número de ensayos ejecutados.

Tabla 15: Resumen ensayos de laboratorio en suelos

ENSAYOS DE LABORATORIO	SOLICITADOS	RECIBIDOS
ENSAYOS DE IDENTIFICACION		
Granulometría por tamizado	178	158
Límites de Atterberg	178	158
Materia orgánica	20	19
Sulfatos	48	43
Carbonatos	41	38
Acidez Baumann-Guly	23	18
Difracción rayos X	20	18
ENSAYOS DE ESTADO ENSAYOS DE ESTADO		
Densidad seca	38	35
Humedad	38	35
Peso Específico	1	1
RESISTENCIA		
Compresión simple	47	42
Triaxial U.U.	14	12
Triaxial C.U. con medida de pres. intersticiales	15	13
Triaxial C.D.	2	2
Corte directo sin drenaje	14	13
Corte directo con drenaje	7	6
DEFORMABILIDAD EXPANSIVIDAD Y CONSOLIDACIÓN		
Ensayo edométrico	4	4
Expansividad Lambe	24	21
Presión de hinchamiento	21	18
Hinchamiento libre	19	17
OTROS		
Análisis contaminación medioambiental	2	2

En el Apéndice 5 se incluye los cuadros resumen con los resultados de los ensayos y en el Apéndice 6 los certificados de estos.

Adicionalmente, se ha extraído muestras de agua en los sondeos con el fin de determinar el grado de agresividad, según el Código Estructural (RD 470/2021), al que se encontrarán sometidos los elementos estructurales de la obra proyectada. En la Tabla 6 se resumen los ensayos ejecutados. En el Apéndice 6 se incluyen también los certificados de los ensayos de aguas realizados.

10. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LAS UNIDADES DIFERENCIADAS

10.1. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE ENSAYOS

La metodología estadística aplicada a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y ensayos *in situ*, para cada litotipo considerado, se basa en la comparación de variables estadísticas para el conjunto de los datos, evaluando la dispersión de estos. Para ello, se han obtenido y analizado los valores numéricos de medidas de centralización (media y mediana) y los de las medidas de dispersión (desviación típica y coeficiente de variación).

Para describir la población de ensayos, la media y la mediana tienen propiedades estadísticas diferentes:

- La media utiliza todos los datos y es, por tanto, el valor que mejor describe el comportamiento general de la población, siempre que dicha población de datos tenga una distribución homogénea. Tiene el inconveniente de que es muy sensible a valores anómalos, y un error de datos o un valor anormal puede modificarla totalmente.
- La mediana utiliza menos información que la media, ya que sólo tiene en cuenta el orden de los datos y no su magnitud, pero, en contrapartida, no se ve alterada si algún valor o pequeño grupo de valores son anómalos o erróneos.

En consecuencia, se considera importante calcular la media y la mediana, y efectuar con ellas el siguiente análisis: si la media y la mediana presentan valores similares, significará que la población de datos es muy homogénea, asignándose a tal población como valor representativo el valor de la media; si la media y la mediana difieren, presentando valores numéricos muy diferentes, significará que la población de resultados de laboratorio es asimétrica, lo cual pueden resultar dos causas: o bien hay ensayos anómalos o bien hay una dispersión de datos debida a diferentes causas, como puede ser la propia naturaleza de la variable analizada o la mezcla de diferentes poblaciones, pudiendo realizarse un análisis, y en su caso separación, de los datos anómalos.

Por otra parte, las medidas de dispersión también reflejan la homogeneidad de los datos. La desviación típica refleja el promedio de la desviación de los resultados de los ensayos respecto de la media aritmética; si presenta un valor próximo a cero indica que la media aritmética es

representativa de la propiedad del litotipo. Valores altos indican alta dispersión en los valores. El coeficiente de variación expresa esta dispersión como porcentaje de la propia media.

Para cada una de las unidades geotécnicas consideradas se ha realizado este análisis estadístico. En el caso de haber observado que los parámetros estadísticos, media y mediana no hayan sido casi coincidentes, y la desviación típica y el coeficiente de variación presentaran valores elevados, se realiza un análisis de los datos para estudiar el motivo de distorsión de los valores de estos parámetros estadísticos, obteniendo las conclusiones oportunas.

10.2. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS INDICADOS EN LA BIBLIOGRAFÍA

En el apartado 3, GEOLOGÍA, se han descrito los materiales presentes a lo largo del trazado de la zona de estudio, habiéndose clasificado según la terminología tradicional de los suelos de Madrid. Para la caracterización geotécnica, se toma como referencia la recopilación de información llevada a cabo por Rodríguez Ortiz (2000, 2006) en la publicación “Propiedades geotécnicas de los suelos de Madrid”. En este documento se definen los valores característicos de los suelos predominantes en el área de Madrid a partir de una base de datos alimentada en las últimas décadas por resultados de informes geotécnicos de empresas especializadas y de sondeos realizados para las ampliaciones de Metro.

La clasificación geotécnica del sustrato de Madrid y alrededores es granulométrica y se basa en su contenido en finos, tal como se muestra en la Tabla 1.

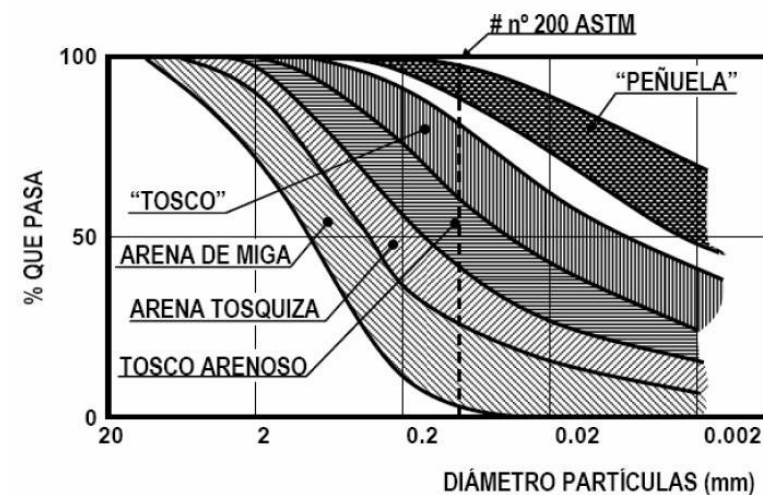


Figura 22. Usos granulométricos de los litotipos de la facies Madrid (Oteo, 1995).

Además, las características plásticas de estos materiales se resumen en la siguiente figura.

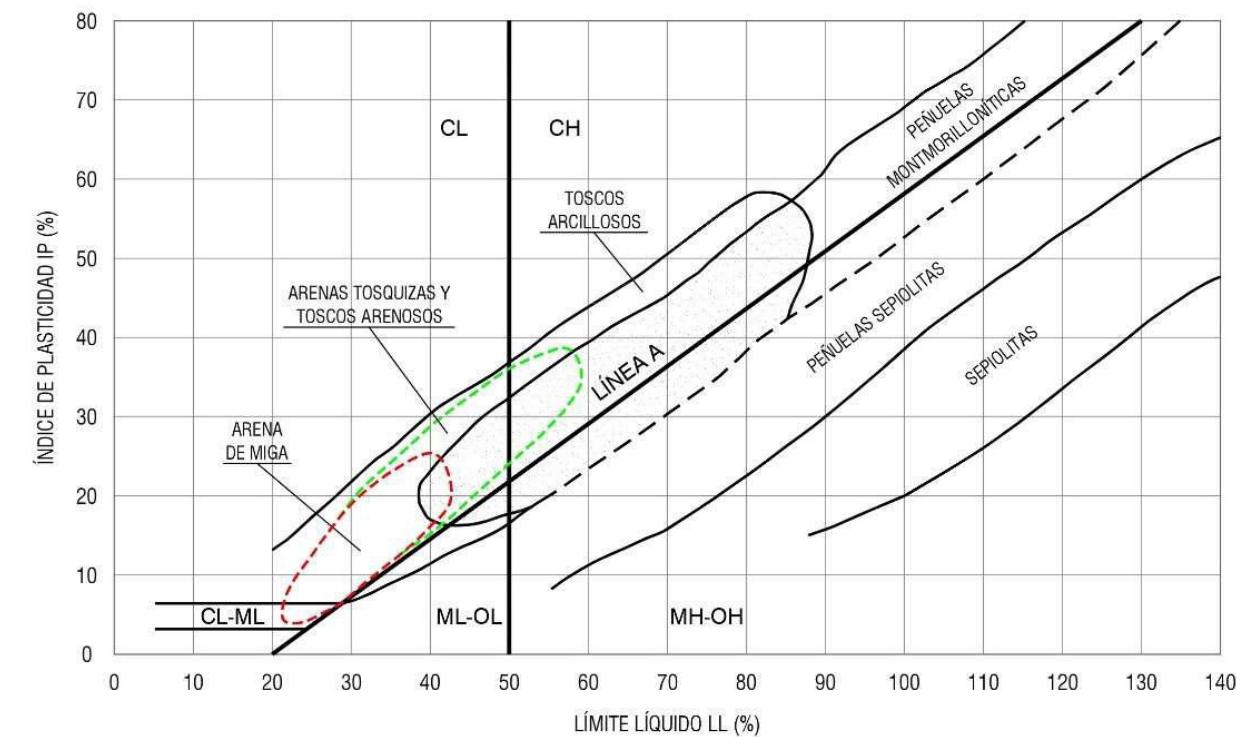


Figura 23. Plasticidad de los litotipos de la facies Madrid (Oteo, 1995).

Como referencia para la caracterización de las unidades geotécnicas diferenciadas en la zona de estudio, se muestran en la siguiente tabla los rangos de variación de los principales parámetros geotécnicos, recogidos en la bibliografía.

MATERIALES	CONTENIDO DE FINOS %	LÍM. LÍQUIDO	ÍNDICE PLÁSTIC.	DENSIDAD SECA (Kg/m³)	HUMEDAD NATURAL (%)	RESIST. A COMPR. SIMPLE (MPa)	COHESIÓN EFECTIVA (KPa)	ROZ. INTERNO EFECTIVO (°)	MÓDULO DE DEFORM. EN EXTENSIÓN (MPa)	MÓDULO DE DEFORM. EN CARGA (MPa)
Arena de Miga	< 25	N.P. -30	N.P. -14	1800-1950	7-14	0-0,3	10-30	33-38	50-120	55-180
Arena Tosquiza	25-40	28-38	8-18	1800-1930	9-14	0,2-0,4	10-50	33-37	75-150	80-250
Tosco arenoso	40-60	30-50	10-20	1750-1880	11-16	0,3-1,0	40-100	31-35	110-180	151-350
Tosco	60-85	36-54	13-30	1700-1850	14-25	0,5-2,0	80-150	28-34	150-225	250-550
Rellenos antrópicos	10-65	N.P. -50	N.P. -20	1200-1600	5-20	0-0,05	0-5	25-28	5-8	4-6
Aluviales	20-45	20-50	10-20	1300-1650	15-35	0-0,07	30-70	27-30	7-10	6-8
Peñuelas algo alteradas	80-95	50-90	20-40	1400-1550	25-30	0,5-1,5	60-150	26-30	100-150	150-250
Peñuelas sanas	80-95	50-90	20-40	1500-1650	22-25	0,7-2,5	> 150	28-32	200-250	250-350

* Valores obtenidos en ensayos de laboratorio

Figura 24. Características geotécnicas de los materiales de Madrid (Oteo; R. Ortiz y Mendaña, 2003).

Finalmente, los parámetros recomendados para la ampliación del Metro de Madrid (Oteo; R. Ortiz y Mendaña, 2003), se recogen en la siguiente tabla, extrayendo solo los materiales presentes en la zona de estudio.

Tabla 16: Parámetros geotécnicos para los proyectos de ampliación del Metro de Madrid (1999-2003)

TIPO DE SUELO	PESO ESPECÍFICO APARENTE (t/m ³)	COHESIÓN c' (t/m ³)	ANGULO ROZAM. INTERNO (°)	MÓDULO DE DEFORMACIÓN (Subsid.) E (t/m ²)	COEFICIENTE DE POISSON	COEFICIENTE DE BALASTO K (t/m ³)
Rellenos antrópicos	1,80	0,0	28	800-1000	0,35	2000
Rellenos compactados	2,10	1,0	33	3500-4500	0,28	8000-10000
Aluviales	2,00	0,0	32	1000-1500	0,32	5000
Arenas de miga	2,00	0,5-1,0	35	5500-7500	0,30	15000-20000
Arenas tosquizas	2.05	1,0-1,5	33	8000-10000	0,30	15000-20000
Toscas arenosas	2.08	2,0-2,5	32,5	13000	0,30	25000-35000
Toscas	2,10	3,0-4,0	30	15000-18000	0,30	30000-40000

NOTA: Cuando aparecen dos valores, el superior es para niveles profundos (>10 m) o más consolidados o cementados.

10.3. RELLENOS SUPERFICIALES

La unidad geotécnica rellenos superficiales engloba principalmente la capa superior de suelos que han sido removilizados, excavados y vertidos, en el área de estudio, con motivo de las obras de construcción del entramado urbano.

Los materiales que se han incorporado a este nivel proceden fundamentalmente del sustrato meteorizado y de depósitos de arroyada o aluviales removilizados.

La clasificación del material es semejante a la de los terrenos subyacentes, fundamentalmente arenas de migas y arenas tosquizas en la mayor parte del área de estudio, por lo que predominan las arenas arcillo-limosas SM.

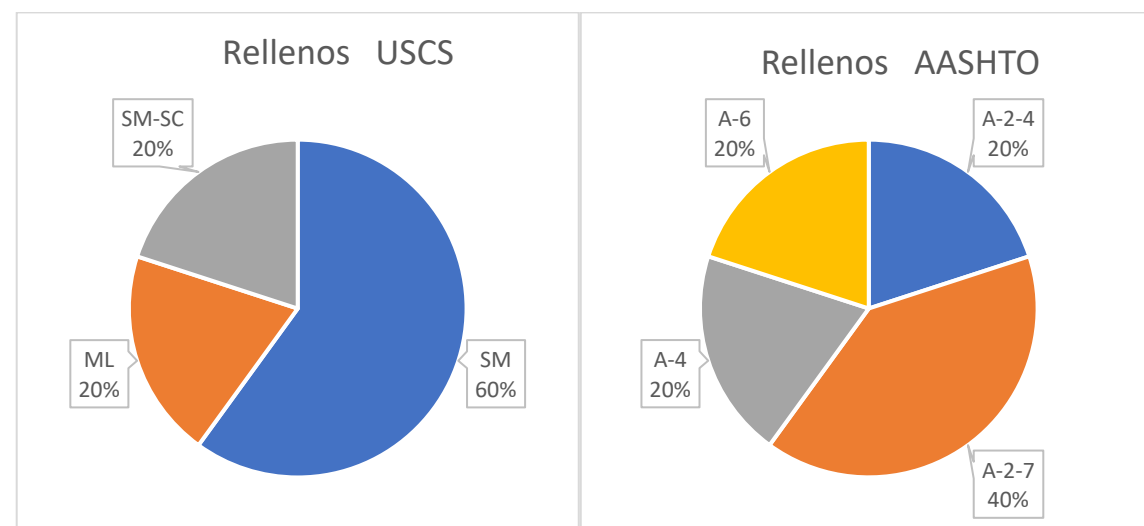


Figura 25. Unidad Rellenos: clasificación USCS y AASHTO.

Su granulometría y plasticidad se muestran en las siguientes figuras.

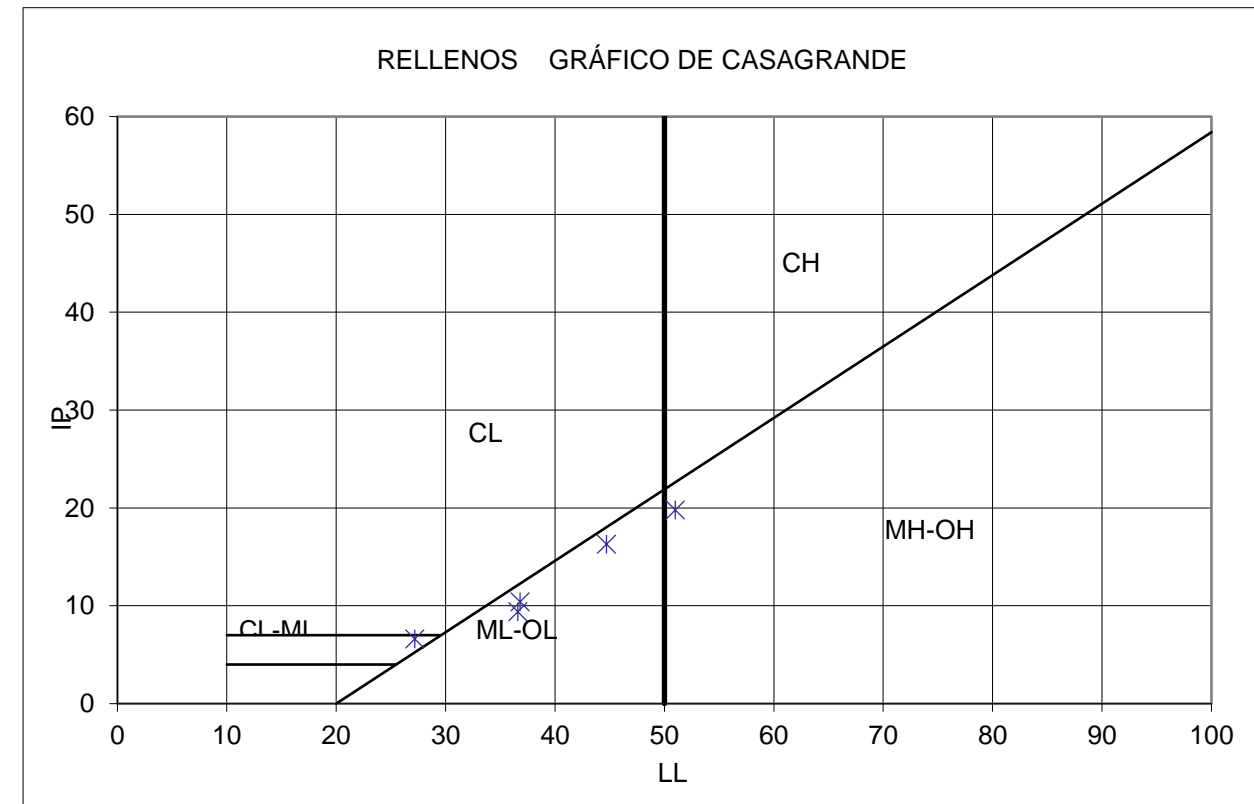
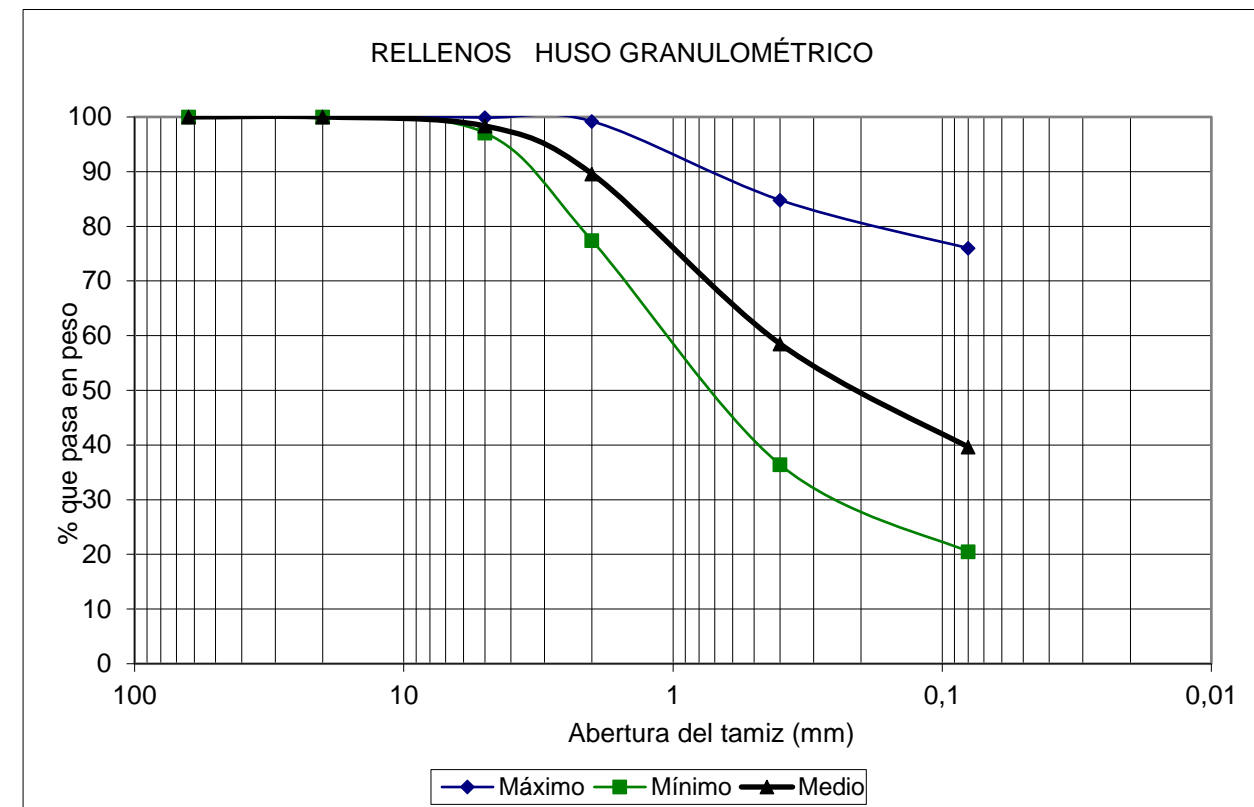


Figura 26. Unidad Rellenos: granulometría y carta de plasticidad.

Respecto a su compacidad, presentan golpes Nspt en general inferiores a 20, aunque excepcionalmente pueden ser superiores.

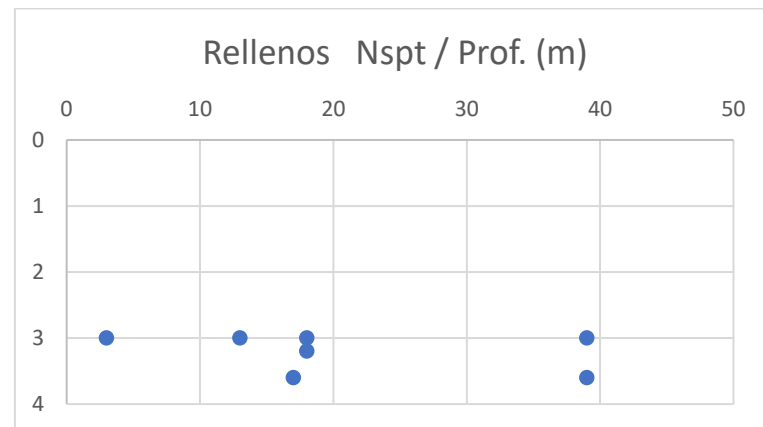


Figura 27. Unidad Rellenos: golpeo SPT en relación a la profundidad.

Su potencial expansivo se ha evaluado mediante la relación entre el límite líquido y el límite plástico (Reese y O'Neill, 1988), como muestra el gráfico siguiente. Puede observarse como su potencial expansivo es bajo y ocasionalmente medio, similar al de las unidades del sustrato, como veremos más adelante, lo que resulta lógico al tratarse del mismo material removilizado, fundamentalmente.

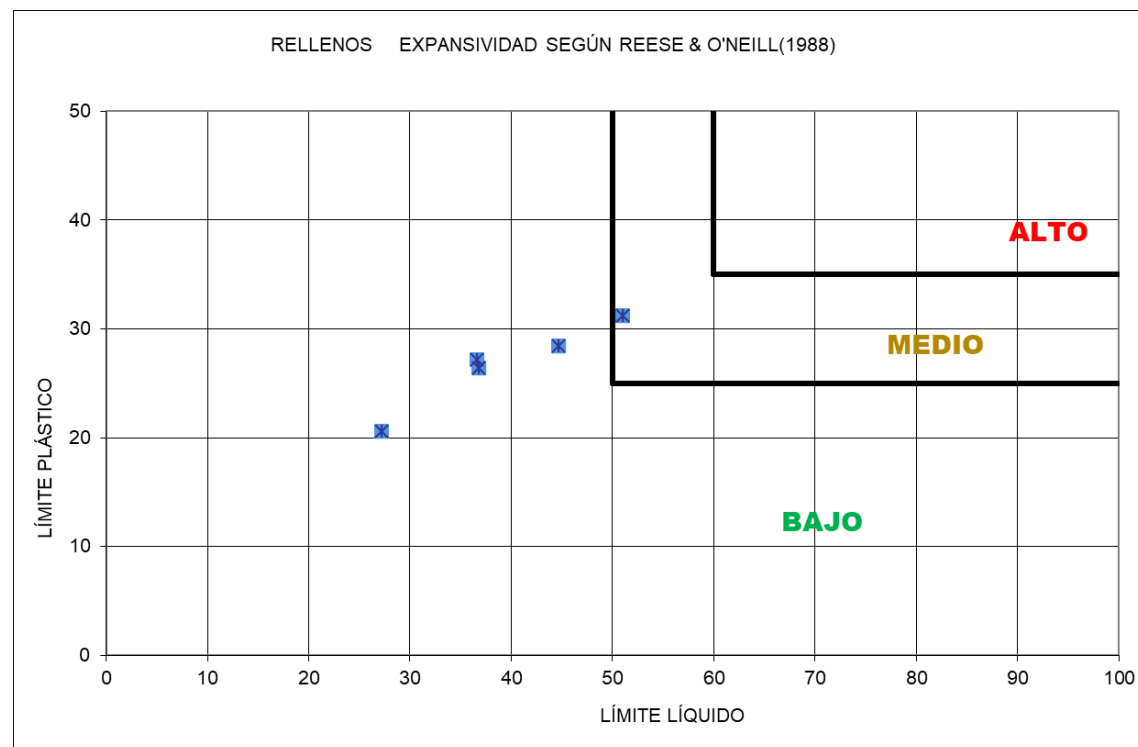


Figura 28. Unidad Rellenos: potencial expansivo (Reese y O'Neill, 1988).

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 17: Rellenos: resumen de ensayos de laboratorio

UNIDAD: RELLENOS								
Ensayos		Nº Ensay.	Promedio	Mediana	Desv. Estan.	Coef. Variac.	Máximo	Mínimo
Resist. penet	N SPT (MI/2)	7	21,00	18,00	13,35	63,59	39,00	3,00
Estado	Humedad, en %	1	12,42	12,42				
	Densidad seca (g/cm³)	1	1,81	1,81				
	Densidad natural (g/cm³)	1	2,03	2,03				
	Peso específico (g/cm³)	1	2,47	2,47				
Granulometría (% que pasa)	Ø 63 mm	5	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	Ø 20 mm	5	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	Ø 5 mm	5	98,36	98,10	1,03	1,05	99,90	97,10
	Ø 2 mm	5	89,60	90,80	8,69	9,69	99,20	77,40
	Ø 0,40 mm	5	58,50	57,60	20,28	34,67	84,80	36,40
	Ø 0,08 mm	5	39,62	30,60	21,54	54,37	76,00	20,50
Límites de Atterberg	Límite Líquido	5	39,26	36,80	9,03	22,99	51,00	27,20
	Límite Plástico	5	26,76	27,20	3,89	14,55	31,20	20,60
	Índice de Plasticidad	5	12,50	10,40	5,40	43,19	19,80	6,60
Clasificación	USCS	5		SM			SW-SM	SC
	AASHTO	5		A-1-b A-2-4			A-1-b	A-2-6
Edómetro	Índice poros inicial	1	0,55	0,55				
Ensayos Químicos	Sulfatos SO42- (mg/kg)	2	200,00	200,00	70,71	35,36	250,00	150,00
	Acidez Baumann-Guly	1	38,00	38,00				
	Carbonatos (%)	2	2,79	2,79	1,30	46,63	3,71	1,87
	Materia orgánica (%)	4	0,48	0,33	0,41	85,31	1,09	0,19
Difracción de rayos X		0						

La tabla general de ensayos de la unidad rellenos se encuentra en el Apéndice 5.

Los parámetros obtenidos se encuentran en el rango de los indicados en la bibliografía.

Los ensayos químicos ya fueron comentados en el apartado 8.5, Agresividad.

10.4. ALUVIAL

En esta unidad se han incluido tanto los depósitos de los arroyos que atraviesan la zona de estudio como las terrazas registradas en sondeos.

La clasificación del material es propia de un material procedente del lavado de los depósitos arenosos miocenos, por lo que únicamente se encuentran arenas SM.

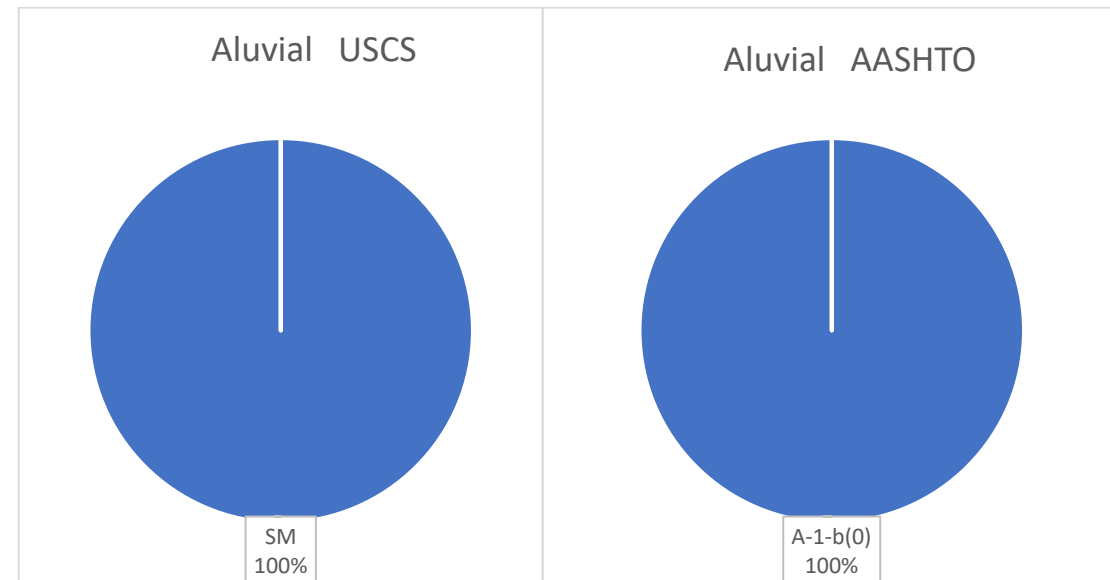


Figura 29. Unidad Aluvial: clasificación USCS y AASHTO.

Su granulometría y plasticidad se muestran en la Figura 31.

Respecto a su compacidad, presentan golpes Nspt en general inferiores a 20, aunque excepcionalmente pueden ser superiores.

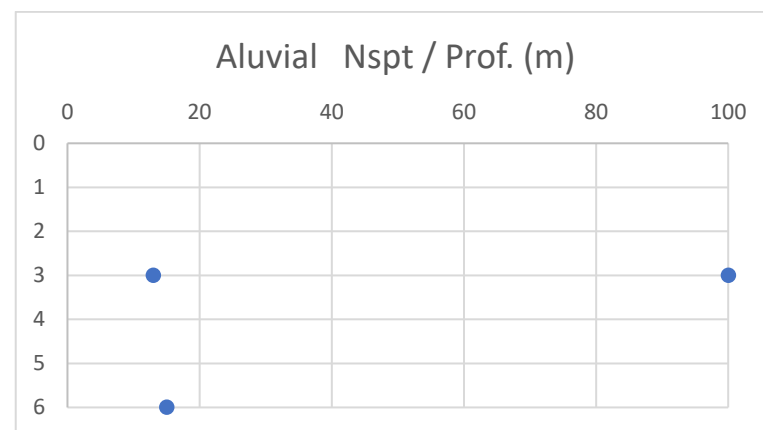


Figura 30. Unidad Aluvial: golpeo SPT en relación a la profundidad.

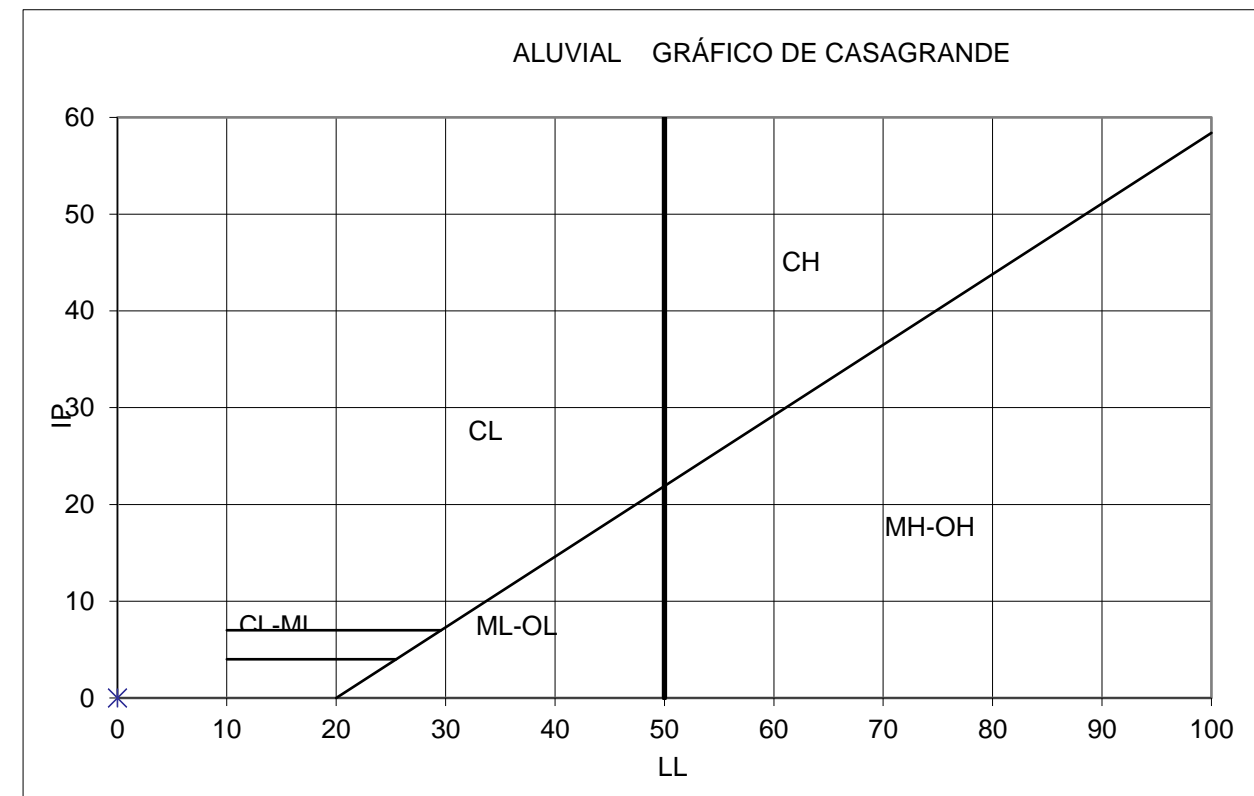
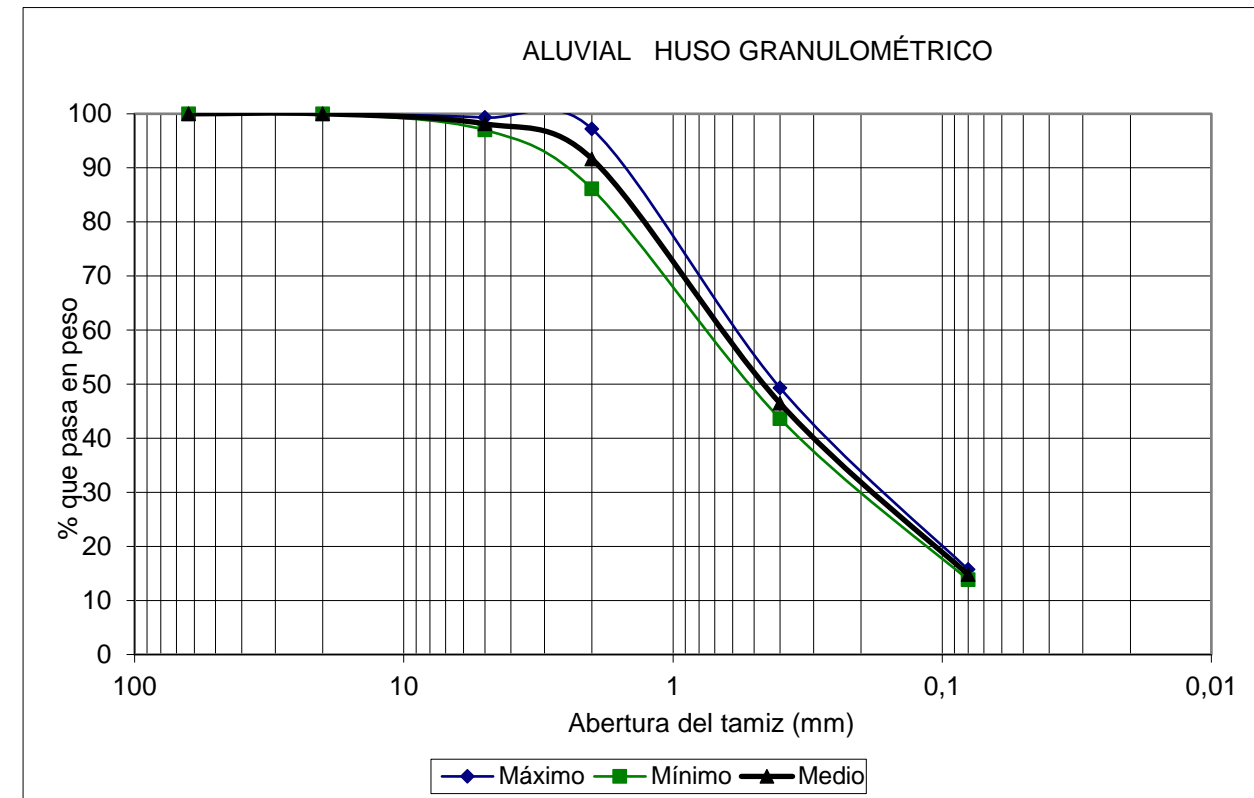


Figura 31. Unidad Aluvial: granulometría y carta de plasticidad.

Dada la naturaleza no plástica de la unidad, su potencial expansivo es nulo.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 18: Aluvial: resumen de ensayos de laboratorio

UNIDAD: ALUVIAL								
Ensayos		Nº Ensay.	Promedio	Mediana	Desv. Estan.	Coef. Variac.	Máximo	Mínimo
Resist. penet.	N SPT (MI/2)	3	42,67	15,00	49,66	116,40	100,00	13,00
Granulometría (% que pasa)	Ø 63 mm	2	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	Ø 20 mm	2	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	Ø 5 mm	2	98,15	98,15	1,63	1,66	99,30	97,00
	Ø 2 mm	2	91,65	91,65	7,85	8,56	97,20	86,10
	Ø 0,40 mm	2	46,45	46,45	4,03	8,68	49,30	43,60
	Ø 0,08 mm	2	14,75	14,75	1,34	9,11	15,70	13,80
Límites de Atterberg	Límite Líquido	2		N.P.			N.P.	N.P.
	Límite Plástico	2		N.P.			N.P.	N.P.
	Índice de Plasticidad	2		N.P.			N.P.	N.P.
Clasificación	USCS	2		SM			SM	SM
	AASHTO	2		A-1-b (0)			A-1-b (0)	A-1-b (0)
Ensayos Químicos	Sulfatos SO42- (mg/kg)	2	112,50	112,50	88,39	78,57	175,00	50,00
	Acidez Baumann-Guly	1	65,00	65,00				
	Carbonatos (%)	0						
	Materia orgánica (%)	3	0,98	0,96	0,33	33,72	1,32	0,66
Difracción de rayos X		0						

limoarcillosas SM y SP, con proporciones menores de arenas más limpias. Un 42% de las muestras ensayadas son no plásticas, estando en el resto el límite líquido en torno al 31% y el índice de plasticidad en torno al 9%.

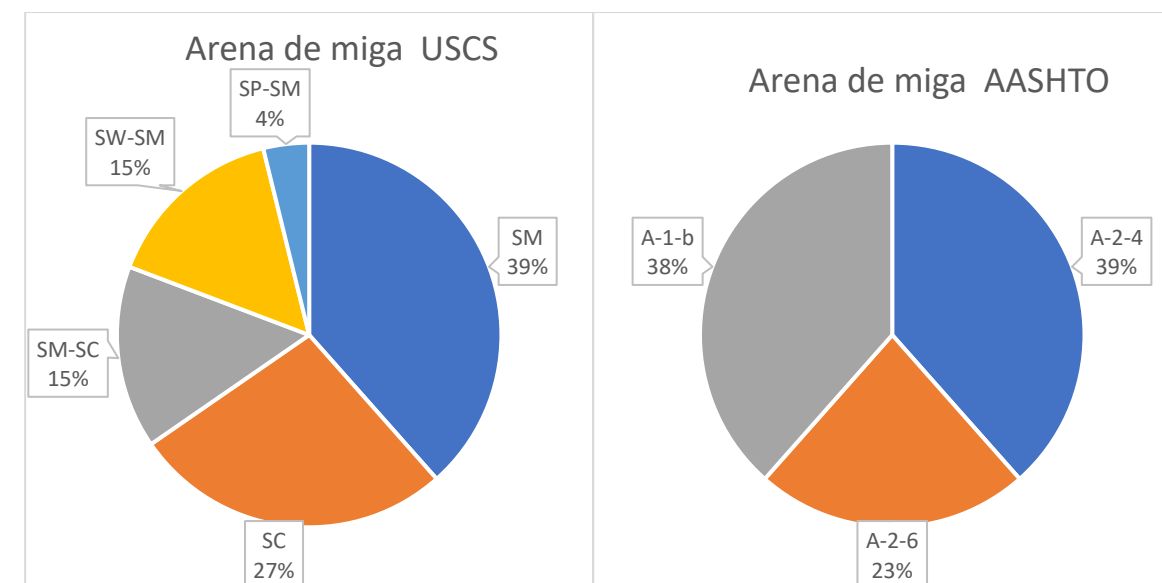


Figura 32. Unidad Arena de miga: clasificación USCS y AASHTO.

Su granulometría y plasticidad se muestran en las siguientes figuras.

La tabla general de ensayos de la unidad aluvial se encuentra en el Apéndice 5.

Los parámetros obtenidos corresponden a materiales más granulares, respecto a lo indicado en la bibliografía, con un contenido en finos menor y ausencia de plasticidad, encajando mejor en los parámetros citados para rellenos.

Los ensayos químicos ya fueron comentados en el apartado 8.5, Agresividad.

10.5. ARENA DE MIGA

Esta unidad se presenta como un conjunto fundamentalmente arenoso con plasticidad baja y compacidad alta, exceptuando los horizontes más superficiales que suelen encontrarse afectados por meteorización y decompresión.

Las arenas de miga presentan cohesión por cementación diagenética, derivada de los feldespatos, con formación de cemento arcilloso. Por otra parte, estas arenas desarrollan una cohesión capilar apreciable (10-20 kN/m²) en estado no saturado. No obstante, esta cohesión puede perderse fácilmente por soleamiento prolongado o por lluvias o saturación accidental.

Geotécnicamente, se describen como unas arenas arcósicas con indicios de grava, arcilla y limo, y coloración blanquecina-amarillenta. Se clasifican fundamentalmente como arenas

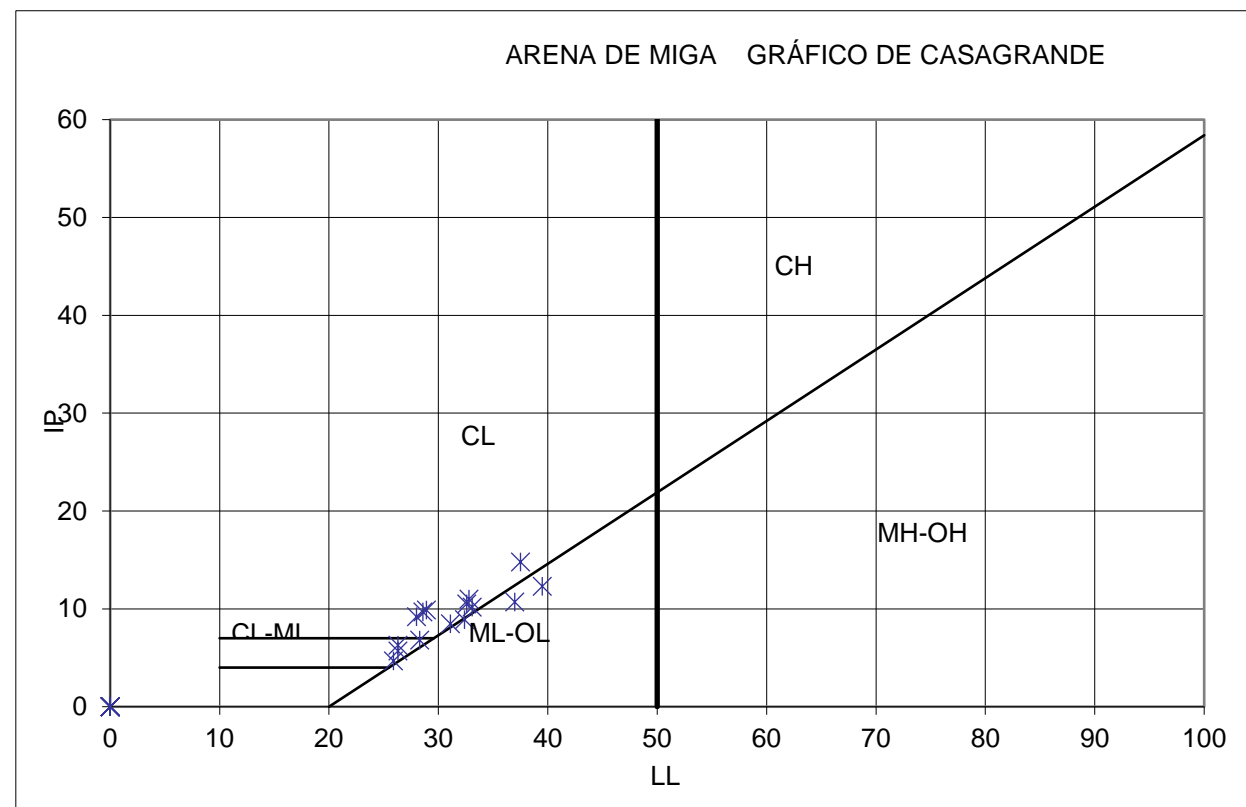
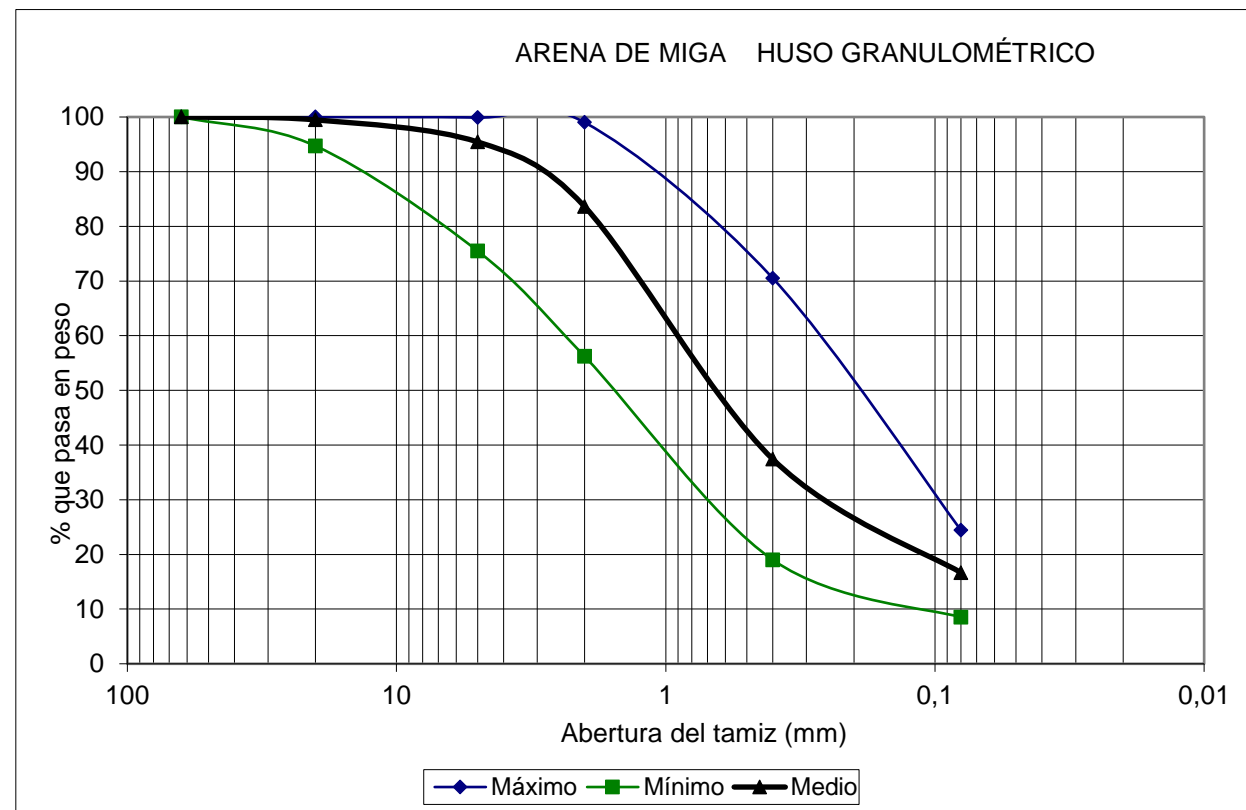


Figura 33. Unidad Arena de miga: granulometría y carta de plasticidad.

Respecto a su compacidad, presentan valores N_{spt} superiores a los 25 golpes, salvo excepciones en la zona meteorizada, con valores usualmente en torno a 60.

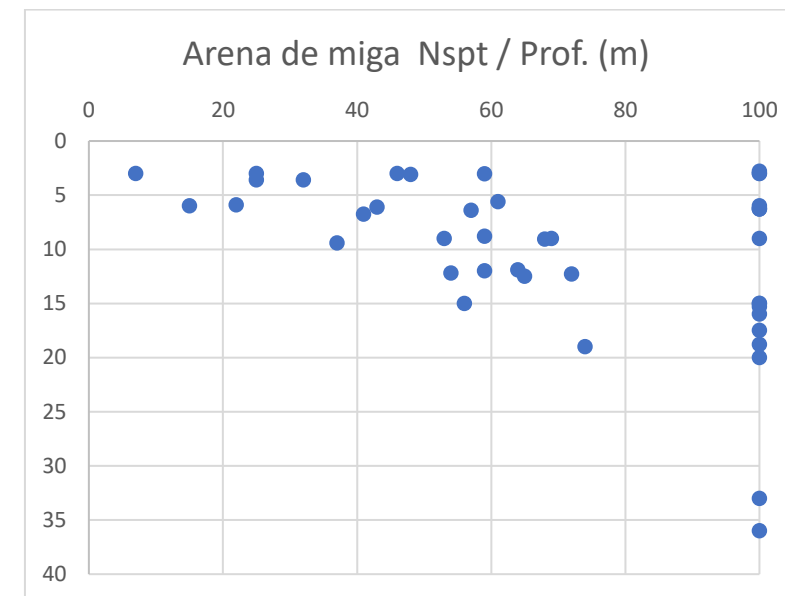


Figura 34. Unidad Arena de miga: golpeo SPT en relación a la profundidad.

Su potencial expansivo se ha evaluado mediante la relación entre el límite líquido y el límite plástico (Reese y O'Neill, 1988), como muestra el gráfico siguiente. Puede observarse como su potencial expansivo es bajo. Esto ha sido verificado en un ensayo de hinchamiento libre, con hinchamiento nulo.

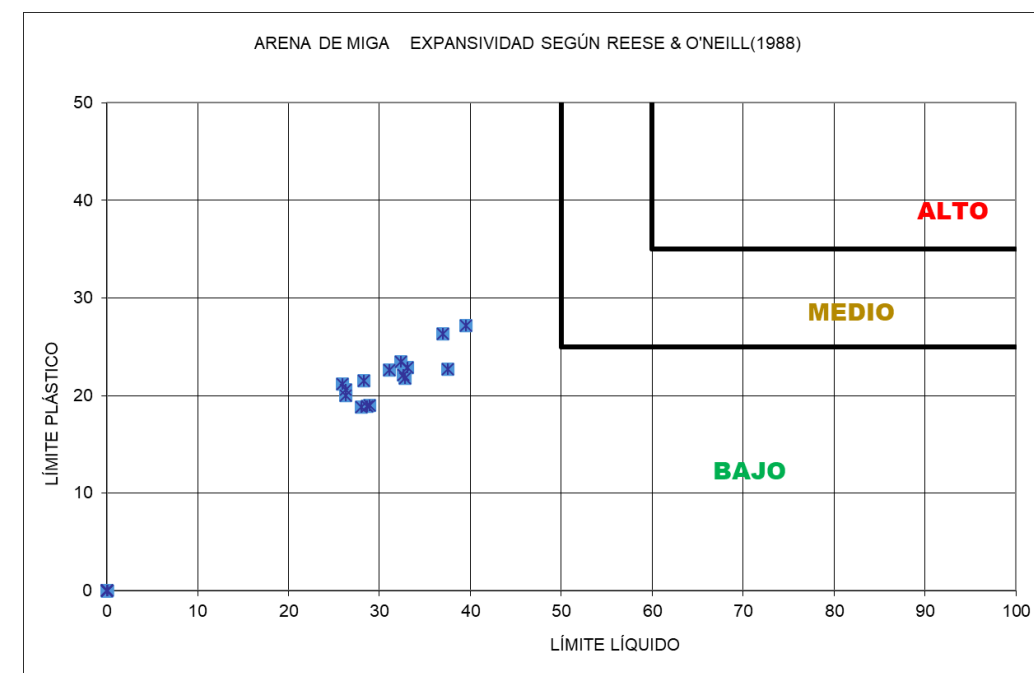


Figura 35. Unidad Arena de miga: potencial expansivo (Reese y O'Neill, 1988).

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 19: Arena de miga: resumen de ensayos de laboratorio

UNIDAD: ARENA DE MIGA								
Ensayos		Nº Ensay.	Promedio	Mediana	Desv. Estand.	Coef. Variac.	Máximo	Mínimo
Resist. penet.	N SPT (MI/2)	41	70,46	68,00	28,70	40,72	100,00	7,00
Estado	Humedad, en %	6	9,31	9,40	1,35	14,44	11,07	7,19
	Densidad seca (g/cm³)	6	1,87	1,85	0,06	3,24	1,97	1,80
	Densidad natural (g/cm³)	6	2,04	2,05	0,07	3,33	2,15	1,96
	Peso específico (g/cm³)	0						
Granulometría (% que pasa)	Ø 63 mm	26	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	Ø 20 mm	26	99,47	100,00		1,39	100,00	94,70
	Ø 5 mm	26	95,44	96,90	5,13	5,37	99,90	75,50
	Ø 2 mm	26	83,60	82,90	9,39	11,23	99,00	56,20
	Ø 0,40 mm	26	37,40	37,15	12,12	32,40	70,50	19,00
	Ø 0,08 mm	26	16,66	16,15	4,68	28,09	24,40	8,50
Límites de Atterberg	Límite Líquido	26	31,22	31,10	4,30	13,77	39,50	N.P.
	Límite Plástico	26	21,94	21,80	2,47	11,24	27,20	N.P.
	Índice de Plasticidad	26	9,28	9,70	2,63	28,37	14,80	N.P.
Clasificación	USCS	26		SM			SW-SM	SC
	AASHTO	26		A-1-b A-2-4			A-1-b	A-2-6
Compresión Simple	Tensión (kg/cm²)	1	1,50	1,50				
	Tensión (kPa)	1	147,11	147,11				
	Deformación (%)	1	3,00	3,00				
Hinchamiento	Pres. hinchamiento (kPa)	0						
	Hinchamiento libre (%)	1	-0,03	-0,03				
	Lambe. Cambio pot. vol. (%)	0						
Triaxial o Corte Directo	Totales	Ángulo rozamiento	2	38,03	38,03	11,57	30,42	46,21
		Cohesión (kPa)	2	29,42	29,42	40,22	136,71	57,86
	Efectivas	Ángulo rozamiento	0					
		Cohesión (kPa)	0					
Ensayos Químicos	Sulfatos SO42- (mg/kg)	6	154,17	112,50	152,00	98,59	400,00	0,00
	Acidez Baumann-Guly	2	34,50	34,50	0,71	2,05	35,00	34,00
	Carbonatos (%)	5	1,41	1,42	0,46	32,37	2,02	0,93
	Materia orgánica (%)	5	0,66	0,58	0,39	59,33	1,32	0,33
Difracción de rayos X		0						

Los parámetros obtenidos se encuentran en el rango de los indicados en la bibliografía, con una plasticidad algo mayor.

Los ensayos químicos ya fueron comentados en el apartado 8.5, Agresividad.

Los valores obtenidos en los ensayos presiométricos ejecutados en arena de miga se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 20: Arena de miga: resumen de ensayos presiométricos

Sondeo	Profundidad (m)		Modulo Presiométrico Ep (MPa)		Presión Límite (MPa)	Presión Fluencia (MPa)
	Inicial	Final	Ciclo 1	Ciclo 2		
ST-AV-01	11,80	12,30	39,8	396,18	5,73	3,39
ST-1.1	13,10	13,60	30,61	356,57	>7,480	4,16
ST-1.3	16,10	16,60	70,12	664,57	6,46	6,78
ST-4.1	17,50	18,00	54,23	213,13	7,53	3,44
ST-R-1.2	18,50	19,00	52,37	544,07	9,37	3,73
ST-C-1	33,50	34,00	58,07	443,79	10,92	5,49
ST-3.5	35,00	35,50	152,49	1006,97	10,79	4,75
UNIDAD ARENA DE MIGA	Ensayos		7	7	7	7
	Promedio		65,4	517,9	8,3	4,5
	Mediana		54,2	443,8	7,5	4,2
	Desv. Estandar		40,5	258,4	2,1	1,2
	Coef. Variac.		61,9	49,9	24,7	27,5
	Máximo		152,5	1007,0	10,9	6,8
	Mínimo		30,6	213,1	5,7	3,4

La variación del módulo de primer ciclo con la profundidad se muestra en el siguiente gráfico, no observándose buena correlación entre ambos.

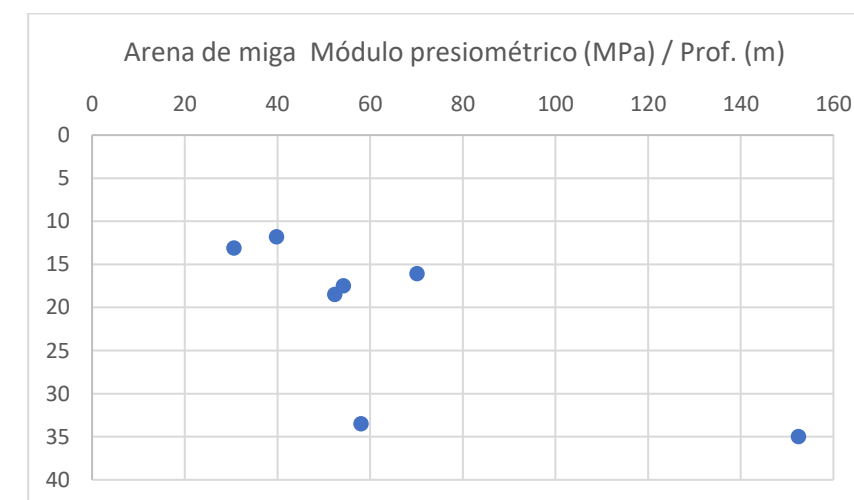


Figura 36. Unidad Arenas de miga: módulo presiométrico en relación a la profundidad.

La tabla general de ensayos de la unidad arena de miga se encuentra en el Apéndice 5.

10.6. ARENAS TOSQUIZAS

Esta unidad representa el primer escalón intermedio entre las arenas de miga y la facies tosco. Su mayor contenido en finos, respecto de la arena de miga, se traduce en una mayor cementación y compacidad.

Geotécnicamente son arenas, con un porcentaje de fracción limo-arcillosa entre el 25-40%, clasificándose como arenas bastante arcillosas a muy arcillosas. El contenido en gravas disminuye claramente frente a las arenas de miga. Se clasifican fundamentalmente como arenas arcillosas SC, con proporciones menores de arenas limosas SM. Es un suelo de plasticidad baja, con un 8% de las muestras ensayadas no plásticas, estando en el resto el límite líquido en torno al 33% y el índice de plasticidad en el resto en torno al 11%.

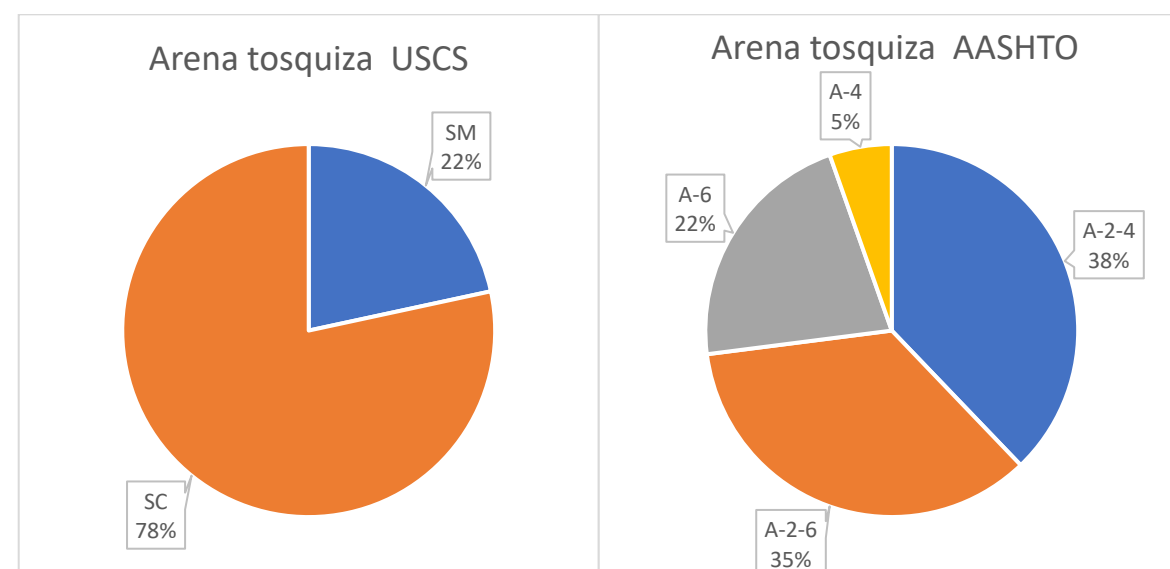


Figura 37. Unidad Arena tosquiza: clasificación USCS y AASHTO.

Su granulometría y plasticidad se muestran en la Figura 38.

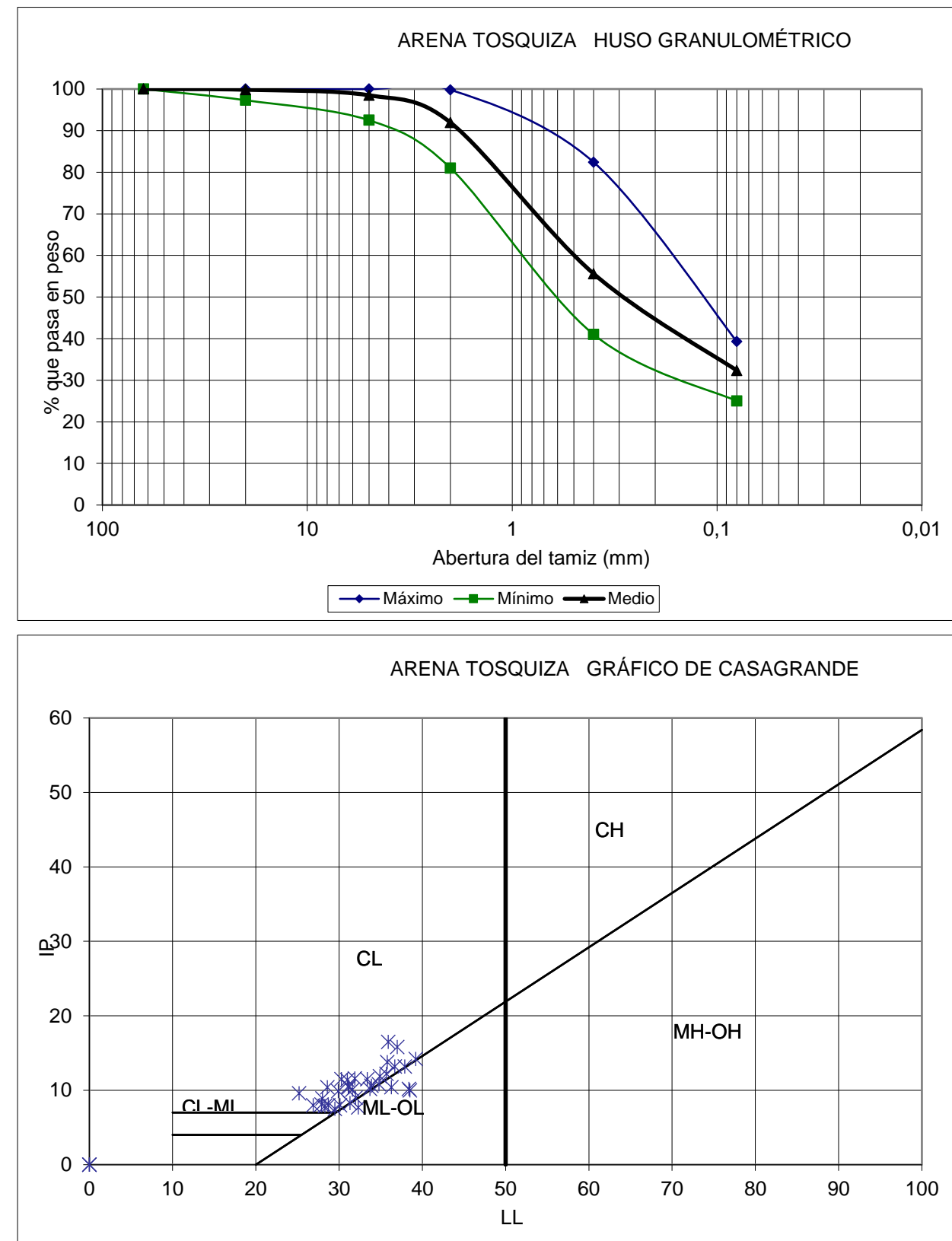


Figura 38. Unidad Arena tosquiza: granulometría y carta de plasticidad.

Respecto a su compacidad, presentan valores N_{spt} superiores a los 18 golpes, salvo excepciones en la zona meteorizada, con valores usualmente en torno a 60.

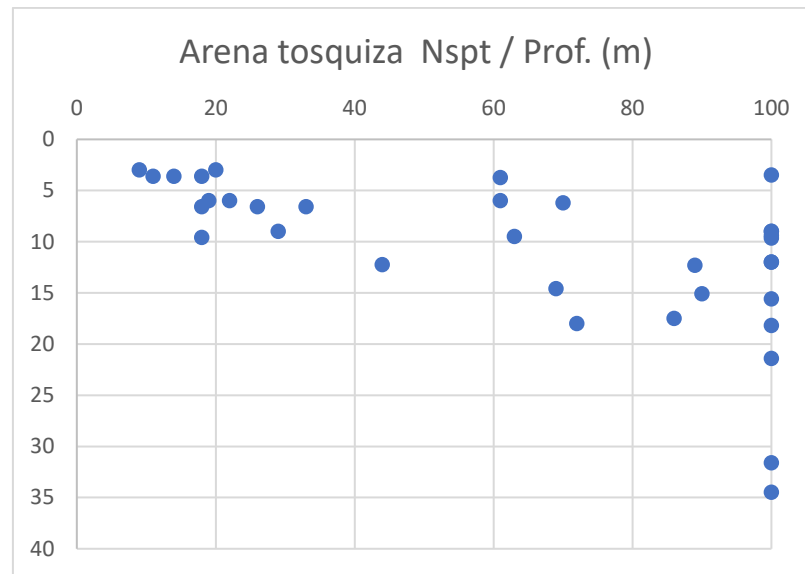


Figura 39. Unidad Arena tosquiza: golpeo SPT en relación a la profundidad.

La resistencia a compresión simple presenta valores en torno a 160 kPa, con bastante dispersión en los resultados. En la siguiente figura se muestra la distribución de valores en relación a la profundidad.

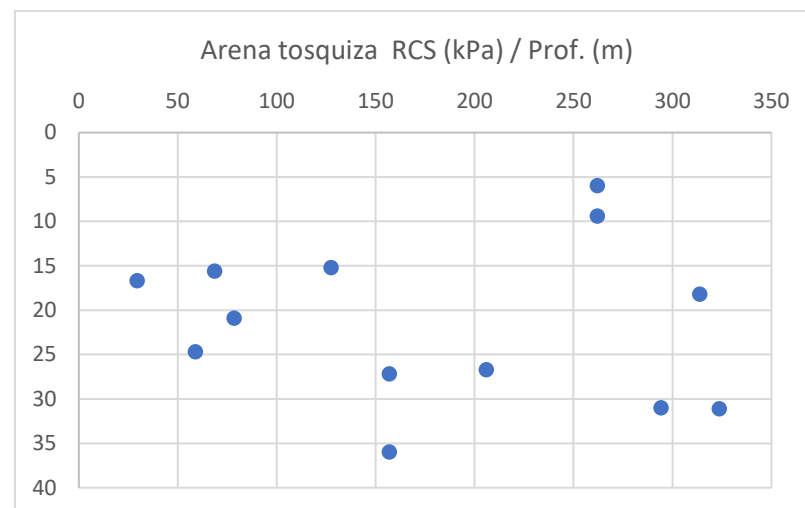


Figura 40. Unidad Arena tosquiza: resistencia a compresión simple en relación a la profundidad.

Su potencial expansivo se ha evaluado mediante la relación entre el límite líquido y el límite plástico (Reese y O'Neill, 1988), como muestra el gráfico siguiente. Puede observarse como su potencial expansivo es bajo. Esto ha sido verificado mediante ensayos de presión de hinchamiento, hinchamiento libre y Lambe, donde se han obtenido, respectivamente, presión de 20 kPa, hinchamiento casi nulo (0,1%) y potencial de hinchamiento no crítico.

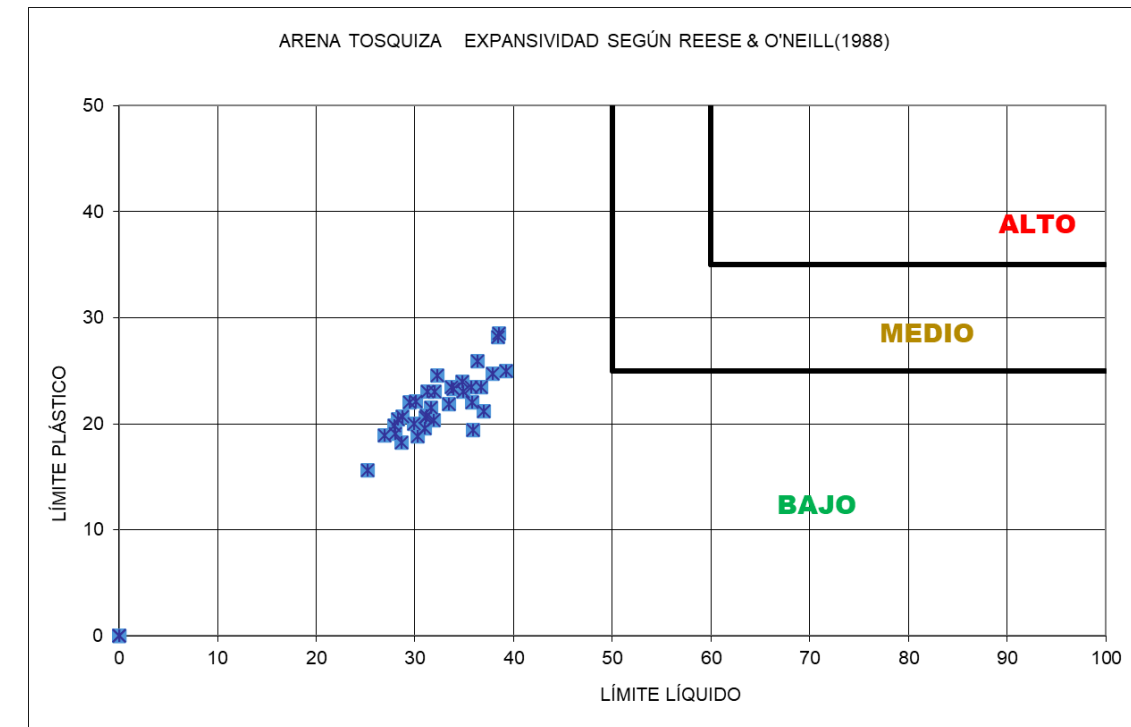


Figura 41. Unidad Arena tosquiza: potencial expansivo (Reese y O'Neill, 1988).

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 21: Arena tosquiza: resumen de ensayos de laboratorio

UNIDAD: ARENA TOSQUIZA								
Ensayos		Nº Ensay.	Promedio	Mediana	Desv. Estan.	Coef. Variac.	Máximo	Mínimo
Resist. penet.	N SPT (MI/2)	34	63,00	69,50	35,63	56,55	100,00	9,00
Estado	Humedad, en %	10	10,82	11,39	2,56	23,61	14,36	5,70
	Densidad seca (g/cm³)	10	1,83	1,84	0,19	10,24	2,10	1,38
	Densidad natural (g/cm³)	8	1,98	2,06	0,20	10,18	2,12	1,51
	Peso específico (g/cm³)	0						
Granulometría (% que pasa)	Ø 63 mm	38	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	Ø 20 mm	38	99,82	100,00	0,62	0,62	100,00	97,30
	Ø 5 mm	38	98,49	99,25	1,88	1,91	100,00	92,50
	Ø 2 mm	38	91,94	92,60	5,15	5,60	99,80	81,00
	Ø 0,40 mm	38	55,60	55,80	7,99	14,37	82,40	41,00
	Ø 0,08 mm	38	32,34	32,15	3,88	12,00	39,30	25,00
Límites de Atterberg	Límite Líquido	34	32,59	31,95	3,71	11,38	39,20	N.P.
	Límite Plástico	34	21,96	21,95	2,76	12,55	28,50	N.P.
	Índice de Plasticidad	34	10,63	10,40	2,28	21,44	16,50	N.P.
Clasificación	USCS	37		SC			SM	SC
	AASHTO	37		A-2-4			A-2-4	A-6

UNIDAD: ARENA TOSQUIZA								
Ensayos		Nº Ensay.	Promedio	Mediana	Desv. Estand.	Coef. Variac.	Máximo	Mínimo
Compresión Simple	Tensión (kg/cm²)	13	1,89	1,60	1,13	59,53	3,40	0,30
	Tensión (kPa)	13	179,87	156,91	103,92	57,78	323,63	29,42
	Deformación (%)	13	7,15	6,00	3,44	48,03	13,00	3,00
Hinchamiento	Pres. hinchamiento (kPa)	1	20,00	20,00				
	Hinchamiento libre (%)	1	0,06	0,06				
	Lambe. Cambio pot. vol. (%)	2	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
			No crític.	No crític.			No crític.	No crític.
Edómetro								
Triaxial o Corte Directo	Totales							
	Ángulo rozamiento	2	20,53	20,53	13,16	64,11	29,83	11,22
	Cohesión (kPa)	2	62,00	62,00	70,71	114,05	112,00	12,00
	Efectivas							
Ensayos Químicos	Ángulo rozamiento	1	38,71	38,71				
	Cohesión (kPa)	1	8,00	8,00				
	Sulfatos SO42- (mg/kg)	10	135,00	87,50	140,53	104,10	425,00	0,00
	Acidez Baumann-Guly	4	32,75	33,00	2,63	8,03	35,00	30,00
	Carbonatos (%)	9	2,40	1,87	1,14	47,50	4,33	1,21
	Materia orgánica (%)	5	0,71	0,89	0,39	54,85	1,07	0,09
Difracción de rayos X		1						

La tabla general de ensayos de la unidad arena tosquiza se encuentra en el Apéndice 5.

Los parámetros obtenidos se encuentran en el rango de los indicados en la bibliografía, con una resistencia a compresión algo inferior del mínimo propuesto (200 kPa).

Los ensayos químicos ya fueron comentados en el apartado 8.5, Agresividad.

Los valores obtenidos en los ensayos presiográficos ejecutados en arena tosquiza se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 22: Arena tosquiza: resumen de ensayos presiográficos

Sondeo	Profundidad (m)		Modulo Presiográfico Ep (MPa)		Presión Límite (MPa)	Presión Fluencia (MPa)
	Inicial	Final	Ciclo 1	Ciclo 2		
ST-0.8	7,50	8,00	5,35	198,62	>3,140	0,75
ST-4.1	7,60	8,10	51,44	224,18	7,18	6,99
ST-3.5	12,30	12,80	122,32	713,63	9,38	3,7
ST-3.2	12,50	13,00	78,38	588,25	6,85	6,48
ST-R-1	14,70	15,30	55,8	701,97	9,41	6,48
ST-6.1	22,30	22,80	339,37	396,62	>11,390	5,52

Sondeo	Profundidad (m)		Modulo Presiográfico Ep (MPa)		Presión Límite (MPa)	Presión Fluencia (MPa)
	Inicial	Final	Ciclo 1	Ciclo 2		
ST-8.1	25,50	26,00	113,72	354,1	9,96	3,95
ST-R-1.2	27,50	28,00	310,59	619,17	>14,920	5,98
ST-3.2	33,50	34,00	110,37	1046,54	10,89	
ST-7.1	35,50	36,00	148,4			7,5
ST-1.1	37,50	38,00	223,38	587,33	>10,750	6,08
ST-3.2	44,80	45,30	142,7	762,13	9,68	4,66
ST-7.1	46,50	47,00	164,74	752,55	10,52	6,09
UNIDAD ARENA TOSQUIZA	Ensayos		13	12	12	12
	Promedio		143,6	578,8	9,5	5,3
	Mediana		122,3	603,7	9,8	6,0
	Desv. Estandar		97,9	247,1	2,9	1,9
	Coef. Variac.		68,2	42,7	30,2	34,6
	Máximo		339,4	1046,5	14,9	7,5
	Mínimo		5,4	198,6	3,1	0,8

La variación del módulo de primer ciclo con la profundidad se muestra en el siguiente gráfico, observándose relación entre ambos solo en los valores <150 MPa.

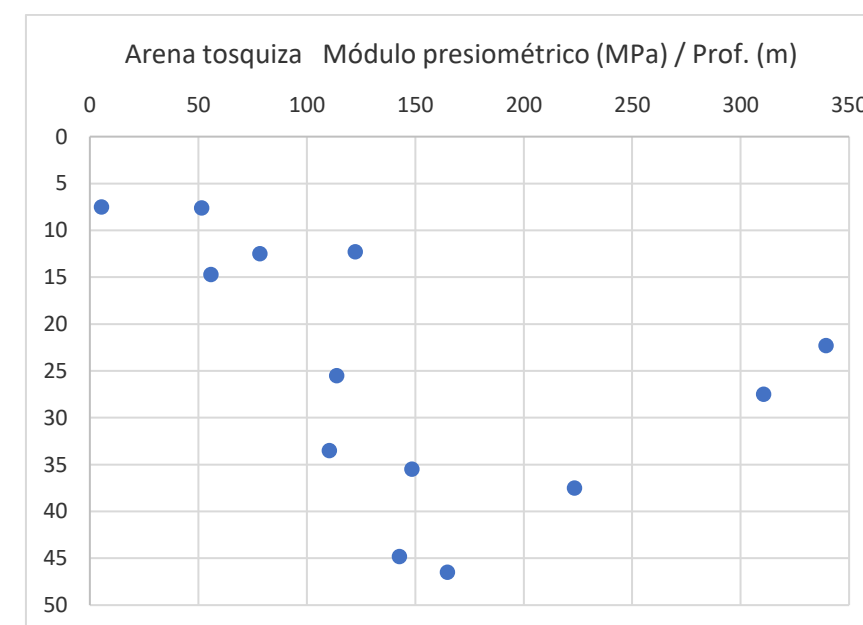


Figura 42. Unidad Arenas tosquizas: módulo presiográfico en relación a la profundidad.

10.7. TOSCO ARENOSO

Esta unidad se sitúa en la transición entre las facies arenosas y el tosco, con proporciones semejantes de arenas y finos. Su contenido en finos le confiere una alta cementación y compacidad, similar a la de la facies tosco.

Geotécnicamente son arenas limoarcillosas que predominan ligeramente sobre arcillas y limos arenosos, con un porcentaje de fracción limo- arcillosa entre el 40- 60%. Se clasifican como

arenas arcillosas SC, arenas limosas SM y arcillas y limos de baja plasticidad, CL y ML. Es un suelo de plasticidad baja, con un 5% de las muestras ensayadas no plásticas, estando en el resto el límite líquido en torno al 36% y el índice de plasticidad en torno al 12%.

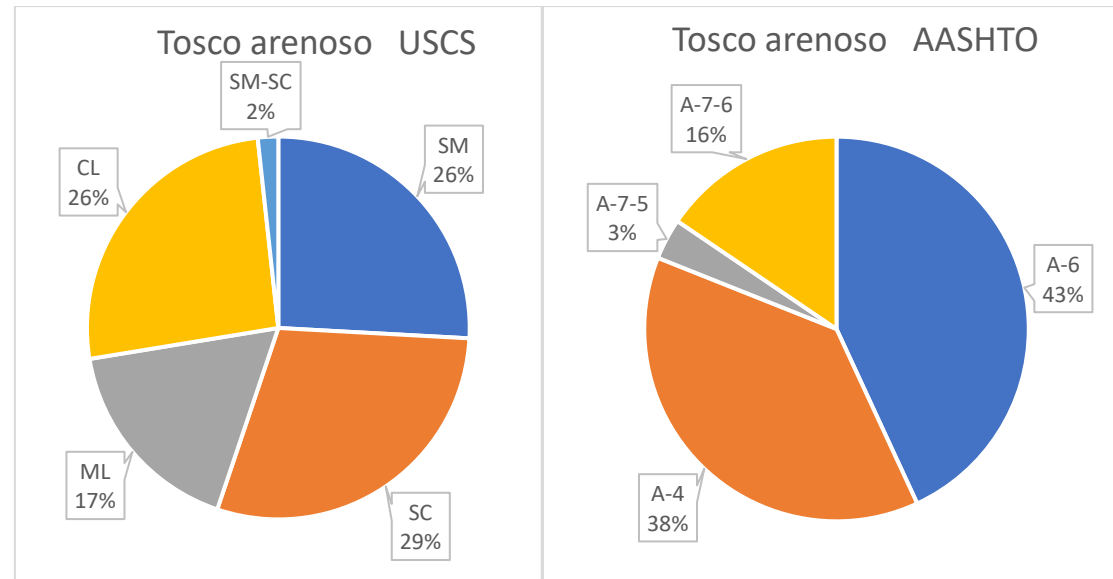


Figura 43. Unidad Tosco arenoso: clasificación USCS y AASHTO.

Su granulometría y plasticidad se muestran en la Figura 44.

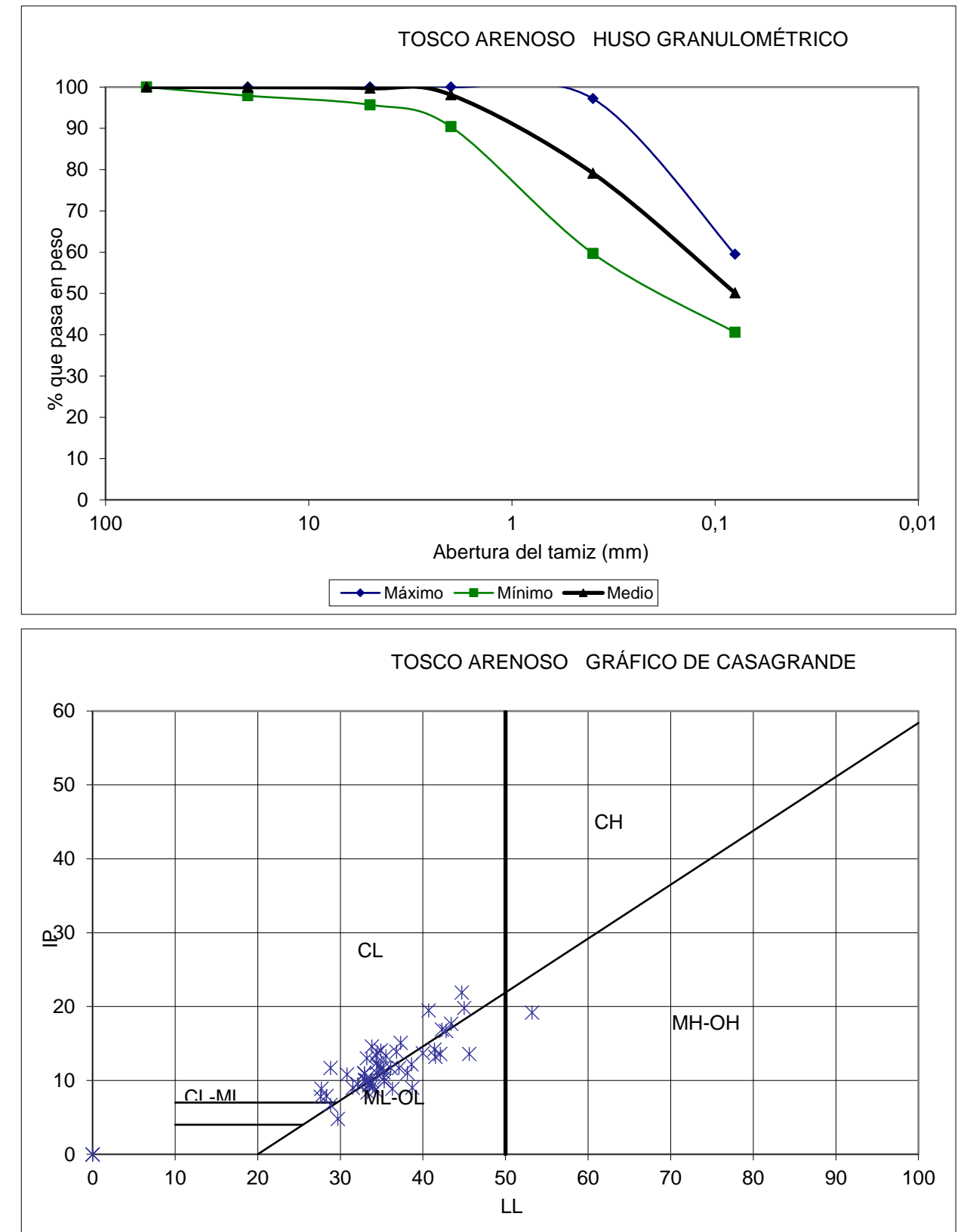


Figura 44. Unidad Tosco arenoso: granulometría y carta de plasticidad.

Respecto a su compacidad, presentan valores N_{spt} superiores a los 36 golpes, incluso en la zona meteorizada, con valores usualmente de rechazo.

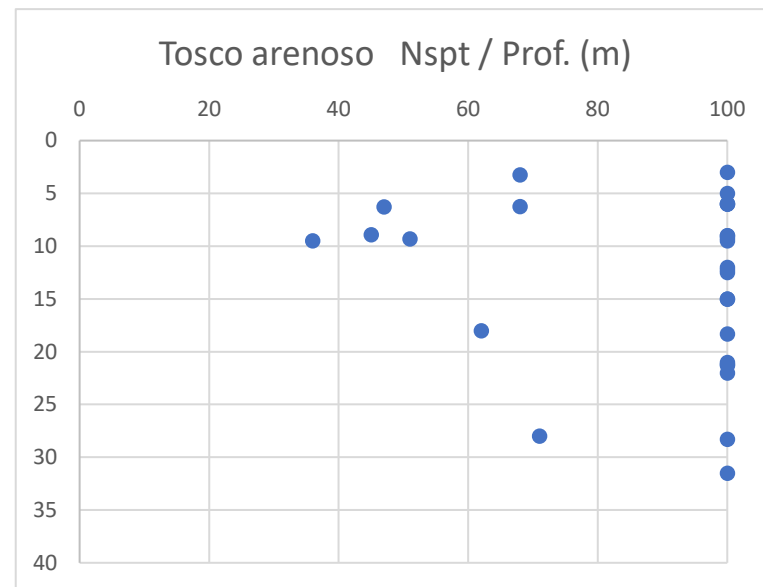


Figura 45. Unidad Tosco arenoso: golpeo SPT en relación a la profundidad.

La resistencia a compresión simple presenta valores en torno a 300 kPa, con bastante dispersión en los resultados, pero siempre superiores a 167 kPa. En la siguiente figura se muestra la distribución de valores en relación a la profundidad.

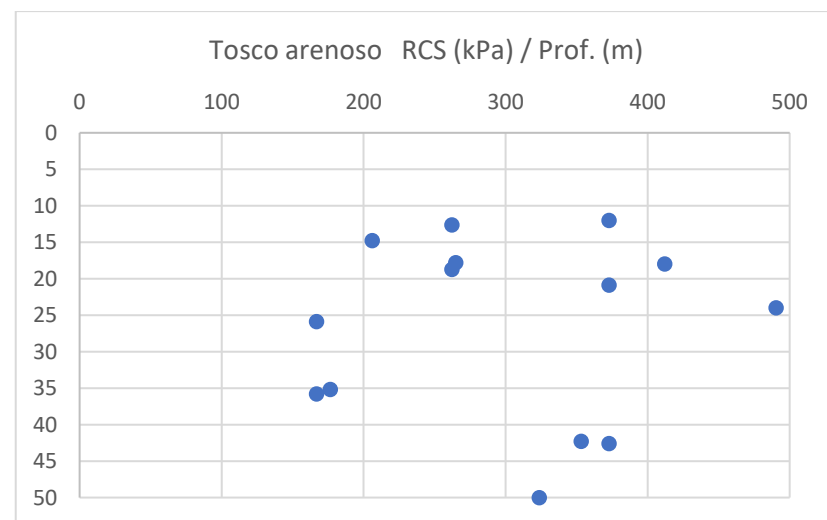


Figura 46. Unidad Tosco arenoso: resistencia a compresión simple en relación a la profundidad.

Su potencial expansivo se ha evaluado mediante la relación entre el límite líquido y el límite plástico (Reese y O'Neill, 1988), como muestra el gráfico siguiente. Puede observarse como su potencial expansivo es bajo, pudiendo ser medio ocasionalmente. Esto ha sido verificado mediante ensayos de presión de hinchamiento, hinchamiento libre y Lambe, donde se han obtenido, respectivamente, presión de 26 kPa en promedio, con máximo de 65 kPa,

hinchamiento promedio muy bajo (0,1%), con máximo de 1,2% y potencial de hinchamiento no crítico en general, con potencial marginal en un 18% de los ensayos.

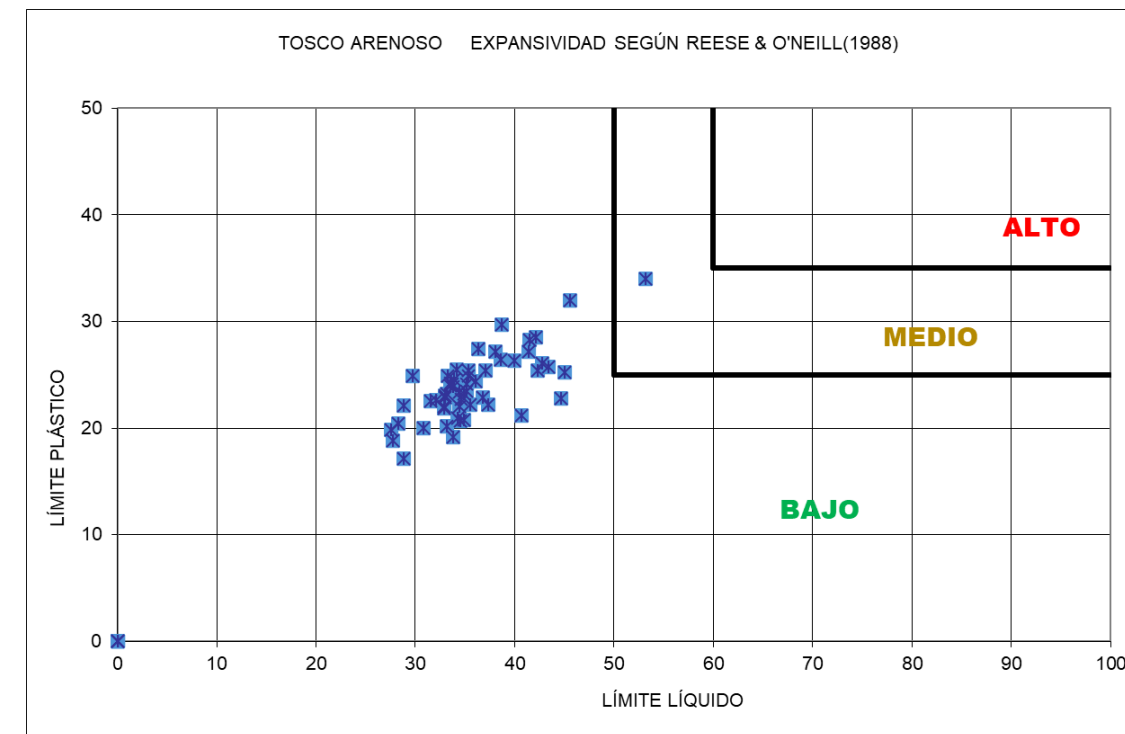


Figura 47. Unidad Tosco arenoso: potencial expansivo (Reese y O'Neill, 1988).

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 23: Tosco arenoso: resumen de ensayos de laboratorio

UNIDAD: TOSCO ARENOSO								
Ensayos		Nº Ensay.	Promedio	Mediana	Desv. Estan.	Coef. Variac.	Máximo	Mínimo
Resist. penet.	N SPT (MI/2)	29	87,86	100,00	21,04	23,94	100,00	36,00
Estado	Humedad, en %	19	14,55	13,60	3,22	22,17	23,58	11,68
	Densidad seca (g/cm³)	19	1,78	1,82	0,12	6,76	1,96	1,57
	Densidad natural (g/cm³)	17	2,05	2,05	0,09	4,37	2,18	1,86
	Peso específico (g/cm³)	0						
Granulometría (% que pasa)	Ø 63 mm	58	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	Ø 20 mm	58	99,96	100,00	0,28	0,28	100,00	97,90
	Ø 5 mm	58	99,72	99,90	0,67	0,67	100,00	95,70
	Ø 2 mm	58	98,13	98,50	1,96	2,00	100,00	90,40
	Ø 0,40 mm	58	79,15	79,25	8,96	11,32	97,20	59,70
	Ø 0,08 mm	58	50,15	49,15	5,52	11,01	59,50	40,60
Límites de Atterberg	Límite Líquido	55	35,88	34,60	5,02	13,98	53,20	N.P.
	Límite Plástico	55	23,89	23,50	3,13	13,11	34,00	N.P.
	Índice de Plasticidad	55	11,99	11,70	3,42	28,49	21,90	N.P.

UNIDAD: TOSCO ARENOSO								
Ensayos		Nº Ensay.	Promedio	Mediana	Desv. Estan.	Coef. Variac.	Máximo	Mínimo
Clasificación	USCS	58		SC			SM	CL
	AASHTO	58		A-6			A-4	A-7-6
Compresión Simple	Tensión (kg/cm ²)	14	3,06	3,10	1,03	33,54	5,00	1,70
	Tensión (kPa)	14	300,11	294,21	100,66	33,54	490,35	166,72
	Deformación (%)	14	7,07	7,00	2,50	35,28	12,00	3,00
Hinchamiento	Pres. hinchamiento (kPa)	10	26,30	16,00	22,91	87,11	65,00	0,00
	Hinchamiento libre (%)	9	0,36	0,32	0,36	100,72	1,23	-0,01
	Lambe. Cambio pot. vol. (%)	11	1,25	1,50	0,94	75,37	2,50	0,00
			No crític.	No crític.			Marginal	No crític.
Edómetro	Índice poros inicial	1	0,38	0,38				
Triaxial o Corte Directo	Totales	Ángulo rozamiento	20	28,49	28,78	6,03	21,17	39,62
		Cohesión (kPa)	20	105,18	73,31	82,28	78,23	309,00
	Efectivas	Ángulo rozamiento	3	34,22	34,38	4,26	12,44	38,39
		Cohesión (kPa)	3	69,06	18,00	104,25	150,95	189,00
Ensayos Químicos	Sulfatos SO ₄ 2- (mg/kg)	15	243,33	250,00	203,42	83,60	625,00	0,00
	Acidez Baumann-Guly	5	34,20	28,00	13,99	40,90	55,00	23,00
	Carbonatos (%)	15	2,24	1,68	1,15	51,26	4,24	0,93
	Materia orgánica (%)	5	0,79	0,96	0,30	37,77	1,05	0,46
Difracción de rayos X		9						

La tabla general de ensayos de la unidad tosco arenoso se encuentra en el Apéndice 5.

Los parámetros obtenidos se encuentran en el rango de los indicados en la bibliografía, con una resistencia a compresión simple en el mínimo propuesto (300 kPa).

Los ensayos químicos ya fueron comentados en el apartado 8.5, Agresividad.

Los valores obtenidos en los ensayos presiográficos ejecutados en tosco arenoso se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 24: Tosco arenoso: resumen de ensayos presiográficos

Sondeo	Profundidad (m)		Profundidad (m)		Presión Límite (MPa)	Presión Fluencia (MPa)
	Inicial	Inicial	Ciclo 1	Ciclo 2		
ST-7.1	17,50	18,00	95,15	1914,33	11,1	7,15
ST-5.6	24,70	25,30	272,9	361,56	10,18	7,99
ST-1.1	25,50	26,00	205,94	222,25	>10,040	8,21
ST-C-1	26,60	27,10	58,62	355,93		6,26
SL-8.1	29,50	30,00	182,04	1179,96	>12,130	6,37

Sondeo	Profundidad (m)		Profundidad (m)		Presión Límite (MPa)	Presión Fluencia (MPa)
	Inicial	Inicial	Ciclo 1	Ciclo 2		
ST-0.1.1	31,50	32,00	159,53	351,71	11,9	7,82
ST-6.1	33,00	33,50	145,4	1219,94	>13,650	6,24
ST-4.1	38,50	39,00	95,41	302,83		6,78
ST-8.1	38,50	39,00	346,9	969,85	>12,000	14,98
ST-1.3	38,60	39,10	237,89	2010,23	11,17	
ST-0.1.1	40,00	40,50	177,54		12,7	7,95
ST-3.5	44,70	45,20	145,79	1016,38	10,17	5,71
ST-6.1	45,50	46,00	158,6	1241,35	10,62	7
ST-1.1	50,70	51,20	99,5	618,34	>12,600	5,98
ST-4.1	52,50	53,00	89,54	8135,15	>15,640	6,57
ST-3.5	55,50	56,00	331,44		7,64	6,64
ST-1.1	64,00	64,50	154,44	3704,53	>16,240	
UNIDAD TOSCO ARENOSO	Ensayos		17	15	15	15
	Promedio		173,9	1573,6	11,9	7,4
	Mediana		158,6	1016,4	11,9	6,8
	Desv. Estandar		83,1	2031,3	2,2	2,2
	Coef. Variac.		47,8	129,1	18,5	29,9
	Máximo		346,9	8135,2	16,2	15,0
	Mínimo		58,6	222,3	7,6	5,7

La variación del módulo de primer ciclo con la profundidad se muestra en el siguiente gráfico, no observándose relación entre ambos.

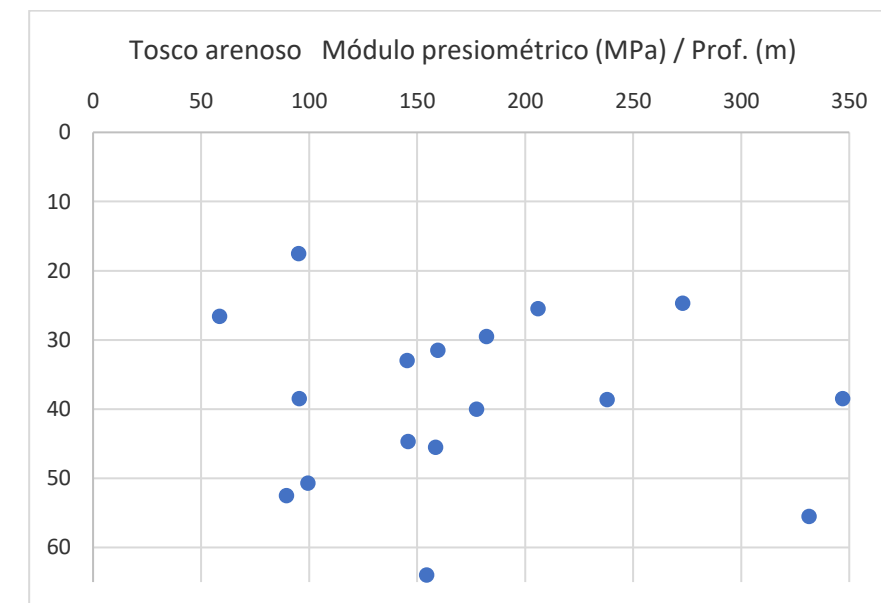


Figura 48. Unidad Tosco arenoso: módulo presiográfico en relación a la profundidad.

10.8. TOSCO

Litológicamente se trata de arcillas de color marrón con contenidos de finos superiores a 60%, aunque pueden presentar niveles intercalados con mayor contenido de arenas. Su contenido en finos le confiere una alta cementación y compacidad.

Geotécnicamente son limos y arcillas, en general algo arenosas. Se clasifican como limos y arcillas de baja plasticidad ML y CL, si bien ocasionalmente se encuentran niveles con alta plasticidad. El límite líquido se sitúa en torno al 41% y el índice de plasticidad en torno al 15%.

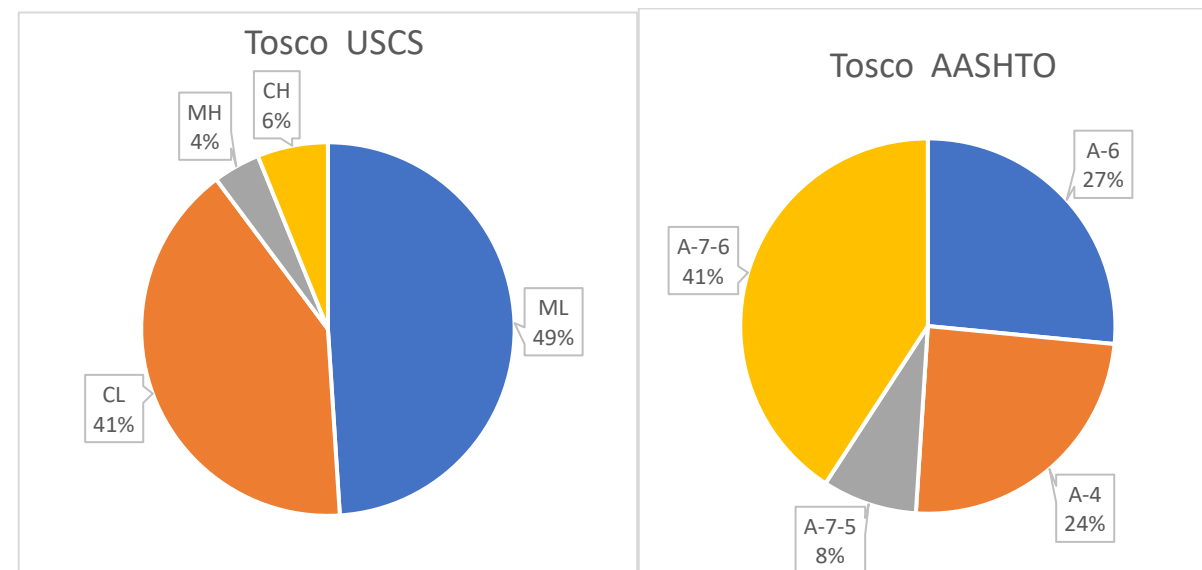


Figura 49. Unidad Tosco: clasificación USCS y AASHTO.

Su granulometría y plasticidad se muestran en la Figura 50.

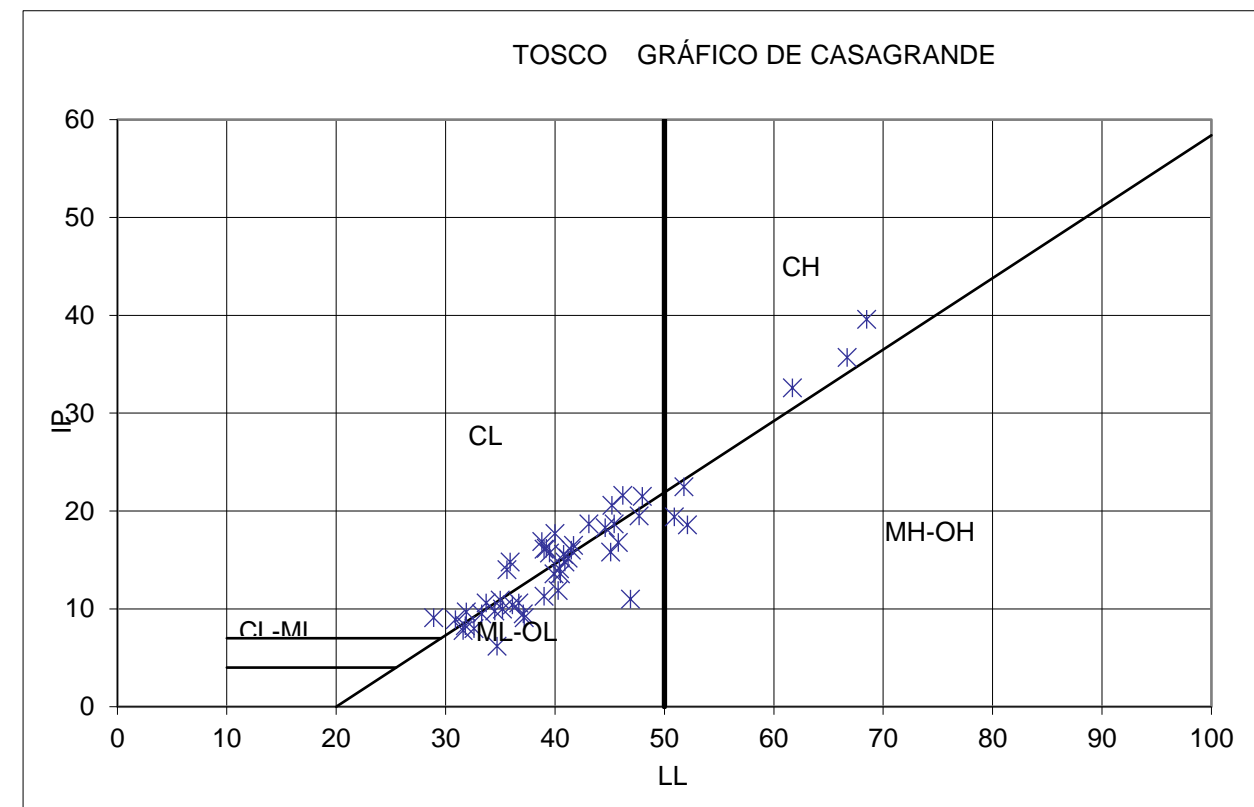
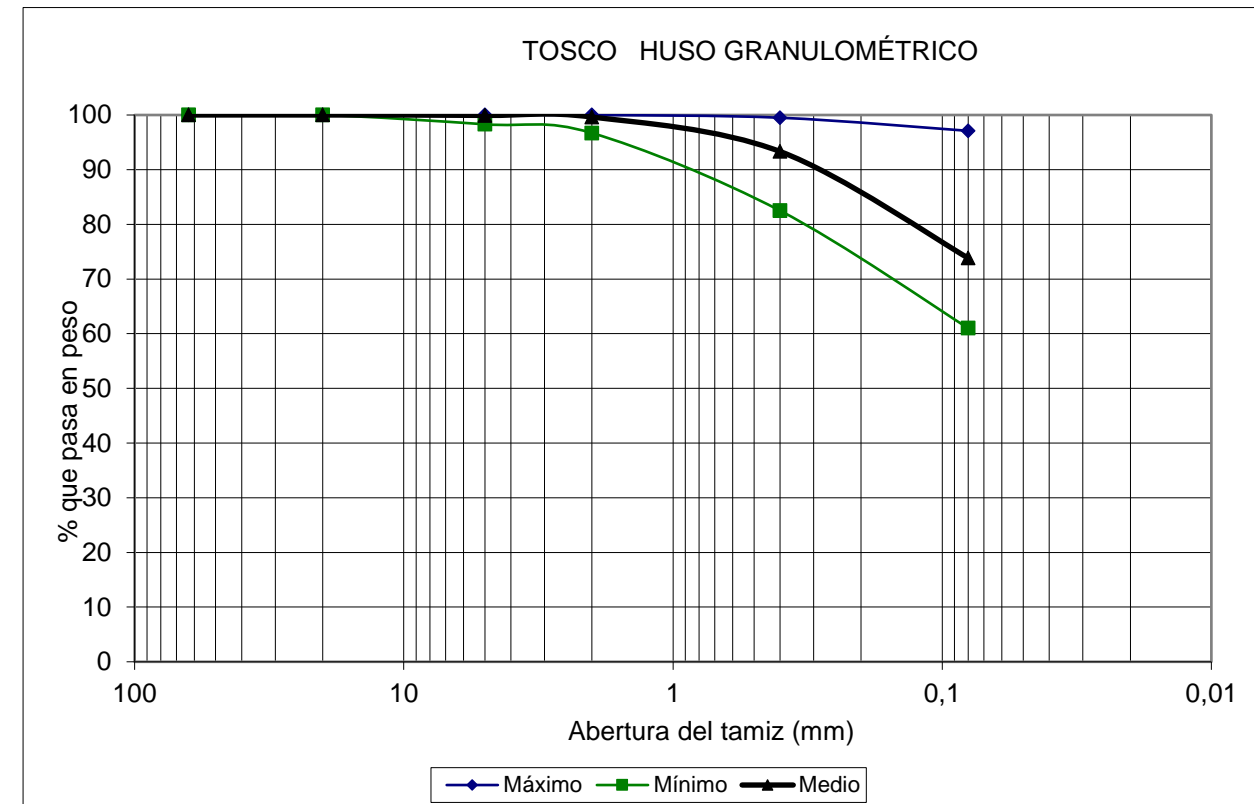


Figura 50. Unidad Tosco: granulometría y carta de plasticidad.

Respecto a su compacidad, presentan valores N_{spt} superiores a los 32 golpes, con valores usualmente de rechazo.

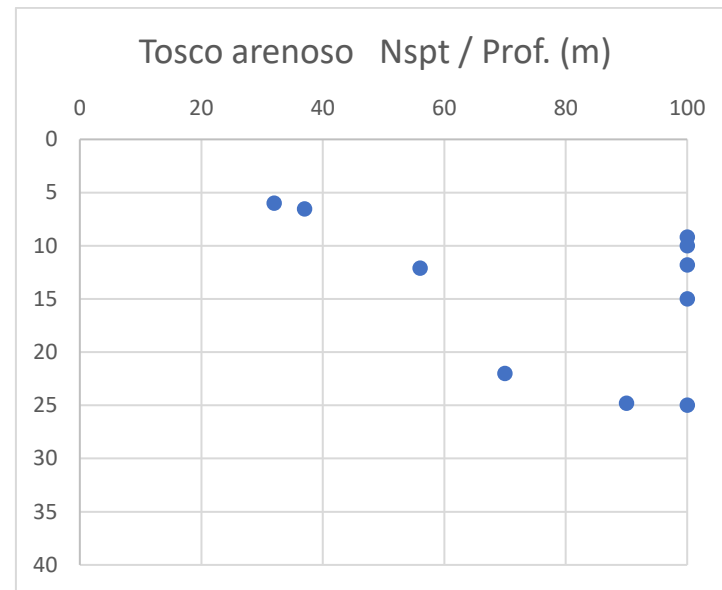


Figura 51. Unidad Tosco: golpeo SPT en relación a la profundidad.

La resistencia a compresión simple presenta valores en torno a 350 kPa, con bastante dispersión en los resultados, pero casi siempre superiores a 196 kPa. En la siguiente figura se muestra la distribución de valores en relación a la profundidad.

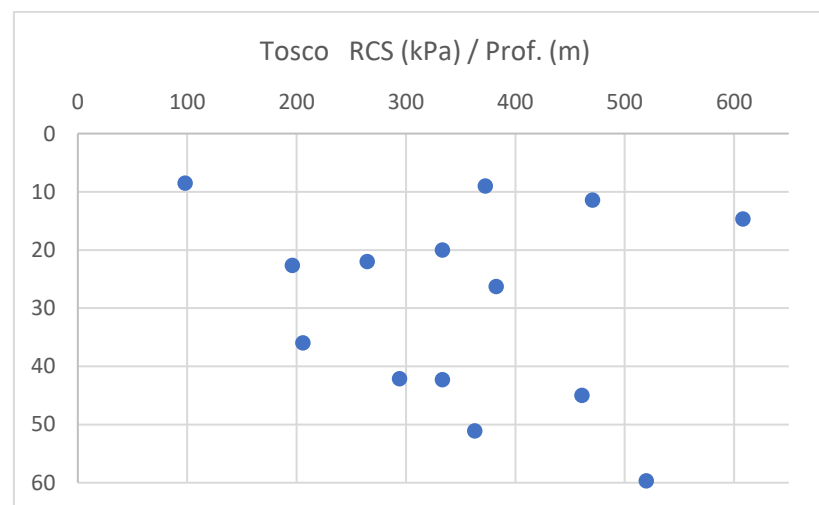


Figura 52. Unidad Tosco: resistencia a compresión simple en relación a la profundidad.

Su potencial expansivo se ha evaluado mediante la relación entre el límite líquido y el límite plástico (Reese y O'Neill, 1988), como muestra el gráfico siguiente. Puede observarse como su potencial expansivo es bajo, pudiendo ser medio ocasionalmente. Esto ha sido verificado mediante ensayos de presión de hinchamiento, hinchamiento libre y Lambe, donde se han obtenido, respectivamente, presión de 24 kPa en promedio, con máximo de 50 kPa, hinchamiento promedio bajo (1%), con máximo de 2,2% y potencial de hinchamiento marginal en general, con potencial no crítico en un 17% de los ensayos.

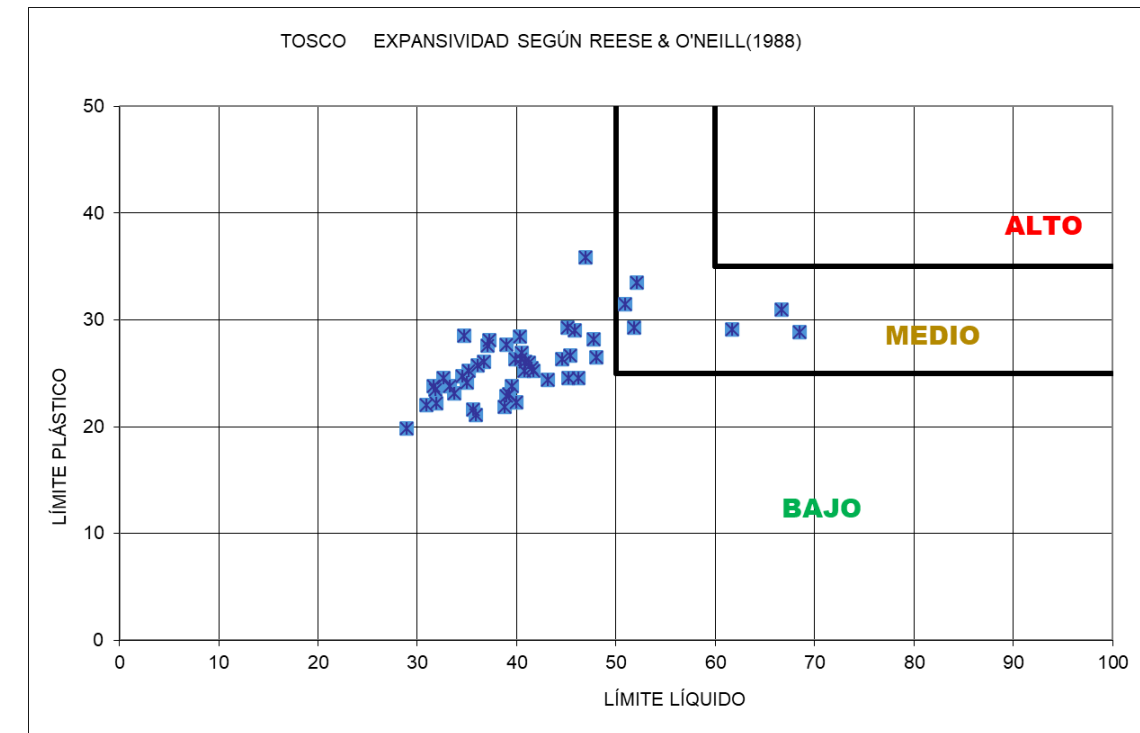


Figura 53. Unidad Tosco: potencial expansivo (Reese y O'Neill, 1988).

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los ensayos de laboratorio realizados.

Tabla 25: Tosco: resumen de ensayos de laboratorio

UNIDAD: TOSCO								
Ensayos		Nº Ensay.	Promedio	Mediana	Desv. Estan.	Coef. Variac.	Máximo	Mínimo
Resist. penet.	N SPT (MI/2)	10	78,50	95,00	27,70	35,29	100,00	32,00
Estado	Humedad, en %	8	19,66	19,50	3,27	16,61	24,87	15,60
	Densidad seca (g/cm³)	8	1,62	1,62	0,08	4,82	1,74	1,52
	Densidad natural (g/cm³)	6	1,96	1,97	0,07	3,52	2,02	1,85
	Peso específico (g/cm³)	0						
Granulometría (% que pasa)	Ø 63 mm	49	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	Ø 20 mm	49	100,00	100,00	0,00	0,00	100,00	100,00
	Ø 5 mm	49	99,92	100,00	0,26	0,26	100,00	98,30
	Ø 2 mm	49	99,63	99,80	0,64	0,65	100,00	96,70
	Ø 0,40 mm	49	93,32	94,00	4,37	4,68	99,50	82,50
	Ø 0,08 mm	49	73,83	73,20	9,15	12,39	97,10	61,00
Límites de Atterberg	Límite Líquido	49	41,33	40,00	8,44	20,41	68,50	28,90
	Límite Plástico	49	25,96	25,70	3,21	12,35	35,90	19,80
	Índice de Plasticidad	49	15,37	14,80	6,79	44,19	39,60	6,20
Clasificación	USCS	49		ML			ML	CH
	AASHTO	49		A-7-6			A-4	A-7-6
Compresión Simple	Tensión (kg/cm²)	14	3,57	3,55	1,39	39,02	6,20	1,00
	Tensión (kPa)	14	350,25	348,15	136,67	39,02	608,03	98,07

UNIDAD: TOSCO								
Ensayos		Nº Ensay.	Promedio	Mediana	Desv. Estan.	Coef. Variac.	Máximo	Mínimo
Hinchamiento	Deformación (%)	14	9,07	8,50	4,08	45,03	16,00	3,00
	Pres. hinchamiento (kPa)	8	23,50	22,00	12,64	53,78	50,00	5,00
	Hinchamiento libre (%)	5	0,97	0,69	0,66	67,97	2,15	0,59
	Lambe. Cambio pot. vol. (%)	6	1,96	1,63	1,18	60,10	3,50	0,50
Edómetro	Índice poros inicial	1	0,42	0,42				
Triaxial o Corte Directo	Totales	Ángulo rozamiento	18	27,70	27,73	6,90	24,92	45,74
			18	99,94	109,02	78,39	78,43	249,00
	Efectivas	Ángulo rozamiento	3	26,45	28,25	3,90	14,76	29,13
			3	83,79	67,00	62,52	74,62	153,00
Ensayos Químicos	Sulfatos SO ₄ 2- (mg/kg)	15	111,67	75,00	123,88	110,93	375,00	0,00
	Acidez Baumann-Guly	6	24,50	26,00	8,31	33,93	34,00	11,00
	Carbonatos (%)	13	1,84	1,68	0,82	44,77	3,42	0,81
	Materia orgánica (%)	0						
Difracción de rayos X		8						

Sondeo	Profundidad (m)		Profundidad (m)		Presión Límite (MPa)	Presión Fluencia (MPa)
	Inicial	Inicial	Ciclo 1	Ciclo 2		
ST-3.2	23,50	24,00	115,3	730,06	9,77	7,66
ST-R-1	25,50	26,00	225,3	427,1	12,63	5,11
ST-7.1	26,50	27,00	101,12	805,39	8,42	4,33
ST-AV-01	26,50	27,00	176,25	669,19	10,26	6,35
ST-1.3	27,50	28,00	543,98	553,85	12,13	>9,6
ST-4.1	27,50	28,00	104,64	1049,63	>8,490	3,34
ST-8.1	51,50	52,00	215,39	595,97	15,36	5,39
ST-1.3	52,00	52,50	70,12	590,88	14,76	6,6
ST-6.1	55,50	56,00	300,34		>9,6	8,38
ST-3.2	56,00	56,50	211,46	430	11,07	8,41
ST-1.3	62,50	63,00	150,25	644,47	12,13	4,59
ST-8.1	64,50	65,00	155,66	663,82	11,75	5,75
UNIDAD TOSCO	Ensayos		19	18	18	18
	Promedio		172,8	646,0	10,5	6,0
	Mediana		155,7	654,1	10,6	5,9
	Desv. Estandar		111,8	220,7	2,5	1,3
	Coef. Variac.		64,7	34,2	24,1	22,4
	Máximo		544,0	1159,4	15,4	8,4
	Mínimo		46,7	183,3	5,6	3,3

La variación del módulo de primer ciclo con la profundidad se muestra en el siguiente gráfico, no observándose relación entre ambos.

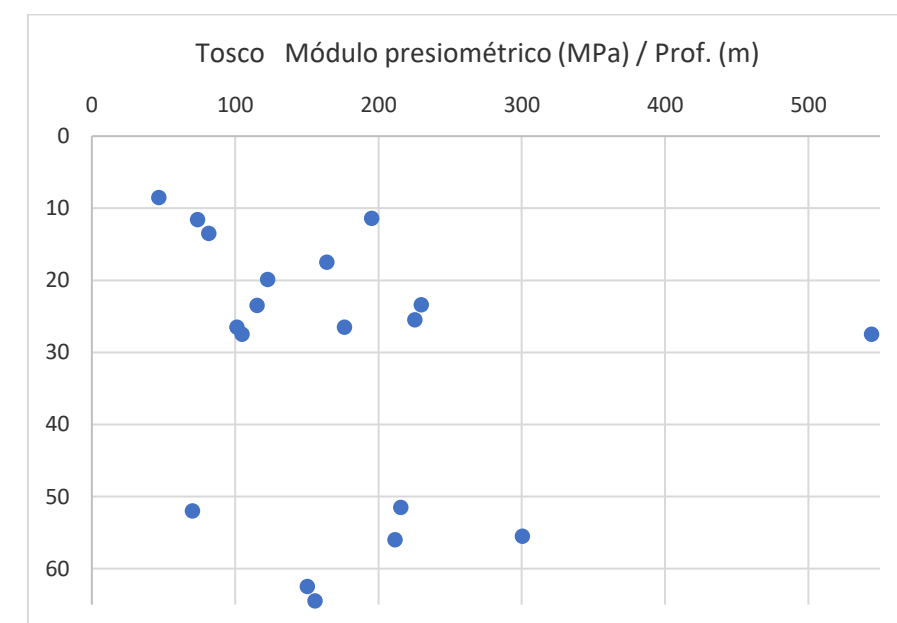


Figura 54. Unidad Tosco: módulo presiométrico en relación a la profundidad.

La tabla general de ensayos de la unidad tosco se encuentra en el Apéndice 5.

Los parámetros obtenidos se encuentran en el rango de los indicados en la bibliografía, estando la densidad seca algo por debajo del límite inferior (1,70 g/cm³) y la resistencia a compresión simple claramente por debajo del mínimo propuesto (500 kPa).

Los ensayos químicos ya fueron comentados en el apartado 8.5, Agresividad.

Los valores obtenidos en los ensayos presiométricos ejecutados en tosco se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 26: Tosco: resumen de ensayos presiométricos

Sondeo	Profundidad (m)		Profundidad (m)		Presión Límite (MPa)	Presión Fluencia (MPa)
	Inicial	Inicial	Ciclo 1	Ciclo 2		
ST-7.1	8,50	9,00	46,7	461,36	5,63	5,53
ST-6.1	11,40	11,90	195,14	1159,38	10,81	5,11
ST-0.8	11,60	12,10	73,7	693,49	>7,680	6,99
ST-8.1	13,50	14,00	81,47	581,31	10,66	6,01
ST-5.6	17,50	18,00	163,9	183,32	6,93	6,33
SL-8.1	19,90	20,40	122,49	687,23	9,44	5,42
ST-3.5	23,40	23,90	229,87	702,05	10,56	6,03

11. DESCRIPCIÓN GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE LAS ALTERNATIVAS

11.1. ALTERNATIVA 1

0+000 a 2+500. El túnel previsto atravesaría materiales de las facies tosco y tosco arenoso, con algunas intercalaciones de arenas tosquizas, entre el origen y la progresiva 2+500, situándose su clave próxima a arenas de miga suprayacentes entre las 1+900 a 2+500.

En este tramo, por encima de la clave del túnel, la estación Mar de Cristal-Alfredo Kraus se emplazaría fundamentalmente en arenas de miga, con arenas tosquizas en los 5-6 m adyacentes a la clave del túnel. El recubrimiento de rellenos superficiales en este punto es de unos 3 m de espesor y el nivel de agua se ha detectado por debajo de la solera de la estación.

La estación IFEMA-Cárcavas se emplazaría, por encima de clave, también fundamentalmente en arenas de miga, con tosco arenoso en los 5 m superiores y arenas tosquizas - tosco en los 5 m adyacentes a la clave del túnel. El recubrimiento de rellenos superficiales en este punto es de unos 3 m de espesor y el nivel de agua se ha detectado a cota de túnel.

2+500 a 3+650. El túnel previsto descendería atravesando materiales de la facies arenas tosquiza hasta alcanzar el tosco y tosco arenoso subyacente. En este tramo, la estación Intercambiador-Ciudad de la Justicia se excavaría, por encima de clave, en arenas tosquizas y arenas de miga, con un nivel de rellenos superficiales que alcanza los 6 m de espesor. El nivel de agua se prevé en clave de túnel, asociado al contacto superior del tosco.

3+650 a 6+400. El túnel previsto se excavaría en facies tosco y tosco arenoso, con la clave adyacente al contacto con las arenas tosquizas y arenas de miga suprayacentes, que llegan a predominar en la mitad superior de la sección en los últimos 400 m del tramo.

La estación Valdebebas Norte se emplazaría, por encima de clave, fundamentalmente en arenas de miga y tosquizas, con un nivel de rellenos superficiales de unos 3 m de espesor y nivel de agua por encima de la clave de túnel.

6+400 a 9+244. El túnel previsto descendería atravesando materiales de la facies tosco y tosco arenoso, con algunos lentejones de arenas de miga a cota de túnel, en especial entre las progresivas 7+600 a 8+500, coincidiendo con el emplazamiento de la estación Barajas -T4. Esta estación se excavaría, por encima de clave, en materiales del tosco arenoso y tosco, con un nivel de rellenos superficiales de 2-3 m de espesor y un nivel de terraza, infrayacente al anterior, de unos 3 m de espesor. El nivel de agua se ha localizado por encima de la clave del túnel.

11.2. ALTERNATIVA 2

Esta alternativa coincide con la Alternativa 1 hasta la progresiva 3+600.

3+650 a 5+100. El túnel previsto se excavaría íntegramente en materiales de la facies tosco y tosco arenoso. La estación Hospital Zandal, por encima de clave, se excavaría en su mitad superior en arenas tosquizas y en su mitad inferior en tosco y tosco arenoso, con el nivel de agua previsiblemente en el contacto entre ambos. El espesor de rellenos superficiales es de 2-3 m de espesor.

5+100 a 7+700. El túnel previsto se excavaría atravesando materiales de la facies tosco y tosco arenoso, con algunos lentejones de arenas de miga a cota de túnel, en especial entre las progresivas 5+600 a 6+500, coincidiendo con el emplazamiento de la estación Barajas -T4. La sección de esta estación ya se ha descrito en la Alternativa 1.

7+700 a 8+497. El túnel previsto se excavaría siguiendo el contacto entre las arenas tosquizas y arenas de miga suprayacentes y el tosco arenoso, que llegan a predominar en los últimos 300 m del tramo. Este tramo incluye la estación de Valdebebas Norte, ya descrita en la Alternativa 1.

11.3. ALTERNATIVA 3

0+000 a 0+900. El túnel previsto atravesaría materiales de las facies tosco y tosco arenoso, con algunas intercalaciones de arenas tosquizas que afectarían a la clave del túnel, entre el origen y la progresiva 0+700, o bien situándose su clave próxima a arenas de miga suprayacentes entre las 0+700 a 0+900.

En este tramo, por encima de la clave del túnel, la estación Mar de Cristal-Alfredo Kraus se emplazaría fundamentalmente en arenas de miga, con tosco arenoso y arenas tosquizas en los 6 m adyacentes a la clave del túnel. El recubrimiento de rellenos superficiales en este punto es de unos 5 m de espesor y el nivel de agua se ha detectado por debajo de la solera de la estación.

El resto de la alternativa coincide con la Alternativa 1, restando a las progresivas de aquella 147 m

11.4. ALTERNATIVA 4

Esta alternativa coincide con la Alternativa 3 hasta la progresiva 3+650, para a partir de ese punto pasar a coincidir con la Alternativa 2, restando a las progresivas de aquella 147 m.

12. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este anejo se describen las características geológicas e hidrogeológicas y se analizan las características geotécnicas de las unidades reconocidas en las distintas alternativas propuestas. Para ello, se ha considerado la información existente y se ha ejecutado una campaña de reconocimientos en la zona.

Geológicamente, Madrid y su entorno se sitúan en la Cuenca Terciaria del Tajo, también denominada Cuenca de Madrid. Ésta es una cuenca intramontañosa rellena por depósitos fundamentalmente miocenos dispuestos con un esquema proximal distal, con materiales detríticos gruesos en los bordes, detríticos finos en las zonas intermedias y depósitos lacustres con formación de sales y carbonatos en las zonas centrales. La naturaleza fundamentalmente granítica de las áreas fuente hace que en la zona de Madrid predominen las arcosas, depositadas en abanicos aluviales, en lo que se ha denominado facies Madrid. Suprayacentes se encuentran formaciones superficiales pliocenas y cuaternarias representadas principalmente por depósitos vinculados a la red fluvial, así como importantes rellenos antrópicos.

En la facies Madrid se distinguen varios litotipos con sentido geotécnico en función de su contenido en finos, que han sido diferenciados en la zona de estudio. Entre estos litotipos hay una variación continua, presentando habitualmente cambios de facies entre ellos e intercalaciones de unos en otros.

Tabla 27. Litotipos de la facies Madrid (Escario, 1985)

DENOMINACIÓN	% FINOS (pasa #0,08 mm)
AM- Arena de miga	< 25
AT- Arena tosquiza	25-40
TA- Tosco arenoso	40-60
T - Tosco	> 60

A partir de los registros de los sondeos y los perfiles sísmicos ejecutados, podemos diferenciar dos tramos en el sustrato de la zona de estudio. En el tramo superior se encuentran predominantemente arenas de miga y arenas tosquizas, mientras que en el tramo inferior predominan el tosco arenoso y el tosco. El límite entre estos dos tramos se encuentra en torno a la cota 660 en la zona situada más al oeste, en torno a Mar de Cristal, bajando progresivamente hasta el entorno de la cota 630 en la zona situada más al este, próxima a la T4. Las formaciones superficiales cuaternarias que afectan a las alternativas propuestas son

terrazas aluviales en el entorno de la T4, aluviales de arroyos y rellenos antrópicos; éstos últimos pueden llegar a alcanzar los 10 m de espesor pero no afectan a ninguna de las obras previstas.

La geomorfología de la zona es resultado de la incisión del río Jarama sobre las altiplanicies o divisorias conocidas también como “Superficie de Madrid”, desarrolladas sobre las facies Madrid.

Desde el punto de vista tectónico, la Cuenca de Madrid es una de las grandes áreas subsidentes de la península, cuyo desarrollo coincide con una deformación compresiva global de la Península Ibérica durante el Terciario, cuyo resultado es la estructuración de relieves positivos, como el Sistema Central, y zonas subsidentes. Debido a la naturaleza de los sedimentos detríticos del área de Madrid, esta tectónica frágil no se manifiesta en superficie, aunque sí se refleja en la jerarquización de la red fluvial.

En cuanto a la clasificación sísmica de la zona, conforme al Eurocódigo 8, la aceleración horizontal $a_g R$ es inferior a 0.04, en toda la zona, por lo que no es obligatoria la aplicación de la normativa sismorresistente.

Desde el punto de vista hidrogeológico, Madrid se localiza dentro de la Cuenca del río Tajo, encontrándose la zona de estudio sobre la Masas de Agua Subterránea 3.05d, Madrid Manzanares-Jarama. De forma regional podemos definir la geometría del acuífero como un conjunto de lentejones areno- arcillosos de diverso tamaño, distribuidos aleatoriamente en una matriz arcillosa, funcionando a nivel regional como un acuífero heterogéneo y anisótropo, que se recarga por infiltración del agua de lluvia en las zonas topográficamente más elevadas (interfluvios) y se descarga fundamentalmente en las más bajas (valles fluviales).

Las alternativas atraviesan una zona hidrológica de cauces de tercer orden, con cursos intermitentes. La red natural de drenaje está constituida en la zona SO por el arroyo de Quinto, ya desaparecido en la trama urbana, y al NE por el arroyo de Valdebebas, que solo transporta agua en periodos húmedos, si bien cuenta con circulación subsuperficial. Otros arroyos en la zona, tributarios de este último y con carácter semipermanente son los arroyos de Valdefuentes, de La Plata (encauzado en la actualidad), Valdelahiguera, y de Las Zorreras.

En cuanto al flujo subterráneo, la frecuencia de intercalaciones arcillosas hace que se comporte en gran medida como un acuífero multicapa, con niveles de diferente permeabilidad intercalados entre sí, lo que da lugar a horizontes saturados confinados que forman bolsas de agua y niveles colgados. Los depósitos antrópicos suelen encontrarse secos y en los aluviales de los arroyos se desarrollan pequeños acuíferos libres estacionales.

La distribución de niveles de agua a lo largo del trazado es bastante errática. No obstante, buena parte de los sondeos ejecutados presentan un nivel situado en torno al contacto entre los dos conjuntos litológicos del sustrato mioceno antes citados, el superior de arenas de miga y tosquizas y el inferior de toscos arenosos y toscos. Esta disposición del nivel de agua sobre el contacto de las unidades más arcillosas e impermeables es lógica, ya que corresponde al flujo subterráneo sobre este nivel, que aflora en superficie mediante una zona de descarga. También se observan en otros sondeos niveles de agua más próximos a la superficie, que corresponderán a aguas colgadas.

Los valores de permeabilidad obtenidos en los ensayos realizados son bastantes bajos, incluso en las unidades arenosas. Así puede adoptarse un valor representativo de $5E-06$ cm/s para arenas de miga y tosquizas y de $7E-07$ cm/s para toscos arenosos y toscos.

En cuanto a las características hidroquímicas del agua de los sondeos ejecutados, el residuo seco se sitúa habitualmente entre 500 y 1000 mg/l, con promedio de 667. El tipo de exposición del hormigón frente a las aguas, de acuerdo con el código estructural es en general Débil (XA1), pudiendo ser puntualmente Medio XA2.

Los posibles riesgos geológicos que pueden afectar a las alternativas propuestas identificados son: la ya mencionada posibilidad de encontrar aguas colgadas, tanto como lentejones dentro de los materiales del sustrato mioceno como en rellenos aluviales de arroyos, y la expansividad. Éste último riesgo es posible debido a la presencia mayoritaria de esmectita entre las arcillas de los materiales de la zona de estudio y ha sido valorada mediante ensayos, concluyéndose que el riesgo es de bajo a moderado, asociado siempre a las facies tosco arenoso y tosco, en las que se excavarán los túneles previstos, con presiones máximas de hinchamiento moderadas que ocasionalmente pueden alcanzar valores del orden de 50-60 kPa.

Otros riesgos asociados a la excavación de túneles en arena de miga pueden ser la inestabilidad durante la excavación del frente o de la clave, o bien el desgaste de los útiles de corte, que pueden darse en los tramos en los que aparece esta unidad.

Se ha verificado la no afección a las alternativas propuestas de otros posibles riesgos geológicos, como el asociado a rellenos antrópicos, la agresividad de los suelos al hormigón o la posible presencia de hidrocarburos en el subsuelo cerca de gasolineras.

Para la caracterización geotécnica de las alternativas se ha realizado una recopilación de información de proyectos y estudios anteriores y se ha ejecutado una campaña geotécnica, con los siguientes trabajos:

- 21 sondeos mecánicos (879,55 m de perforación), en los que se ejecutaron:

- 63 ensayos presiométricos
- 11 ensayos Lefranc
- 32 penetrómetros dinámicos DPSH (211,70 m)
- 11 ensayos MASW
- 13 perfiles sísmica pasiva ReMi
- 7 perfiles tomografía eléctrica.

Con las muestras obtenidas se realizaron los ensayos de laboratorio siguientes:

Tabla 28: Resumen ensayos de laboratorio en suelos

ENSAYOS DE LABORATORIO	SOLICITADOS	RECIBIDOS
ENSAYOS DE IDENTIFICACION		
Granulometría por tamizado	178	158
Límites de Atterberg	178	158
Materia orgánica	20	19
Sulfatos	48	43
Carbonatos	41	38
Acidez Baumann-Guly	23	18
Difracción rayos X	20	18
ENSAYOS DE ESTADO ENSAYOS DE ESTADO		
Densidad seca	38	35
Humedad	38	35
Peso Específico	1	1
RESISTENCIA		
Compresión simple	47	42
Triaxial U.U.	14	12
Triaxial C.U. con medida de pres. intersticiales	15	13
Triaxial C.D.	2	2
Corte directo sin drenaje	14	13
Corte directo con drenaje	7	6
DEFORMABILIDAD EXPANSIVIDAD Y CONSOLIDACIÓN		
Ensayo edométrico	4	4
Expansividad Lambe	24	21
Presión de hinchamiento	21	18
Hinchamiento libre	19	17
OTROS		
Análisis contaminación medioambiental	2	2

En base a la información recogida, se ha realizado una caracterización geotécnica de las unidades diferenciadas, que son:

- Rellenos superficiales
- Aluvial
- Arena de miga
- Arena tosquiza
- Tosco arenoso
- Tosco

En líneas generales, los resultados obtenidos son acordes a los indicados en la bibliografía, en concreto a los indicados en la tabla siguiente:

MATERIALES	CONTENIDO DE FINOS %	LÍM. LÍQUIDO	ÍNDICE PLÁSTIC.	DENSIDAD SECA (Kg/m³)	HUMEDAD NATURAL (%)	RESIST. A COMPR. SIMPLE (MPa)	COHESIÓN EFECTIVA (KPa)	ROZ. INTERNO EFECTIVO (°)	MÓDULO DE DEFORM. EN EXTENSIÓN (MPa)	MÓDULO DE DEFORM. EN CARGA (MPa)
Arena de Miga	< 25	N.P. -30	N.P. -14	1800-1950	7-14	0-0,3	10-30	33-38	50-120	55-180
Arena Tosquiza	25-40	28-38	8-18	1800-1930	9-14	0,2-0,4	10-50	33-37	75-150	80-250
Tosco arenoso	40-60	30-50	10-20	1750-1880	11-16	0,3-1,0	40-100	31-35	110-180	151-350
Tosco	60-85	36-54	13-30	1700-1850	14-25	0,5-2,0	80-150	28-34	150-225	250-550
Rellenos antrópicos	10-65	N.P. -50	N.P. -20	1200-1600	5-20	0-0,05	0-5	25-28	5-8	4-6
Aluviales	20-45	20-50	10-20	1300-1650	15-35	0-0,07	30-70	27-30	7-10	6-8
Peñuelas algo alteradas	80-95	50-90	20-40	1400-1550	25-30	0,5-1,5	60-150	26-30	100-150	150-250
Peñuelas sanas	80-95	50-90	20-40	1500-1650	22-25	0,7-2,5	> 150	28-32	200-250	250-350

* Valores obtenidos en ensayos de laboratorio

Figura 55. Características geotécnicas de los materiales de Madrid (Oteo; R. Ortiz y Mendaña, 2003).

Solo son reseñables los valores de resistencia a compresión simple registrados en las muestras ensayadas, en general inferiores a los indicados en la bibliografía. Así para las arenas tosquizas los valores obtenidos están en el entorno de los 160-180 kPa, en el tosco arenoso están en torno a 300 kPa y en el Tosco en torno a 350 kPa.

Así, para la definición de los parámetros geotécnicos de las unidades afectadas por las alternativas se han considerado los recogidos en el documento de referencia “Sobre los sistemas y parámetros geotécnicos de diseño en la Ampliación del Metro de Madrid” Oteo, C; Rodriguez Ortiz, J.M. y Mendaña Saavedra, F. (2003), que se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 29: Parámetros geotécnicos para los proyectos de ampliación del Metro de Madrid (1999-2003)

TIPO DE SUELO	PESO ESPECÍFICO APARENTE (t/m³)	COHESIÓN c' (t/m²)	ANGULO ROZAM. INTERNO (º)	MÓDULO DE DEFORMACIÓN (Subsid.) E (t/m²)	COEFICIENTE DE POISSON	COEFICIENTE DE BALASTO K (t/m³)
Rellenos antrópicos	1,80	0,0	28	800-1000	0,35	2000
Rellenos compactados	2,10	1,0	33	3500-4500	0,28	8000-10000
Aluviales	2,00	0,0	32	1000-1500	0,32	5000
Arenas de miga	2,00	0,5-1,0	35	5500-7500	0,30	15000-20000
Arenas tosquizas	2,05	1,0-1,5	33	8000-10000	0,30	15000-20000
Toscos arenosos	2,08	2,0-2,5	32,5	13000	0,30	25000-35000
Toscos	2,10	3,0-4,0	30	15000-18000	0,30	30000-40000

NOTA: Cuando aparecen dos valores, el superior es para niveles profundos (>10 m) o más consolidados o cementados.