

UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL
EXPANSIVO DE LOS SUELOS DEL
NOROESTE DE JAÉN Y ANÁLISIS DE SUS
PROBLEMAS GEOTÉCNICOS**

Alumno: Alicia Sandoval Ríos

Tutor: Prof. D. Julio Antonio Calero González
Depto.: Geología

Junio, 2017



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL
EXPANSIVO DE LOS SUELOS DEL
NOROESTE DE JAÉN Y ANÁLISIS DE SUS
PROBLEMAS GEOTÉCNICOS**

Alumno:
Alicia Sandoval Ríos

Tutor:
Prof. D. Julio Antonio Calero González

Junio, 2017

ÍNDICE

Agradecimientos.....	3
1 Resumen.....	4
2 Introducción	5
2.1 Suelos expansibles	5
2.1.1 Constitución de los suelos expansivos	5
2.1.2 Propiedades de los suelos expansivos	9
2.1.3 Comportamiento de los suelos expansivos	13
2.2 Problemáticas ocasionadas por los suelos expansibles	17
3 Objetivos	18
3.1 Objetivos generales	18
3.2 Objetivos específicos	18
4 Materiales y Métodos	19
4.1 Material	19
4.1.1 Situación geográfica de la zona estudiada	19
4.1.2 Contexto geológico de la zona estudiada.....	19
4.1.3 Toma de muestras para laboratorio.	24
4.1.4 Estudio de patologías constructivas y sus posibles causas.....	25
4.2 Métodos	45
4.2.1 Análisis granulométrico de suelos por tamizado.....	45
4.2.2 Límite líquido.....	47
4.2.3 Límite plástico	48
4.2.4 Presión de hinchamiento y consolidación.....	49
4.2.5 Densidad relativa	51
4.2.6 Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación.....	52
4.2.7 Difracción de Rayos X.....	53
5 Resultados y discusión.....	56
5.1 Muestra 2 (M2).....	56

5.1.1	Parámetros geotécnicos: clasificación, expansividad y consolidación	56
5.1.2	Mineralogía de la muestra.....	70
5.2	Muestra 1 (M1).....	74
5.2.1	Parámetros geotécnicos: clasificación, expansividad y consolidación	74
5.2.2	Mineralogía de la muestra.....	87
5.3	Muestra 3 (M3).....	90
5.3.1	Parámetros geotécnicos: clasificación, expansividad y consolidación	90
5.3.2	Mineralogía de la muestra.....	103
6	Conclusiones	107
7	Referencias bibliográficas	109

AGRADECIMIENTOS

A Julio Antonio Calero González, por darme la oportunidad de realizar este trabajo. Durante la realización del mismo ha sido la principal ayuda y guía, cuyos conocimientos, paciencia y trabajo han posibilitado la finalización de esta etapa tan importante. Gracias a su colaboración y apoyo durante la realización de este trabajo, ha sido posible la finalización del mismo, estando presente en cada paso.

Dar mi especial agradecimiento a Israel Mellado García, ayuda esencial en este trabajo, cuyos conocimientos y consejos han sido claves para la óptima comprensión de la problemática surgida en la zona de estudio, aportando además su experiencia personal, lo cual ha sido un factor muy significativo para la consecución de este trabajo teórico experimental.

A Mario Sánchez Gómez, por su gran ayuda durante la ejecución de la fase experimental de este trabajo, siendo sus conocimientos geológicos de gran ayuda para establecer la base principal de este trabajo.

A Theo Guerra Dug, cuya implicación y disposición han sido de fundamental durante la fase inicial de este trabajo.

A mi familia, ya que sin ellos la realización de este trabajo no habría sido posible. Gracias a su apoyo y animo incondicional bajo cualquier circunstancia.

A mis amigos más cercanos, en especial a Antonio Jesús Rodríguez por el apoyo fundamental recibido durante este último periodo, siendo un empujón esencial para lograr el fin de esta etapa de mi vida.

1 RESUMEN

El objetivo de este Trabajo Teórico Experimental, se centra en la determinación del potencial expansivo de suelos situados en el noroeste de Jaén. Con este análisis, conseguiremos obtener la influencia que posee la composición del suelo en los diferentes problemas geotécnicos que se observan en la zona.

Durante los primeros capítulos del trabajo se desarrollan las características generales de las arcillas y sus componentes mineralógicos, además de introducir nuestra zona en su contexto geológico correspondiente y citar las patologías constructivas observadas a causa de los problemas geotécnicos.

Una vez explicados los ensayos durante el capítulo de materiales y métodos, se extraen las conclusiones de cada uno de los resultados de las muestras extraídas, relacionándolos entre sí. El resultado de los ensayos para las tres muestras determinan que la capacidad expansiva que posee el suelo de referencia es significativa, por lo que se explican los problemas geotécnicos observados.

Abstract.

The objective of this Experimental Theoretical Work is focused on the determination of the expansive potential of soils located in the northwest of Jaén. By this analysis, we will be able to obtain the influence of soil composition in the different geotechnical problems observed in the area.

During the first chapters, the general characteristics of clays and their mineralogical components are developed. Moreover, we introduce our area into the appropriate geological context and cite the constructive pathologies observed due to geotechnical problems.

Once the tests are explained during the materials and methods chapter, conclusions are drawn from each of the results of extracted samples, relating them to each other. Results from tests of the three samples determine that the expansive capacity of the reference soil is significant, which explains the geotechnical problems observed.

2 INTRODUCCIÓN

2.1 Suelos expansibles

2.1.1 *Constitución de los suelos expansivos*

Con el término de suelos expansivos encontramos todos aquellos suelos que presentan cambios de volumen apreciables frente a la modificación de determinadas condiciones físico-químicas. Principalmente, pueden presentarse tres causas diferentes que ocasionan este fenómeno:

- La presencia de minerales arcillosos de estructura laminar expansiva, principalmente los que pertenecen al grupo de las Esmectitas y la Vermiculita, las cuales aumentan su tamaño de manera notable con la presencia de agua.
- La presencia de sulfato sódico (Na_2SO_4) y otras sales afines, como el carbonato sódico (Na_2CO_3) pueden ocasionar, en determinadas condiciones de humedad y temperatura, la formación de cristales de mayor tamaño, provocando el hinchamiento del suelo que los alberga.
- El proceso de congelación del agua en climas templados, ocasionado por la helada puede llegar a afectar a profundidades de poco más de un metro como máximo. Este tipo de proceso requiere presencia de nivel freático en la zona susceptible de congelación, así como un porcentaje determinado de partículas finas de carácter permeable (limos) para que su efecto sea apreciable.

De los tres fenómenos descritos anteriormente, el más habitual es el primero. Por esta casuística, la denominación de suelos expansivos incluye genéricamente aquellos suelos arcillosos cuya estructura mineralógica le permite absorber moléculas de agua con un incremento de volumen notable. Del mismo modo, son capaces de presentar el efecto contrario si hay árboles y vegetación que provoquen un efecto de desecación, ya que al ser más expansiva succiona más agua, pero también es capaz de perderla más rápidamente. Estas variaciones volumétricas son las que producen movimientos intolerables y no previstos a la hora de realizar una construcción.

Más concretamente, en la forma de comportarse de los suelos expansivos influyen, además de su constitución, las variaciones climáticas que se presentan, que por sí solas son capaces de modificar el contenido de humedad en los primeros metros del suelo y, por tanto, alterar su comportamiento.

Las arcillas

El carácter expansivo de un suelo está fundamentalmente relacionado con la presencia de minerales pertenecientes al grupo de las arcillas. En este punto, debe resaltarse que el término arcilla se usa normalmente con cuatro definiciones totalmente diferenciadas:

- Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales, filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino.
- Desde el punto de vista petrológico, la arcilla es una roca sedimentaria, en la mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas.
- Sedimentológicamente, arcilla es un término granulométrico, que abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 2 μm .
- Desde el punto de vista económico, las arcillas son un grupo de minerales industriales con diferentes características mineralógicas y genéticas, que presentan diversas propiedades tecnológicas y aplicaciones.

Observando estas definiciones, vemos que las connotaciones del término arcilla no son solamente mineralógicas, sino que también incluyen el tamaño de partícula. En este sentido, se consideran arcillas todas las fracciones con un tamaño de grano inferior a 2 μm .

Mineralógicamente, las arcillas están compuestas básicamente por aluminosilicatos hidratados, y se integran en el grupo de los filosilicatos o silicatos laminares. Según lo anterior, todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldespatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan los 2 μm .

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

Los filosilicatos

Las propiedades de las arcillas dependen, en gran grado, de las características estructurales de las mismas, por lo que es necesario e imprescindible conocer la estructura que compone a los filosilicatos para tener más datos sobre sus características.

En los Filosilicatos (del griego “phyllon, cuyo significado es “hoja”), se presenta una estructura basada en el apilamiento de iones oxígeno e hidroxilos. La estructura general de los mismos puede observarse en la Figura 2.1. La unidad estructural predominante en los filosilicatos son los tetraedros de silicio y oxígeno. Tres de los cuatro oxígenos de un tetraedro se comparten con grupos contiguos y se desarrollan estructuras en capas o láminas planas infinitamente extensas de composición unitaria Si_2O_5 , que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos, distribuyéndose de tal manera que acaban formando hexágonos. Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita.

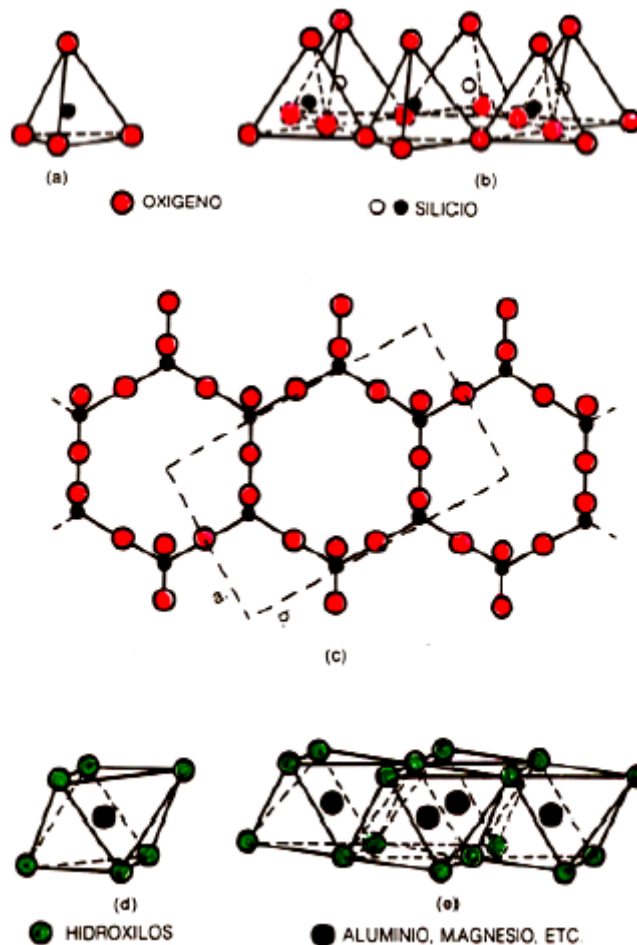
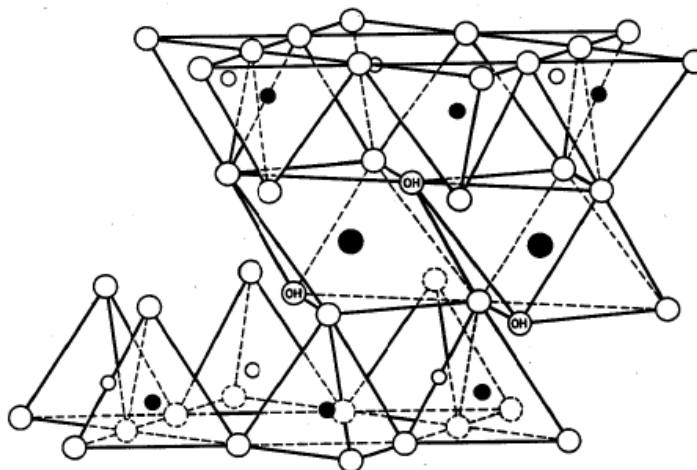


Figura 2.1. Estructura general de los filosilicatos (arcillas): (a).- Tetraedro laminar; (b).- Capa tetraédrica; (c).- Disposición hexagonal de la capa tetraédrica; (d).- Octaedro elemental; (e).- Capa octaédrica. (Ciencia e Ingeniería de los Materiales: estructura y propiedades)

En este grupo mineralógico, se presentan dos tipos de capas cuya disposición relativa (distintas combinaciones en su apilamiento) varía entre dos grupos: capa “t” y capa “o”. La capa t se define como la capa tetraédrica (lámina de tetraedros SiO_4 enlazados, mientras que la capa o se denomina como capa octaédrica, compuesta por

lámina XO_6 , siendo X normalmente Mg o Al. Estas capas pueden combinarse de tal manera que pueden llegar a ser bilaminares, formadas por dos capas 1:1 ó T:O, trilaminares, formadas por tres capas 2:1 ó T:O:T. A la unidad formada por la unión de una capa octaédrica y una o dos tetraédricas se denomina lámina y aparece representada en la Figura 2.2.



*Figura 2.2. Unión entre capas tetraédricas y octaédricas en un filosilicato trilaminar.
(Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales)*

Si todos los huecos octaédricos se encuentran ocupados, la lámina pasa a denominarse trioctaédrica (Mg^{2+} dominante en la capa octaédrica). Si solo se ocupan dos tercios de las posiciones octaédricas, quedando el tercio restante vacío, se denomina dioctaédrica (Al^{3+} es el catión dominante).

En algunos filosilicatos (esmeclitas, vermiculitas, micas) las láminas no son eléctricamente neutras, ya que se sustituyen unos cationes por otros de distinta carga. El balance de carga se mantiene por la presencia, en el espacio interlaminar de cationes (grupo de las micas), cationes hidratos (vermiculitas y esmeclitas) o grupos hidróxilo coordinados octaédricamente, similares a las capas octaédricas (cloritas).

Las fuerzas que se encargan de unir las diferentes unidades estructurales son más débiles que las que existen entre los iones de una misma lámina. Ese es el motivo por el cual los filosilicatos tienen una clara dirección de exfoliación, paralela a las láminas.

En cuanto a la clasificación de los filosilicatos, pueden distinguirse entre bilaminares o trilaminares y, a su vez, dioctaédricos o trioctaédricos. En la Tabla 1 puede verse que, dentro de los filosilicatos, se encuentran grupos tan importantes como las esmeclitas y las micas.

	DIOCTAÉDRICOS		TRIOCTAÉDRICOS	
BILAMINARES T:O 1:1	Grupo de la Caolinita	Caolinita	Grupo de la Serpentinita	Antigorita
		Nacrita		Crisotilo
		Dickita		Lizardita
		Halloysita		Bertierina
TRILAMINARES T:O:T 2:1	Pirofilita		Talco	
	Grupo de las Esmectitas	Montmorillonita	Grupo de las Esmectitas	Saponita
		Beidellita		Hectorita
		Nontronita		Estevensita
	Grupo de las Vermiculitas			
	Grupo de las Micas	Moscovita	Grupo de las Micas	Biotita
		Illita		Flogopita
		Paragonita		Lepidolita
T:O:T:O 2:1:1	Grupo de las Cloritas			
FIBROSOS	Paligorskita		Sepiolita	

Tabla 2.1. Clasificación de los filosilicatos. Galán Huertos, E. (1990)

2.1.2 Propiedades de los suelos expansivos

La forma de comportarse que experimentan las arcillas expansivas radica principalmente en sus propiedades físico-químicas, las cuales derivan principalmente de tres factores:

- Su tamaño de partícula extremadamente pequeño (2 μm)
- Su morfología laminar, propia de los filosilicatos.
- Las sustituciones isomórficas, que provocan la aparición de carga en las láminas y la presencia de cationes muy poco ligados en el espacio interlaminar.

Los dos primeros factores descritos anteriormente, conjugados, provocan que aparezca un valor elevado de la superficie específica, y a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa. Por estos factores, son capaces de interaccionar con muchas sustancias, especialmente con compuestos polares, siendo el más importante el agua. Las consecuencias directas son comportamientos plásticos en mezclas arcilla-agua y el hinchamiento con el desarrollo de cambios mecánicos en suelos con alto contenido en suspensiones acuosas.

Por otra parte, la aparición de carga en las láminas (propias de los filosilicatos) se compensa con la entrada de cationes muy poco cargados y con estado variable de hidratación. A su vez, estos cationes pueden ser intercambiados fácilmente mediante la

puesta en contacto de la arcilla con una solución saturada de otros cationes. Esta propiedad de la conoce como capacidad de intercambio catiónico.

Para definir de forma más concreta los suelos expansivos de tipo arcilloso, se deben detallar las propiedades más relevantes de dichos suelos, las cuales se describen en los siguientes apartados.

Superficie específica

Se define como el área de superficie por unidad de masa (expresándose en m^2/g), que incluye dos superficies, una externa y otra interna. En la superficie externa se producen las interacciones relacionadas con las caras superficiales y con los bordes rotos de las partículas que contienen. Por otro lado, la superficie interna es la zona en la que tienen lugar los intercambios interlaminares.

Las arcillas expansivas se caracterizan por poseer una superficie específica elevada, lo que facilita el contacto de las moléculas de agua con la estructura de las partículas de arcilla.

Capacidad de intercambio catiónico

Se define como la capacidad de intercambiar, de forma sencilla, los iones fijados en la superficie exterior de los cristales que conforman el mineral, en los espacios interlaminares o en otros espacios interiores de las propias estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. Se expresa en mili-equivalentes por cada 100 g. de arcilla seca a 110°C y es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral.

Al hablar de las arcillas, se conoce que los cationes son atraídos hacia las partículas arcillosas debido a la carga negativa que poseen. Sin embargo, a esta atracción se opone el hecho de que los cationes tienden a repartirse por igual en la fase líquida del sistema. Todo esto resulta en una distribución difusa de los iones alrededor de las partículas arcillosas: la concentración de cationes disminuye a medida que nos alejamos de la superficie de la partícula. De este modo, se forma una doble capa eléctrica, negativa en la capa arcillosa y positiva en la zona próxima a ella, en la que la concentración de cationes es alta, de ahí su nombre de capa difusa.

Los cationes adsorbidos (los más frecuentes son Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ y Li^+) en la superficie de los minerales de la arcilla influyen en su capacidad de cambio de volumen por medio de sus propiedades de hidratación, los cationes se fijan a la arcilla de una manera u otra como resultado de la carga eléctrica de éstos. (González de Vallejo et al, 2003). Debido a sus valencias, radios iónicos y propiedades de hidratación, los diferentes cationes son adsorbidos con diferente intensidad.

Como resultado de lo anteriormente descrito sabemos que, cuanto mayor sea el radio iónico y la valencia, más cerca y con más fuerza será adsorbido el ion. Sin embargo, cuanto mayor es el grado de hidratación del ion, más lejos se encontrará de la superficie de adsorción y más débil será su unión. Por todo esto, una mayor capacidad de cambio de cationes implica un mayor potencial expansivo del suelo.

Capacidad de absorción

Algunos tipos de arcillas, entre las que se encuentran las expansivas, son capaces de absorber agua u otras moléculas localizadas en su espacio interlaminar o en los canales que conforman su estructura. Esa capacidad de absorción está relacionada de forma directa con las características texturales de las arcillas (superficie específica y porosidad). De este modo, se presentan dos tipos de procesos, que rara vez aparecen de forma aislada, absorción y adsorción. La absorción se da cuando los procesos son fundamentalmente físicos, como la retención de agua por capilaridad, mientras que la adsorción se da cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente (arcilla) y el líquido o gas adsorbido (adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de la que se trate. Esta capacidad puede ser, en caso de que el adsorbato sea agua, mayor del 100% del peso de la arcilla.

Hidratación e hinchamiento

En cuanto a expansividad se refiere, los factores que más interfieren en las arcillas son la hidratación y deshidratación de las mismas, provocando el primer factor un hinchamiento y aumento de volumen en el terreno que contiene este tipo de suelo.

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar en los suelos con contenidos arcillosos ocurren independientemente del tipo de cambio catiónico que se produzca, pero por el contrario, el grado de hidratación si depende de forma directa de la naturaleza del catión interlaminar y de la carga existente en la lámina.

El hinchamiento está muy directamente relacionado al grado de hidratación que posea la arcilla en cuestión. Éste fenómeno aparece cuando se produce la adsorción de agua en el espacio interlaminar, ya que provoca la separación de dichas láminas, dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende de la relación existente entre la atracción electrostática entre el catión y la lámina y la energía de hidratación que contiene el catión. De este modo, cuando se van intercalando capas de agua y la distancia entre láminas se hace mayor, las fuerzas predominantes son las de repulsión electrostática entre láminas,

contribuyendo esto a que la acción de hinchamiento llegue a separar completamente unas láminas de otras.

Según la procedencia del catión interlaminar, el grado de disociación entre láminas varía en gran medida. Si el catión interlaminar es Sodio, puede provocar un gran hinchamiento en las esmectitas, llegando a dar lugar a una completa disociación de los cristales contenidos en éstas, dando como resultado un elevado grado de dispersión y un enorme desarrollo de propiedades coloidales. Sin embargo, si el catión interlaminar es Calcio o Magnesio, la capacidad de hinchamiento será mucho menor.

Plasticidad

La plasticidad es un rasgo muy característico de las arcillas. Esa propiedad puede definirse como la capacidad que tienen las partículas laminares de adsorber agua en la superficie, causando un efecto lubricante que facilita el deslizamiento entre partículas cuando se ejerce un esfuerzo sobre las mismas. El elevado valor de plasticidad en las arcillas aparece como consecuencia de su morfología laminar, alta capacidad de hinchamiento y pequeño tamaño de partícula.

La plasticidad puede ser cuantificada a partir de los tres límites definidos por Atterberg: el límite de retracción o consistencia que separa sólido y el semisólido, el límite plástico que separa el estado semisólido del plástico y el límite líquido que separa el estado plástico del semilíquido (Jiménez Salas, et al., 1975). Estos dos últimos límites serán determinados en este trabajo. Estos estados marcan una disociación arbitraria entre los cuatro modos de comportamiento que tiene un suelo: sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso. Existe una gran diversificación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla en función del catión de cambio, inclusive para un mismo mineral de la arcilla. Esta variación es debida a la diferencia de tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal ya que, generalmente, cuanto menores son las partículas, refiriéndonos a su tamaño, y más imperfecta es su estructura, resulta un material más plástico.

Para obtener datos sobre la composición granulométrica, naturaleza, calidad y comportamiento de la arcilla, se debe atender a la relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad. Esta relación se establece en la Carta de Casagrande, representada en la Figura 2.3, mediante la cual se determina el tipo de suelo.

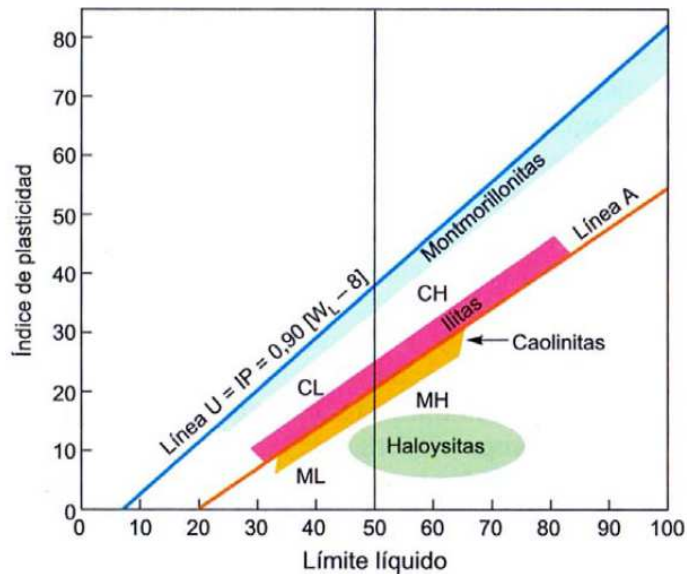


Figura 2.3. Relación entre límite líquido e índice de plasticidad de diversas especies de arcillas.
Holtz & Kovac (1981)

Los tipos de suelo de grano fino que pueden determinarse mediante este método son los siguientes:

- ML: Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas.
- CL: Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.
- MH: Limos inorgánicos, arenas finas o limos con mico o diatomeas, limos elásticos.
- CH: Arcillas inorgánicas de elevada plasticidad.

Actividad

Skempton (1953) encontró que si se toman una serie de muestras de un estrato de arcilla, representando en abscisas la fracción granulométrica arcillosa ($< 2 \mu\text{m}$), y en ordenadas el índice de plasticidad, se obtiene una relación lineal entre ambos parámetros. A esta relación se le conoce como actividad de una arcilla, y se calcula dividiendo el Índice de Plasticidad entre el contenido de arcilla de cada una de las muestras.

2.1.3 Comportamiento de los suelos expansivos

La expansividad de un suelo se puede resumir como un efecto ocasionado cuando se añaden moléculas de agua en la red cristalina de dicho suelo, disminuyendo o anulando las cadenas de silicatos que se encuentran unidas por enlaces débiles, causando que la arcilla aumente de volumen sin variar sus propiedades químicas. Si

posteriormente cambian las condiciones de humedad, las moléculas de agua adsorbidas serían expulsadas de la red cristalina, causando una disminución de volumen, también denominada retracción.

Con todo esto debemos saber que, para estudiar el comportamiento de los suelos expansivos, el comportamiento de estos puede ser reversible, condicionado por factores del propio material, intrínsecos, y extrínsecos al mismo.

Factores intrínsecos

Los factores intrínsecos, dependientes de la propia génesis del suelo, son los que definen su comportamiento frente a los cambios de volumen. Estos factores son fundamentalmente cuatro: su contenido en arcilla, su estructura, su mineralogía y su fábrica. Podría decirse que dichos factores son los encargados de definir el potencial expansivo del suelo. La expansividad de los suelos está profundamente ligada a la constitución físico química de los suelos y del tamaño de sus partículas.

Las arcillas están constituidas por láminas muy delgadas de silicatos que, por la forma de distribuirse sus átomos en las respectivas mallas cristalinas, dejan cargas negativas libres en sus caras. En cuanto a los bordes que se forman cuando las láminas se rompen, las cargas en ellas pueden ser positivas o negativas. Las cargas negativas de las partículas atraen a su superficie el extremo positivo de los dipolos de agua y cationes salinos de diversa naturaleza. A su vez, los cationes cuya carga no queda totalmente neutralizada, atraen a su alrededor a otras moléculas de agua. Todo el conjunto anteriormente descrito constituye la capa doble difusa, explicada gráficamente en la Figura 2.4, negativa en la superficie de la partícula de arcilla y positiva en la zona más próxima, teniendo una elevada concentración de cationes. La fuerza de atracción de las caras de las partículas de arcilla va disminuyendo con la distancia y, como consecuencia, también disminuye la cantidad de iones.

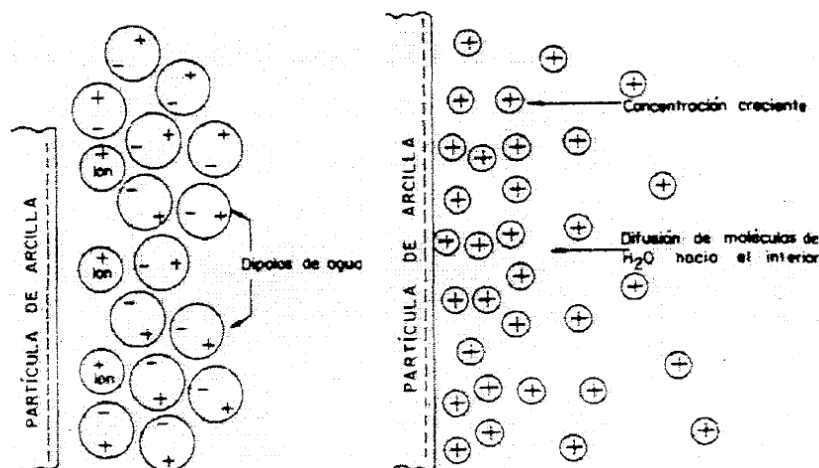


Figura 2.4. Capa doble difusa. (Fundamentos de Química Analítica).

La variación de la concentración con la distancia es una de las causas de que, cuando se pone un suelo en contacto con el agua libre, ésta tienda, mediante ósmosis, a entrar en la capa doble, para diluir el mayor contenido salino de las proximidades de las caras de las partículas de suelo e igualar la concentración en el conjunto. Como consecuencia, se origina una variación de volumen.

Dependiendo de las características de las arcillas, habrá mayor o menor cantidad de cargas libres en la superficie de sus partículas y, por ende, podrán absorberse mayor o menos número de cationes. Según la naturaleza de estos cationes, denominados cationes de cambio, la arcilla tomará mayor o menor cantidad de agua, cambiando sus características expansivas.

Generalmente, las características expansivas de los minerales de arcilla aumentan con la capacidad de cambio de cationes.

Factores extrínsecos

A diferencia de los factores intrínsecos, los extrínsecos no determinan el potencial expansivo del suelo, pero sí lo regulan, disminuyéndolo o intensificándolo en función del contenido de humedad del suelo. No dependen de la composición ni estructura de los suelos, sino de agentes externos, entre los cuales los más importantes son los siguientes:

- **Variaciones climáticas:** De éstas depende la presencia de agua necesaria para producir la expansión o retracción del suelo.
- **Vegetación:** Puede modificar localmente el contenido de humedad del terreno, teniendo como consecuencia cambios de volumen en suelos potencialmente expansivos. Existen especies con mayor propensión por el agua, que pueden causar mayores gradientes higrométricos. Uno de los aspectos que presentan los daños producidos por la vegetación es que

tardan mucho tiempo en presentarse (entre 6 y 12 años), hasta que los árboles alcanzan un desarrollo adulto.

- Cambios hidrogeológicos: Los cambios en el nivel freático en zonas cercanas a la superficie, ocasionadas por los propios cambios climáticos o por la acción del hombre, puede afectar al estado de humedad del suelo y, por tanto, a su volumen.

Más adelante en este trabajo, analizaremos uno de los factores extrínsecos, las zonas arbóreas próximas a las zonas de estudio, para determinar su influencia en el terreno.

Comportamiento expansivo aparente de un suelo

Sabemos que la expansividad que posee un suelo tiene un carácter potencial dependiente de la mineralogía y estructura del suelo (factores intrínsecos), pero esta propiedad se mostrará en mayor o menor medida dependiendo de los factores extrínsecos, tales como las condiciones climáticas de la zona o las variaciones de humedad natural que muestra el suelo. De este modo, puede darse el caso de que una arcilla muy expansiva no exponga su comportamiento en condiciones climáticas favorables, de escasa humedad del suelo, o bien una arcilla poco expansiva presente un comportamiento geotécnico perjudicial para las construcciones en condiciones climáticas hostiles, con grandes variaciones de la humedad superficial del suelo.

Uno de los aspectos fundamentales a explicar para entender cómo afecta la expansividad es el concepto de capa activa del suelo (Figura 2.5). Ésta capa se define como la zona en la que se dan los procesos de variación de humedad que ocasionan el hinchamiento. En España, los estudios suelen situar dicha capa entre los 3-4 primeros metros de profundidad.

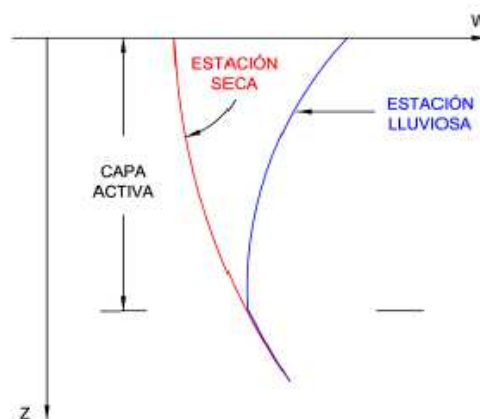


Figura 2.5. Concepto de capa activa en un suelo expansivo. (Alonso, E., Suelos Expansivos. Curso Aplicado de Ingeniería del Terreno)

Las arcillas suelen recibir agua de las precipitaciones o de las instalaciones que se encuentren en esa capa superficial (árboles, zonas ajardinadas, conducciones de aguas pluviales, etc). Del mismo modo, perderán el agua que contengan mediante el factor externo de la evaporación y migración por capilaridad. Todos estos cambios se producirán en la zona más superficial del suelo, justo donde encontramos la capa activa. Por debajo del límite de la capa activa, la variación de humedad es mínima, haciéndola insignificante.

2.2 Problemáticas ocasionadas por los suelos expansibles

La problemática real de las arcillas expansivas radica más en el desconocimiento de su presencia, que en su propia peligrosidad intrínseca. Si se detectan en un determinado emplazamiento, existe sobrada metodología para evitar su nefasta influencia sobre la obra a realizar, pero puede ocurrir que pasen desapercibidas en un reconocimiento geotécnico poco riguroso, con el resultado de importantes daños, incluso ruina estructural, que irán apareciendo con el tiempo.

Los problemas más comunes provocados por la expansividad suelen aparecer en inmuebles antiguos, en las cuales es probable que no se siguiese un estudio geotécnico riguroso a la hora de la construcción de los mismos. La expansividad, al provocar cambios de volumen en el suelo sobre el que se asientan las edificaciones, hace que parezcan las patologías y problemas de los cuales se hablará de forma concreta más adelante.

Tal y como se especifica en el artículo Una et al., 2015, el colapso de una estructura puede venir dado por la incapacidad del suelo para soportar el peso de un edificio. Suele ocurrir cuando el peso del edificio sobrepasa el cojinete permisible del suelo causando el asentamiento irregular del edificio. La pérdida de vidas, lesiones graves y enormes pérdidas económicas en millones de euros se asocian principalmente con el colapso del edificio.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos generales

Este trabajo fin de grado contiene una fase experimental de investigación efectuada sobre muestras de suelo extraídas en la zona noroeste de Jaén, más concretamente en la localidad de Navas de San Juan.

Mediante diversos ensayos e investigaciones, se pretende determinar el potencial expansivo de los suelos de esta zona, mediante ensayos de las muestras de dichos suelos y la interpretación de los mismos. Estos ensayos son complementados con un estudio de la problemática que aparece en diversas viviendas de la zona y la flora que rodea a las mismas.

Como conclusión, se pretende determinar el carácter expansivo de éstos suelos, relacionando entre si cada una de las propiedades que reflejan los ensayos realizados.

3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo teórico experimental de fin de grado se pueden resumir en los citados a continuación:

- Análisis geológico y muestreo de los suelos del área estudiada y levantamiento de la columna estratigráfica, señalando los principales tipos de materiales presentes.
- Caracterización geotécnica de los horizontes muestreados. Para ello se llevarán a cabo los ensayos necesarios para realizar una clasificación del suelo (según la clasificación de Casagrande modificada). Estos ensayos vienen recogidos en las normas UNE 103 101, UNE 103 102, UNE 103 103, UNE 103 104.
- Caracterización de las propiedades de compresión de los materiales muestreados mediante realización de ensayo de consolidación con edómetro (UNE 103 405), para un conocimiento más completo del comportamiento mecánico de las muestras.
- Determinación del potencial expansivo de los horizontes muestreados mediante el ensayo de presión de hinchamiento (UNE 103 601).
- Estudio detallado de la composición mineralógica de las muestras mediante difracción de rayos-X (DRX).
- Relacionar las propiedades compositivas y mineralógicas con el comportamiento mecánico del suelo puesto de manifiesto mediante los ensayos geotécnicos, especialmente con la presión de hinchamiento.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Material

4.1.1 Situación geográfica de la zona estudiada

Este proyecto tiene su origen en la zona noroeste de Jaén, más concretamente en el municipio de Las Navas de San Juan (38.184224, -3.315560), en el borde meridional de la meseta ibérica. Su localización y zonas anexas representativas quedan mostradas en la Figura 4.1.



Figura 4.1. Mapa topográfico de la comarca (Navas de San Juan)

Con una población de 4.597 habitantes (INE 2016), es el municipio con mayor número de habitantes de la comarca de El Condado. Por su término municipal discurren los ríos Guadalimar, Guadalén y Guarrizas.

Dentro del municipio de Navas de San Juan, este proyecto se centra en el barrio de La Estrella, anexo a la plaza de toros del municipio, en el cual se realizan los estudios de patologías y toma de muestras que se especificarán con detalle más adelante.

4.1.2 Contexto geológico de la zona estudiada

El área en la que se sitúa nuestra zona de estudio se emplaza en la parte nororiental de la Cuenca del Guadalquivir. Esta zona ha sido minuciosamente estudiada, desde el punto de vista geológico, por el artículo Gómez et al. 2014. Dicha cuenca se denomina cuenca de antepaís de la Cordillera Bética, situándose entre el Macizo Ibérico al

norte y la propia Cordillera Bética, al sur. Actualmente, la Cuenca del Guadalquivir muestra una geometría triangular, alargada en su sentido NE-SO y abierta hacia el Océano Atlántico en su extremo SO. La formación de esta cuenca tuvo lugar en el Mioceno medio, más concretamente en el Langhiense superior (Fernández et al., 1998), (que se extiende por el tiempo entre $15,97 \pm 0,05$ Ma y $13,65 \pm 0,05$ Ma), edad de los sedimentos más antiguos que se encuentran discordantes por encima del basamento Paleozoico y de la Cobertera Tabular, zona en la cual se sitúa más concretamente nuestra zona de estudio, aunque su relleno más importante se produce durante el Tortoniense (Martínez del Olmo et al., 1984). Desde el Mioceno superior hasta la actualidad ha tenido una evolución condicionada por la estructuración de la Cordillera Bética, generándose varias secuencias deposicionales marinas, progresivamente más jóvenes en sentido NE-SO, hasta producirse su continentalización en el Cuaternario (Ríaza y Martínez del Olmo, 1996; Sierro et al., 1996).

Esta cuenca, como las típicas cuencas del antepaís, muestra una importante asimetría en su basamento, debido a la flexura que se origina en el Macizo Ibérico por el sobrepeso que supone el cinturón de pliegues y cabalgamientos subbéticos y prebéticos, y la superposición del propio Dominio de Alborán (aflorante en la rama del Arco de Gibraltar durante el Cenozoico) sobre la litosfera (Fernández et al., 1998; García-Castellanos et al., 2002). Debido a esto la Cuenca del Guadalquivir muestra dos márgenes completamente diferentes: el margen norte, formado por materiales paleozoicos de la Orogenia Varisca y mesozoicos de la Cobertera Tabular, poco subsidente y alejado de la deformación bética; y el margen sur, mucho más subsidente.

Más detalladamente, la sedimentación en el margen norte está caracterizada por el depósito de unidades de edad Mioceno superior (Tortoniense - Messiniense), en un contexto marino somero con influencia continental, que evolucionan a materiales hemipelágicos hacia el sur, donde se encontraría la zona más profunda de la cuenca. Estas unidades se depositan discordantes sobre materiales de la Cobertera Tabular, o sobre unidades paleozoicas del basamento varisco, y corresponden al relleno autóctono de la Cuenca del Guadalquivir. A grandes rasgos, este relleno autóctono está constituido por conglomerados, calcarenitas y areniscas calcáreas en las zonas próximas al antepaís ibérico, que pasan a niveles de margas con paquetes de areniscas subordinados hacia la parte más interna de la cuenca. En la columna estratigráfica que se observa en la Figura 4.2, podemos observar de forma más visual lo descrito anteriormente.

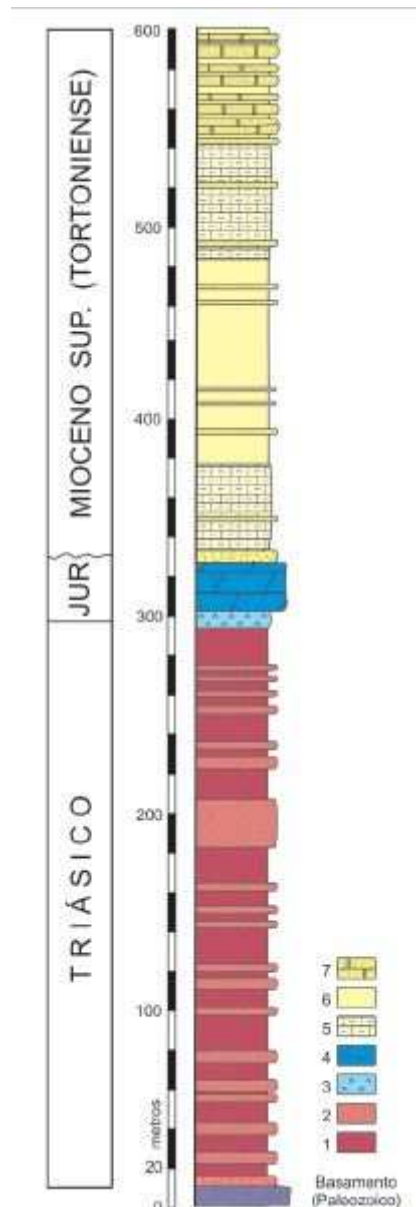


Figura 4.2. Columna estratigráfica: 1.- Arcillas y Lutitas. 2.- Areniscas. 3.- Yesos bandeados. 4.- Dolomías. 5.- Margas calcáreas. 6.- Margas y arcillas. 7.- Areniscas calcáreas (Sánchez et al., 2014).

Por el contrario, el margen sur de la Cuenca del Guadalquivir presenta una mayor complejidad en cuanto a la organización de las unidades presentes, siendo además discutido su génesis y su modo de emplazamiento. Tras varias teorías, se ha impuesto la hipótesis del origen gravitacional para explicar el borde meridional de la Cuenca del Guadalquivir. De hecho, Roldán-García y García-Cortés (1988), definen la unidad Olistostrómica, emplazada en el Serravalliense (edad geológica que sigue al Langhiense) como un gran olistostroma, definiendo olistostroma como depósito sedimentario constituido por una masa de bloques de roca, dispuestos caóticamente junto con gravas y

arenas, inmersos en una matriz arcillosa, que se ha constituido a partir de un deslizamiento gravitatorio submarino, típicos de fosas oceánicas dispuestas en zonas de subducción.

Adentrándonos en las características geológicas que abarca nuestra zona de estudio, observamos la pertenencia de la misma a la denominada Cobertera Tabular, citada anteriormente.

La localidad de Las Navas de san Juan se encuentra en una zona geológica en la que predominan las geologías propias del Trías Tabular de la Meseta, arcillas, margas y conglomerados del Plioceno-Cuaternario, tal y como se observa en la Figura 4.3.

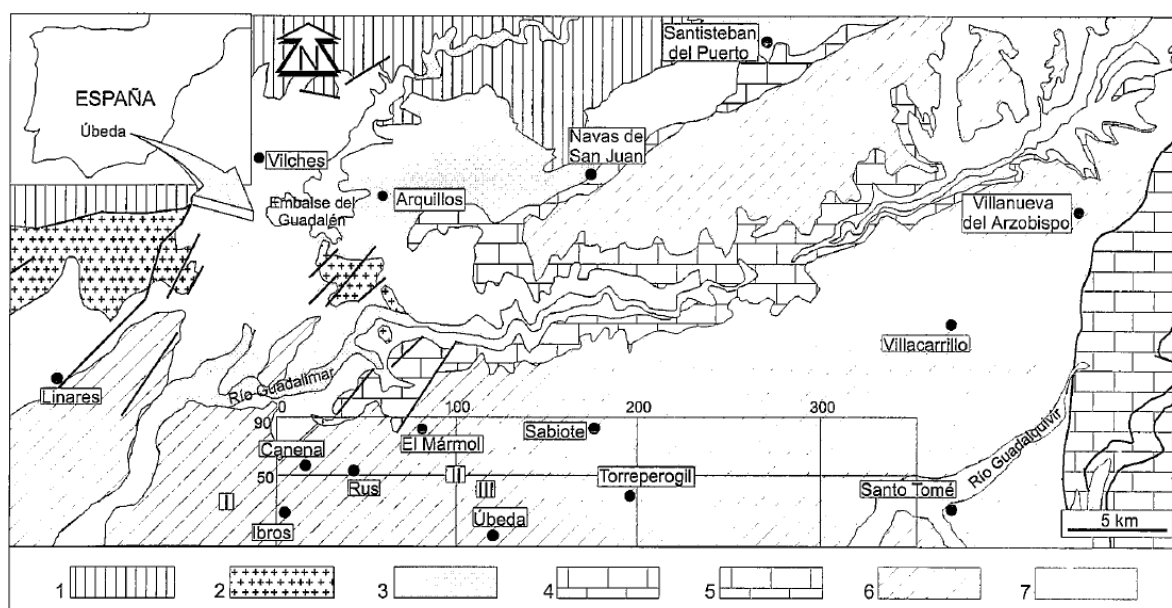


Figura 4.3. Mapa de características geológicas: 1.- Filitas; 2.- Granito; 3.- Trías Tabular de la Meseta; 4.- Dolomías tabulares (Jurásico inferior); 5.- Dolomías del Prebético (Jurásico inferior); 6.- Margas con niveles detríticos (Mioceno superior); 7.- Arcillas, margas y conglomerados (Plioceno-Cuaternario)(Sánchez et al., 2014).

En cuanto al Trías Tabular de la Meseta, aflora extensamente al norte del Río Guadalimar. La base de esta unidad fossiliza un paleorrelieve paleozoico. Su posición es subhorizontal y presenta una potencia variable, que oscila entre los 50 y 300 m. En estos materiales son características sus coloraciones rojizas, por lo que también se les conoce como “Facies Detríticas Rojas” del borde de la Meseta. La serie se inicia con un conjunto de 10-20 m de potencia de niveles conglomeráticos o areniscosos intercalados en arcillas. Los conglomerados contienen cantos de gran madurez textural y diámetros entre 2 y 5 cm. Sobre esos niveles basales se desarrolla un potente conjunto sedimentario, con espesores generalmente superiores a los 100 m, constituidos fundamentalmente por lutitas de colores rojos-vinosos, en las que también aparecen finas intercalaciones de

areniscas en capas tabulares o con base canalizada. Este conjunto de facies presenta espesores variables, entre 5 y 60 m, aumentando su potencia hacia el sur.

Centrándose en la aportación geológica del Jurásico Tabular, se especifica que aflora en el valle del Río Guadalimar y en las proximidades de las Navas de San Juan y Santisteban del puerto. Aparece subhorizontal o con suaves buzamientos hacia el sureste, directamente sobre los materiales triásicos, en aparente continuidad estratigráfica. Se trata de carbonatos fuertemente brechificados y dolomitizados, lo que origina una importante porosidad secundaria. En algunas ocasiones observan restos de laminación algal (estromatolitos planares) e intercalaciones calcareníticas. La potencia, muy variable, disminuye generalmente hacia el oeste; al norte de Villacarrillo el espesor supera los 70 m, al norte de Sabiote oscila entre 30-50 m, al norte de Rus no supera los 10 m, desaparece totalmente al oeste de Canena. Sin embargo, esta tendencia no puede generalizarse ya que en las proximidades de Villanueva del Arzobispo, donde la potencia de la unidad debería ser considerable, no supera los 20 m. Aunque no existen criterios bioestratigráficos, este conjunto litológico ha sido atribuido a las Lías inferior en función de sus facies y de la posición estratigráfica. Al sur de Úbeda, la cobertera tabular de la meseta limita con la Depresión del Guadalquivir, donde los materiales anteriormente comentados no afloran en continuidad estratigráfica, sino que aparecen como olistolitos inmersos en margas del Mioceno medio. A este conjunto se le conoce con el nombre de “Unidad Olistostrómica”, la cual hemos mencionado con anterioridad, definiendo los olistostromas. En el sector Villacarrillo-Villanueva del Arzobispo (Alto Guadalquivir) no se describen unidades de tipo olistostrómico para el Neógeno entre la Cobertera Tabular y la Zona Prebética, por lo que cabe la posibilidad de que, en profundidad, el Jurásico Tabular esté en contacto con el Jurásico Prebético.

En la Figura 4.3 se presenta la columna estratigráfica correspondiente a la zona de toma de muestras. En la misma se observa la distribución de los diferentes estratos que la componen, estando formados por suelos de las tres muestras extraídas para la realización de los ensayos (M1, M2 y M3). Esta columna abarca una profundidad de aproximadamente 13 metros, en los cuales se observa un predominio de las muestras M2 y M3 frente a M1. A una altura de 5 metros, comenzando por el punto 0 de la columna, se hayan signos de la presencia de yesos. La capa situada a unos 7 metros de altura, con un espesor de 2 metros aproximadamente, se presenta litificada, ya que se encuentra compactada, presentándose casi en forma de roca sedimentaria.

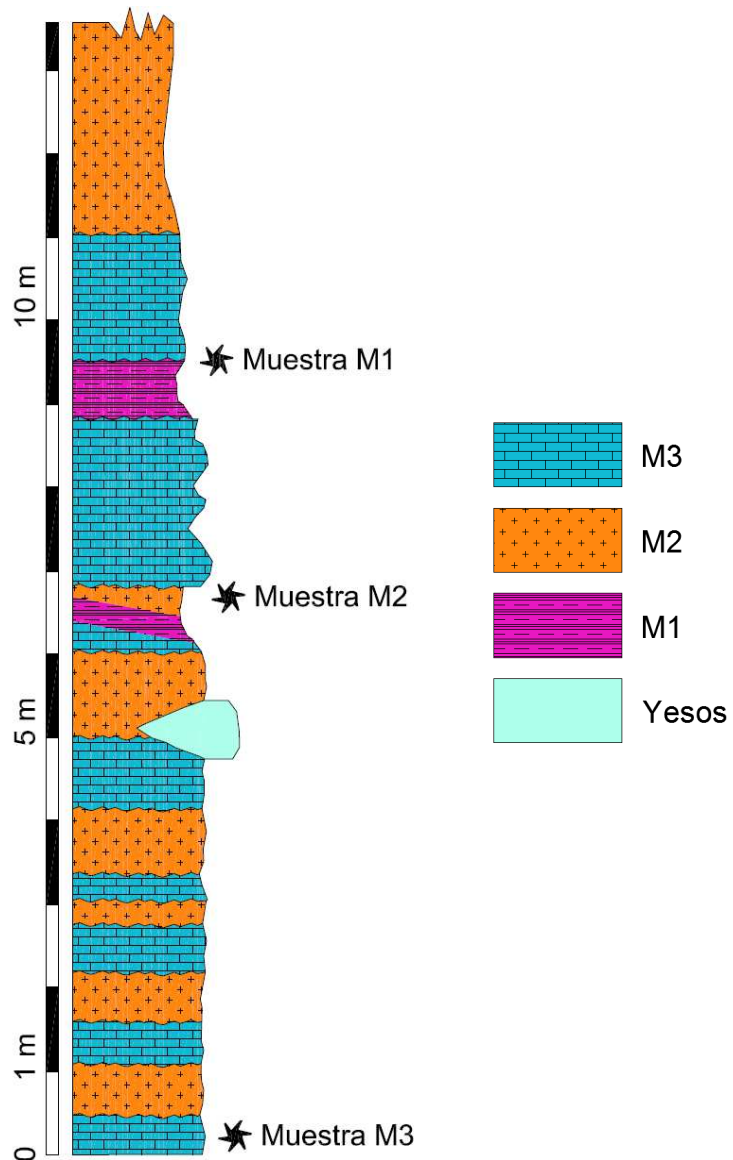


Figura 4.4. Columna estratigráfica correspondiente a la zona de muestreo.

4.1.3 Toma de muestras para laboratorio.

La toma de muestras para la realización de los diferentes ensayos de este proyecto se localiza en una zona anexa al barrio de La Estrella (Figura 4.5).

En la zona exacta de toma de muestras se podía observar los diferentes estratos que componen el suelo, diferenciándose tres, de los cuales se procede a la extracción de fracciones de tierra para su posterior ensayo.



Figura 4.5. Zona de toma de muestras.

Para la recogida de muestras, se usan cilindros de pvc denominados toma muestras manuales (60 cm, 6x6 cm). Por último, se recogen muestras de suelo mediante una pequeña pala y se introducen en bolsa de plástico, numerando cada una con su tipo de muestra correspondiente. Estas muestras de suelo se destinan al ensayo de clasificación del suelo (Límite Líquido, Límite Plástico y Granulometría).

4.1.4 Estudio de patologías constructivas y sus posibles causas

En esta parte del estudio, analizaremos el tipo de patologías constructivas que se presentan en viviendas cercanas a la zona de toma de muestras. Realizaremos dicho análisis para intentar explicar la causa de estas patologías y, comparando con los resultados obtenidos de los ensayos de las muestras recogidas, poder determinar si intervienen o no en la aparición de dicha problemática.

A parte, se estudian las zonas ajardinadas anexas a dichos inmuebles, para comprobar si éstas intervienen en el terreno como para poder causar la aparición de grietas y demás problemas constructivos observados.

A continuación se proceden a explicar las causas más frecuentes de la aparición de fisuras y grietas en cerramientos exteriores. Una vez se especifiquen las causas más comunes, se conseguirá decidir cuál de ellas es la que más afecta a las patologías que aparecen en las viviendas objeto de estudio.

Condiciones climáticas:

Por norma general, las condiciones climáticas son las que más intervienen en la aparición de problemas en cerramientos exteriores, ya que son éstos los que soportan todo tipo de inclemencias atmosféricas, cumpliendo su función de proteger el interior de las viviendas. Las causas más comunes son las filtraciones de agua desde el terreno o el uso de materiales muy porosos, en los cuales el agua encuentra un lugar de resguardo que, al congelar en épocas de invierno, producen roturas en los materiales de acabado del muro y, en muchos casos, afectan a la propia estructura del mismo provocando daños a nivel interno.

Los factores relacionados con la intemperie pueden afectar también al cambio de volumen en el muro. Este cambio se debe a la cristalización de las sales existentes en el interior del muro, contenidas en los materiales que lo conforman. Una vez aparece esta cristalización, es muy probable que produzca la disgregación de la estructura interna de los materiales que conforman el muro. Todos estos cambios provocan que, en todo tipo de muro y mucho más en los antiguos, aparezcan fuertes tensiones que dicho cerramiento no sea capaz de soportar, visualizando los síntomas de ésta “dolencia” con la aparición de grietas.

Causas mecánicas:

Estas causas son las que se originan en tensiones ejercidas sobre el muro y que pueden provocar su aplastamiento, deformación, aparición de grietas, derrumbe, etc. Los factores desencadenantes más comunes son las sobrecargas, los movimientos inherentes a todo edificio y, en las que más nos centraremos en este estudio, los asientos diferenciales y empujes del terreno.

Las fisuras y grietas son siempre síntomas del agotamiento del elemento constructivo, causado por la aplicación de sollicitaciones, directas o indirectas, que éste no puede soportar y que puede llevarlo hasta el colapso y rotura. Aparecen cuando la tensión provocada por la sollicitación sobrepasa la capacidad de deformación elástica del material que conforma el elemento constructivo.

La diferencia principal entre fisuras y grietas se basa en el grosor de éstas. Las fisuras permanecen en la parte más superficial del muro, normalmente atacan sólo al acabado del mismo, mientras que las grietas afectan a la mayoría o a todo el grosor del cerramiento, afectando seriamente a su estabilidad.

La dirección, grosor y progresión de las grietas nos pueden dar una información muy valiosa sobre el problema que está sufriendo el elemento constructivo.

En este caso, no es posible analizar de forma continuada la progresión de las mismas, ya que es un procedimiento prolongado en el tiempo e invasivo. Éste procedimiento consiste en la aplicación de testigos de yeso, atravesando la grieta, en los

cuales se anota la fecha en la que se realiza. Pasado un tiempo, si se trata de una grieta viva y ha ido aumentando su tamaño, se podrá ver fácilmente en los efectos que haya ocasionado en el testigo colocado. Este es uno de los métodos más usado para comprobar si una grieta es viva o muerta, ya que es fácilmente apreciable por cualquier tipo de personas, bien sean técnicos y especialistas en la materia o no.

Otro aspecto de las grietas que sí pueden aportarnos información en nuestro estudio es la dirección y lugares de aparición de las mismas. Mostraremos los tipos de grietas y causas más frecuentes en la Figura 4.6:

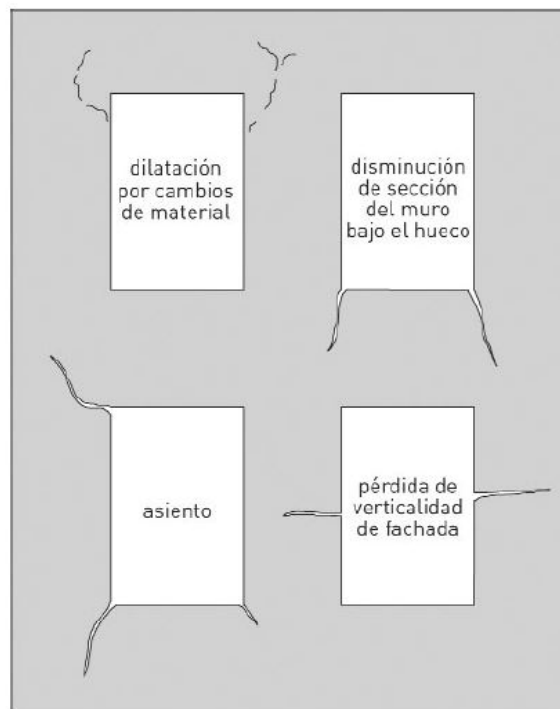


Figura 4.6. Fisuras y grietas según el tipo de problema (Enciclopedia Broto de Patologías Constructivas).

La dilatación por cambios de material, disminución en la sección del muro, el asiento o la pérdida de verticalidad en la fachada son las causas que describen la aparición de grietas del modo que representa la figura (*), siendo éstas la casuística más frecuente en la visión de las mismas.

Análisis de las viviendas cercanas a la zona de estudio

Fachada 1:

Vivienda observada en la Figura 4.7 con acceso desde C/ Miguel Hernández. Muy buen estado de conservación, ya que se intuye un mantenimiento óptimo de la vivienda. No se perciben grietas ni desperfectos importantes. Presenta pequeñas fisuras

superficiales que afectan únicamente al revestimiento de la fachada. Suelen aparecer en zonas en las que se intuye un cambio de material constructivo, como los encuentros entre forjado y cerramiento. Dicho cambio de material, al no estar ejecutado de forma correcta, hace que aparezcan estos problemas superficiales que afectan al acabado de la fachada.



Figura 4.7. Fachada 1.

Fachada 2:

Vivienda observada en la Figura 4.8 con acceso por Avenida Virgen de la Estrella. No presenta daños graves como grietas, pero si se observan zonas en las que se producen desconchones y se desprende el recubrimiento de la fachada. Esto es debido a la pérdida de cohesión del material usado para enlucir dicha fachada, causado por no haber preparado de manera adecuada la superficie antes de aplicar el material de recubrimiento. Además, se añade el efecto de los cambios de temperatura que, junto a mala conservación de la fachada, provoca éste estado. En efecto cadena, el estado de la edificación empeora ya que las zonas carentes de recubrimiento son puntos muy susceptibles por lo que el agua accede, deteriorando el muro portante y haciéndolo débil a problemas como movimientos del terreno.



Figura 4.8. Fachada 2 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 3:

Vivienda observada en la figura 4.9 con acceso por Avenida Virgen de la Estrella. Como en la fachada 2, se observa la pérdida de cohesión en el material de agarre, aunque en este caso el estado de conservación es mejor. Presenta fisuras más pronunciadas en el dintel que conforma la puerta de entrada al inmueble. La causa de estas fisuras puede ser la diferencia de material entre el dintel y el cerramiento que conforma parte de la fachada, ya que si no se ejecuta debidamente esta unión, el grado de dilatación y retracción de los materiales a causa de los cambios de temperatura es diferente, lo que provoca la aparición de las fisuras que se observan en la Figura 4.9. A esto se le añade la susceptibilidad a los movimientos del terreno



Figura 4.9. Fachada 3 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 4:

Vivienda observada en la Figura 4.10 con acceso por Avenida Virgen de la Estrella. Se encuentra en muy buen estado de conservación, apreciándose reparaciones más o menos recientes, las cuales han solucionado los daños de desprendimiento del material de cubrición de la fachada en la zona próxima a uno de los huecos que forma la ventana. Estas zonas de los cerramientos son siempre las más susceptibles de sufrir daños, fisuras y grietas en su mayoría.



Figura 4.10. Fachada 4 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 5:

Vivienda observada en la Figura 4.11 con acceso por Avenida Virgen de la Estrella. Se encuentra en muy buen estado de conservación. No se aprecian desperfectos ni patologías en la fachada debido a su continuo mantenimiento.



Figura 4.11. Fachada 5.

Fachada 6:

Vivienda observada en la Figura 4.12 con acceso por la plaza, a la cual se accede desde Avenida Virgen de la Estrella y por Calle Federico García Lorca. Esta vivienda tiene entre 50-60 años de antigüedad. Presenta patologías más importantes, convirtiéndose las fisuras de ciertas zonas en grietas de mayor envergadura. Las grietas más importantes se observan en las zonas de ventanas y puerta de acceso que, tal y como hemos mencionado anteriormente, son las zonas más susceptibles de reflejar los daños que puede poseer el cerramiento, posiblemente afectado por movimientos del terreno. Se hace notar el problema de la pérdida de cohesión en el material que recubre la fachada, acentuándose en las zonas en las que se aprecia el encuentro entre forjado y cerramiento.



Figura 4.12. Fachada 6 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 7:

Vivienda observada en la Figura 4.13 con acceso por la plaza, a la cual se accede desde Avenida Virgen de la Estrella y por Calle Federico García Lorca. Esta vivienda presenta patologías de menor envergadura que la anterior, aunque es probable que esto

se deba a reformas realizadas en la misma. Se observan pequeñas fisuras que afectan al recubrimiento de la fachada, provocadas por el efecto de los cambios de temperatura y las filtraciones superficiales de agua. Hay una segunda zona en la que se observa una fisura más importante a las descritas con anterioridad. Aparece en la sección de encuentro entre el pilar, que forma parte de la estructura de la vivienda, y el cerramiento que conforma la fachada, debido a una mala ejecución en dicho encuentro, ya que al ser materiales diferentes, reaccionan de diferentes maneras a los problemas que surgen en las viviendas y provocan estas fisuras. Estos problemas se incrementan, además de por la incorrecta ejecución de los acabados, por los movimientos que sufre el terreno.



Figura 4.13. Fachada 7 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 8:

Vivienda observada en Figura 4.14 con acceso por Avenida Virgen de la Estrella. En esta vivienda somos capaces de ver fisuras en las zonas de huecos que forman puertas y ventanas. Como se observa en las fotografías, dichas fisuras se encuentran recubiertas, a modo de reparación superficial, intuyéndose su reaparición posteriormente a dicho arreglo. En este caso, las fisuras superficiales podrían llevar escondido un problema de asientos, que afectaría a la estructura y cerramiento de la vivienda.



Figura 4.14. Fachada 8 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 9:

Vivienda observada en Figura 4.15 con acceso por Avenida Virgen de la Estrella. En esta vivienda aparecen patologías muy similares a la fachada número 8. Las fisuras que se observan están en huecos de ventanas y puertas, afectando al recubrimiento superficial de la fachada y pudiendo traducirse en un problema de movimientos en el terreno.



Figura 4.15. Fachada 9 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 10:

Vivienda observada en la Figura 4.16 con acceso por Avenida Virgen de la Estrella. La construcción de esta vivienda fue realizada hace alrededor de unos 50-60 años. Se pueden ver fisuras más marcadas, como en los casos anteriores, en huecos de

puertas y ventanas, haciéndose notar la problemática de los movimientos en el terreno. Según nos especifica la inquilina del inmueble, las fisuras también son visibles en el interior del inmueble, afectando a cerramiento y tabiquería.



Figura 4.16. Fachada 10 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 11:

Vivienda observada en la Figura 4.17 con acceso por Avenida Virgen de la Estrella. Este inmueble presenta las características que comparten el resto de fachadas, degradación del recubrimiento de la fachada y fisuras, las cuales se encuentran tapadas debido a la reparación previa de las mismas. Se puede observar la reciente reparación de esta fachada comparándola con la contigua, en la que el estado de conservación se encuentra en peores condiciones.



Figura 4.17. Fachada 11 visiblemente rehabilitada.

Fachada 12:

Vivienda observada en la Figura 4.18 con acceso por Calle Doctor Severo Ochoa. Esta vivienda refleja de forma más visible las grietas que pueden desvelar un problema de movimientos del terreno, ya que son prominentes en los huecos de ventanas y puertas. En este caso, las fisuras llegan a transformarse en grietas más notables, tanto en huecos de ventanas como se indicaba anteriormente, como en los encuentros entre los diferentes paramentos que componen el cerramiento.



Figura 4.18. Fachada 12 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 13:

Vivienda con acceso por Calle Doctor Severo Ochoa. Esta vivienda, al igual que la anteriormente descrita, refleja de forma más visible las grietas que pueden desvelar un problema de movimientos del terreno. Se hace notar de forma clara esta causa en la última imagen que compone la Figura 4.19, en la que se ve claramente una gran grieta de varios centímetros de ancho. Además de las fisuras y grietas que presenta, el deterioro es aún mayor al haberse desprendido parte del aplacado que decora la fachada, por lo que esta zona es aún más susceptible de ser atacada por agentes externos que afecten al estado de la misma. En el cerramiento que da a uno de los patios del inmueble se observan un gran número de fisuras y grietas, las cuales pueden estar acrecentadas por la existencia de un limonero en el interior de dicho patio. Éste árbol, al no disponer de sistema de riego, ya que la vivienda se encuentra en estado de abandono, trata de obtener el agua necesaria del terreno, acrecentando aún más en esta zona la problemática surgida por asientos.



Figura 4.19. Fachada 13 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 14:

Vivienda observada en la Figura 4.20 con acceso por Calle Mercado. Todos los paramentos que componen este cerramiento se encuentran gravemente afectados por grietas de más de 1 centímetro de espesor. Se observa como se ha intentado subsanar el problema rellenando dichas grietas, sin dar ningún resultado ya que siguen apareciendo las en las mismas zonas. Ésta es una de las fachadas en las que se observa más claramente el problema de movimientos en el terreno, provocando una pérdida de la verticalidad de la fachada que se refleja en las grietas que aparecen en dirección longitudinal a la misma. En la actualidad, aparenta estado de abandono.



Figura 4.20. Fachada 14 con zoom en zonas deterioradas.

Fachada 15:

Vivienda observada en la Figura 4.21 con acceso por Calle Mercado. El estado de conservación y aparición de grietas es muy similar a la fachada anterior. Todos los paramentos que componen este cerramiento se encuentran gravemente afectados por

grietas de hasta 2,5 centímetros de espesor. Se observa como se ha intentado subsanar el problema rellenando dichas grietas. En este inmueble se representa claramente el problema de movimientos del terreno y pérdida de verticalidad de los paramentos, reflejándose en la aparición de estas grietas de gran espesor. En la actualidad, aparenta estado de abandono.



Figura 4.21. Fachada 15 con zoom en zonas deterioradas.

Análisis de las zonas ajardinadas anexas

Tras la recogida de muestras y en visitas posteriores a la localidad de Navas de San Juan, se procede a realizar un reportaje fotográfico de las zonas ajardinadas anexas a las viviendas que muestran patologías, localizadas en el barrio de La Estrella. Con esto pretendemos concluir si, estas zonas ajardinadas en contacto con el material que compone el subsuelo, interviene en la aparición de la problemática en las viviendas.

La presencia de especies vegetales en las proximidades de la cimentación puede provocar, en un suelo expansivo con un grado de humedad elevado, una desecación de la misma, produciendo la correspondiente retracción y generando de esta forma asientos diferenciales importantes en la cimentación de la estructura, tal y como se observa en la Figura 4.22.

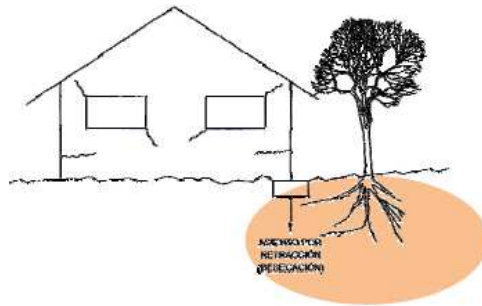


Figura 4.22. Influencia local de la vegetación sobre la humedad natural en un suelo expansivo.

Fernández Galvez, J. (2005)

En el área objeto de estudio clasificamos 10 zonas ajardinadas, referenciada su localización en la Figura 4.23, de las cuales realizamos un inventario del tipo de flora existente.



Figura 4.23. Localización de zonas ajardinadas.

Zona ajardinada 1: su flora la componen doce plantas, de las cuales nueve son de tipo arbóreo y tres de tipo arbustivo. Su especie y envergadura aparecen en la Tabla 4.1.

	Especie	Altura (m)	Tipo
	Ornamental	8,60	Arbóreo
	Ornamental	8,60	Arbóreo
	Ornamental	8,60	Arbóreo
	Pinus sp	12,30	Arbóreo
	Ornamental	15,20	Arbóreo
	Adelfa	1,30	Arbustivo
	Cica	1,80	Arbóreo
	Higuera	1,75	Arbóreo
	Palmera	1,60	Arbóreo
	Níspero	5,50	Arbóreo
	Pita	0,60	Arbustivo
	Lavanda	0,30	Arbustivo

Tabla 4.1. Inventario de flora zona ajardinada 1.

Zona ajardinada 2:

Su flora la componen ocho plantas, de las cuales dos son de tipo arbóreo y seis de tipo arbustivo. Su especie y envergadura aparecen en la Tabla 4.2.

	Especie	Altura (m)	Tipo
	Higuera	6,70 m	Arbóreo
	Sauce llorón	9,60 m	Arbóreo
	Adelfa	1,80	Arbustivo
	Adelfa	1,50	Arbustivo
	Rosal	0,40	Arbustivo
	Rosal	0,40	Arbustivo
	Rosal	0,40	Arbustivo
	Majuelo	1,60	Arbustivo

Tabla 4.2. Inventario de flora zona ajardinada 2.

Zona ajardinada 3:

Su flora la componen veintitrés plantas, todas de tipo arbóreo. Su especie y envergadura aparecen en la Tabla 4.3.

	Especie	Altura (m)	Tipo
	Membrillo	2,80	Arbóreo
	Membrillo	2,80	Arbóreo
	Membrillo	2,80	Arbóreo
	Membrillo	2,80	Arbóreo
	Membrillo	2,80	Arbóreo
	Membrillo	2,80	Arbóreo
	Rosal	0,60	Arbóreo
	Rosal	0,60	Arbóreo
	Rosal	0,60	Arbóreo
	Rosal	0,60	Arbóreo
	Rosal	0,60	Arbóreo
	Rosal	0,60	Arbóreo
	Rosal	0,60	Arbóreo
	Rosal	0,60	Arbóreo
	Rosal	0,60	Arbóreo
	Rosal	0,60	Arbóreo
	Almendro	2,40	Arbóreo
	Pinus sp	8,30	Arbóreo
	Pinus sp	8,30	Arbóreo
	Pinus sp	8,30	Arbóreo
	Pinus sp	8,30	Arbóreo
	Pinus sp	8,30	Arbóreo
	Pinus sp	8,30	Arbóreo
	Pinus sp	8,30	Arbóreo
	Pinus sp	8,30	Arbóreo

Tabla 4.3. Inventario de flora zona ajardinada 3.

Zona ajardinada 4:

Su flora la componen trece plantas, de las cuales todas son de tipo arbóreo. Su especie y envergadura aparecen en la Tabla 4.4.

	Especie	Altura (m)	Tipo
	Pinus sp	9,00	Arbóreo
	Pinus sp	9,00	Arbóreo
	Pinus sp	9,00	Arbóreo
	Pinus sp	9,00	Arbóreo
	Pinus sp	9,00	Arbóreo
	Pinus sp	9,00	Arbóreo
	Pinus sp	9,00	Arbóreo
	Pinus sp	9,00	Arbóreo
	Ornamental	3,80	Arbóreo
	Ornamental	3,80	Arbóreo
	Níspero	2,30	Arbóreo
	Adelfa	3,10	Arbóreo

Tabla 4.4. Inventario de flora zona ajardinada 4.

Zona ajardinada 5:

Su flora la componen cuatro plantas, de las cuales dos todas son de tipo arbóreo. Su especie y envergadura aparecen en la Tabla 4.5.

	Especie	Altura (m)	Tipo
	Palmera	3,75	Arbóreo
	Adelfa	1,70	Arbóreo
	Arizónica	15,20	Arbóreo
	Pinus sp	8,50	Arbóreo

Tabla 4.5. Inventario de flora zona ajardinada 5.

Zona 6:

Su flora la componen dos plantas, las cuales son de tipo arbóreo. Su especie y envergadura aparecen en la Tabla 4.6.

	Especie	Altura (m)	Tipo
	Olivo	3,70	Arbóreo
	Arizónica	8,50	Arbóreo

Tabla 4.6. Inventario de flora zona ajardinada 6.

Zona ajardinada 7:

Su flora la componen siete plantas, de las cuales seis son de tipo arbóreo y sólo una de tipo arbustivo. Su especie y envergadura aparecen en la Tabla 4.7.

	Especie	Altura (m)	Tipo
	Pinus sp	8,70	Arbóreo
	Pinus sp	8,70	Arbóreo
	Pinus sp	8,70	Arbóreo
	Adelfa	2,60	Arbóreo
	Adelfa	2,60	Arbóreo
	Adelfa	2,60	Arbóreo
	Rosal	1,10	Arbustivo

Tabla 4.7. Inventario de flora zona ajardinada 7.

Zona ajardinada 8:

Su flora la componen seis plantas, las cuales son de tipo arbóreo. Su especie y envergadura aparecen en la Tabla 4.8.

	Especie	Altura (m)	Tipo
	Arizónica	11,40	Arbóreo
	Arizónica	11,40	Arbóreo
	Arizónica	11,40	Arbóreo
	Palmera	4,50	Arbóreo
	Adelfa	2,10	Arbóreo
	Ornamental	7,10	Arbóreo

Tabla 4.8. Inventario de flora zona ajardinada 8.

Zona ajardinada 9:

Su flora la componen cuatro plantas, las cuales son de tipo arbóreo. Su especie y envergadura aparecen en la Tabla 4.9.

	Especie	Altura (m)	Tipo
	Arizónica	11,30	Arbóreo
	Arizónica	11,30	Arbóreo
	Ornamental	4,90	Arbóreo
	Arizónica	9,00	Arbóreo

Tabla 4.9. Inventario de flora zona ajardinada 9.

Zona ajardinada 10:

Su flora la componen tres plantas, las cuales todas son de tipo arbóreo. Su especie y envergadura aparecen en la Tabla 4.10

	Especie	Altura (m)	Tipo
	Ornamental	7,80	Arbóreo
	Arizónica	6,10	Arbóreo
	Ornamental	5,40	Arbóreo

Tabla 4.10. Inventario de flora zona ajardinada 10.

En esta zona, conocemos el testimonio de un caso particular de una vivienda con piscina. Dicha piscina se encontraba afectada por problemas de filtraciones, lo que generaba un aporte de agua importante al terreno. Al poco tiempo de estos hechos, se observa como la vivienda comienza a mostrar patologías tales como fisuras y grietas. Se realiza un estudio más exhaustivo en el que se confirma el desplazamiento de las zapatas hacia la superficie, provocado por el levantamiento de las mismas.

Este dato refleja claramente el problema de expansividad que sufre la zona, derivando en varias ocasiones a asientos provocados por esa misma expansividad. Estos asientos se explican por el fenómeno de desecación de los árboles localizados en las zonas anexas a las viviendas, los cuales aprovechan el incremento de humedad que experimentan las arcillas para sustraer la misma, causando los asientos mencionados.

No obstante, aunque los árboles provoquen estos asientos del terreno, se evidencia la expansividad como la causa principal de los problemas observados.

4.2 Métodos

4.2.1 Análisis granulométrico de suelos por tamizado

Objeto:

Este ensayo se realiza en base a la Norma UNE 103 101, la cual especifica el método a seguir para determinar los diferentes tamaños de partículas de un suelo y obtener la cantidad de las mismas, expresada en tanto por ciento, que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el tamiz 0.080 mm Norma UNE 7 050-2.

Aparatos y material necesario:

- Mazos de cabeza de goma y mortero.

- Series de tamices de maya cuadrada y tejido de alambre, divididos en tres baterías:
- Batería 0: tamices de 80, 63, 50, 40, 25 y 20 mm.
- Batería 1: tamices de 12.5, 11.2, 10, 6.3, 5, y 2 mm.
- Batería 2: tamices de 1.600, 1.250, 0.630, 0.400, 0.320, 0.250, 0.200, 0.160 y 0.080 mm.
- Tamizadora eléctrica.
- Brochas para limpiar los tamices.
- Balanza de precisión (0.01 g de precisión).
- Estufa de desecación.
- Material general de laboratorio (pesafiltros, espátulas, probetas, varillas de vidrio, etc).
- Vasos de precipitado de 1000 ml y varillas de agitación.
- Agua destilada.
- Solución de polifosfato de sodio al 4%.

Preparación de la muestra:

El proceso comienza con la recogida de la muestra en la localidad de Navas de San Juan. Se recogieron muestras de cada uno de los estratos relevantes de estudio en este trabajo y se introducen en bolsas, nombrándolas y numerándolas perfectamente referenciadas para su correcta distinción.

El siguiente paso consiste en el secado de la muestra. En este caso, se ha realizado al aire libre (siempre a una temperatura menor de 60^º). Una vez finalizado el secado de la muestra, se procede a deshacer los terrones con la ayuda de una maza de goma sobre una superficie sólida.

Procedimiento operatorio:

Una vez preparada la muestra mediante el desecho de los terrones con la maza de goma, pesamos el total de la misma, tomándolo, por ejemplo, como el valor A.

Se ejecuta el vertido de la muestra cuidadosamente sobre el tamiz de 2 mm, colocando el fondo del tamiz para recoger el cernido (muestra que pasa por el tamiz) y se tamiza manualmente hasta que pasa toda la muestra < 2 mm.

El rechazo (muestra que no pasa por el tamiz) del tamiz de 2 mm, se vierte en la batería de tamices 0 + 1 y se tamiza en la tamizadora eléctrica durante 10-15 minutos. Seguidamente se obtienen los pesos de cada una de las fracciones de los fragmentos > 2 mm, las cuales corresponderán al peso de muestra no cuarteado. El peso total de la fracción > 2 mm se obtiene como la suma de los pesos parciales, tomándolo en este caso como valor F.

El cernido del tamiz de 2 mm se cuartea y se toman dos porciones: una para la determinación de la humedad higroscópica, de aproximadamente 20g, y otra para la continuación del tamizado de la muestra en la batería de tamices 2, de entre 100 y 50 g. Este valor será anotado como G.

Para la determinación de la humedad higroscópica, se coge la muestra de de aproximadamente 20g, se traslada a una cápsula, previamente tarada, y se deseca en estufa a 115°C durante 24h. Pasado este tiempo, se saca de la estufa y se procede a su pesada. Teniendo en cuenta los factores obtenidos anteriormente, se calcula el factor de corrección de la humedad para cada una de las muestras.

En este punto, procedemos a la dispersión de la segunda porción de tierra fina cuarteada. Para ellos, se vierte la muestra pesada y anotada en la casilla G de la Tabla 2 en un vaso de precipitado de 1000 ml, añadiendo al mismo 125 ml de solución de Polifosfato de sodio al 4% y unos 200 ml de agua destilada, agitando con una varilla de vidrio durante 10-15 minutos.

Tras agitar, vertemos el contenido del vaso de precipitado en el tamiz de 0.08 mm, lavando hasta que la muestra salga clara. El rechazo > 0.08 mm se vierte en la batería de tamices 2 y se tamiza en la tamizadora eléctrica durante 10-15 minutos, anotando cada una de las fracciones en las casillas de la columna Peso de Muestra Cuarteada de la Tabla 3. Para hallar el Peso de Muestra No Cuarteado referente a la batería de tamices 2, se multiplica por el factor de corrección del cuarteo 2.

4.2.2 *Límite líquido*

Objeto:

Para esta parte del ensayo, nos apoyamos en la norma UNE 103 103, la cual tiene como objeto establecer el procedimiento para determinar el Límite Líquido de un suelo por el procedimiento del aparato Casagrande.

Se define el Límite Líquido como la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchara normalizada, cuando un surco, realizado con un acanalador normalizado, que divide el suelo en dos mitades, se cierra a los largo de su fondo en una distancia de 13 mm, tras haber dejado la cuchara caer el número de veces que indique cada pare del ensayo, desde una altura de 10 mm sobre una base también normalizada, con una cadencia de 2 golpes por segundo.

Aparatos y material necesario:

- Aparato de Casagrande.
- Acanalador normalizado.
- Espátulas de hojas flexibles de 2 tamaños (grande y pequeña).

- Pesafiltros.
- Balanza de precisión (0.01g de precisión).
- Tamiz 0.04 mm.
- Estufa de desecación.
- Placa de vidrio de 300 x 300 mm para amasar el suelo.
- Frascos lavadores y agua destilada.

Preparación de la muestra:

Se tamiza tierra fina (< 2 mm) en el tamiz de 0.400 mm hasta obtener unos 300 g, que emplearemos en el ensayo.

Procedimiento operatorio:

El material obtenido en el tamizado anteriormente realizado se amasa con agua sobre un cristal o plástico con ayuda de las espátulas, asegurando una humectación homogénea de toda la masa. Cuando hayamos conseguido una pasta homogénea, se rellena la cuchara, previamente separada del aparato de Casagrande, con una porción de pasta suficiente para cubrir $4/5$ partes de su diámetro y con una superficie lisa. A continuación, se realiza el surco con el acanalador, disponiendo en todo momento el acanalador perpendicular a la superficie y describiendo un arco. Efectuado el surco, se vuelve a colocar la cuchara sobre el aparato de Casagrande.

Se hace una primera determinación de la humedad en el Límite Líquido. Para ello, se gira la manivela a razón de dos vueltas por segundo, contando el número de golpes necesarios para que el surco se cierre en el fondo al menos 13 mm. Se apuntan los golpes, que deben estar comprendidos entre 25 y 35.

Para la segunda determinación, seguimos las mismas especificaciones que en la primera pero, en este caso, los golpes deben estar comprendidos entre 15 y 25.

4.2.3 Límite plástico

Objeto:

En este caso, es la norma UNE 103 104 la que tiene por objeto especificar el método para la determinación del límite plástico de un suelo, el cual se define como la humedad más baja con la que puede formarse con un suelo, cilindros de 3 mm de diámetro, rodando dicho suelo entre los dedos de la mano y una superficie lisa, hasta que los cilindros comiencen a resquebrajarse.

Aparatos y material necesario:

- Espátulas de hojas flexibles de 2 tamaños (grande y pequeña).
- Pesafiltros.
- Balanza de precisión (0.01 g de precisión).

- Tamiz 0.04 mm.
- Estufa de desecación.
- Placa de vidrio 300 x 300 mm para amasar el suelo.
- Frascos lavadores y agua destilada.
- Una superficie lisa tal como un vidrio de 300 x 300 mm y 10 mm de espesor para amasar el suelo y rodarlo sobre ella.
- Una varilla de 3 mm de diámetro para comparar el grosor de los cilindros.

Preparación de la muestra:

De las muestras de tierras guardadas y clasificadas, se selecciona una porción de unos 20 g aproximadamente, que haya pasado por el tamiz de 0.400 mm.

Procedimiento operatorio:

Cogemos los 20 g de muestra obtenida en el punto anterior, se amasa con agua destilada hasta formar con facilidad una bola.

Se moldea la mitad de la muestra en forma de elipsoide y, a continuación, se hace rodar entre los dedos de la mano y en el cristal con la presión estrictamente necesaria para que se formen cilindros del diámetro necesario.

Cuando alcanzamos el diámetro de 3 mm sin que se resquebraje, se parte en seis trozos, volviendo a amasarlos juntos, con los dedos de ambas manos hasta conseguir de un elipsoide. Se repite el proceso descrito cuantas veces sea necesario hasta que el cilindro se desquebraje, siendo mayor de 3 mm. El proceso se detiene en este punto.

Las porciones obtenidas, de un mínimo de 5 g, se colocan en un pesafiltros y se determina la humedad mediante el secado en estufa, anotando los datos obtenidos para cada muestra.

4.2.4 Presión de hinchamiento y consolidación

Objeto:

Se denomina presión de hinchamiento, a la presión vertical necesaria para mantener sin cambio de volumen, una probeta confinada lateralmente cuando se inunda de agua.

El ensayo que sigue una vez finaliza el ensayo de presión de hinchamiento, se denomina ensayo de consolidación. Tal y como su nombre indica, se utiliza para determinar las características de consolidación de los suelos. Para ello, la misma probeta confinada lateralmente que se usa en el ensayo de presión de hinchamiento, se somete a diferentes presiones verticales, en las cuales se permite el drenaje por sus caras superior e inferior, y se miden los asentos correspondientes.

Aparatos y material necesario:

- Equipo edométrico (Figura 4.1.2.1)
- Célula edométrica (Figura 4.1.2.2)
- Piedras porosas superior e inferior
- Anillo edométrico
- Pistón de cargas
- Cuerpo lateral de cierre (collarín)
- Tuercas de fijación del collarín

Preparación de la muestra:

Se mide el anillo porta probeta para determinar así el volumen interior del mismo, en cm³. En nuestro caso las medidas son las siguientes:

- M1: 49,075 cm³
- M2: 39,260 cm³
- M3: 39,260 cm³

Para que la muestra no pierda sus propiedades, la probeta debe prepararse en un ambiente de humedad relativa no inferior al 50%, como es el caso de nuestro laboratorio.

Previo recogida de los testigos de nuestras diferentes muestras, se prepara el mismo hasta obtener una superficie horizontal, de un diámetro apreciablemente mayor al diámetro interior del anillo y una altura también mayor a la del anillo. Se coloca el anillo sobre el testigo, empujando la superficie cortante del mismo sobre la muestra. La introducción del anillo en la muestra se hace ejerciendo presión con un martillo de goma, evitando en todo momento hacerlo mediante golpeo del anillo. El sobrante de muestra se elimina mediante, en nuestro caso, un elemento cortante, dejando la muestra totalmente contenida en el anillo, a ras del mismo.

Procedimiento operatorio:

Montaje de la célula

Colocamos la placa porosa inferior sobre la base de la célula, seguidamente el anillo con la probeta, la placa porosa superior y el pistón de carga, de forma que todos estos elementos quedan centrados. Las placas porosas deben ser humedecidas previamente a su colocación en la célula edométrica, eliminando de las mismas el exceso de agua antes de ponerlas en contacto con la muestra. Por último se coloca el collarín y las tuercas de fijación del mismo.

Montaje de la bancada y preparación del ensayo

Se coloca la célula edométrica sobre la bancada, ajustando seguidamente el contrapeso de manera que entren en contacto todos los elementos de transmisión de carga y quede la palanca prácticamente horizontal. Se aplica una ligera presión de ajuste,

no superior a 3 kPa (0,03 kg/cm²), mediante la colocación de la pesa adecuada. Se coloca el medidor de deformación en posición, de manera que le vástago tenga recorrido en ambos sentidos, y se anota su lectura como valor inicial de referencia.

Procedimiento operatorio

Se llena el recipiente de la célula con agua destilada. A partir de ese momento se vigila la lectura del medidor de deformaciones, aumentando la carga para que éste se mantenga en $\pm 0,01$ mm de la lectura inicial de referencia.

Una vez esté en equilibrio, dejamos pasar unas 24 h. Se vuelve a revisar la muestra y se anotan los datos obtenidos, además del peso necesario para el equilibrado de la muestra.

Una vez finalizada la parte que determina la presión de hinchamiento, partimos del valor obtenido en dicho ensayo para comenzar con la consolidación del suelo.

Dividimos cada muestra en 6 escalones de carga. Vamos añadiendo un determinado peso en cada uno de los escalones, hasta colocarle a cada una de las muestras un total de 45 kg. El tiempo transcurrido para la toma de datos de cada escalón es, aproximadamente, de 24 horas.

Una vez finalizado el proceso de carga, se inicia el de descarga, partiendo del valor de la presión de consolidación correspondiente al último escalón. Se va disminuyendo dicha presión, mediante la retirada de pesas del colgadero en un proceso de dos escalones de descarga.

En nuestro caso, el proceso de descarga finaliza en el valor de la presión de hinchamiento determinada anteriormente. Al igual que en la etapa de carga, se mantiene cada escalón 24 horas.

Una vez finalizado este proceso, se quitan las pesas que aún queden, se retira la célula de la bancada, se vacía el agua de la misma y a continuación se desmonta la célula retirando el anillo con la probeta en su interior. Se eliminan las gotas de agua que queden en el anillo mediante material absorbente.

4.2.5 Densidad relativa

Objeto:

Para la determinación de la densidad real de nuestras muestras de suelo, nos basamos en la norma UNE 103 302 94, mediante la cual obtenemos la densidad real de las partículas que pasan por el tamiz de 2 mm de un suelo, definida como el cociente entre la masa de un determinado volumen de suelo exento de poros, a una temperatura y la masa del mismo volumen de agua destilada exenta de aire, a la misma temperatura.

Aparatos y material necesario:

- Tamiz de 2 mm de luz de malla.
- Espátulas.
- Matraces aforados 50 ml.
- Balanza de precisión.
- Baño de agua.
- Agua destilada hervida y fría.
- Termómetro.

Preparación de la muestra:

De las muestras de tierras guardadas y clasificadas, se selecciona una porción de unos 10 g aproximadamente, que haya pasado por el tamiz de 2 mm.

Procedimiento operatorio:

El matraz aforado, limpio y seco, se pesa con su tapón en la balanza de precisión, sea P1. Se añaden al matraz aproximadamente 10 g de la muestra de suelo seco al aire obtenida en el punto anterior. El matraz se tapa con su tapón y se pesa, siendo esta medida P2.

Se añade agua destilada hasta poco más de la mitad del matraz, arrastrando en el proceso aquellas partículas adheridas al cuello del mismo. A continuación, se introduce el matraz en un baño maría hirviendo durante unos minutos, con el fin de expulsar el aire ocluido entre las partículas.

Enfriar a temperatura ambiente, añadir agua destilada hervida y fría hasta el enrase. Tapar y secar bien el exterior del matraz y pesarlo, siendo esta medida P3. Vaciar y limpiar el matraz, secarlo y llenarlo de agua destilada hervida y fría hasta el enrase y secar el exterior. Tapar y pesar el matraz, sea P4. Anotar a temperatura del agua contenida en el matraz.

4.2.6 Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación

Objeto:

Esta norma UNE 103 102 tiene como objeto especificar el método para determinar cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas de un suelo desde 0,08 mm hasta 0,002 mm.

Aparatos y material necesario:

- Densímetro, con escala entre 0.9950 g/l y 1,040 g/l (precisión 0.001 g/l)
- Probetas graduadas de 1 L, sin boquilla
- Balanza de precisión (0.01 g de precisión)
- Probetas de 100 ml

- Vasos de precipitado de 1000 ml y varillas de agitación
- Agua destilada
- Solución de Polifosfato de sodio al 4%.
- Termómetro
- Tamiz 0.080 mm

Preparación de la muestra:

De las muestras secas al aire de forma natural (siempre a temperatura inferior a 60°C), se procede coger 20 gramos de tierra fina (< 2mm).

Procedimiento operatorio:

Se toman unos 20 g de tierra fina (< 2mm) mediante el cuarteo de la muestra total.

Para dispersar la muestra, se introduce en un vaso de precipitado de 1000 ml y se añaden 125 ml de Polifosfato de sodio, agitando con una varilla de vidrio durante 10-15 minutos.

Se transfiere la dispersión así preparada a la probeta graduada, lavando bien el vaso de precipitado con ayuda de un frasco lavador (con la precaución de no exceder el enrase de la probeta).

Se agita la probeta vigorosamente durante 1 min. (60 movimientos completos de agitación).

Se toman medidas de densidad a tiempos de 0.5, 1, 3, 60 y 90 minutos.

4.2.7 Difracción de Rayos X

Objeto:

Con este ensayo de Difracción de Rayos X se pretende extraer en detalle la mineralogía de las muestras objeto de estudio, mediante una primera parte de mineralogía total y, después, más concretamente, la mineralogía de los filosilicatos.

Aparatos y material necesario:

- Mortero de Ágata (< 2 mm)
- Difractómetro Siemens D5000
- Porta muestras de carga lateral
- Agua destilada
- Polifosfato de sodio (10%)
- Estufa de desecación

Preparación de la muestra:

De las muestras secas al aire de forma natural (siempre a temperatura inferior a 60°C), se procede a la transformación en polvo de las mismas mediante el uso del mortero.

Procedimiento operatorio:

Mineralogía total (técnica polvo cristalino desorientado)

Este análisis se lleva a cabo mediante difracción de rayos-X (DRX) sobre la muestra total del suelo, finamente pulverizado mediante mortero de ágata (< 0.02 mm). Se emplea un difractómetro Siemens D5000, utilizando radiación Cu K α (0.15406 nm) a 35 kV y 15 mA, en un rango angular de 3 -50° 2 θ , con tamaño de paso de 0.05° 2 θ y una constante de tiempo de 1 segundo. Para la correcta desorientación del polvo se empleó un porta muestras de carga lateral (Nistaken, 1964). Los porcentajes de los distintos minerales se establecieron en función del área relativa de los picos identificativos de cada mineral, con el método de poderes reflectantes, según los factores dados por Martín-García et al. (1997). La cantidad total de filosilicatos de la muestra (illita, vermiculita, clorita, esmectita, caolinita y fases interestratificadas) se estimó empleando el pico 4.45 nm y el factor 0.1.

Mineralogía de los filosilicatos (técnica del agregado orientado)

Se lleva a cabo sobre la arcilla del suelo (fracción > 0.002 mm), previamente extraída de la muestra total. La extracción se lleva a cabo según el siguiente protocolo:

Eliminación previa de la materia orgánica: se preparó una suspensión de aprox. 20 gr. de tierra fina en 100 ml de agua destilada y se añaden 20 ml de H₂O₂ a intervalos de 20 min., agitando mecánicamente, hasta que no se observa liberación de CO₂. Posteriormente se añaden 25 ml de Polifosfato de sodio (10%) y se agita durante 8 horas en agitador rotacional para provocar la dispersión homogénea de los coloides, filtrando las arenas con tamiz de 50 μ m y separando limo (50 – 2 μ m) y arcilla (< 2 μ m) por sedimentación y extracción con pipeta de Robinson. Se extrae la arcilla hasta agotamiento de la suspensión con limo y arcilla, en cantidad suficiente para realizar las analíticas fisicoquímicas de estas fracciones. Por último, se procede a dializar la suspensión de arcilla para eliminar el exceso de sodio y otros iones empleados como dispersante, y se seca a baja temperatura (60°C) hasta obtener arcilla pulverulenta.

Los agregados orientados se prepararon a partir de 50 mg arcilla en polvo, que se añadieron a una disolución de cloruro magnésico 1N durante 72 horas. Posteriormente, 5 ml de la suspensión magnésica se depositaron en una placa de vidrio que se dejó secar a temperatura y humedad ambiental. Los análisis de las placas se realizarán en las condiciones especificadas por Whitting and Allardice (1986): 1) secas al aire, 2) saturadas en vapor de etilenglicol, para lo que una réplica de la muestra seca al aire se introdujo en

una placa de Petri con etilenglicol durante 48 horas. Los análisis de agregado orientado se llevaron a cabo en un difractómetro Siemens D5000 (radiación Cu K α , 35 kV y 15 mA) en un rango angular de 2-30 $^{\circ}2\theta$, una velocidad angular de 0.2 $^{\circ}2\theta s^{-1}$ y una constante de tiempo de 2 s. Para la identificación exacta de los filosilicatos se hizo una descomposición en la zona 3 – 10 $^{\circ}2\theta$ de los patrones de difracción de las muestras secas al aire y saturadas en Mg-etilenglicol, mediante el programa DecompRX (Lanson, 1997), siguiendo las recomendaciones de Barré et al. (2008). Una vez realizada la descomposición del difractograma e identificados los filosilicatos presentes, se estimó el porcentaje de cada fase según el área relativa de cada pico identificativo (Velde and Barré, 2010). Por último, para la identificación de fases interestratificadas, en el caso de estar presentes, se empleó el programa MULCALC (Le and Ferrer, 1996), que permite estimar la composición cuantitativa de interestratificados binarios (dos fases) y el grado de desorden del mismo.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Muestra 2 (M2)

5.1.1 Parámetros geotécnicos: clasificación, expansividad y consolidación

Presentación de los datos

Análisis granulométrico de los suelos por tamizado

Una vez preparada la muestra mediante el desecho de los terrones con la maza de goma, pesamos el total de la misma y anotamos su valor en la casilla A de la Tabla 5.18.

Se ejecuta el vertido de la muestra cuidadosamente sobre el tamiz de 2 mm, colocando el fondo del tamiz para recoger el cernido (muestra que pasa por el tamiz) y se tamiza manualmente hasta que pasa toda la muestra < 2 mm. El rechazo (muestra que no pasa por el tamiz) del tamiz de 2 mm, se vierte en la batería de tamices 0 + 1 y se tamiza en la tamizadora eléctrica durante 10-15 minutos. Seguidamente se obtienen los pesos de cada una de las fracciones de los fragmentos > 2 mm, las cuales apuntamos en las casillas correspondientes a la columna de Peso de Muestra No Cuarteado de la Tabla 5.19. El peso total de la fracción > 2 mm se obtiene como la suma de los pesos parciales y se apunta en la casilla F de la Tabla 5.18. El cernido del tamiz de 2 mm se cuarteo y se toman dos porciones: una para la determinación de la humedad higroscópica de aproximadamente 20g y otra para la continuación del tamizado de la muestra en la batería de tamices 2, de entre 100 y 50 g, que se anota en la casilla G de la Tabla 5.18.

Para la determinación de la humedad higroscópica, se anotan los datos en el modelo de Tabla 5.17. La muestra de aproximadamente 20g se traslada a una cápsula, previamente tarada, y se deseca en estufa a 115°C durante 24h. Pasado este tiempo, se saca de la estufa y se procede a su pesada, anotando los valores en la Tabla 5.17.

Humedad Higroscópica M2	
Gramos de la muestra	20,15g
Tara pesafiltros (t)	61,20g
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	81,35g
Pesafiltros + suelo secado (t+s)	80,10g
Suelo (s) = (t+s) - t	18,90g
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	1,25g
Humedad higroscópica (w) = (a/s)*100	6,61%
fh = Factor de corrección humedad = $100/(100+w)$	0,94

Tabla 5.17. Humedad higroscópica de la muestra M2

En este punto, procedemos a la dispersión de la segunda porción de tierra fina cuarteada. Para ello, se vierte la muestra pesada y anotada en la casilla G de la Tabla 5.18, en un vaso de precipitado de 1000 ml, añadiendo al mismo 125 ml de solución de Polifosfato de sodio al 4% y unos 200 ml de agua destilada, agitando con una varilla de vidrio durante 10-15 minutos.

Muestra 2		
A	Muestra total (g)	1189
B	Muestra retenida en el tamiz 20 mm, lavada y secada en estufa (g)	0
C	Porción que tomamos del cernido del tamiz de 20 mm [cuarteo] (g)	0
D	Muestra total entre 20 y 2 mm, lavada y secada en estufa (g)	327
$E = D \cdot f_1$	Muestra total entre 20 y 2 mm, lavada y secada en estufa [corregido cuarteo] (g)	327
$F = B + E$	Muestra retenida en el tamiz 2 mm, lavada y secada en estufa (g)*	327
G	Porción que tomamos del cernido del tamiz de 2 mm [cuarteo] (g)	95,38
$H = G \cdot f_h$	Muestra que pasa por el tamiz 2 mm, lavada y secada en estufa [corregida humedad] (g)*	89,46
$J = (A - F) \cdot f_h$	Muestra total que pasa por el tamiz 2 mm, secada [corregida humedad] (g)	808,53
$K = F + J$	Muestra total seca (g)	1135,53

Tabla 5.18. Datos totales del análisis granulométrico muestra M2

Tras agitar, vertemos el contenido del vaso de precipitado en el tamiz de 0.08 mm, lavando hasta que la muestra salga clara. El rechazo > 0.08 mm se vierte en la batería de tamices 2 y se tamiza en la tamizadora eléctrica durante 10-15 minutos, anotando cada una de las fracciones en las casillas de la columna Peso de Muestra Cuarteada de la Tabla 5.19. Para hallar el Peso de Muestra No Cuarteado referente a la batería de tamices 2, se multiplica por el factor de corrección del cuarteo 2, f_2 , el cual se obtiene del resultado de la división de la casilla J, muestra total que pasa por el tamiz 2 mm, secada, entre la casilla H, muestra que pasa por el tamiz 2 mm, lavada y secada en estufa.

Muestra 2							
Batería de Tamices	Tamiz (mm)	Tara Tamiz (g)	Tara + Muestra (g)	Peso Muestra Cuarteada (g)	Peso Muestra No Cuarteada (g)	Pasa de la Muestra Total	
						(g)	(%)
0	80					1135,52	100,00
	60					1135,52	100,00
	50					1135,52	100,00
	40					1135,52	100,00
	25					1135,52	100,00
1	20	683	683	0	0	1135,52	100,00
	12,5	605	605	0	0	1135,52	100,00
	11,2	587	587	0	0	1135,52	100,00
	10	591	591	0	0	1135,52	100,00
	6,3	562	573	11	11	1124,52	99,03
	5	559	575	16	16	1108,52	97,62
	2	520	820	300	300	808,52	71,20
2	1,600	514	514	0	0,00	808,52	71,20
	1,250	492	492	0	0,00	808,52	71,20
	0,630	473	473	0	0,00	808,52	71,20
	0,400	433	434	1	9,03	799,48	70,40
	0,320	442	443	1	9,03	790,45	69,61
	0,250	435	436	1	9,03	781,41	68,81
	0,200	433	435	2	18,07	763,33	67,22
	0,160	419	422	3	27,11	736,22	64,83
	0,080	411	429	18	162,67	573,55	50,51

Tabla 5.19. Análisis granulométrico (fracciones) de la muestra M2

Límite líquido

El material obtenido en el tamizado anteriormente realizado se amasa con agua sobre un cristal con ayuda de las espátulas, asegurando una humectación homogénea de toda la masa. Cuando hayamos conseguido una pasta homogénea, se rellena la cuchara, previamente separada del aparato de Casagrande, con una porción de pasta suficiente para cubrir 4/5 partes de su diámetro y con una superficie lisa. A continuación, se realiza el surco con el acanalador, disponiendo en todo momento el acanalador perpendicular a la superficie y describiendo un arco. Efectuado el surco, se vuelve a colocar la cuchara sobre el aparato de Casagrande.

Se hace una primera determinación de la humedad en el Límite Líquido. Para ello, se gira la manivela a razón de dos vueltas por segundo, contando el número de golpes necesarios para que el surco se cierre en el fondo al menos 13 mm. Se apuntan los golpes, que deben estar comprendidos entre 25 y 35 (Tabla 5.20).

Muestra 2: LL 25-35	
Nº de golpes	33
Tara pesafiltros (t)	57,41
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	70,24
Pesafiltros + suelo secado (t+s)	66,68
Suelo (s) = (t+s) - t	9,27
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	3,56
% Humedad 1 (w) = (a/s)*100	38,40

Tabla 5.20. Determinación primera Límite Líquido (25-35 golpes) de la muestra M2

Para la segunda determinación, seguimos las mismas especificaciones que en la primera pero, en este caso, los golpes deben estar comprendidos entre 15 y 25. Los golpes resultantes para cada muestra se apuntarán en la Tabla 5.21.

Muestra 2: LL 15-25	
Nº de golpes	23
Tara pesafiltros (t)	51,36
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	64,7
Pesafiltros + suelo secado (t+s)	60,87
Suelo (s) = (t+s) - t	9,51
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	3,83
% Humedad 1 (w) = (a/s)*100	40,27

Tabla 5.21. Determinación segunda Límite Líquido (15-25 golpes) de la muestra M2

Límite plástico

Se obtiene una porción de unos 20 g aproximadamente que haya pasado por el tamiz de 0.400 mm y se amasa con agua destilada hasta formar con facilidad una bola.

Se moldea la mitad de la muestra en forma de elipsoide y, a continuación, se hace rodar entre los dedos de la mano y en el cristal con la presión estrictamente necesaria para que se formen cilindros del diámetro necesario.

Cuando alcanzamos el diámetro de 3 mm sin que se resquebraje, se parte en seis trozos, volviendo a amasarlos juntos, con los dedos de ambas manos hasta conseguir de un elipsoide. Se repite el proceso descrito cuantas veces sea necesario hasta que el cilindro se desquebraje, siendo mayor de 3 mm. El proceso de detiene en este punto.

Las porciones obtenidas, de un mínimo de 5 g, se colocan en un pesafiltros y se determina la humedad mediante el secado en estufa, anotando los datos obtenidos para cada muestra en la Tabla 5.22.

Muestra 2: LP	
Tara pesafiltros (t)	58,27
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	65,51
Pesafiltros + suelo seco (t+s)	63,91
Suelo (s) = (t+s) - t	5,64
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	1,60
% Humedad 1 (w) = (a/s)*100	23,37

Tabla 5.22. Determinación Límite Plástico de la muestra M2

Clasificación de Casagrande

Con esta última parte de la clasificación, se obtendrá el tipo de suelo correspondiente a cada una de las muestras. Nos apoyamos en los resultados obtenidos de Límite Líquido y Límite Plástico de cada muestra para la realización de esta parte del ensayo.

Usando el Nomograma de Casagrande y mediante los datos del número de golpes y el porcentaje de humedad resultante, obtenemos el porcentaje de humedad del Límite Líquido a 25 golpes. Este dato, junto al porcentaje de humedad del Límite Plástico (LP), sirva para calcular el Índice de Plasticidad (IP), dato que junto al Límite Líquido (LL) dará el tipo de suelo obtenido para cada muestra. Los cálculos de Índice Plástico se reflejan de la siguiente forma:

- Muestra 2:

LL (obtenido mediante el Nomograma de Casagrande): 40%

LP: 23%

$$IP = LL - LP = 40\% - 23\% = 17\%$$

Con los cálculos realizados y los resultados obtenidos, se determina el tipo de suelo mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande (Figura 5.10), según la cual se obtiene un suelo CL.

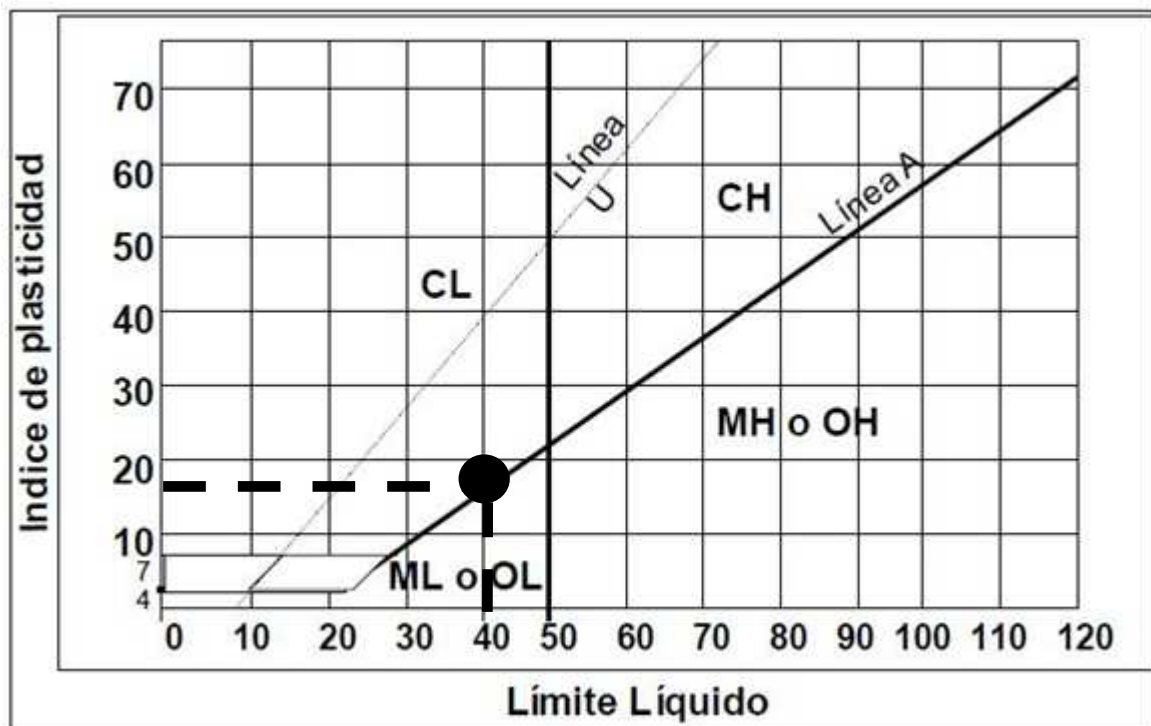


Figura 5.10. Carta de Plasticidad de Casagrande.

Presión de hinchamiento

Una vez preparada la muestra en la célula edométrica y preparado el equipo edométrico para la realización del ensayo. Observamos que el medidor comienza a desplazarse hacia la derecha, haciendo patente el hinchamiento. Durante varias horas debemos estar pendientes de estabilizar el medidor hasta que quede en cero. Dicha estabilización se consigue añadiendo peso en el cargadero, hasta que la muestra deja de presentar el hinchamiento y se mantiene en dicho número.

En este caso, el peso añadido fue de 2,50 kg, con una presión de hinchamiento de 125 kPa con lo que se finaliza la parte del ensayo correspondiente a la presión de hinchamiento.

Consolidación

Partiendo del peso obtenido en el ensayo de presión de hinchamiento, continuamos determinando la consolidación que presentan nuestras muestras. Se establecen seis escalones de carga y dos de descarga.

Para comenzar la carga por escalones, mantenemos el peso añadido en el ensayo anterior.

Finalizado el proceso de descarga, se extrae la célula edométrica, eliminando el agua contenida en su interior y sacando el anillo edométrico que contiene la muestra de suelo, intentando eliminar cuidadosamente el exceso de agua con un papel poroso y absorbente. Tras extraer las muestras, se introduce una porción de cada una de ellas en

un pesafiltros y este, a su vez, en la estufa desecadora. Transcurridas 24h se extraen las muestras y se pesan, obteniendo los resultados que aparecen en la Tabla 5.23, 5.24 y 5.25.

CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA M2		
Estado	Inicial	Final
Densidad húmeda (g/cm ³)	2,01	2,17
Densidad seca (g/cm ³)	1,54	1,65
Humedad (%)	30,42	31,28
Grado de saturación (%)	112,25	137,72
Índice de huecos (e)	0,72	0,60
Altura de sólidos (H)	14,57	14,57
Densidad relativa de las partículas (g/cm ³)	2,64	

Tabla 5.23. Características de la muestra M2

PARÁMETROS DE LA MUESTRA M2	
Presión de hinchamiento (kp/cm ²)	1,24
Presión inicial (kp/cm ²)	1,22
Presión de preconsolidación (kp/cm ²)	3,57
Razón de sobreconsolidación (OCR)	2,93

Tabla 5.24. Parámetros de la muestra M2

Carga (kp/cm²)	Carga (kpa)	H probeta (mm)	H sólido (mm)	Deformación unitaria	Cambio de espesor	Índice de huecos
1,27	124,81	20,00	11,66	0	0,000	0,715
1,78	174,73	19,96	11,66	-0,002	-0,040	0,712
2,80	274,58	19,84	11,66	-0,008	-0,160	0,702
5,35	524,20	19,61	11,66	-0,020	-0,390	0,682
10,44	1023,43	18,71	11,66	-0,069	-1,290	0,605
15,54	1522,67	18,31	11,66	-0,092	-1,690	0,570
22,92	2246,56	17,93	11,66	-0,115	-2,070	0,538
Descarga (kp/cm²)	Carga (kpa)	H probeta (mm)	H sólido (mm)	Deformación unitaria	Cambio de espesor	Índice de huecos
2,80	274,58	18,46	11,66	-0,083	0,490	0,583
1,27	124,81	18,65	11,66	-0,072	0,730	0,600

Tabla 5.25. Resultados del ensayo de consolidación para la muestra M2

Mediante los resultados obtenidos durante el ensayo y cálculos posteriores, se traza la curva Índice de huecos – Carga (Figura 5.11), en este usando la escala logarítmica de este último valor.

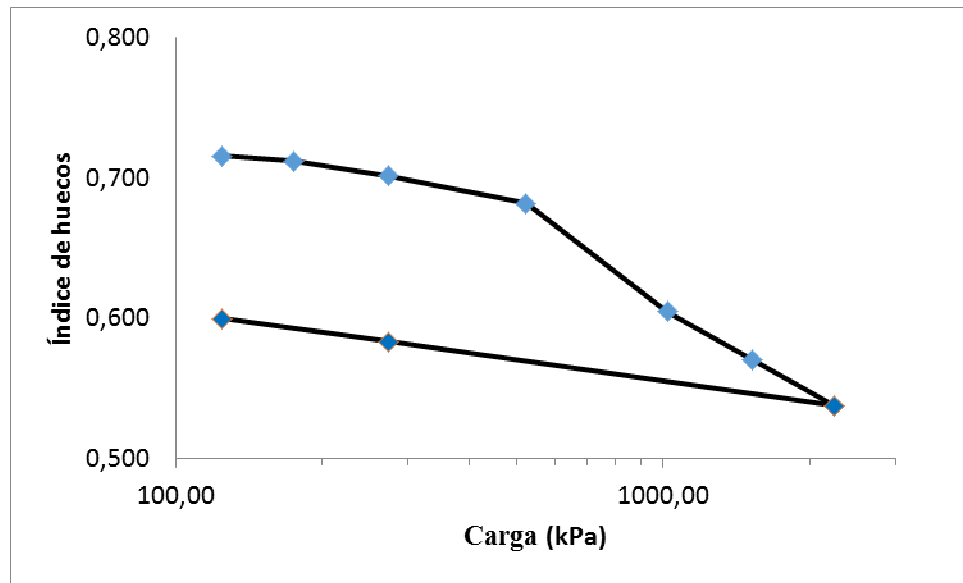


Figura 5.11. Curva Índice de huecos – Carga para la muestra M2

Para el cálculo de la presión de preconsolidación (kPa), se utiliza el método gráfico de Casagrande, el cual se aplica sobre la Figura 5.11. El método gráfico se describe en la Figura 5.12, y el resultado obtenido para la presión de preconsolidación en la muestra 2 es de 350 kpa.

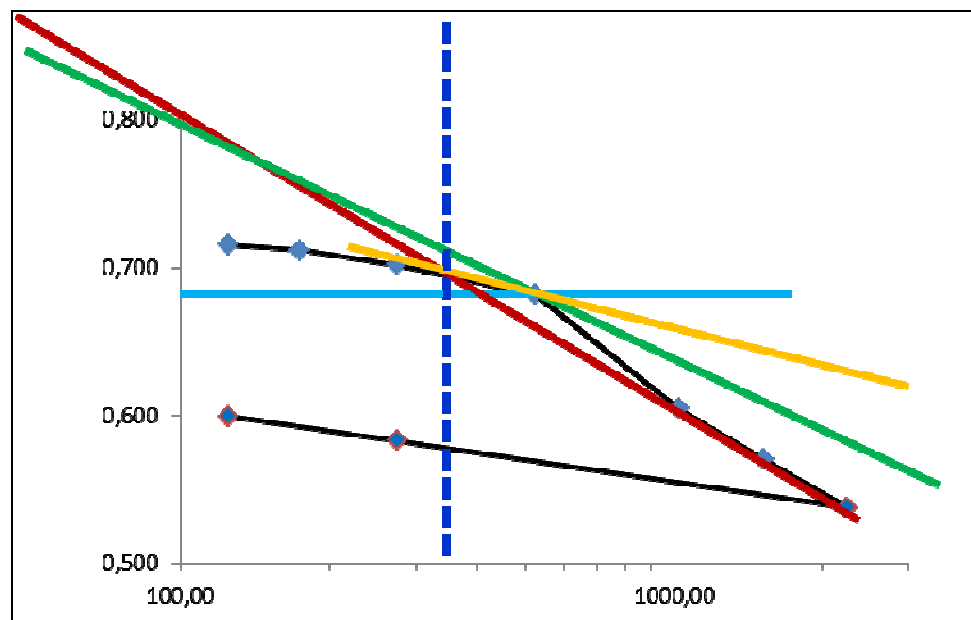


Figura 5.12. Método gráfico presión preconsolidación para la muestra M2

Densidad relativa

Una vez finalizado el ensayo y obtenidos los pesos correspondiente en cada una de las fases del mismo, se plasman los resultados en la Tabla 5.26. En nuestro caso, el

ensayo ha sido realizado a una temperatura del agua de 26°C, a lo que le corresponde una densidad del agua (D_w) de 996,86 kg/m³.

M2	
Procesos del ensayo	Peso (g)
P1: Tara matraz con tapón	32,35
P2: P1 + muestra	41,88
P3: P2 + agua destilada	87,27
P4: P1 + agua destilada	82,08
P5 (V. Sólido): (P4-P1)-(P3-P2)	4,34
P6 (Masa del sólido): P2-P1	9,53
Densidad real: (P5/P6)x D_w	0,04

Tabla 5.26. Resultado para la densidad real de la muestra M2

Análisis granulométrico de suelos por sedimentación

Recogidos 20 gramos de muestra M2 y finalizado el proceso de ensayo, los resultados obtenidos para cada tiempo son los que se reflejan en la Tabla 5.27.

Tiempo (min)	Tamiz por el que pasa la muestra (mm)	% Muestra que pasa sobre 20 g	% Muestra que pasa sobre total de finos	% Retenido en el tamiz
0,5	0,08	100	50,51	51
1	0,05	45,51	22,99	28
3	0,02	43,01	21,72	1
60	0,005	43,01	21,72	0
90	0,002	40,51	20,46	1

Tabla 5.27. Método Resultados análisis por sedimentación para la muestra M2

Una vez calculado el porcentaje de muestra que pasa por cada uno de los tamices, se puede clasificar cada uno de ellos con el tipo de suelo al que corresponde, reflejándose en la Tabla 5.28:

Tipo de suelo	% Muestra
Grava	2
Arena	47
Finos	51
Limos	30
Arcillas	20

Tabla 5.28. Tipo de suelo por ensayo de sedimentación de la muestra M2

Por último, se calcula la actividad de la muestra mediante la división de los porcentajes de Índice de plasticidad, 17%, entre las arcillas que contiene la muestra M2, 20%, siendo el resultado de la Actividad para la muestra M2 de 0,85, situándose en el tipo Interestratificados.

Discusión de los resultados

Desde el punto de vista de la granulometría, se trata de una muestra con predominio de elementos finos (pasan 51% por tamiz 200) (Tabla 5.19) que presenta, sin embargo, un contenido de arena casi equivalente (47%) y un contenido de grava despreciable (2%) (Tabla 5.28). La fracción de finos se compone de un 31% de limos y un 20% arcilla, por lo que no hay un claro predominio de ninguna de las dos fracciones. Se obtiene un límite líquido (LL) de 40%, un límite plástico (LP) del 23% y un índice de plasticidad (IP) del 17%, que pueden interpretarse, en conjunto, como indicadores de una plasticidad moderada-baja (Abduljawwad and Al-Suleimani, 1993). Trasladando estos valores a la carta de plasticidad de Casagrande, obtenemos una arcilla de baja plasticidad (CL).

En condiciones de campo, la muestra presenta una humedad (w) del 31%, inferior al límite líquido (40%), con un índice líquido o de fluidez de 0,47, lo que indica una consistencia en condiciones de campo relativamente dura, suficientemente alejada del límite de peligrosidad establecido cuando w supera al LL. Por su parte, la densidad seca de 1,54 g/cm³ de este suelo (peso específico aparente seco γ_d de 15,08 kN/m³), así como su índice de huecos (e), de 0,72, corresponden también a materiales moderadamente duros y compactos (González de Vallejo et al., 2004), con escasa microporosidad (Ito and Azam, 2009).

Los parámetros del ensayo de consolidación apoyan los datos anteriores. La presión de preconsolidación, de 350 kPa indica, según Mitchell and Soga (1992), un suelo de comportamiento mecánico moderadamente duro o rígido. La explicación de la moderada dureza de esta capa, que no pueda ser considerada como material blando o excesivamente plástico, podría estar relacionada con su historial tensional. Así, la razón

de sobreconsolidación (OCR) hallada ha sido de 2,93, lo que nos indicaría una arcilla moderadamente sobreconsolidada (Urbaitis et al., 2016). Esto es coherente con la historia geológica del área considerada, compuesta por depósitos antiguos, del Triásico (Sánchez et al., 2014)). El índice de compresión C_c (0,212), cae dentro del típico rango de arcillas limosas, establecido por Mitchell and Soga (1992) entre 0,15 y 0,3, indicando así mismo una muestra de moderada rigidez (Azam et al., 2013). Por último, el índice de entumecimiento (Swellingindex, C_s) de 0,05 cae también dentro de lo establecido por Mitchell and Soga (2005) para arcillas limosas, indicando una muestra de moderada-baja plasticidad (0,08 indicaría una plasticidad típica de los grupos CL y ML, según Azam et al. 2013, luego a valores ligeramente inferiores le corresponderían plasticidades ligeramente mayores).

Junto con el historial geológico, la composición mineralógica también puede explicar los parámetros mecánicos obtenidos. Según el clásico diagrama de Casagrande (1948) modificado por Holtz and Kovac (1981) representado en la Figura 5.13, esta muestra debería presentar, en función de su moderada-baja plasticidad, una mineralogía predominantemente illítica, mientras que en el diagrama de Bain (1971) representado en la Figura 5.14, en función de LP e IP, la mineralogía sería más propia de caolinitas. Se trata, en ambos casos, de minerales relativamente poco plásticos, debido a su escasa capacidad de adsorción de agua (especialmente las caolinitas). Sin embargo, para interpretar correctamente estas correspondencias, debemos tener en cuenta que el elevado contenido en arena (47%) y de limo (30%), según la (Tabla 5.28), dificulta la caracterización de la mineralogía de la muestra en base exclusivamente a la plasticidad, dado que los anteriores diagramas se establecieron originalmente en base a la fracción arcilla del suelo ($< 2 \mu\text{m}$).

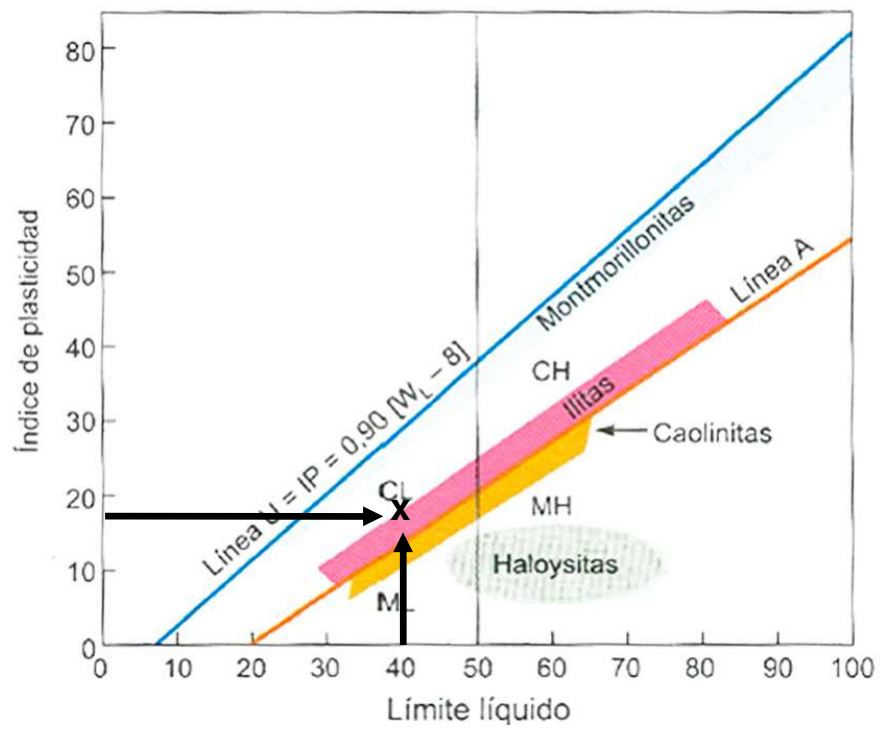


Figura 5.13. Diagrama de Holtz & Kovac (1981)

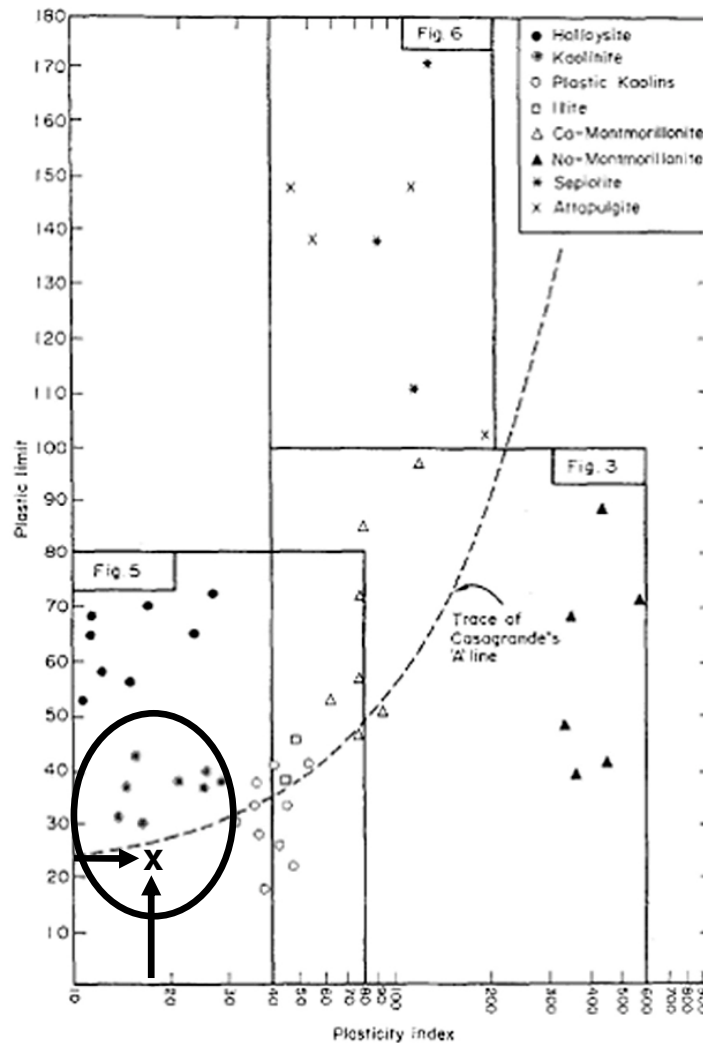


Figura 5.14. Diagrama de Bain (1971)

Desde el punto de vista de la predicción de la expansividad de un suelo, se han empleado diversos parámetros y ensayos relacionados con la granulometría del suelo y la plasticidad. Peck et al. (1974) consideran que suelos con IP entre 10 y 35 presentan una expansividad media, mientras que Snethen et al. (1977) atribuyen a muestras con IP < 50 y LL > 35 una expansividad “marginal” (media). Más recientemente, en su importante trabajo *Cimentaciones en Suelos Expansibles*, Chen (1988), atribuye un valor de expansividad media (en el límite de alta, en función del LL) a suelos con LL entre el 30% y 40% e IP entre 10 y 35. Estos valores son muy coherentes con la interpretación de la presión de hinchamiento obtenida, 125 kPa, que según González de Vallejo et al. (2004), incluye a este horizonte en la Clase II de expansividad media (justo en el límite con la Clase III, alta). Según las diversas clasificaciones del grado de expansibilidad del suelo, por tanto, estamos ante un suelo de **expansividad media**.

Por último, se ha empleado el parámetro de la actividad de la arcilla (A) como indicador de la tendencia al hinchamiento por parte de la muestra. En nuestro caso,

obtenemos una A de 0,83, que debe interpretarse según Van de Merwe (1964), representado en la Figura 5.16 como un valor en el rango superior de las illitas (que darían según estos autores actividades entre 0,90 y 1,15). Tanto los diagramas de este último autor, como el de Bell and Maud (1995), representado en la Figura 5.15, que establecen el potencial de hinchamiento en base a la actividad, el IP y el % arcilla, indican que estamos ante un suelo de expansividad media. Como conclusión, todos los indicios establecen un suelo de expansividad media o moderada, consistente con una composición rica en illitas y, en menor medida, caolinitas, pero sin influencia clara de minerales puramente expansibles como las montmorillonitas.

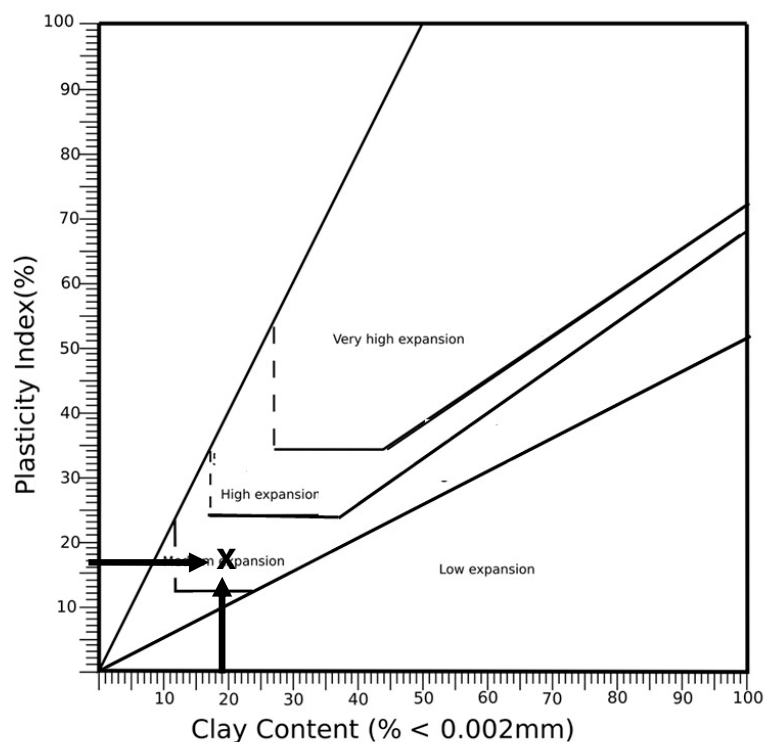


Figura 5.15. Diagrama de Bell & Maud (1995)

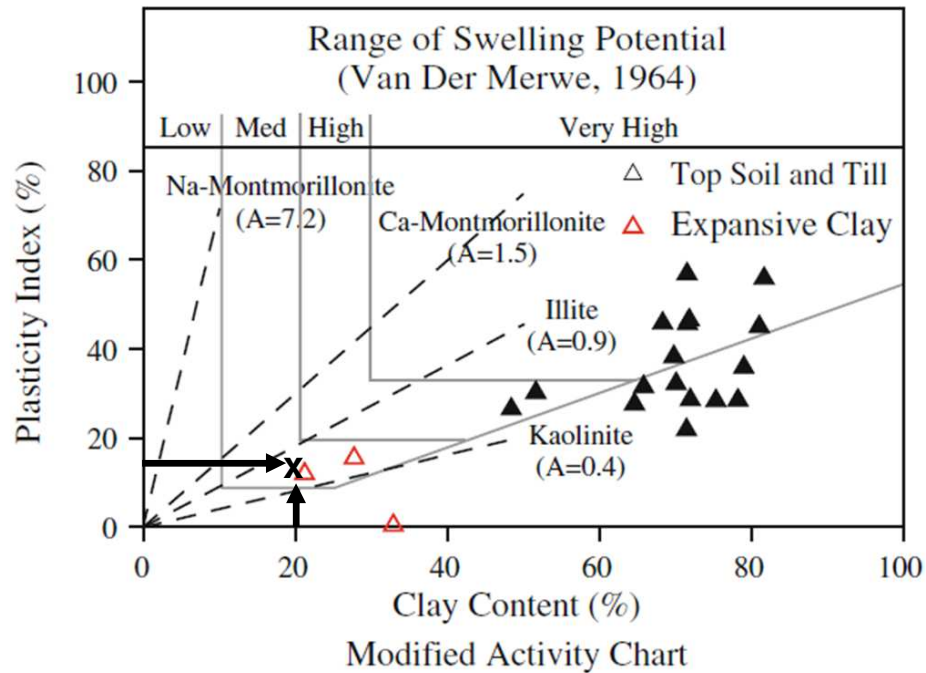


Figura 5.16. Diagrama de Van der Merwe (1964)

5.1.2 Mineralogía de la muestra

Presentación de los datos

Difracción de Rayos X

Durante el ensayo DRX se obtienen varios tipos de gráficos que definen la mineralogía de nuestra muestra. El gráfico de polvo total (Figura 5.17) recoge valiosa información sobre dicha mineralogía, representado los porcentajes de contenido de cada mineral en la Tabla 5.29.

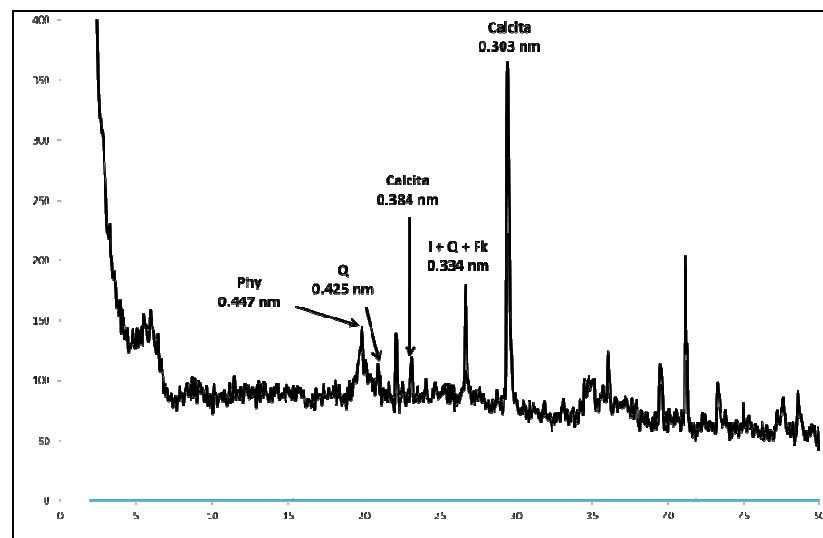


Figura 5.17. Mineralogía de rayos-X de la fracción tierra fina del suelo (< 2 mm; método del polvo desorientado).

Muestra	Filosilicatos	Cuarzo	Goethita	Hematites	Clorita	Feld.K	Feld.Na	Calcita	Dolomita
M2	78	10	tr	tr	tr	tr	tr	12	tr

Tabla 5.29. Mineralogía de rayos-X de la fracción tierra fina del suelo (< 2 mm; método del polvo desorientado).

Otro de los gráficos obtenidos (Figura 5.18) es el que presenta dos tipos de muestra. En color negro aparece la muestra seca al aire, mientras que en color gris se observa la muestra con etilenglicol. El porcentaje de contenido de cada mineral y los picos más significativos son representados en las Tabla 5.30.

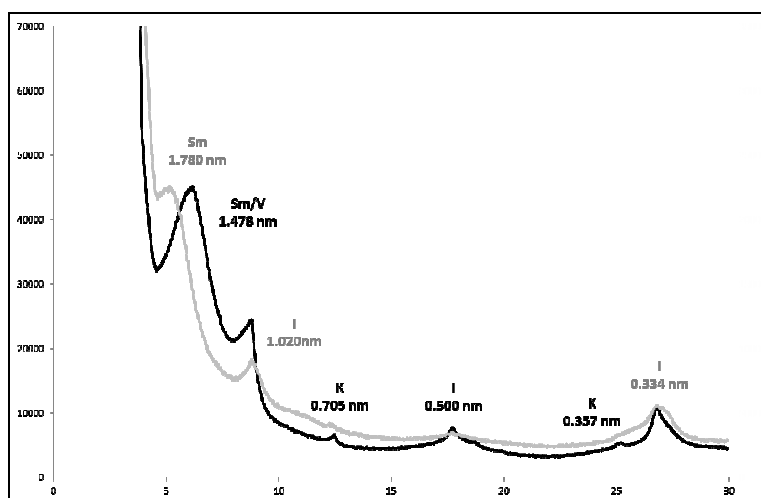


Figura 5.18. Mineralogía de rayos-X de la fracción arcilla del suelo (< 0.002 mm; método del agregado orientado).

Muestra	Sm (%)*	Ill. (%)	Cl. (%)	K. (%)	Q. (%)	Feld.K(%)	Cal. (%)	Dol. (%)
M2	51	34	0	14	0	0	0	0

* Incluye esmectita pura e interestratificados con esmectita.

Tabla 5.30. Mineralogía de rayos-X de la fracción arcilla del suelo (< 0.002 mm; método del agregado orientado).

Por último, se realiza la descomposición de la muestra en un rango de 0-10 °2θ, representando su gráfico en la Figura 5.19 y el contenido de cada mineral para cada uno de los picos en las Tablas 5.31 y 5.32.

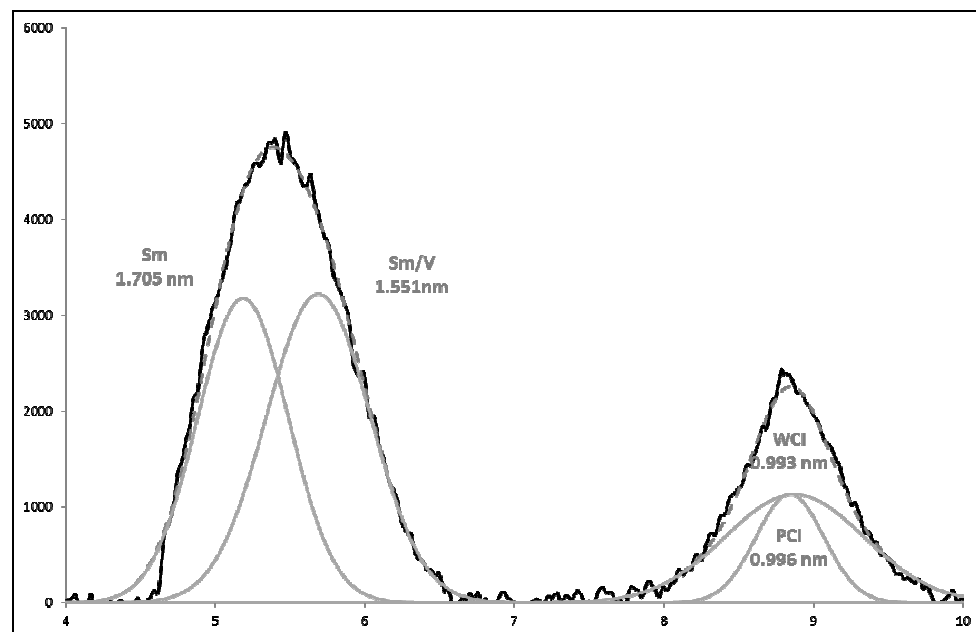


Figura 5.19. Áreas relativas (%) resultantes de la descomposición de los picos en 0-10 °2θ (Decomprx software).

	Otras fases				Illita (mica) ≈ 1.0	
Muestra	Sm (> 1.7)	Sm/V (1.5-1.7)	V (1.4-1.5)	Sm/I (<1.4)	PCI (%)	WCI (%)
M2	35 (1.705 nm)	39 (1.551 nm)	0	0	9	18

PCI = illita pobremente cristalizada (pico más ancho, normalmente >nm)

WCI = illita bien cristalizada (pico más estrecho, normalmente el más próximo a 1.000 nm)

Tabla 5.31. Áreas relativas (%) resultantes de la descomposición de los picos en 0-10 °2θ (Decomprx software).

	Descomposición 0-10 °2θ				Simulación Sm/V	
Muestra	Sm (%)	Sm/V (%)	Pico en EG (nm)*	Picos en EG (nm)**	% Esmeclita	Parámetro R
M5	35	39	1.780	1.705/1.551	44	0

*Pico experimental.

** Curva simulada (decomprx)

Tabla 5.32. Resultados de la descomposición de los picos correspondientes a fases esmeclíticas (Decomprx software) y simulación de la composición en el caso de interestratificados (Mulcalc software).

Discusión de los resultados

Si atendemos a la composición mineral deducida de los diagramas de Casagrande o Bain (Figuras 5.10 y 5.14), la muestra estaría compuesta predominantemente por minerales poco plásticos y no expansibles como illita o caolinita,

lo que hace complicado explicar la presión de hinchamiento relativamente elevada de esta muestra. Para una interpretación precisa del factor o componente del suelo que determina su expansividad, pues, se hace necesario estudiar con detalle la mineralogía del suelo, y no únicamente deducirla de la clasificación (Mitchell and Soga, 1992).

En nuestro caso, la muestra considerada presenta un claro predominio de filosilicatos (78%), en la fracción total, como corresponde a un suelo de grano fino (Tabla 5.29, Figura 5.17), con pocas cantidades de calcita (12%) y cuarzo (10%). En la fracción coloidal ($< 2 \mu\text{m}$), la más activa desde el punto de vista de la expansividad (Tabla 5.30, Figura 5.18), se obtiene un ligero predominio de minerales que han presentado hinchamiento en etilenglicol (51%), desplazando el pico de $\approx 1.5 \text{ nm}$ a más de 1.7 nm , frente a filosilicatos no expansibles como la caolinita y la mica (48% en total). Si atribuimos la totalidad del pico 1.780 nm a la montmorillonita pura, la muestra debería mostrar una expansividad notablemente superior a la que los que el estudio geotécnico indica. Por ejemplo, Azañón et al., 2010, obtiene presiones de hinchamiento de entre 200 y 500 kPa para arcillas ricas en montmorillonitas en una zona cercana al área de estudio. Así mismo, Shi et al. (2002) encuentran LL superiores al 50% e IP superiores a 25 en muestras con contenidos de montmorillonitas de entre el 40 y el 50%.

La descomposición en el sector $0-10^\circ 2\theta$ del difractograma de la Figura 2 (Tabla 5.31, Figura 5.19), nos da las claves para interpretar por qué la muestra parece presentar una expansividad (y una plasticidad) menores de lo previsto en base a su mineralogía de arcillas.

El pico experimental obtenido a 1.780 nm se descompone en dos curvas, de aproximadamente el mismo área, a 1.705 y 1.551 nm . Ambas muestran hinchamiento en EG respecto al pico 1.478 nm de la muestra seca al aire, pero grado menor al del pico sin descomponer (1.780 nm). De acuerdo con Bordchart (1989), atribuimos la primera curva a una esmectita pura dado que expande > 1.70 (considerado por este autor el límite mínimo de expansión de las esmectitas puras en EG), mientras que la segunda fase de 1.551 la atribuimos a un interestratificado de esmectita y otro filosilicato no expansible (Barnhisel and Bertsch, 1989). Para identificar la otra fase del interestratificado procedemos a simular en MULCALC combinaciones binarias de otros filosilicatos 2:1 con esmectitas, hasta conseguir el pico exacto 1.551 nm . Obtenemos una esmectita/vermiculita desordenada ($R = 0$) y con un 44% de láminas de esmectita (Tabla 5.32). Se trata, por tanto, de un interestratificado donde predomina el componente no expansivo (la vermiculita). La vermiculita es un tipo de filosilicato presente en el material detrítico de la zona de estudio, que resulta frecuentemente como producto de alteración del mineral clorita (Aparicio et al., 1997).

5.2 Muestra 1 (M1)

5.2.1 Parámetros geotécnicos: clasificación, expansividad y consolidación

Presentación de los datos

Análisis granulométrico de suelos por tamizado

Una vez preparada la muestra mediante el desecho de los terrones con la maza de goma, pesamos el total de la misma y anotamos su valor en la casilla A de la Tabla 5.1.

Se ejecuta el vertido de la muestra cuidadosamente sobre el tamiz de 2 mm, colocando el fondo del tamiz para recoger el cernido (muestra que pasa por el tamiz) y se tamiza manualmente hasta que pasa toda la muestra < 2 mm. El rechazo (muestra que no pasa por el tamiz) del tamiz de 2 mm, se vierte en la batería de tamices 0 + 1 y se tamiza en la tamizadora eléctrica durante 10-15 minutos. Seguidamente se obtienen los pesos de cada una de las fracciones de los fragmentos > 2 mm, las cuales apuntamos en las casillas correspondientes a la columna de Peso de Muestra No Cuarteado de la Tabla 5.3. El peso total de la fracción > 2 mm se obtiene como la suma de los pesos parciales y se apunta en la casilla F de la Tabla 5.2. El cernido del tamiz de 2 mm se cuarteo y se toman dos porciones: una para la determinación de la humedad higroscópica de aproximadamente 20g y otra para la continuación del tamizado de la muestra en la batería de tamices 2, de entre 100 y 50 g, que se anota en la casilla G de las Tablas 5.4.

Para la determinación de la humedad higroscópica, se anotan los datos en el modelo de Tabla 5.1. La muestra de aproximadamente 20g se traslada a una cápsula, previamente tarada, y se deseca en estufa a 115°C durante 24h. Pasado este tiempo, se saca de la estufa y se procede a su pesada, anotando los valores en la Tabla 5.1.

Humedad Higroscópica M1	
Gramos de la muestra	20,04g
Tara pesafiltros (t)	65,50g
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	85,54g
Pesafiltros + suelo seco (t+s)	84,32g
Suelo (s) = (t+s) - t	18,82g
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	1,22g
Humedad higroscópica (w) = (a/s)*100	6,48%
f_h = Factor de corrección humedad = $100/(100+w)$	0,94

Tabla 5.1. Humedad higroscópica de la muestra M1

En este punto, procedemos a la dispersión de la segunda porción de tierra fina cuarteada. Para ello, se vierte la muestra pesada y anotada en la casilla G de las Tablas 5.2, en un vaso de precipitado de 1000 ml, añadiendo al mismo 125 ml de solución de

Polifosfato de sodio al 4% y unos 200 ml de agua destilada, agitando con una varilla de vidrio durante 10-15 minutos.

Muestra 1		
A	Muestra total (g)	899,00
B	Muestra retenida en el tamiz 20 mm, lavada y secada en estufa (g)	0,00
C	Porción que tomamos del cernido del tamiz de 20 mm [cuarteo] (g)	0,00
D	Muestra total entre 20 y 2 mm, lavada y secada en estufa (g)	206,00
$E = D \cdot f_1$	Muestra total entre 20 y 2 mm, lavada y secada en estufa [corregido cuarteo] (g)	206,00
$F = B + E$	Muestra retenida en el tamiz 2 mm, lavada y secada en estufa (g)*	206,00
G	Porción que tomamos del cernido del tamiz de 2 mm [cuarteo] (g)	96,50
$H = G \cdot f_h$	Muestra que pasa por el tamiz 2 mm, lavada y secada en estufa [corregida humedad] (g)*	90,63
$J = (A - F) \cdot f_h$	Muestra total que pasa por el tamiz 2 mm, secada [corregida humedad] (g)	650,81
$K = F + J$	Muestra total seca (g)	856,81

Tabla 5.2. Datos totales del análisis granulométrico muestra M1

Tras agitar, vertemos el contenido del vaso de precipitado en el tamiz de 0.08 mm, lavando hasta que la muestra salga clara. El rechazo > 0.08 mm se vierte en la batería de tamices 2 y se tamiza en la tamizadora eléctrica durante 10-15 minutos, anotando cada una de las fracciones en las casillas de la columna Peso de Muestra Cuarteada de las Tablas 5.7. Para hallar el Peso de Muestra No Cuarteado referente a la batería de tamices 2, se multiplica por el factor de corrección del cuarteo 2, f_2 , el cual se obtiene del resultado de la división de la casilla J, muestra total que pasa por el tamiz 2 mm, secada, entre la casilla H, muestra que pasa por el tamiz 2 mm, lavada y secada en estufa.

Muestra 1							
Batería de Tamices	Tamiz (mm)	Tara Tamiz (g)	Tara + Muestra (g)	Peso Muestra Cuarteada (g)	Peso Muestra No Cuarteada (g)	Pasa de la Muestra Total	
						(g)	(%)
0	80					856,81	100,00
	60					856,81	100,00
	50					856,81	100,00
	40					856,81	100,00
	25					856,81	100,00
1	20	683	683	0	0	856,81	100,00
	12,5	605	605	0	0	856,81	100,00
	11,2	587	587	0	0	856,81	100,00
	10	591	591	0	0	856,81	100,00
	6,3	562	562	0	0	856,81	100,00
	5	559	563	4	4	852,81	99,53
	2	520	722	202	202	650,81	75,96
2	1,600	514	514	0	0,00	650,81	75,96
	1,250	492	493	1	7,18	643,63	75,12
	0,630	473	475	2	14,36	629,26	73,44
	0,400	433	435	2	14,36	614,90	71,77
	0,320	442	443	1	7,18	607,72	70,93
	0,250	435	437	2	14,36	593,36	69,25
	0,200	433	435	2	14,36	578,99	67,58
	0,160	419	423	4	28,72	550,27	64,22
	0,080	411	431	20	143,62	406,64	51,46

Tabla 5.3. Análisis granulométrico (fracciones) de la muestra M1

Límite líquido

El material obtenido en el tamizado anteriormente realizado se amasa con agua sobre un cristal con ayuda de las espátulas, asegurando una humectación homogénea de toda la masa. Cuando hayamos conseguido una pasta homogénea, se rellena la cuchara, previamente separada del aparato de Casagrande, con una porción de pasta suficiente para cubrir 4/5 partes de su diámetro y con una superficie lisa. A continuación, se realiza el surco con el acanalador, disponiendo en todo momento el acanalador perpendicular a la superficie y describiendo un arco. Efectuado el surco, se vuelve a colocar la cuchara sobre el aparato de Casagrande.

Se hace una primera determinación de la humedad en el Límite Líquido. Para ello, se gira la manivela a razón de dos vueltas por segundo, contando el número de golpes necesarios para que el surco se cierre en el fondo al menos 13 mm. Se apuntan los golpes, que deben estar comprendidos entre 25 y 35 (Tabla 5.4).

Muestra 1: LL 25-35	
Nº de golpes	32
Tara pesafiltros (t)	56,50
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	70,50
Pesafiltros + suelo secado (t+s)	63,59
Suelo (s) = (t+s) - t	7,09
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	6,91
% Humedad 1 (w) = (a/s)*100	97,46

Tabla 5.4. Determinación primera Límite Líquido (25-35 golpes) de la muestra M1

Para la segunda determinación, seguimos las mismas especificaciones que en la primera pero, en este caso, los golpes deben estar comprendidos entre 15 y 25. Los golpes resultantes para cada muestra se apuntarán en la Tabla 5.5.

Muestra 1: LL 15-25	
Nº de golpes	18
Tara pesafiltros (t)	55,42
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	66,83
Pesafiltros + suelo secado (t+s)	63,45
Suelo (s) = (t+s) - t	8,03
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	3,38
% Humedad 1 (w) = (a/s)*100	42,09

Tabla 5.5. Determinación segunda Límite Líquido (15-25 golpes) de la muestra M1

Límite plástico

Se obtiene una porción de unos 20 g aproximadamente que haya pasado por el tamiz de 0.400 mm y se amasa con agua destilada hasta formar con facilidad una bola.

Se moldea la mitad de la muestra en forma de elipsoide y, a continuación, se hace rodar entre los dedos de la mano y en el cristal con la presión estrictamente necesaria para que se formen cilindros del diámetro necesario.

Cuando alcanzamos el diámetro de 3 mm sin que se resquebraje, se parte en seis trozos, volviendo a amasarlos juntos, con los dedos de ambas manos hasta conseguir de un elipsoide. Se repite el proceso descrito cuantas veces sea necesario hasta que el cilindro se desquebraje, siendo mayor de 3 mm. El proceso de detiene en este punto.

Las porciones obtenidas, de un mínimo de 5 g, se colocan en un pesafiltros y se determina la humedad mediante el secado en estufa, anotando los datos obtenidos para cada muestra en la Tabla 5.6.

Muestra 1: LP	
Tara pesafiltros (t)	56,53
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	71,42
Pesafiltros + suelo secado (t+s)	68,55
Suelo (s) = (t+s) - t	12,02
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	2,87
% Humedad 1 (w) = (a/s)*100	23,88

Tabla 5.6. Determinación Límite Plástico de la muestra M1

Clasificación de Casagrande

Con esta ultima parte de la clasificación, se obtendrá el tipo de suelo correspondiente a cada una de las muestras. Nos apoyamos en los resultados obtenidos de Límite Líquido y Límite Plástico de cada muestra para la realización de esta parte del ensayo.

Usando el Nomograma de Casagrande y mediante los datos del número de golpes y el porcentaje de humedad resultante, obtenemos el porcentaje de humedad del Límite Líquido a 25 golpes. Este dato, junto al porcentaje de humedad del Límite Plástico (LP), sirva para calcular el Índice de Plasticidad (IP), dato que junto al Límite Líquido (LL) dará el tipo de suelo obtenido para cada muestra. Los cálculos de Índice Plástico se reflejan de la siguiente forma:

- Muestra 1:

LL (obtenido mediante el Nomograma de Casagrande): 64%

LP: 24%%

$$IP = LL - LP = 64\% - 24\% = 40\%$$

Con los cálculos realizados y los resultados obtenidos, se determina el tipo de suelo mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande (Figura 5.1), según la cual se obtiene un suelo CH.

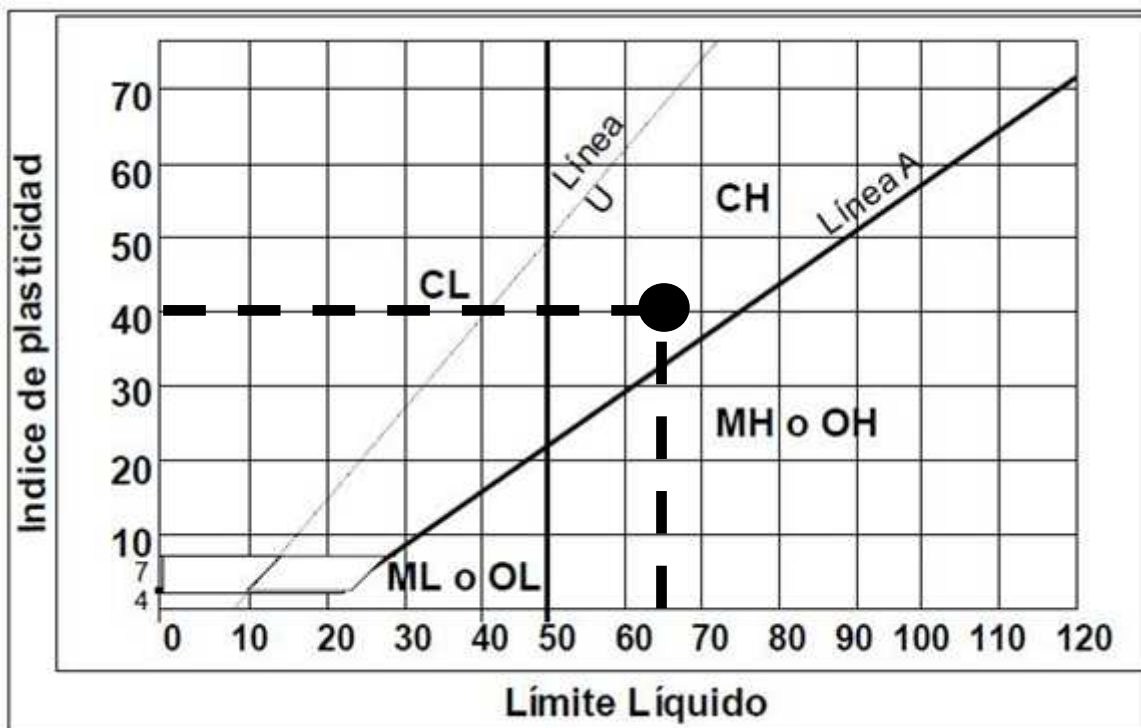


Figura 5.1. Carta de Plasticidad de Casagrande.

Presión de hinchamiento

Una vez preparada la muestra en la célula edométrica y preparado el equipo edométrico para la realización del ensayo. Observamos que el medidor comienza a desplazarse hacia la derecha, haciendo patente el hinchamiento. Durante varias horas debemos estar pendientes de estabilizar el medidor hasta que quede en cero. Dicha estabilización se consigue añadiendo peso en el cargadero, hasta que la muestra deja de presentar el hinchamiento y se mantiene en dicho número.

En este caso, el peso añadido fue de 9,25 kg y una presión de hinchamiento de 126kPa, con lo que se finaliza la parte del ensayo correspondiente a la presión de hinchamiento.

Consolidación

Partiendo del peso obtenido en el ensayo de presión de hinchamiento, continuamos determinando la consolidación que presentan nuestras muestras. Se establecen seis escalones de carga y dos de descarga.

Para comenzar la carga por escalones, mantenemos el peso añadido en el ensayo anterior.

Finalizado el proceso de descarga, se extrae la célula edométrica, eliminando el agua contenida en su interior y sacando el anillo edométrico que contiene la muestra de suelo, intentando eliminar cuidadosamente el exceso de agua con un papel poroso y absorbente. Tras extraer las muestras, se introduce una porción de cada una de ellas en

un pesafiltros y este, a su vez, en la estufa desecadora. Transcurridas 24h se extraen las muestras y se pesan, obteniendo los resultados que aparecen en la Tabla 5.7, Tabla 5.8 y Tabla 5.9.

CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA M1		
Estado	Inicial	Final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1,81	1,85
Densidad seca (g/cm ³)	1,36	1,36
Humedad (%)	33,09	36,38
Grado de saturación (%)	95,24	116,31
Índice de huecos (e)	0,89	0,80
Altura de sólidos (H)	10,57	10,57
Densidad relativa de las partículas (g/cm ³)	2,57	

Tabla 5.7. Características de la muestra M1

PARÁMETROS DE LA MUESTRA M1	
Presión de hinchamiento (kp/cm ²)	1,26
Presión inicial (kp/cm ²)	0,39
Presión de preconsolidación (kp/cm ²)	3,86
Razón de sobreconsolidación (OCR)	9,95

Tabla 5.8. Parámetros de la muestra M1

Carga (kp/cm²)	Carga (kpa)	H probeta (mm)	H sólido (mm)	Deformación unitaria	Cambio de espesor	Índice de huecos
1,26	123,56	20,00	10,57	0	0,000	0,891
1,78	174,56	19,92	10,57	-0,004	-0,078	0,884
2,55	250,07	19,77	10,57	-0,012	-0,230	0,870
5,09	499,16	19,28	10,57	-0,037	-0,720	0,823
10,19	999,30	18,70	10,57	-0,070	-1,298	0,769
15,28	1498,46	18,35	10,57	-0,090	-1,654	0,735
20,37	1997,61	18,03	10,57	-0,109	-1,970	0,705
Descarga (kp/cm²)	Carga (kpa)	H probeta (mm)	H sólido (mm)	Deformación unitaria	Cambio de espesor	Índice de huecos
2,55	250,07	18,79	10,57	-0,064	0,760	0,777
1,27	124,54	19,06	10,57	-0,049	1,030	0,802

Tabla 5.9. Resultados del ensayo de consolidación para la muestra M1

Mediante los resultados obtenidos durante el ensayo, reflejados en la Tabla 5.10, y cálculos posteriores, se traza la curva Índice de huecos – Carga (Figura 5.2), en este usando la escala logarítmica de este último valor.

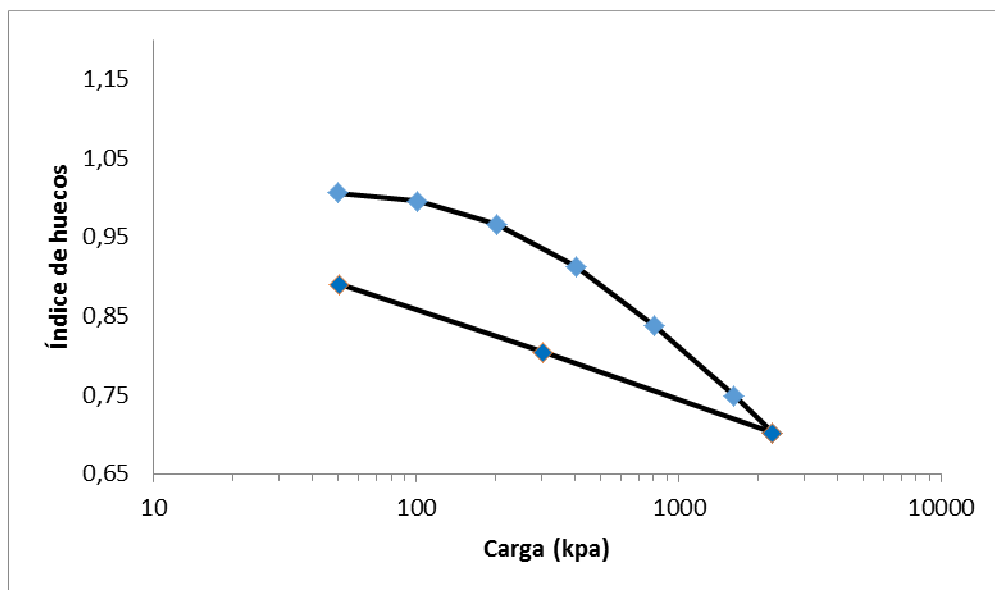


Figura 5.2. Curva Índice de huecos – Carga para la muestra M1

Para el cálculo de la presión de preconsolidación (kPa), se utiliza el método gráfico de Casagrande, el cual se aplica sobre la Figura 5.2. El método gráfico se describe en la Figura 5.3, y el resultado obtenido para la presión de preconsolidación en la muestra 2 es de 398 kpa.

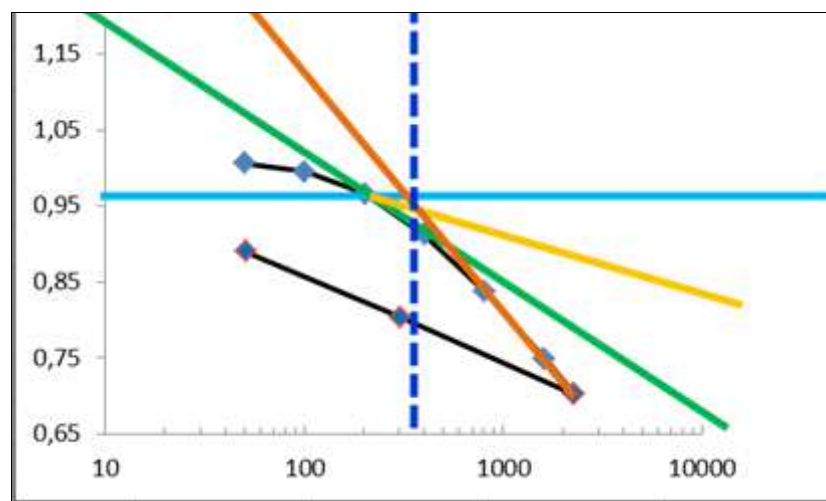


Figura 5.3. Método gráfico presión preconsolidación para la muestra M1

Análisis granulométrico de suelos por sedimentación

Recogidos 20 gramos de muestra M1 y finalizado el proceso de ensayo, los resultados obtenidos para cada tiempo son los que se reflejan en la Tabla 5.10.

Tiempo (min)	Tamiz por el que pasa la muestra (mm)	% Muestra que pasa sobre 20 g	% Muestra que pasa sobre total de finos	% Retenido en el tamiz
0,5	0,08	100	51,46	51
1	0,05	40	20,58	31
3	0,02	32,5	16,72	4
60	0,005	32,5	16,72	0
90	0,002	27,5	14,15	3

Tabla 5.10. Método Resultados análisis por sedimentación para la muestra M1

Una vez calculado el porcentaje de muestra que pasa por cada uno de los tamices, se puede clasificar cada uno de ellos con el tipo de suelo al que corresponde, reflejándose en la Tabla 5.11:

Tipo de suelo	% Muestra
Grava	0
Arena	49
Finos	51
Limos	37
Arcillas	14

Tabla 5.11. Tipo de suelo por ensayo de sedimentación para la muestra M1

Por último, se calcula la actividad de la muestra mediante la división de los porcentajes de Índice de plasticidad, 40%, entre las arcillas que contiene M1, 14%, siendo el resultado de la Actividad para la muestra M1 de 2,85, situándose en el tipo Interestratificados.

Densidad relativa

Una vez finalizado el ensayo y obtenidos los pesos correspondiente en cada una de las fases del mismo, se plasman los resultados en la Tabla 5.10. En nuestro caso, el ensayo ha sido realizado a una temperatura del agua de 26°C, a lo que le corresponde una densidad del agua (D_w) de 996,86 kg/m³.

M1	
Procesos del ensayo	Peso (g)
P1: Tara matraz con tapón	41,25
P2: P1 + muestra	51,66
P3: P2 + agua destilada	96,71
P4: P1 + agua destilada	90,94
P5 (V. Sólido): (P4-P1)-(P3-P2)	4,64
P6 (Masa del sólido): P2-P1	10,41
Densidad real: (P5/P6) $\times$ Dw	0,04

Tabla 5.12. Resultado para la densidad real de la muestra M1

Discusión de los resultados

Se trata de una muestra de grano fino (49% pasa por el tamiz nº 200), aunque con una cantidad importante y casi equivalente de arenas (51%). Aunque granulométricamente predominan los limos dentro del material fino (37%, frente al 14% de arcilla), la muestra presenta una elevada plasticidad ($LL > 50\%$), lo que la lleva a clasificarla dentro del grupo CH (arcillas de elevada plasticidad).

Las propiedades de estado indican que se trata de un material ligeramente más blando que el horizonte de la muestra M2, con un índice de poros de 0,89, una densidad aparente de $1,36 \text{ g/cm}^3$ y un peso específico aparente seco γ_d de $13,33 \text{ kN/m}^3$ (González de Vallejo et al., 2004). En estado natural el suelo está bastante seco (humedad del 33%), con un bajo índice de fluidez (0,23), lo que puede condicionar un efecto más pronunciado de su expansibilidad potencial.

La presión de preconsolidación es similar a la del suelo de la muestra M2 (386kPa) y debe interpretarse en el mismo sentido, un material moderadamente duro o rígido (Mitchell and Soga, 2005). Respecto a este horizonte, se ha estimado una razón de sobreconsolidación (OCR) de 9,95, lo que nos indicaría una arcilla bastante sobreconsolidada (Urbaitis et al., 2016). El índice de compresión C_c (0,212), cae dentro del típico rango de arcillas limosas, establecido por Mitchell and Soga (1992) entre 0,15 y 0,3, indicando como en el caso del horizonte de la muestra M2, una muestra de moderada rigidez (Azam et al., 2013). Por último, el índice de entumecimiento (Swellingindex, C_s) es algo superior (0,081) que el horizonte de la muestra M2, en coherencia con su mayor plasticidad.

Las Figuras 5.4 y 5.5 muestran los diagramas de Holtz and Kovac (1981) y Bain (1971), en virtud de los cuales puede hacerse una predicción de la mineralogía del suelo en función de sus propiedades mecánicas. El primero de los diagramas muestra que la mineralogía del material debe ser intermedia entre la montmorillonita y la illita. Por su

parte, en el diagrama de Bain, la muestra se representa en el campo de las illitas y los caolines plásticos (alterados). Ambos predicen, por tanto, una composición relativamente más rica en minerales expansibles que el horizonte rojo, aunque hay que tener en cuenta también el alto contenido en arenas.

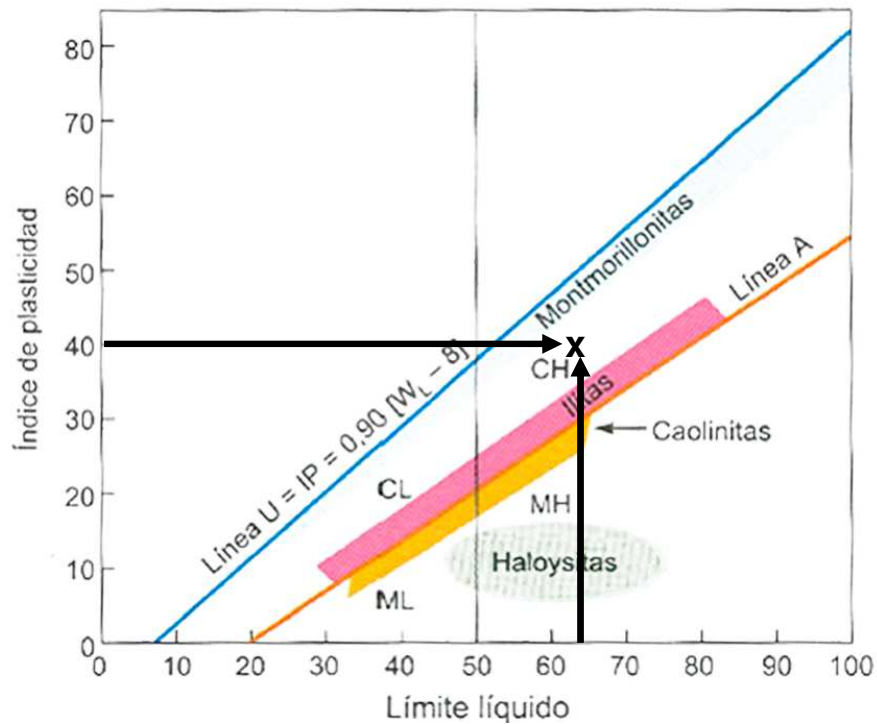


Figura 5.4. Diagrama de Holtz & Kovac (1981)

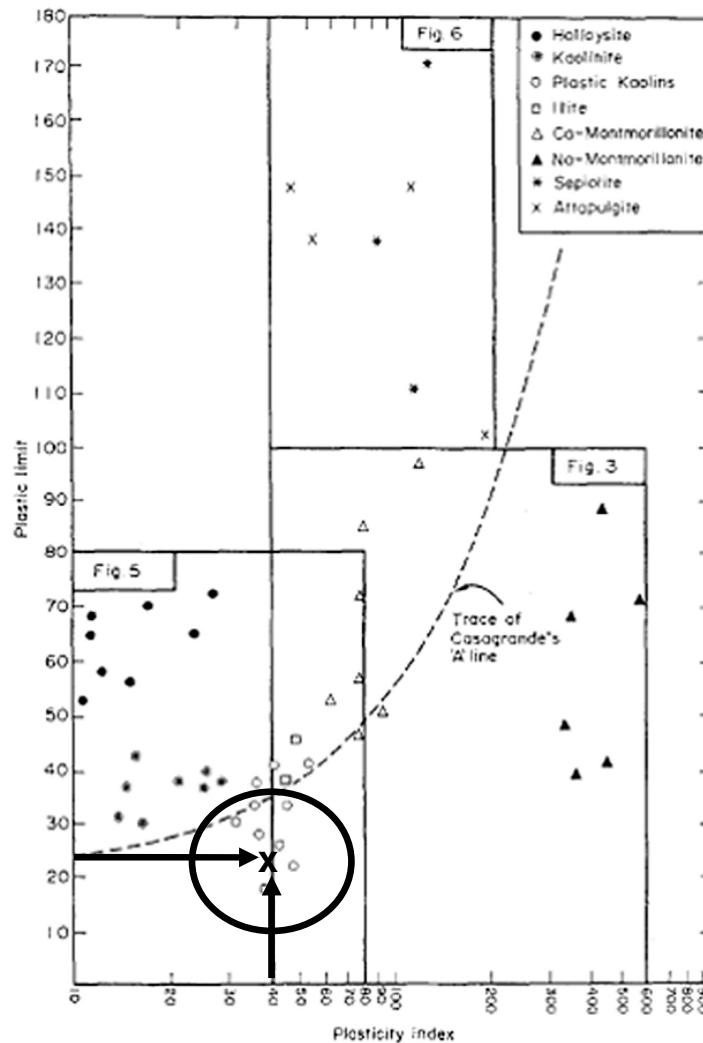


Figura 5.4. Diagrama de Bain (1971)

En función de la mayor plasticidad de esta muestra, Peck et al. (1974) y Chen (1988) consideran este material como de expansividad alta ($IP > 35$). Estos valores vuelven a ser muy coherentes con la interpretación de la presión de hinchamiento obtenida, 126kPa, que incluye a este material en la Clase III de expansividad alta (González de Vallejo et al., 2004).

La actividad de la arcilla (A) calculada para este horizonte fue la mayor de los tres horizontes estudiados, 2,85. En el diagrama de Van de Merwe (1964), representado en la Figura 5.6, y de forma coherente con el diagrama de Holtz y Kovac (Figura 5.4) antes comentado, nos indica una composición más rica en minerales expansivos, en este caso, montmorillonita. Por último, el diagrama de Bell and Maud (1995), representado en la Figura 5.5, nos indicaría que estamos ante una muestra con expansividad media-alta.

En virtud a todo lo comentado anteriormente, estamos ante una muestra muy parecida a la anteriormente comentada, si bien con plasticidad y expansividad ligeramente mayor.

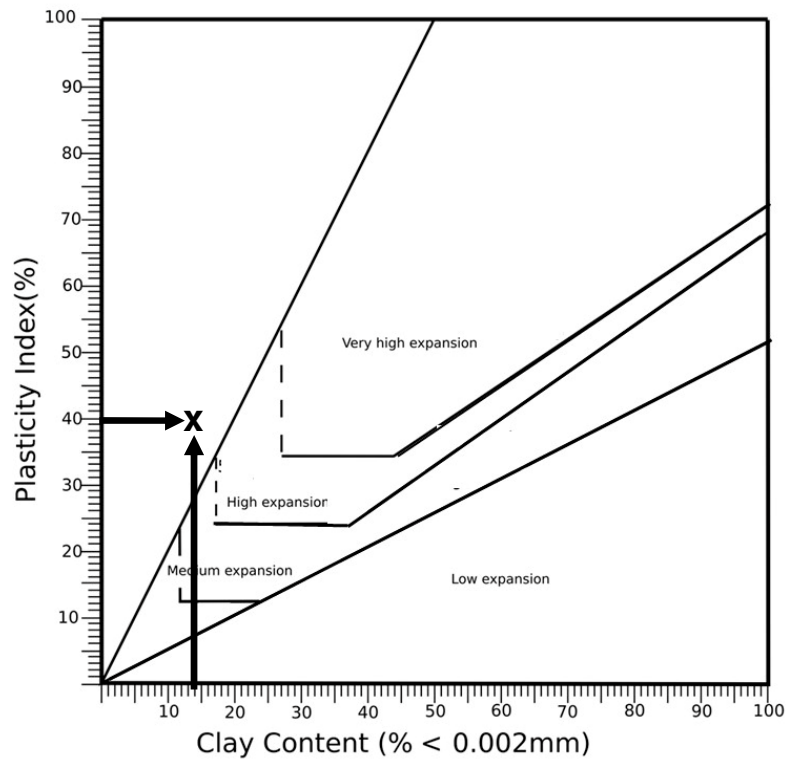


Figura 5.5. Diagrama de Bell & Maud (1995)

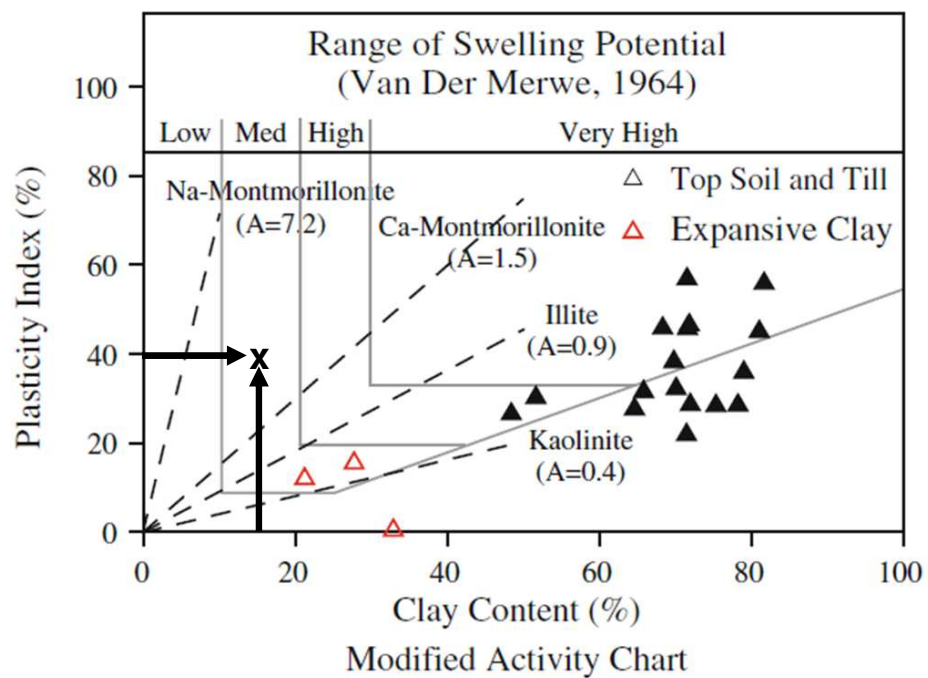


Figura 5.6. Diagrama de Van der Merwe (1964)

5.2.2 Mineralogía de la muestra

Presentación de los datos

Durante el ensayo DRX se obtienen varios tipos de gráficos que definen la mineralogía de nuestra muestra. El gráfico de polvo total (Figura 5.7) recoge valiosa información sobre dicha mineralogía, representado los porcentajes de contenido de cada mineral en la Tabla 5.13.

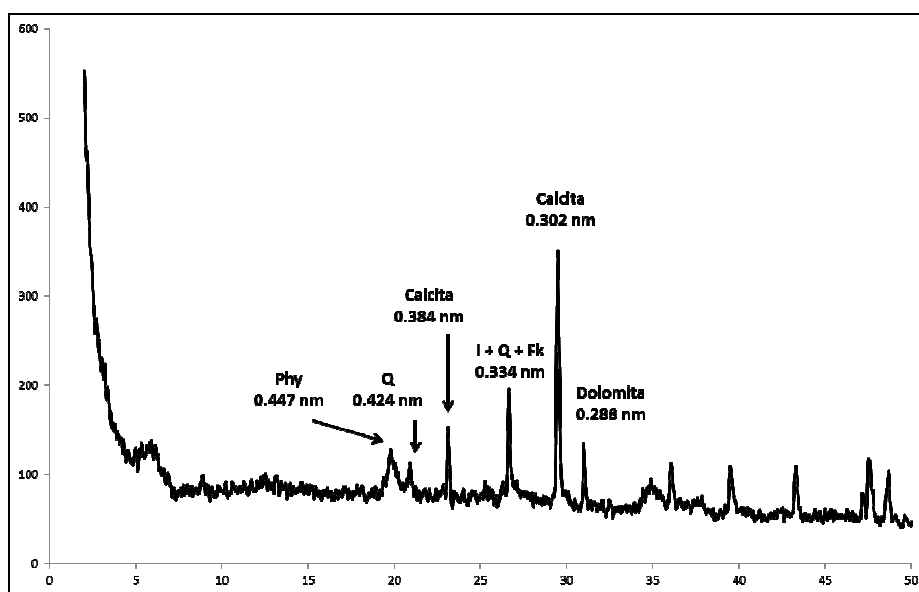


Figura 5.7. Mineralogía de rayos-X de la fracción tierra fina del suelo (< 2 mm; método del polvo desorientado).

Muestra	Filosilicatos	Cuarzo	Goethita	Hematites	Clorita	Feld.K	Feld.Na	Calcita	Dolomita
M1	76	9	tr*	tr	tr	tr	tr	13	3

*tr: trazas (< 1%).

Tabla 5.13. Mineralogía de rayos-X de la fracción tierra fina del suelo (< 2 mm; método del polvo desorientado).

Otro de los gráfico obtenidos (Figura 5.8) es el que presenta dos tipos de muestra. En color negro aparece la muestra seca al aire, mientras que en color gris se observa la muestra con etilenglicol. El porcentaje de contenido de cada mineral y los picos más significativos son representados en las Tabla 5.14.

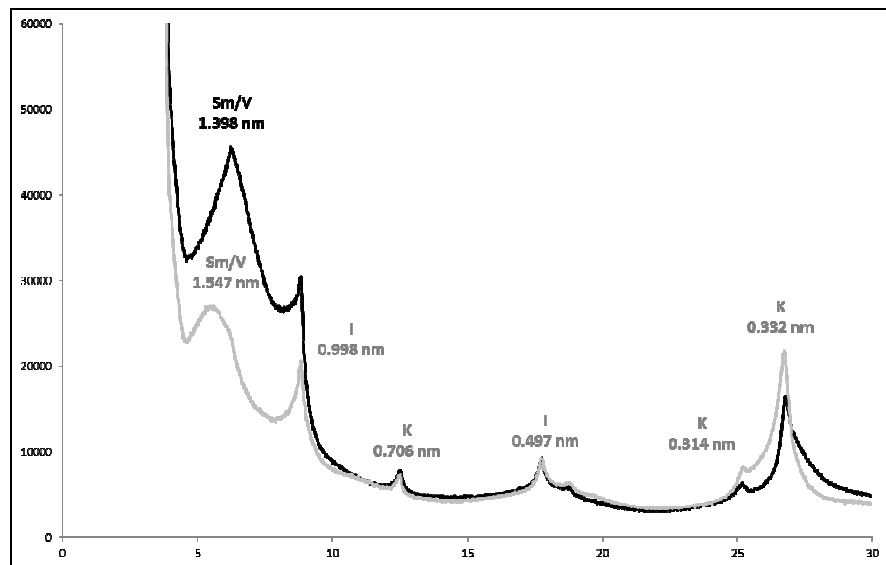


Figura 5.8. Mineralogía de rayos-X de la fracción arcilla del suelo (< 0.002 mm; método del agregado orientado).

Muestra	Sm (%)*	Ill. (%)	Cl. (%)	K. (%)	Q. (%)	Feld.K(%)	Cal. (%)	Dol. (%)
M1	49	44	0	7	0	0	0	0

* Incluye esmectita pura e interestratificados con esmectita.

Tabla 5.14. Mineralogía de rayos-X de la fracción arcilla del suelo (< 0.002 mm; método del agregado orientado).

Por último, se realiza la descomposición de la muestra en un rango de 0-10 °2θ, representando su gráfico en la Figura 5.9 y el contenido de cada mineral para cada uno de los picos en las Tablas 5.15 y 5.16.

	Otras fases				Illita (mica) ≈ 1.0	
Muestra	Sm (> 1.7)	Sm/V (1.5-1.7)	V (1.4-1.5)	Sm/I (<1.4)	PCI (%)	WCI (%)
M1	0	68 (1.542 nm)	0	0	26	7

PCI = illita pobremente cristalizada (pico más ancho, normalmente >nm)

WCI = illita bien cristalizada (pico más estrecho, normalmente el más próximo a 1.000 nm)

Tabla 5.15. Áreas relativas (%) resultantes de la descomposición de los picos en 0-10 °2θ (Decomprx software).

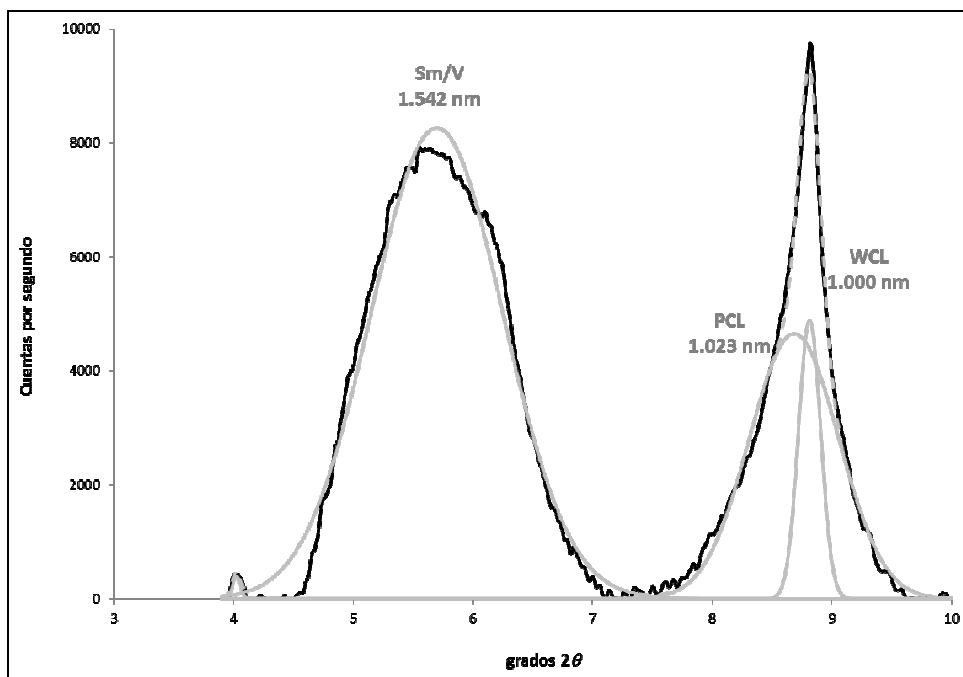


Figura 5.9. Áreas relativas (%) resultantes de la descomposición de los picos en 0-10 $^{\circ}2\theta$ (Decomprx software).

	Descomposición 0-10 $^{\circ}2\theta$				Simulación Sm/V	
Muestra	Sm(%)	Sm/V(%)	Pico en EG (nm)*	Pico en EG (nm)**	% Esmeclita	Parámetro R
M1	0	68	1.547	1.542	41	0

*Pico experimental.

** Curva simulada (decomprx).

Tabla 5.16. Resultados de la descomposición de los picos correspondientes a fases esmeclíticas (Decomprx software) y simulación de la composición en el caso de interestratificados (Mulcalc software).

Discusión de los resultados

Esta muestra presenta muchas similitudes en su composición mineralógica, con respecto a la anteriormente comentada. Como ella, presenta un claro predominio de filosilicatos (76%) en la fracción total, junto con calcita (13%) y cuarzo (9%) como minerales accesorios (Tabla 5.13). La fracción arcilla (< 2 μm) se compone de cantidades casi idénticas de fases expansivas (49% de esmeclita, Tabla 5.14) y no expansivas (caolinita e illita, 53% entre ambas). La expansividad del pico seco al aire ≈ 15 nm (1,398 nm) (Figura 5.8) es menor que en la muestra anterior (1.547 nm) (Figura 5.9), lo que indica la ausencia de esmeclita pura y la presencia de interestratificados de esmeclita. La descomposición del pico experimental 1.547 nm no arroja más que una curva teórica

coincidente en posición (1.542 nm), curva que mediante la simulación podemos atribuir a un interestratificado de esmectita con vermiculita desordenado ($R = 0$), y un 40% de láminas de esmectita (Barnhisel and Bertsch, 1989), muy similar, por tanto, al de la muestra roja. En ambos casos, por tanto, las presiones de hinchamiento similares (124,8 y 126,0 kPa en la muestra M2 y M1, respectivamente) vienen condicionadas por mineralogías similares, teniendo que restar importancia al hecho de que la muestra roja se clasifique dentro de la Clase II (media expansividad) mientras que la presente muestra se clasifique dentro de la Clase III (alta expansividad).

5.3 Muestra 3 (M3)

5.3.1 *Parámetros geotécnicos: clasificación, expansividad y consolidación*

Presentación de los datos

Análisis granulométrico de suelos por tamizado

Una vez preparada la muestra mediante el desecho de los terrones con la maza de goma, pesamos el total de la misma y anotamos su valor en la casilla A de la Tabla 5.34.

Se ejecuta el vertido de la muestra cuidadosamente sobre el tamiz de 2 mm, colocando el fondo del tamiz para recoger el cernido (muestra que pasa por el tamiz) y se tamiza manualmente hasta que pasa toda la muestra < 2 mm. El rechazo (muestra que no pasa por el tamiz) del tamiz de 2 mm, se vierte en la batería de tamices 0 + 1 y se tamiza en la tamizadora eléctrica durante 10-15 minutos. Seguidamente se obtienen los pesos de cada una de las fracciones de los fragmentos > 2 mm, las cuales apuntamos en las casillas correspondientes a la columna de Peso de Muestra No Cuarteado de la Tabla 5.35. El peso total de la fracción > 2 mm se obtiene como la suma de los pesos parciales y se apunta en la casilla F de la Tabla 5.34. El cernido del tamiz de 2 mm se cuarteo y se toman dos porciones: una para la determinación de la humedad higroscópica de aproximadamente 20g y otra para la continuación del tamizado de la muestra en la batería de tamices 2, de entre 100 y 50 g, que se anota en la casilla G de la Tabla 5.34.

Para la determinación de la humedad higroscópica, se anotan los datos en el modelo de Tabla 5.33. La muestra de aproximadamente 20g se traslada a una cápsula, previamente tarada, y se deseca en estufa a 115°C durante 24h. Pasado este tiempo, se saca de la estufa y se procede a su pesada, anotando los valores en la Tabla 5.33.

Humedad Higroscópica M3	
Gramos de la muestra	20,22g
Tara pesafiltros (t)	60,68g
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	80,90g
Pesafiltros + suelo seco (t+s)	79,12g
Suelo (s) = (t+s) - t	18,44g
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	1,78g
Humedad higroscópica (w) = (a/s)*100	9,65%
fh = Factor de corrección humedad = 100/(100+w)	0,91

Tabla 5.33. Humedad higroscópica de la muestra M3

En este punto, procedemos a la dispersión de la segunda porción de tierra fina cuarteada. Para ello, se vierte la muestra pesada y anotada en la casilla G de las Tablas 5.34, en un vaso de precipitado de 1000 ml, añadiendo al mismo 125 ml de solución de Polifosfato de sodio al 4% y unos 200 ml de agua destilada, agitando con una varilla de vidrio durante 10-15 minutos.

Muestra 3		
A	Muestra total (g)	1050
B	Muestra retenida en el tamiz 20 mm, lavada y secada en estufa (g)	0
C	Porción que tomamos del cernido del tamiz de 20 mm [cuarteo] (g)	0
D	Muestra total entre 20 y 2 mm, lavada y secada en estufa (g)	257,75
E = D*f1	Muestra total entre 20 y 2 mm, lavada y secada en estufa [corregido cuarteo] (g)	258
F = B+E	Muestra retenida en el tamiz 2 mm, lavada y secada en estufa (g)*	258
G	Porción que tomamos del cernido del tamiz de 2 mm [cuarteo] (g)	97,09
H = G*fh	Muestra que pasa por el tamiz 2 mm, lavada y secada en estufa [corregida humedad] (g)*	88,54
J = (A-F)*fh	Muestra total que pasa por el tamiz 2 mm, secada [corregida humedad] (g)	722,28
K = F+J	Muestra total seca (g)	980,28

Tabla 5.34. Datos totales del análisis granulométrico muestra M3

Tras agitar, vertemos el contenido del vaso de precipitado en el tamiz de 0.08 mm, lavando hasta que la muestra salga clara. El rechazo > 0.08 mm se vierte en la batería de

tamices 2 y se tamiza en la tamizadora eléctrica durante 10-15 minutos, anotando cada una de las fracciones en las casillas de la columna Peso de Muestra Cuarteada de la Tabla 5.35. Para hallar el Peso de Muestra No Cuarteado referente a la batería de tamices 2, se multiplica por el factor de corrección del cuarteo 2, f_2 , el cual se obtiene del resultado de la división de la casilla J, muestra total que pasa por el tamiz 2 mm, secada, entre la casilla H, muestra que pasa por el tamiz 2 mm, lavada y secada en estufa.

Muestra 3							
Batería de Tamices	Tamiz (mm)	Tara Tamiz (g)	Tara + Muestra (g)	Peso Muestra Cuarteada (g)	Peso Muestra No Cuarteada (g)	Pasa de la Muestra Total	
						(g)	(%)
0	80					980,28	100,00
	60					980,28	100,00
	50					980,28	100,00
	40					980,28	100,00
	25					980,28	100,00
1	20	683	683	0	0	980,28	100,00
	12,5	605	605	0	0	980,28	100,00
	11,2	587	587	0	0	980,28	100,00
	10	591	591	0	0	980,28	100,00
	6,3	562	570	8	8	972,28	99,18
	5	559	577	18	18	954,28	97,35
	2	520,25	752	231,75	231,75	722,53	73,71
2	1,600	514	514	0	0,00	722,53	73,71
	1,250	492	492	0	0,00	722,53	73,71
	0,630	473	473	0	0,00	722,53	73,71
	0,400	433	434	1	8,15	714,37	72,87
	0,320	442	443	1	8,15	706,21	72,04
	0,250	435	436	1	8,15	698,06	71,21
	0,200	433	435	2	16,31	681,74	69,55
	0,160	419	421	2	16,31	665,43	67,88
	0,080	411	422	11	89,73	575,70	58,73

Tabla 5.35. Análisis granulométrico (fracciones) de la muestra M3

Límite líquido

El material obtenido en el tamizado anteriormente realizado se amasa con agua sobre un cristal con ayuda de las espátulas, asegurando una humectación homogénea de toda la masa. Cuando hayamos conseguido una pasta homogénea, se rellena la cuchara, previamente separada del aparato de Casagrande, con una porción de pasta suficiente

para cubrir 4/5 partes de su diámetro y con una superficie lisa. A continuación, se realiza el surco con el acanalador, disponiendo en todo momento el acanalador perpendicular a la superficie y describiendo un arco. Efectuado el surco, se vuelve a colocar la cuchara sobre el aparato de Casagrande.

Se hace una primera determinación de la humedad en el Límite Líquido. Para ello, se gira la manivela a razón de dos vueltas por segundo, contando el número de golpes necesarios para que el surco se cierre en el fondo al menos 13 mm. Se apuntan los golpes, que deben estar comprendidos entre 25 y 35 (Tabla 5.11).

Muestra 3: LL 25-35	
Nº de golpes	26
Tara pesafiltros (t)	59,36
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	75,57
Pesafiltros + suelo secado (t+s)	67,66
Suelo (s) = (t+s) - t	8,3
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	7,91
% Humedad 1 (w) = (a/s)*100	95,30

Tabla 5.11. Determinación primera Límite Líquido (25-35 golpes) de la muestra M3

Para la segunda determinación, seguimos las mismas especificaciones que en la primera pero, en este caso, los golpes deben estar comprendidos entre 15 y 25. Los golpes resultantes para cada muestra se apuntarán en la Tabla 5.14.

Muestras 3: LL 15-25	
Nº de golpes	20
Tara pesafiltros (t)	48
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	61,04
Pesafiltros + suelo secado (t+s)	55,88
Suelo (s) = (t+s) - t	7,88
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	5,16
% Humedad 1 (w) = (a/s)*100	65,48

Tabla 5.14. Determinación segunda Límite Líquido (15-25 golpes) de la muestra M3

Límite plástico

Se obtiene una porción de unos 20 g aproximadamente que haya pasado por el tamiz de 0.400 mm y se amasa con agua destilada hasta formar con facilidad una bola.

Se moldea la mitad de la muestra en forma de elipsoide y, a continuación, se hace rodar entre los dedos de la mano y en el cristal con la presión estrictamente necesaria para que se formen cilindros del diámetro necesario.

Cuando alcanzamos el diámetro de 3 mm sin que se resquebraje, se parte en seis trozos, volviendo a amasarlos juntos, con los dedos de ambas manos hasta conseguir de un elipsoide. Se repite el proceso descrito cuantas veces sea necesario hasta que el cilindro se desquebraje, siendo mayor de 3 mm. El proceso de detiene en este punto.

Las porciones obtenidas, de un mínimo de 5 g, se colocan en un pesafiltros y se determina la humedad mediante el secado en estufa, anotando los datos obtenidos para cada muestra en la Tabla 5.17.

Muestra 3: LP	
Tara pesafiltros (t)	55,42
Pesafiltros + suelo húmedo (t+s+a)	77,06
Pesafiltros + suelo secado (t+s)	70,56
Suelo (s) = (t+s) - t	15,14
Agua (a) = (t+s+a) - (t+s)	6,50
% Humedad 1 (w) = (a/s)*100	42,93

Tabla 5.17. Determinación Límite Plástico de la muestra M3

Clasificación de Casagrande

Con esta ultima parte de la clasificación, se obtendrá el tipo de suelo correspondiente a cada una de las muestras. Nos apoyamos en los resultados obtenidos de Límite Líquido y Límite Plástico de cada muestra para la realización de esta parte del ensayo.

Usando el Nomograma de Casagrande y mediante los datos del número de golpes y el porcentaje de humedad resultante, obtenemos el porcentaje de humedad del Límite Líquido a 25 golpes. Este dato, junto al porcentaje de humedad del Límite Plástico (LP), sirva para calcular el Índice de Plasticidad (IP), dato que junto al Límite Líquido (LL) dará el tipo de suelo obtenido para cada muestra. Los cálculos de Índice Plástico se reflejan de la siguiente forma:

- Muestra 3:

LL (obtenido mediante el Nomograma de Casagrande): 78%

LP: 43%

$IP = LL - LP = 78\% - 43\% = 35\%$

Con los cálculos realizados y los resultados obtenidos, se determina el tipo de suelo mediante la Carta de Plasticidad de Casagrande (Figura 5.20), según la cual se obtiene un suelo MH.

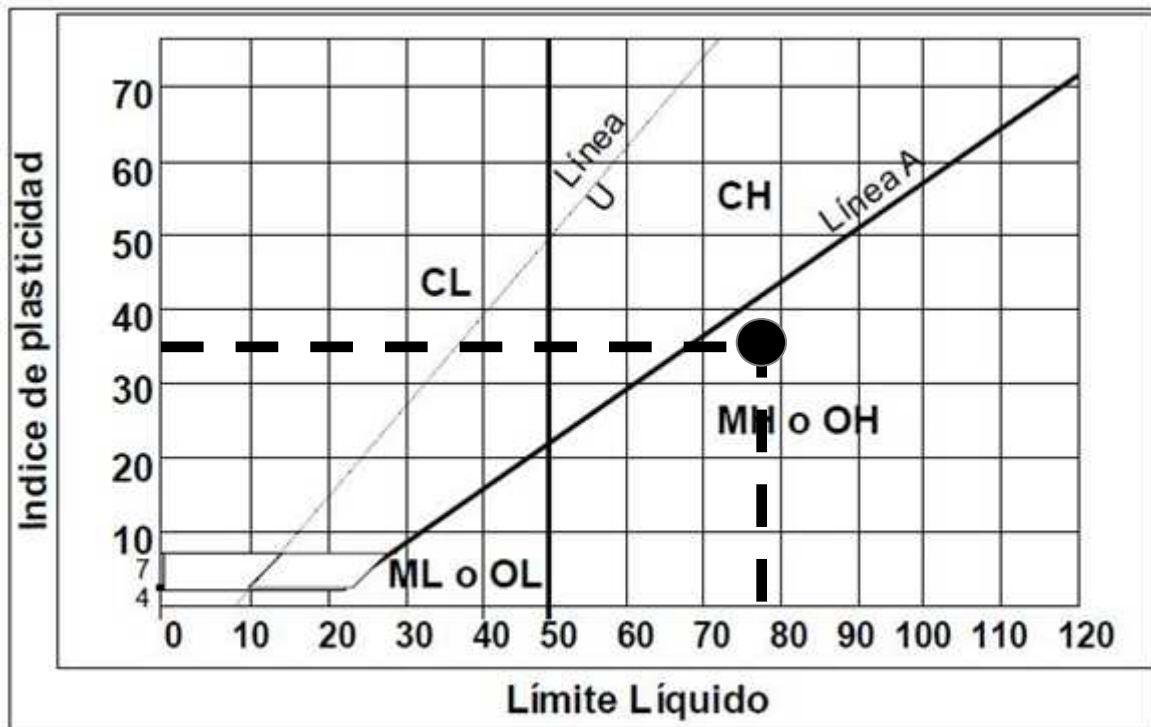


Figura 5.20. Carta de Plasticidad de Casagrande.

Presión de hinchamiento

Una vez preparada la muestra en la célula edométrica y preparado el equipo edométrico para la realización del ensayo. Observamos que el medidor comienza a desplazarse hacia la derecha, haciendo patente el hinchamiento. Durante varias horas debemos estar pendientes de estabilizar el medidor hasta que quede en cero. Dicha estabilización se consigue añadiendo peso en el cargadero, hasta que la muestra deja de presentar el hinchamiento y se mantiene en dicho número.

En este caso, el peso añadido fue de 0,75 kg y una presión de hinchamiento de 38 kPa, con lo que se finaliza la parte del ensayo correspondiente a la presión de hinchamiento.

Consolidación

Partiendo del peso obtenido en el ensayo de presión de hinchamiento, continuamos determinando la consolidación que presentan nuestras muestras. Se establecen seis escalones de carga y dos de descarga.

Para comenzar la carga por escalones, mantenemos el peso añadido en el ensayo anterior.

Finalizado el proceso de descarga, se extrae la célula edométrica, eliminando el agua contenida en su interior y sacando el anillo edométrico que contiene la muestra de suelo, intentando eliminar cuidadosamente el exceso de agua con un papel poroso y absorbente. Tras extraer las muestras, se introduce una porción de cada una de ellas en un pesafiltros y este, a su vez, en la estufa desecadora. Transcurridas 24h se extraen las muestras y se pesan, obteniendo los resultados que aparecen en las Tablas 5.36, 5.37 y 5.38.

CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA M3		
Estado	Inicial	Final
Densidad húmeda (g/cm ³)	1,82	1,88
Densidad seca (g/cm ³)	1,29	1,35
Humedad (%)	40,41	38,93
Grado de saturación (%)	102,58	107,71
Índice de huecos (e)	1,04	0,95
Altura de sólidos (H)	9,80	9,80
Densidad relativa de las partículas (g/cm ³)	2,64	

Tabla 5.36. Características de la muestra M3

PARÁMETROS DE LA MUESTRA M3	
Presión de hinchamiento (kp/cm ²)	0,38
Presión inicial (kp/cm ²)	2,53
Presión de preconsolidación (kp/cm ²)	6,13
Razón de sobreconsolidación (OCR)	2,42

Tabla 5.37. Parámetros de la muestra M3

Carga (kp/cm²)	Carga (kpa)	H probeta (mm)	H sólido (mm)	Deformación unitaria	Cambio de espesor	Índice de huecos
0,38	37,44	20,00	9,80	0	0,000	1,040
0,89	87,37	19,97	9,80	-0,002	-0,030	1,037
1,91	187,21	19,91	9,80	-0,005	-0,090	1,031
2,93	287,06	19,85	9,80	-0,008	-0,150	1,025
5,99	586,60	19,60	9,80	-0,020	-0,400	0,999
12,10	1185,69	19,14	9,80	-0,045	-0,860	0,952
22,92	2246,56	18,43	9,80	-0,085	-1,570	0,880
Descarga (kp/cm²)	Carga (kpa)	H probeta (mm)	H sólido (mm)	Deformación unitaria	Cambio de espesor	Índice de huecos
1,91	187,21	18,92	9,80	-0,057	0,490	0,930
0,38	37,44	19,16	9,80	-0,044	0,730	0,954

Tabla 5.38. Resultados del ensayo de consolidación para la muestra M3

Mediante los resultados obtenidos durante el ensayo y cálculos posteriores, se traza la curva Índice de huecos – Carga (Figura 5.21), en este usando la escala logarítmica de este último valor.

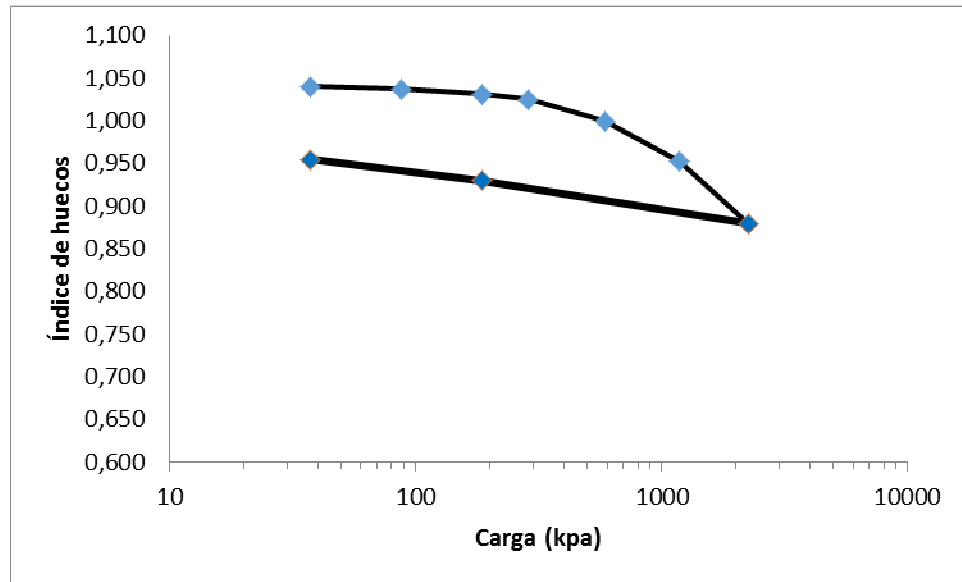


Figura 5.21. Curva Índice de huecos – Carga para la muestra M3

Para el cálculo de la presión de preconsolidación (kpa), se utiliza el método gráfico de Casagrande, el cual se aplica sobre la Figura 5.21. El método gráfico se describe en la Figura 5.22, y el resultado obtenido para la presión de preconsolidación en la muestra 3 es de 601 kPa.

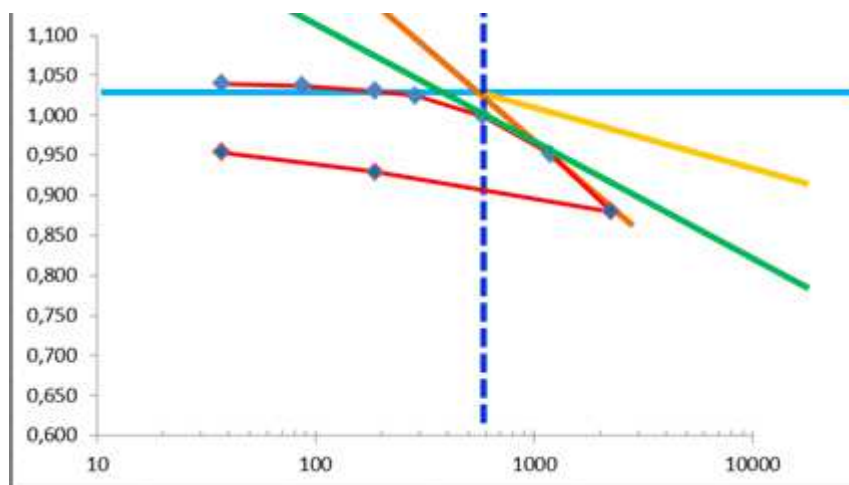


Figura 5.22. Método gráfico presión preconsolidación para la muestra M3

Densidad relativa

Una vez finalizado el ensayo y obtenidos los pesos correspondiente en cada una de las fases del mismo, se plasman los resultados en la Tabla 5.39. En nuestro caso, el ensayo ha sido realizado a una temperatura del agua de 26°C, a lo que le corresponde una densidad del agua (D_w) de 996,86 kg/m³.

M3	
Procesos del ensayo	Peso (g)
P1: Tara matraz con tapón	41,86
P2: P1 + muestra	53,31
P3: P2 + agua destilada	97,23
P4: P1 + agua destilada	91,34
P5 (V. Sólido): (P4-P1)-(P3-P2)	5,56
P6 (Masa del sólido): P2-P1	11,45
Densidad real: (P5/P6)x D_w	0,04

Tabla 5.39. Resultado para la densidad real de la muestra M3

Análisis granulométrico de suelos por sedimentación

Recogidos 20 gramos de muestra M3 y finalizado el proceso de ensayo, los resultados obtenidos para cada tiempo son los que se reflejan en la Tabla 5.40.

Tiempo (min)	Tamiz por el que pasa la muestra (mm)	% Muestra que pasa sobre 20 g	% Muestra que pasa sobre total de finos	% Retenido en el tamiz
0,5	0,08	100	58,7	59
1	0,05	43,7	25,65	33
3	0,02	38,7	22,72	3
60	0,005	33,7	19,78	3
90	0,002	33,7	19,78	0

Tabla 5.40. Método Resultados análisis por sedimentación para la muestra M3

Una vez calculado el porcentaje de muestra que pasa por cada uno de los tamices, se puede clasificar cada uno de ellos con el tipo de suelo al que corresponde, representado en la Tabla 5.41:

Tipo de suelo	% Muestra
Grava	3
Arena	38
Finos	59
Limos	39
Arcillas	20

Tabla 5.41. Tipo de suelo por sedimentación para la muestra M3

Por último, se calcula la actividad de la muestra mediante la división de los porcentajes de Índice de plasticidad, 35%, entre las arcillas que contiene la muestra M3, 20%, siendo el resultado de la Actividad para la muestra M3 de 1,75%, situándose en el tipo Interestratificados.

Discusión de los resultados

La última de las muestras analizadas es también de grano fino (59% pasa por el tamiz nº 200) (Tabla 5.35), presentando una cantidad menor de arena que las dos muestras anteriores, aunque esta es aún importante (39%). Dentro de los elementos finos, predomina la fracción granulométrica de los limos (29%) frente a las arcillas (20%) (Tabla 5.41). Como la muestra violeta, este material presenta una elevada plasticidad (LL de 78%), aunque al presentar un mayor LP (43%) tiene un IP menor (35%), y se clasifica como un limo de alta plasticidad (MH).

Las propiedades de estado indican que se trataría de un suelo relativamente blando, con un índice de poros de 1,04, una densidad aparente de 1,29 g/cm³ y un peso específico aparente seco γ_d de 12,64kN/m³ (González de Vallejo et al., 2004). Estos valores están en concordancia con su elevado LL.

La presión de preconsolidación más acentuada de las tres muestras estudiadas (601 kPa), aunque su OCR de 2,42 (Tabla 5.37) nos indicaría un grado moderado de sobreconsolidación (Urbaitis et al., 2016). El índice de compresión C_c (0,118) apoya el dato de elevada presión de preconsolidación, indicando que se trata de un material en general poco comprimible. El menor índice de entumecimiento C_s (0,035), por su parte, apunta en el sentido de considerar este material como el de mayor plasticidad de los tres analizados (Azam et al., 2013), coincidiendo con el LL.

Los diagrama de Holtz and Kovac (1981) y Bain (1971) (Figuras 5.23 y 5.24) indican que la muestra, a pesar de su elevada plasticidad, debería presentar composiciones enriquecidas en minerales no expansibles como caolinitas e illitas.

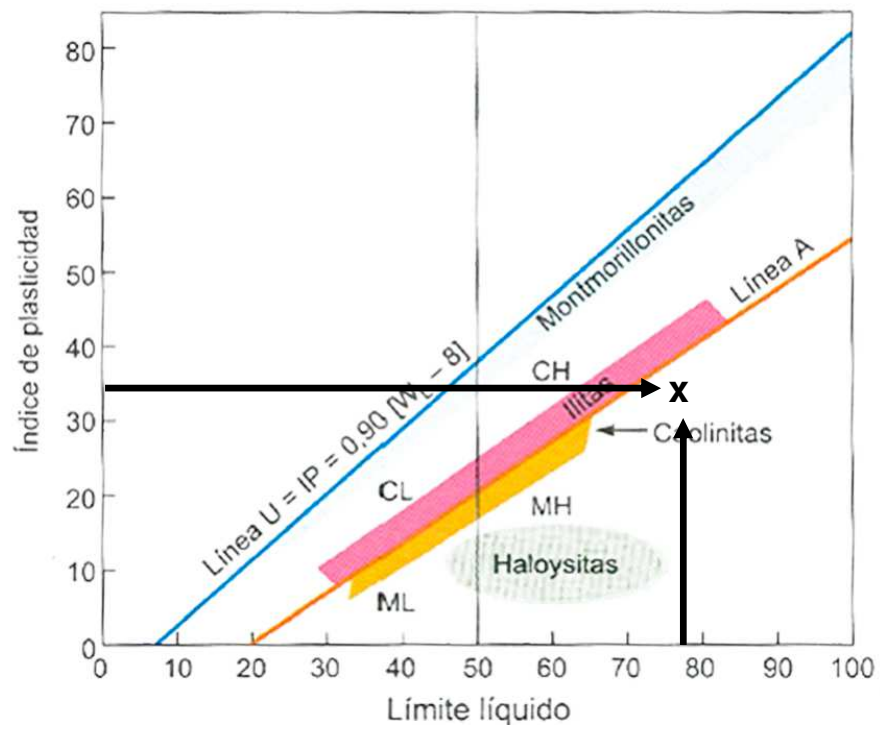


Figura 5.23. Diagrama de Holtz & Kovac (1981)

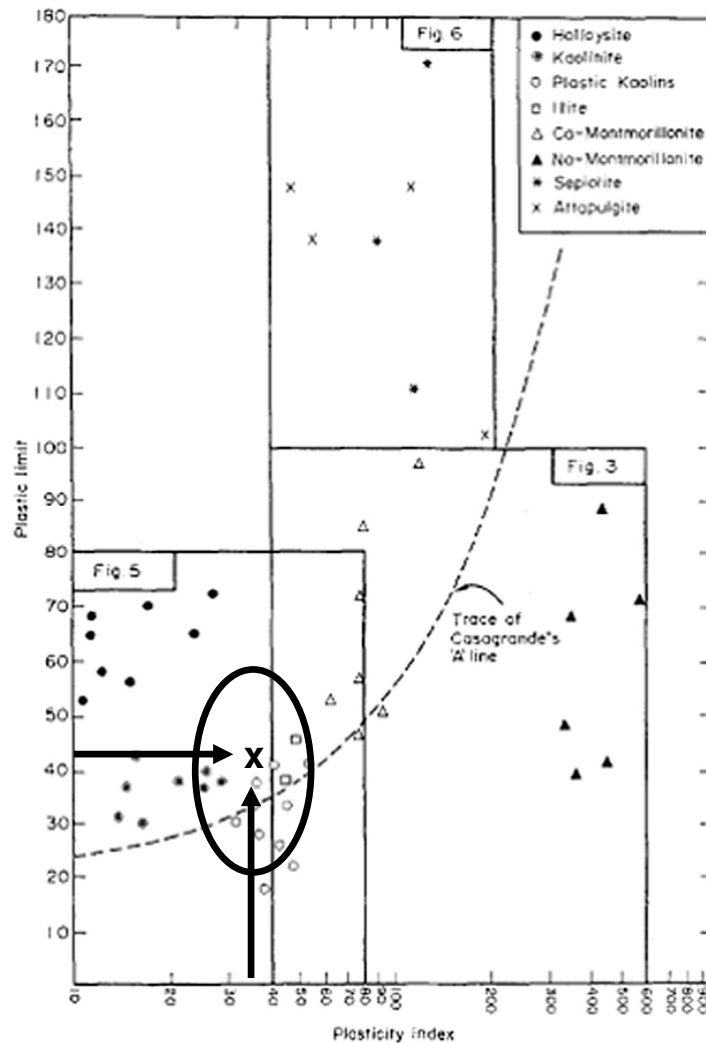


Figura 5.24. Diagrama de Bain (1971)

En este horizonte se ha medido la menor presión de hinchamiento de toda la columna estratigráfica, 38 kPa, que debe considerarse en el rango inferior de la Clase II, de expansividad media, de González de Vallejo et al. (2004). Si bien la expansividad prevista en función de la plasticidad y el contenido en fracción < 0,002 mm por Peck et al. (1974) y Chen (1988), así como el diagrama de Bell y Maud (1995) (Figura 5.25) considerarían a esta muestra como de alta expansividad, la medida de la presión de hinchamiento no lo corrobora. Esto podría estar relacionado con que esta muestra es la que mayor humedad de campo presentó de las tres estudiadas (40%, frente al 33% y 30% para la violeta y la roja, respectivamente). En este sentido, es conocida la relación entre la presión de hinchamiento y la humedad inicial de la muestra (Zemenu et al., 2009), aspecto que muchas veces dificulta la interpretación de los parámetros de hinchamiento. Por otra parte, la actividad relativamente elevada de esta muestra, 1,77, así como el diagrama de Van der Merwe (1964) (Figura 5.26), apuntan a que estaríamos ante una mineralogía rica en minerales expansibles. En cualquier caso, el

comportamiento notablemente plástico de esta muestra no parece un buen predictor de su capacidad expansiva.

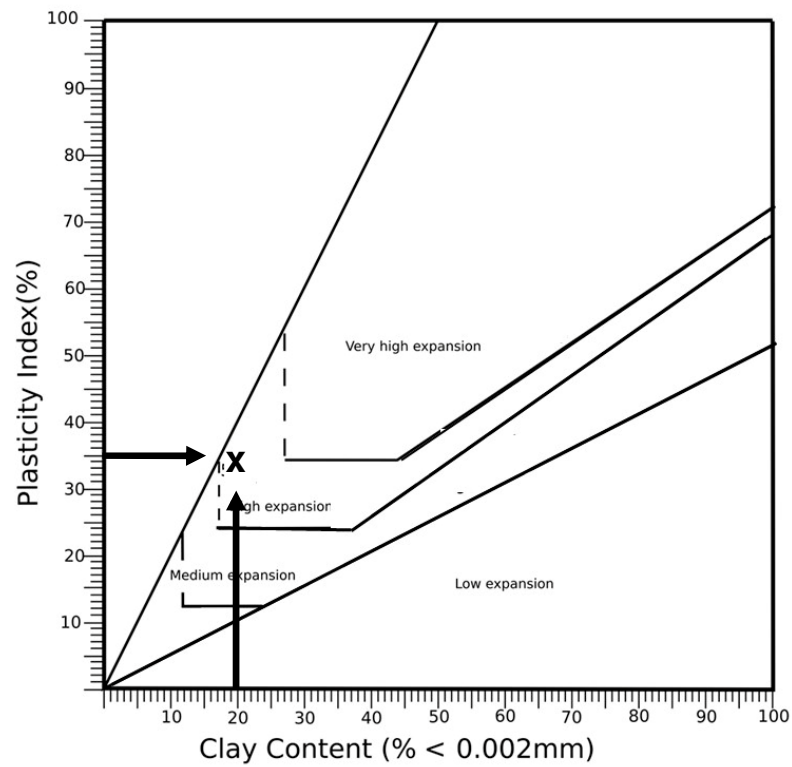


Figura 5.25. Diagrama de Bell & Maud (1995)

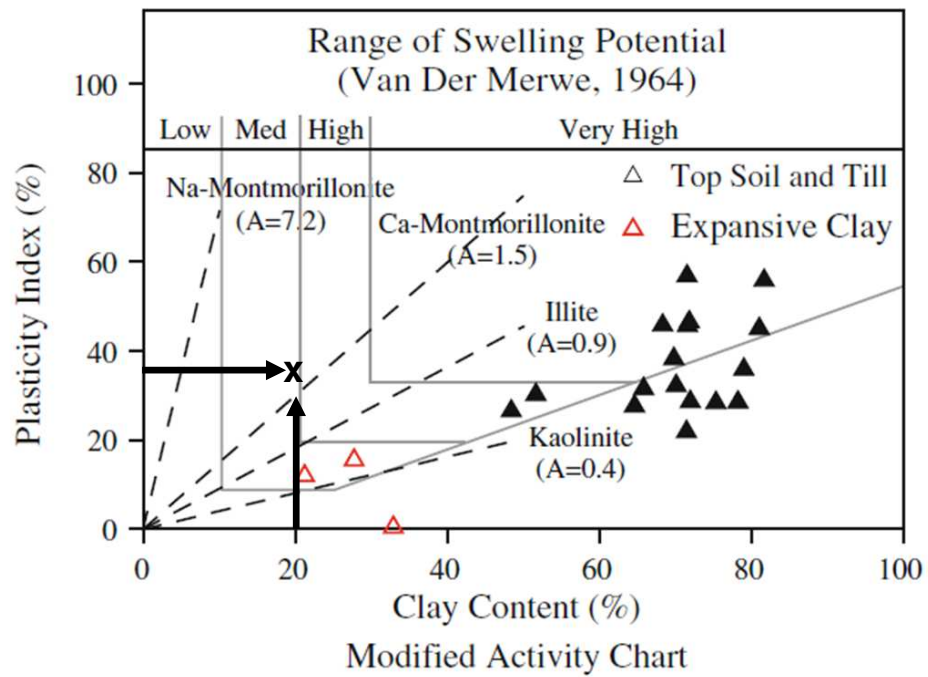


Figura 5.26. Diagrama de Van der Merwe (1964)

5.3.2 Mineralogía de la muestra

Presentación de los datos

Difracción de Rayos X

Durante el ensayo DRX se obtienen varios tipos de gráficos que definen la mineralogía de nuestra muestra. El gráfico de polvo total (Figura 5.27) recoge valiosa información sobre dicha mineralogía, representado los porcentajes de contenido de cada mineral en la Tabla 5.42.

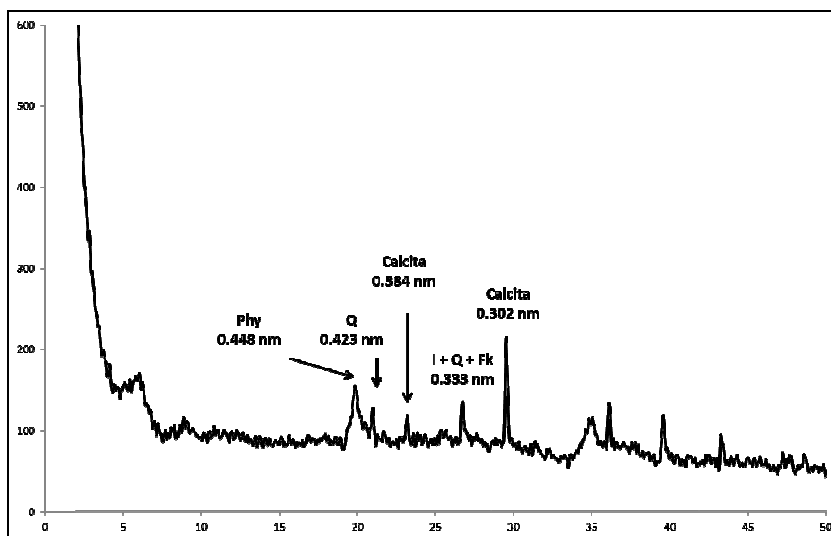


Figura 5.27. Mineralogía de rayos-X de la fracción tierra fina del suelo (< 2 mm; método del polvo desorientado).

Muestra	Filosilicatos	Cuarzo	Goethita	Hematites	Clorita	Feld.K	Feld.Na	Calcita	Dolomita
M3	90	6	tr	tr	tr	tr	tr	5	tr

Tr: traces (< 1%).

Tabla 5.42. Mineralogía de rayos-X de la fracción tierra fina del suelo (< 2 mm; método del polvo desorientado).

Otro de los gráficos obtenidos (Figura 5.28) es el que presenta dos tipos de muestra. En color negro aparece la muestra seca al aire, mientras que en color gris se observa la muestra con etilenglicol. El porcentaje de contenido de cada mineral y los picos más significativos son representados en las Tabla 5.43.

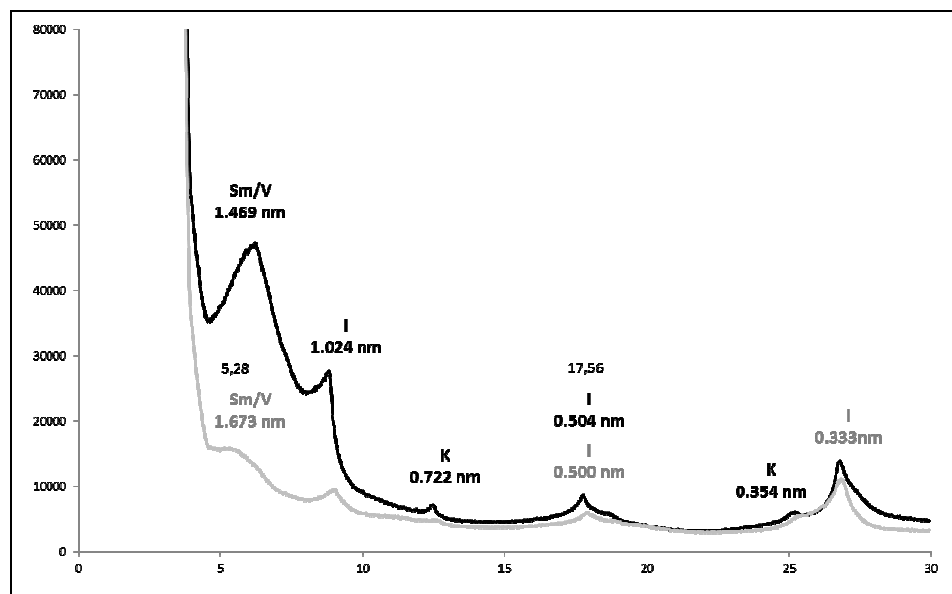


Figura 5.28. Mineralogía de rayos-X de la fracción arcilla del suelo (< 0.002 mm; método del agregado orientado).

Muestra	Sm (%)*	Ill. (%)	Cl. (%)	K. (%)	Q. (%)	Feld.K(%)	Cal. (%)	Dol. (%)
M3	42	39	0	19	0	0	0	0

* Incluye esmectita pura e interestratificados con esmectita.

Tabla 5.43. Mineralogía de rayos-X de la fracción arcilla del suelo (< 0.002 mm; método del agregado orientado).

Por último, se realiza la descomposición de la muestra en un rango de 0-10 °2θ, representando su gráfico en la Figura 5.29 y el contenido de cada mineral para cada uno de los picos en las Tablas 5.44 y 5.45.

	Otras fases				Illita (mica) ≈ 1.0	
Muestra	Sm (> 1.7)	Sm/V (1.5-1.7)	V (1.4-1.5)	Sm/I (<1.4)	PCI (%)	WCI (%)
M3	0	38 (1.626 nm)	25 (1.445 nm)	0	30	7

PCI = illita pobremente cristalizada (pico más ancho, normalmente >nm)

WCI = illita bien cristalizada (pico más estrecho, normalmente el más próximo a 1.000 nm)

Tabla 5.44. Áreas relativas (%) resultantes de la descomposición de los picos en 0-10 °2θ (Decomprx software).

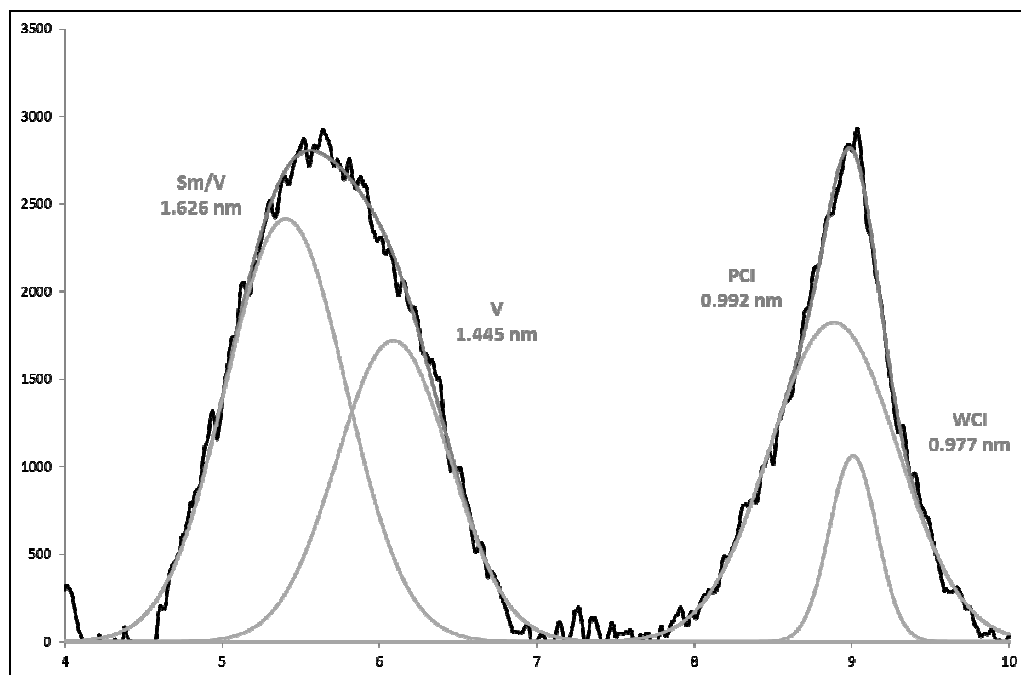


Figura 5.29. Áreas relativas (%) resultantes de la descomposición de los picos en 0-10 °2θ (Decomprx software).

	Descomposición 0-10 °2θ				Simulación Sm/V	
Muestra	Sm(%)	Sm/V(%)	Pico en EG (nm)*	Picos en EG (nm)**	% Esmeclita	Parámetro R
M3	0	39	1.673	1.626	72	0

*Pico experimental.

** Curva simulada (decomprx)

Tabla 5.45. Resultados de la descomposición de los picos correspondientes a fases esmeclíticas (Decomprx software) y simulación de la composición en el caso de interestratificados (Mulcalc software).

Discusión de los resultados

El elevadísimo contenido en filosilicatos totales de la muestra (90%, Tabla 5.42 y Figura 5.27) explica convenientemente la elevada plasticidad de la misma, mientras que el contenido claramente superior de fases no expansibles (58% suma de illita y caolinita) sobre fases esmeclíticas (42%) en la fracción < 0,002 mm (Tabla 5.43, Figura 5.28) puede dar cuenta, junto con la mayor humedad de campo, de la relativamente baja presión de hinchamiento observada.

Se produce una buena expansión en etilenglicol del pico 1.469 nm seco al aire hasta 1.673 nm (Figura 5.28). Esta reflexión es, por otra parte, la menos intensa de las tres muestras estudiadas. El pico experimental 1.673 nm puede descomponerse en dos curvas teóricas, indicando la presencia de una fase expansible (1.626 nm) y una fase no expansible (1.445 nm). En este caso, la presencia de una fase pura, no expansible, en el

sector 4 – 7º 2θ puede atribuirse a una vermiculita, puesto que este es el espaciado típico que arroja este mineral en magnesio (Barnhisel and Bertsch, 1989). La curva expansible a 1.626 nm debe ser un interestratificado esmectítico, dado que presenta un evidente hinchamiento en etilenglicol, pero queda por debajo de los 1.700 nm, la expansión mínima para las esmectitas puras. El simulador confirma esta atribución, destacando que se trata de un interestratificado esmectita/vermiculita desordenado ($R = 0$) con un 72% de láminas esmectíticas.

El análisis mineralógico detallado, por tanto, nos permite explicar convenientemente el hecho aparentemente contradictorio de una elevada plasticidad y una relativamente baja presión de hinchamiento. La muestra se comporta de forma muy plástica por su extraordinaria riqueza total en minerales de la arcilla (90%), aunque en la composición de los mismos predominan claramente las fases no expansibles. De esta manera, incluso en el pico que ha mostrado expansividad (1.673 nm), gracias a la descomposición, podemos suponer una cantidad importante de una fase no expansible como la vermiculita. Esto, junto al hecho de que esta muestra presentaba la mayor humedad de campo, explicaría también la aparente discordancia comentada para el diagrama de Bell y Maud.

6 CONCLUSIONES

1) Geológicamente, la zona de estudio se localiza sobre las arcillas y margas del Triásico de la Cobertera Tabular. La columna estratigráfica levantada se compone de una alternancia de materiales finos relativamente ricos en arenas (muestras M1, M2 y M3), que presentaron una granulometría homogénea: contenidos en arcilla (fracción < 2 mm) entre el 14-20%, de limos (0,002 – 0,08 mm) entre el 30-39% y de arena entre el 38-47% (0,08 – 5 mm).

2) El límite líquido LL osciló entre el 40% (M2) y el 78% (M3), mientras que el índice de plasticidad IP varió entre el 17% (M2) y el 40% (M1). En función de estos valores las muestras se clasificaron como CL (M2), MH (M3) y CH (M1). La plasticidad de estos materiales fue, por tanto, más variable que la granulometría, encontrando tanto muestras de moderada-baja plasticidad (M2) como de elevada plasticidad (M3 y M1).

3) El ensayo de consolidación arrojó presiones de pre-consolidación relativamente elevadas, que oscilaron entre 350 kPa (M2) y 708 kPa (M3). En general, se trata de materiales entre sobreconsolidados, con OCR superiores a 1,5, y de consistencia moderadamente dura a dura.

4) Todo el material analizado mostró actividad expansiva, lo que permite explicar muchas de las patologías estructurales descritas. Las muestras M1 y M2 presentaron presiones de hinchamiento similares (126 y 125 kPa, respectivamente), en el rango de la clase media-alta, mientras que la muestra M3, con 37 kPa, se situó en el rango medio-bajo. La actividad de las arcillas mostró mayor relación con la plasticidad que con la presión de hinchamiento, coincidiendo la muestra de menor actividad 0,85, con la de menor plasticidad (M2). Esto puede deberse, en parte, a la relación de la presión de hinchamiento con la humedad de campo. Así, la muestra M3, con mayor humedad natural (40%), fue la que presentó menor presión de hinchamiento en laboratorio.

5) En correspondencia con la granulometría fina, los filosilicatos dominaron ampliamente la composición total de las muestras analizadas, suponiendo siempre más del 75% de los minerales, en tanto que el cuarzo o la calcita siempre se presentaron en cantidades menores del 15%.

6) La mineralogía de la fracción arcilla (< 0.002 mm) mostró la presencia de filosilicatos expansibles y no expansibles, en proporciones cercanas al 50%. La principal fase no expansible fue la illita, cuyos contenidos variaron entre el 34 y el 44% del total, aunque también se detectaron cantidades relativamente importantes de caolinita (> 10%) en las muestras M3 y M2. Por su parte, las fases expansibles, tipo esmectita, oscilaron entre el 42 y el 51%.

7) La descomposición y posterior simulación de los picos diagnósticos en el sector 2-10° 2θ del difractograma indicó una relativa escasez de esmectita pura, sólo presente en la muestra M2, y la abundancia de interestratificados esmectita-vermiculita, que se detectaron en todas las muestras analizadas. Así mismo, la muestra M3 reveló vermiculita pura, probablemente de tipo dioctaédrico, un filosilicato no expansible resultante de la alteración de la mica.

8) El estudio mineralógico detallado nos ha permitido explicar varios resultados previos aparentemente contradictorios. Por ejemplo, composiciones cercanas al 50% de esmectita en la fracción arcilla de M3 harían prever presiones de hinchamiento muy superiores a 37 kPa. Sin embargo, la descomposición del pico expansible de esta muestra, atribuido convencionalmente a esmectita pura, nos ha permitido constatar que este se compone únicamente de una fase moderadamente expansiva (el interestratificado esmectita-vermiculita) y otra fase no expansible (la vermiculita), por lo que el efecto expansivo total queda bastante disminuido, en consonancia con la presión de hinchamiento. Dadas las limitaciones de los métodos empleados habitualmente para caracterizar la expansividad del suelo, el estudio mineralógico detallado supone un avance en la caracterización de este importante problema geotécnico.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abduljawwad, S.N. & Al-Sulaimani, G.J. (1993). Determination of swell potential of Al-Qalif clay. *Geotech Testing J ASTM* 16 (4), pp. 469 – 484.

Alonso, E., Suelos Expansivos. Curso Aplicado de Ingeniería del Terreno, Universidad de Alicante, 2007.

Aparicio, A., García, R. & Brell, J.M. (1997). El metamorfismo de bajo y muy bajo grado de los materiales carboníferos del área hercínica de Sierra Morena. *Boletín Geológico y Minero* (108), pp. 171 – 184.

Azam, S., Shah, I. & Ito, M. (2013). Study on swelling properties of an expansive soil deposit in Saskatchewan, Canada. *Bull Eng Geol Environ* (72), pp. 25 – 35.

Azañón, J.M., Azor, A. & Yesares, J. (2009). Regional-scale high-plasticity clay-bearing formation as controlling factor on landslides in Southeast Spain. *Geomorphology* (120), pp. 26 – 37.

Bain, J. A. (1971). A plasticity chart as an aid to the identification and assessment of industrial clays. Institute of Geological Sciences, 64-78 Gray's Inn Road, London WC1.

Barnhisel, R.I. & Bertsch, P.M. 1989. Chlorites and hydroxy-interlayered vermiculite in soils. *Minerals in Soil Environments* (1): *Soil Science Society America Book Series* (eds J.B. Dixon & S.B. Weed), pp. 728 – 788. Soil Science Society of America Madison, WI.

Bell, F.G. & Muad, R.R. (1995). Expansive clays and construction, especially of low-rise structures: a viewpoint from Natal, South Africa. *Environ Eng Geosci* 1 (1), pp. 41 – 59.

Borchardt, G. (1989). Smectites, pp. 675 – 727. In J.B. Dixon and S.B. Weed (ed.) *Minerals in soil environments*. 2 ed. Soil Sci. Soc. Am. Book Ser. No. 1. Madison, WI.

Chen, F.H. (1988). Foundations on Expansive Soils. Elsevier, Amsterdam.

Ciencia e Ingeniería de los Materiales: estructura y propiedades” J. A. Pero- Sanz Elorz, Editorial: Dossat 2000, (2000).

Enciclopedia Broto de Patologías de la Construcción.

Fernandez Galvez, J. (2005). Interpretation of soil moisture profiles on gravel rich soils derived from soil dielectric measurements. *Advances in GeoEcology* 36, 241-250.

Fundamentos de Química Analítica. Skoog, West, Holler y Crouch. Ed. Thomson. 8ª Edición.

Galan Huertos, H. (1990). "Palygorskita y sepiolita" En: Recursos Minerales de España. Coord. J. García Guinea y J. Martínez Frias. Textos Universitarios (C.S.I.C.) 15, pp. 71-94.

García – Castellanos, D., Fernández, M., & Torné, M. (1998). Numerical modeling of foreland basin formation: a program relating thrusting, flexure, sediment geometry and lithosphere rheology. *Computers, and Geosciences*, 23 (9), pp. 993 – 1003. doi: 10.1016/S0098-3004(97)00057-5.

García – Castellanos, D., Fernández, M., & Torné, M. (2002). Modelling the evolution of the Guadalquivir foreland basin (South Spain). *Tectonics* (3). doi: 10.1029/2001TC001339.

García – Castellanos, D., Fernández, M., & Torné, M. (2002). Modelling the evolution of the Guadalquivir foreland basin (South Spain). *Tectonics* (3). doi: 10.1029/2001TC001339.

García-Castellanos, D., Fernández, M., & Torné, M. (1998). Numerical modeling of foreland basin formation: a program relating thrusting, flexure, sediment geometry and lithosphere rheology. *Computers, and Geosciences*, 23 (9), pp. 993 – 1003. doi: 10.1016/S0098-3004(97)00057-5.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2004). *Ingeniería Geológica*. (2da. Ed).

Holtz WG, Kovacs WD (1981). An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs.

Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales" (I, II) W.D. CALLISTER, Jr., Editorial Reverté, S.A., (2003). 620 CAL in

Ito, M. & Azam, S. (2009). Engineering characteristics of a glacio-lacustrine clay deposit in a semi-arid climate. Springer-Verlag, Berlin. *Bull Eng Geol Environ* (68), pp. 551 – 557.

Jiménez Salas, J.A. & De Justo Alpañes, J.L. (1975). Geotecnia y cimientos. Propiedades de los suelos y de las rocas, (2da. Ed).

Lanson, B. 1997. Decomposition of experimental X-ray diffraction profile (profile fitting): a convenient way to study clay minerals. *Clays & Clay Minerals* (45), pp. 132 – 146.

Le, T.H. & Ferrer, R. 1996. MULCALC. Department of Geology and Geophysics E325 Howe/Russell Geoscience Complex, Baton Rouge, LA.

Martínez del Olmo, W., García Mallo, J., Leret Verdu, G., Serrano Oñate, A & Suárez Alba, J. (1984). Modelo tectosedimentario del bajo Guadalquivir. *Congreso Español de Geología*. (Tomo 1), pp. 199 – 213.

Martínez del Olmo, W., García Mallo, J., Leret Verdu, G., Serrano Oñate, A & Suárez Alba, J. (1984). Modelo tectosedimentario del bajo Guadalquivir. *Congreso Español de Geología*. (Tomo 1), pp. 199 – 213.

Martín-García, J.M., Delgado, G., Sánchez-Marañón, M., Párraga, J.F. & Delgado, R. 1997. Nature of dioctahedral micas in Spanish red soils. *Clay Minerals*, 32, 107–121.

Mitchell, J.K. & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behaviour*, 3rd edn. Wiley, New York.

Peck, R.B., Hanson, J.B. & Thornburn, S. (1974). *Foundation Engeneering*, 2nd Edition, John Willey & Sons Ed. New York.

Riaza, C., Martínez del Olmo, W. (1996). Depositional model of the Guadalquivir-Gulf of Cadiz Tertiary basin. En: Friend, P.F., Dabrio, C., (Eds). *Tertiary Basins of Spain: The Stratigraphic Record of Crustal Kinematics*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 330 – 338.

Riaza, C., Martínez del Olmo, W. (1996). Depositional model of the Guadalquivir-Gulf of Cadiz Tertiary basin. En: Friend, P.F., Dabrio, C., (Eds). *Tertiary Basins of Spain: The Stratigraphic Record of Crustal Kinematics*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 330 – 338.

Roldán García, F.J. & García Cortés, A. (1988). Implicaciones de materiales triásicos en la depresión de Guadalquivir (Provincias de Córdoba y Jaén). *II Congr. Geol. Esp. SGE*, Granada, (1), pp. 189 – 192.

Roldán García, F.J. & García Cortés, A. (1988). Implicaciones de materiales triásicos en la depresión de Guadalquivir (Provincias de Córdoba y Jaén). *II Congr. Geol. Esp. SGE*, Granada, (1), pp. 189 – 192.

Sánchez Gómez, M., Peláez, J.A., García Tortosa, F.J., Pérez Valera, F. y Sanz de Galdeano, C. (2014): La serie sísmica de Torreperogil (Jaén, Cuenca del Guadalquivir oriental): evidencias de deformación tectónica en el área epicentral. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 27(1): 301-318.

Shi, B., Jiang, H. & Liu, Z. (2002). Engineering geological characteristics of expansive soils in China. *Engineering Geology* (67), pp. 63 – 71.

Skempton, A. W. (1953). Soil mechanics in relation to geology. *Proc. Yorks. Geol. Soc.* (29), pp. 33 – 62.

Snethen, D.R., Johnson, L.D. & Patrick, D.M. (1977). An evaluation of expedient methodology for identification of potentially ex-pansive soils. Soil and Pavements Laboratory, U.S. Army Eng. Waterway Exp. Sta., Vicksburg, MS, Rep. No. FHWA-RE-77-94, NTIS PB-289-164.

Urbaitis, D., Lekstutyte, I. & Gribulis, D. (2016). Overconsolidation Ratio Determination of Cohesive Soil. Faculty of Natural Sciences, Department of Hydrogeology and Engineering Geology, Vilnius University, Vilnius, Lithuania.

Van der Merwe, D.H. (1964). The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils. *Civil Eng S Afr* (6), pp. 103 – 107.

Velde, B. & Barré, P. 2010. Soils, Plants and Clay Minerals. Springer-Verlag, Berlin.

Whittig L.D. & Allardice W.R. (1986). X-ray diffraction techniques, pp. 331-359. In: A Klute (ed.). Methods of soil analysis: Physical and Mineralogical Methods. 2nd ed. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. Agronomy Series N°. 9, part 1.

Zemenu, G., Martine, A. & Roger, C. (2009). Analyse du comportement d'un sol argileux sous sollicitations hydriques cycliques. Analysis of the behaviour of a natural expansive soil under cyclic drying and wetting. *Bull Eng Geol Environ* (68), pp. 421 – 436.