

Cálculo analítico de la presión de preconsolidación del suelo: aplicación a la Vega Baja del río Segura (Alicante)

R. TOMÁS (*), A. CUENCA (**), J. DELGADO (*), C. DOMÉNECH (***) y A. MIRAD (****)

RESUMEN La presión de preconsolidación es la máxima tensión efectiva que ha sufrido el suelo a lo largo de su historia. Este parámetro tiene un gran interés geotécnico dado que marca el límite de las grandes deformaciones separando las deformaciones elásticas de las anelásticas. El objeto de este trabajo es calcular la presión de preconsolidación de 114 muestras inalteradas de la Vega Baja del río Segura utilizando el ensayo de consolidación uniaxial aplicando el método de Casagrande a través de un procedimiento analítico de cálculo con el fin de evitar interpretaciones subjetivas en la determinación del punto de máxima curvatura. Estos resultados son también comparados con los obtenidos a partir de ensayos triaxiales CU. Los resultados muestran un elevado grado de sobreconsolidación ($1.4 < OCR < 12.2$) en los cinco primeros metros de suelo. La sobreconsolidación del suelo disminuye progresivamente con la profundidad estando normalmente consolidados ($OCR=1$) a partir de los 15 m. La sobreconsolidación superficial de estos suelos parece estar relacionada con descensos piezométricos causados por la sobreexplotación del acuífero (especialmente en épocas de sequía) con valores inferiores a 41 kPa, así como con fenómenos de desecación producidos por las variaciones estacionales del nivel freático con valores superiores a los 50 kPa.

FALTA TITULO EN INGLES

ABSTRACT *Preconsolidation stress is the maximum effective stress that a soil has suffered throughout its history. This parameter has an important geotechnical interest because it marks the starting point of high compressibility separating elastic from anelastic deformations. The aim of this work is to compute preconsolidation pressure of 114 undisturbed soil samples from the Vega Baja of the Segura River using uniaxial consolidation test and applying the method proposed by Casagrande while using an analytical procedure to avoid subjective interpretations of maximum curvature point. These values are also compared with that derived from CU triaxial test. Obtained results show a high overconsolidation ratio ($1.4 < OCR < 12.2$) for the first 5 meter depth. Soil overconsolidation decreases gradually with depth, being normally consolidated ($OCR=1$) from 15 m depth. Superficial overconsolidation seems to be related with piezometric decreases caused by aquifer overexploitation (especially during drought periods) with values lower than 41 kPa, and with desiccation phenomenon caused by phreatic level seasonal variations with values higher than 50 kPa.*

Palabras clave: Presión de preconsolidación, Grado de sobreconsolidación, Método de Casagrande, Vega Baja, Río Segura.

Keywords: Preconsolidation stress, Overconsolidation ratio, Casagrande method, Vega Baja, Segura River.

1. INTRODUCCIÓN

La presión de preconsolidación (σ'_p), también llamada presión de precompresión, de precompactación o de precarga (Dawidowski and Koolen, 1994), es la máxima tensión a la que se

ha visto sometido un suelo a lo largo de su historia geológica. Este parámetro presenta un gran interés geotécnico dado que separa las deformaciones elásticas, o recuperables, de las anelásticas o irreversibles, por lo que su correcta determinación es fundamental para el análisis de la respuesta del suelo.

(*) Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructuras Urbanas. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, P.O. Box 99, E-03080 Alicante, España.

(**) Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructuras Urbanas. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Alicante, P.O. Box 99, E-03080. Laboratorio de Carreteras, Consejería de Infraestructuras y Transportes, Ctra. Ocaña nº 4, 03006 Alicante, España.

(***) Instituto Técnico de la Construcción, S.A., Avda de Elche, 164, E-03006, Alicante, España.

(****) Ceico S.L., Cra. Nacional 301, Km. 397.9, P.O. Box 15, 30100 Espinardo, Murcia, España.

En el presente trabajo se utiliza un método analítico para el cálculo de la presión de preconsolidación, que evita las subjetividades que introducen otros métodos, aplicándolo a los suelos de la Vega Baja del Segura, y analizando la contribución de diferentes factores en los valores de preconsolidación calculados.

2. METODOLOGÍA

Son varios los autores que han propuesto métodos para calcular la presión de preconsolidación de una muestra de suelo: Casagrande (1936), Pacheco Silva (1970), Juárez y Rico (1976), Tavenas *et al.*, (1979), Gregory *et al.* (2006), entre otros. De entre todos éstos, el más extendido es el método gráfico de Casagrande (1936), que consiste en trazar una recta horizontal (h) por el punto de máxima curvatura de la curva edométrica (M), trazar la tangente (t) por ese mismo punto y determinar la bisectriz (b) de esas dos rectas (Figura 1). El valor de tensión efectiva correspondiente al punto (i) de intersección de dicha bisectriz (b) con la prolongación del tramo recto de la rama de carga de la curva edométrica es la presión de preconsolidación (Figura 1).

Este método adolece de presentar una importante componente subjetiva que lo hace difícil de aplicar a determinadas curvas edométricas. La principal dificultad estriba en la elección del punto de mínimo radio de curvatura (máxima curvatura) de la curva edométrica.

Para evitar esta arbitrariedad en la elección del punto de máxima curvatura, Gregory *et al.* (2006) proponen un método analítico consistente en ajustar una curva sigmoideal de Gompertz a los datos de la curva edométrica, cuya expresión matemática es:

$$e = a + c \cdot e^{b(\log_{10} \sigma' - m)} \quad (1)$$

De este modo puede determinarse el punto de máxima curvatura de la curva ajustada optimizando la función del radio de curvatura, que viene expresado como:

$$\kappa = \frac{d^2 e}{d(\log_{10} \sigma')^2} \left[1 + \left(\frac{de}{d(\log_{10} \sigma')} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (2)$$

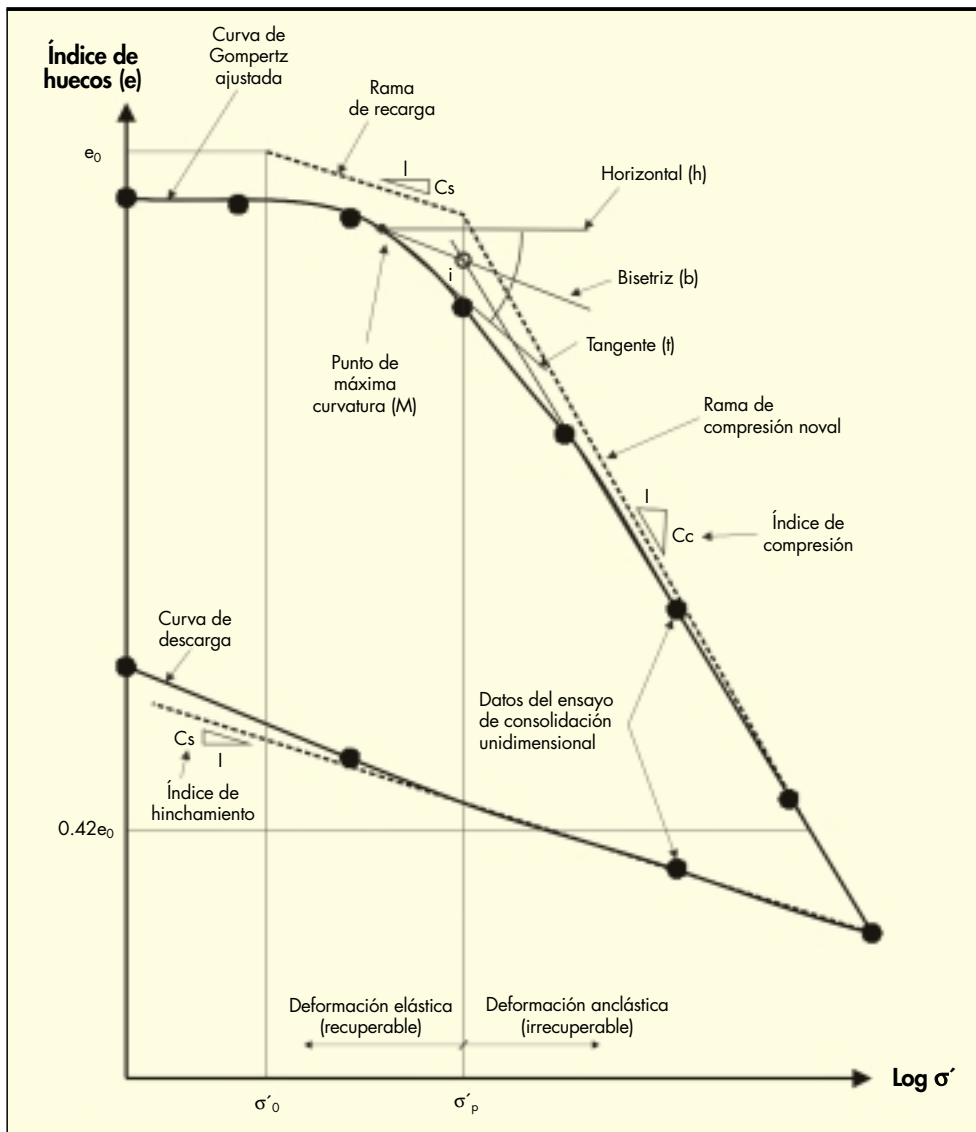


FIGURA 1. Curva edométrica de laboratorio y de campo de una muestra de suelo sobreconsolidada. Parámetros característicos: σ'_o : tensión efectiva natural de la muestra; σ'_p : tensión de preconsolidación; e_0 : índice de huecos inicial de la muestra; C_c : índice de compresión; C_s : índice de hinchamiento o entumecimiento.

donde:

$$\frac{de}{d(\log_{10} \sigma')} = \left[b \cdot c \cdot e^{-e^{b(\log_{10} \sigma' - m)}} \right] \times \left[-e^{b(\log_{10} \sigma' - m)} \right] \quad (3)$$

$$\frac{d^2e}{d(\log_{10} \sigma')^2} = \left[b^2 \cdot c \cdot e^{-e^{b(\log_{10} \sigma' - m)}} \right] \times \left[e^{b(\log_{10} \sigma' - m)} \right] \times \left[e^{b(\log_{10} \sigma' - m)} - 1 \right] \quad (4)$$

El otro parámetro que permite expresar el grado de sobreconsolidación del suelo es la relación entre la presión de preconsolidación y la tensión vertical actual, la denominada razón de sobreconsolidación (*OverConsolidation Ratio* – OCR):

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma_0} \quad (5)$$

Parry y Wroth (1981) propusieron una forma simplificada para estimar el grado de sobreconsolidación (OCR) debido al descenso de nivel freático, que deja patente el cambio en las tensiones efectivas que implica la variación de nivel freático. La tensión vertical natural (σ_0) inicial es:

$$\sigma_0 = \sigma'_0 + u_0 \quad (6)$$

Tras el descenso del nivel freático (ΔH), la nueva tensión que actúa en ese mismo punto puede expresarse como:

$$\sigma_1 = \sigma'_1 + (u_0 - \Delta H \gamma_w) \quad (7)$$

donde γ_w es el peso específico del agua.

La variación de tensión efectiva debido al descenso del nivel freático será:

$$\sigma'_1 - \sigma'_0 = \Delta \sigma' = \Delta H \gamma_w - \Delta H (\gamma_{sat} - \gamma) \quad (8)$$

en la que γ es el peso específico aparente del suelo emergido y γ_{sat} es su peso específico saturado. El segundo término puede ser despreciado si se considera que el suelo permanece saturado debido a fuerzas capilares.

Si además suponemos que el descenso del nivel del agua se prolonga hasta que se ha completado la consolidación primaria del suelo (se ha disipado el exceso de presión intersticial ocasionado por el descenso del nivel del agua), para posteriormente recuperar su nivel inicial, entonces el grado de sobreconsolidación del suelo podemos definirlo como:

$$OCR = \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0} = \frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'}{\sigma'_0} = 1 + \frac{\Delta H \gamma_w - \Delta H (\gamma_{sat} - \gamma)}{\sigma'_0} \quad (9)$$

En aquellos casos en los que el suelo ya está sobreconsolidado, la magnitud del descenso del nivel freático deberá ser mayor que aquella que hace incrementar la tensión efectiva (σ') hasta el valor de la presión de preconsolidación (σ'_p) para así aumentar el OCR. De no ser así, el descenso de nivel freático será insuficiente y no se modificará el OCR del suelo.

Como metodología alternativa, en aquellas muestras de las que no se dispone de edómetros, pero se tiene la resistencia al corte sin drenaje (c_u), se ha calculado el OCR partiendo de que en el Modelo Cam Modificado (Schofield y Wroth, 1968) la máxima presión isotrópica (p_0) es:

$$p_0 = \frac{4c_u}{M} \quad (10)$$

donde M es la constante friccional de estado crítico.

Asumiendo que antes de llegar hasta ese estado el suelo estaba normalmente consolidado, y también que se cumple la ley de Jaky, la componente vertical σ_1 vale:

$$\sigma_1 = \frac{6+M}{6-M} p_0 \quad (11)$$

Esta será la máxima presión vertical que ha actuado sobre el suelo, por lo que conociendo su estado actual, es inmediata la determinación del OCR.

3. MARCO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE LA VEGA BAJA DEL SEGURA

La Cuenca del Bajo Segura (Montenat, 1973) constituye una cuenca neógeno-cuaternaria de la Cordillera Bética. Queda englobada en el extremo más oriental, en el contacto entre las Zonas Internas y Externas (Figura 2a).

A través de ella discurre el Río Segura (Figura 2b), que desemboca en el Mar Mediterráneo mediante de un estrecho paso situado en las proximidades de la población de Guardamar. Este río ha protagonizado importantes episodios de desbordamiento a lo largo de la historia, lo que ha influido en la formación de diferentes unidades sedimentológicas.

Desde el punto de vista estructural, la cuenca se encuentra limitado por varios elementos tectónicos importantes, al NW la Falla de Crevillente, al Sur la denominada del Bajo Segura y por el Norte la Falla del Molar (Alfaro, 1995). Esta conjunción de fracturas ha dado origen a una fosa tectónica, orientada aproximadamente Este-Oeste y abierta hacia el Mediterráneo, en la que el substrato bético, formado por dolomías, cuarcitas y esquistos, ha descendido hasta profundidades que en ocasiones superan los dos mil metros, dibujando un relieve de bloques independizados por fallas de menor entidad (Cuenca, 1988). Sobre este relieve que constituye el substrato de la cuenca se han ido acumulando sedimentos cuya edad va desde el Tortoniense hasta el Holoceno (Soria *et al.*, 1999).

Los materiales detríticos que forman los rellenos más recientes pertenecen mayoritariamente a tres ambientes sedimentarios bien diferenciados (Figura 2). El primero lo constituyen una serie de abanicos aluviales desarrollados en las zonas próximas a los relieves periféricos. Están constituidos fundamentalmente por gravas y arenas alternantes con limos rojos. A menudo se encuentran encostrados mediante un caliche calcáreo, lo que les confiere un mejor comportamiento mecánico frente al resto de los sedimentos que rellenan la cuenca.

El segundo ambiente sedimentario lo constituyen los sedimentos fluviales de canal y de llanura de inundación, así como las áreas pantanosas desarrolladas en la misma llanura de inundación del río. Los materiales son fundamentalmente arcillas, arcillas orgánicas y limos gruesos con intercalaciones arenosas.

El tercer ambiente lo constituyen los depósitos costeros constituidos por arenas finas, de origen eólico y marino, con cantidades pequeñas de limos arenosos y arcillas grises caracterizadas por la presencia de Posidonia Oceánica.

La potencia de los sedimentos que rellenan la cuenca varía desde pocos metros en el borde del valle hasta más de 50 metros en el depocentro (Delgado *et al.*, 2000).

Desde el punto de vista geotécnico los materiales de mayor interés, debido a los problemas que originan por su elevada deformabilidad son los sedimentos fluviales y costeros, especialmente los palustres, frente al mejor comportamiento de los materiales detríticos de los abanicos.

Las propiedades geotécnicas de todos los materiales se resumen en la Tabla 1 donde se han diferenciado tres unidades (Delgado *et al.*, 2000). La primera Unidad se denomina Superficial y se caracteriza por contener frecuentes niveles de arena, que en ocasiones alcanzan varios metros de potencia. La segunda unidad se denomina Unidad Inferior y está constituida por los subniveles de Arcillas Blandas y Limos profundos. Ambas unidades constituyen los sedimentos recientes de la Vega Baja del Segura. La tercera Unidad constituye, dadas sus mejores propiedades mecánicas, el Basamento Geotécnico de la cuenca y está constituida por margas y areniscas plioceanas, con un mayor grado de rigidez y cementación.

UNIDAD SUPERFICIAL	Arcilla	Limo	Arena
Límite líquido, W_L (%)	42.7	-	-
Índice de plasticidad, I_p (%)	23.9	-	-
Humedad natural, W (%)	29.0	26.6	-
Peso específico seco, γ_d (kN/m ³)	15.3	15.6	14.6
Índice de huecos, e	0.78	0.76	0.84
Cohesión efectiva, c' (kPa)	17.0	-	-
Ángulo de rozamiento efectivo, ϕ' (°)	24.8	-	-
Resistencia a compresión simple, q_u (kPa)	114	67	-
Golpeo ensayo de penetración estándar, N_{SPT}	10	7	13
UNIDAD INFERIOR	Arcilla blanda	Arcilla profunda	Limo profundo
Límite líquido, W_L (%)	42.4	47.5	-
Índice de plasticidad, I_p (%)	17.7	24.0	-
Humedad natural, W (%)	39.7	31.7	-
Peso específico seco, γ_d (kN/m ³)	13.2	14.8	15.2
Índice de huecos, e	1.0	0.8	0.8
Cohesión efectiva, c' (kPa)	14	20	-
Ángulo de rozamiento efectivo, ϕ' (°)	-	26.6	-
Resistencia a compresión simple, q_u (kPa)	42	55	-
Golpeo ensayo de penetración estándar, N_{SPT}	4	12	11
UNIDAD PROFUNDA	Marga	Arenisca/calcarenita	Conglomerado
Límite líquido, W_L (%)	42.9	-	-
Índice de plasticidad, I_p (%)	22.5	-	-
Humedad natural, W (%)	21.9//17.4*	16.2	-
Peso específico seco, γ_d (kN/m ³)	17.3	21.0	-
Índice de huecos, e	0.60	-	-
Cohesión efectiva, c' (kPa)	18	-	-
Ángulo de rozamiento efectivo, ϕ' (°)	27	-	-
Resistencia a compresión simple, q_u (kPa)	474	1000-10000	400
Golpeo ensayo de penetración estándar, N_{SPT}	30 (R)	(R)	(R)

TABLA 1. Resumen de las principales propiedades geotécnicas de los suelos de la Vega Baja del Segura (modificado de Delgado, 1997).

Desde el punto de vista hidrológico cabe diferenciar un importante acuífero detrítico superficial cuya superficie piezométrica se sitúa a unos 2 m de profundidad y un acuífero multicapa profundo con diferentes niveles confinados cuyas superficies piezométricas se sitúan por encima de la propia superficie del terreno.

Los niveles piezométricos del acuífero superficial y del profundo han sufrido importantes oscilaciones desde los años 90, llegando puntualmente a sufrir caídas que han superado los

15 m en las Vegas Media y Baja del Segura. Como consecuencia de estos descensos se ha producido una consolidación del suelo que ha derivado en un proceso de deformación superficial o subsidencia que ha afectado a todo el valle, siendo especialmente importante y conocido los efectos sobre el área metropolitana de Murcia (Vázquez y de Justo, 2002; Mulas *et al.*, 2003; Martínez *et al.*, 2004; Aragón *et al.*, 2004; Tomás *et al.*, 2005; Tomás *et al.*, 2007b, 2008; Herrera, 2008; Tomás, 2009), dando lugar a asentamientos del terreno de varios centímetros.

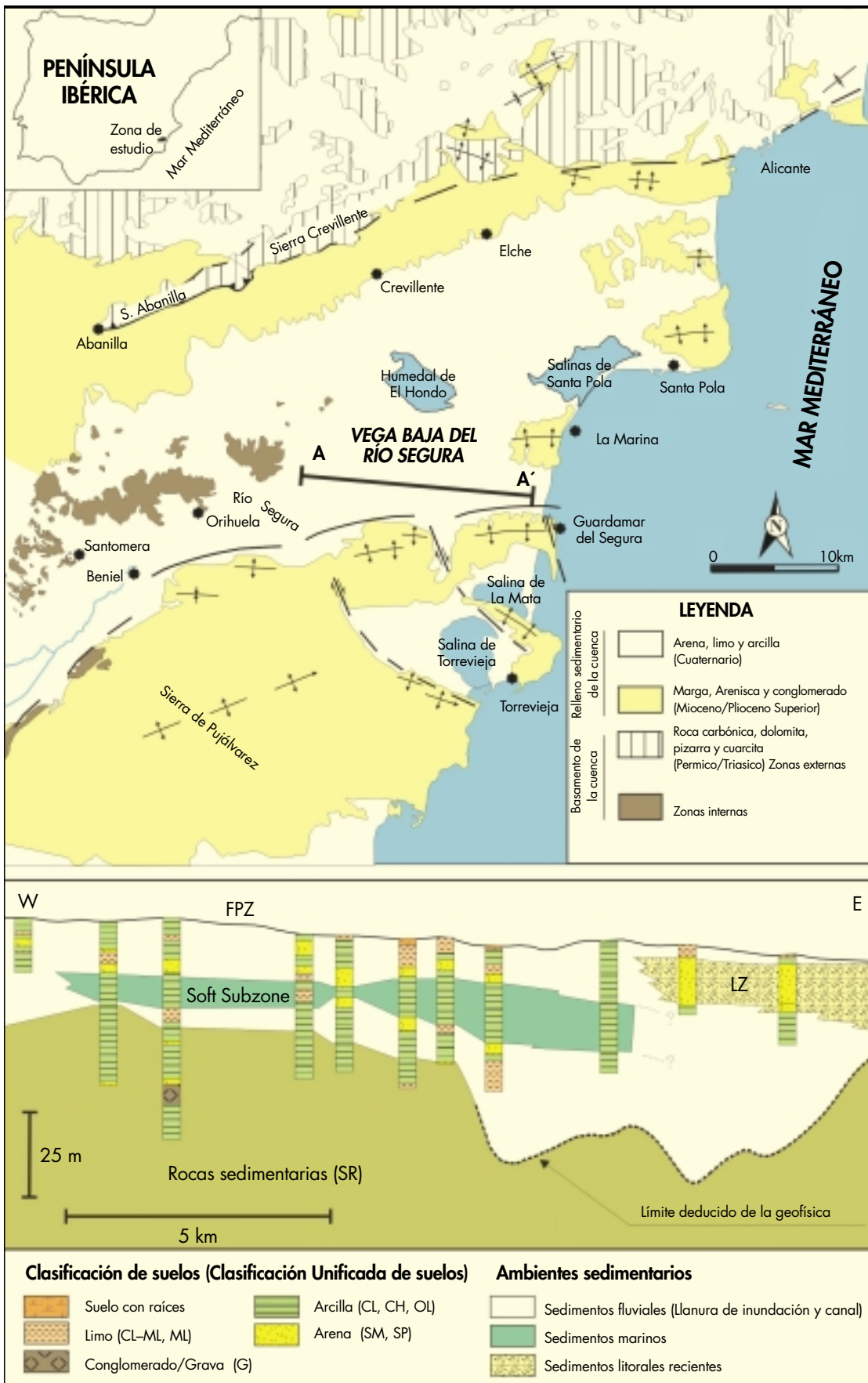


FIGURA 2. (a) esquema geológico (modificado de Tomás *et al.*, 2007a) y (b) corte geológico de la Vega Baja del Segura (modificado de Delgado *et al.*, 2002).

4. CÁLCULOS DE LA PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN DE LOS SUELOS DE LA VEGA BAJA DEL SEGURA

Desde el punto de vista del cálculo de los asentamientos de consolidación primaria de un suelo, la presión de preconsolidación, juega un papel notable en los cálculos y/o estimaciones de asentamientos del terreno, dado que define el límite que separa las deformaciones elásticas y las anelásticas. Las recomendaciones y códigos geotécnicos de uso en ingeniería civil y edificación (Ministerio de Fomento, 2004, 2005; Ministerio de Vivienda, 2006) hacen referencia expresa a la presión de preconsolidación y el grado de sobreconsolidación en diversos apartados.

El cálculo de la presión de preconsolidación de los suelos de la Vega Baja del río Segura mostrado en este apartado ha sido llevado a cabo a través del método de Casagrande (1936), utilizando la metodología analítica propuesta por Gregory *et al.*, (2006) expuesta en el apartado anterior.

La sobrecarga natural de terreno, que corresponde a la tensión efectiva natural del suelo a una profundidad z , ha sido calculada como:

$$\sigma'_0 = \sigma_0 - u \tag{12}$$

donde la tensión total natural del terreno (σ_0) se ha calculado sumando los productos resultantes de multiplicar los pesos específicos (saturado o aparente dependiendo de la posición respecto al nivel freático) de cada capa por su espesor correspondiente, para todas las capas que constituyen la columna de suelo suprayacente al punto considerado. La presión intersticial (u) ha sido calculada como la presión generada por la columna

de agua que actúa a una profundidad z , multiplicando el peso específico del agua, γ_w (establecido constante en 10 kN/m^3), por la profundidad en cuestión a través de la expresión:

$$u = (z - h)\gamma_w \tag{13}$$

donde h es la profundidad del nivel freático medido desde la superficie del terreno.

Obsérvese que al calcular de este modo la presión intersticial se asume una distribución hidrostática de la misma. Como veremos a continuación, esta aproximación puede causar desviaciones respecto a la tensión efectiva real cuando el nivel piezométrico es mayor o menor en el acuífero confinado.

Se han calculado las presiones de preconsolidación de 114 muestras inalteradas de suelo de 50 mm de diámetro y 12 mm de altura, obtenidas de sondeos geotécnicos llevados a cabo en la Vega Baja del río Segura y ensayadas en célula edométrica (ensayo de consolidación uniaxial) según la norma UNE 103-405-94 (UNE, 1994). Las muestras ensayadas han sido tomadas de profundidades de hasta 40.4 m. Aquellas curvas edométricas que presentaban anomalías patentes a simple vista, como escalones anómalos, falta de datos, etc. han sido rechazadas.

Los resultados de presión de preconsolidación (σ'_p) y de grado de sobreconsolidación (OCR) obtenidos al aplicar la ya referida metodología se muestran en las Figuras 3 a 6 y en la Tabla 2. La Figura 3 muestra la variación de la presión de preconsolidación con la profundidad. En la Figura 4 se han representado los OCR calculados para las diferentes profundidades. Finalmente, en la Figura 5 se muestra la variación de la tensión efectiva natural (σ'_0), la presión de preconsoli-

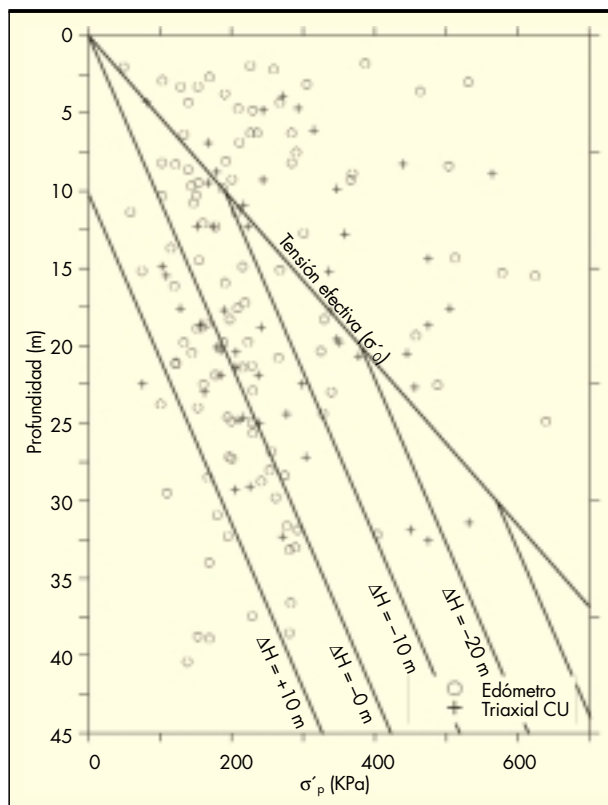


FIGURA 3. Variación de la presión de preconsolidación (en kPa) de suelos de la Vega Baja del río Segura. ΔH : Posición del nivel freático respecto a la superficie del terreno: (-) descenso y (+) ascenso.

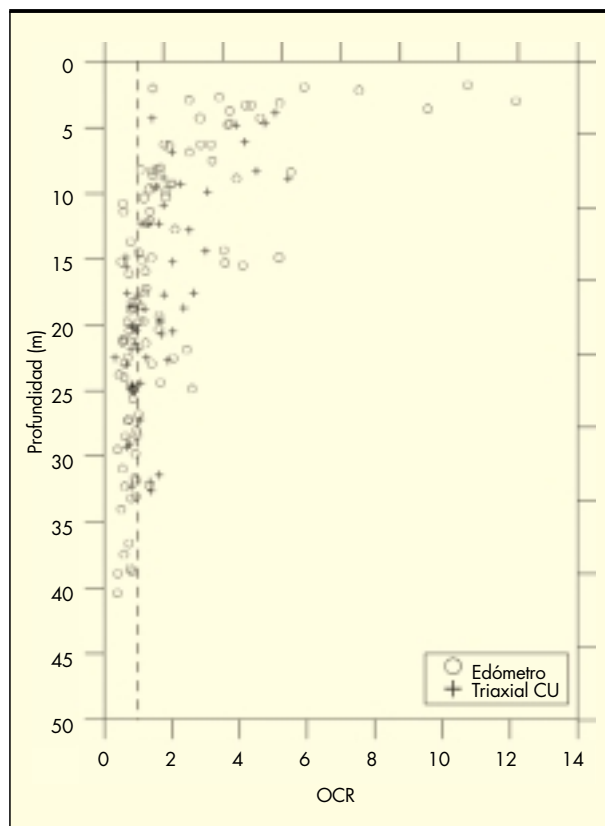


FIGURA 4. Variación con la profundidad del grado de sobreconsolidación de los suelos de la Vega Baja del río Segura.

	Presión de preconsolidación, KPa (σ'_p)			OCR		
	Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.
0-5 metros	531 (293)	49 (81)	224 (222)	12.2 (5.1)	1.4 (1.4)	5.3 (3.8)
5-10 metros	503 (564)	50 (167)	216 (302)	5.5 (5.4)	0.7 (1.5)	2.1 (3.1)
10-25 metros	813 (505)	59 (75)	240 (260)	5.2 (3.0)	0.3 (0.3)	1.3 (1.3)
>25 metros	404 (352)	110 (205)	231 (352)	1.3 (1.6)	0.4 (0.7)	0.7 (1.0)

TABLA 2. Resultados de presión de preconsolidación de las muestras de suelo de la Vega Baja del Segura ensayadas en edómetro. (Máx.: máximo; Mín.: Mínimo; Med.:Media; DND: Dato no disponible). Los valores comparativos obtenidos a partir de los ensayos triaxiales son los expresados entre paréntesis.

dación (σ'_p) y el grado de sobreconsolidación (*OCR*) para varios sondeos representativos y completos de la Vega Baja del río Segura.

Los ajustes de las curvas de Gompertz a los datos de la curva edométrica proporcionan coeficientes de correlación siempre superiores a 0.99. La presión de preconsolidación va-

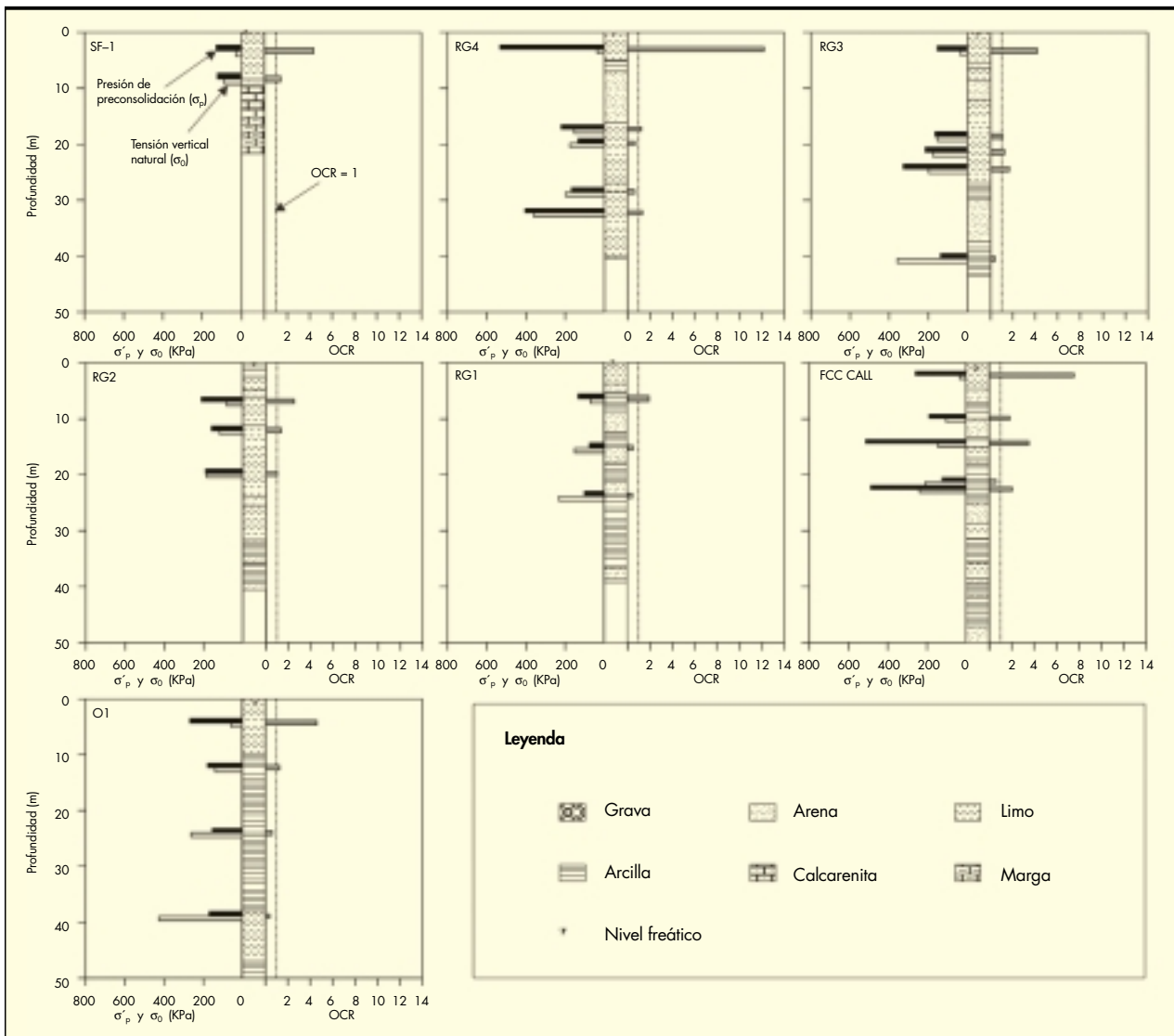


FIGURA 5. Variación con la profundidad de la presión de preconsolidación (σ'_p), de la presión efectiva natural (σ'_0) y del grado de sobreconsolidación (OCR) calculados en nueve sondeos de las Vegas Baja del río Segura.

ría desde 49.1 a 813.5 KPa mientras que el *OCR* oscila entre 0.3 y 12.2.

Paralelamente se ha calculado la presión de preconsolidación y *OCR* de 53 muestras inalteradas de suelo convenientemente talladas y ensayadas en célula triaxial (ensayo triaxial consolidado y no drenado) según la norma UNE 103-402-98 (UNE, 1998). Las muestras ensayadas han sido tomadas de profundidades comprendidas entre 3.9 hasta 32.6 m. Los valores obtenidos a partir de los ensayos triaxiales se muestran en la Tabla 2 y se han representado junto con los valores obtenidos a partir de curvas edométricas en las Figuras 3 y 4.

Del análisis de las Figuras 3 a 5 y de la Tabla 2, se deduce con claridad que todas las muestras de suelo tomadas entre la superficie del terreno y los 5 primeros metros de profundidad se encuentran altamente sobreconsolidadas, con *OCR* variables entre 1.4 y 12.2 (valor medio de 5.3). Desde los 5 hasta los 10 m de profundidad, el 86% de las muestras están ligeramente sobreconsolidadas con valores de *OCR* comprendidos entre 0.7 y 5.5 (valor medio de 2.1). Desde los 10 a los 25 m las muestras de suelo están también ligeramente sobreconsolidadas (55%) y frecuentemente infraconsolidadas (37%) con valores de *OCR* que varían entre 0.3 y 5.2 (valor medio de 1.3). Para profundidades mayores a los 35 m la mayoría de las muestras de suelo están infraconsolidadas y solo un 12% están normalmente consolidadas. Únicamente una muestra se encuentra sobreconsolidada en este rango de profundidades, con un valor de *OCR* de 1.3.

La infraconsolidación calculada puede explicarse considerando el procedimiento de cálculo de la presión de poro de las muestras. Para ello se considera una situación hidrostática en la que el nivel freático corresponde al nivel alcanzado por el agua en los sondeos y que es el correspondiente al nivel freático del acuitardo constituido por limos y arcillas. Sin embargo, diversas medidas realizadas recientemente en piezómetros multicapa de la Diputación Provincial de Alicante muestran que los niveles piezométricos en el acuitardo y en el primer acuífero confinado son diferentes, siendo mayor en el segundo (Tomás, 2009). Ese hecho genera un gradiente hidráulico vertical que a su vez da lugar a un flujo ascendente. El gradiente generado deriva a su vez en un incremento de las presiones intersticiales a lo largo de toda la columna de limos y arcillas del acuitardo respecto a

la distribución teórica de presiones intersticiales que correspondería a una situación hidrostática. Por ese motivo, las tensiones efectivas iniciales reales son menores que las tensiones efectivas iniciales correspondientes a una situación hidrostática y, en consecuencia, los *OCR* calculados son menores que los reales, de ahí la infraconsolidación. Desafortunadamente no se dispone de datos de nivel piezométrico de los dos niveles en la época de obtención de la muestra necesarios para corregir de forma exacta la tensión inicial por este efecto y poder así obtener el valor real de *OCR*.

Por lo tanto, los datos de preconsolidación del terreno indican que los mayores valores corresponden a los primeros 5 m de suelo. Curiosamente, los valores de subsidencia instrumental medidos en la ciudad de Murcia, situada en la Vega Media del Segura como prolongación geológica de la Vega Baja, mediante extensómetros de varilla e incrementales indican que el mayor porcentaje de la deformación superficial del terreno se produce en los primeros 5 primeros metros de profundidad (Peral *et al.*, 2004; Tomás 2009). Ambos datos apuntan a que las variaciones piezométricas generan importantes tensiones en el terreno, de mayor magnitud en la zona superficial, que ocasionan la sobreconsolidación del suelo además de generar una deformación del mismo.

5. CAUSAS DE LA SOBRECONSOLIDACIÓN

5.1. TÉRMINOS DE LA PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN

En la zona de estudio existen dos causas principales que podrían explicar la preconsolidación del terreno observada en las capas más superficiales: los descensos de nivel piezométrico y la desecación del suelo debida a ciclos de humectación-desecación combinados con actividad pedológica. Otras causas parecen tener menor efecto (tectónica activa) o simplemente son imposibles en este contexto geológico (erosión o glaciarrismo).

En este apartado se va a intentar determinar la contribución de cada una de estas causas a la presión de preconsolidación del suelo. Para ello se supone que la presión de preconsolidación es la suma de varios términos:

$$\sigma'_p = \sigma'_0 + \Delta\sigma'_{MPLD} + \Delta\sigma'_D \quad (14)$$

donde σ'_p es la presión efectiva de preconsolidación calculada, σ'_0 es la tensión debida a la sobrecarga natural existente en el

Muestra	Profundidad (m)	NAP (m)	Fecha de perforación	Localización	Rango de variación del nivel de agua (m)	OCR	σ'_p (KPa) [1]	σ'_0 (KPa) [2]	$\Delta\sigma'_{MPLD}$ (KPa) [3]	$\Delta\sigma'_D$ (KPa) [1]-[2]-[3]
ORI PAL	1.9	2.3	1999	VBS	5.7 – 10.1	5.9	226	38	0*	188
ORI IV	2.7	1.8	1996	VBS	5.7 – 10.1	3.4	141	41	1	99
O1	4.3	1.5	1994	VBS	5.7 – 10.1	4.6	267	58	27	182
ORI AUG	4.3	1.0	1990	VBS	5.7 – 10.1	2.8	140	49	34	57
O2	4.8	1.3	1994	VBS	5.7 – 10.1	3.7	229	63	36	130
BENIEL	2.7	1.3	2006	VMS	17.3 – 17.7	4.8	190	39	14	137
BENIEL	4.9	1.3	2006	VMS	17.3 – 17.7	2.7	158	58	37	63
BENIEL	5.3	1.3	2006	VMS	17.3 – 17.7	3.6	232	64	41	127

(*) Muestra situada sobre el nivel del agua al ejecutar el sondeo. NAP: Nivel de agua durante la perforación.

TABLA 3. Descomposición de la presión de preconsolidación de muestras inalteradas de suelo de la Vega Baja del río Segura en diferentes términos. Los rangos de variación del nivel piezométrico han sido obtenidos usando los registros de los piezómetros disponibles más próximos a los sondeos geotécnicos.

presente, $\Delta\sigma_{MPLD}$ es el máximo incremento de esfuerzo efectivo debido a variaciones de nivel piezométrico ocurridas en el pasado, y $\Delta\sigma_D$ es el incremento de esfuerzo efectivo debido a la desecación y otras causas asociadas como procesos pedológicos.

La presión de preconsolidación y la tensión efectiva debida a la sobrecarga natural del terreno pueden calcularse según la metodología expuesta anteriormente. El incremento de esfuerzo efectivo debido a variaciones de nivel piezométrico puede calcularse también usando los datos de evolución de nivel piezométrico conocidos. En consecuencia, el tercer término de la eq. (14), que corresponde a la tensión efectiva debida a la desecación puede despejarse y ser calculado. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos para varias muestras superficiales distribuidas por toda la Vega Baja del Segura. Obsérvese que no se han incluido muestras de suelo del sector más oriental de la Vega Baja del Segura debido a la inexistencia de series completas de datos piezométricos que permitan calcular el segundo término de la eq. (14).

5.2. CONTRIBUCIÓN DE LOS DESCENSOS PIEZOMÉTRICOS EN PRECONSOLIDACIÓN DEL SUELO

Cuando el nivel piezométrico de un acuífero libre desciende, u y σ_v disminuyen, resultando un incremento de la tensión vertical efectiva que actúa sobre las partículas de suelo.

Si asumimos unas condiciones hidrostáticas, cada metro que descienda el nivel de agua implica que la presión de poro (intersticial) disminuye al final del drenaje 10 kPa, y que al mismo tiempo se produce un cambio en la tensión efectiva debido a la sobrecarga del terreno. Este segundo cambio de tensión se calculará como la diferencia de esfuerzos debida al espesor de suelo emergido multiplicado por el peso específico aparente, que antes estaba multiplicado por el peso específico saturado, despreciando así los efectos capilares que podrían mantener saturada la franja de suelo situada sobre el nivel freático.

El incremento de tensión efectiva debido al máximo descenso del nivel del agua sufrido por el suelo a lo largo de su historia ($\Delta\sigma_{MPLD}$) será grabado por el suelo como "parte" de su presión de preconsolidación. Holzer (1981) calculó los valores de preconsolidación debido a descensos de nivel piezométrico por bombeo de agua en varios acuíferos de Estados Unidos basándose en las curvas descenso piezométrico-subsistencia, estimando unos valores comprendidos entre 160 y 620 KPa.

El mayor descenso del nivel piezométrico en la Vega Baja del Segura fue de 10 m durante el periodo 1993-2005, al cual pertenecen la totalidad de las muestras ensayadas. Desafortunadamente no se disponen de datos de periodos anteriores. Sin embargo, es bien sabido que la explotación del acuífero es máxima en la actualidad (comparado con el pasado), por lo que asumir que los niveles piezométricos actuales son los mínimos históricos no es irreal. Esos descensos representan incrementos de tensión efectiva máximos de 49-87 kPa en la Vega Baja, dependiendo de la zona.

La máxima tensión efectiva posible calculada (suponiendo un drenaje total y disipación de la presión de poro) debida a la bajada de nivel piezométrico ($\Delta\sigma_{MPLD}$) ha sido calculada para varias muestras representativas de la Vega Baja del Segura. Estos valores son siempre inferiores a 50 kPa (Tabla 3).

Es importante observar que los valores de presión de preconsolidación calculados en las muestras superficiales no se justifican totalmente con las tensiones inducidas por los descensos de nivel piezométrico. Sólo justifican una parte de la presión de preconsolidación (menos del 40% de la sobreconsolidación). Un mayor descenso de nivel piezométrico en el pasado que los registrados actualmente podría justificar el exceso de preconsolidación, pero esta posibilidad parece prácticamente imposible en esta región.

5.3. CONTRIBUCIÓN DE LAS OSCILACIONES DEL NIVEL FREÁTICO EN LA PRECONSOLIDACIÓN DEL SUELO

La segunda causa de la preconsolidación de los suelos de la Vega Baja es la desecación. Cambios estacionales en el contenido de humedad del suelo pueden causar desecación y retrabajado por procesos pedológicos, tal como actividad biológica y formaciones secundarias de calcita (Cetin, 2000). La desecación, y especialmente la desecación estacional causada por re-

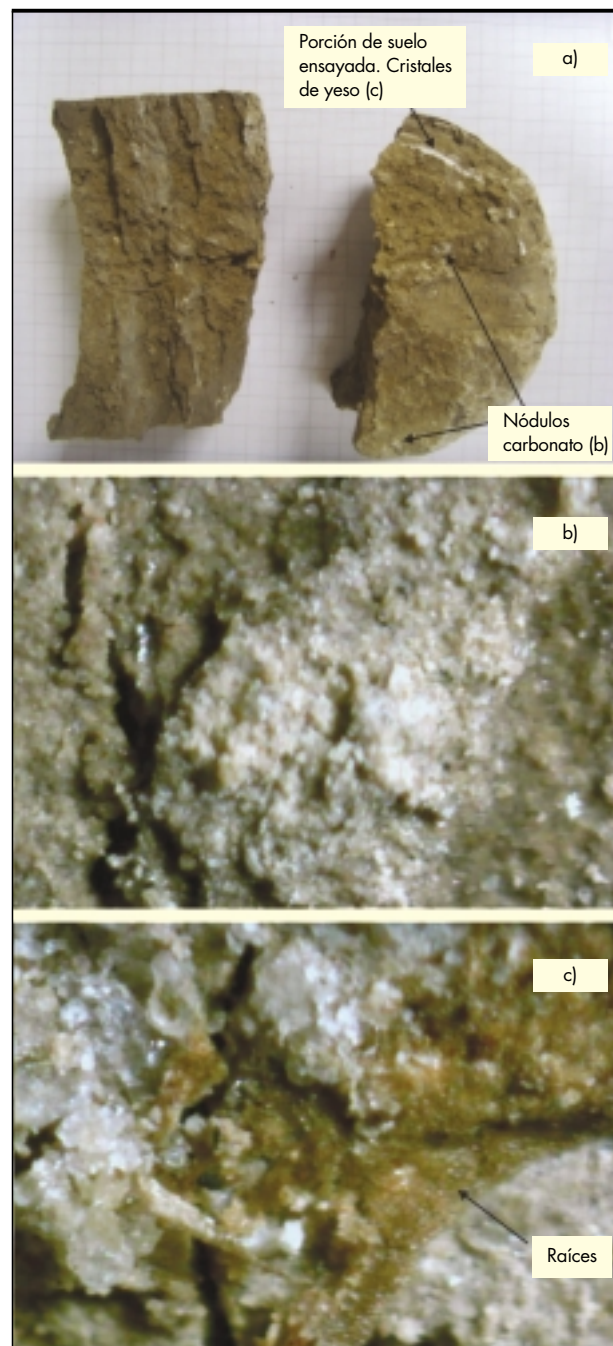


FIGURA 6. (a) Testigo de suelo obtenido entre 1.0 y 1.6 m de profundidad en un sondeo de la Vega Baja del Segura. Obsérvese la presencia de precipitaciones de sales blanquecinas. (b) nódulos blanquecinos, de aspecto más pulverulento (15x). (c) Restos de células vegetales de las raíces y los huecos ocupados por los cristales de yeso.

petición de ciclos de humectación y secado, induce importantes esfuerzos a microescala. Estos esfuerzos, referidos como presiones intersticiales negativas, se deben a tensiones internas equivalentes resultantes de la humedad y la evaporación de agua capilar, estando relacionadas con las presiones de succión del suelo. Tschebotarioff (1951) estableció que la desecación del suelo puede generar tensiones muy elevadas en los suelos finos, que pueden variar desde 0.15 KPa a 305 KPa para tamaños de grano variables entre arena gruesa a arcilla. Otros autores han observado presiones de preconsolidación en exceso de 400 KPa (Selby y Lindsay, 1982; Stapledon, 1985). Chu *et al.*, (2002) encontraron valores de OCR de hasta 8 en las capas superficiales de las arcillas de Singapur debido a la desecación de las mismas.

En la Vega Baja este fenómeno afecta principalmente a la zona vadosa (zona del terreno parcialmente saturada situada entre la superficie del terreno y el nivel freático), donde el contenido de agua cambia notablemente y la actividad pedológica puede ser significativa. Esta actividad pedológica es inducida principalmente por las raíces de las plantas (observadas en las capas más superficiales de casi todos los sondeos geotécnicos disponibles) (Figura 6) y se manifiestan a modo de horizontes ligeramente cementados (Figura 6). Algunos autores como Won y Chang (2007) han constatado fenómenos de cementación de granos de suelo debida a la existencia de iones sulfato y potasio en el agua que rellena los poros del suelo, que precipitan al cambiar las condiciones químicas y causan una preconsolidación del suelo que denominan aparente al no tener un origen tensional puro.

La zona de estudio disfruta de un clima Mediterráneo, con escasas precipitaciones y veranos muy calientes y secos. Cuando se produce la insolación directa sobre la superficie del terreno, pueden ocurrir fenómenos de evaporación del agua presente en el suelo. De la misma forma, la transpiración natural de las plantas puede generar también efectos similares de pérdida de agua del suelo en la zona radicular. Las pérdidas directas e indirectas del agua del suelo a la atmósfera por evaporación en la Vega Baja del Segura puede llegar a alcanzar valores importantes (PNIAS, 1978). De hecho, la humedad natural de los diez primeros metros del terreno en la zona de estudio varía entre el 2.1% y el 41.6% (Tomás, 2009). El efecto que suele causar la pérdida de agua en estas franjas más superficiales de suelo es la precipitación de sales (Figura 6), generando una sobreconsolidación aparente del suelo (Wong y Chang, 2007).

Las variaciones estacionales del nivel freático son también comunes en esta área. Como consecuencia, los primeros cinco metros de columna de suelo se encuentran sobreconsolidados debido a la ocurrencia de estos fenómenos, coincidiendo con la franja de terreno situada inmediatamente por encima del nivel freático, que es en la que se producen los ascensos capilares de agua desde la superficie libre del nivel freático.

Este hecho se ha confirmado a través de un estudio de difracción de Rayos X (DRX) realizado sobre cristales blancos seleccionados de un testigo de suelo extraído de un sondeo entre 1.0 y 1.6 m de profundidad en la localidad de Callosa del Segura. El análisis muestra la presencia de calcita, dolomita, ilita, cuarzo y yeso como componentes principales. Mediante un análisis con lupa binocular de las manchas blanquecinas del mismo testigo de suelo se han reconocido características típicas del yeso como el brillo satinado, existencia de maclas polisintéticas de gran superficie reflectante y morfologías prismáticas de agrupaciones de cristales de yeso (Figura 6). Estos microcristales de yeso se encuentran rodeados de pequeños surcos y rellenando cavidades, lo que pone de manifiesto su origen tardío, tal y como revelan las numerosas grietas de retracción reconocidas en gran parte de la muestra analizada.

La eq. (14) ha permitido calcular los valores correspondientes a la contribución de la desecación a la presión de preconsolidación ($\Delta\sigma_D$) para las muestras representativas de suelo. Estos valores varían entre 57 y 188 KPa (Tabla 3).

6. CONCLUSIONES

La presión de preconsolidación es un importante parámetro geotécnico que separa las deformaciones elásticas y anelásticas de los suelos. Es un parámetro de gran importancia en geotecnia dado que controla el cálculo de asentamientos y condiciona la resistencia al corte.

En este trabajo se ha calculado la presión de preconsolidación de 114 muestras inalteradas de suelo obtenidas en sondeos realizados en la Vega Baja del Segura. El cálculo de este parámetro se ha llevado a cabo aplicando el método de Casagrande de forma analítica con el fin de evitar interpretaciones subjetivas en la determinación del punto de máxima curvatura.

Las presiones de preconsolidación calculadas por este procedimiento han proporcionado valores de sobreconsolidación en los cinco primeros metros de profundidad muy superiores a los esperados en estos suelos cuaternarios.

Las causas a las que se atribuye esta sobreconsolidación superficial pueden ser explicadas con los descensos piezométricos que han afectado a este acuífero, así como por la desecación del terreno como consecuencia de las fluctuaciones estacionales del nivel del agua.

7. AGRADECIMIENTOS

Al profesor Rafael Arana del Departamento de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Murcia por la realización del estudio mineralógico por difracción de Rayos X. Este estudio ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología y EU FEDER (Project TEC-2008-06764) y por la Universidad de Alicante (Proyectos VIGROB-157 y VIGROB-184). Los datos piezométricos han sido cedidos por la Diputación Provincial de Alicante y los datos geotécnicos por el Laboratorio de Carreteras de la Consejería de Infraestructuras y Transportes de la Comunidad Valenciana, el Instituto Técnico de la Construcción (ITC, S.A.) y CEICO S.L..

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, P. (1995). Neotectónica en la Cuenca del Bajo Segura (extremo oriental de la Cordillera Bética). Tesis doctoral. Universidad de Alicante, 219 pp.
- Aragón, R., García-Aróstegui, J.L., Lambán, J., Hornero, J., & Fernández-Grillo, A.I. (2004). Impacto de la explotación intensiva de aguas subterráneas en la ciudad de Murcia (España). Análisis hidrogeológico. Proc. XXXIII Congress of IAHS-ALH-SUD, Zacatecas, Mexico. *Conférence on Groundwater Flow Understanding from local to regional scales*, 2622-2624.
- Canales, G., Vera Rebollo, J.F. (1985). Colonización del Cardenal Belluga en las tierras donadas por Guardamar del Segura: creación de un paisaje agrario y situación actual. *Invest. Geogr.* 3, 143-160.
- Casagrande, A. (1936). The determination of pre-consolidation load and its practical significance. In: *Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering*, 3, 60-64.
- Cetin, H. (2000). An experimental study of soil memory and preconsolidation adjacent to an active tectonic structure: the Meers fault, Oklahoma, USA. *Engineering Geology*, 57, 169-178.

- Chu, J., Myint Win, B., Chang, M.F., Choa, V. (2002). Consolidation and permeability properties of Singapore Marine clay. *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, 128, 724-732.
- Cuenca, A. (1988). La terminación oriental del Accidente Cádiz-Alicante. *Investigaciones geográficas*, nº 6. Universidad de Alicante.
- Dawidowski, J.B., Koolen, A.J. (1994). Computerized determination of the precompression stress in compaction testing of field core samples. *Soil and Tillage research*, 31, 277-282.
- Delgado J., (1997). Zonificación sísmica de la Vega Baja del Río Segura: Análisis de la respuesta del suelo. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.
- Delgado, J., Alfaro, P., Andréu, J.M., Cuenca, A., Doménech, C., Estévez, A., Soria, J.M., Tomás, R., Yébenes, A. (2002). Engineering-geological model of the Segura river flood plain (SE Spain): a case study for engineering planning, *Engineering Geology*, 68: 171-187
- Delgado, J., López Casado, C., Alfaro, P., Estévez, A., Giner, J., Cuenca, A., Molina, S. (2000). Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case of study of microtremors as an exploration tool. *J. Appl. Geophys.* 45, 19-32.
- Gregory, A.S., Whaley, W.R., Watts, C.W., Bird, N.R.A., Hallet, P.D., Whitmore, A.P. (2006). Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research*, 89, 45-57.
- Herrera, G. (2008). Aplicación de la Interferometría Diferencial Avanzada (CPT-DInSAR) al estudio de los riesgos geológicos y mineros. Universidad Politécnica de Madrid, Tesis doctoral, 206 pp.
- Holzer, T.L. (1981). Preconsolidation stress of aquifer systems in areas of induced land subsidence. *Water Research*, 17, 693-704.
- Juárez, E., Rico, A. (1976). "Mecánica de suelos". tomo 3era edición. Editorial Limusa, México. 443 p.
- Martínez, M., Mulas, J., Herrera, G., Aragón, R. (2004). Efectos de una subsidencia moderada por extracción de agua subterránea en Murcia, España. Proc. XXXIII Congress of IAH-ALH-SUD, Zacatecas, Mexico. *Conference on Groundwater Flow Understanding from local to regional scales*, 249-252.
- Ministerio de Fomento (2004). Guía de cimentaciones en obras de carretera. 304 pp.
- Ministerio de Fomento (2005). ROM 05.05. Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias. 537 pp.
- Ministerio de Vivienda (2006). Código Técnico de la Edificación. Documento Básico DB-SE-C Seguridad Estructural Cimientos. 160 pp.
- Montenat, C. (1977). Les basins néogènes et quaternaires du Levant d'Alicante à Murcie (Cordillères Bétiques orientales, Espagne). *Stratigraphie, paléontologie et evolution dynamique*. Doc. Lab. Geol. Univ. Lyon, 69, 1-345.
- Mulas, J., Aragón, R., Martínez, M., Lambán, J., García-ArosteGUI, J.L., Fernández-Grillo, A.I., Hornero, J., Rodríguez, J., Rodríguez, J.M. (2003). Geotechnical and hydrological analysis of land subsidence in Murcia (Spain). Proc. 1st International Conference on Groundwater in Geological Engineering, RMZ-M&G, Materials and Geoenvironment, Bled, Slovenia, 50, 249-252.
- Pacheco-Silva, F. (1970). A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample. In *Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Brazil, 2, 225-232.
- Parry, R.H.G., Worth, C.P. (1981). Shear stress-strain properties of soft clay. En: E.W. Brand y R.P. Brenner Eds., *Soft clay engineering: Developments in geotechnical engineering*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 311-362.
- Peral, F., Rodríguez, A., Mulas, J. (2004). Control of subsidence with borehole extensometers and surveying measurements in Murcia (Spain). Proc. ISC-2 on Geotech. and Geophys. Site Characterization, Rotterdam, Holland, 1171-1176.
- Schofield, A.N., Wroth, C.P. (1968). *Critical state soil mechanics*. Ed. Mc Graw Hill, 218 pp.
- Selby, J., Lindsay, J.M. (1982). *Engineering geology of the Adelaide city area*. South Australia Geological Survey Bulletin, 51, 94 p.
- Soria, J.M., Alfaro, P., Estévez, A., Delgado, J., Durán, J.J. (1999). The Holocene sedimentation rates in the Lower Segura Basin (eastern Betic Cordillera, Spain): eustatic implications. *B. Soc. Geol. Fr.* 170, 349-354.
- Stapledon, D.H. (1970). Changes and structural defects developed in some south Australian clays, and their Engineering consequences. *Symp. On Soil and Earth Structures in Arid Climates*, Inst. Eng. Aust. Geomech. Soc., Adelaide, 62-71.
- Tavenas, F., Des Rosiers, J.P., Leroueil, S., La Rochelle, P., Roy, M. (1979). The use of strain energy as a Yield and creep criterion for lightly overconsolidated clays. *Geotechnique* 29, 285-303.
- Tomás, R. (2009). Estudio de la subsidencia de la ciudad de Murcia mediante interferometría SAR diferencial avanzada. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.
- Tomás, R., Domenech, Mira, A., Cuenca, A., Delgado, J. (2007a). Preconsolidation stress in the Vega Baja and Media areas of the River Segura (SE Spain): Causes and relationship with piezometric level changes. *Engineering Geology*, 91, 135-151.
- Tomás, R., Lopez-Sanchez, J.M., Delgado, J., Mallorquí, J.J., Herrera, G. (2008). DInSAR monitoring of aquifer compaction due to water withdrawal: Vegas Baja and Media of the Segura river (SE, Spain) case study. En "Droughts: Causes, Effects and Predictions", New York, EE.UU., Nova Publishers, pp. 253-276.
- Tomás, R., Lopez-Sanchez, J.M., Delgado, J., Vicente, F., Cuenca, A., Mallorquí, J.J., Blanco, P., Duque S. (2007b). DInSAR monitoring of land subsidence in Orihuela city, Spain: comparison with geotechnical data. *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, IGARSS 2007, Barcelona, 23-28 Julio, 3027-3030.
- Tomás, R., Márquez, Y., Lopez-Sanchez, J.M., Delgado, J., Blanco, P., Mallorquí, J.J., Martínez, M., Herrera, G., Mulas, J. (2005). Mapping ground subsidence induced by aquifer overexploitation using advanced Differential SAR Interferometry: Vega Media of the Segura River (SE Spain) case study. *Remote Sensing of the Environment*, 98, 269 - 283.
- Tschebotarioff, G.P. (1951). *Soil mechanics, Foundations and Earth Structures*. Mac Graw Hill, New York, 655 pp.
- UNE (1994). Geotecnia, UNE 103-405-94. Ensayo de consolidación unidimensional de un suelo en edómetro. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 10 pp.
- UNE (1998). Geotecnia, UNE 103-402-98. Determinación de los parámetros resistentes de una muestra de suelo en el equipo triaxial. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, 42 pp.
- Vázquez, J.N., De Justo, J.L. (2002). La subsidencia en Murcia. Implicaciones y consecuencias en la edificación. (262 pp.). Murcia: Ed. COPVT-ASEMAS.
- Won, J.Y., Chang, P.W. (2007). The cause of apparent overconsolidation in the Namak marine deposit, Korea. *Géotechnique* 57, 355-369.