

ESTUDIO DE LA RELACIÓN ENTRE LA DURABILIDAD Y LAS CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DE LAS ROCAS BLANDAS

Joan MARTINEZ-BOFILL^{1,3}, Jordi COROMINAS¹ y Albert SOLER²

¹ Departament d'Enginyeria del Terreny
Escola d'Enginyers de Camins, Canals i Ports
UPC Universitat Politècnica de Catalunya

² Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals
Facultat de Geologia
UB Universitat de Barcelona

³ Geomar Enginyeria del Terreny, SLP

RESUMEN

Numerosos taludes constituidos por rocas blandas presentan problemas de estabilidad debido al proceso de degradación progresiva de las mismas. Presentamos un análisis sobre el papel de las características mineralógicas y texturales en la durabilidad de las rocas blandas. Para ello, se han tomado muestras de 45 taludes distribuidos en distintas carreteras del sector catalán de la Cuenca Terciaria del Ebro. Se han estudiado tres tipos de litologías distintas (areniscas, wackes y lutitas) con distintas características texturales. Se ha comparado el valor de durabilidad obtenido en el ensayo Slake Durability Test (SDT) para muestras intactas y después de haber sido sometidas a un proceso de envejecimiento en condiciones de humedad-secado y hielo-deshielo. El análisis de los resultados obtenidos muestra que la durabilidad está controlada por un conjunto de parámetros, entre los que destacan la relación esqueleto granular, matriz y cemento. Entre las muestras ensayadas, las que contienen texturas homogéneas de grano grueso son las más durables. Las muestras sometidas a envejecimiento en laboratorio, y especialmente, las sometidas a ciclos de hielo-deshielo permiten discriminar el comportamiento a largo plazo en las muestras de durabilidad media en muestra intacta.

Palabras clave: durabilidad, rocas blandas, petrografía, mineralogía, Slake Durability Test

1. INTRODUCCIÓN

Los taludes excavados en rocas blandas muestran a menudo mecanismos de degradación y caídas locales que afectan tanto a la seguridad como a los costes de mantenimiento de carreteras y otras obras lineales. Sin embargo, este comportamiento no se puede generalizar. Así, algunos taludes se mantienen prácticamente intactos durante años, mientras que otros se degradan muy rápidamente. Los procesos de degradación ocurren tanto en formaciones sedimentarias marinas como continentales, que involucran una variedad de litologías y texturas que no se refleja en los términos simples de uso habitual para su denominación (arcillitas, limolitas, lutitas o margas). Las investigaciones previas muestran que la relación entre las propiedades de los materiales y su comportamiento en taludes a largo plazo, no es evidente (Martínez-Bofill et al. 2004).

Varios autores han investigado las relaciones entre las características petrográficas de las rocas, y su durabilidad. Estas investigaciones han abarcado tanto extensos estudios regionales, con una gran variedad de tipos de rocas, texturas e incluso condiciones estructurales (Santi, P.M. & Higgins, J.D., 1998; Santi, P.M. 2003, Dick & Shakoor, 1992, 1995), y problemas geotécnicos específicos (Russell, D.J. 1982; Moon, V. & Beattie, A. G. 1995; Dhakal, G et al., 2002; Gökçeoğlu, C. et al., 2000; Sadisun et al, 2005). A pesar de que estos estudios han aportado información valiosa, aún no se ha establecido una relación entre la petrología y la durabilidad.

En este artículo, discutiremos sobre la influencia de la textura en la durabilidad a medio plazo de las rocas blandas y arcillosas, y su posible influencia en el comportamiento de los taludes.

2. METODOLOGÍA

Se han seleccionado un total de 45 taludes con el objetivo de analizar el comportamiento a medio plazo de los taludes y su relación con las características litológicas y texturales de las rocas blandas. Las muestras han sido obtenidas de distintos taludes de la Depresión Central Catalana, que constituye el extremo oriental de la Cuenca del Ebro. Esta área tiene un clima de transición mediterráneo-continental, que muestra un elevado contraste térmico entre inviernos fríos y con niebla, con elevada humedad y días de helada, y veranos calientes y secos, con temperaturas que a menudo superan los 30° C. Geológicamente, la cuenca del Ebro es la cuenca de antepaís meridional de la Cordillera de los Pirineos. Ésta ha sido rellenada tanto con sedimentos marinos como continentales. Las muestras de las formaciones geológicas seleccionadas han permanecido básicamente sin deformar y tan solo han sido afectadas por diagénesis de enterramiento.

La selección de taludes se ha realizado teniendo en cuenta los siguientes factores: (i) presencia de depósitos arcillosos; (ii) presencia de formaciones marinas y continentales; (iii) variedad litológica que incluye limolitas, arcillitas y margas, para evaluar la influencia de la mineralogía y la textura; (iv) ausencia o bajo grado de deformación estructural de los materiales que, de otra forma, podrían introducir un elemento adicional de dispersión, en la evaluación de la durabilidad de los materiales.

La hipótesis de trabajo es que la degradación de los taludes depende tanto de la litología (mineralogía y grado de cementación), y características texturales como de las condiciones ambientales del área. Los niveles de rocas blandas han sido sistemáticamente muestreados con una máquina perforadora portátil. Las muestras obtenidas se han identificado y posteriormente ensayado con el Slake Durability Test (SDT) según el procedimiento descrito por Franklin & Chandra (1972). Los resultados se dan utilizando el Índice Sehudes (Id_2), que corresponde a la relación entre el peso final e inicial de la muestra, expresado como porcentaje, después de dos ciclos de desgaste SDT. En cualquier caso, en este estudio, se han llevado a cabo un total de cinco ciclos SDT en cada muestra, obteniendo el Índice de Durabilidad Id_5 .

De cada talud se han ensayado tres grupos de muestras. Un grupo ha sido ensayado sin tratamiento previo. Para simular los cambios de humedad en los taludes, se ha ensayado un segundo grupo de muestras después de someterlas a un proceso de envejecimiento de 15 ciclos de humedad-secado de 24 horas de duración (muestras H-S). Cada ciclo consiste en introducir las muestras en una estufa a 105°C por un periodo de 12 horas y después introducir las muestras en una cámara húmeda a una temperatura de 22°C durante el mismo lapso de tiempo. Finalmente, un tercer grupo de muestras se ha sometido a un proceso de envejecimiento de 15 ciclos de hielo-deshielo (ASTM, 1997) de 24 horas de duración, antes de ensayarlas en el SDT (en adelante, muestras H-D). Las muestras se sumergen previamente en una solución de alcohol isopropil al 0,5% antes de colocarlas en un congelador a una temperatura de -18°C durante 12 horas, y posteriormente colocarlas en una cámara húmeda a 22° durante el mismo tiempo. Se han utilizado testigos cilíndricos de 30 mm de diámetro, y 30 mm de altura, para poder comparar visualmente la evolución durante el proceso de envejecimiento, y después de ensayarlas con el SDT. Las muestras que muestran un bajo grado de durabilidad han sido también caracterizadas en el laboratorio de mecánica de suelos (límites de Atterberg, granulometría, ensayos de expansividad...)

Al mismo tiempo, se han estudiado las características mineralógicas y texturales de las muestras, llevándose a cabo un análisis modal de los componentes de las rocas en microscopio petrográfico de polarización. Para ellos se han contabilizado entre 1000 y 2000 puntos por preparación, dependiendo de la distribución granulométrica y la homogeneidad de la muestra. El objetivo del análisis microscópico era clasificar correctamente cada tipo de roca, así como describir las características texturales que se pudieran relacionar a la durabilidad de las muestras.

3. TIPOS TEXTURALES

Las características texturales están estrechamente relacionadas a la granulometría o distribución de tamaño de grano. Las muestras han sido analizadas y separadas en distintos grupos texturales, con el objetivo de compararlas entre sí. Los análisis petrográficos de las muestras estudiadas de margas y limolitas muestran que se deben clasificar como wackestones.

Se han identificado dos tipos principales de textura, los cuales a su vez se dividen en ocho tipologías secundarias (figura 1). Estas categorías texturales se describen a continuación:

Textura Principal	Textura Secundaria	
Homogénea	Arenosa	
	Wacky	Cementada
		Fangosa (limo-arcillosa)
	Limo-arcillosa	Cementada
No cementada		
Heterogénea	Arenosa	
	Wacky	
	Fangosa (limo-arcillosa)	

Figure 1: Clasificación textural de las muestras investigadas

La homogeneidad de la muestra es la principal característica textural que se puede identificar, ya sea mediante observación en microscopio, o incluso con una simple observación a trasluz de la lámina delgada. Las muestras pueden ser homogéneas o bien heterogéneas.

Las texturas homogéneas se caracterizan por su aspecto uniforme, con una distribución regular de granulometría y de matriz. Las muestras homogéneas no presentan signos remarcables de alteración o perturbación de su estructura interna.

Por otro lado, las texturas heterogéneas muestran una mezcla irregular de distintos tipos texturales y de distribución de tamaño de grano.

Para precisar las características secundarias se requiere una observación detallada y la realización de contajes modales en microscopio de polarización.

La característica más distintiva para clasificar las texturas homogéneas es la distribución granulométrica, que puede ser gruesa (arenosa) o fina (fangosa o limosa-arcillosa), o bien con presencia de matriz fina entre granos gruesos (wacky). La fracción de tamaño fino puede estar cementada, formada por micrita y granos de calcita esparítica, o compactada pero no cementada, compuesta por partículas de tamaño limo y arcilla sin cemento carbonatado. Así pues, las texturas homogéneas se dividen en las siguientes texturas secundarias, de acuerdo con la naturaleza de sus componentes principales:

- **Textura homogénea arenosa:** en este tipo, la fracción granular de tamaño arena predomina claramente, y constituye al menos el 75% de la muestra. La roca tiene una textura grano-soportada.
- **Textura homogénea wacky:** corresponde a una muestra con un importante contenido de fracción granular terrígena de tamaño arena, acompañada de una matriz de grano muy

fino. Puede ser grano-soportada o matriz-soportada. Tal y como se discutirá posteriormente, la cantidad y tipo de matriz es fundamental para explicar la durabilidad de las muestras. Esta matriz puede estar formada por limo, arcilla, cemento carbonatado (figura 2) con micrita o esparita, o bien una mezcla de todo, que acostumbra a ser lo más común.

- **Textura homogénea fangosa o limo-arcillosa:** en este grupo, la matriz domina sobre el contenido en granos detríticos (figura 3), presentando un contenido inferior al 25% en partículas de tamaño arena. La matriz puede ser cementada, o limosa o arcillosa. Otras características adicionales puede ser un bandeo composicional o la presencia de granos opacos (minerales metálicos).

Las texturas heterogéneas se caracterizan por una mezcla irregular de distintos tipos texturales y de tamaños de grano. A pesar de ello, es posible distinguir entre algunas tipologías predominantes:

- **Textura heterogénea arenosa:** muestra un contenido alto en granos detríticos, distribuidos de forma irregular y mezclados con una matriz de grano fino, que en algunas zonas puede predominar. Puede presentar nódulos blandos arcillosos dispersos. (Figura 4).
- **Textura heterogénea wacky:** está representada por una fracción detrítica de tamaño arena, inmersa dentro de una matriz de grano fino, mezclada a su vez con zonas arcillosas y limosas.
- **Textura heterogénea fangosa o limo-arcillosa:** los materiales de tamaño fino predominan sobre sectores arenas de distribución irregular, ocasionalmente aislados. (Figura 5)

Algunas características especiales que pueden ser observadas tanto en texturas heterogéneas arenosas y arcillosas, se describen a continuación:

- **Textura heterogénea bioturbada:** la textura original ha sido afectada por procesos de bioturbación causados por trazas de organismos fósiles (gusanos), denominados comúnmente como burrows. Las trazas fósiles rompen la textura original del sedimento, mezclando zonas arenosas y arcillosas. A pesar de que la presencia de bioturbación podría suponerse como una característica muy localizada, ésta es muy común y ha sido frecuentemente observada en sedimentos de tipo continental. Una textura bioturbada puede ser tanto predominante arenosa, como predominantemente fangosa.
- **Textura caótica:** en este caso, no es posible definir cual es la textura o granulometría dominante. La muestra presenta un gran desorden interno.

Otras características interesantes a considerar son la presencia de opacos (minerales metálicos, principalmente pirita), yeso o anhidrita, nódulos blandos arcillosos, discontinuidades en la roca, como filones, fracturas juntas (continuidad, apertura, orientación, morfología, relleno...)

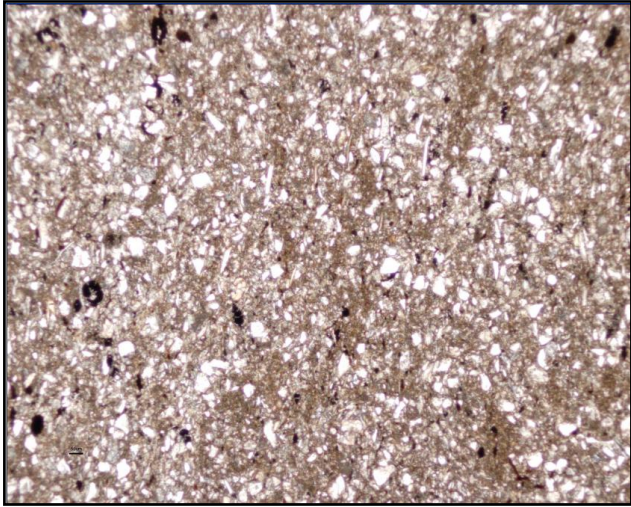


Figura 2 (izquierda): Texturas homogéneas: textura homogénea waxy cementada, formada por un esquelet granular de cuarzo de tamaño arena con matriz arcillosa carbonatada.

Figura 3 (derecha): Texturas homogéneas: textura homogénea fangosa (arcillosa).

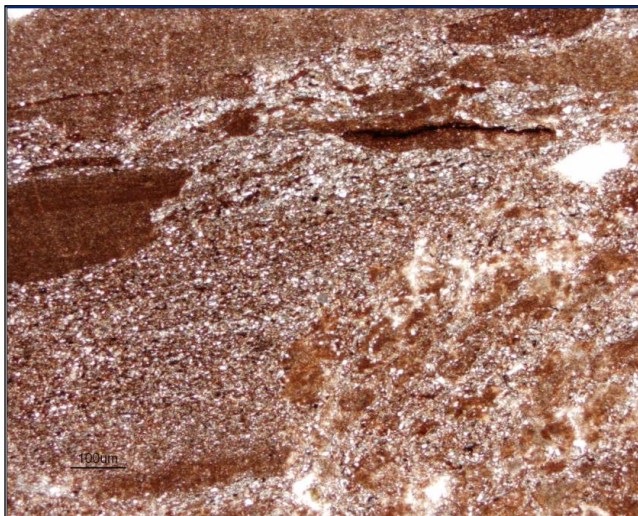


Figura 4 (izquierda): Texturas heterogéneas: textura heterogénea predominantemente arenosa.

Figura 5 (derecha): Texturas heterogéneas: textura heterogénea predominantemente fangosa.

4. RESULTADOS

Se han contrastado los valores de durabilidad en SDT respecto las características texturales de las muestras, obteniendo los siguientes resultados (figura 6):

- Muestras de alta durabilidad: Las muestras de alta durabilidad se definen como aquellas con un valor de SDT Id5 superior a 90. La mayor parte de las muestras de alta durabilidad tienen una textura homogénea arenosa o una textura wacky (84,6 % de las muestras). Tanto las texturas homogéneas como las heterogéneas pueden tener una elevada durabilidad. Estas muestras corresponden a wackstones, con un elevado contenido en fracción granular tamaño arena, y normalmente, una textura grano-soportada y matriz carbonatada.
- Muestras de durabilidad media: Las muestras de durabilidad media son aquellas con valores de SDT Id5 que se encuentren entre 60 y 90 para muestras intactas. En este caso, las características texturales tienen una notable influencia en la durabilidad. Estos valores de SDT se encuentran en muestras de textura homogénea arcillosa cementada, y para las muestras de textura heterogénea wacky. Este segundo grupo de muestras se clasifican como wackstones, y tienen una composición similar a las muestras heterogéneas de alta durabilidad. De esta forma, encontramos dos rocas diferentes (lutitas y wackstones) con texturas distintas que muestran una durabilidad similar. De estos resultados se puede concluir que en las wackstones, el efecto de la textura permite un mayor rango de valores de durabilidad, que oscilan entre los valores de muy alta a media durabilidad, mientras que los resultados obtenidos para el mismo tipo de roca con textura homogénea, tiene un rango que oscila entre muy alta y alta.
- Muestras de durabilidad baja y muy baja: Las muestras de durabilidad baja són aquellas con valores de SDT Id5 menores de 60. En esta categoría se han identificado 9 muestras, 2 de ellas con una textura homogénea pura fangosa, y 7 de textura fangosa heterogénea. Estas muestras se clasifican como lutitas (mudstones) y wackstones, con bajo contenido en fracción granular, y textura matriz soportada.

Si analizamos la variación de contenido terrígeno respecto la durabilidad, se puede concluir que un menor contenido en arena se relaciona a una menor durabilidad, tanto para texturas homogéneas como heterogéneas. Algunos tipos de rocas (wackstones) con un rango composicional muy amplio también muestran un amplio rango de valores de durabilidad. Se interpreta que las texturas heterogéneas permiten una mayor degradación de la roca en comparación con las texturas homogéneas.

Textura Principal	Textura Secundaria	SDT Int. Id5	SDT H-S Id5	SDT H-D Id5	
Homogénea	Arenosa	>90	>90	>70	
	Wacky	Carbonatada Cementada	100-89	97-72	97-67
		Fangosa	94-75	60-0	88-60
	Fangosa	Carbonatada Cementada	94-79	93-68	0
		Pura	74-28	52-47	13-0
Heterogénea	Wacky cementada	93	75	0	
	Wacky	92-62	80-20	0	
	Fangosa	53-0	49-0	0	

Figura 6: Comparación entre las texturas observadas y el valor de SDT obtenidos en laboratorio, sobre muestras intactas, y después de someterlas a procesos de envejecimiento en sendos procesos de H-D y H-S.

El efecto de los ensayos de envejecimiento en la durabilidad de las rocas:

El análisis de la durabilidad de las muestras después de ser sujetas a procesos de envejecimiento en condiciones de hielo-deshielo (H-D) y humedad-secado (H-S) sugieren 4 comportamientos diferenciados que se describen a continuación:

- El primer grupo corresponde a muestras con altos a muy altos valores de durabilidad que, después de ser sometidas al proceso de envejecimiento H-D, mantienen altos valores de durabilidad. Estas muestras corresponden a texturas homogéneas arenosas y homogéneas wacky cementadas.
- El segundo grupo corresponde a muestras que presentan un valor alto de durabilidad en condiciones intactas, y después de ser sometidas a ciclos de envejecimiento H-D muestran una notable reducción de durabilidad. Principalmente corresponden a muestras de textura heterogénea, arenosa y wacky.
- El tercer grupo está representado por muestras con valores de media a alta durabilidad para muestra intacta, las cuales, después de ser sometidas al envejecimiento H-D se desmoronan completamente. Estas muestras corresponden tanto a texturas homogéneas fangosas cementadas con carbonato, como a texturas heterogéneas wacky.
- El cuarto grupo corresponde a aquellas muestras con valores de baja durabilidad cuando están intactas. Estas muestras tienen, obviamente, bajos valores de durabilidad después de ser sometidas a procesos de envejecimiento. Este comportamiento corresponde a texturas homogéneas fangosas sin cementar, y a texturas heterogéneas predominantemente fangosas.

No se observan cambios significativos después de someter las muestras a ciclos de envejecimiento en humedad-secado (H-S).

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- No se encuentra un parámetro único que controle la durabilidad de las rocas. A pesar de ello, en este trabajo se muestra que la durabilidad está fuertemente influenciada tanto por la composición como por las características texturales de las rocas blandas.
- Las texturas homogéneas arenosas o granulares son más durables que sus equivalentes de textura heterogénea. Se interpreta, como primera aproximación, que las texturas heterogéneas crean canales a través de los cuales los agentes responsables de la meteorización pueden penetrar dentro de la roca. También permiten la existencia de puntos débiles en el contacto entre las distintas texturas. Una textura heterogénea permite a su vez, reducir la efectividad del cemento.
- Los mayores valores de durabilidad se encuentran en texturas homogéneas arenosas y wacky (Id_5 en muestra intacta >90). Los valores altos de durabilidad (Id_5 en muestra intacta entre 80 y 90) se asocian tanto a texturas homogéneas y heterogéneas predominantemente arenosas. Los menores valores de durabilidad se encuentran en materiales fangosos sin cementar (Id_5 en muestra intacta normalmente <50). En este caso, la textura no es un factor crítico ya que tanto las texturas homogéneas como heterogéneas muestran valores muy bajos de durabilidad.
- Los valores de durabilidad media en SDT se asocian tanto a texturas homogéneas como a heterogéneas, con contenidos variables en fracción fina y cemento. Las rocas fangosas cementadas muestran valores de SDT medios a altos (Id_5 en muestra intacta entre 70 y 80). Normalmente, en el campo, estos materiales se clasifican como margas, lutitas, arcillitas... Sin embargo, los análisis petrográficos muestran que corresponden a lutitas (mudstones) y wackestones.
- La presencia de matriz fina tiene un papel importante en la durabilidad a largo plazo, especialmente si consideramos cambios de temperatura diarios o estacionales. Cuando se someten las muestras a envejecimiento en ciclos de hielo-deshielo, la durabilidad de las muestras de textura homogénea granular es notablemente más alta (Id_5 H-D >70) que las de textura heterogénea (Id_5 H-D <50).
- Cuando los materiales de durabilidad media se someten a ciclos de envejecimiento en hielo-deshielo, la respuesta es heterogénea. Algunas muestras presentan valores bajos de SDT mientras que otras pueden desmoronarse completamente. Éstas últimas corresponden a texturas con un porcentaje elevado en matriz fangosa.
- Por tanto, se concluye que el análisis textural puede ayudar en la predicción a largo plazo de la durabilidad de los taludes en rocas blandas. Para ello se considera necesario la observación microscópica de las muestras, para clasificar correctamente cada tipo de roca y definir sus características texturales. El trabajo de campo y las descripciones de muestras de mano, a pesar de contar con información litográfica y cartográfica, parece no ser suficiente para caracterizar correctamente la textura de las muestras.

REFERENCIAS

- ASTM., 1997. Standard test method for evaluation of durability of rock for erosion control under freezing and thawing conditions. Designation D 5312 –92 (Reapproved 1997). pp. 190-192
- Dhakal, G et al., 2002. Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks. *Engineering Geology*. 65: 31-45
- Dick, J.; Shakoor, A., 1992. Lithological controls of mudrock durability. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 25: 31-46
- Dick, J.; Shakoor, A., 1995. Characterizing durability of mudrocks for slope stability purposes. A: Haneberg, W.C.; Anderson, S.A. (Editors). *Clay and Shale Slope Instability*. Boulder, Colorado, Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology. v. X: 121-130
- Franklin, JA & Chandra, A., 1972. The slake durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 9, pp. 325-341.
- Gökçeoğlu, C.; Ulusay, R.; Sönmez, H., 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. *Engineering Geology*. 57: 215-237
- Martinez-Bofill, J, Corominas, J, Soler, A., 2004. Behaviour of the weak rock cutslopes and their characterization using the results of the Slake Durability Test. In: *Lecture Notes in Earth Sciences*. 104. *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe*. pp. 405-413
- Moon, V. G.; Beattie, A. G., 1995. Textural and microstructural influences on the durability of Waikato Coal Measures mudrocks. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 28: 303-312
- Russell, D.J. (1982) Controls on shale durability: the response of two Ordovician shales in the slake durability test. *Canadian Geotechnical Journal*. 19: 1-13
- Sadisun, A. et al., 2005 Study on the physical disintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test. *Geotechnical and Geological Engineering*. 23: 199-218
- Santi, P.M.; Higgins, J.D., 1998. Methods for predicting shale durability in the field. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ. vol. 21 n° 3: 195-202
- Santi, P.M., 2003. Field methods for characterizing weak rock for engineering. *Environmental & Engineering Geoscience*. vol. XII, n° 1: 1-11