

VALIDACION DEL METODO DE DAVIS PARA EL ANALISIS DE LA DIACLASACION DE MACIZOS ROCOSOS (1)

M. GUTIERREZ CLAVEROL (*)

M. GONZALEZ BUELGA (*)

L. RODRIGUEZ BOUZO (**)

RESUMEN. El inventario de la diaclasación en diversas unidades litoestratigráficas del Paleozoico de la Cordillera Cantábrica, mediante la medición de las fracturas incluidas en un círculo de referencia, y la obtención de un índice de densidad de fracturación, según la metodología propuesta por George H. Davis (1984), justifica el interés de esta técnica con vistas a caracterizar geotécnicamente los macizos rocosos.

Los datos obtenidos sobre el terreno son procesados mediante un programa informático, obteniéndose diagramas en rosa, orientativos del abaco de direcciones de las diaclasas, y diagramas de densidad de los polos, mediante proyección estereográfica, complementarios de los anteriores.

ABSTRACT. *The description of joint systems in different lithostratigraphic units of the Paleozoic of the Cantabrian Mountains through measurement of fractures included in a reference circle and computation of a fracturation density index following the method of George H. Davis (1984), show the interest of this technique for the geotechnical characterization of rock masses.*

The measured data are processed in a computer and rose diagrams obtained which describe the range in joint direction as well as complementary pole density diagrams with stereographic projection.

INTRODUCCION

La diaclasación es una de las estructuras geológicas condicionantes de alguno de los parámetros utilizados en las clasificaciones geomecánicas (Wickham *et al.*, 1972; Bieniawski, 1973, 1976 y 1979; Barton *et al.*, 1974; Louis, 1974, entre otras). En todas ellas intervienen fundamentalmente tres tipos de parámetros: resistencia de la roca matriz, disposición (entre sí y con respecto al eje de la obra) y condiciones de las discontinuidades (espaciado, continuidad, rugosidad, apertura, relleno, meteorización) y, por último, la presencia de agua. De la adecuada elección del método de valoración de estos parámetros dependerá, en gran medida, la fiabilidad de cada clasificación.

Uno de los problemas que se suscitan en el estudio de las discontinuidades estructurales que afectan a un macizo rocoso es el de disponer de un método de medida

que haga representativo el muestreo, ya que ninguna de las clasificaciones geomecánicas establece una norma de actuación al respecto. En este trabajo se propone un sistema de toma de datos que evita el subjetivismo y favorece la unidad de criterio.

Habitualmente, el estudio de la diaclasación de un área concreta se realiza sobre un número indeterminado de diaclasas escogidas aleatoriamente a lo largo de un afloramiento. Este «método de selección» utilizado para la toma de los datos tiene, en la mayoría de los casos, un escaso valor estadístico y adolece incluso del rigor científico más elemental.

Numerosos autores se han ocupado de este tema proponiendo diferentes soluciones, estableciendo determinados criterios de selección que no siempre son fiables. Así, mientras algunos sólo miden las diaclasas que son rectas y continuas (Parker, 1942; Hodgson, 1961), otros consideran exclusivamente las agrupadas en conjuntos de tres o más unidades, despreciando el resto (Rehrig y Heidrick, 1972 y 1976). En las publicaciones de Geología Estructural de mayor divulgación, al referirse a la diaclasación, se elude esta problemática (Price, 1966; Billings, 1972; Ragan, 1980; Hobbs *et al.*, 1981; Suppe, 1985; Ramsay y Huber, 1987; Mikhailov, 1987; Nicolas, 1987; McClay, 1987; Price y Cosgrove, 1990; Hatcher, 1990, entre otros), orientándose hacia

(1) Este trabajo ha sido realizado en el ámbito del proyecto DP-89/2777, subvencionado por la Universidad de Oviedo.

(*) Dpto. de Geología. Universidad de Oviedo.

(**) Dpto. de Exploración y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo.

consideraciones sobre morfología, tipología, génesis o el análisis dinámico.

Este trabajo surge como consecuencia de la experiencia adquirida en el estudio de la diaclasación que se está realizando con el objeto de caracterizar geotécnicamente materiales paleozoicos de la Cordillera Cantábrica, en la región comprendida entre el puerto de Pajares y la localidad de Villamanín (N de León), donde se ha aplicado con profusión el método que se recomienda.

METODOLOGIA UTILIZADA

Se describe, primeramente, el método de medida de la diaclasación y, en segundo lugar, el tratamiento informático de los datos obtenidos.

METODO DEL CIRCULO INVENTARIO

Con objeto de solventar la problemática aludida en el capítulo anterior, Davis (1984) propone una técnica de medida que palió los errores inherentes a lo que se denomina «método de selección». Sugiere medir todas las diaclasas, independientemente de su tamaño u otras características, que se encuentren dentro de un círculo de radio establecido (método del círculo inventario o «circle-inventory method»).

El círculo se dibuja, con una simple tiza y un cordel, sobre la superficie de afloramiento de la estación de medida elegida que deberá permitir realizar medidas en dos o tres superficies aproximadamente ortogonales entre sí.

Es importante la elección adecuada de la longitud del radio del círculo, pues si éste es demasiado grande y la densidad de diaclasación muy elevada, se puede alargar en exceso el tiempo de trabajo. En este sentido, es de gran interés el hecho, ya observado a mediados de siglo por los autores rusos Bogdanov y Novikova (1947) y Kirillova (1949) y confirmado, posteriormente, por otros muchos (especialmente por Harris *et al.*, 1960; Sowers, 1973 y Ladeira *et al.*, 1981), de que, para una litología dada, la concentración de diaclasas está inversamente relacionada con el espesor de los estratos. El propio Davis (*op. cit.*), basándose en ello, estima razonable elegir un radio de longitud igual a la potencia de la estratificación, excepto cuando ésta sea masiva o muy gruesa. De todas formas, el establecer el radio óptimo no es sencillo, ya que no sólo influye el parámetro anterior, sino también el grado de deformación del macizo, concentrándose, para un área determinada, un mayor número de fracturas en las zonas con mayor grado de curvatura (Harris *et al.*, 1960). Normalmente, el radio del círculo es inferior a 1,5 metros.

Una vez dibujado el círculo, se mide la dirección, el buzamiento y la longitud de todas las diaclasas inscritas en él. Se recomienda seguir un cierto orden en la medición, considerando primero las diaclasas pertenecientes a una misma familia, que se señalarán con tizas de un color, y una vez agotadas se repite el proceso con las de otra familia, que se marcarán con distinto color, y así sucesivamente. Además de los datos anteriores se anota-

tan otros complementarios (apertura, relleno, rugosidad y espaciado de la diaclasación), necesarios para las clasificaciones geomecánicas.

Cuando se dispone de todos los datos de una estación, se cuantifica la densidad de las fracturas utilizando la siguiente relación: $\rho_d = L/\pi r^2$, donde ρ_d representa la densidad de diaclasación, L la longitud acumulada de todas las diaclasas y r el radio del círculo inventario.

Habitualmente, la longitud de las diaclasas se mide en cm y consecuentemente, al ser la densidad de diaclasación un cociente longitud/área, el índice de densidad se expresa en cm/cm² (cm⁻¹).

Si se hace un estudio sistemático y detallado sobre la fracturación de un macizo rocoso, puede ser de interés preparar mapas de isóneas representativas del índice de densidad de la diaclasación en una zona determinada (Wheeler y Dickson, 1980), que normalmente muestran una relación estrecha con la distribución de las fallas regionales.

TRATAMIENTO INFORMÁTICO DE LOS DATOS

Para procesar estadísticamente los datos de diaclasación es recomendable utilizar algún programa informático. En este trabajo se recurrió al denominado «Stereonet», versión 3.66 (Allmendinger, 1988) siendo procesado en un ordenador Macintosh. Para ordenadores compatibles existen en el mercado, por ejemplo, los programas «Stereo», desarrollado por McEachran, y el «Fracture Analysis System», de Gardner, comercializados por Rock Ware, Inc. de Colorado (USA).

Se introducen, en primer lugar, los valores de dirección (una vez corregida la declinación magnética) y buzamiento de las distintas superficies de diaclasas. Esta información puede cargarse de diferentes maneras (azimut-buzamiento-dirección de buzamiento, cuadrante-buzamiento-dirección de buzamiento, buzamiento-azimut del buzamiento, etc.), a elección del usuario.

De todo el menú que exhibe el programa, se eligieron dos tipos de representación: el diagrama en rosa y el diagrama de densidad.

El **diagrama en rosa** es muy apropiado para visualizar la distribución de frecuencias de las direcciones de una población de planos de diaclasación. Los intervalos de los pétalos se establecen con incrementos de 10° y la longitud de los mismos se calcula en relación al tamaño del radio del círculo, que se expresa en porcentaje del número de fracturas. El dibujo resultante no es simétrico pues la representación de las diaclasas se efectúa en función de la dirección del buzamiento de las mismas.

En el **diagrama de densidad** se representa la concentración de los polos de las diaclasas. Se escogió la proyección estereográfica equiareal, basada en la red de Schmidt, pues al conservar las áreas resulta más adecuada en el tratamiento estadístico. La proyección se efectuó sobre el hemisferio interior, obteniéndose nubes de puntos que son sustituidas por áreas de igual densidad de puntos por unidad de superficie, quedando limi-

tadas unas de otras por contornos de densidad, según el método tradicional (Billings, 1972; Phillips, 1975; Ragan, 1980; Ramsay y Huber, 1987).

En el diagrama de densidad se utilizó el método de 1 % del área, por ser el más clásico y extendido, donde una determinada área de las curvas de densidad significa que el correspondiente porcentaje de todos los puntos que muestra el diagrama se sitúan en un área equivalente al 1 % del área total. Así, por ejemplo, si se trata de un intervalo del 10-12 %, un círculo que cubre un área igual al 1 % del círculo grande contendría un 10-12 % de los polos. El intervalo de contorno (I. C.) se puede elegir voluntariamente.

En el diagrama se observan máximos de concentración de puntos característicos de los haces de diaclasas subparalelas, definitorios de las distintas familias existentes, pudiendo medirse sobre estos máximos la dirección y buzamiento medios. Para visualizar la relación entre las orientaciones de las diaclasas y la estratificación, es recomendable proyectar también, de forma polar y cíclográfica, el valor medio de la estratificación.

En algunos casos, al objeto de facilitar la observación de su distribución, se representaron sobre los diagramas de densidad los polos de las diaclasas.

CASO PRACTICO DE ESTUDIO ESTADISTICO DE LA DIACLASACION

Se seleccionó un afloramiento de calizas y dolomías de edad Cámbrica, en la localidad de Camplongo (León). Primeramente se realizaron 138 medidas de diaclasas escogidas al azar (apéndice I) y distribuidas a lo largo de los 93 m del afloramiento. En segundo lugar, se eligió una zona representativa del afloramiento y en ella se midieron un total de 140 diaclasas (apéndice II), comprendidas en dos círculos A y B (de 42 y 25 cm de radio), aproximadamente perpendiculares entre sí.

Al comparar los dos métodos se observa que los valores obtenidos con las medidas realizadas al azar (figura 1a) presentan un rango de dispersión más amplio que los hallados mediante el método de Davis (figura 1b); por ello, utilizando este último, resultará más fácil y preciso establecer las distintas familias de diaclasas.

A pesar de las considerables diferencias existentes entre los valores que aportan ambos métodos, al ser agrupados los datos para obtener las familias de diaclasas se comprueba (figuras 2a, 2b, 3a y 3b) cómo estas desigualdades no son tan marcadas, ya que en ambos casos se obtienen familias muy similares (tabla I), aunque su abundancia (%) no es la misma en cada caso. También es necesario destacar que al emplear el método de Davis aparece una nueva familia (271/42°).

En los porcentajes obtenidos para cada una de las familias, con ambos métodos, se aprecian notables diferencias. Mientras que según el método de Davis la familia 0/0° es la más abundante (35 %), en las diaclasas medidas al azar pasa a ser la segunda en abundancia (15 %). Con el resto de las familias ocurre algo similar; así la primera (24 %) en las medidas al azar, ocupa un cuarto lugar (11 %) cuando se aplica el método de Davis.

Este tipo de diferencias también se observan al comparar los resultados obtenidos en cada uno de los círculos. En el círculo B, perpendicular a la estratificación, se midieron 22 diaclasas que resultaron ser todas ellas pertenecientes a una misma familia de disposición aproximadamente horizontal (figura 4b). En el círculo A, paralelo a la estratificación, sobre un total de 118 medidas, se establecieron cuatro familias, resultando ser la subhorizontal la tercera en abundancia (23 %) (figura 4a y tabla II). Al agrupar las medidas realizadas sobre ambos círculos A + B se producen cambios considerables en las proporciones de las distintas familias, la

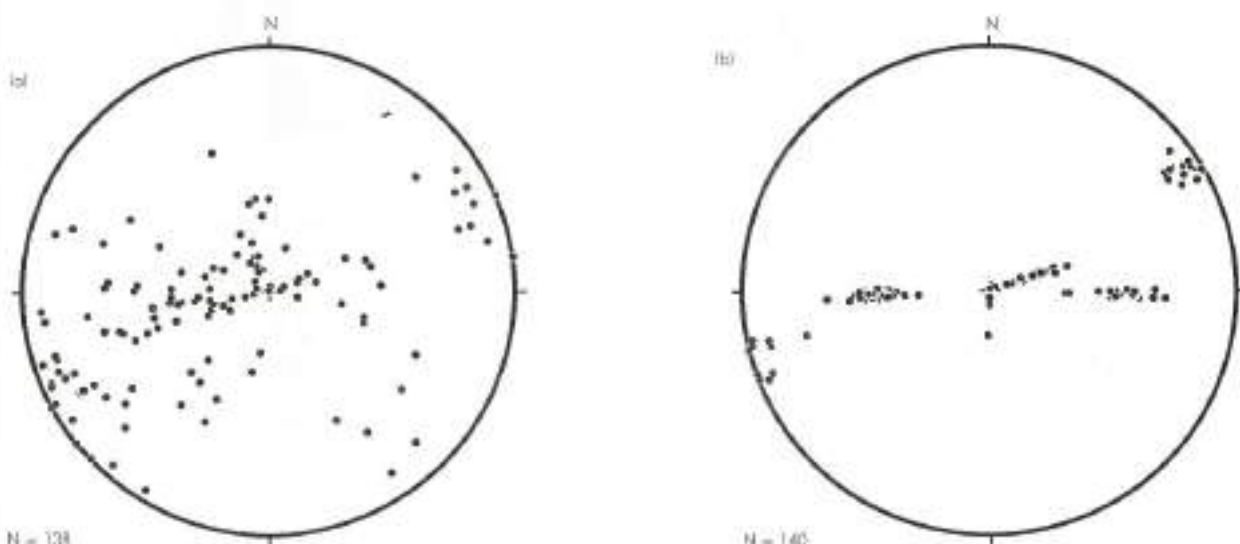


FIGURA 1. Representación polar de las diaclasas (a) medidas al azar y (b) según el método de Davis (círculos A + B). N = número de diaclasas.

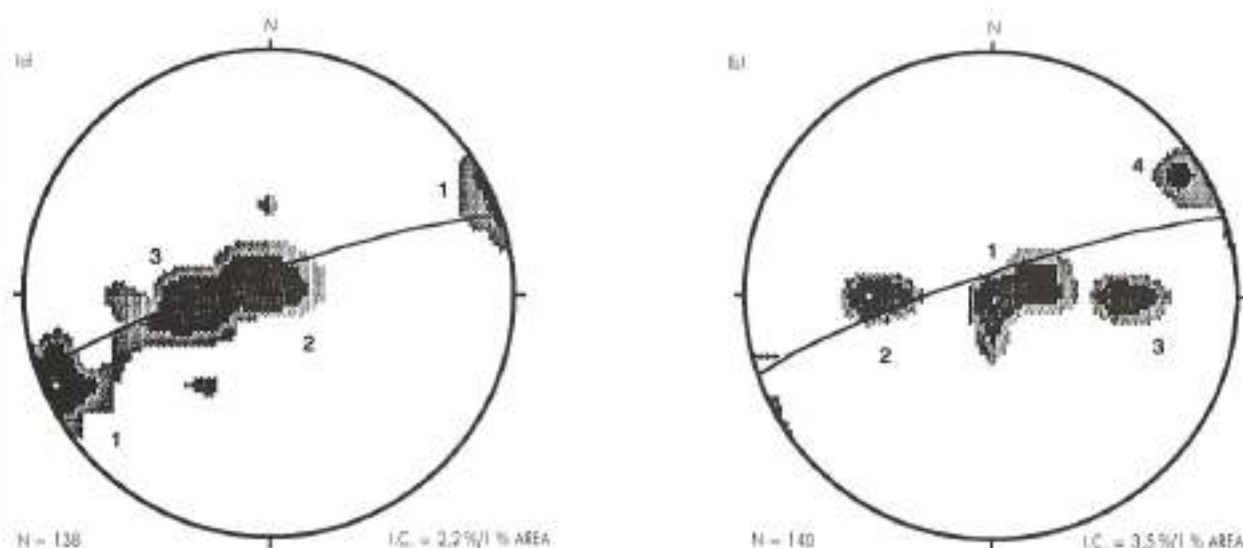


FIGURA 2. Diagrama de densidad de las diaclasas medidas (a) al azar y (b) según el método de Davis (círculos A + B). N = número de diaclasas representadas en el diagrama; I.C. = intervalo de contorno.

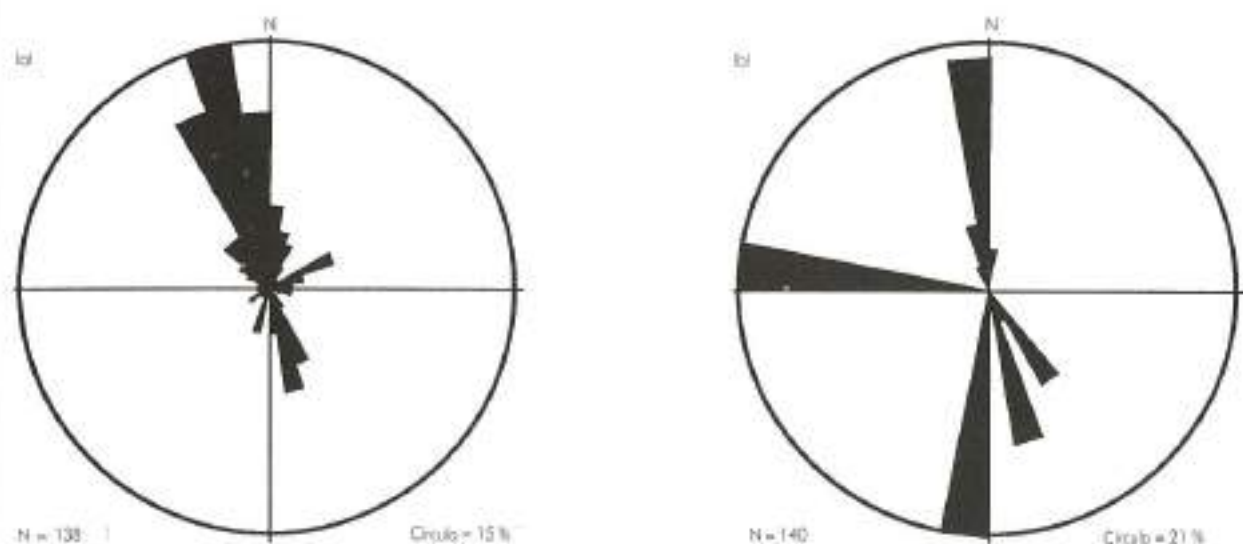


FIGURA 3. Diagrama en rosa de las diaclasas medidas (a) al azar y (b) según el método de Davis (círculos A + B). El pétalo con intervalo 270/280 representa diaclasas subhorizontales.

subhorizontal pasa a ser dominante (35 %) (tabla I). Esto justifica la necesidad de realizar, al menos, dos círculos sobre planos aproximadamente ortogonales.

Como por principio de operación el método de Davis obliga a medir todas las diaclasas de un área concreta, se obtendrán todas las familias existentes y su abundancia real, ello explica el que pueda aparecer un mayor número de familias. Por el contrario, cuando las diaclasas han sido medidas al azar es probable que algunas pasen desapercibidas o no queden reflejadas en la proporción correcta, ya que este método está muy condicionado tanto por factores subjetivos del operador, como

por factores propios del afloramiento (facilidad de trabajo, disposición relativa de las discontinuidades y características de las mismas).

Además de las consideraciones precedentes, la medida de la diaclasación, según el método de Davis, supone una ventaja adicional ya que permite determinar un índice (ρ_d) que pondera la densidad de fracturación del macizo (tabla II).

CONCLUSIONES

— El método de Davis, comparado con el método de medida de diaclasas al azar, no sólo proporciona más

CIRCULO DE DAVIS (A + B)				MEDIDAS AL AZAR		
FAMILIA	ORIENTACION	%	ESTRAT.	FAMILIA	ORIENTACION	%
1	0/0°	35	341/83°	1	66/84°	17
2	89/41°	23		1	246/90°	7
3	271/42°	21		2	0/0°	15
4	237/79°	11		3	83/26°	14

TABLA I.

CIRCULO DE DAVIS (A)				CIRCULO DE DAVIS (B)			
FAM.	ORIENTACION	%	ρ_d	FAM.	ORIENTACION	%	ρ_d
1	89/41°	27	0,593 cm ⁻¹	1	0/0°	100	0,230 cm ⁻¹
2	271/42°	25					
3	255/13°	23					
4	237/79°	13					

TABLA II.

242/80	62/90	257/80	159/7	161/17	0/0
62/75	47/90	252/70	69/81	85/82	99/4
74/8	77/40	62/75	37/68	76/59	0/0
242/75	77/40	67/75	82/31	67/79	82/64
62/88	82/30	62/70	268/4	44/38	52/64
72/85	82/5	82/30	198/1	12/28	55/58
262/90	77/5	82/25	38/49	7/2	72/33
252/75	252/10	66/86	156/12	316/75	83/34
67/85	247/15	67/78	259/16	326/79	86/33
67/80	257/5	72/86	247/28	325/60	105/79
232/65	82/40	73/80	252/34	307/57	108/73
247/90	92/45	82/81	281/25	157/51	106/60
237/80	112/20	92/20	74/52	163/12	26/50
72/80	102/30	202/15	71/44	147/11	93/56
72/80	62/15	257/35	90/46	70/49	117/54
57/85	122/5	250/11	75/53	72/16	294/55
47/70	72/40	282/10	91/57	77/13	289/34
42/85	72/20	246/14	91/33	26/41	286/33
32/85	112/40	102/22	82/31	37/39	41/31
247/80	82/25	0/0	172/31	67/22	267/38
52/90	72/40	152/21	180/31	85/24	114/17
62/90	262/1	77/19	154/9	332/50	137/16
62/90	122/5	80/20	153/7	175/25	167/30

APENDICE I. Dirección de buzamiento/buzamiento de las diaclasas medidas al azar.

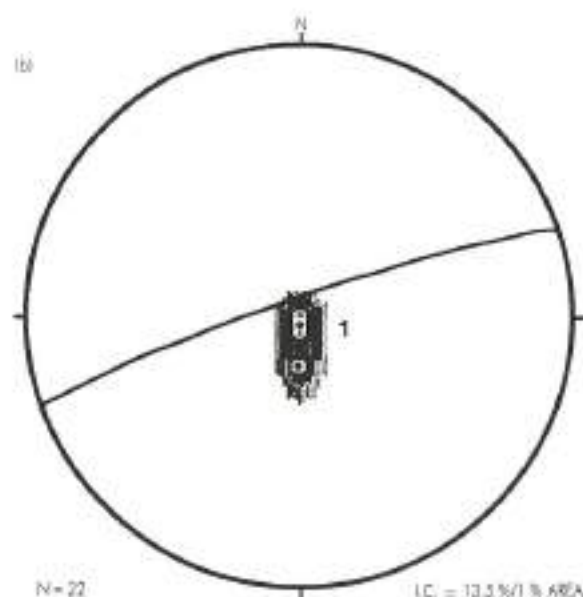
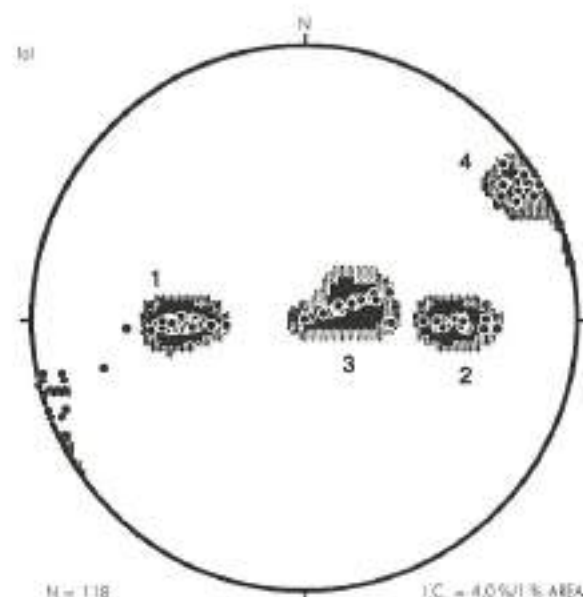


FIGURA 4. Diagrama de polos y de densidad de las diaclasas medidas en el círculo A, paralelo a la superficie de estratificación (al) y es el círculo B, perpendicular a la misma (bl).

- información sino que además ésta es más precisa.
- Cuantifica de un modo más fiable las distintas familias de diaclasas, ya que el método obliga a medir indiscriminadamente todas las discontinuidades existentes en el área seleccionada.
 - Con vista a su uso en las clasificaciones geomecánicas, resulta ser un método de toma de datos científico.

76/80(16)	77/88(7)	87/32(12)	254/16(15)	273/60(19)	0/5(136)
69/83(30)	78/88(7)	88/40(17)	253/27(15)	271/42(18)	0/4(144)
69/90(70)	87/42(60)	86/55(15)	250/17(32)	270/36(38)	0/3(123)
237/86(31)	86/41(40)	87/34(39)	251/18(38)	272/48(14)	0/2(18)
76/80(16)	88/43(20)	89/43(26)	249/10(12)	272/40(16)	0/1(26)
76/90(22)	90/35(28)	86/23(11)	250/11(21)	273/42(38)	0/0(26)
242/85(36)	90/35(29)	87/28(12)	252/15(16)	271/40(37)	0/5(28)
239/86(27)	86/41(41)	88/34(10)	272/42(32)	271/36(16)	0/4(27)
68/85(38)	89/39(55)	87/35(10)	272/43(40)	272/25(12)	0/3(23)
236/74(19)	86/39(57)	86/34(10)	271/41(47)	273/26(14)	0/2(22)
70/90(22)	87/38(43)	87/55(18)	273/40(33)	272/48(38)	0/1(19)
232/82(35)	91/37(40)	252/21(70)	271/41(29)	271/49(34)	0/0(22)
238/74(20)	87/39(40)	252/16(60)	270/46(34)	273/36(18)	0/1(22)
237/74(10)	89/31(36)	252/7(120)	273/30(39)	0/0(56)	0/2(20)
238/74(9)	85/36(36)	252/2(13)	272/49(37)	0/0(25)	0/3(15)
239/81(42)	86/47(39)	252/8(112)	272/49(16)	0/0(36)	2/15(12)
236/78(20)	88/43(30)	252/8(7)	273/49(19)	0/0(49)	1/15(13)
237/83(25)	90/41(15)	253/10(63)	271/49(11)	0/0(44)	3/15(12)
238/85(41)	89/40(22)	251/6(158)	272/49(12)	0/0(30)	2/15(21)
237/86(23)	87/43(20)	250/16(153)	270/49(11)	0/0(32)	2/15(8)
77/80(28)	90/33(19)	253/22(39)	271/49(10)	0/0(42)	1/15(6)
240/89(29)	88/39(20)	251/22(140)	273/42(17)	76/65(24)	3/15(8)
241/78(45)	87/32(110)	255/22(122)	272/43(18)		
236/77(22)	87/32(113)	254/11(120)	272/43(18)		

APENDICE II. Dirección de buzamiento/buzamiento de los diaclasas medidas según el método de Davis. La última columna corresponde a los datos del círculo B. La cifra entre paréntesis representa la longitud (expresada en cm) de cada diaclasa.

camente más correcto que el convencional. Además facilita una cuantificación de la densidad de diaclasación del macizo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLMENDINGER, R. W. (1988). Stereonet v. 3.6 a plotting program for orientation data for the Macintosh Plus, SE and II Computers. *Dept. Geol. Sciences, Cornell University, Ithaca, NY*.
- BARTON, E.; LIEN, R. y LUNDE, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, Springer Verlag, 6, 189-236.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *The Civil Engineer in South Africa*, Dec., 335-343.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1976). Rock mass classifications in rock engineering. *Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg. Proceedings, 97-106.
- BIENIAWSKI, Z. T. (1979). The geomechanics classifications in rocks engineering applications. *4th Int. Cong. on Rock Mechanics*, Montreux, 2, 41-48.
- BILLINGS, M. P. (1972). *Structural Geology*. Prentice-Hall Inc., 606 pp., New Jersey.
- BOGDANOV, A. A. y NOVIKOVA, A. C. (1947). The intensity of cleavage as related to the thickness of the bed. *Sov. Geol.*, 16, Moscú.

- DAVIS, G. H. (1984). *Structural Geology of rocks and regions*. John Wiley & Sons, Inc., 492 pp., NY.
- HARRIS, J. F.; TAYLOR, G. L. y WALPER, J. L. (1960). Relation of deformational fractures in sedimentary rocks to regional and local structures. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 44, 12, 1859-1873.
- HATCHER, R. D. Jr. (1990). *Structural Geology. Principles, Concepts and problems*. Maxwell MacMillan Publ., 531 pp., Ohio.
- HOBBS, B. E.; MEANS, W. D. y WILLIAMS, P. F. (1981). *Geología Estructural*. Ed. Omega, 518 pp., Barcelona.
- HODGSON, R. A. (1961). Classification of structures on joint surfaces. *Am. Jour. Sc.*, 259, 493-532.
- KIRILLOVA, A. C. (1949). Some problems of the mechanics of folding. *Trans. Geofiz.*, 6.
- LADEIRA, F. L. y PRICE, N. J. (1981). Relationship between fracture spacing and bed thickness. *J. Struct. Geol.*, 3, 179-184.
- LOUIS, C. (1974). Reconnaissance des massifs rocheux par sondages et classifications géotechniques des roches. *Ann. Soc. et Foundations*, 108, 97-122.
- MC CLAY, K. (1987). The mapping of geological structures. *Geol. Soc. London Hand-book. Open Univ. Press, Butler & Tanner Ltd.*, 161 pp., London.
- MIKHAILOV, A. Y. (1987). *Structural Geology and geological mapping*. Mir Publish., 535 pp., Moscú.
- NICOLAS, A. (1987). *Principios de Tectónica*. Masson, S. A., 185 pp., Barcelona.
- PARKER, J. M. (1942). Regional systematic jointing in slightly deformed sedimentary rocks. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 53, 381-408.
- PHILLIPS, F. C. (1976). La aplicación de la proyección estereográfica en Geología Estructural. *Ed. Blume*, 132 pp., Madrid.
- PRICE, N. J. (1966). Fault and joint development in brittle and semibrittle rocks. *Pergamon Press*, 176 pp., Oxford.
- PRICE, N. J. y COSGROVE, J. W. (1990). Analysis of geological structures. *Cambridge Univ. Press*, 502 pp., Cambridge.
- RAGAN, D. M. (1980). *Geología Estructural. Introducción a las técnicas geométricas*. Ed. Omega, 207 pp., Barcelona.
- RAMSAY, J. G. y HUBER, M. L. (1987). The techniques of modern Structural Geology. Folds and Fractures. *Academic Press Inc.*, 700 pp., London.
- REHRIG, W. A. y HEIDRICK, T. L. (1972). Regional fracturing in Laramide stocks of Arizona and its relationship to porphyry copper mineralization. *Economic Geol.*, 67, 198-213.
- REHRIG, W. A. y HEIDRICK, T. L. (1976). Regional tectonic stress during the Laramide and late Tertiary intrusive periods, Basin and Range Province, Arizona. *Arizona Geol. Digest*, 10, 205-228.
- SOWERS, G. M. (1973). Theory of spacing of extension fractures. *Engl. Geol. Case Hist.*, 9, 27-53.
- SUPPE, J. (1985). *Principles of Structural Geology*. Prentice-Hall, Inc., 537 pp., New Jersey.
- WHEELER, R. L. y DICKSON, J. M. (1980). Intensity of systematic joints, methods and application. *Geology*, 8, 230-233.
- WICKHAM, G. E.; TIEDEMANN, H. R. y SKINNER, E. H. (1972). Support determinations based on geological predictions. *North American Rapid Excavation and Tunneling Conf.*, Chicago. Proceedings, 1, 43-64.