

METODOLOGIA PARA ANALIZAR LA ESTABILIDAD GEOESTRUCTURAL DE AREAS
CON PENDIENTES ROCOSAS.

Por: Dr. Gianfranco Perri A. (*).

RESUMEN

Se presenta una metodología para el "Análisis de la Estabilidad Geoestructural" de las pendientes rocosas, mediante una extensión de las conocidas técnicas de las proyecciones hemisféricas para el estudio de la estabilidad de taludes en rocas.

Después de breves indicaciones sobre la problemática general de la estabilidad de los taludes rocosos y del estudio con las técnicas de las proyecciones hemisféricas, en forma detallada se presenta la metodología elaborada, con su aplicación a un caso real tomado como ejemplo.

En las conclusiones se hace hincapié sobre el aspecto más general de la zonificación geotécnica en el contexto de la cual, el análisis geoestructural propuesto representa solamente uno de los aportes necesarios.

(*) Profesor de "Mecánica de Rocas" en la Universidad Central de Venezuela.

En este trabajo se presenta una metodología elaborada para realizar el análisis de la estabilidad de taludes naturales y artificiales de corte en áreas rocosas, especialmente eficaz para los efectos de un estudio a escala mediana (de 1:1.000 a 1:10.000) de zonificación del territorio y cuyos campos de posibles aplicaciones son numerosos: urbanizaciones, vialidad, etc.

Se trata de una ampliación de aquellos conceptos y metodologías conocidas como técnicas de las proyecciones hemisféricas ya ampliamente ilustradas por numerosísimos Autores; por ejemplo: Hoek y Bray (1974) y Goodman (1976).

LA PROBLEMÁTICA GENERAL

En un ambiente rocoso, caracterizado por un comportamiento mecánico altamente anisotropo debido a la presencia de superficies de menor resistencia sistemáticamente ordenadas en el interior de un macizo, los parámetros que en manera decisiva controlan la estabilidad de los taludes son de dos órdenes principales:

- por un lado los parámetros de resistencia al corte (cohesión y fricción) que pueden desarrollarse a lo largo de las diferentes superficies de menor resistencia o planos de discontinuidad geológico - estructural;
- por el otro las ubicaciones recíprocas entre estos planos de discontinuidad y los planos de las superficies libres de los macizos rocosos: las caras de los taludes.

En particular frente al problema de la estabilidad de taludes en rocas anisotropas, pueden definirse por lo menos tres características situaciones posibles:

- a) Condiciones cinemáticamente estables. Esto es ubicación relativa en el espacio, entre los planos involucrados en el problema, que no da lugar a la existencia de algún grado de libertad cinemática para toda la estructura, la cual en consecuencia, resulta estable independientemente de las características de resistencia al corte que puedan desarrollarse.

Más explícitamente, para que ocurran movimientos de volúmenes rocosos en el talud, es necesario que las líneas de intersección entre planos de discontinuidades no paralelas existentes en el macizo rocoso buzén hacia la cara del talud y con ángulo de buzamiento menor del que presente el mismo talud en el sentido del potencial movimiento.

Por otro lado podrán desarrollarse movimientos de tipo planares, además de los de cuñas de rocas ya citados, cuando el plano de discontinuidad sea pseudo-paralelo al del talud y presente un ángulo de buzamiento concorde y menor que el del talud mismo.

En otras palabras es necesario, para que haya posibilidad de movimiento, que tanto la línea de intersección de los planos de discontinuidad en el caso de cuña, como el plano mismo de la discontinuidad en el caso de movimiento planar, afloren en la cara del talud; de lo contrario no se estarán verificando las condiciones de estabilidad cinemática.

- b) Condiciones de inestabilidad cinemática y de estabilidad mecánica. Cuando están dadas las condiciones geométricas de inestabilidad cinemática, interviene para oponerse al movimiento, la resistencia al corte que puede desarrollarse en el contacto entre los planos de discontinuidad en cuestión.

Esta resistencia al corte, que es función de diferentes variables

físicas y principalmente de la naturaleza geológica de los materiales que constituyen la masa rocosa y de las condiciones morfológicas de las superficies de las discontinuidades, está debida en general a dos distintos factores mecánicos: la fricción y la cohesión.

El primer parámetro, la fricción, hace desarrollar fuerzas resistentes que no están ligadas a las dimensiones de las superficies de contacto y en consecuencia no dependen de la escala del problema sino simplemente del buzamiento de los planos de discontinuidad; el segundo parámetro, la cohesión, en cambio desarrolla fuerzas resistentes de intensidad directamente proporcional a las dimensiones de las superficies en contacto y que por lo tanto están muy ligadas a la escala del problema (en particular a la altura del talud), mientras son independientes de las relaciones angulares y de ubicación en el espacio de las estructuras.

Ahora bien, estas fuerzas resistentes que pueden desarrollarse al contacto de las superficies de discontinuidad, puede ocurrir que sean de magnitud superior a las fuerzas actuantes (esencialmente debidas a los efectos de la gravedad) tendientes a producir el movimiento, y en este caso el talud seguirá siendo un talud estable definiéndose para él un factor de seguridad (F_s) igual a la relación existente entre fuerzas resistentes y fuerzas actuantes; ambas calculadas en sus componentes paralelas a la dirección del potencial movimiento.

- c) Condiciones de inestabilidad cinemática y mecánica. Si además de verificarse situaciones de inestabilidad cinemática, ocurre que las fuerzas actuantes superan en intensidad a las correspondientes de resistencia, el factor de seguridad del talud resultará menor que 1 y el talud mismo será inestable.

Igualmente puede ocurrir que el factor de seguridad a pesar de ser mayor que la unidad, sea de magnitud no aceptable para el tipo de

obra en estudio o, en otras palabras, puede ocurrir que se requiera garantizar un factor de seguridad mínimo superior a la unidad y entonces, en todos casos, se requerirá una estabilización artificial del talud. La misma podrá llevarse a cabo en diferentes formas que van desde la modificación de la geometría del talud hasta la aplicación de fuerzas externas estabilizantes que se vayan a sumar a las fuerzas resistentes o que, alternativamente o contemporáneamente, se vayan a sustraer a las fuerzas actuantes.

LA TÉCNICA DE LAS PROYECCIONES HEMISFÉRICAS

Como ya se mencionó al comienzo, las técnicas de representación e interpretación de problemas geoestructurales mediante las proyecciones hemisféricas son muy conocidas y difundidas entre los ingenieros geólogos y geotécnicos, así como las correspondientes aplicaciones básicas a problemas de análisis y cálculo de estabilidad de taludes rocosos.

Por lo tanto no se dedican páginas a la explicación de estas técnicas basilaras enviando, a los lectores que lo necesitaran, a la abundante bibliografía disponible y solamente en mínima parte reportada al final de este escrito.

Sin embargo cabe comentar que todas aquellas consideraciones sobre la problemática general del análisis de estabilidad, ilustradas en el párrafo anterior encuentran, en las técnicas de las proyecciones hemisféricas, un soporte ideal para su representación, análisis, estudio y cuantificación del problema. En efecto las técnicas en mención representan un instrumento extremadamente cómodo y simple para la representación en un plano de los complejos fenómenos de interacción espacial entre las estructuras geométricas involucradas; y más aún, es igualmente cómodo y fácil introducir en la representación los efectos de la resistencia mecánica al corte en su componente friccional y hasta cohesiva, PERRI (1979); finalmente las técnicas más avanzadas permiten la

cuantificación completa del problema hasta la determinación de los valores numéricos de los factores de seguridad y de los efectos de eventuales fuerzas externas no debidas a la gravedad.

LA METODOLOGIA DE ANALISIS

Ya se han mencionado los factores que juegan un papel fundamental en la problemática de la estabilidad de taludes rocosos. El segundo de estos factores se ha denominado: ubicación recíproca entre los planos geoestructurales y los planos topográficos; en otras palabras, es fundamental la interacción geométrica entre estas dos familias de planos: la primera intrínseca de la naturaleza geológico - estructural de las formaciones rocosas y la segunda, consecuente de la topografía del área: rumbos y buzamientos que definen las diferentes pendientes integrantes del relieve.

Ahora bien, resulta claro que en un enfoque a gran escala, como es el que se ha propuesto, la metodología a usar debe estar íntimamente ligada a conceptos estadísticos y probabilísticos en consideración del hecho que no se está estudiando una situación extremadamente localizada (por ejemplo un sólo talud), sino una amplia área; así como no se está buscando la solución a un problema local, sino persiguiendo una zonificación general. El mismo término de riesgo, por otro lado, implica directamente los mencionados conceptos estadísticos y probabilísticos.

Por lo tanto también es obvio que la eficaz y confiabilidad de los resultados, cualquiera que sean, de un estudio de este tipo están íntimamente ligadas a la abundancia y representatividad de los datos de entrada.

En este caso los datos de entrada son: la ubicación en el espacio, asociada a la naturaleza geológico - geotécnica, de las discontinuidades estructurales presentes en las formaciones rocosas del área (la primera

familia de planos) y, la ubicación en el espacio de los planos de las pendientes topográficas de la misma área (la segunda familia de planos).

Sucesivamente se tratará de analizar con criterios adecuados las interacciones existentes, por un lado entre los diferentes planos de la primera familia y luego, entre éstos y los planos de la segunda familia. Este tipo de análisis será el que permitirá evidenciar interesantes aspectos del problema y conducirá hasta la cuantificación y localización del fenómeno en su integridad.

El primer importante grupo de datos deriva directamente de las labores de levantamiento geoestructural de campo. El resultado de esta investigación, además que la definición de unidades y sub-unidades geológicas y respectivas características peculiares, entrega todo el volumen de los datos estructurales constituidos por la ubicación y descripción geomorfológica de los principales accidentes estructurales existentes.

Estos, para el ejemplo presentado, han sido agrupado en foliaciones, diaclasas y fallas menores. En la figura 1 se representa el diagrama de concentración de polos de discontinuidades; nótese el elevado número de estructuras medidas y analizadas: 1130, sobre un área de aproximadamente 100 hectáreas.

En la figura 2 se representa el correspondiente diagrama de contornos de polos; el mismo permite observar la existencia de dos claros patrones de discontinuidades: un primero correspondiente a los planos de foliaciones y un segundo a los planos de diaclasas. Las fallas menores siguen un patrón similar al de las foliaciones.

Como complemento útil para las consideraciones sucesivas, se reportan en las figuras 3 y 4 respectivamente las envolventes de los círculos de meridiano de los planos de foliaciones y de los de diaclasas;

en ambas figuras también está delineada el área común de estas envolventes, la misma que representa la zona en que quedan ubicadas las intersecciones entre las dos familias de planos de discontinuidades; en otras palabras las líneas de todas las posibles cuñas estructurales presentes en el área en estudio.

Con esto se han analizado y ordenado las características relativas al primer parámetro en juego: el aspecto geoestructural. Queda ahora analizar y ordenar el segundo parámetro en juego: el aspecto topográfico. A este propósito resulta cómodo imaginarse las colinas conformantes el área, como el conjunto de un número muy grande de pequeños taludes cada uno de los cuales, representando una pequeña porción de la ladera cresta o base de un relieve, está caracterizado por un valor bien definido de buzamiento y un valor, igualmente bien definido, de rumbo o sea de orientación de la pendiente.

Una vez ajustados a esta imagen, queda simplemente cuantificar el problema, o sea definir y localizar para cada uno de estos taludes ideales, que por cierto son numerosísimos, las correspondientes características geométricas de rumbo y buzamiento.

Con tal objeto se ha construído un mapa de pendientes, el cual además que estar caracterizado por los valores de buzamiento de cada porción de área, contiene en sí la información relativa a la orientación de estas pendientes o sea el rumbo mismo.

Se utilizaron cuatro rangos de buzamiento y ocho rangos de pendientes los mismos que están indicados en las figuras 5 y 6 en que se dan en forma de diagrama, los resultados cuantificados de este análisis para el área en estudio.

Ahora bien, se va a utilizar en forma original la idea mediante la cual se ha asociado al relieve de la roca un conjunto constituído por tan-

tos pequeños taludes los cuales, geométricamente, no son otra cosa que planos cuya orientación en el espacio, rumbo y buzamiento, se conocen con suficiente precisión. Así mismo puede representarse en proyección hemisférica este conjunto de planos mediante un simple diagrama de concentración de polos el cual a su vez permite construir un diagrama de contornos de polos de pendientes y la envolvente de los círculos meridianos correspondientes. Estos mismos se reportan en la figura 7.

Una vez definidos los aspectos cualitativos y sobre todo cuantitativos de los factores involucrados en el problema, queda de poner a confrontación los mismos y deducir las conclusiones correspondientes relativas a la estabilidad geoes estructural del área estudiada,

Recordando a las que se han definido al comienzo de este artículo como las tres (a, b, c) características situaciones posibles frente al problema de la estabilidad de taludes en rocas, es evidente que interesa por un lado individualizar las condiciones cinemáticamente estables para ya no considerarlas, y por el otro lado individualizar cuáles, entre las condiciones de inestabilidad cinemática, puedan revestir caracteres de inestabilidad mecánica y cuáles no.

A pesar de que en general un sucesivo análisis de estabilidad de detalle daría los valores exactos del factor de seguridad para los taludes cinemáticamente inestables, es casi siempre posible en esta fase de zonificación general, tomar en cuenta un valor mínimo del parámetro friccional de resistencia al corte que seguramente se va a desarrollar a lo largo de las diferentes superficies de discontinuidad analizadas.

Esto permitirá reducir aún más los casos a ser analizados detenidamente en la sucesiva fase de estudio de detalle incluyendo o sea, en el grupo de los taludes seguramente estables (cinemáticamente), también aquellos que lo son (mecánicamente) con la contribución del sólo parámetro friccional de resistencia al corte evaluado por ahora con sentido

conservador.

Las técnicas de las proyecciones hemisféricas en efecto brindan esta posibilidad en manera extremadamente simple; solamente con el trazar en el diagrama un círculo concéntrico con la red que demarca, desde la periferia hacia el centro, el valor del ángulo de fricción disponible.

Volviendo al ejemplo, el aspecto cualitativo del problema de la estabilidad resulta ya evidente y fácilmente deducible al estadio de análisis en que se ha llegado: por un lado las estructuras de foliaciones buzán hacia el N-W, las de diaclasas son pseudo verticales con rumbo NE-SW y las estructuras de cuñas potenciales también buzán hacia el N-W; por el otro lado el relieve del área presenta pendientes que buzán predominantemente hacia N-E y S-E y en todo caso sin buzán hacia el W. En consecuencia son inmediatas todas las conclusiones relativas a la estabilidad de las pendientes en términos cualitativos; sin embargo los propósitos incluían también la cuantificación del problema y con tal objeto, sobre la base de los datos ya presentados, es suficiente proceder a realizar una simple y nueva elaboración de los mismos de la forma siguiente:

- Superposición de las representaciones reportadas en las figuras 7 y 3 o 4.
- Demarcación de la figura delimitada por la envolvente de los planos de las pendientes y por el área de las intersecciones foliaciones-diaclasas a su vez delimitada externamente por el círculo correspondiente al ángulo de fricción supuesto.
- Delimitación de la porción del diagrama de contorno de polos de las pendientes correspondiente a los polos cuyos círculos meridianos están comprendidos en la figura delimitada al paso anterior.

El resultado es la figura 8, de la observación y análisis de la cual se

puede observar que:

- a) el área de ubicación de las intersecciones foliaciones - diaclasas potencialmente inestables (por poseer ángulo de buzamiento mayor que el de los taludes) representa cerca del 50% del total del área de ubicación de estas intersecciones.
- b) el área de contorno de polos de pendientes potencialmente inestables (por poseer ángulo de buzamiento mayor que el de las líneas de cuñas) representa cerca del 22% del total del área de contorno de polos de pendientes.
- c) en consecuencia de (a) y (b) los taludes probablemente inestables (para los cuales se verifican simultáneamente las dos condiciones desfavorables) serán cerca del 11% del total existente en toda el área estudiada (obviamente de solamente todos aquellos reportados en el diagrama de contorno de polos y correspondientes a inclinaciones superiores a los 20°).

A este punto debería repetirse el procedimiento de análisis, ilustrado con referencia a la estabilidad de las cuñas estructurales, también para analizar la estabilidad relativa a los dos sistemas de discontinuidades presentes considerados en forma separada, siguiendo exactamente todos los mismos pasos ya descritos.

En el caso particular del ejemplo, estos otros análisis revisten una importancia sólo relativa debido a que por un lado las diaclasas son perpendiculares y por el otro las foliaciones dan lugar a situaciones de inestabilidad coincidentes con las ya individualizadas para las cuñas de manera que, cualitativa y cuantitativamente lo indicado en el anterior punto (c), no va a sufrir variaciones importantes.

Una vez cuantificado el problema queda simplemente ubicarlo en el área estudiada para un mayor provecho aplicativo. Esta última operación de

esta etapa de zonificación general relativa al problema de la estabilidad geométrico - estructural de los taludes, es inmediata considerando que se poseen ya todas las informaciones necesarias para ello. Los resultados están reportados en la figura 9 que representa una porción pequeña de toda el área estudiada y perteneciente a un plano general que se denomina "Mapa de análisis de estabilidad", resumen en sí de todos los principales aspectos involucrados en el problema y antes comentados; originalmente elaborado a escala 1:2000.

En este plano, a pesar de haberse podido realizar una zonificación más detallada, o sea individualizando un número grande de rangos posibles de estabilidad así como lo hubiera permitido la gran cantidad de información disponible, se ha preferido utilizar una zonificación de solamente tres rangos, en consideración del grado de precisión disponible y sobre todo en consideración de los fines prácticos de la utilización de un tal análisis.

En otras palabras una subdivisión más detallada (en esta etapa y a esta escala del estudio) resultaría quizás una pura especulación académica.

Se han utilizado los siguientes rangos de zonificación:

a) Zonas de potencial inestabilidad geométrico - estructural; que comprenden taludes con rumbo sub-paralelo al de las estructuras de foliación y buzando con ángulo mayor que 28° en el mismo sentido de la foliación.

Así mismo se comprenden en estas zonas taludes con pendientes de 28° en las caras de los cuales afloran líneas de intersección de discontinuidades con dirección pseudo-perpendicular al rumbo del talud; así como taludes con pendientes mayores que 35° en la cara de los cuales afloran líneas de intersección de discontinuidades con dirección no perpendicular al rumbo del talud.

b) Zonas de potencial inestabilidad geométrico - estructural reducida;

comprenden taludes con pendientes mayores que 35° y en la cara de los cuales eventualmente puedan aflorar líneas de intersección de discontinuidades con dirección pseudo-paralela al rumbo del talud. Así mismo se comprenden taludes con pendientes mayores que 28° en la cara de los cuales afloran discontinuidades con dirección no paralela al rumbo del talud.

- c) Zonas de estabilidad geométrico - estructural; que comprenden taludes con pendientes menores que 28° y taludes con pendientes superiores que están orientados en forma tal de no permitir condiciones cinemáticas de inestabilidad debido a la ubicación favorable de las estructuras geológicas.

CONCLUSION

Se ha presentado una metodología para la zonificación del territorio con respecto al problema de la estabilidad geoestructural de las pendientes en un medio rocoso caracterizado por la existencia de superficies (discontinuidades) de menor resistencia y comportamiento francamente anisotropo.

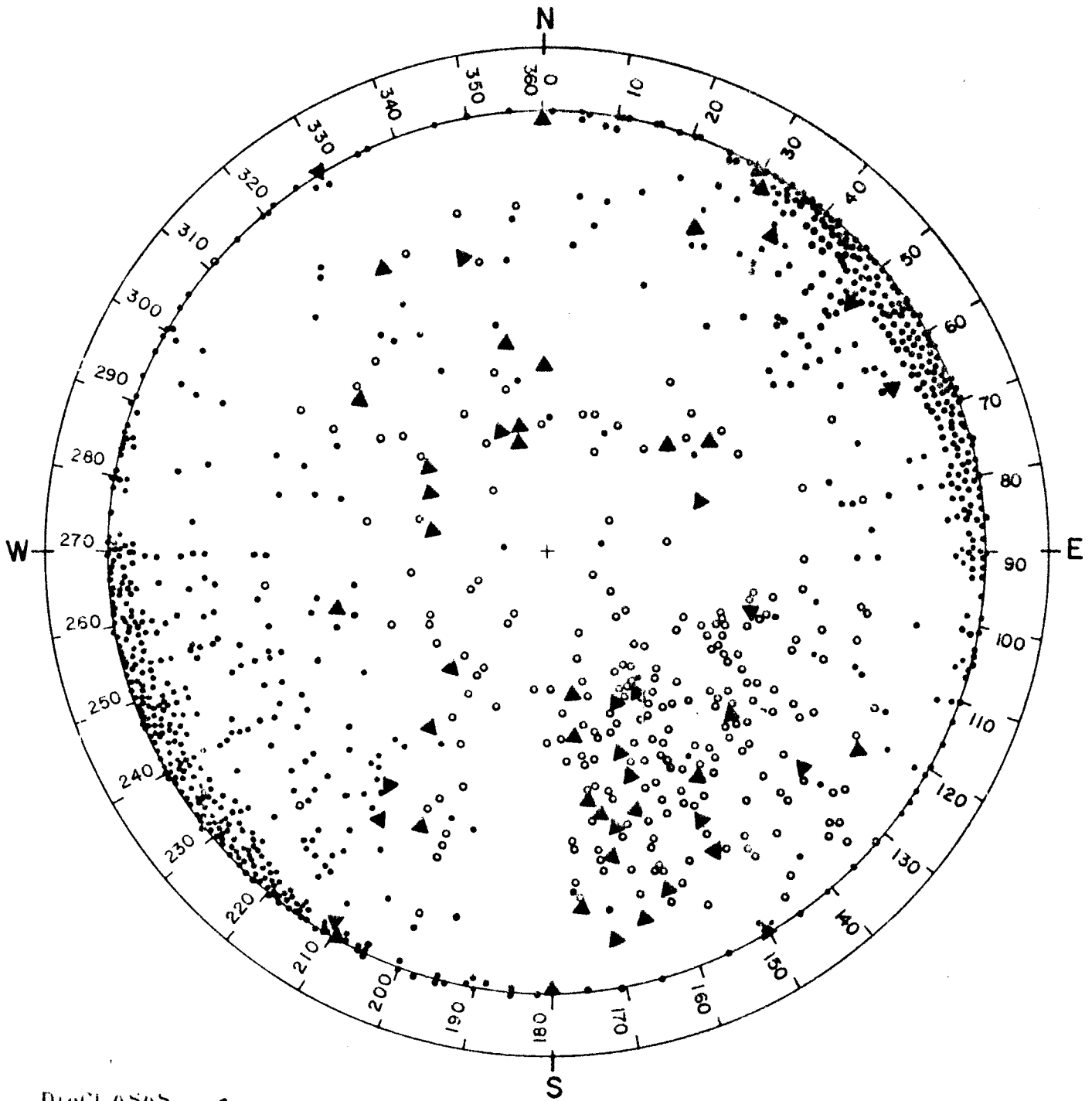
La metodología basada sobre el uso de las técnicas de las proyecciones hemisféricas, se encuadra en la problemática más amplia de la zonificación geotécnica de un territorio, respecto a la cual constituye solamente una de las facetas fundamentales.

Además a escala más de detalle el análisis debe ser complementado mediante el cálculo de los taludes específicos, obviamente de aquellos comprendidos en las áreas definidas críticas.

BIBLIOGRAFIA

- AGUERREVERE, S.E. y ZULOAGA, G. (1937) "Observaciones geológicas en la parte central de la cordillera de la costa", Bol. Geol. y Min., Caracas, 1 (2-4): pp. 3 - 22.
- GOODMAN, R. (1976) "Methods of geological engineering in discontinuous rocks", West Publishing Co., New York, t. pp.
- HOEK, E. y BRAY, J.W. (1974) "Rock slope engineering", Institution of mining and metallurgy, London, t. pp. 402.
- PERRI, G. (1979) "La cohesión en el análisis estereográfico de estabilidad de taludes", Tecnológica, ESPOL., Guayaquil, 2(1).: pp. 63-75.

DIAGRAMA DE CONCENTRACION DE POLOS .-



DIACLASAS •

FOLIACIONES ◦

FALLAS. ▲

Nº DE POLOS DE FOLIACION = 226

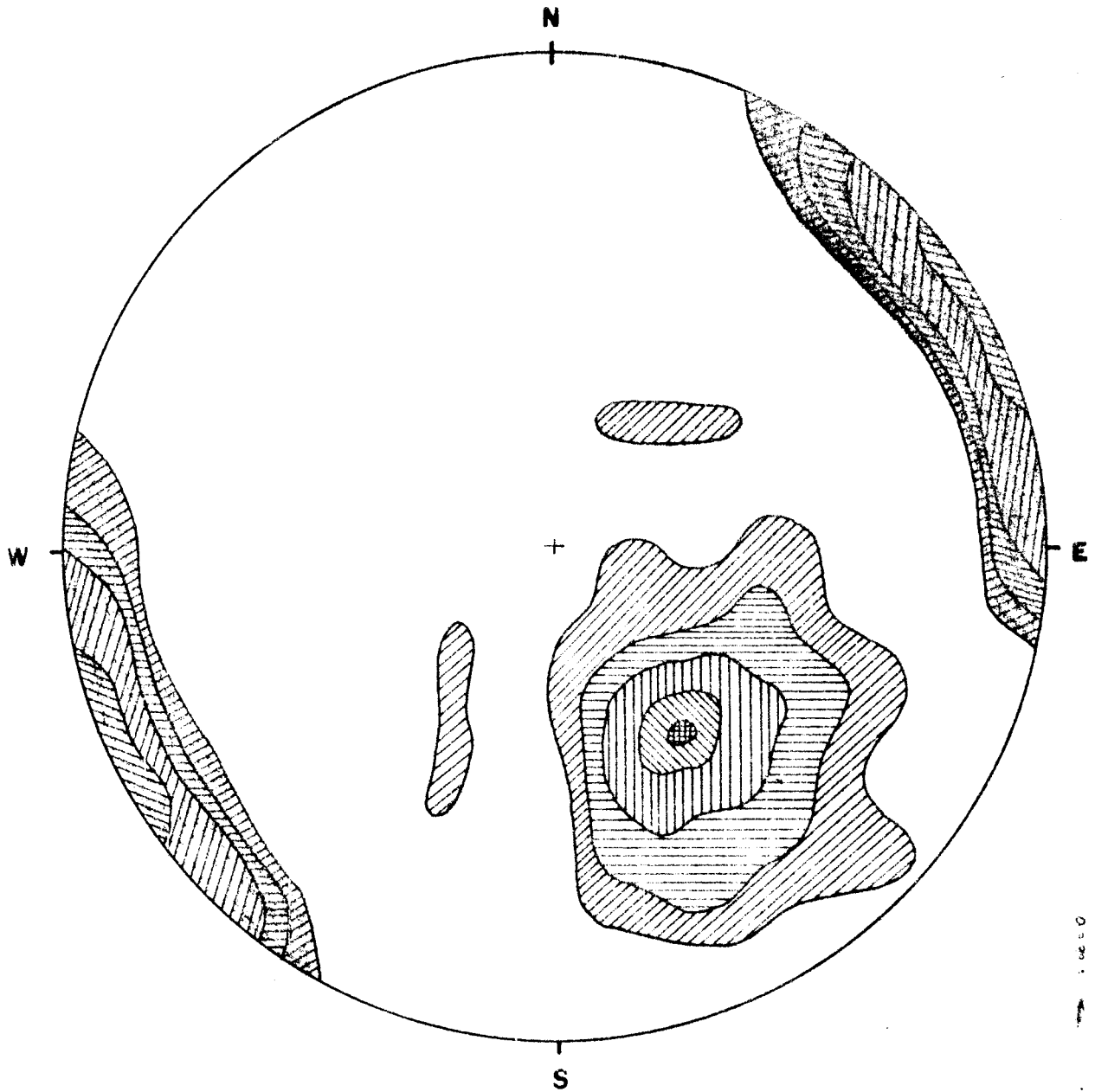
Nº DE POLOS DE DIACLASAS = 850

Nº DE POLOS DE FALLAS = 54

Nº TOTALES DE POLOS = 1.130

Fig. 1

DIAGRAMA DE CONTORNO DE POLOS

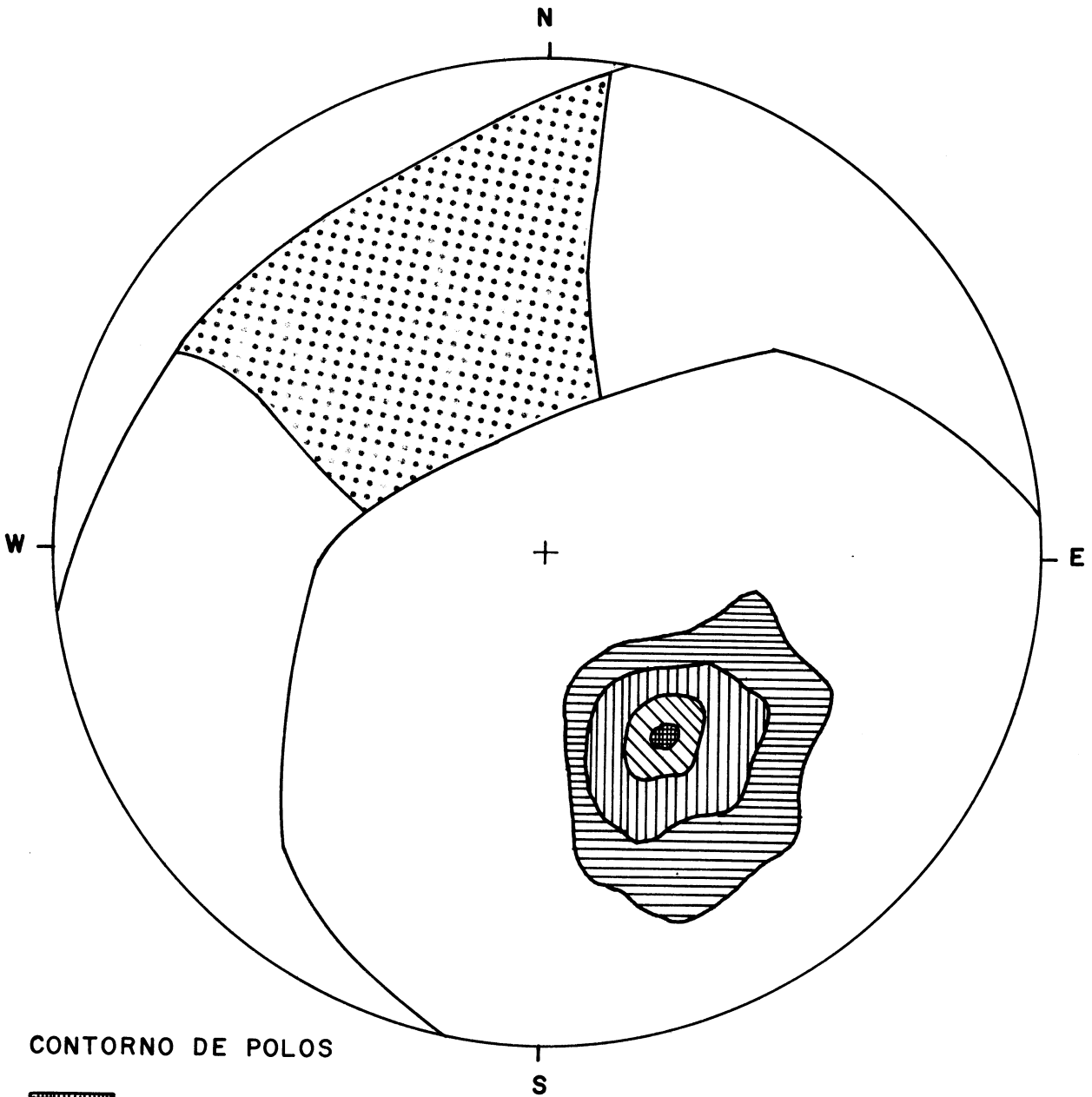


<u>FOLIACIONES</u>				<u>DIACLASAS</u>	
	10 %	23	PUNTOS	—	—
	8 % - 10 %	19 - 23	PUNTOS	—	68 - 85 PUNTOS
	6 % - 8 %	14 - 19	PUNTOS	—	51 - 68 PUNTOS
	4 % - 6 %	9 - 14	PUNTOS	—	34 - 51 PUNTOS
	2 % - 4 %	4 - 9	PUNTOS	—	17 - 34 PUNTOS

Fig.2


Fig. 2 a.


ENVOLVENTE DE PLANOS DE FOLIACIONES



CONTORNO DE POLOS

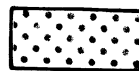
 10%

 8% - 10%

 6% - 8%

 4% - 6%

UBICACION DE LAS
INTERSECCIONES
FOLIACIONES - DIACLASAS



ENVOLVENTE DE PLANOS DE DIACLASAS

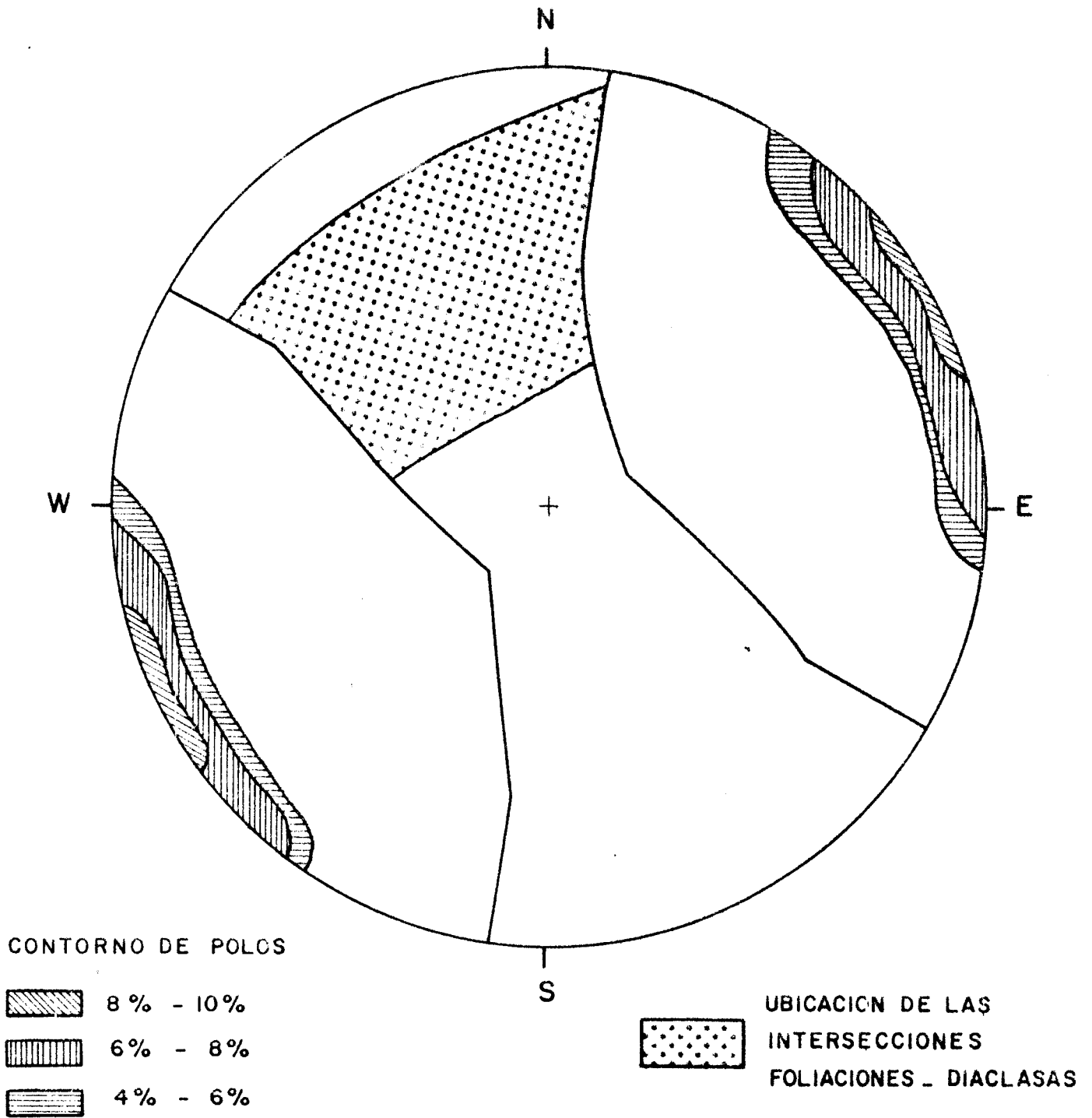
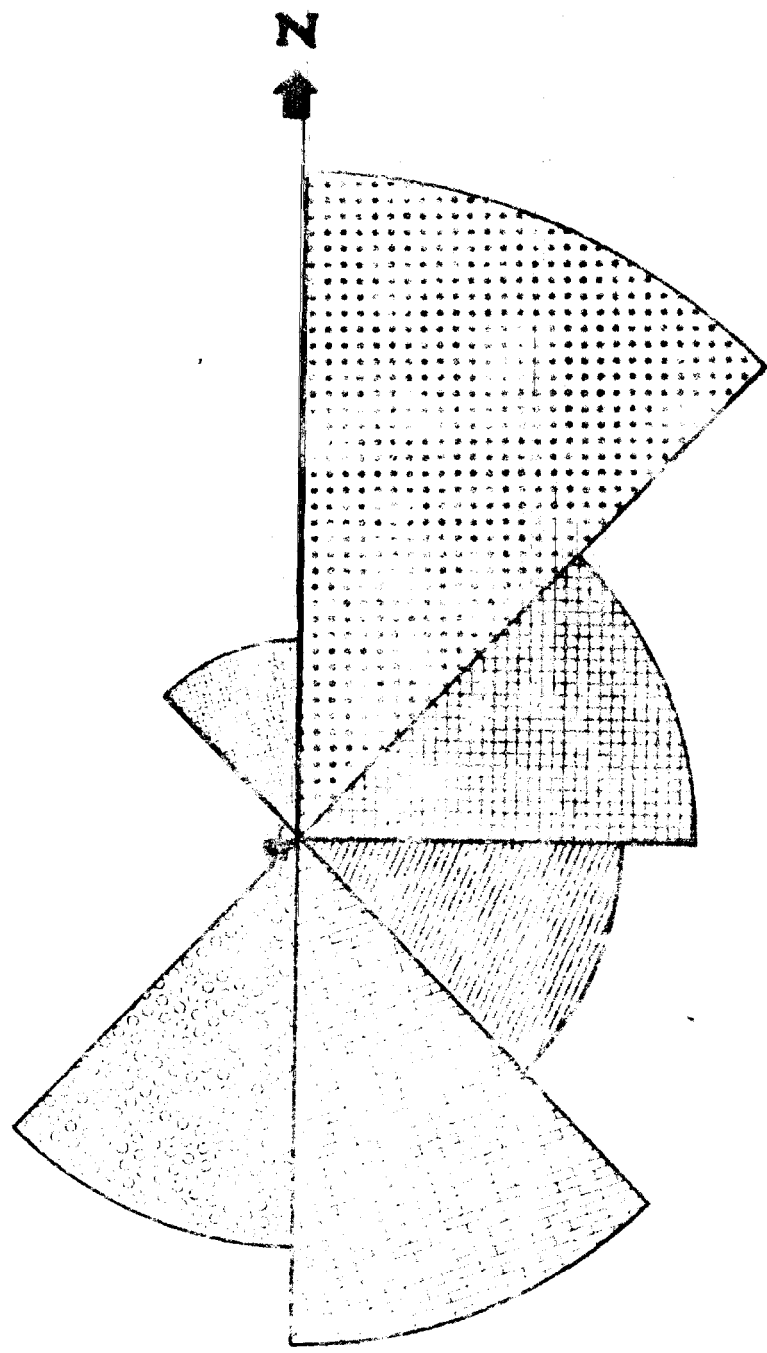

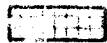

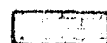


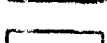
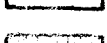


Fig. 4

DISTRIBUCION DE ORIENTACION DE PENDIENTES

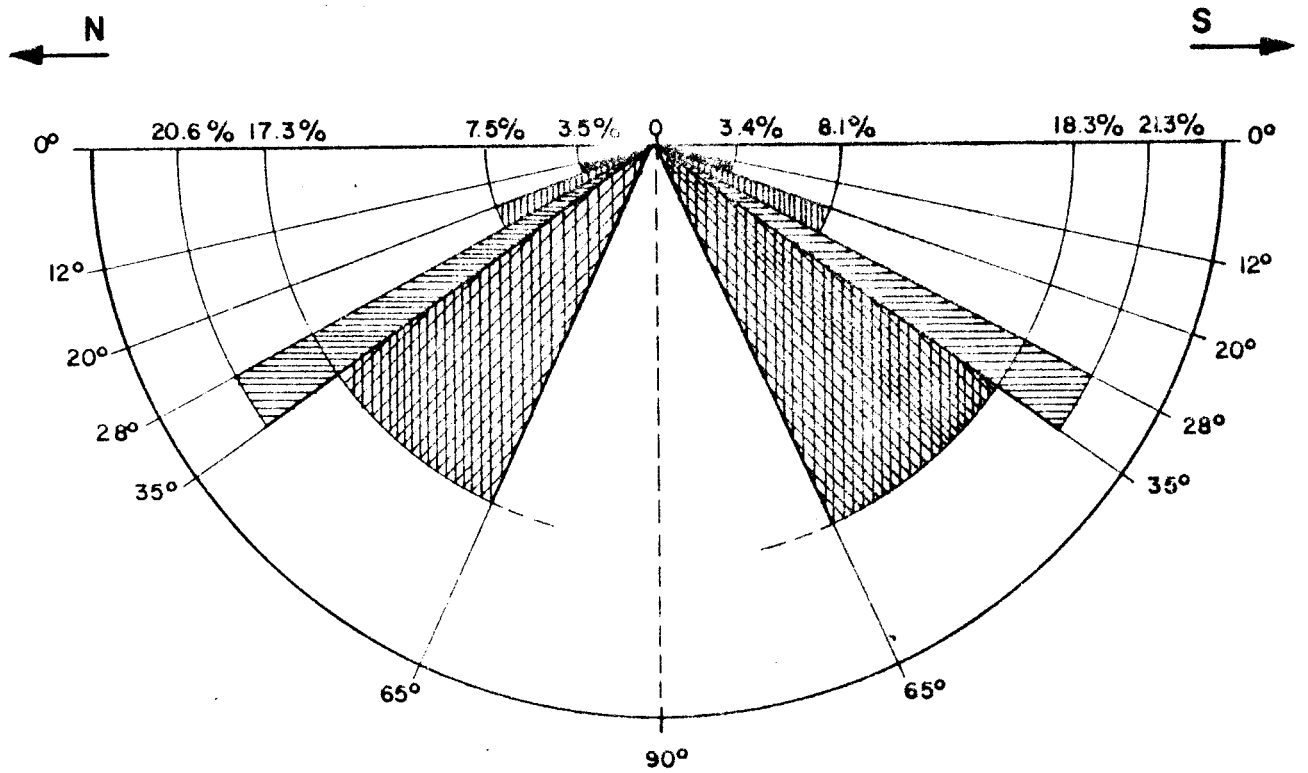


	15,6%
	9,5%
	7,6%
	11,9%
	9,4%
	0,46%
	0,08%
	4,5%

SUPERFICIE TOTAL APROXIMADA: 100 HECTAREAS.

Fig. 5

DISTRIBUCION DE BUZAMIENTOS DE PENDIENTES



- (12° - 20°) 6.9%
- (20° - 28°) 15.6%
- (28° - 35°) 41.9%
- (> 35°) 35.6%

Fig. 6

DIAGRAMA DE CONTORNO DE POLOS DE PENDIENTES
ENVOLVENTE DE PLANOS CORRESPONDIENTES.

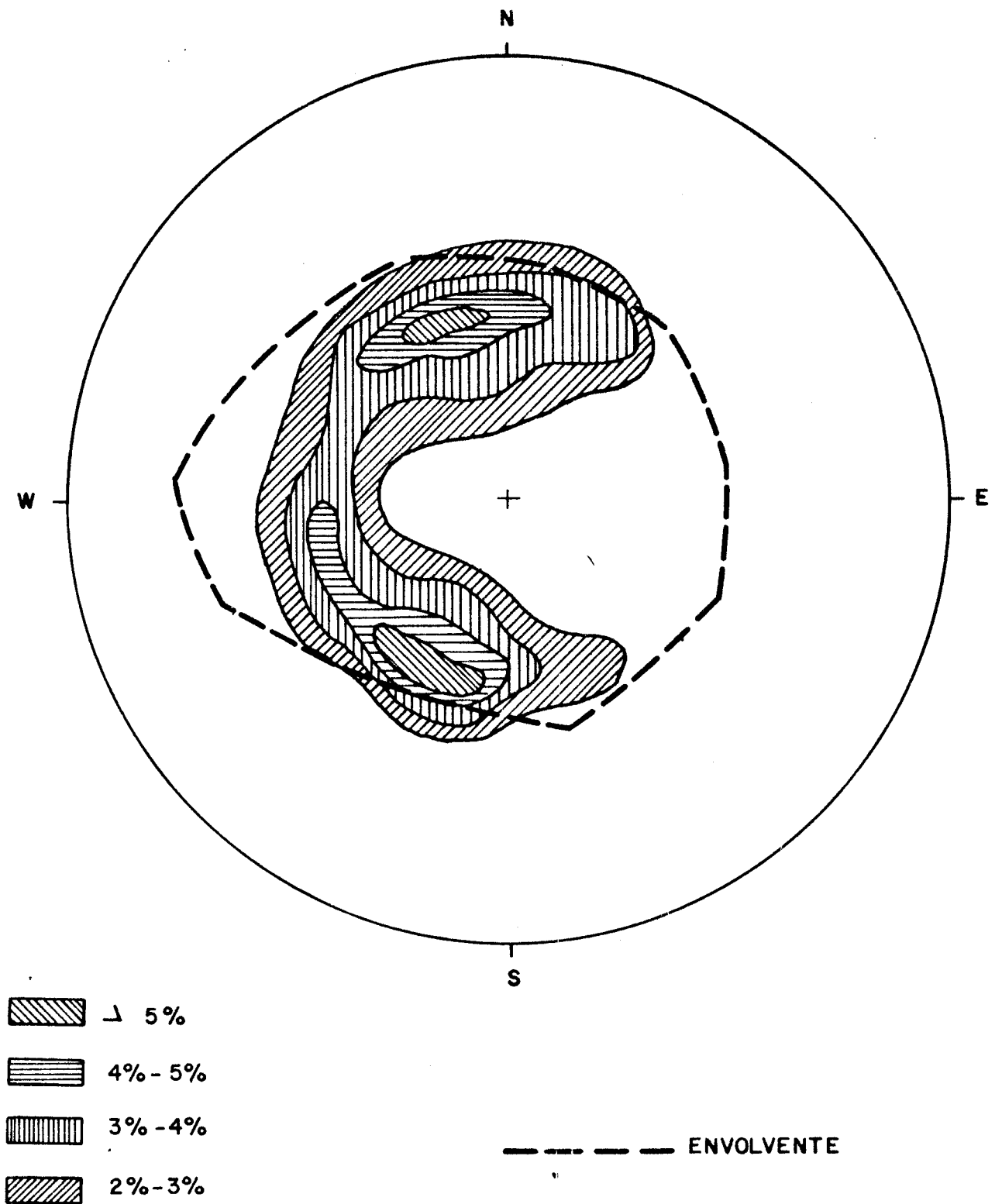
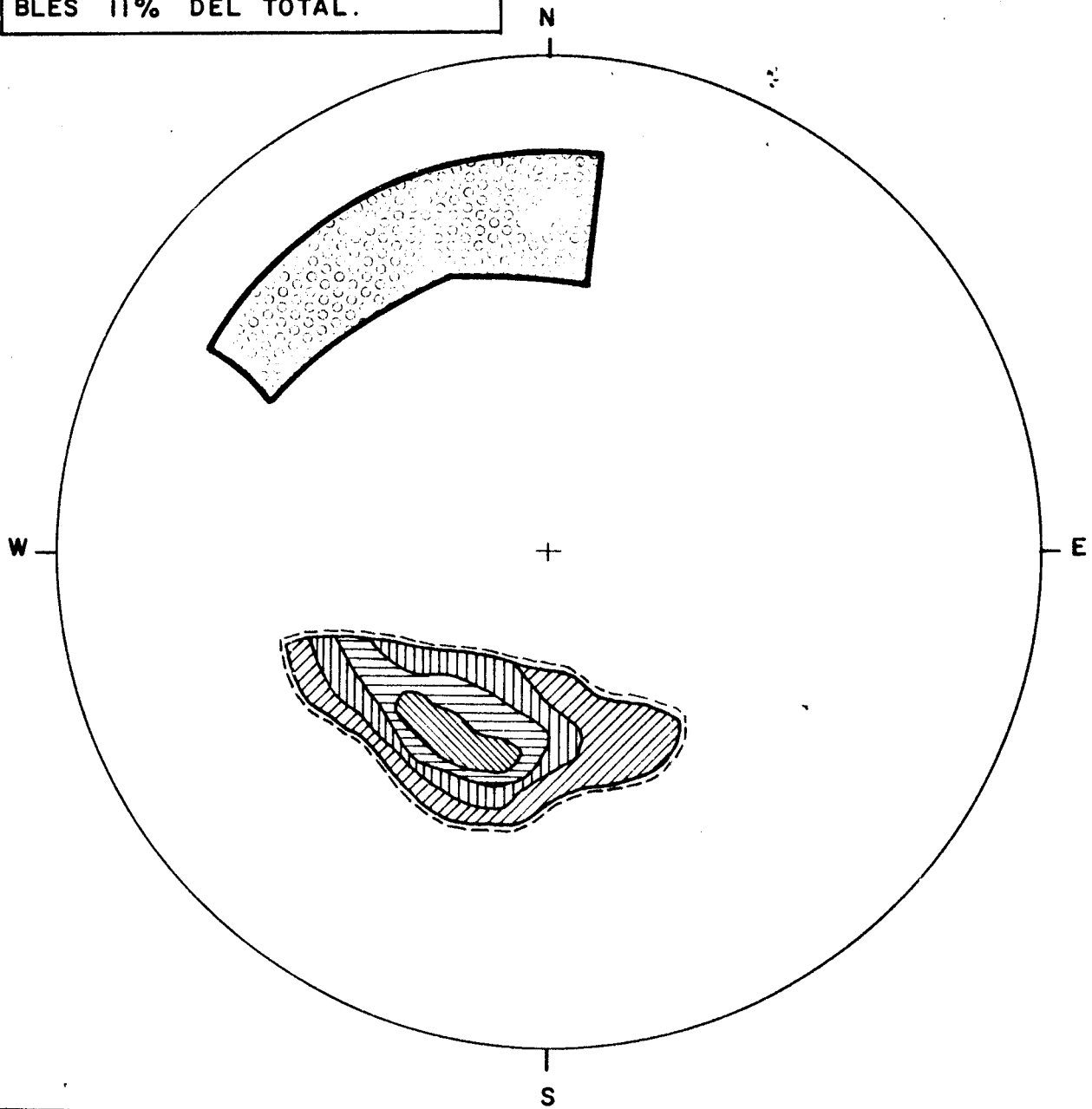

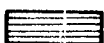





Fig. 7

DIAGRAMA DE CONTORNO DE POLOS DE PENDIENTES
POTENCIALMENTE INESTABLES .—

TALUDES PROBABLEMENTE INESTABLES 11% DEL TOTAL.



-  Δ 5%
-  4% - 5%
-  3% - 4%
-  2% - 3%

UBICACION DE LAS INTERSECCIONES FOLIACIONES - DIACLASAS POTENCIALMENTE INESTABLES (50% DEL TOTAL). 


CONTORNO DE POLOS DE PENDIENTES POTENCIALMENTE INESTABLES (22% DEL TOTAL.) 

Fig. 8

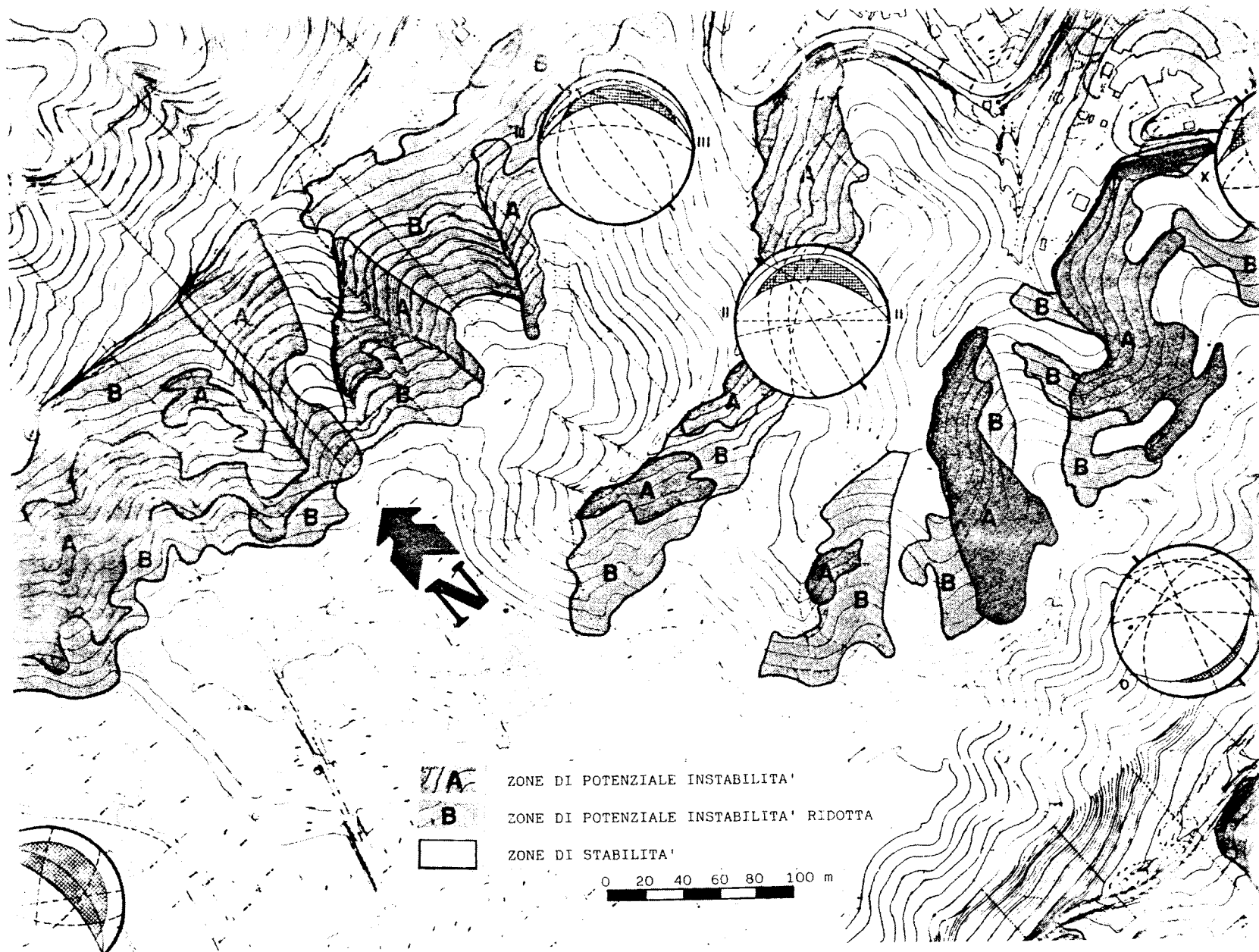


FIG. 6 - Mappa della stabilità geostrutturale

