

PÚBLICO

DOCUMENTO DEL BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO

## **ECUADOR**

### **PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA-CODO SINCLAIR**

#### **ESTUDIOS DE FACTIBILIDAD**

(EC0123)

#### **ANEXO J MECÁNICA DE ROCAS**

**ABRIL 1992**



**INECEL**

**REPUBLICA DEL ECUADOR**

**MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS**

**INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION**

---

**PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD**

**ANEXO J**  
**MECANICA DE ROCAS**

**BORRADOR**

---

**ESTUDIOS REALIZADOS POR INECEL Y LA ASOCIACION DE FIRMAS CONSULTORAS**

**ELECTROCONSULT - TRACTIONEL - RODIO**  
**ASTEC - INELIN - INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES**

---

**0209-B-160**

**FINANCIAMIENTO: INECEL - BID**

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

ANEXO J

MECANICA DE ROCAS

Borrador

Abril de 1992

---

El presente Anexo forma parte de los documentos que constituyen el Informe Final del Estudio de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair.

La documentación completa se compone de los siguientes informes:

0209-B-150	INFORME GENERAL
0209-B-151	ANEXO A: Topografía, Cartografía y Caminos
0209-B-152	ANEXO B: Hidrología y Sedimentología
0209-B-153	ANEXO C: Impacto Ambiental del Proyecto
0209-B-154	ANEXO D: Geología
0209-B-155	ANEXO E: Geofísica
0209-B-156	ANEXO F: Perforaciones y Galerías Exploratorias
0209-B-157	ANEXO G: Vulcanología
0209-B-158	ANEXO H: Sismología y Tectónica
0209-B-159	ANEXO I: Mecánica de Suelos
0209-B-160	ANEXO J: Mecánica de Rocas
0209-B-161	ANEXO K: Selección de Alternativas del Factor de Planta
0209-B-162	ANEXO L: Selección de Alternativas de Obras Componentes
0209-B-163	ANEXO M: Equipos Electromecánicos
0209-B-164	ANEXO N: Metodología Constructiva y Presupuesto del Proyecto
0209-B-165	ANEXO O: Obras Subterráneas
0209-B-166	ANEXO P: Análisis Geotécnicos, Hidráulicos y Estructurales
0209-B-167	ANEXO Q: Modelos Hidráulicos
0209-B-168	ANEXO R: Evaluaciones Económicas



---

El presente volumen constituye el Anexo J (Mecánica de Rocas) del Informe Final del Estudio de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, en el que se reportan los mapeos geoestructurales realizados en las galerías exploratorias y las determinaciones de campo efectuadas en el curso de las investigaciones profundas para las principales obras del Proyecto.

Además se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio ejecutados sobre los litotipos seleccionados entre los testigos de perforación y los resultados de los ensayos de Mecánica de Rocas "in situ" llevados a cabo en las galerías exploratorias que estuvieron a cargo del Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional en Quito.

Este volumen complementa el informe 0209-A-160, Anexo J (Mecánica de Rocas) del Estudio de Selección de Alternativas del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, Fase A, y sustituye los informes de avance 0209-B-320, 0209-B-321 y 0209-B-322, Fase B.

## INTRODUCCION

El programa de investigaciones geotécnicas para la Fase B de los Estudios de Factibilidad preveía la excavación de galerías exploratorias, la perforación de sondeos rotativos profundos y la ejecución de prospecciones geofísicas para la obtención de los parámetros geomecánicos necesarios para el diseño de las obras subterráneas.

Con este fin se programó también una campaña de ensayos de mecánica de rocas "in situ" y una serie de ensayos de laboratorio sobre los litotipos seleccionados de las diferentes unidades litológicas investigadas con las perforaciones profundas.

Todos estos ensayos estuvieron a cargo del Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Facultad de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica Nacional en Quito.

En este informe se presentará, además del análisis de los datos obtenidos de los mapeos geoestructurales de las galerías exploratorias y de las determinaciones de campo efectuadas sobre los testigos de roca recuperados en el curso de las perforaciones, también la interpretación de los ensayos de permeabilidad y de hidrofracturamiento y de las pruebas de inyección de cemento realizadas en los sondeos.

Los datos obtenidos serán comparados con los resultados de los ensayos de mecánica de rocas y procesados conjuntamente para definir los parámetros geomecánicos representativos de los tres principales macizos rocosos que serán afectados por las obras de captación, de aducción y de generación.

En vista de las grandes diferencias litológicas y mecánicas que presentan, estos macizos serán analizados por separado en las tres partes que componen este informe recopilando, al final de cada una de ellas, los principales parámetros a ser utilizados para fines de diseño:

Parte A: INTRUSIVO GRANODIORITICO

Parte B: FORMACION HOLLIN

Parte C: FORMACION MISAHUALLI

PARTE A

INTRUSIVO GRANODIORITICO

---

## INTRODUCCION

### PARTE A

#### INTRUSIVO GRANODIORITICO

#### INDICE

	Página
1. INVESTIGACIONES GEOTECNICAS	1
1.1 Perforaciones rotativas	1
1.2 Galería exploratoria GT1	4
2. INVESTIGACIONES GEOFISICAS	5
2.1 Prospección sísmica de refracción	5
2.2 Ensayos de taladro transversal	7
3. INVESTIGACIONES DE MECANICA DE ROCAS IN SITU	9
3.1 Ensayos de carga sobre placa	9
3.2 Comparación entre los parámetros estáticos y dinámicos	12
4. PERMEABILIDAD DEL MACIZO GRANODIORITICO	13
5. ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO	15
5.1 Análisis petrográfico	18
5.2 Características físicas	18
5.3 Resistencia a la compresión	19
5.4 Deformabilidad	21
5.5 Resistencia al corte	21
6. CARACTERISTICAS GEOMECHANICAS DEL MACIZO GRANODIORITICO	23
6.1 Clasificación del macizo	23
6.2 Parámetros de deformabilidad	26
6.3 Parámetros de resistencia	26
7. RESUMEN DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS PARA DISEÑO	29

#### CUADROS

Cuadro A/1	Galería exploratoria GT1 Prospección sísmica de refracción Velocidades de las ondas y módulos dinámicos	6
------------	---	---

---

Cuadro A/2	Galería exploratoria GT1 Ensayo de taladro transversal Velocidad de las ondas y módulos dinámicos	7
Cuadro A/3	Intrusivo granodiorítico Sondeos rotativos Ensayos de permeabilidad tipo Lugeon	13
Cuadro A/4	Intrusivo granodiorítico Mecánica de rocas en laboratorio Resumen de los ensayos ejecutados	16
Cuadro A/5	Intrusivo granodiorítico Resultados de los ensayos de laboratorio	17
Cuadro A/6	Intrusivo granodiorítico Parámetros de deformabilidad	26
Cuadro A/7	Intrusivo granodiorítico Parámetros de resistencia	28
FIGURAS		
Figura A/1	Intrusivo granodiorítico Investigaciones geotécnicas Ubicación de los sondeos en roca y galería exploratoria	
Figura A/2	Intrusivo granodiorítico Galería exploratoria GT1 Investigación sísmica de refracción Velocidades y parámetros dinámicos	
Figura A/3	Intrusivo granodiorítico Galería exploratoria GT1 Ubicación de las perforaciones cortas y de los ensayos de Mecánica de Rocas	
Figura A/4	Intrusivo granodiorítico Galería exploratoria GT1 Velocidades y parámetros dinámicos obtenidos con el método del taladro transversal	
Figura A/5	Intrusivo granodiorítico Galería exploratoria GT1 Ensayos de carga vertical sobre placa	

---



Figura A/6	Intrusivo granodiorítico Galería exploratoria GT1 Ensayos de carga horizontal sobre placa
Figura A/7	Intrusivo granodiorítico Ensayos de carga sobre placa Histograma resumen de los módulos de deformación
Figura A/8	Intrusivo granodiorítico Ensayos de carga sobre placa Histograma resumen de los módulos elásticos
Figura A/9	Intrusivo granodiorítico Permeabilidad del macizo en la margen derecha del sitio Presa Salado
Figura A/10	Intrusivo granodiorítico Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Compresión triaxial Semicírculos de Mohr para la definición de la envolvente de ruptura
Figura A/11	Intrusivo granodiorítico Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Compresión triaxial Parámetros de resistencia según el criterio de ruptura lineal de Coulomb
Figura A/12	Intrusivo granodiorítico Clasificación geomecánica del macizo en la margen derecha del sitio Presa Salado (corte transversal)
Figura A/13	Intrusivo granodiorítico Clasificación geomecánica del macizo en la margen derecha del sitio Presa Salado (corte longitudinal)
Figura A/14	Correlación entre el índice RMR y el módulo de deformación "in situ" Correlación entre el índice de calidad de la roca (RQD) y la relación $E_M/E_L$
Figura A/15	Ecuaciones fundamentales asociadas al criterio de ruptura de Hoek-Brown
Figura A/16	Relación entre el índice RMR y los valores de las constantes $\underline{m}$ y $\underline{s}$
Figura A/17	Intrusivo granodiorítico Envolventes de ruptura del macizo en el plano $\sigma_1$ - $\sigma_3$
Figura A/18	Intrusivo granodiorítico Envolventes de ruptura del macizo en el plano $\sigma$ - $\tau$

---

## PLANOS

- |               |  |
|---------------|--|
| 0209-G-2023-1 | Geología<br>Investigaciones geotécnicas<br>Mapa de ubicación   |
| 0209-G-2900   | Mecánica de Rocas<br>Parámetros para la descripción de los testigos y la clasificación de las unidades litológicas |
| 0209-G-2901   | Mecánica de Rocas<br>Galería exploratoria GT1<br>Mapeo geoestructural  |
| 0209-G-2902   | Mecánica de Rocas<br>Galería exploratoria GT1<br>Estereogramas de discontinuidades                                 |

## 1. INVESTIGACIONES GEOTECNICAS

El cuerpo intrusivo granodiorítico, aflorante en el sitio de la Presa Salado, fue investigado en profundidad inicialmente mediante cuatro sondeos rotativos realizados en los años 1977-78, durante los estudios enfocados a la elaboración del inventario energético de la cuenca de los ríos Quijos-Coca. Posteriormente, en el año 1990, durante la Fase B de los Estudios de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, fue excavada una galería exploratoria de 100 m de longitud denominada GT1, ubicada en la misma margen derecha del río Coca donde fueron perforados los sondeos mencionados y donde están previstas las obras de captación y la embocadura del Túnel de Aducción (Plano 0209-G-2023-1 y Figura A/1).

A continuación se resumen las determinaciones de campo relativas a estos sondeos y se presentan los aspectos geoestructurales obtenidos del mapeo detallado de la galería.

### 1.1 Perforaciones rotativas

Como se indica anteriormente, estas investigaciones fueron ejecutadas en la margen derecha del río Coca, sobre un trecho de unos 900 m, frente al Morro Salado, a partir de las cotas comprendidas entre la 1.300 y la 1.400.

Para cada uno de estos sondeos se indican brevemente los principales parámetros definidos en base a los criterios presentados en el Plano 0209-G-2900.

#### Sondeo SR-18

- Profundidad (m)	151,2
- Cota inicial	1.393,3
- Inclinación	vertical
- Cota final	1.242,1
- Cota del nivel de agua	1.326,2

Este sondeo está ubicado casi en la misma dirección de la galería exploratoria GT1 y complementa la investigación del macizo arriba y abajo de la cota de la galería. Después de 4-5 m de suelo de alteración, esta perforación atravesó el macizo granodiorítico meteorizado y alterado, con fracturas abiertas y oxidadas, hasta la cota 1.340, pasando a una roca granodiorítica grisácea con moteados verdosos, de textura granular con abundante diseminación de sulfuros (pirita). Esta roca, muy dura y sana, presenta, en general, fracturas inclinadas cerradas con carbonatos y óxidos y, solamente en algunos tramos, fracturas abiertas, oxidadas con vetas mineralizadas.

Los principales parámetros registrados son:

Recuperación	100%	
RQD	50-75% 30-50%	cota 1.300 a 1.280 cota 1.335 al fondo
Alteración	roca muy alterada a medianamente alterada roca sana a poco alterada	cota 1.393 a 1.340 cota 1.340 al fondo
Dureza	roca poco a medianamente dura roca muy dura	cota 1.393 a 1.340 cota 1.340 al fondo
Fracturación	roca extremadamente fracturada a muy fracturada roca poco fracturada a maciza	cota 1.393 a 1.350 cota 1.350 al fondo
Permeabilidad	1 a 9 UL	cota 1.283 al fondo

#### Sondeo SR-24

- Profundidad (m)	90,0
- Cota inicial	1.340,3
- Inclinación	vertical
- Cota final	1.250,3
- Cota del nivel de agua	1.333,1

Este sondeo se ubica unos 400 m aguas arriba del anterior, a una cota 50 m más baja. La perforación atravesó unos 3 m de depósitos coluviales y unos 6 m de roca granodiorítica meteorizada y muy alterada hasta la cota 1.328. A partir de esta cota, la roca investigada resultó sana y muy dura pero con fracturas subverticales e inclinadas, en general, abiertas, oxidadas y mineralizadas y frecuentes espejos de falla.

Los principales parámetros registrados son:

Recuperación	100%	
RQD	50-75% 75-100%	cota 1.330 a 1.290 cota 1.290 al fondo
Alteración	roca muy alterada roca sana	cota 1.337 a 1.328 cota 1.328 al fondo
Dureza	roca muy dura	
Fracturación	roca fragmentada roca poco fracturada	cota 1.337 a 1.328 cota 1.328 al fondo
Permeabilidad	0 a 1 UL	cota 1.287 al fondo

Sondeo SR-25

- Profundidad (m)	110,0
- Cota inicial	1.362,5
- Inclinación	vertical
- Cota final	1.252,5
- Cota del nivel de agua	1.292,5

Este sondeo está ubicado a unos 200 m aguas abajo del sondeo SR-18, a una cota 30 m más baja. Después de una reducida cobertura de suelos de alteración, la perforación atravesó roca granodiorítica profundamente meteorizada con abundante oxidación de las fracturas abiertas predominantemente inclinadas, hasta la cota 1.304. Hacia abajo la roca resultó sana a poco alterada, con presencia de abundantes fracturas, inclinadas a subverticales, abiertas, oxidadas y mineralizadas, con estrías de falla y zonas milonitizadas.

Los principales parámetros registrados son:

Recuperación	25-50%	cota 1.360 a 1.330
	50-100%	cota 1.330 a 1.290
	100%	cota 1.290 al fondo
RQD	0-30%	cota 1.360 a 1.274
	30-75%	cota 1.274 al fondo
Alteración	roca totalmente alterada a muy alterada	cota 1.360 a 1.304
	roca de poco alterada a sana	cota 1.304 al fondo
Dureza	roca poco dura	cota 1.360 a 1.304
	roca dura a muy dura	cota 1.304 al fondo
Fracturación	roca extremadamente fracturada a fragmentada	cota 1.360 a 1.293
	roca fracturada a poco fracturada	cota 1.293 al fondo
Permeabilidad	1 a 10 UL	cota 1.299 al fondo

Sondeo SR-35

- Profundidad (m)	41,3
- Cota inicial	1.309,0
- Inclinación	vertical
- Cota final	1.267,7
- Cota del nivel de agua	no alcanzado

Este sondeo se ubica a unos 300 m aguas arriba del sondeo SR-24, próximo a la quebrada que confluye en el río Coca. Debido al fuerte espesor de depósitos coluvia-



les atravesados (34 m) y a la poca profundidad perforada, este sondeo resulta ser de escaso interés para la investigación del macizo granodiorítico.

## 1.2 Galería exploratoria GT1

Esta galería, cuyo portal de entrada está en la cota 1.278, tiene una longitud de 100 m y una dirección N 58°E, aproximadamente perpendicular a la margen derecha en el sitio de la Presa Salado, y se encuentra enclavada en el macizo intrusivo granodiorítico.

El mapeo geoestructural de esta galería (Plano 0209-G-2901) ha evidenciado la presencia de roca de medianamente a muy alterada en los primeros 30 m, pasando a roca de medianamente a poco alterada en el tramo sucesivo, hasta la abscisa 0+060 m, y a roca sana en los últimos 40 m de galería.

En lo referente al grado de fracturación, éste es importante a lo largo de toda la galería. La roca se presenta medianamente fractura hasta fragmentada en los primeros 35 m, con una zona entibada entre las abscisas 0+019 y 0+024 m, correspondiente a un tramo fallado. Hasta la abscisa 0+060 m la roca resulta de muy fracturada a extremadamente fracturada, predominando la primera, mientras la segunda es más evidente en sitios próximos a las fallas. En este tramo, entre las abscisas 0+056 y 0+060 m la galería está entibada en correspondencia de la zona fallada más importante en toda la galería. En el tramo final hasta la abscisa 0+100 m la roca continúa de muy fracturada a fracturada.

La presencia de fracturas más o menos abiertas en toda la longitud de la galería produce débiles filtraciones de agua en forma de goteos, de aislados a continuos en los primeros 60 m, pasando a pequeños chorros aislados, cuyo caudal estimado es de 1 a 3 l/min, en el tramo final.

Las discontinuidades mapeadas, analizadas a través de estereogramas y por tramos de galería, evidencian los siguientes sistemas principales y secundarios (Plano 0209-G-2902):

Abscisa (m)	Sistemas de discontinuidades	
	Principal	Secundario
de 0+000 a 0+030	N 40°E/60°SE	N 60°E/70°NW
de 0+030 a 0+060	N 40°E/70°SE	N 35°E/65°NNW
de 0+060 a 0+100	N 50°E/70°SE	-
	N 30°W/60°NE	-

## 2. INVESTIGACIONES GEOFISICAS

Una vez completado el mapeo geoestructural, en la galería exploratoria GT1 fueron ejecutadas prospecciones sísmicas de refracción y ensayos para la medición de la velocidad de las ondas de corte con el método del taladro transversal.

### 2.1 Prospección sísmica de refracción

Esta investigación se realizó a lo largo de toda la galería utilizando como fuente de energía los impactos de un martillo dados a la roca cada 4 m y registrados por geófonos colocados en el piso de la galería a distancia de 1 m entre ellos (para mayores detalles véase el Anexo E del Informe Final).

El método permite la evaluación de las características geomecánicas del nivel más superficial de la roca, algo descomprimida y afectada por la excavación, mediante la determinación de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales ( $V_p$ ) y transversales ( $V_s$ ).

En el Cuadro A/1 se presentan las velocidades medidas a lo largo de la galería GT1 y los valores del módulo de corte dinámico ( $G_{DIN}$ ), del módulo de Young dinámico ( $E_{DIN}$ ) y del coeficiente de Poisson dinámico ( $\nu_{DIN}$ ), calculados con las siguientes fórmulas:

$$E_{DIN} = \rho V_p^2 (1-2\nu)(1+\nu) = 2 V_s^2 \rho (1+\nu) = 2(1+\nu)G$$

$$G = \rho V_s^2$$

$$\nu_{DIN} = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2[(V_p/V_s)^2 - 1]}$$

donde:

$\rho$  = densidad asumida      2,40 g/cm<sup>3</sup> (hasta la abscisa 0+035 m)  
    2,66 g/cm<sup>3</sup> (desde 0+035 hasta 0+100 m)

Cuadro A/1

Galería exploratoria GT1-

Prospección sísmica de refracción

## VELOCIDAD DE LAS ONDAS Y MODULOS DINAMICOS

Abscisa (m)	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$G_{DIN}$ (MPa)	$E_{DIN}$ (MPa)	$\nu_{DIN}$
0+000	1.300	670	1.077	2.842	0,32
0+010	1.500	780	1.460	3.839	0,31
0+020	1.700	938	2.112	5.411	0,28
0+030	2.920	1.520	5.545	14.573	0,31
0+040	2.290	1.217	3.940	10.268	0,30
0+050	2.435	1.240	4.090	10.838	0,32
0+060	2.400	1.288	4.413	11.453	0,30
0+070	2.668	1.300	4.495	12.087	0,34
0+080	2.650	1.470	5.748	14.689	0,28
0+090	3.000	1.770	8.334	20.550	0,23
0+100	3.300	2.000	10.640	25.743	0,21

En la Figura A/2 se ilustra la variación de las velocidades sísmicas medidas en comparación con los módulos dinámicos calculados, evidenciándose que:

$V_p$  varía entre 1.300 y 3.300 m/s  
 $V_s$  varía entre 670 y 2.000 m/s

mientras que:

$E_{DIN}$  varía entre 2.800 y 25.700 MPa  
 $G_{DIN}$  varía entre 1.070 y 10.600 MPa

Los valores más bajos corresponden al tramo inicial de la galería donde la roca se presenta muy descomprimida. De todas maneras cabe anotar que todos los valores sísmicos, y en particular los de  $V_p$  y  $V_s$ , son muy bajos para una granodiorita. Sin embargo, esto está relacionado con el proceso de excavación y con el elevado grado de descompresión del macizo en proximidad de la ladera del valle del río Coca.

Esto se refleja en la clasificación del tipo de roca que hasta la abscisa 0+080 m varía de muy mala a mala, mejorando las condiciones estructurales solamente en los últimos 20 m con un notable aumento de los parámetros dinámicos.

## 2.2 Ensayos de taladro transversal

Estos ensayos fueron realizados en once sondeos cortos, de 3 a 8 m de profundidad, de diámetro NW, perforados en el piso de la galería exploratoria GT1 distribuidos con una separación variable hasta 8 m, a lo largo de toda la galería (Figura A/3).

Para la generación de las ondas de corte se utilizó un martillo de impacto colocado en estos sondeos a profundidades mayores de 2 m. La recepción del arribo de las ondas se realizó por medio de un geófono colocado en el interior de otro sondeo de la misma profundidad a la que se realizó el impacto. Los tiempos de arribo de las ondas fueron medidos mediante un sistema de computadora portátil, la misma que almacenaba los resultados.

Se analizaron por lo menos diez impactos por sondeo hasta obtener lecturas estadísticamente consistentes.

En el Cuadro A/2 se presentan las velocidades medidas en cada sondeo, los valores de los módulos elásticos y dinámicos y el coeficiente de Poisson calculados.

Cuadro A/2

Galería exploratoria GT1  
Ensayos de taladro transversal  
VELOCIDAD DE LAS ONDAS Y MODULOS DINAMICOS

Abscisa (m)	$V_p^*$ (m/s)	$V_s^*$ (m/s)	$G_{DIN}$ (MPa)	$E_{DIN}$ (MPa)	$\nu_{DIN}$
0+003 a 0+011	2.845	1.532	17.055	6.583	0,30
0+011 a 0+018	2.865	1.534	17.592	6.771	0,30
0+018 a 0+027	3.007	1.581	18.362	7.014	0,30
0+027 a 0+035	2.882	1.455	16.013	6.047	0,32
0+035 a 0+044	2.839	1.517	16.974	6.528	0,30
0+044 a 0+053	2.824	1.518	16.933	6.562	0,29
0+053 a 0+062	2.467	1.411	13.693	5.448	0,25
0+062 a 0+071	2.835	1.656	19.365	7.809	0,24
0+071 a 0+080	3.667	1.561	18.972	6.827	0,38
0+080 a 0+089	3.573	1.645	20.877	7.646	0,36

\*: Valores promedio de ida y vuelta

En la Figura A/4 se ilustra la variación de velocidad de las ondas en comparación con los módulos dinámicos calculados, evidenciándose que:

$V_p$	varía entre	2.800	y	3.570	m/s
$V_s$	varía entre	1.400	y	1.650	m/s

mientras que:

$E_{DIN}$	varía entre	13.500	y	20.800	MPa
$G_{DIN}$	varía entre	5.500	y	7.800	MPa

Cabe anotar que la distribución de estos valores es bastante parecida a la obtenida con la prospección sísmica de refracción, aunque los parámetros determinados de ésta sean más bajos por haberse medido niveles de roca más superficiales, afectados por la excavación.

Los resultados de los ensayos de taladro transversal confirman un apreciable mejoramiento de la roca a partir de la abscisa 0+080 m, hasta el fondo de la galería, y además resaltan la presencia de las zonas falladas reconocidas durante el mapeo geoestructural.



### 3. INVESTIGACIONES DE MECANICA DE ROCAS IN SITU

Para la determinación de las características mecánicas de deformabilidad del macizo granodiorítico, en la galería exploratoria GT1 fueron ejecutados ensayos de carga vertical y horizontal sobre placa, utilizando un gato hidráulico con una capacidad máxima de 200 t y placas metálicas circulares de 30 y 50 cm de diámetro y de 5 cm de espesor. Las deformaciones fueron medidas con deformímetros mecánicos con una sensibilidad de 0,01 mm.

En cada ensayo se realizaron 3-4 ciclos de carga cuya duración era de, por lo menos, seis horas cada uno. Para evitar cargas excéntricas se utilizó una rótula de giro entre el gato y el vástago de extensión.

#### 3.1 Ensayos de carga sobre placa

Los ensayos de carga realizados en la galería GT1 fueron los siguientes (Figura A/3):

- 2 ensayos de carga vertical con medida de las deformaciones en el piso, ubicados en las abscisas 0+068 y 0+093 m, respectivamente.
- 2 ensayos de carga horizontal con medida de las deformaciones en el hastial izquierdo, ubicados en las abscisas 0+070 y 0+100 m, respectivamente.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

- Ensayo de carga vertical (Figura A/5)

Abscisa 0+068 m

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-4,6	3.208	21.919
0-6,9	4.583	23.192
0-12,1	4.743	22.344
0-18,4	6.368	-
	$\bar{x}$	22.485
	s	648

Módulo de deformación global = 2.502 MPa.

- Ensayo de carga vertical (Figura A/5)

Abscisa 0+093 m

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-4,6	3.058	16.404
0-6,9	3.942	17.921
0-12,1	4.074	16.492
0-18,4	6.561	-
$\bar{x}$	4.409	16.939
s	1.504	851

Módulo de deformación global = 2.410 MPa.

- Ensayo de carga horizontal (Figura A/6)

Abscisa 0+070 m. Hastial izquierdo

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-2,8	3.313	15.291
0-5,7	6.922	24.524
0-8,6	10.460	27.099
0-11,4	11.702	47.593
$\bar{x}$	8.099	28.627
s	3.780	13.623

Módulo de deformación global = 4.131 MPa.

- Ensayo de carga horizontal (Figura A/6)

Abscisa 0+100 m. Hastial izquierdo

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-5,7	6.086	16.930
0-6,4	11.433	21.489
0-13,0	9.315	39.900
$\bar{x}$	8.944	26.106
s	2.692	12.161

Módulo de deformación global = 5.490 MPa.

La variación de los módulos de deformación y elástico en cada uno de estos ensayos se ilustra gráficamente en los histogramas de las Figuras A/7 y A/8.

En base a lo indicado y del análisis de las figuras citadas se concluye lo siguiente:

- Todos los ensayos evidencian el cierre total de las fracturas afectadas; sin embargo el macizo presenta fracturas muy abiertas que tampoco con ciclos de carga de 18 MPa se cierran completamente.
- En el interior del macizo destacaría la presencia de dos direcciones diferentes de deformación:
  - En el plano vertical:  $E_{DEF} = 4.500 \text{ MPa}$  aprox. promedio
  - En el plano horizontal:  $E_{DEF} = 8.500 \text{ MPa}$  aprox. promedio
- Considerando un esfuerzo vertical máximo de 7 MPa, aproximadamente, que actúa encima de la galería GT1, podrían considerarse representativos los siguientes módulos:

Abscisa (m)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0+068 ▲	4.500	23.000
0+093 ▲	4.000	18.000
0+070 ○	9.000	26.000
0+100 ○	12.000	22.000

▲ Ensayo de carga vertical  
 ○ Ensayo de carga horizontal

(Anotamos que el esfuerzo máximo de 7 MPa asumido es igual a  $2,5 \cdot \gamma \cdot h$ , donde: 2,5 es un factor relativo al esfuerzo máximo sobre un túnel de sección circular;  $\gamma$  es el peso específico de la roca =  $2,8 \text{ t/m}^3$ ; y  $h$  una altura de 100 m).

Entonces en las abscisas 0+070 y 0+100 m de la galería tendríamos los siguientes módulos:

Abscisa (m)	$E_{DEF}$ (MPa)		$E_{EL}$ (MPa)	
	vertical	horizontal	vertical	horizontal
0+070	4.500	9.000	23.000	26.000
0+093	4.000	12.000	18.000	22.000

### 3.2 Comparación entre los parámetros estáticos y dinámicos

Los resultados obtenidos de estos ensayos de deformabilidad, comparados con los módulos dinámicos calculados en base a las investigaciones geofísicas realizadas en la galería GT1 aproximadamente en los mismos lugares, permiten determinar las siguientes relaciones:

Abscisa (m)	Prospección sísmica $E_{DIN}$ (MPa)	Ensayo de taladro transversal $E_{DIN}$ (MPa)	Ensayo de carga directa	
			$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0+068	12.000	19.000	4.500 ▲	23.000 ▲
0+070	12.000	19.000	9.000 ○	26.000 ○
0+093	20.000	21.000	4.000 ▲	18.000 ▲
0+100	25.500	-	12.000 ○	22.000 ○

▲ Ensayo de carga vertical

○ Ensayo de carga horizontal

Asumiendo como más representativos los módulos obtenidos de los ensayos de taladro transversal menos afectados por las condiciones de la roca se obtiene:

$$\begin{array}{ll}
 E_{DIN}/E_{DEF} = 4-5 & \text{para el módulo de deformación vertical} \\
 E_{DIN}/E_{DEF} = 2 & \text{para el módulo de deformación horizontal} \\
 E_{DIN}/E_{DEF} = 0,7-1,2 & \text{para el módulo de elasticidad horizontal y vertical}
 \end{array}$$

#### 4. PERMEABILIDAD DEL MACIZO GRANODIORÍTICO

Para evaluar las condiciones de permeabilidad del macizo granodiorítico en la zona de las obras de captación se dispone de los ensayos de pérdida de agua tipo Lugeon ejecutados en tres de los cuatro sondeos perforados en la margen derecha del sitio Salado y de las observaciones hechas en el curso del mapeo geoestructural de la galería exploratoria GT1.

A continuación se presentan los valores UL medidos en los sondeos y la interpretación del correspondiente tipo de flujo, según Housby (1976).

Cuadro A/3

Intrusivo granodiorítico

Sondeos rotativos

##### ENSAYOS DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON

Sondeo	Profundidad (m)	Cota (m s.n.m.)	Unidad Lugeon (UL)	Tipo de flujo
SR-18	110	1.283	4	Lavado de relleno
	116	1.277	9	Laminar
	122	1.271	3	Turbulento
	125	1.268	2	Lavado de relleno
	128	1.265	0,2	Lavado de relleno
	132	1.261	4	Laminar
	138	1.255	0,2	Laminar
	144	1.249	0,2	Laminar
SR-24	58	1.282	0	Impermeable
	63	1.277	0,5	Turbulento
	68	1.272	0	Impermeable
	71	1.269	0	Impermeable
	74	1.266	0	Impermeable
	87	1.253	0	Impermeable
SR-25	88	1.274	1	Saturación de vacíos
	91	1.271	4	Laminar
	94	1.268	0,3	Lavado de relleno
	97	1.265	2	Lavado de relleno
	100	1.262	10	Laminar
	103	1.259	1	Lavado de relleno
	107	1.255	0,2	Laminar



En la galería GT1 una evaluación de la permeabilidad es posible solamente en el último tramo entre las abscisas 0+075 y 0+100 m donde fueron registradas filtraciones de hasta 3 l/min. Por lo tanto, estimando en esta zona un caudal de 50 l/min y una carga hídrica de 5 atm, se obtiene:

$$UL = Q \cdot \frac{10}{P} = \frac{50}{25} \cdot \frac{10}{5} = 4$$

Los valores de permeabilidad indicados han sido correlacionados entre ellos en un corte geológico esquemático de la margen derecha en el sitio Presa Salado (Figura A/9), observándose que, en la zona de las obras de captación, el macizo presenta una permeabilidad mediana (5 a 10 UL) a baja (1 a 5 UL), pasando a impermeable a niveles más profundos. Cabe anotar que los bajos valores de permeabilidad en un macizo bastante descomprimido, están relacionados a la presencia en las fracturas de abundante arcilla de alteración y de material de oxidación.

## 5. ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

Con el fin de complementar los parámetros obtenidos de las pruebas y determinaciones de campo efectuadas sobre los testigos de perforación, se llevó a cabo una serie de análisis petrográficos y de ensayos de laboratorio sobre muestras extraídas de la galería exploratoria GT1 y de los sondeos cortos ejecutados en el piso de la misma galería para los ensayos de taladro transversal.

Los resultados de estos ensayos fueron comparados con aquellos obtenidos durante la Fase A de los Estudios de Factibilidad y relativos a una roca intrusiva granodiorítica alcanzada en uno de los sondeos (ST3) realizado a lo largo del Túnel de Aducción.

En el Cuadro A/4 se presenta la cantidad de ensayos de laboratorio realizados, mientras que en el Cuadro A/5 se resumen todos los resultados de los ensayos relativos a muestras de granodiorita.

## Cuadro A/4

Intrusivo granodiorítico

Mecánica de rocas en laboratorio

## RESUMEN DE LOS ENSAYOS EJECUTADOS

Ubicación	Análisis petrográfico	Peso específico	Porosidad	Compresión simple	Compresión monoaxial	Compresión triaxial	Carga puntual	Martillo Schmidt	Velocidad sónica	Corte directo	Abrasión
<u>Sitio Presa Salado</u>											
Galería GT1	1	2	2	-	-	-	4	-	-	-	-
Sondeos cortos											
SC9	-	1	1	1	1	-	1	1	1	-	-
SG19	1	1	1	1	-	1	-	1	1	-	1
SC21	-	1	1	-	1	-	1	1	1	-	-
<u>Túnel de Aducción</u>											
ST3	1	2	1	2	-	-	3	-	2	1	1
TOTALES	3	7	6	4	2	1	9	3	5	1	2

Cuadro A/5  
Intrusivo granodiorítico  
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Galería o sondeo	Muestra No.	Abscisa o Profundidad (m)	Propiedades generales			Resistencia a la Compresión					Deformabilidad		Velocidad Sónica (m/s)	Resistencia al Corte		Desgaste a la Abrasión		Fase
			Peso Específico natural (g/cm³)	Peso Específico seco (g/cm³)	Porosidad (%)	Monoaxial (MPa)	Puntual		Resistencia Schmidt (MPa)	Dureza Schmidt (No. rebotes)	Módulo Elástico (MPa)	Coeficiente de Poisson		φ Máximo (°)	φ Residual (°)	Pérdida (%)	Coeficiente de Uniformidad	
							Axial (MPa)	Diametral (MPa)										
6T1	16	0+080	-	2.801	0.5	-	-	7.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	A
	17	0+085	-	-	-	-	-	10.6	-	-	-	-	-	-	-	-		
	18	0+090	-	2.915	2.0	-	-	9.2	-	-	-	-	-	-	-	-		
	29	0+095	-	-	-	-	-	5.8	-	-	-	-	-	-	-	-		
S69	A	7.00	2.804	2.802	0.2	120.0	-	3.8	129.0	45.4	69767	0.3	5795	-	-	-	A	
S619	C	8.00	2.801	2.800	0.2	158.6	-	-	131.0	45.7	-	-	5795	-	17.00	0.23		
S621	B	8.00	2.798	2.794	0.1	201.4	5.0	5.3	131.0	45.6	66250	0.2	5771	-	-	-		
Σ			2.801	2.822	0.6	160.0	5.0	7.0	130.3	45.5	68008	0.25	5787	-	17.00	0.23		
s			0.003	0.005	0.8	40.7	-	2.5	1.2	0.2	2487	0.07	138					
S13	15	331.00	2.790	-	-	70.0	-	12.3	-	-	-	-	5200	-	-	-	-	B
	16	342.00	2.810	2.810	0.8	176.0	-	5.0	-	-	-	-	5450	54.5	39.0	14.10	0.32	
	17	344.00	-	-	-	-	-	6.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Σ		2.800	2.810	0.8	123.0	-	7.9	-	-	-	-	-	5325	54.5	39.0	14.10	
s			0.010	-	-	75.0	-	3.8	-	-	-	-	176					
FASE A-B			2.800	2.820	0.6	145.0	5.0	7.3	130.3	45.5	68008	0.25	5577	54.5	39.0	15.50	0.27	
			0.007	0.040	0.7	51.0	-	2.8	1.2	0.2	2487	0.07	291	-	-	2.00	0.06	

### 5.1 Análisis petrográfico

Los análisis petrográficos mediante láminas delgadas de algunas muestras extraídas de la galería exploratoria GT1 y de los sondeos cortos realizados en la misma galería, han permitido definir que el cuerpo intrusivo del Salado está constituido por una roca ígnea de textura granular gruesa, compuesta por feldespatos andesínicos (85%), anfíboles tipo hornblenda (7-10%), piroxeno tipo hipersteno y augita (2-3%), sulfuros y trazas de biotita y óxido de hierro. Esta roca, clasificada como una granodiorita, se presenta en general sana y compacta; solamente en correspondencia de tramos muy fracturados y fallados la roca se presenta de alterada a muy alterada, afectada por un proceso de seritización de los feldespatos y de cloritización de los minerales máficos (anfíboles).

En el interior del macizo la alteración de la roca se evidencia sobre todo en los costados de las discontinuidades rellenadas por arcilla y material oxidado producido por alteración de la brecha de fricción o por acarreo de material fino por el agua de circulación.

Las muestras de granodiorita obtenidas del sondeo ST3, en el sector del Túnel de Aducción, evidencian una roca con las mismas características petrográficas pero con indicios de un proceso de metamorfismo térmico que determinó la seritización de la masa rocosa. El mismo proceso es evidente en los litotipos limítrofes de la formación Misahuallí, lo cual confirmaría que el fenómeno está relacionado a la intrusión de un cuerpo granodiorítico a elevada temperatura.

### 5.2 Características físicas

Los parámetros físicos básicos determinados en laboratorios fueron los siguientes:

- . peso específico natural
- . peso específico seco
- . porosidad
- . velocidad sónica
- . desgaste a la abrasión

El peso específico natural ( $\gamma$ ) y el peso específico seco ( $\gamma_s$ ) de la granodiorita resultaron ser, prácticamente, los mismos. Las pequeñas diferencias registradas están relacionadas probablemente a la misma tecnología de ensayo. Entonces, para fines de cálculo se puede asumir un valor de  $\gamma$  y  $\gamma_s$  de  $2,80 \text{ g/cm}^3$ .

La porosidad de la granodiorita resultó ser muy baja de 0 a 1%; los valores más elevados obtenidos están relacionados a la presencia de microfracturas.

La determinación de la velocidad sónica en especímenes intactos de granodiorita, o sea de la velocidad de las ondas elásticas  $V_p$ , indicó valores variables entre 5.500 y 6.000 m/s que son típicos de una roca cristalina, sana y compacta.

Los ensayos de desgaste a la abrasión (Los Angeles) para muestras mayores de 19 mm evidenciaron un porcentaje de pérdida de 15-16% y un coeficiente de uniformidad de desgaste de 0,27, que indican una elevada resistencia de la granodiorita a los procesos erosivos.

### 5.3 Resistencia a la compresión

Los ensayos de laboratorio realizados para determinar la resistencia a la compresión de la roca granodiorítica intacta fueron los siguientes:

- . Ensayo de carga puntual
- . Prueba con martillo Schmidt
- . Compresión monoaxial
- . Compresión triaxial

En base a estos ensayos se midieron los siguientes parámetros:

- . Carga de ruptura o esfuerzo máximo de ruptura  $\sigma$
- . Angulo de fricción  $\phi$
- . Cohesión  $c$

Los ensayos de carga puntual y la prueba con martillo Schmidt son de rápida ejecución en laboratorio y en el campo y los resultados obtenidos pueden ser correlacionados con los valores de resistencia a la compresión. Por esta razón, una vez definido el índice de correlación existente por cada litotipo, en una etapa de construcción, se pueden utilizar estos ensayos expeditivos para conocer rápidamente el esfuerzo máximo de ruptura  $\sigma_c$ .

- . Resistencia a carga puntual

El índice  $I_{s(50)}$  obtenido del ensayo de carga puntual se relaciona con el valor del esfuerzo máximo de ruptura a la compresión monoaxial ( $\sigma_c$ ) mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = 24 I_{s(50)}$$

donde el coeficiente 24 puede variar en función de la litología y de la anisotropía de la formación o del macizo.

El índice promedio  $I_{s(50)}$  obtenido de los ensayos realizados sobre las muestras de granodiorita es 7,3 MPa, de manera que la relación con el valor de resistencia a la compresión es:

$$\sigma_c = 20 I_{s(50)}$$

### Prueba con martillo Schmidt

Los valores de resistencia ( $\sigma$ ) obtenidos de las pruebas con martillo Schmidt se relacionan con el valor del esfuerzo máximo de ruptura ( $\sigma_c$ ) mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = 10 \times 10^{(0,00874 \gamma \cdot R)}$$

donde:

$\gamma$  = peso de volumen ( $t/m^3$ )

$R$  = valor del rebote

$\sigma$  = resistencia última a la compresión monoaxial (MPa)

El valor promedio de la resistencia de Schmidt ( $\sigma$ ) obtenido de los ensayos sobre muestras de granodiorita es 130,3 MPa, de manera que la relación con  $\sigma_s$  es:

$$\sigma_c = 1,2 \sigma$$

### Compresión monoaxial

El valor promedio de resistencia última obtenido de los ensayos de compresión sobre muestras de granodiorita es:

$$\sigma_c = 145 \text{ MPa}$$

que puede ser considerado un valor típico de una roca muy dura, sana y compacta que puede resistir a grandes esfuerzos verticales como son los que se registrarán a lo largo del Túnel de Aducción.

### Compresión triaxial

Para determinar la envolvente de ruptura, el ángulo de fricción y la cohesión de la granodiorita intacta se realizó un ensayo triaxial sobre especímenes obtenidos de los testigos de perforación, diámetro N, recuperados en los sondeos cortos ejecutados en la galería GT1.

Los resultados del ensayo:

Sondeo	Muestra No.	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)
SG19	C	14,0	301,2	158,6
		21,0	361,4	-

se presentan en la Figura A/10 donde los semicírculos de Mohr delimitan la envolvente de ruptura que a su vez define, por cada valor de  $\sigma$  normal, diferentes valores de ángulo de fricción y de cohesión.

Los resultados del ensayo triaxial, analizados en base al criterio de ruptura lineal de Coulomb (Brown, 1981), están ilustrados en la Figura A/11, donde se evidencian los parámetros obtenidos:

$$\phi = 55^\circ, \quad c = 25 \text{ MPa}$$

#### 5.4 Deformabilidad

Durante la ejecución de los ensayos de compresión monoaxial instrumentada, se determinaron también las deformaciones diametrales y axiales de los especímenes para el cálculo del módulo de deformación secante y tangente y de los relativos coeficientes de Poisson.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Sondeo	Muestra No.	Módulo secante $E_s$ (MPa)	Módulo tangente $E_t$ (MPa)	$\nu_s$	$\nu_t$
SG9	A	69.767	60.140	0,30	0,30
SG21	B	66.250	74.250	0,20	0,24

Por lo tanto los valores promedio redondeados son:

$$\begin{aligned} E_s &= 68.000 \text{ MPa} \\ E_t &= 67.200 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Comparando estos módulos obtenidos en laboratorio ( $E_{DEF}$ ) con aquellos obtenidos de los ensayos "in situ" ( $E_{DEF'}$ ) se arriba a la siguiente relación:

$$\begin{aligned} E_{DEF}/E_{DEF'} &\approx 7 \quad \text{para ensayos de carga vertical} \\ E_{DEF}/E_{DEF'} &\approx 15 \quad \text{para ensayos de carga horizontal} \end{aligned}$$

#### 5.5 Resistencia al corte

Los parámetros de resistencia de las discontinuidades, es decir el ángulo de fricción máximo  $\phi_{MAX}$ , y el ángulo de fricción residual  $\phi_R$ , se obtienen de los ensayos de corte directo en laboratorio.

Una discontinuidad bien representativa, encontrada en la granodiorita del sondeo ST3, en el sector Túnel de Aducción, fue sometida a corte directo obteniéndose los siguientes resultados que pueden ser considerados bastante representativos de este litotipo considerada su homogeneidad.



---

Sondeo	Muestra No.	$\phi_{MAX}$	$\phi_R$
ST3	I6	54,5°	39°

## 6. CARACTERISTICAS GEOMECHANICAS DEL MACIZO GRANODIORITICO

Para una adecuada evaluación de los parámetros de deformabilidad y resistencia del macizo granodiorítico, se efectuó una clasificación de la unidad litológica investigada mediante la galería exploratoria GT1 y los cuatro sondeos rotativos perforados en la margen derecha del sitio Presa Salado.

Para alcanzar este objetivo se utilizó el método de clasificación de Bieniawski (1979) integrado por el método para la descripción de los testigos de perforación y de las unidades litológicas, adaptado al Proyecto, que se presenta en el Plano 0209-G-2900. La aplicación de estos métodos ha permitido obtener por cada unidad el índice RMR (Rock Mass Rating).

Posteriormente con los métodos de Hoek-Brown y de Barton basados sobre criterios de ruptura no lineales, se determinaron las envolventes de ruptura típicas del macizo granodiorítico del sitio Salado al cual se refieren la casi totalidad de los datos disponibles.

### 6.1 Clasificación del macizo

La clasificación del macizo en la zona de la galería GT1 se realizó en base a la determinación de sus características geoestructurales. El mapeo detallado llevado a cabo a lo largo de la galería ha permitido diferenciar los siguientes tramos cuya descripción es:

Abscisa (m)			
0+000	a	0+030	Roca muy descomprimida con fracturas abiertas (hasta varios centímetros), rellenas con arcilla y material de alteración. Goteos continuos. Desprendimiento en la clave. Tramo entibado de 0+020 a 0+025 m.
0+030	a	0+055	Roca muy fracturada y descomprimida. Disminuye la abertura de las fracturas y la cantidad de relleno en las mismas. Goteos aislados. Presencia de cuñas inestables en la clave y las paredes.

0+055	a	0+065	Roca fallada y muy fracturada con brecha milonitizada y arcilla. Goteos continuos. Tramo entibado de 0+055 a 0+065 m.
0+065	a	0+080	Condiciones de la roca análogas a las del tramo 0+030 a 0+055 m.
0+080	a	0+100	Roca fracturada pero menos descomprimida y, en general, más compacta. La mayoría de las fracturas están cerradas y la presencia de arcilla en las discontinuidades ha disminuido. Presencia de chorros débiles de agua relacionados con la intersección de la napa freática del macizo.

Con base en estas observaciones de campo se elaboró la siguiente clasificación geomecánica (Figura A/12).

Abscisa (m)	Indice RMR	Tipo de roca	Calidad de roca
0+000 a 0+030	< 20	V	muy mala
0+030 a 0+055	30	IV	mala
0+055 a 0+065	< 20	V	muy mala
0+065 a 0+080	30	IV	mala
0+080 a 0+100	50	III	regular

En conclusión la roca investigada con la galería GT1 es, en un 80%, de calidad mala a muy mala, debido al grado de descompresión de la ladera del valle del río Coca que disminuye hacia el interior del macizo, como es evidente en los últimos 20 m de galería.

Ampliando los comentarios al macizo granodiorítico investigado con los sondeos rotativos SR-18, SR-24, SR-25 y SR-35 ejecutados durante la etapa de inventario energético, se puede elaborar la siguiente clasificación geomecánica con base en los registros de perforación (Figura A/13).

Sondeo	Cota (m s.n.m.)	Espesor (m)	Tipo de roca	Calidad de roca
SR-18	1.393-1.333	60	IV	mala
	1.333-1.278	55	III	regular
	1.278-1.242	36	II	buena
SR-24	1.340-1.337	3	coluvium	-
	1.337-1.328	9	V	muy mala
	1.328-1.312	16	II	buena
	1.312-1.301	11	III	regular
	1.301-1.393	8	II	buena
	1.393-1.289	4	III	regular
	1.289-1.281	8	II	buena
	1.281-1.270	11	III	regular
	1.270-1.250	20	II	buena
SR-25	1.362-1.360	2	coluvium	-
	1.360-1.313	47	V	muy mala
	1.313-1.309	4	III	regular
	1.309-1.304	5	V	muy mala
	1.304-1.292	12	IV	mala
	1.292-1.286	6	III	regular
	1.286-1.276	10	IV	mala
	1.276-1.259	17	III	regular
SR-35	1.309-1.275	34	coluvium	-
	1.275-1.268	7	V	muy mala

Analizando las dos clasificaciones geomecánicas se nota la completa correlación entre ellas y, consecuentemente, las siguientes evidencias:

- En la ladera de la margen derecha del río Salado la roca granodiorítica se encuentra muy descomprimida.
- Al interior del macizo la calidad de la roca va mejorando, pasando de regular a buena, a medida que disminuye el efecto de la descompresión.
- Los sondeos confirman el mejoramiento de la roca en profundidad hasta encontrar roca de tipo II con un índice promedio  $RMR = 70$ .
- El Túnel de Aducción cruzará entonces un tramo inicial de 80 m de roca mala a muy mala, luego un tramo de 30 a 50 m de roca regular, hasta alcanzar roca buena que debería continuar hasta el contacto con la formación Misahuallí en la abscisa 0+600-0+700 m.

## 6.2 Parámetros de deformabilidad

El índice RMR está relacionado directamente con el módulo de deformabilidad en sitio ( $E_M$ ) por medio de la siguiente relación propuesta por Bieniawski (1978):

$$E_M = 2 \text{ RMR} - 100 \text{ GPa} \quad \text{por valores de RMR mayores de 50}$$

Posteriormente esta ecuación ha sido modificada por Serafim-Pereira (1983) para adaptarla a valores de RMR menores de 50 (Figura A/14):

$$E_M = 10^{\text{RMR}-10/40} \text{ GPa}$$

A continuación se presentan los módulos de deformación relativos a los diferentes tipos de roca encontrados en el macizo granodiorítico investigado:

Cuadro A/6

Intrusivo granodiorítico

### PARAMETROS DE DEFORMABILIDAD

Calidad de la roca	Tipo de roca	Índice RMR	Módulo $E_M$ (GPa)
Roca muy mala	V	< 20	< 3
Roca mala	IV	30	3
Roca regular	III	50	10
Roca buena	II	70	30

Anotamos que los valores de los módulos indicados corresponden a los obtenidos con los ensayos de carga directa sobre placa realizados en la galería GT1, en roca mala y regular.

## 6.3 Parámetros de resistencia

El índice RMR proporciona también parámetros aproximados de resistencia al corte, con referencia a diferentes criterios de ruptura. La clasificación geomecánica propuesta por Bieniawski suministra los siguientes valores de cohesión y de ángulo de fricción estimados en base al criterio de ruptura lineal de Coulomb:

Tipo de roca	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción (°)
V	< 0,10	< 30
IV	0,10-0,15	30-35
III	0,15-0,20	35-40
II	0,20-0,30	40-45

La resistencia al corte puede ser evaluada también por medio del criterio de ruptura no lineal propuesto por Hoek-Brown (1980), a través de la siguiente ecuación entre los esfuerzos principales (Figura A/15):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_c \sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2}$$

donde:

$\sigma_1, \sigma_3$  son los esfuerzos máximo y mínimo de ruptura

$\sigma_c$  es la resistencia última a la compresión monoaxial de la roca intacta

$m, s$  son coeficientes constantes relacionados al ángulo de fricción y a la cohesión

Los coeficientes  $m$  y  $s$  se obtienen en función del índice RMR y del tipo de roca, en base a la relación definida por Hoek-Brown (1988) que se presenta en la Figura A/16.

Tipo de roca	V	IV	III	II
$m$	0,025	0,13	0,50	2,50
$s$	0	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$

Para la resistencia última a la compresión ( $\sigma_c$ ) se ha utilizado el valor promedio de 140 MPa, considerado bastante conservador para el macizo granodiorítico. Las envolventes de ruptura del macizo, en el plano  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  están representadas en la Figura A/17. Las mismas curvas envolventes representadas en el plano  $\tau$ - $\sigma$  (Figura A/18) permiten obtener los valores del ángulo de fricción ( $\phi$ ) de la cohesión ( $c$ ) por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\tau &= (\cotan \phi - \cos \phi) \cdot m\sigma_c/8 \\ c &= \tau - \sigma \tan \phi\end{aligned}$$

donde:

$$\phi = \arctan [4 h \cos^2 (30 + \frac{1}{2} \arcsin h^{-1,5}) - 1]^{-0,5}$$

$$h = 1 + \frac{16(m\sigma + s\sigma_c)}{3 m^2 \sigma_c}$$

Consecuentemente, para los diferentes tipos de roca que constituyen el macizo, se obtienen los siguientes valores de ángulo de fricción y de cohesión.

Cuadro A/7

Intrusivo granodiorítico  
PARAMETROS DE RESISTENCIA

Calidad de la roca		muy mala				mala		regular		buena			
Tipo de roca		V				IV		III		II			
$\sigma$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	
0,0	0,001	80	0,001	0,04	71	0,04	0,11	73	0,11	0,6	72	0,6	
0,5	0,4	29,5	0,1	0,7	44	0,2	1,0	55,5	0,2	1,9	65	0,8	
1,0	0,6	22,5	0,2	1,1	38	0,3	1,5	51	0,3	3,0	61	1,1	
3,0	1,2	14,5	0,4	2,3	27,5	0,7	3,7	40	1,1	5,5	55	1,2	
5,0	1,7	11,5	0,7	3,2	23	1,0	5,3	35	1,8	7,8	51	1,6	
8,0	2,2	9,2	0,9	4,4	19	1,6	7,0	31	2,2	11,8	46	3,5	
10,0	2,6	8,2	1,1	5,2	17	2,0	8,4	28,5	2,9	13,8	44	4,1	

Finalmente, si en la Figura A/18 se consideran los valores promedio de las envolventes, en el rango de  $\sigma = 0 \div 10$  MPa, se obtendrán los siguientes parámetros promedio de resistencia:

Tipo de roca	V	IV	III	II
$\phi$ (°)	15-18	26-30	38-44	53-56
c (MPa)	0,001	0,04	0,04	0,60

## 7. RESUMEN DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS PARA DISEÑO

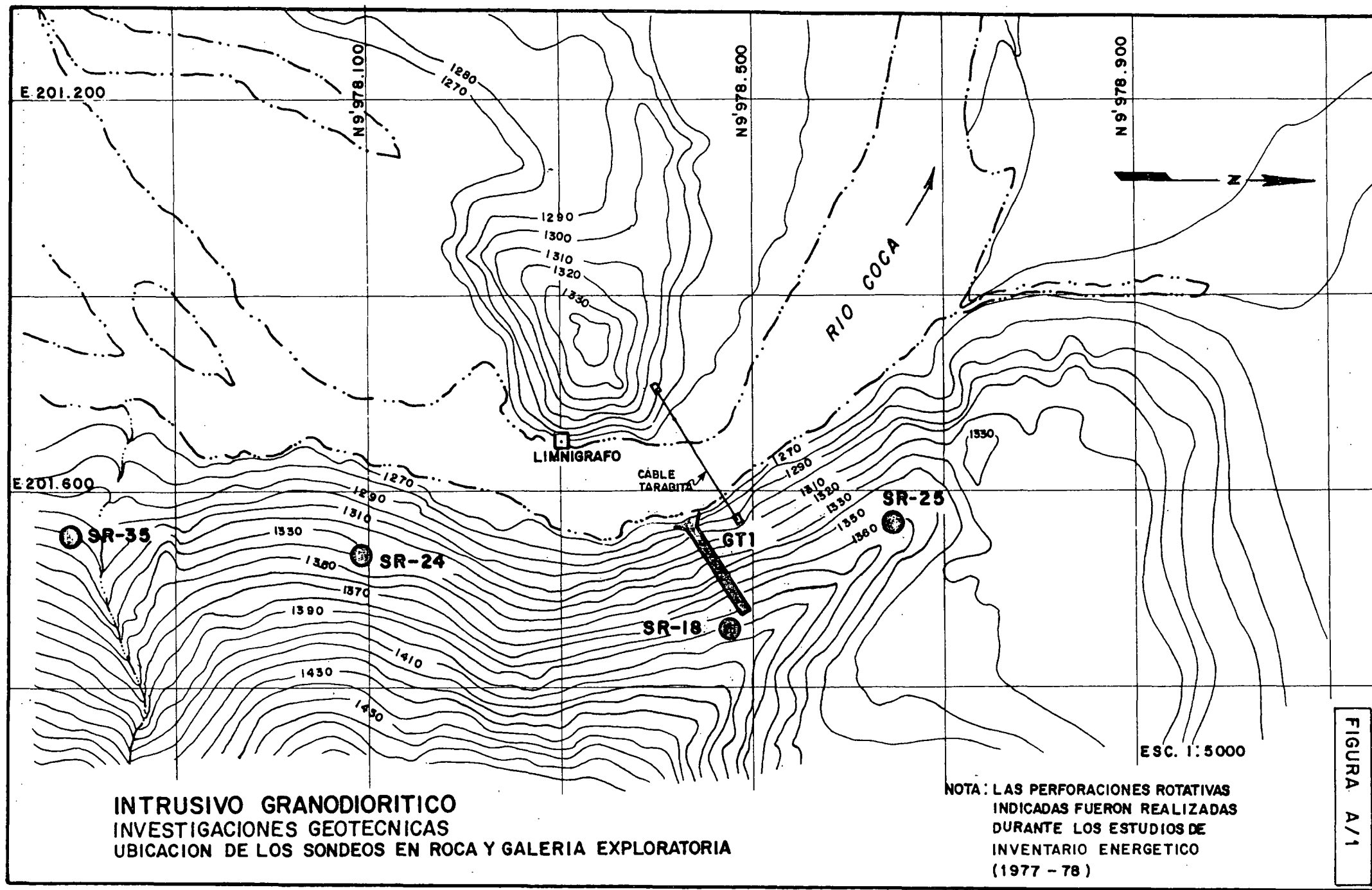
Para fines de diseño, se presenta a continuación una síntesis de los principales parámetros obtenidos de ensayos directos in situ y del procesamiento de las determinaciones de campo y de los ensayos de laboratorio.

Parámetro	Ubicación	Valores
<u>Permeabilidad</u>	Galería GT1	
	0+000 a 0+080	m muy alta
	0+080 a 0+100	m mediana a baja
<u>Deformabilidad</u>		
- Módulo de deformación	Galería GT1	
	0+070 m	4.000 MPa (vertical) 12.000 MPa (horizontal)
- Módulo de elasticidad	Galería GT1	
	0+100 m	18.000 MPa (vertical) 22.000 MPa (horizontal)
<u>Resistencia</u>		
- Angulo de fricción	Galería GT1	
	0+000 a 0+025 m	15°-18°
	0+025 a 0+080 m	26°-30°
	0+080 a 0+100 m	38°-44°
	Interior del macizo	46°-51°
- Cohesión	Galería GT1	
	0+000 a 0+025 m	10 <sup>-3</sup> MPa
	0+025 a 0+100 m	0,04 MPa
	Interior del macizo	0,6-0,7 MPa

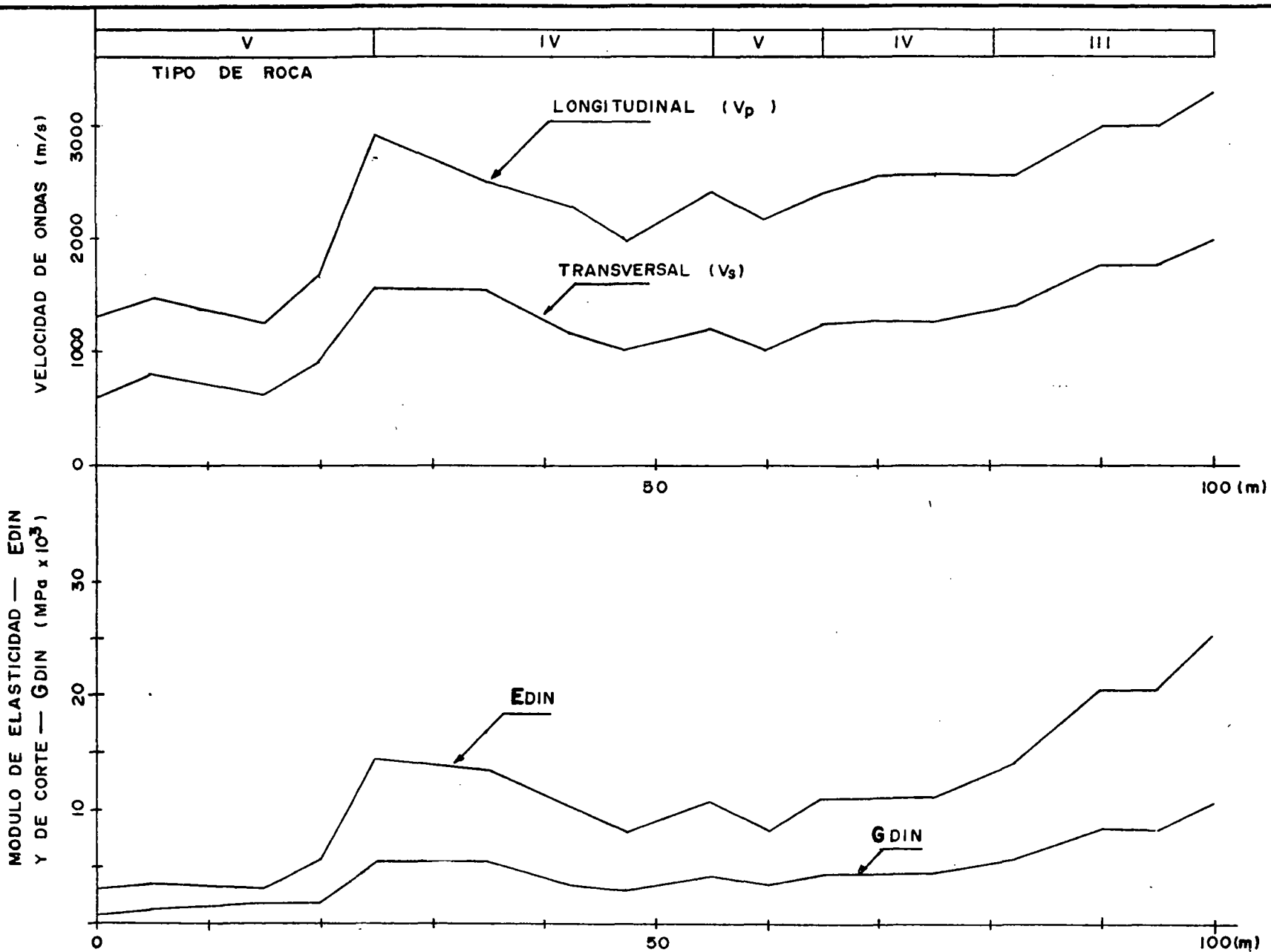


PARTE A

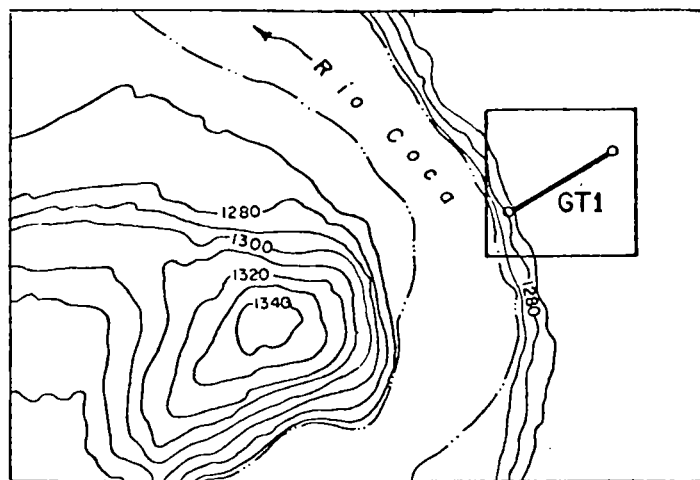
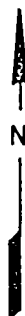
FIGURAS



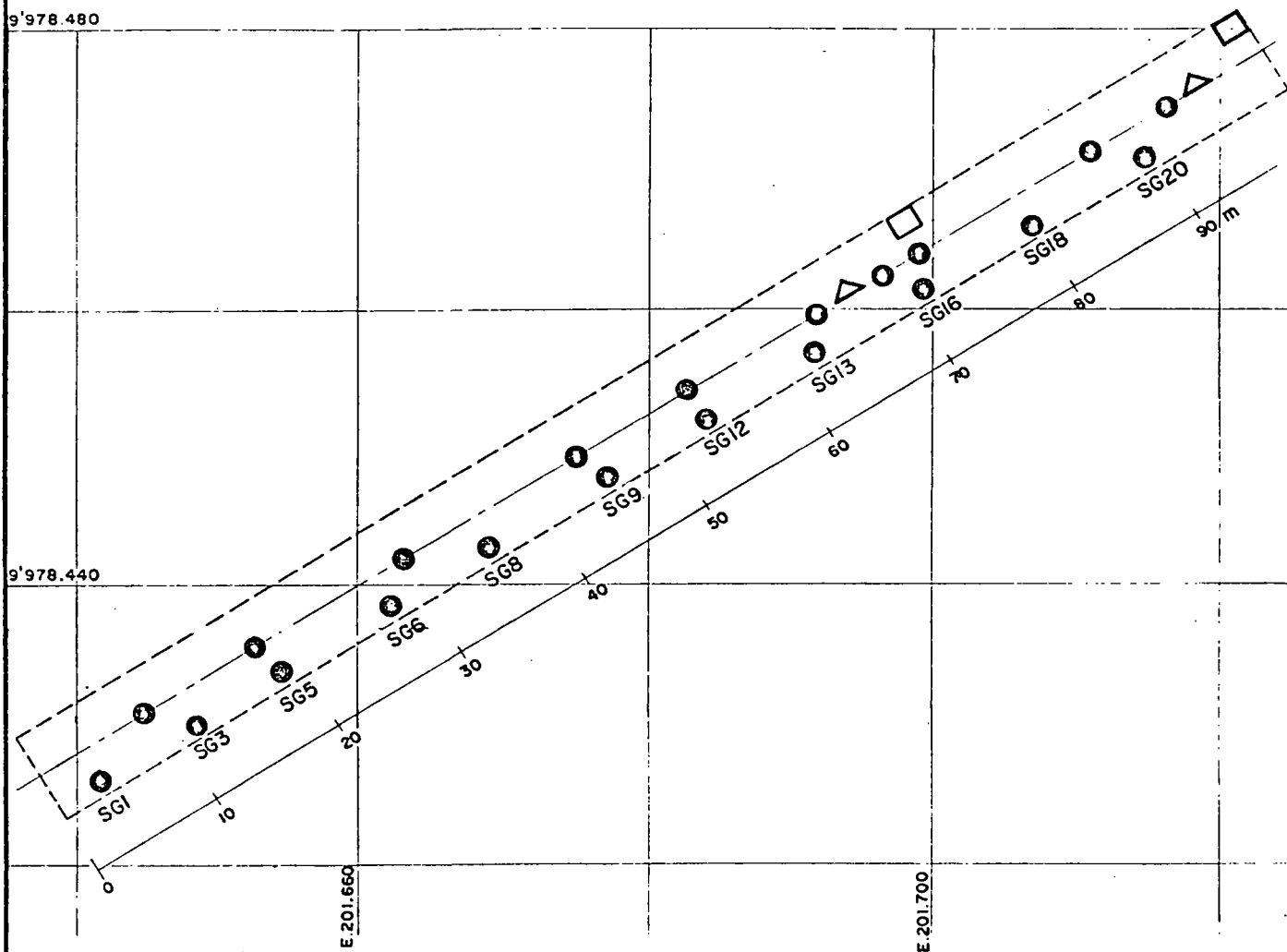
**INTRUSIVO GRANODIORITICO**  
**GALERIA EXPLORATORIA GT1**  
**INVESTIGACION SISMICA DE REFRACCION**  
**VELOCIDADES Y PARAMETROS DINAMICOS**



**FIGURA A/2**



UBICACION  
SIN ESCALA



LEYENDA

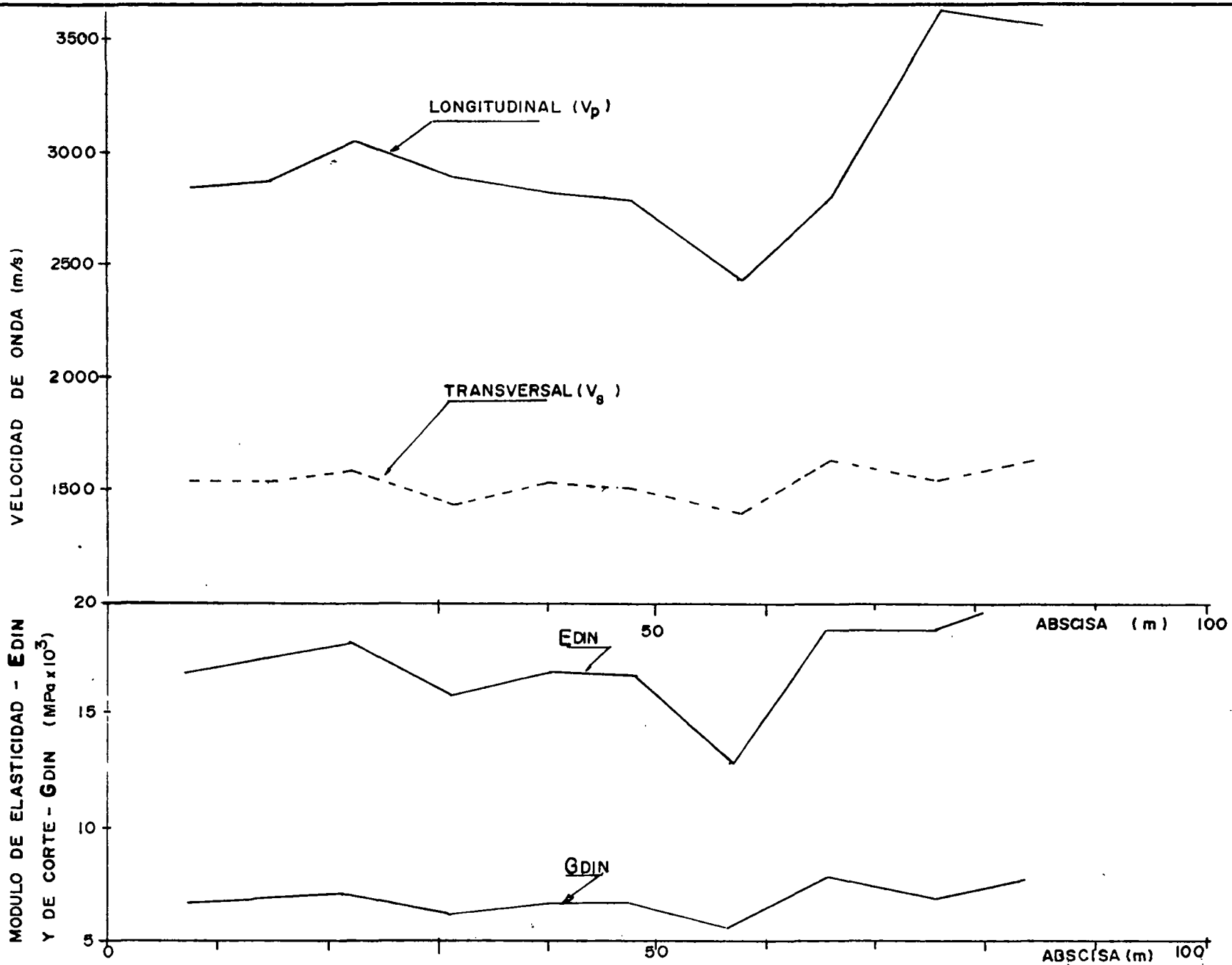
- PERFORACION CORTA PARA ENSAYOS DE TALADRO TRANSVERSAL
- ENSAYOS DE CARGA HORIZONTAL SOBRE PLACA
- △ ENSAYOS DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA

INTRUSIVO GRANODIORITICO

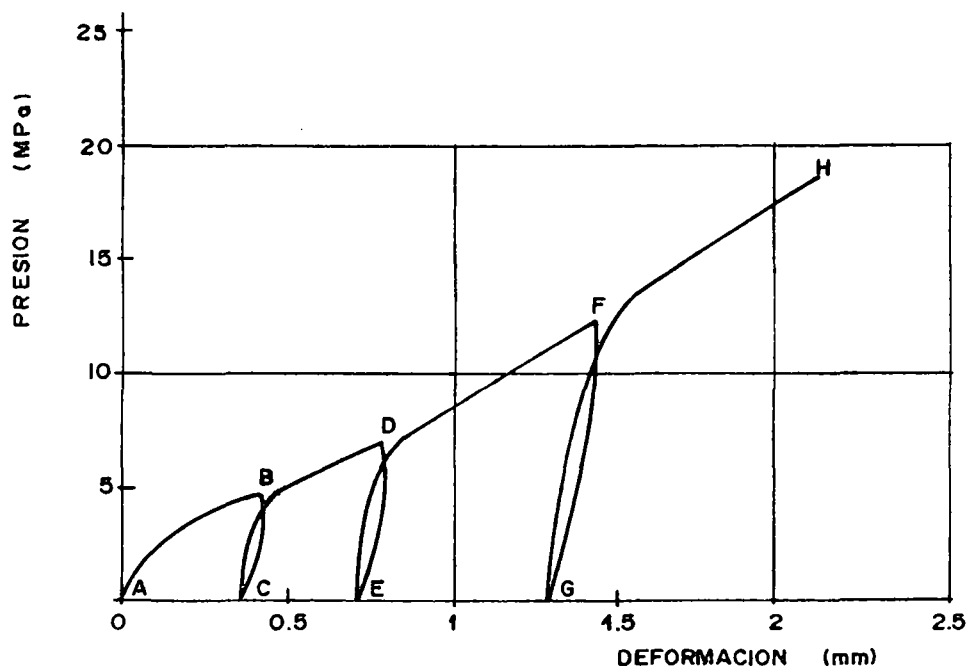
GALERIA EXPLORATORIA GT1

UBICACION DE LAS PERFORACIONES CORTAS Y DE LOS ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS

FIGURA A/4



INTRUSIVO GRANODIORITICO  
 GALERIA EXPLORATORIA GT 1  
 VELOCIDADES Y PARAMETROS DINAMICOS OBTENIDOS CON EL METODO  
 DE TALADRO TRANSVERSAL



**INTRUSIVO GRANODIORITICO**

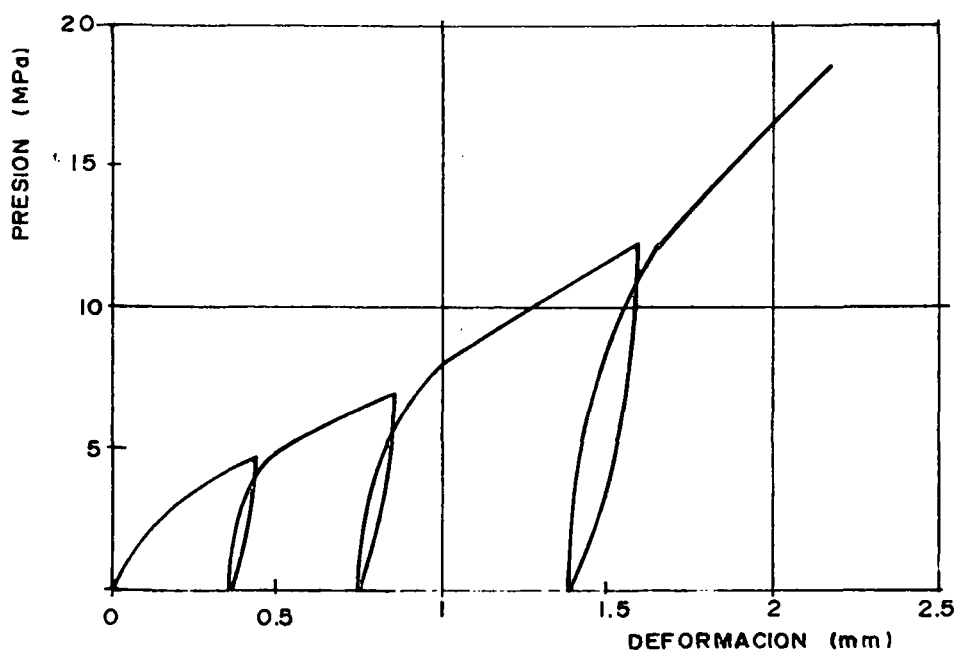
GALERIA EXPLORATORIA GT1 - ABSCISA 0+068m

ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA

MODULOS DE DEFORMACION A-B  
C-D  
E-F  
G-H

MODULOS ELASTICOS B-C  
D-E  
F-G

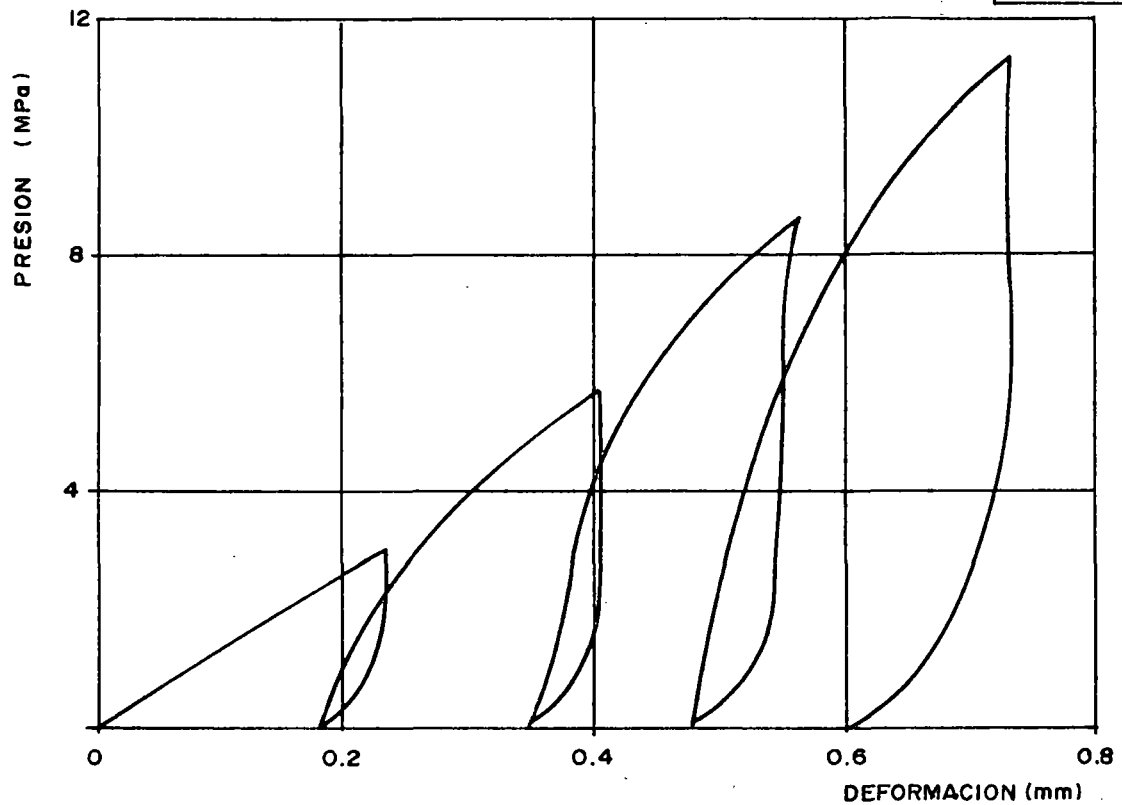
MODULO DE DEFORMACION GLOBAL A-H



**INTRUSIVO GRANODIORITICO**

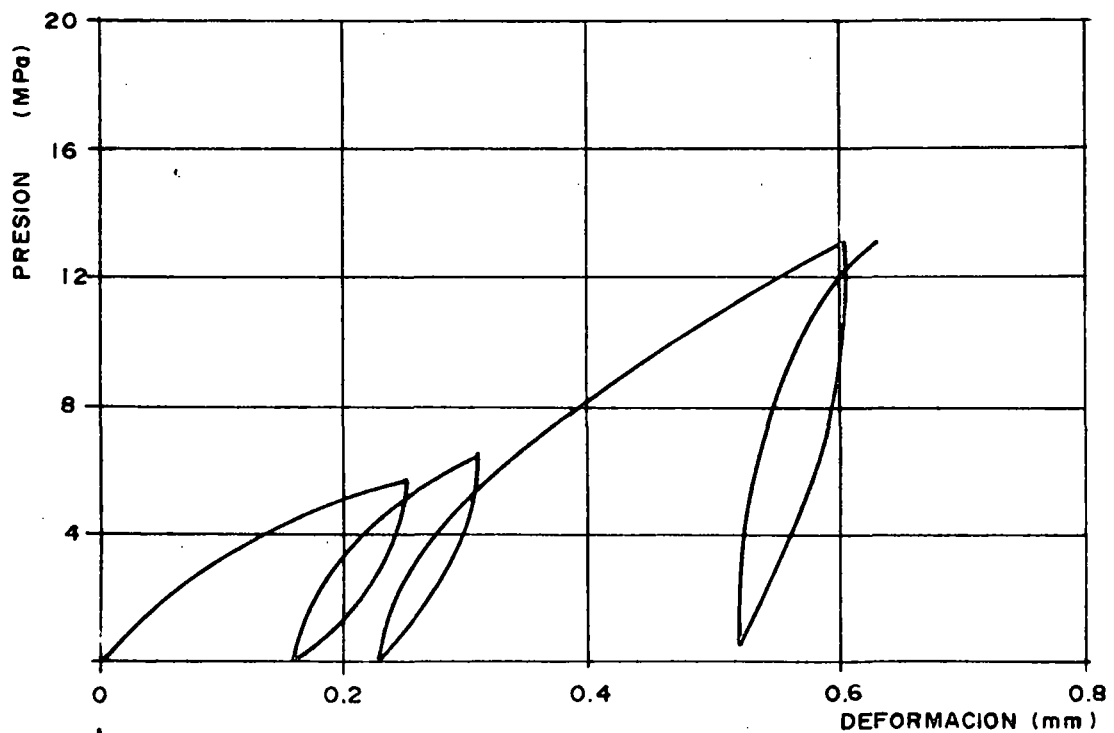
GALERIA EXPLORATORIA GT1 - ABSCISA 0+093m

ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA



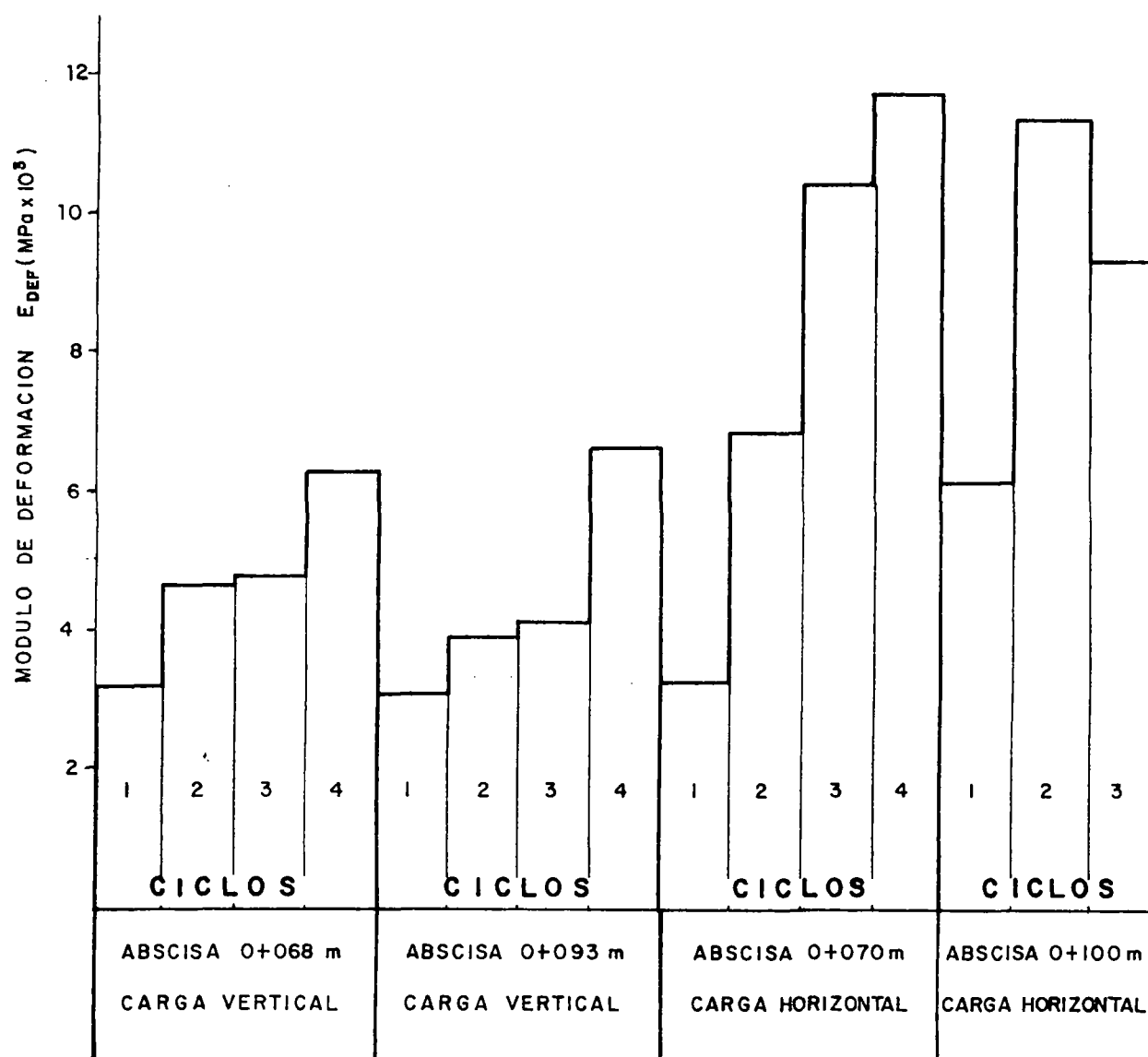
**INTRUSIVO GRANODIORITICO**

GALERIA EXPLORATORIA GT1 - ABSCISA 0+070m  
 HASTIAL IZQUIERDO  
 ENSAYO DE CARGA HORIZONTAL SOBRE PLACA



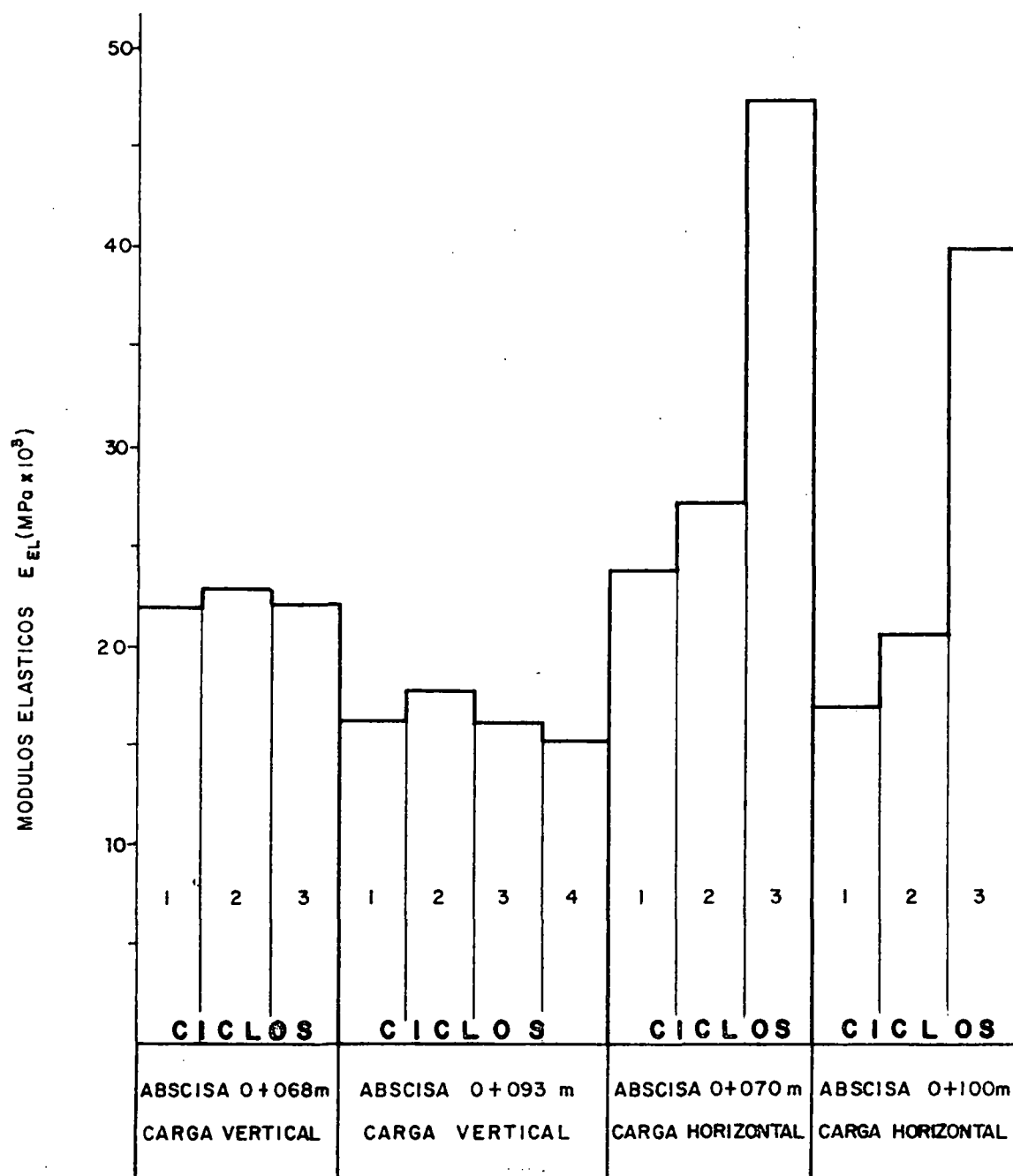
**INTRUSIVO GRANODIORITICO**

GALERIA EXPLORATORIA GT1 - ABSCISA 0+100 m  
 HASTIAL IZQUIERDO  
 ENSAYO DE CARGA HORIZONTAL SOBRE PLACA



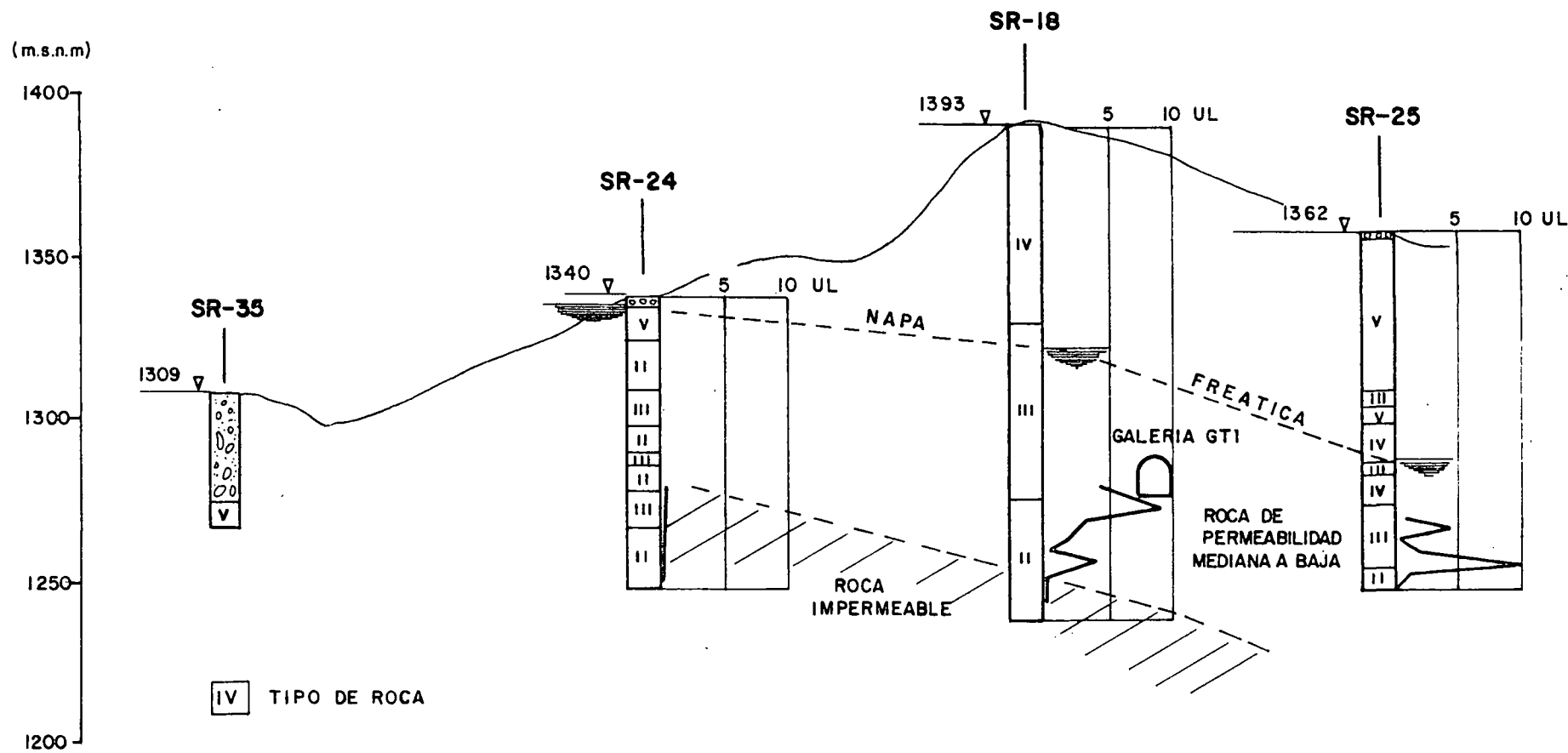
**INTRUSIVO GRANODIORITICO**  
**ENSAYOS DE CARGA SOBRE PLACA**  
**HISTOGRAMA RESUMEN DE LOS MODULOS DE DEFORMACION**





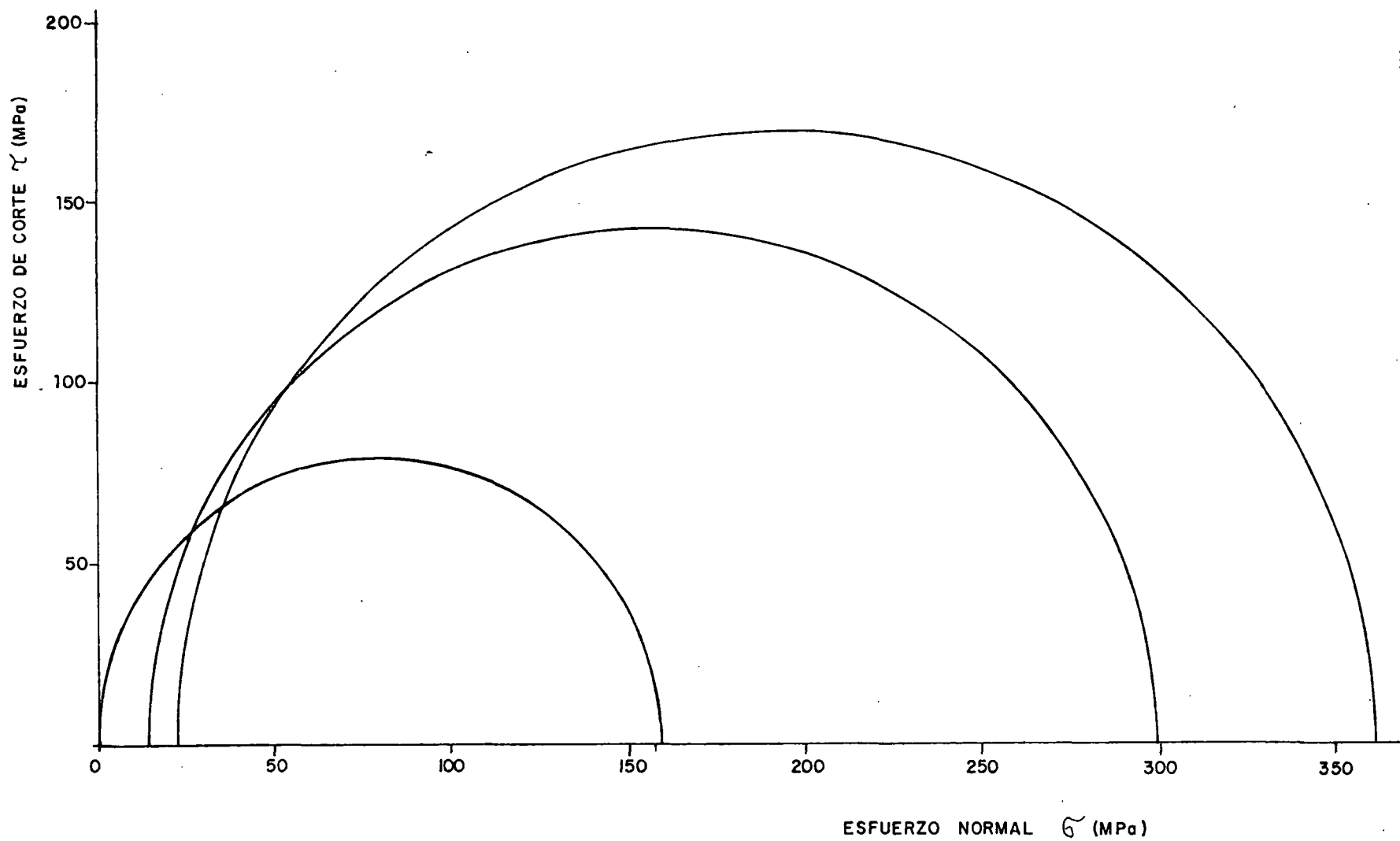
**INTRUSIVO GRANODIORITICO**  
**ENSAYOS DE CARGA SOBRE PLACA**  
**HISTOGRAMA RESUMEN DE LOS MODULOS ELASTICOS**

**INTRUSIVO GRANODIORITICO**  
**PERMEABILIDAD DEL MACIZO EN LA MARGEN DERECHA DEL SITIO**  
**PRESA SALADO**

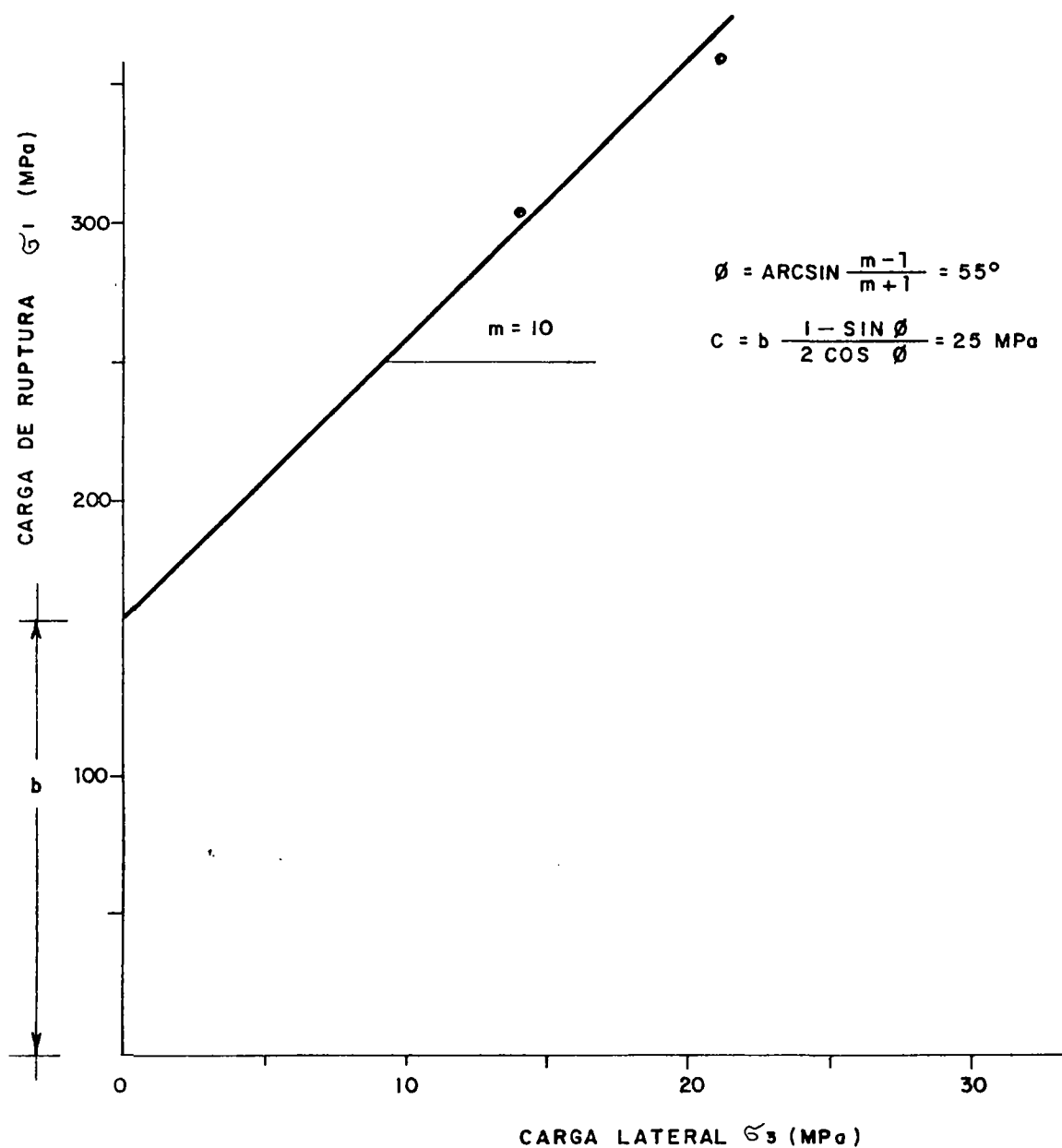


**NOTA:**

LA UBICACION PLANIMETRICA DE LOS SONDEOS SE PRESENTA EN LA FIGURA A/1



**INTRUSIVO GRANODIORITICO**  
**ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO**  
**COMPRESION TRIAXIAL**  
**SEMICIRCULOS DE MOHR PARA LA DEFINICION DE LA ENVOLVENTE DE RUPTURA**

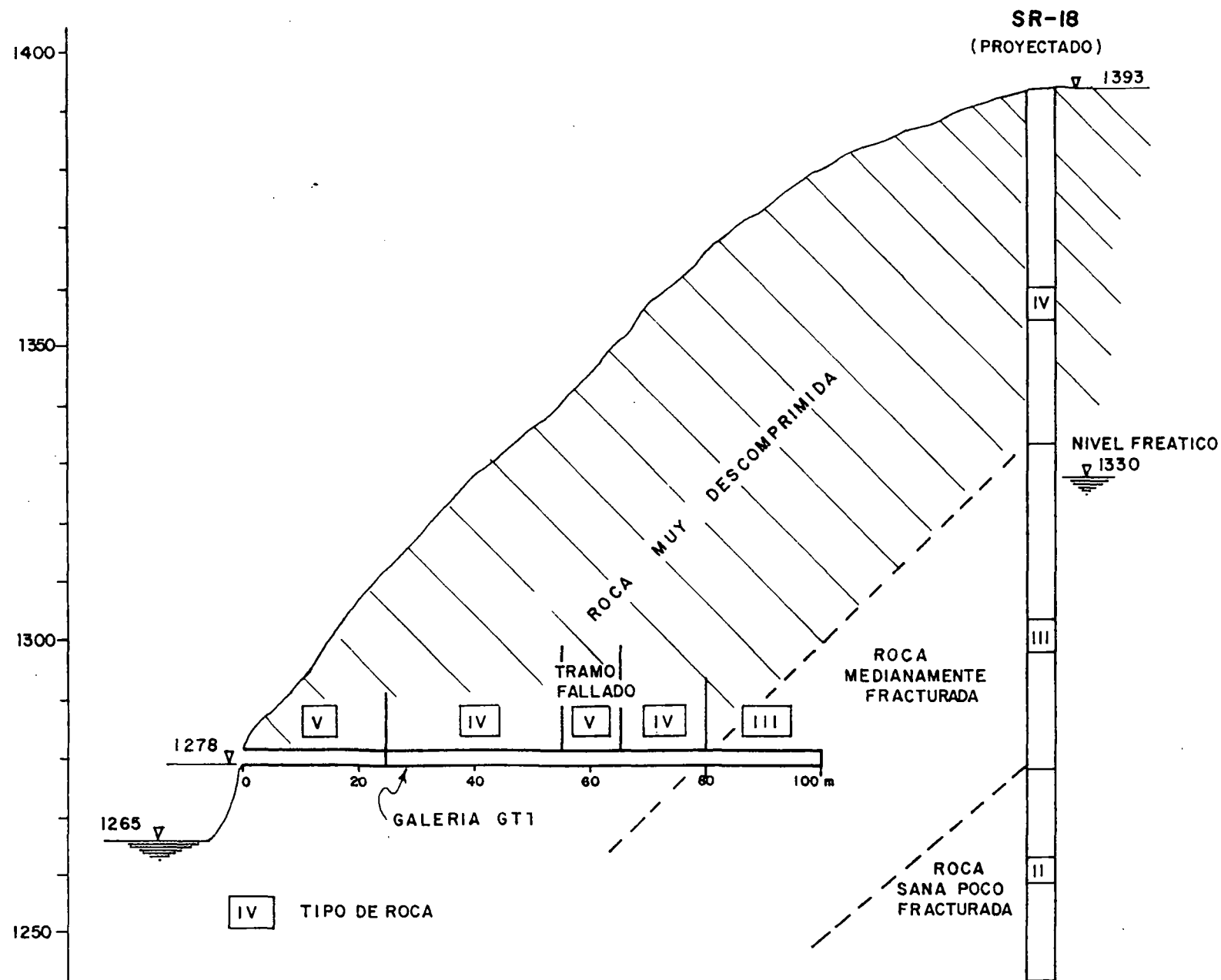


### INTRUSIVO GRANODIORITICO

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
COMPRESION TRIAXIAL

PARAMETROS DE RESISTENCIA SEGUN EL CRITERIO DE RUPTURA  
LINEAL DE COULOMB (Brown, 1981)

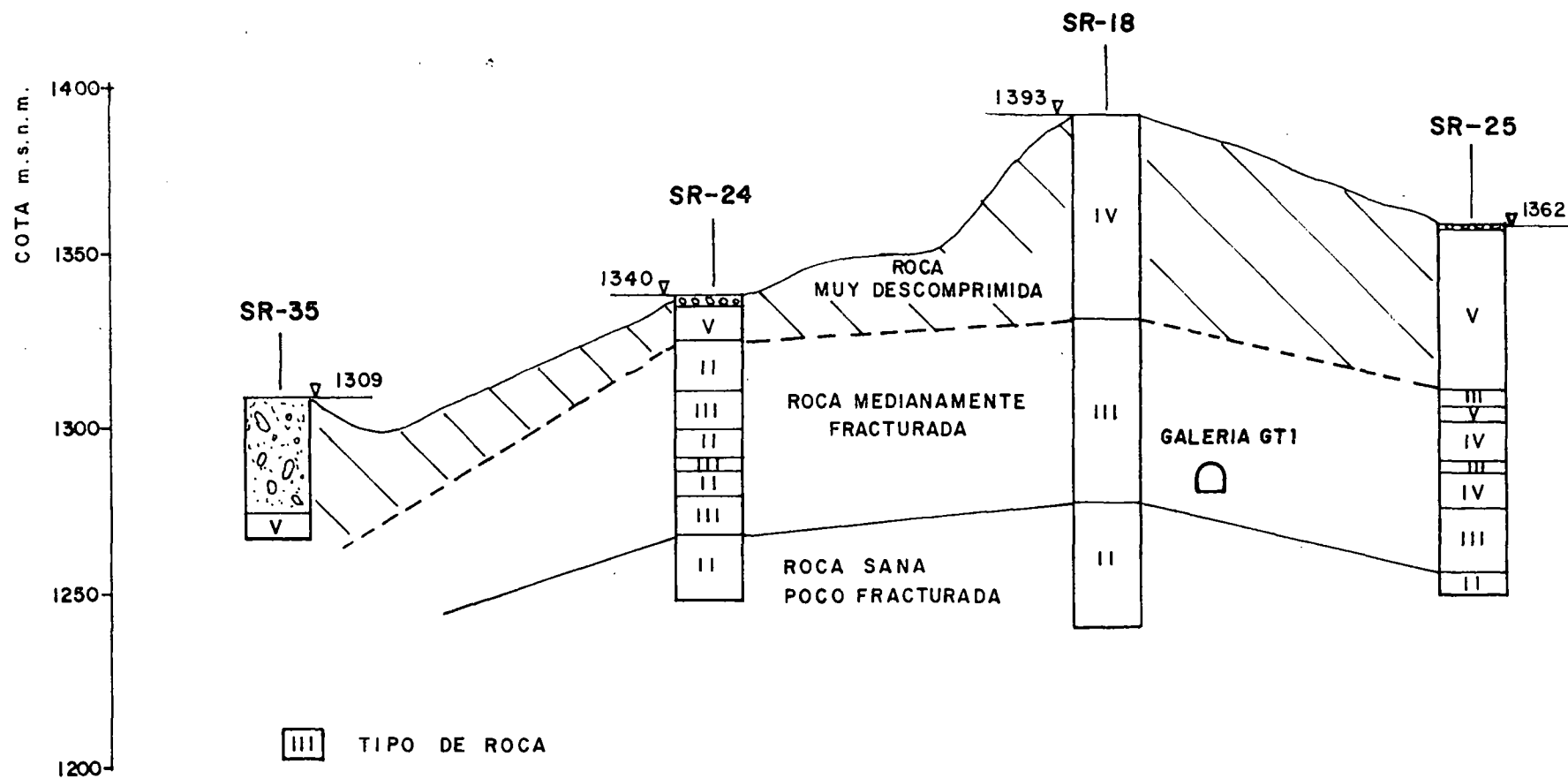
**INTRUSIVO GRANODIORITICO**  
**CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO EN LA MARGEN DERECHA**  
**DEL SITIO PRESA SALADO (CORTE TRANSVERSAL)**



NOTA : LA UBICACION PLANIMETRICA SE PRESENTA EN LA FIGURA A / 1

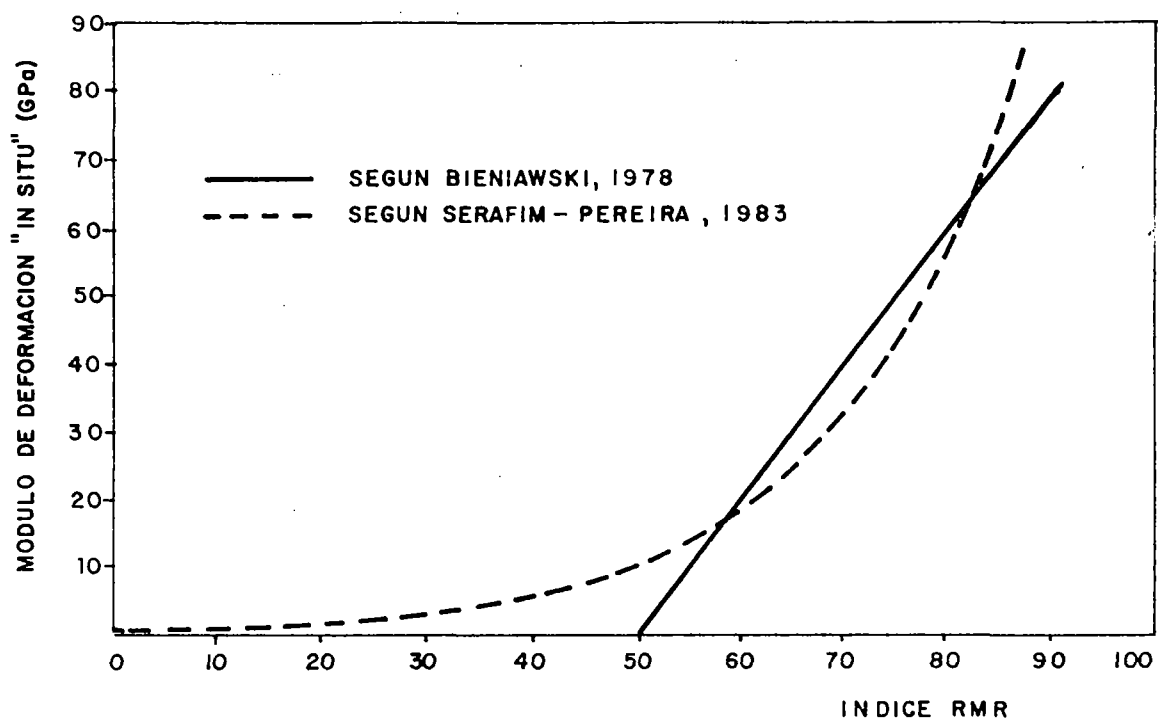
**FIGURA A/12**

**INTRUSIVO GRANODIORITICO**  
**CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO EN LA MARGEN DERECHA DEL SITIO DE PRESA SALADO (CORTE LONGITUDINAL)**

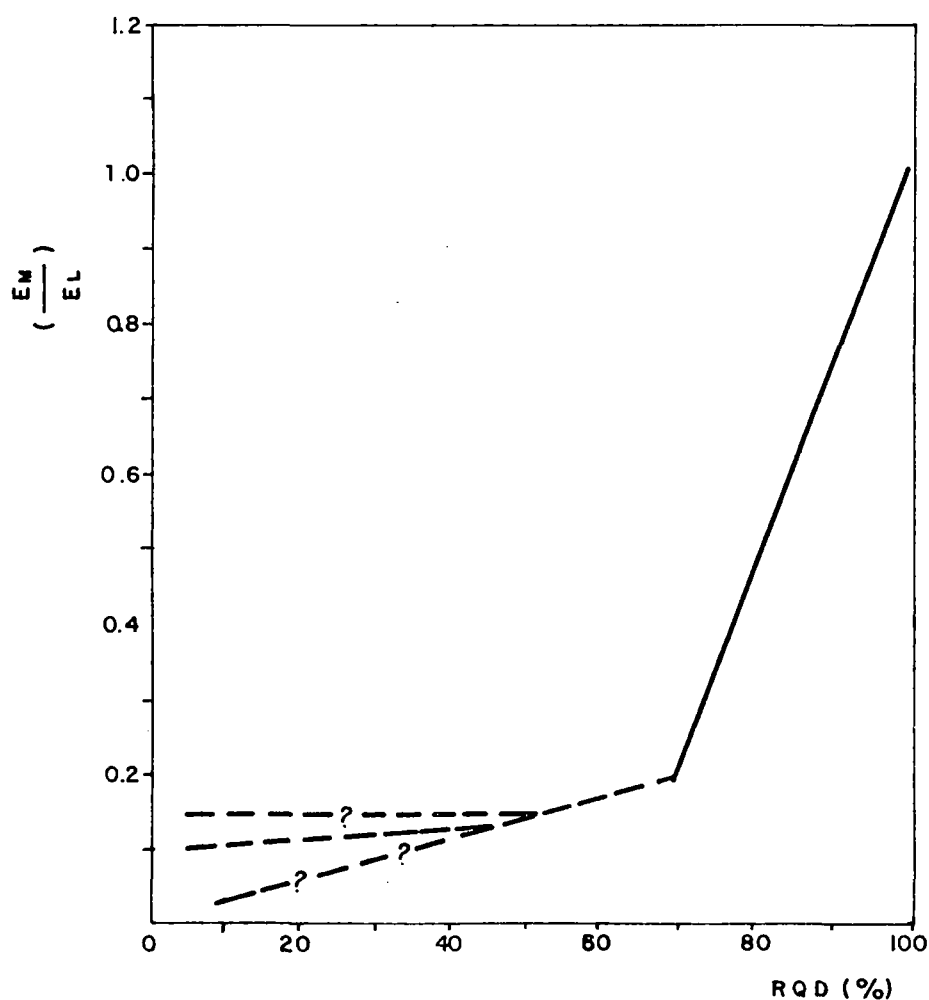


**NOTA :**

LA UBICACION PLANIMETRICA DE LOS SONDEOS SE PRESENTA EN LA FIGURA A/1



CORRELACION ENTRE EL INDICE RMR Y EL MODULO DE DEFORMACION "IN SITU"



CORRELACION ENTRE EL INDICE DE CALIDAD DE LA ROCA (RQD) Y DE LA RELACION  $\frac{E_D}{E_L}$  (SEGUN BIENIAWSKI, 1978)

ECUACIONES FUNDAMENTALES ASOCIADAS AL CRITERIO DE RUPTURA DE HOEK - BROWN

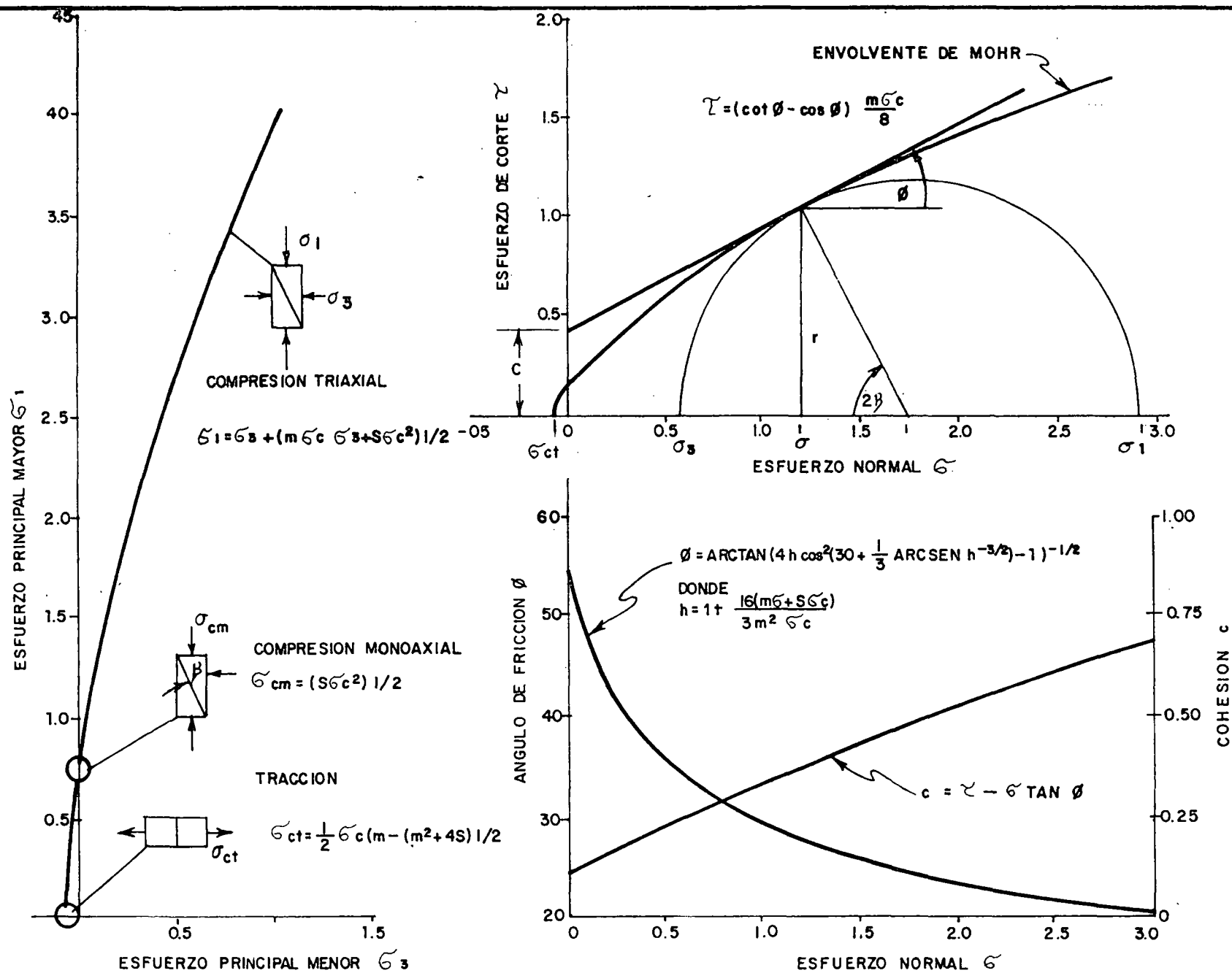


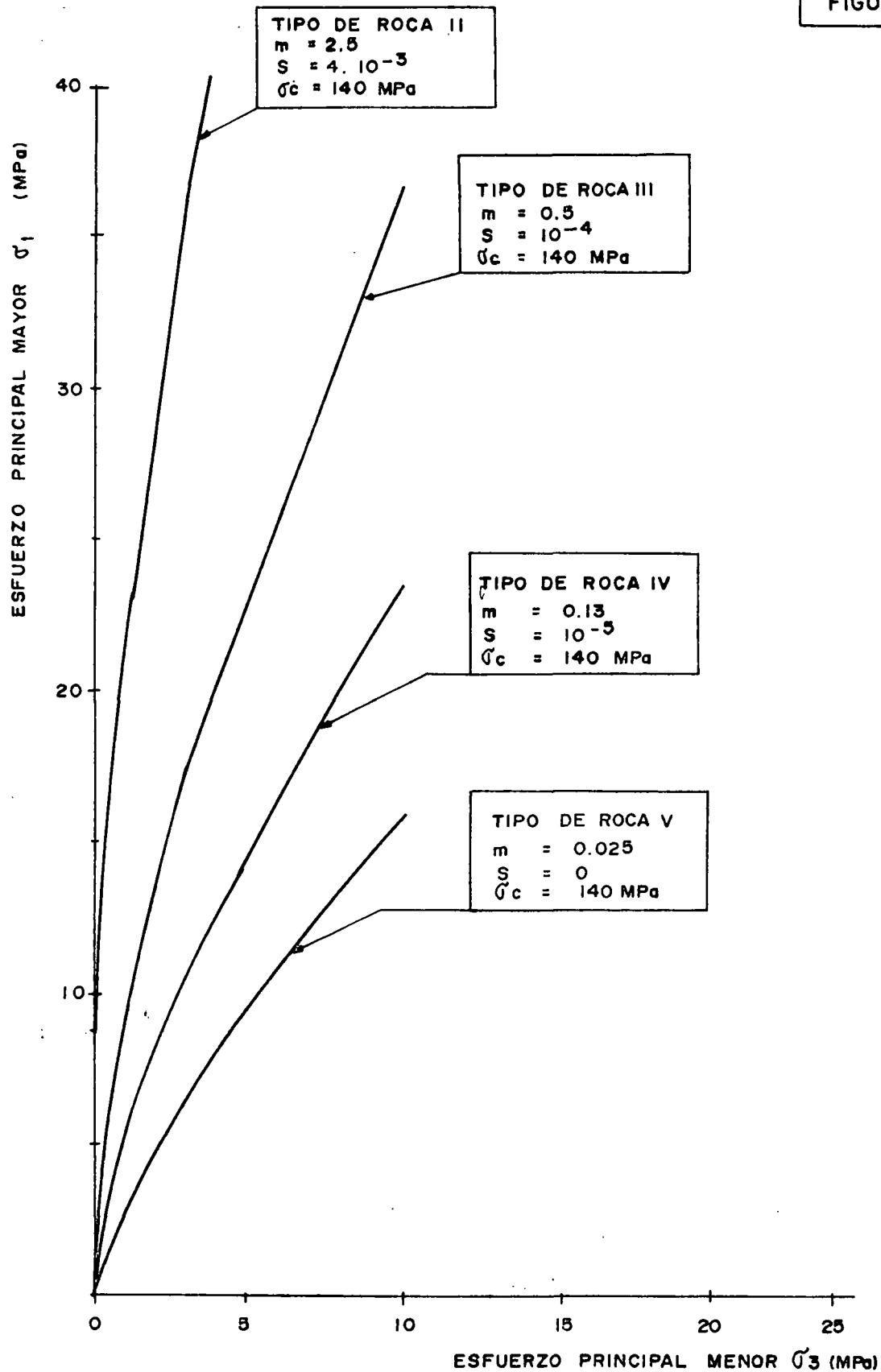
FIGURA A/15



RELACION ENTRE EL INDICE RMR Y LOS VALORES DE LAS  
CONSTANTES  $\bar{m}$  y  $\bar{s}$  (HOEK Y BROWN, 1988)

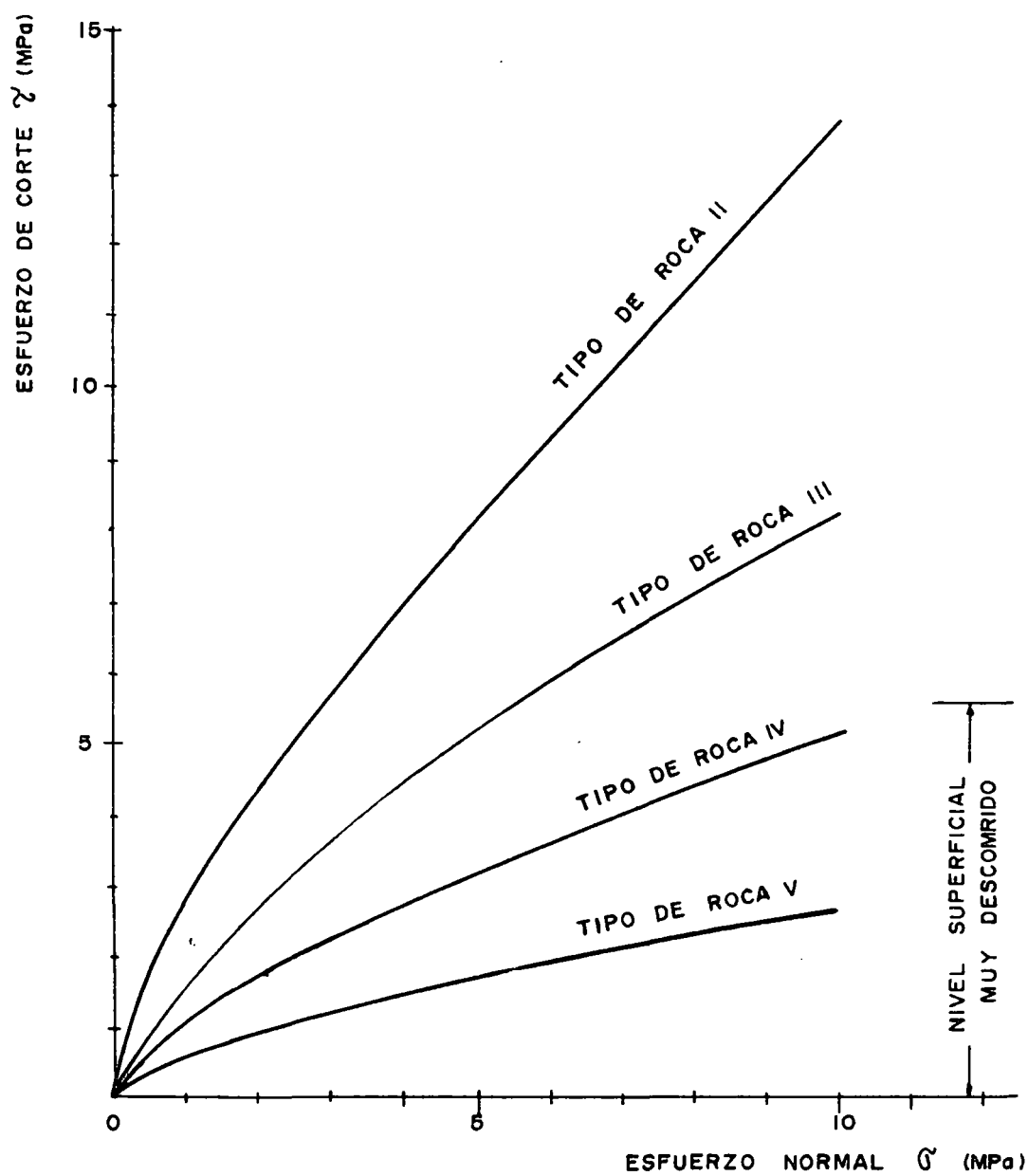
	<i>Rocas carbonatadas con el crucero de los cristales bien desarrollado (dolomita, caliza y mármol)</i>	<i>Rocas arcillosas litificadas (lodolita, limolita, lutita y pizarra) (normales al crucero)</i>	<i>Rocas arenosas con cristales fuertes y el crucero de los cristales poco desarrollado (arenisca y cuarcita)</i>	<i>Rocas ígneas cristalinas de grano fino y poliminerálicas (andesita, dolerita, diabasa y riolita)</i>	<i>Rocas cristalinas ígneas y metamórficas de grano grueso y poliminerálicas (anfíbolita, gabro, gneiss, granita, norita y cuarzodiorita)</i>
<u>Muestras de roca</u> <u>inalterada</u> Muestras de roca de tamaño de laboratorio, libres de defectos estructurales Valor CSIR 100+, Valor NOI 500	m = 7 s = 1	m = 10 s = 1	m = 15 s = 1	m = 17 s = 1	m = 25 s = 1
<u>Macizo rocoso de muy buena calidad</u> Roca íntimamente embanada inalterada con fisuras no meteorizadas con separación de $\pm$ 3m Valor CSIR 85, Valor NOI 100	m = 3,50 s = 0,10	m = 5 s = 0,10	m = 7,50 s = 0,10	m = 8,50 s = 0,10	m = 12,50 s = 0,10
<u>Macizo rocoso de buena calidad</u> Roca sana a poco meteorizada y poco afectada por fisuras espaciadas de 1 a 3 m Valor CSIR 65, Valor NOI 10	m = 0,70 s = 0,004	m = 1 s = 0,004	m = 1,50 s = 0,004	m = 1,70 s = 0,004	m = 2,50 s = 0,004
<u>Macizo rocoso de calidad mediana</u> Varías series de fisuras de meteorización moderada, con espaciamiento de 0.3 a 1m Valor CSIR 44, Valor NOI 1.0	m = 0,14 s = 0,0001	m = 0,20 s = 0,0001	m = 0,30 s = 0,0001	m = 0,34 s = 0,0001	m = 0,50 s = 0,0001
<u>Macizo rocoso de mala calidad</u> Muchas juntas meteorizadas, con espaciamiento de 30 a 500mm con algo de relleno/pedacería de roca limpia Valor CSIR 23, Valor NOI 0.1	m = 0,04 s = 0,00001	m = 0,05 s = 0,00001	m = 0,08 s = 0,00001	m = 0,09 s = 0,00001	m = 0,13 s = 0,00001
<u>Macizo rocoso de muy mala calidad</u> Muchas juntas muy meteorizadas con espaciamiento de menos de 80mm con relleno/pedacería de roca con fisas Valor CSIR 3, Valor NOI 0.01	m = 0,007 s = 0	m = 0,010 s = 0	m = 0,015 s = 0	m = 0,017 s = 0	m = 0,025 s = 0

CSIR: Organización de Investigaciones Científicas e Industriales del Commonwealth  
NOI: Instituto Geotécnico de Noruega



INTRUSIVO GRANODIORITICO

ENVOLVENTES DE RUPTURA DEL MACIZO EN EL  
PLANO  $\sigma_1 - \sigma_3$

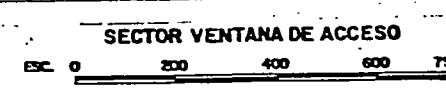
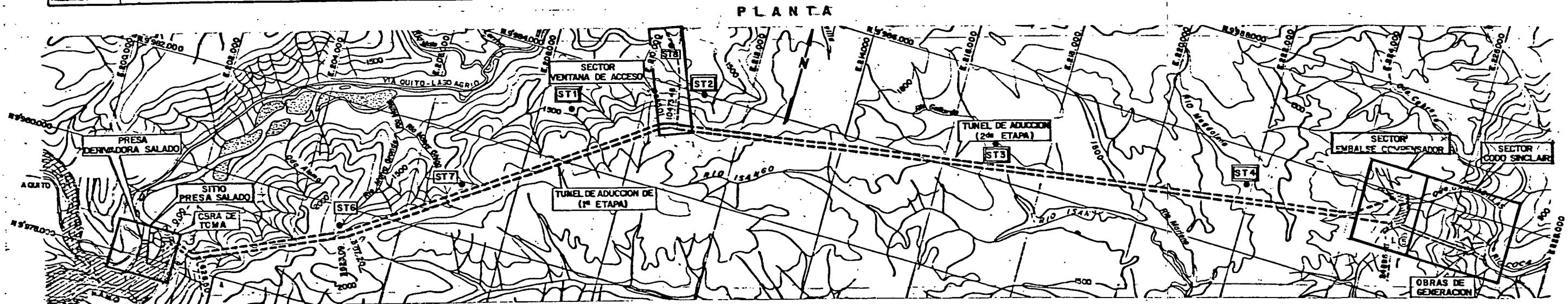
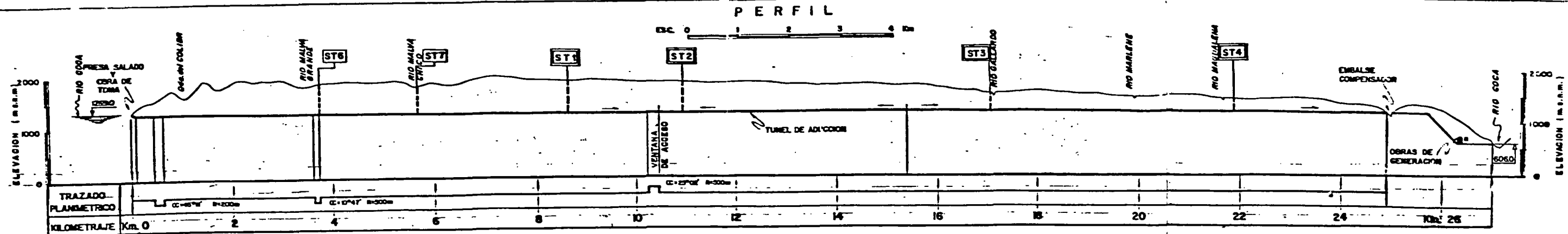


INTRUSIVO GRANODIORITICO

ENVOLVENTES DE RUPTURA DEL MACIZO EN EL  
PLANO  $\sigma - \tau$

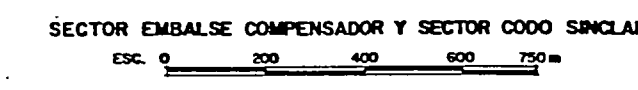
PARTE A

PLANOS



**GALERIAS EXPLORATORIAS EJECUTADAS EN LA FASE "B"**

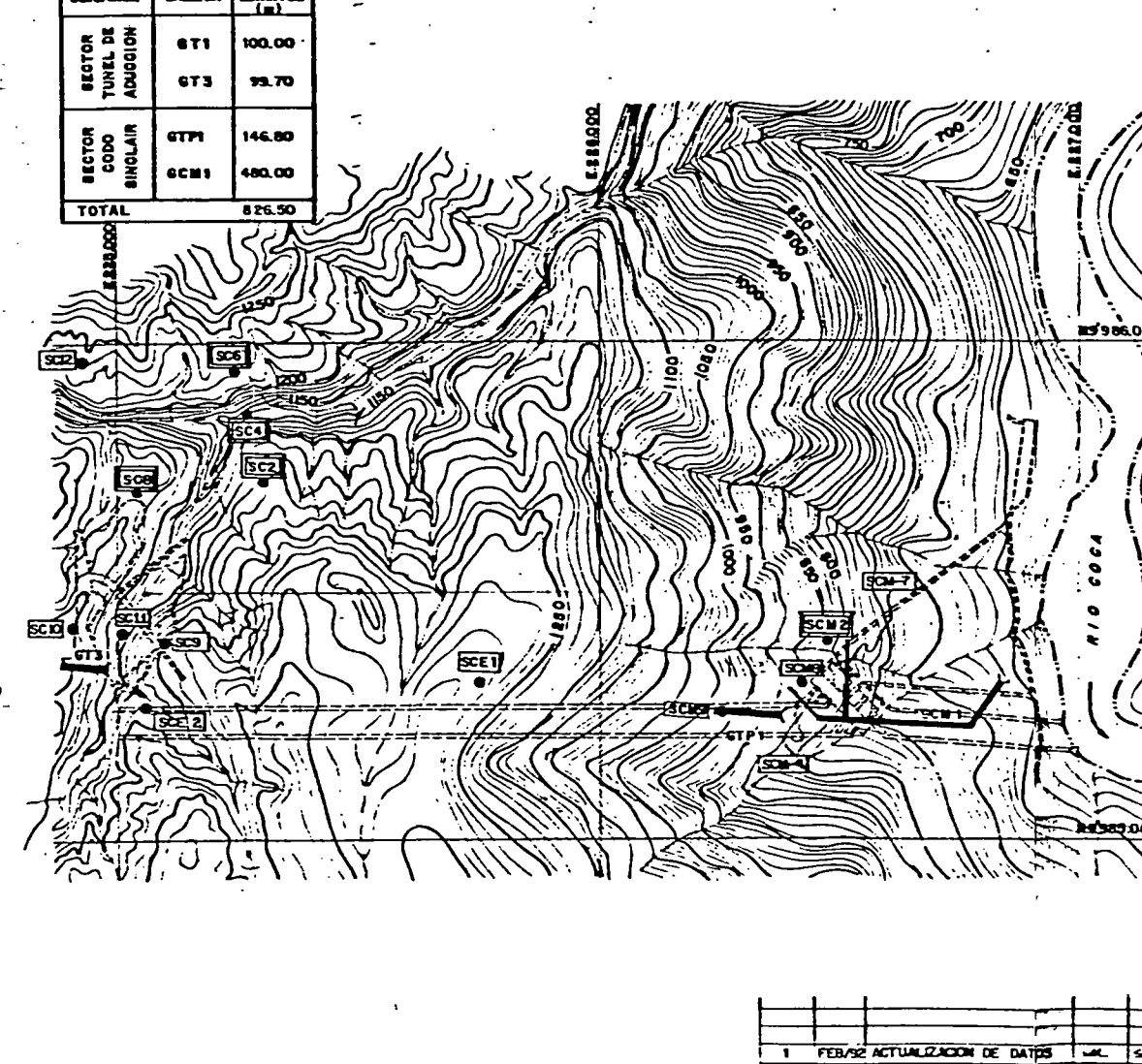
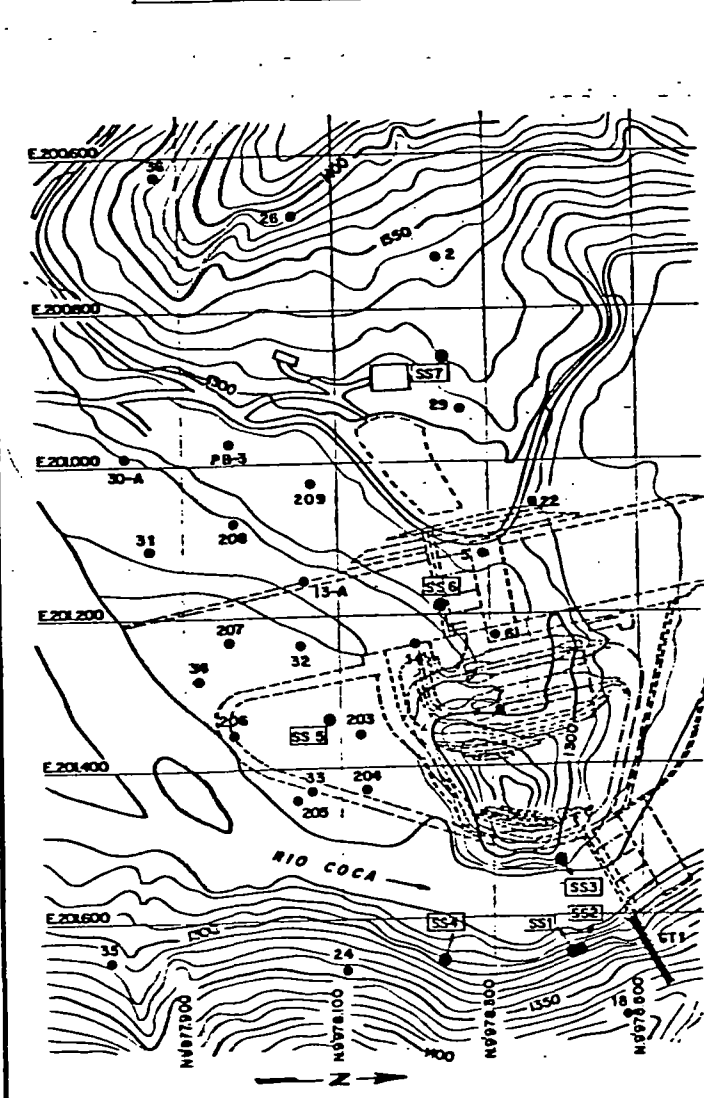
UBICACION	GALERIA	LONGITUD (m)
SECTOR TUNEL DE ADUCCION	GT1	100.00
	GT3	95.70
SECTOR CODO SINCLAIR	GTP1	146.80
	GCM1	480.00
<b>TOTAL</b>		<b>822.50</b>



**PERFORACIONES ROTATIVAS EJECUTADAS EN LA FASE "B"**

UBICACION	SONDEO	INCLINACION	PROFUNDIDAD (m)
SITIO PRESA SALADO	SS1	40°	108.15
	SS2	55°	73.95
	SS3	45°	100.50
	SS4	45°	103.15
	SS5	VERTICAL	61.50
	SS6	VERTICAL	61.00
	SS7	VERTICAL	60.00
SECTOR TUNEL DE ADUCCION	ST6	VERTICAL	485.00
	ST7	VERTICAL	390.00
	ST8	VERTICAL	170.00
SECTOR EMBALSE COMPENSADOR	SC9	VERTICAL	123.50
	SC10	VERTICAL	114.70
	SC11	VERTICAL	56.00
SECTOR CODO SINCLAIR	SC12	VERTICAL	60.00
	SCE1	VERTICAL	300.00
SECTOR CODO SINCLAIR	SCE2	VERTICAL	420.00
	SCM8	VERTICAL	220.00
	SCM9	VERTICAL	150.00
	SCM4	HORIZONTAL	80.00
	SCM7	HORIZONTAL	100.00
<b>TOTAL</b>			<b>3 237.75</b>

- PERFORACION ROTATIVA EJECUTADA EN LA FASE "A"
- PERFORACION ROTATIVA EJECUTADA EN LA FASE "B"
- GALERIA EXPLORATORIA EJECUTADA EN LA FASE "B"



**ELECTROCONSULT-TRACTIONEL-RODIO**  
**ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES**

**INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION**  
 INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION

**PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR**  
 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"

**GEOLOGIA**  
 INVESTIGACIONES GEOTECNICAS  
 MAPA DE UBICACION

HOJA DE: \_\_\_\_\_

ELABORADO: SAL

REVISADO: M.L.L.

APROBADO: SAL

FECHA: MAR-1994

REF: 0209-G-2023-1

# PARAMETROS PARA LA DESCRIPCION DE LOS TESTIGOS

## SÍMBOLOS LITOLÓGICOS PARA REGISTRO DE SONDEO

CLASE	RECUPERACION %	INTERPRETACION
1	100 a 91	EXCELENTE
2	90 a 76	BUENA
3	75 a 51	REGULAR
4	50 a 26	MALA
5	25 a 0	PESIMA

CLASE	R. Q. D. %	INTERPRETACION
1	100 a 91	EXCELENTE
2	90 a 76	BUENA
3	75 a 51	REGULAR
4	50 a 26	MALA
5	25 a 0	PESIMA

CLASE	ALTERACION (A)
1	ROCA SANA
2	ROCA POCO ALTERADA (APRECIABLE OXIDACION DE LAS FRACTURAS)
3	ROCA MEDIANAMENTE ALTERADA (MATRIZ POCO ALTERADA)
4	ROCA MUY ALTERADA (MATRIZ PROFUNDAMENTE ALTERADA)
5	ROCA TOTALMENTE ALTERADA (SOLO CON VESTIGIOS DE LA ESTRUCTURA ORIGINAL)

CLASE	DUREZA (D)
1	MUY DURA (SONIDO METALICO, QUEBRA CON DIFICULTAD CON MARTILLO)
2	DURA (SONIDO MUERTO, QUEBRA CON FACILIDAD CON MARTILLO)
3	MEDIANAMENTE DURA (LOS BORDES QUEBRAN DIFICILMENTE CON LOS DEDOS)
4	POCO DURA (SE DESHACE CON EL MARTILLO)
5	FRIABLE (SE DESHACE ENTRE LOS DEDOS)

	COBERTURA VEGETAL
	DEPOSITOS COLUVIALES
	DEPOSITOS ALUVIALES
	LAHARES
	ARCILLAS O LUTITAS ARCILLIFICADAS
	LUTITAS
	MARGAS
	CALIZAS
	ARENISCAS
	ROCAS VOLCANICAS Y VULCANO-SEDIMENTARIAS (Riolitos, Andesitos, Basaltos, Brechas, Tobas, Areniscas tobáceas, etc.)
	ROCAS INTRUSIVAS (Granodioritas, Sienitas, Aplitas)

CLASE	FRACTURACION (F)
1	ROCA MACIZA (<1 FRACTURA)
2	ROCA FRACTURADA (DE 1 A 5 FRACTURAS/m)
3	ROCA MUY FRACTURADA (DE 6 A 10 FRACTURAS/m)
4	ROCA EXTREMADAMENTE FRACTURADA (DE 11 A 20 FRACTURAS/m)
5	ROCA FRAGMENTADA (>20 FRACTURAS/m)

CLASE	INCLINACION PREDOMINANTE DE LAS FRACTURAS
1	90° - 71° VERTICAL Y SUBVERTICAL
2	70° - 31° INCLINADAS
3	30° - 0° SUBHORIZONTAL Y HORIZONTAL

CLASE	CARACTERISTICAS PREDOMINANTES DE LAS FRACTURAS
1	CONTACTO ROCA-ROCA, SUPERFICIE IRREGULAR Y/O RUGOSA (I-R)
2	CONTACTO ROCA-ROCA, SUPERFICIE LISA (L)
3	CONTACTO ROCA-ROCA, SUPERFICIE ESTRIADA (E)
4	FRACTURA ABIERTA Y/O ROTADA (A), OXIDADA (Ox) Y/O CON VESTIGIOS DE ARCILLA (Ar)
5	FRACTURAS CON BORDES OXIDADOS Y/O CON RELLENO DE ARCILLA, (Ox, Arc)

CLASE	PERMEABILIDAD (en Lugeon)	INTERPRETACION
1	<1	IMPERMEABLE
2	1 a 5	BAJA
3	5 a 10	MEDIANA
4	10 a 20	ALTA
5	>20	MUY ALTA

CLASE	TIPO DE FLUJO EN LAS FRACTURAS	INTERPRETACION
1	ABSORCION NULA (o CASI)	ROCA IMPERMEABLE
2	LAMINAR	ROCA FRACTURADA, PERMEABLE BAJO PRESIONES MEDIO-ALTAS
3	TURBULENTO	ROCA CON MUCHAS FRACTURAS ABIERTAS, DISCONTINUAS, PERMEABLE BAJO PRESIONES MODERADAS
4	CON DEFORMACION	ROCA MUY ALTERADA Y CON RELLENO EN LAS FRACTURAS
5	ABSORCION TOTAL	PRESENCIA DE CAVIDADES Y/O FRACTURAS MUY ABIERTA

CLASE	ABSORCION ESTIMADA TOTAL DE CEMENTO SECO (Kg/m)	INTERPRETACION
1	0 a 12,5	MUY BAJA
2	12,5 a 25	BAJA
3	25 a 100	MEDIANA
4	100 a 400	ALTA
5	>400	MUY ALTA

NOTA - LOS CRITERIOS DE CLASIFICACION RELATIVOS A PERMEABILIDAD SON SUCEPTIBLES DE CAMBIO EN BASE A LOS RESULTADOS DE CAMPO.

- LOS CRITERIOS DE CLASIFICACION RELATIVOS A ABSORCION DE CEMENTO REPRESENTAN PARAMETROS DE CARACTER ORIENTATIVO Y GENERAL.

- EN LOS REGISTROS DE SONDEOS SE PRESENTARA LA DESCRIPCION MACROSCOPICA (O, DE SER EL CASO, MICROSCOPICA) DE TODOS LOS LITOTIPOS ATRAVESADOS POR LA PERFORACION.

- PARA LA CLASIFICACION DEL TIPO DE ROCA SE UTILIZARAN TODOS LOS PARAMETROS DISPONIBLES, INCLUSIVE ADAPTANDO RAZONABLEMENTE LA TABLA RESPECTIVA, SI ES QUE FALTARA ALGUNO DE ELLOS.

## CLASIFICACION DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS

RECUPERACION	R. Q. D.	ALTERACION	DUREZA	FRACTURACION	FRACTURAS		PERMEABILIDAD	FLUJO	ABSORCION DE CEMENTO	TOTAL	TIPO DE ROCA	DESCRIPCION GENERAL
CLASE	CLASE	CLASE	CLASE	CLASE	CLASE	CLASE	CLASE	CLASE	CLASE			
1	1-2	1	1	1-2	1	1-2	1-2	1-2	1	<15	I	ROCA COMPACTA, SANA, MUY DURA, MACIZA O CON RARAS FRACTURAS RUGOSAS E IRREGULARES, PRACTICAMENTE IMPERMEABLE
1	2	1-2	1-2	2	1-2	2-3	2	2	2	15 a 20	II	ROCA COMPACTA, SANA, DURA, POCO FRACTURADA, CON FRACTURAS PREDOMINANTEMENTE LISAS Y LIGERAMENTE OXIDADAS, SUBVERTICALES O INCLINADAS, POCO PERMEABLE
2	3	2-3	2-3	3	2	3-4	3	2-3	2-3	20 a 25	III	ROCA ALGO ALTERADA, MEDIANAMENTE DURA, FRACTURADA, CON FRACTURAS ESTRIADAS Y/O POCO OXIDADAS, INCLINADAS, DE MEDIANA PERMEABILIDAD
2-3	3-4	3-4	3-4	4	2-3	4	3-4	3-4	3-4	25 a 35	IV	ROCA ALTERADA, POCO DURA, MUY FRACTURADA, FRACTURAS ABIERTAS, OXIDADAS CON VESTIGIOS DE ARCILLA, INCLINADAS A SUBHORIZONTALES, MUY PERMEABLE
3-5	4-5	4-5	4-5	4-5	2-3	4-5	4-5	4-5	4-5	>35	V	ROCA TOTALMENTE ALTERADA, FRIABLE, FRAGMENTADA, FRACTURAS ABIERTAS, OXIDADAS CON ARCILLA, PREDOMINANTEMENTE SUBHORIZONTALES, ALTAMENTE PERMEABLE

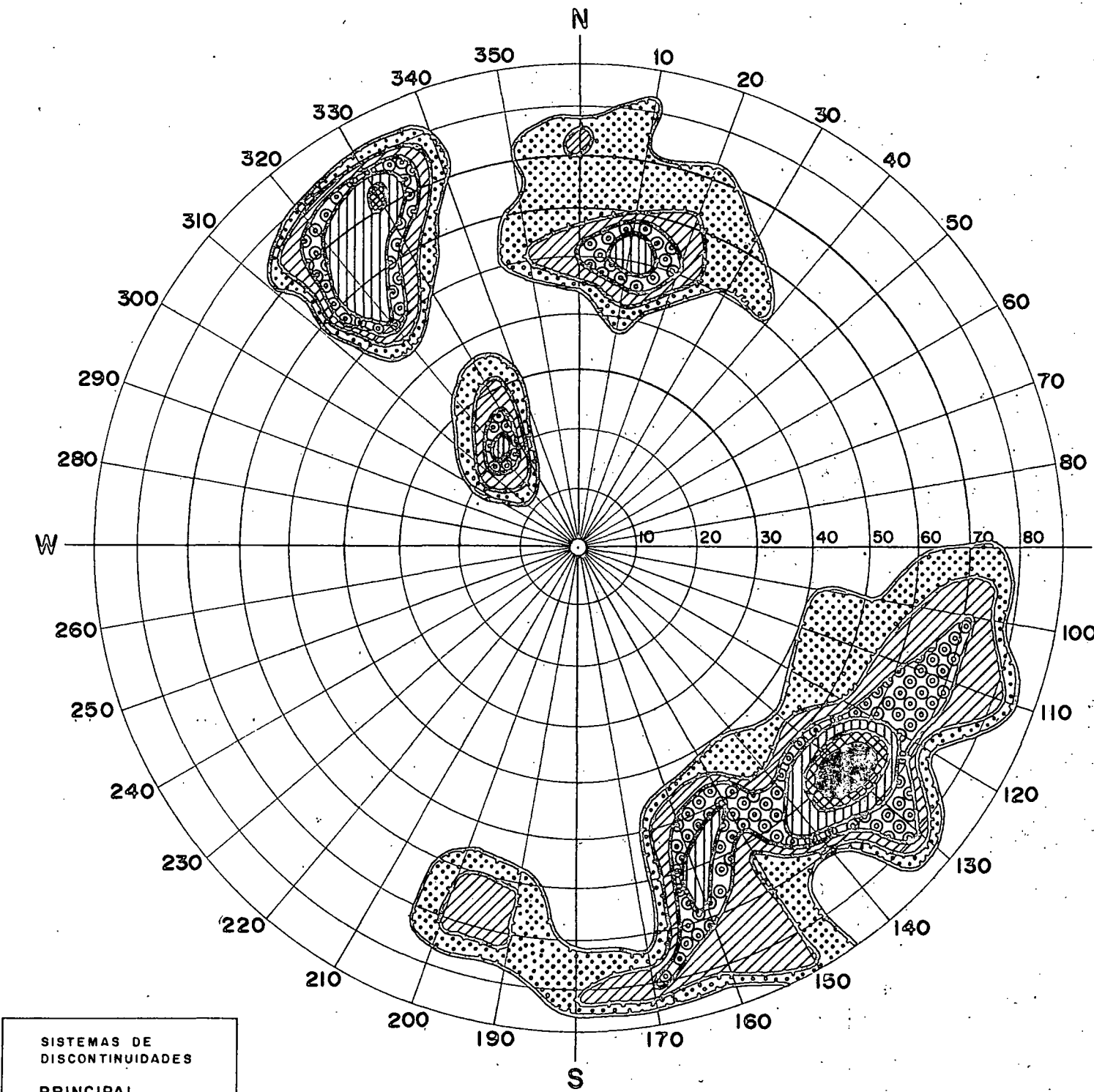
ELECTROCONSULT-TRACTIONEL-RODIO	
ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES	
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION	
QUITO - ECUADOR	
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR	
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "A"	
MECANICA DE ROCAS	
PARAMETROS PARA LA DESCRIPCION DE LOS TESTIGOS Y LA CLASIFICACION DE LAS UNIDADES LITOLÓGICAS	
HOJA DE	
DISEÑADO	SAL
RECOMENDADO	
DEBILADO	M. M. I.
REVISADO	SAL
APROBADO	
FECHA	NOVIEMBRE / 1990
REF	0209-6-2900

# INTRUSIVO GRANODIORITICO

## SITIO DE CIERRE SALADO

### GALERIA EXPLORATORIA GT 1

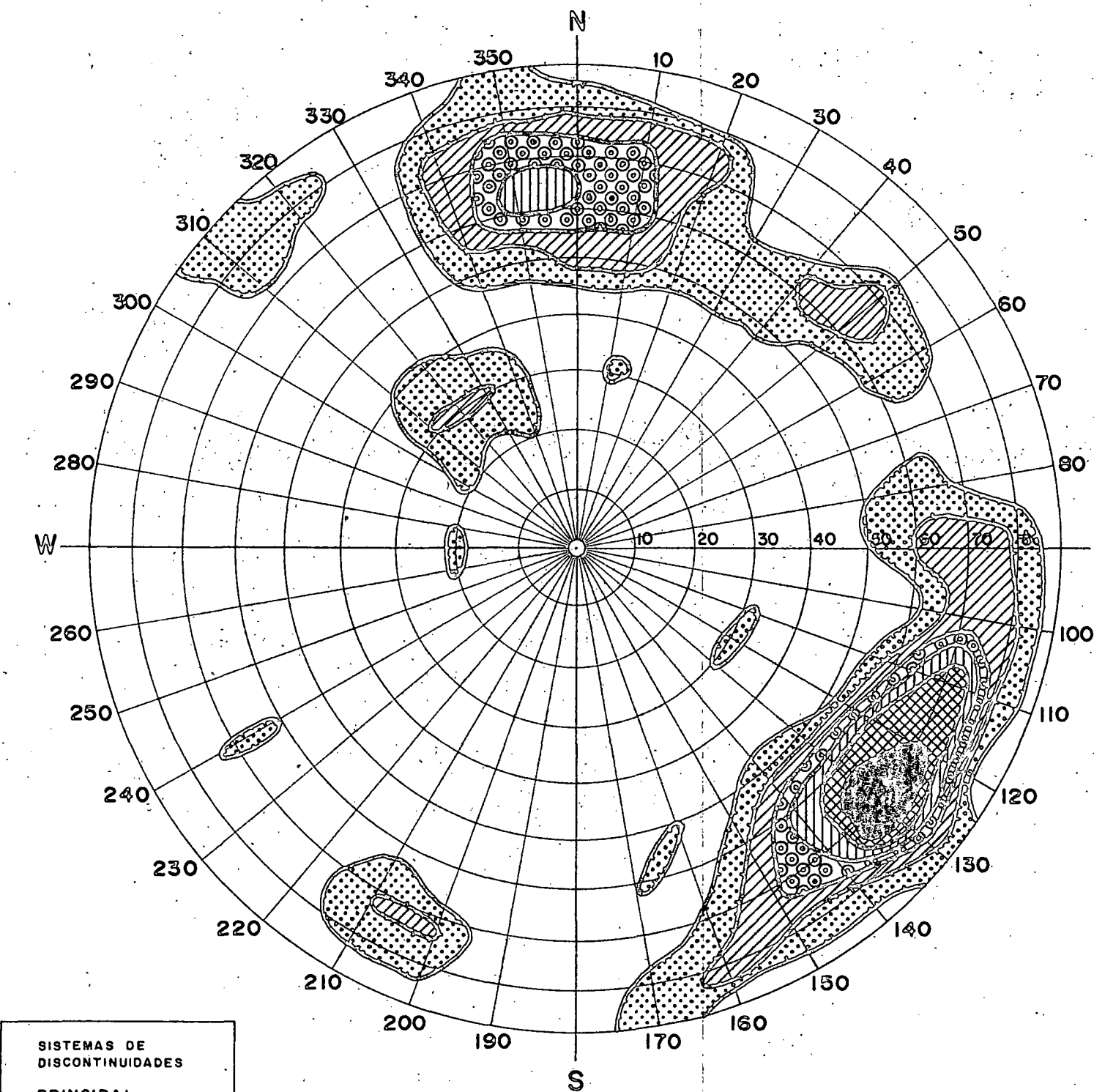
ABSCISA DE 0 + 000 A 0 + 030m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 40° E / 60° SE  
SECUNDARIO  
N 60° E / 70° NW

NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 134  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

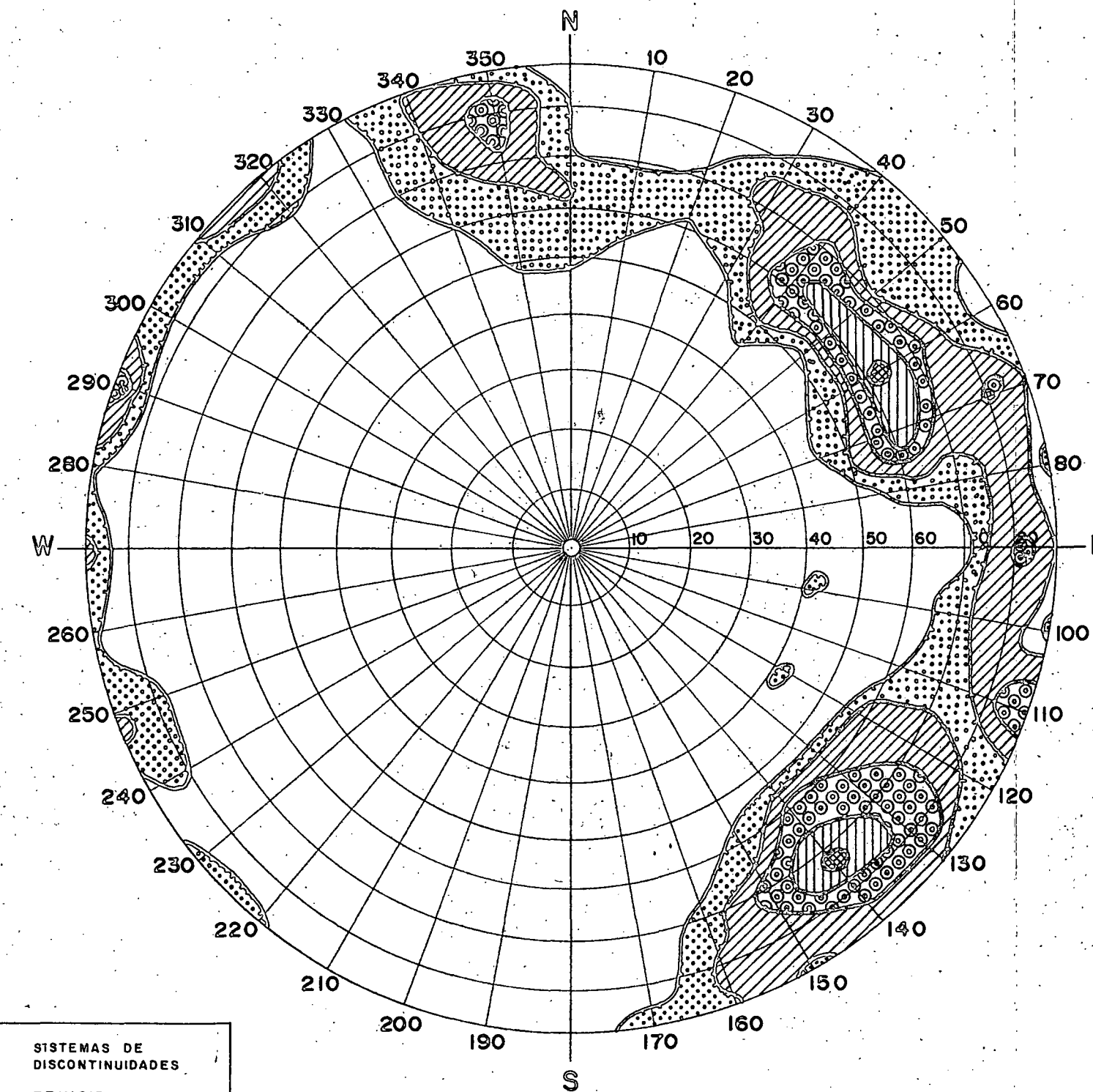
ABSCISA DE 0 + 030 A 0 + 060m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 40° E / 70° SE  
SECUNDARIO  
N 35° E / 65° NNW

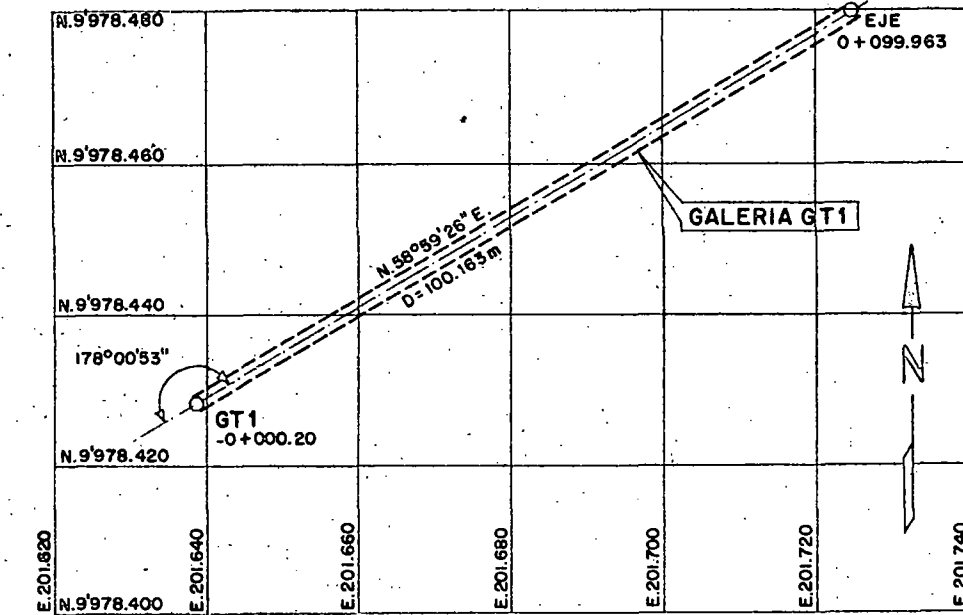
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 200  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

ABSCISA DE 0 + 060 A 0 + 100m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 50° E / 70° SE  
N 30° W / 60° NE  
SECUNDARIO  
N 30° W / 60° NE

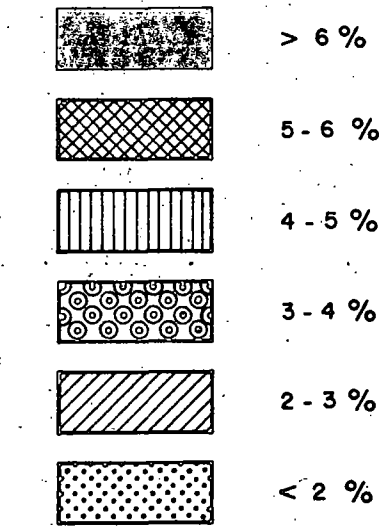
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 300  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR



UBICACION  
ESCALA: 1:1000

#### LEYENDA

CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS



#### NOTAS:

1. PARA EL MAPEO GEOESTRUCTURAL DE LA GALERIA GT 1, VER PLANO 0209-G-2901
2. PARA LA INVESTIGACION SISMICA DE LA GALERIA GT1, VER PLANO 0209-G-2233

ELECTROCONSULT TRACCIONEL - RODIO			
ASTEC-INELIN - INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES			
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION			
QUITO - ECUADOR			
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR			
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"			
MECANICA DE ROCAS			
GALERIA EXPLORATORIA GT 1			
ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES			
HOJA	DE	ESC.	
DISEÑADO	H.S.	RECOMENDADO	
DELUJADO	V.H.A.	APROBADO	
REVISADO	SA		
REV. N°	FECHA	NATURALEZA DE LA REVISION	POR VERIF. APROB.
ENERO-1991			REF. 0209-G-2902







PARTE B

FORMACION HOLLIN

## PARTE B

FORMACION HOLLIN

## INDICE

	Página
1. INVESTIGACIONES GEOTECNICAS	1
1.1 Perforaciones rotativas	1
1.2 Galería exploratoria GT3	3
2. INVESTIGACIONES GEOFISICAS	5
2.1 Prospección sísmica de refracción	5
2.2 Ensayos de taladro transversal	6
3. INVESTIGACIONES DE MECANICA DE ROCAS IN SITU	8
3.1 Ensayos de gato plano en pared	8
3.2 Ensayos de carga sobre placa	9
3.3 Comparación entre los parámetros estáticos y dinámicos	12
4. PERMEABILIDAD DEL MACIZO	14
5. INYECTABILIDAD DEL MACIZO	19
6. ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO	23
6.1 Análisis petrográficos	23
6.2 Características físicas	28
6.3 Resistencia a la compresión	30
6.4 Deformabilidad	32
6.5 Resistencia al corte	34
7. CARACTERISTICAS GEOMECHANICAS DEL MACIZO	36
7.1 Clasificación del macizo	36
7.2 Parámetros de deformabilidad del macizo	37
7.3 Parámetros de resistencia del macizo	39
7.4 Parámetros de resistencia de las discontinuidades	41
8. RESUMEN DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS PARA DISEÑO	50

## CUADROS

Cuadro B/1	Galería exploratoria GT3 Prospección sísmica de refracción Velocidad de las ondas y módulos dinámicos	5
Cuadro B/2	Galería exploratoria GT3 Ensayo de taladro transversal Velocidad de las ondas y módulos dinámicos	6
Cuadro B/3	Formación Hollín Sondeos rotativos Ensayos de permeabilidad tipo Lugeon	14
Cuadro B/4	Formación Hollín Sondeos rotativos Pruebas de inyección de cemento	20
Cuadro B/5	Formación Hollín Pruebas de inyección de cemento Correlación entre absorción y permeabilidad	21
Cuadro B/6	Formación Hollín Mecánica de rocas en laboratorio Resumen de los ensayos ejecutados	24
Cuadro B/7	Formación Hollín Resultados de los ensayos de laboratorio	25
Cuadro B/8	Formación Hollín Síntesis de los resultados de laboratorio por litotipo	26
Cuadro B/9	Formación Hollín Síntesis de los resultados de laboratorio por litotipo (Fase A y B)	27
Cuadro B/10	Formación Hollín Ensayo de compresión monoaxial Módulos de deformación y coeficiente de Poisson	33
Cuadro B/11	Galería exploratoria GT3 Clasificación geomecánica según Bieniawski	38
Cuadro B/12	Sitio de cierre del Embalse Compensador Ensayos de corte directo en laboratorio	41

---

**FIGURAS**

Figura B/1	Formación Hollín Investigaciones geotécnicas Ubicación de los sondeos y galería exploratoria
Figura B/2	Formación Hollín Galería exploratoria GT3 Investigación sísmica de refracción
Figura B/3	Formación Hollín Galería exploratoria GT1 Ubicación de las perforaciones cortas y de los ensayos de Mecánica de Rocas
Figura B/4	Formación Hollín Galería exploratoria GT3 Parámetros dinámicos obtenidos con el método del taladro transversal
Figura B/5	Formación Hollín Galería exploratoria GT3 - Abscisa 0+030 m Ensayos de deformabilidad con gato plano en pared
Figura B/6	Formación Hollín Galería exploratoria GT3 - Abscisa 0+075 m Ensayos de deformabilidad con gato plano en pared
Figura B/7	Formación Hollín Galería exploratoria GT3 - Abscisa 0+099 m Ensayos de carga vertical sobre placa
Figura B/8	Formación Hollín Galería exploratoria GT3 - Abscisa 0+070 m Ensayos de carga horizontal sobre placa
Figura B/9	Formación Hollín Galería exploratoria GT3 - Abscisa 0+070 m Ensayos de carga horizontal sobre placa Relación entre carga aplicada y deformabilidad
Figura B/10	Formación Hollín Galería exploratoria GT3 Ensayos de Mecánica de Rocas "in situ" Histograma de los módulos
Figura B/11	Clasificación de los ensayos de permeabilidad tipo Lugeon

---

Figura B/12	Formación Hollín Ensayos de Mecánica de Roca en laboratorio Correlación entre porosidad y peso específico
Figura B/13	Formación Hollín Ensayos de Mecánica de Roca en laboratorio Correlación entre velocidad sónica y peso de volumen
Figura B/14	Formación Hollín Ensayos de Mecánica de Roca en laboratorio Correlación entre módulo de deformación y velocidad sónica $V_p^2$
Figura B/15	Formación Hollín Ensayos de Mecánica de Roca en laboratorio Correlación entre porosidad y absorción
Figura B/16	Formación Hollín Ensayos de Mecánica de Roca en laboratorio Compresión puntual Relación entre el índice $I_{s(50)}$ axial y el índice $I_{s(50)}$ diametral
Figura B/17	Formación Hollín Ensayos de Mecánica de Roca en laboratorio Compresión puntual Relación entre el índice $I_{s(50)}$ y la resistencia última a la compresión monoaxial $\sigma_c$
Figura B/18	Formación Hollín Ensayos de Mecánica de Roca en laboratorio Prueba con martillo Schmidt Relación entre resistencia Schmidt y resistencia última a la compresión monoaxial $\sigma_c$
Figura B/19	Formación Hollín Ensayos de Mecánica de Roca en laboratorio Histogramas de la resistencia última a la compresión monoaxial ( $\sigma_c$ ) de los litotipos
Figura B/20	Formación Hollín Ensayos de Mecánica de Roca en laboratorio Compresión triaxial Areniscas con lutita del sondeo SC10 Semicírculos de Mohr y envolvente de ruptura en el plano $\tau$ - $\sigma$
Figura B/21	Formación Hollín Ensayos de Mecánica de Roca en laboratorio Compresión triaxial Parámetros de resistencia según el criterio de ruptura lineal de Coulomb

---

Figura B/22	Diagrama de referencia para la determinación del módulo de deformación
Figura B/23	Formación Hollín Histogramas de módulos de deformación
Figura B/24	Formación Hollín Envolverte de ruptura en el plano $\sigma_1$ - $\sigma_3$
Figura B/25	Formación Hollín Envolverte de ruptura en el plano $\tau$ - $\sigma$ y curvas $\phi$ - $c$
Figura B/26	Clasificación de los perfiles de rugosidad de discontinuidades y correspondientes coeficientes JRC
Figura B/27	Formación Hollín Envolvertes de ruptura de las discontinuidades según Barton comparadas con las envolvertes de ruptura del macizo según Hoek-Brown
Figura B/28	Formación Hollín Envolvertes de ruptura de las discontinuidades de la roca tipo IV en la sección de cierre del Embalse Compensador
Figura B/29	Formación Hollín Envolvertes de ruptura de las discontinuidades de la roca tipo III en el interior del macizo
Figura B/30	Formación Hollín Clasificación del macizo en el sector comprendido entre el Embalse Compensador y el tramo superior de la Tubería de Presión
PLANOS	
0209-G-2036	Geología Embalse Compensador Mapa geológico
0209-G-2037	Geología Presa del Embalse Compensador Alternativas aguas abajo Cortes geológicos
0209-G-2038	Geología Presa del Embalse Compensador Alternativas aguas arriba Cortes geológicos

- 
- 0209-G-2903      Mecánica de Rocas  
                    Galería exploratoria GT3  
                    Mapeo geoesstructural
- 0209-G-2904      Mecánica de Rocas  
                    Galería exploratoria GT3  
                    Estereogramas de discontinuidades

## 1. INVESTIGACIONES GEOTECNICAS

La formación Hollín ha sido investigada mediante perforaciones profundas en el sector del Embalse Compensador, donde estará afectada por el último tramo del Túnel de Aducción y por las obras de cierre en la quebrada Granadillas, y en la parte alta del sector Codo Sinclair, donde estará atravesada por el primer tramo de Tubería de Presión, y eventualmente, por la Chimenea de Equilibrio (Plano 0209-G-2023-1 y Figura B/1).

A lo largo del trazado del Túnel de Aducción, tres de los siete sondeos rotativos ejecutados, atravesaron la formación Hollín en todo su espesor, pero, puesto que estos sondeos estaban programados para investigar la subyacente formación Misahuallí, en ellos fueron realizados pocas pruebas de permeabilidad y pocos ensayos de laboratorio.

Para complementar la investigación de este macizo y realizar ensayos de mecánica de rocas "in situ", en la margen derecha del Embalse Compensador, en correspondencia de la desembocadura del Túnel de Aducción, fue excavada una galería exploratoria, denominada GT3, que alcanzó una longitud de 100 m.

A continuación se resumen las determinaciones de campo relativas a estos sondeos y se presentan los aspectos geoestructurales obtenidos del mapeo detallado de la galería.

### 1.1 Perforaciones rotativas

Las perforaciones en el sector del Embalse Compensador fueron realizadas durante la Fase A de los estudios en correspondencia de los sitios de cierre alternativos aguas abajo de la confluencia de las quebradas Granadillas y Los Loros y, en la Fase B, en los sitios de cierre seleccionados en ambas quebradas, aguas arriba de la confluencia (Plano 0209-G-2036 a 2038).

Para cada uno de estos sondeos se resumen los principales parámetros definidos en base a los criterios presentados en el Plano 0209-G-2900.



Alternativas de cierre aguas abajo

Sondeo	SC2	SC4	SC6	SC8
Profundidad (m)	60,0	80,1	60,0	118,1
Cota inicial	1.234,0	1.144,9	1.220,5	1.242,4
Inclinación	vertical	vertical	vertical	vertical
Cota final	1.174,0	1.064,8	1.160,5	1.124,3
Cota del nivel de agua	1.183,3*	1.138,4*	1.161,5*	1.220,7*
Recuperación (%)	100	100	100	100
RQD (%)	10-40	10-50	20-40	30-70
Alteración (A)	4-2	3-4	3	3-2
Fracturación (F)	5-4	4-3	3-4	4-3
Permeabilidad (UL)	15-120	49-243	3-76	1-50

\*: Medido al finalizar la perforación

Alternativas de cierre aguas arriba

Sondeo	SC9	SC10	SC11	SC12
Profundidad (m)	123,5	114,7	56,0	60,0
Cota inicial	1.260,7	1.254,2	1.198,0	1.247,5
Inclinación	vertical	vertical	vertical	vertical
Cota final	1.137,2	1.139,5	1.142,0	1.187,5
Cota del nivel de agua	1.197,7 o	1.193,2 o	1.184,8*	1.192,8*
Recuperación (%)	90-100	90-100	50-90	30-70
RQD (%)	25-75	0-90	0-70	0-50
Alteración (A)	4-2	3-2	4-2	3-2
Fracturación (F)	4-3	2-3	5-2	4-3
Permeabilidad (UL)	0-49	0-46	1-162	2-95

o: Lectura piezométrica

\*: Medido al finalizar la perforación

Las dos perforaciones en el sector Codo Sinclair que atravesaron la formación Hollín fueron realizadas durante la Fase B de los estudios para investigar el macizo rocosos que será afectado por la Chimenea de Equilibrio y por la Tubería de Presión con pozo vertical. Las determinaciones de campo relativas a estos sondeos son las siguientes:

Sondeo	SCE1	SCE2
Profundidad (m)	300,0	420,3
Cota inicial	1.284,1	1.238,5
Inclinación	vertical	vertical
Cota final	984,1	818,2
Cota del nivel de agua	1.136,4*	1.185,2*
Recuperación (%)	100	90-100
RQD (%)	70-90	0-50
Alteración (A)	2-1	3-1
Fracturación (F)	2	4-2
Permeabilidad (UL)	21-49	-

\*: Medido al finalizar la perforación

Las tres perforaciones en el sector Túnel de Aducción que atravesaron la formación Hollín fueron realizadas dos en la Fase A (ST3 y ST4) y una en la Fase B (ST6).

Las determinaciones de campo relativas a estos sondeos son las siguientes:

Sondeo	ST3	ST4	ST5
Profundidad (m)	345,2	218,0	485,0
Cota inicial	1.567,6	1.434,3	1.725,5
Inclinación	vertical	vertical	vertical
Cota final	1.222,4	1.216,3	1.240,5
Cota del nivel de agua	1.447,8*	1.371,5*	1.642,5*
Recuperación (%)	100	100	75-100
RQD (%)	70-100	0-90	30-90
Alteración (A)	3-2	3-2	2-1
Fracturación (F)	3-1	2-4	3-2
Permeabilidad (UL)	-	16-47	-

\*: Medido al finalizar la perforación

## 1.2 Galería exploratoria GT3

Esta galería, cuyo portal de entrada está en la cota 1.203 m, tiene una longitud de 100 m y una dirección N 85°W, aproximadamente perpendicular a la margen

izquierda del río Granadillas, y ha sido excavada en la arenisca de la formación Hóllín, caracterizada por su estratificación subhorizontal con buzamientos locales que varían entre 5° y 30°, como puede observarse en las paredes de la galería.

El mapeo geoestructural de esta galería (Plano 0209-G-2903) ha evidenciado hasta la abscisa 0+025 m roca medianamente alterada y luego, hasta el fondo de la galería, roca poco alterada, con excepción de los tramos comprendidos entre las abscisas 0+085 y 0+088 m y entre las abscisas 0+092 y 0+094 m, donde la roca se encuentra medianamente alterada.

El fracturamiento es importante a lo largo de toda la galería; sin embargo, en las paredes las fracturas verticales se concentran con diferente densidad en los estratos y a su vez los estratos no mantienen el mismo grado de fracturamiento a lo largo de la galería, pasando de medianamente fracturado a fragmentado.

Por lo tanto, en las paredes de la galería se puede observar, en el sentido vertical y por tramos, la presencia de estratos fragmentados al pie de la pared, medianamente fracturados al centro y muy fracturado hacia el techo o viceversa en otro tramo de la galería. En términos generales, la roca se presenta fragmentada en las zonas falladas y en los primeros cinco metros de la galería, y de medianamente a muy fracturada en el resto de la galería.

En lo referente a filtraciones se observan goteos aislados permanentes solamente hasta la abscisa 0+013 m; luego la galería permanece totalmente seca.

Las discontinuidades verticales de los estratos, analizadas a través de los estereogramas y por tramos de galería, evidencian la existencia de prácticamente un solo sistema principal (Plano 0209-G-2904).

Abscisa (m)	Sistema de discontinuidades	
	Principal	Secundario
de 0+000 a 0+030	N 40°W/90°	-
de 0+030 a 0+060	N 30°W/80°SW	-
de 0+060 a 0+100	N 30°W/80°SW	-

## 2. INVESTIGACIONES GEOFISICAS

En la galería GT3, una vez concluido el mapeo geoestructural, fueron ejecutadas prospecciones sísmicas de refracción y ensayos con el método del taladro transversal para la medición de la velocidad de las ondas de corte.

### 2.1 Prospección sísmica de refracción

Esta investigación que abarcó la longitud total de la galería se realizó instalando en el piso geófonos cada metro y la fuente de energía cada 4 metros. La velocidad de propagación de las ondas longitudinales ( $V_p$ ) y transversales ( $V_s$ ) medidas en los diferentes tramos de la galería y los correspondientes módulos calculados de corte dinámico ( $G_{DIN}$ ), de elasticidad ( $E_{DIN}$ ) y el coeficiente de Poisson ( $\nu_{DIN}$ ) se presentan en el Cuadro B/1.

Cuadro B/1

Galería exploratoria GT3

Prospección sísmica de refracción

VELOCIDAD DE LAS ONDAS Y MODULOS DINAMICOS

Abscisa (m)	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$G_{DIN}$ (MPa)	$E_{DIN}$ (MPa)	$\nu_{DIN}$
0+000 a 0+004	2.000	1.110	2.340	6.000	0,28
0+004 a 0+010	1.700	1.000	2.950	4.700	0,24
0+010 a 0+017	2.500	1.400	6.900	9.470	0,27
0+017 a 0+027	2.000	1.200	3.950	6.670	0,22
0+027 a 0+038	2.000	1.200	3.950	6.670	0,22
0+038 a 0+050	1.850	1.080	3.550	5.500	0,24
0+050 a 0+061	2.200	1.200	5.550	7.050	0,29
0+061 a 0+072	2.400	1.350	6.330	8.800	0,27
0+072 a 0+081	1.920	1.070	4.100	5.550	0,27
0+081 a 0+087	2.200	1.270	5.100	7.660	0,25
0+087 a 0+090	2.000	1.200	3.950	6.670	0,22
0+090 a 0+095	1.833	1.060	3.540	5.300	0,25
0+095 a 0+100	1.750	1.010	3.230	4.850	0,25

En la Figura B/2 se evidencia la variación de la velocidad  $V_p$  entre 1.700 y 2.500 m/s y de la velocidad  $V_s$  entre 1.010 y 1.400 m/s con una relación entre ellas de 2, aproximadamente.

Por otro lado los módulos varían como sigue:

$G_{DIN}$  de 2.340 a 6.900 MPa  
 $E_{DIN}$  de 4.700 a 9.470 MPa

los cuales indican una roca de bajas características geomecánicas.

Los valores más bajos corresponden al tramo inicial y final de la galería, lo cual resulta ser en parcial contradicción con el mapeo geoestructural que indica un mejoramiento de las condiciones de la roca en el tramo final de la galería. Esto tendría su explicación si se considera que la investigación sísmica alcanzó una profundidad reducida, probablemente todavía afectada por la excavación.

## 2.2 Ensayos de taladro transversal

Para la ejecución de estos ensayos fueron perforados diez sondeos de 6 m de profundidad y de diámetro NW, en el piso de la galería GT3 (Figura B/3).

El aparato para la generación de los impactos y los geófonos de recepción estaban instalados en sondeos distantes entre ellos de 8 a 10 m. Los ensayos fueron ejecutados a la profundidad de 1,5 y de 4,0 m, determinándose de esta manera la velocidad media en la sección de roca entre los sondeos y la estratigrafía sísmica de la roca investigada.

En el Cuadro B/2 se presentan las velocidades mediadas a diferente profundidad y los valores del módulo dinámico ( $E_{DIN}$ ) y de corte ( $G_{DIN}$ ).

Cuadro B/2

Galería exploratoria GT3

Ensayos de taladro transversal

VELOCIDAD DE LAS ONDAS Y MODULOS DINAMICOS

Abscisa (m) Profundidad	$V_p$ (m/s)		$V_s$ (m/s)		$E_{DIN}$ (MPa)		$G_{DIN}$ (MPa)	
	1,5 m	4,0 m	1,5 m	4,0 m	1,5 m	4,0 m	1,5 m	4,0 m
0+000 a 0+016	2.350	2.580	620	588	2.650	2.370	900	800
0+016 a 0+024	1.650	2.100	740	750	3.600	3.820	1.300	1.340
0+077 a 0+085	2.090	2.385	1.155	1.140	8.300	8.560	3.250	3.160
0+085 a 0+093	2.160	2.200	1.225	1.280	9.260	10.025	3.670	4.040

Las variaciones más significativas se registran en sentido horizontal, a partir del tramo inicial de la galería hacia el fondo (Figura B/4). Los valores de las velocidades y, sobre todo, la relación  $V_p/V_s$  y los módulos  $E_{DIN}$  indican un mejoramiento de las características de la roca hacia el interior del macizo.

Sin embargo, se nota también una variación en sentido vertical relacionado a la diferente profundidad de ensayo y a la presencia de un estrato subhorizontal de lutita de 2,0 m de espesor entre las profundidades de 1,5 a 3,5 m debajo del piso de la galería.

En conclusión, los resultados obtenidos de estos ensayos parecen ser más representativos de los obtenidos de la prospección sísmica de refracción. En realidad, a pesar de la falta de ensayos en la parte intermedia de la galería, estos resultados destacan muy bien las características geomecánicas en el tramo inicial y final de la galería, en acuerdo con las observaciones geoestructurales.

### 3. INVESTIGACIONES DE MECANICA DE ROCAS IN SITU

La deformabilidad del macizo de la formación Hollín fue determinada mediante la ejecución de ensayos de gato plano en pared y de ensayos de carga sobre placa en la galería GT3 cuya ubicación se ilustra en la Figura B/3.

#### 3.1 Ensayos de gato plano en pared

El ensayo de gato plano proporciona datos sobre la tensión natural y la deformabilidad de la roca en la parte superficial de una sección de la galería. Mediante el corte de una ranura horizontal en la pared, la roca fue parcialmente descargada y luego nuevamente sometida a carga.

La tensión natural normal a la ranura está relacionada con la presión que se requiere para anular el desplazamiento que se produce como resultado del corte. Las medidas de deformación se hicieron entre los puntos de referencia colocados previamente a ambos lados de la ranura.

En cada ensayo fueron ejecutados, en forma sistemática, ciclos de carga y descarga y se determinó el módulo de deformación ( $E_{DEF}$ ) y el módulo de elasticidad ( $E_{EL}$ ).

En la galería fueron realizados dos ensayos de gato plano: en la abscisa 0+030 m (hastial izquierdo) y en la abscisa 0+075 m (hastial derecho).

En las Figuras B/5 y B/6 se ilustran los diagramas presión/deformación relativos a los dos ensayos.

A continuación se resumen los módulos obtenidos:

Ensayo No.	Abscisa (m)	Carga aplicada (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
1	0+030	2,0	438,5	728
2	0+075	4,1	1.870,5	2.656
		4,2	1.650	2.188
		6,3	1.746	2.340
			$\bar{x}$ 1.756	$\bar{x}$ 2.395

Los valores obtenidos resultan ser demasiado bajos para el macizo investigado que, a pesar de su estructura fracturada y relajada, sigue siendo estable y no presenta fenómenos de convergencia en las paredes de la galería.

Los diagramas denotan un comportamiento pseudo-plástico de la roca, la cual no puede soportar mayores incrementos de carga, pues se verificaría un fenómeno de fluencia o un incremento muy grande de las deformaciones que conllevaría, a corto plazo, a la ruptura de la roca.

En efecto, durante los ensayos, los ciclos de carga y descarga originaron en la roca la formación, en manera violenta, de fracturas alrededor de la ranura y el desprendimiento de fragmentos en la pared. Esto resultó muy evidente en el curso del ensayo ubicado en la abscisa 0+030 m donde se pudieron efectuar solamente dos ciclos de carga y descarga.

Las mejores condiciones estructurales de la roca en la abscisa 0+075 permitieron realizar tres ciclos de carga y descarga antes que la arenisca fallara.

Los resultados de estos ensayos están evidentemente relacionados con la estratificación subhorizontal del macizo y con la presencia de las intercalaciones de lutita, es decir a la situación de anisotropía de la formación Hollín. Entonces las características geomecánicas son de mayor deformabilidad en la dirección horizontal, paralela a la estratificación.

Por lo tanto, los ensayos de gato plano realizados mediante un corte horizontal en la pared, midieron la deformabilidad en la dirección de mayor compresibilidad.

Adicionalmente, después de realizar estos ensayos, se intentó medir el estado de esfuerzo en el macizo como consecuencia del relajamiento de las tensiones producidas por el corte de las ranuras.

Sin embargo, en las ranuras no se registró ningún indicio de cierre de los bordes, o sea ninguna variación en la posición de los puntos de referencia durante las 24 horas siguientes al corte. Por lo tanto el macizo resulta ser completamente descomprimido, lo cual se explicaría tomando en cuenta:

- El elevado grado de fracturación de la roca que presenta fracturas abiertas y estructuras de distensión.
- Las condiciones de alivio de tensiones en el macizo por procesos geomorfológicos de erosión (quebradas, derrumbes, deslizamientos).
- Los levantamientos tectónicos verticales ocurridos en el macizo que se descargaron lateralmente a través de los estratos subhorizontales y de las fracturas.

### 3.2 Ensayos de carga sobre placa

Con el fin de obtener datos de deformabilidad más confiables, en la galería GT3 fueron realizados dos ensayos de carga directa sobre placa con los cuales, además de



ensayar un mayor volumen de roca, se aplicaron cargas más elevadas de las que fueron aplicadas en los ensayos de gato plano.

En base a lo mencionado anteriormente, se optó para efectuar dos ensayos, el primero vertical, en la dirección de mayor deformabilidad, ubicado en la abscisa 0+099 m y el segundo, horizontal, en la dirección de menor deformabilidad, ubicado en la abscisa 0+075 m (Figura B/3).

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

- Ensayo de carga vertical (Figura B/7)

Abscisa 0+099 m

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-2,8	712,7	2.072
0-3,5	505,5	1.610
0-5,7	561	1.926
	$\bar{x}$ 593	$\bar{x}$ 1.870
$E_{DEF}/E_{EL} = 0,30$		

- Ensayo de carga horizontal (Figura B/8)

Abscisa 0+075 m

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa) Hastial		$E_{EL}$ (MPa) Hastial	
	derecho	izquierdo	derecho	izquierdo
0-1,4	1.114	1.188	4.454	3.956
0-2,8	1.782	1.345	3.960	4.751
0-5,7	1.926	2.137	4.914	3.960
0-8,6	2.706	2.576	4.454	4.972
0-12,8	3.025	2.375	5.727	3.960
	$\bar{x}$ 2.110	1.924	4.700	4.320
	s 762	622	665	500
$E_{DEF}/E_{EL} = 0,45$				

Módulo de deformación global = 1.419 MPa.

La relación de los módulos obtenidos y las cargas aplicadas se ilustra en la Figura B/9, mientras que en la Figura B/10 se presenta el histograma de los módulos obtenidos con los ensayos de carga sobre placa y de los ensayos de gato plano en pared.

De los resultados indicados y del análisis de los gráficos relativos se concluye lo siguiente:

- Los ensayos de carga vertical y horizontal evidencian, una vez más, la anisotropía del macizo como resulta de la relación  $E_{DEF}/E_{EL} = 0,30 \div 0,45$ .
- El ensayo de carga vertical mide la dirección de mayor deformabilidad en cuanto comprime estratos subhorizontales.
- En ensayo de carga horizontal mide la dirección de menor deformabilidad en el macizo y los valores obtenidos son 2-3 veces mayores de los del ensayo de carga vertical.
- En el ensayo de carga vertical la curva presión/deformación muestra una relación lineal con módulos constantes hasta la ruptura. La roca comenzó a fallar bajo la carga de 7 MPa.
- En el ensayo de carga horizontal la curva presión/deformación evidencia el cierre de las fracturas que en el macizo son predominantemente subverticales. En efecto, los módulos aumentan con las cargas aplicadas. El proceso de compresión de las fracturas no parece todavía concluido bajo la carga de 13 MPa.
- Los bajos valores de los módulos reflejan la situación estructural de la roca afectada por fenómenos de fracturación y descompresión hasta el interior del macizo, aún si el índice RMR y los ensayos de taladro transversal denotan un mejoramiento hacia el fondo de la galería GT3.
- Los valores representativos de deformabilidad para las direcciones anisótropas son:

Normal a la estratificación		Paralela a la estratificación	
$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
593	1.870	2.017	4.510

Debido a la geometría del ensayo, también estos valores están afectados por la presencia de roca disturbada y relajada en la superficie de la sección excavada. Los módulos de roca indisturbada deberían ser más elevados.

### 3.3 Comparación entre los parámetros estáticos y dinámicos

Los resultados obtenidos de estos ensayos de deformabilidad comparados con los módulos dinámicos calculados en base a las investigaciones geofísicas realizadas en la galería GT3, evidencian las siguientes relaciones:

Abscisa (m)	Prospección sísmica $E_{DIN}$ (MPa)	Ensayo de taladro transversal $E_{DIN}$ (MPa)*	Ensayo de gato plano $E_{EL}$ (MPa)	Ensayo de carga vertical $E_{EL}$ (MPa)	Ensayo de carga horizontal $E_{EL}$ (MPa)
0+030	6.670	3.600	728	-	-
0+075	5.550	8.300	2.395	-	4.510
0+090	5.300	9.260	-	1.870	-

\* Relativo al ensayo realizado a la profundidad de 1,50 m

Como lo indicado anteriormente, los módulos obtenidos de las prospecciones sísmicas y del ensayo con gato plano están demasiado afectados por la presencia de roca disturbada y, por lo tanto, no son representativos del macizo.

Asumiendo como más reales los resultados obtenidos de los ensayos de taladro transversal y de carga directa se obtiene la siguiente relación entre los módulos estáticos y dinámicos:

$$\begin{aligned} E_{DIN}/E_{EST} &= 1,8 && \text{para el módulo elástico horizontal} \\ E_{DIN}/E_{EST} &= 5,0 && \text{para el módulo elástico vertical} \end{aligned}$$

De esta manera se pueden estimar los siguientes módulos elásticos estáticos a lo largo de la galería GT3:

Abscisa	$E_{EL}$ horizontal (MPa)	$E_{EL}$ vertical (MPa)	Calidad de la roca
0+008 - 0+016	1.470	530	Descomprimida
0+016 - 0+024	2.000	720	
0+077 - 0+085	4.510	1.660	Regular
0+085 - 0+093	5.140	1.870	

Por otro lado, si se toman en cuenta los módulos de deformación, se obtiene la siguiente relación entre los módulos estáticos y dinámicos:

$$E_{DIN}/E_{EST} = 4,0 \quad \text{para el módulo de deformación horizontal}$$

$E_{DIN}/E_{EST} = 15,0$  para el módulo de deformación vertical

La variación del módulo de deformación a lo largo de la galería GT3, se puede estimar como se indica a continuación:

Abscisa	$E_{DEF}$ horizontal (MPa)	$E_{DEF}$ vertical (MPa)	Calidad de la roca
0+008 - 0+016	660	170	Descomprimida
0+016 - 0+024	900	230	
0+077 - 0+085	2.017	535	Regular
0+085 - 0+093	2.315	593	

#### 4. PERMEABILIDAD DEL MACIZO

La permeabilidad del macizo rocoso de la formación Hollín ha sido evaluada analizando todos los ensayos de absorción de agua tipo Lugeon, realizados en los sondeos profundos perforados en el sector Embalse Compensador, en ambas fases de estudio (Anexo F del Informe Final).

Estos ensayos han sido efectuados a intervalos de 5,0 m de longitud utilizando, en general, tres niveles de presión, ascendente y descendente, y manteniendo la presión por 10 minutos en cada sección para lograr gastos estabilizados de absorción de agua.

Los valores de unidad Lugeon (UL) registrados han sido interpretados mediante el método propuesto por Houlby (1976) y basado en la variación de la absorción de agua a diferentes niveles de presión (Figura B/11).

A continuación se presentan los valores UL medidos en los sondeos y la interpretación del correspondiente tipo de flujo.

Cuadro B/3

Formación Hollín

Sondeos rotativos

##### ENSAYOS DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON

Ubicación	Sondeo	Profundidad de referencia (m)	Cota (m snm)	Unidad Lugeon (UL)	Tipo de flujo
Aguas abajo del Embalse Compensador	SC12	32	1.216	2	L
		37	1.211	22	L-T
		42	1.206	16	W
		47	1.201	50	W
		52	1.196	47	L
		57	1.191	53	W
		62	1.186	95	W
	SC8	27	1.215	8	L
		32	1.210	15	W
		37	1.205	12	W
		42	1.200	42	L
		47	1.195	46	L
		57	1.185	22	L-T

	SC8	62	1.180	45	L
		67	1.175	22	F
		72	1.170	77	F
		77	1.165	0,2	L
		82	1.160	2	F
		87	1.155	2	F
		92	1.150	0,3	F
		97	1.145	0,8	W
		102	1.140	3	L-W
		107	1.135	2	L-F
		112	1.130	42	L-F
		117	1.125	25	W
	SC6	13	1.207	53	L
		18	1.202	42	W
		23	1.197	38	W
		28	1.192	73	L-W
		33	1.187	61	T
		38	1.182	76	L-T
		43	1.177	16	W
		48	1.172	18	L
		53	1.167	3	W
		58	1.162	34	L
	SC4	12	1.133	58	W
		17	1.128	243	L-W
		22	1.123	48	L
		27	1.118	80	W
		32	1.113	43	L
		37	1.108	37	L-T
		42	1.103	36	L
		47	1.098	37	L-T
		52	1.093	5	L
		57	1.088	5	L-D
	SC2	18	1.216	71	W
		23	1.211	120	L
		28	1.206	89	L
		33	1.201	27	W
		38	1.196	33	W
		43	1.191	45	F
		48	1.186	30	F
		53	1.181	18	L
		58	1.176	15	L
Sitio de	SC9	23	1.238	40	W
cierre del		28	1.233	10	W
Embalse		33	1.228	7	L
Compensador		38	1.223	3	L-T

	SC9	43	1.218	21	L-W
		48	1.213	17	L-W
		53	1.208	18	W
		58	1.203	50	W
		63	1.198	40	W
		68	1.193	24	W
		71	1.190	35	W
		76	1.185	7	W
		81	1.180	2	T-D
		86	1.175	389	W
		91	1.170	2	F
		96	1.165	0	Impermeable
		101	1.160	6	L
		106	1.155	2	L-T
		111	1.150	1	L
		116	1.145	1	L
		121	1.140	62	W
	SC10	27	1.227	10	L
		32	1.222	3	L-D
		47	1.217	46	T
		52	1.212	28	L-W
		55	1.209	18	W
		60	1.204	2	W
		65	1.199	3	W
		70	1.194	7	L-W
		75	1.189	3	L-F
		80	1.184	1	F
		85	1.179	18	W
		90	1.174	7	W
		95	1.169	23	F
		100	1.164	17	F
		105	1.159	1	F
		110	1.154	53	L-W
	SC11	12	1.186	98	F
		17	1.181	51	T
		22	1.176	162	W
		27	1.171	79	L-D
		32	1.166	1	F
		37	1.161	3	F
		42	1.156	7	L
		47	1.151	131	-
		53	1.145	21	-
Túnel de Aducción	ST4	170	1.264	42	D
		175	1.259	16	L
		180	1.254	31	L-T
		185	1.249	27	L

	ST4	190	1.244	47	F
		195	1.239	36	F
Chimenea de	SCE1	120	1.164	21	W
Equilibrio		125	1.159	21	W
		133	1.151	19	W
		140	1.144	49	-
		152	1.132	44	F
		157	1.127	39	F
		168	1.116	26	F-D

Por otro lado, la galería exploratoria GT3 excavada en la margen izquierda del Embalse Compensador a unos 130 aguas arriba del eje de cierre, resultó completamente seca en toda su longitud, puesto que la cota del piso se encuentra unos 8 m arriba del nivel freático existente en el macizo.

Del análisis de todos estos datos se obtiene un cuadro bastante completo de la variación de la permeabilidad en el macizo de la formación Hollín en el área de las obras de cierre del Embalse Compensador. Esta variación se ilustra gráficamente en los Planos 0209-G-2037 y 2038 adjuntos.

En resumen, los principales comentarios son los siguientes:

- En la parte superior del macizo la permeabilidad es alta a muy alta ( $UL > 10$ ), a veces con tramos de baja permeabilidad ( $UL = 1-5$ ), en la relación con las variaciones litológicas.
- En la parte inferior del macizo la permeabilidad disminuye hasta valores bajos ( $UL < 5$ ). El contacto con la subyacente formación Misahuallí está siempre caracterizado por una permeabilidad muy alta ( $UL = 20$  a  $60$ ), y el flujo del agua durante el ensayo produce un lavado de relleno.
- La roca al fondo de la quebrada Granadillas y en las laderas, en un espesor de 30 m, aproximadamente, es muy permeable con valores  $UL$ , a veces,  $> 100$ . Se trata de la faja de roca descomprimida encontrada en el primer tramo de la galería exploratoria GT3.
- El tipo de flujo es prevalentemente laminar, de lavado de relleno y de saturación de vacíos, lo cual indica que las fracturas son abiertas y permeables a presión medio-baja y que el relleno de la fracturas, fácilmente movilizado y lavado por el agua de ensayo, no está relacionado a un proceso de alteración de la roca sino a la circulación hídrica subterránea procedente desde las cotas más altas. En la parte inferior del macizo donde la permeabilidad disminuye, las fracturas están más cerradas de manera que se favorece la redeposición del material lavado y el relleno de las discontinuidades.



En áreas periféricas al sector del Embalse Compensador la permeabilidad del macizo es, en general, alta a muy alta en todo su espesor.

En el último tramo del Túnel de Aducción, los ensayos en el sondeo ST4 indican una permeabilidad muy alta en la parte inferior del macizo ( $UL = 20-50$ ).

En la zona de la Chimenea de Equilibrio, la parte superior del macizo presenta una permeabilidad alta ( $UL < 20$ ) que aumenta en la parte inferior caracterizada por valores de  $UL = 40-50$ .

## 5. INYECTABILIDAD DEL MACIZO

Para evaluar la posibilidad de tratamiento de las cimentaciones de las obras de cierre del Embalse Compensador, mediante mezclas convencionales de agua-cemento, fueron realizadas algunas pruebas de inyección de la arenisca de la formación Hollín en el curso de la perforación de los sondeos SC9 y SC10, ubicados en la parte alta de las laderas de la quebrada Granadillas.

Las pruebas fueron realizadas entre las cotas 1.230 y 1.195 (correspondiente al fondo de la quebrada) con el fin de verificar la absorción de lechada en la roca más descomprimida y fracturada de ambos márgenes. Fueron ensayados tramos de 3 a 5 m de longitud, utilizando mezclas progresivamente más espesas, con presión variable de 1 a 6 kg/cm<sup>2</sup>.

Los registros de estas pruebas están ilustrados en el Cuadro B/4.

Las absorciones registradas, a pesar de algunos problemas ejecutivos relacionados con la dificultad de perforación de la arenisca y con la pérdida de agua de circulación en las fracturas, proporcionan valiosas informaciones comparadas con la permeabilidad del macizo obtenida de los ensayos de pérdida de agua.

En el Cuadro B/5 se presenta la correlación entre la absorción registrada (cantidad de cemento seco por metro) y las unidades Lugeon (UL) correspondientes.

Cuadro B/4

Formación Hollín  
Sondeos rotativos  
PRUEBAS DE INYECCION DE CEMENTO

## SONDEO SC9 - Embalse Compensador - Margen derecha

Tramo ensayado	(m)	32-36	36-41	42-47	47-52	52-57	58-61	61-64
Cota	(m)	1230-24	1224-19	1219-14	1214-09	1209-04	1202-1199	1199-96
1. Presión	(kg/cm <sup>2</sup> )	1	1	0	0	0	-	-
Mezcla		5:1	4:1	4:1	5:1	5:1	-	-
Cemento seco	(kg)	36	18	18	18	18	-	-
2. Presión	(kg/cm <sup>2</sup> )	2	1	1	2	2	2	2
Mezcla		4:1	4:1	4:1	5:1	5:1	2:1	3:1
Cemento seco	(kg)	36	18	31	64	50	300	165
3. Presión	(kg/cm <sup>2</sup> )	-	-	2	5	3	-	6
Mezcla		-	-	4:1	5:1	4:1	-	3:1
Cemento seco	(kg)	-	-	32	64	17	-	33
4. Presión	(kg/cm <sup>2</sup> )	-	-	4	-	-	-	-
Mezcla		-	-	4:1	-	-	-	-
Cemento seco	(kg)	-	-	32	-	-	-	-
Admisión total	(kg)	72	36	113	146	85	300	198
Absorción	(kg/m)	16	7	22	29	17	100	66
Interpretación		baja	muy baja	baja	mediana	baja	mediana	mediana
Clase		2	1	2	3	2	3	3
		*		*	*			

## SONDEO SC10 - Embalse Compensador - Margen izquierda

Tramo ensayado	(m)	36-41	46-50	50-54	54-58
Cota	(m)	1218-1213	1208-1204	1204-1199	1199-1195
1. Presión	(kg/cm <sup>2</sup> )	1	1	2	2
Mezcla		5:1	5:1	2:1	3:1
Cemento seco	(kg)	30	92	150	100
2. Presión	(kg/cm <sup>2</sup> )	-	1	2	6
Mezcla		-	4:1	2:1	2:1
Cemento seco	(kg)	-	23	100	100
Admisión total	(kg)	30	115	250	200
Absorción	(kg/m)	6	29	63	50
Interpretación		muy baja	mediana	mediana	mediana
Clase		1	3	3	3

\*: Ensayos no aceptados por INECCEL

Cuadro B/5

Formación Hollín  
Pruebas de inyección de cemento  
Correlación entre absorción y permeabilidad

Cota (m s.n.m.)	Sondeo SC10		Sondeo SC9	
	Absorción (kg/m)	Permeabilidad (UL)	Absorción (kg/m)	Permeabilidad (UL)
1.230	-	-	16	7
1.220	- 6	3 17	7 22	3 20
1.210	- 29	- 46	29 17	16 18
1.200	63 50	28 18	100 66	49 39
1.190	-	2	-	24

Aunque la cantidad de datos disponibles sea relativamente pequeña, del análisis de los mismos, se puede hacer los siguientes comentarios:

- Tomando en cuenta la variabilidad de composición de los estratos de arenisca con frecuentes intercalaciones de lutita e irregulares bandeamientos de asfalto, la correlación entre los registros de absorción y la permeabilidad es buena.
- En los tramos más permeables, con la misma presión, se registran absorciones muy diferentes que van aumentando a medida que se realizan los ensayos o sea a medida que aumente la circulación de fluidos en las fracturas y que se lave el relleno en las mismas. En realidad el tipo de flujo W (lavado de relleno) ha sido interpretado frecuentemente en los ensayos de permeabilidad.
- En los tramos menos permeables se nota un aumento de absorción a medida que aumenta la presión de inyección.
- Por lo que se refiere al tipo de mezcla empleado no se evidencian correlaciones con las absorciones registradas.

En resumen, se considera que, de realizarse el tratamiento de las cimentaciones en arenisca con métodos tradicionales, se deberá tomar muy en cuenta lo siguiente:

Durante la perforación de los taladros, los déritos de arena cuarzosa pueden ocasionar frecuentes atrapamientos de la herramienta.

La estratificación subhorizontal y la abundante fracturación ocasionan pérdidas del agua de circulación y la dificultad de limpiar el polvillo que se produce al fondo del taladro.

La rotoperforación con aire comprimido resultará ser el método más seguro de perforación.

Para obtener absorciones elevadas de lechada agua-cemento deberán ser lavadas previamente las fracturas con agua en presión.

Resultará conveniente utilizar presiones de inyección relativamente altas y mezclas espesas para evitar una excesiva difusión de lechada entre los estratos del macizo fracturado.

## 6. ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

Las determinaciones de campo y los ensayos in situ fueron complementados con una serie de ensayos de laboratorio sobre los diferentes litotipos identificados en los testigos de perforación.

Los resultados de estos ensayos han sido comparados con aquellos obtenidos durante la Fase A de los estudios y están resumidos en los siguientes cuadros.

En el Cuadro B/6 está resumida la cantidad de ensayos de laboratorio ejecutados, relativos a los litotipos de la formación Hollín; mientras que el Cuadro B/7 muestra todos los resultados obtenidos.

Debido a la heterogeneidad litológica de la formación Hollín, los resultados obtenidos son bastante variables y, por lo tanto, resulta poco indicativo tomar valores promedio de las muestras de cada sondeo. Entonces se ha considerado más representativo resumir los resultados por litotipos como se ilustra en el Cuadro B/8.

Para conseguir una mejor caracterización del macizo rocoso de la formación Hollín, se han reconsiderado los datos de laboratorio de la Fase A y, en particular, los de deformabilidad y de resistencia. En el Cuadro B/9 está resumido el conjunto de todos los resultados relativos a este macizo, donde cada litotipo resulta caracterizado por sus parámetros físicos y mecánicos promedio.

### 6.1 Análisis petrográficos

El estudio macroscópico de las muestras y el análisis petrográfico mediante láminas delgadas, ha permitido identificar los varios litotipos que constituyen el macizo rocoso de la formación Hollín.

Para fines geomecánicos los diferentes litotipos han sido agrupados como sigue:

Areniscas:	Arenisca con cemento oxidado Arenisca de granos finos Arenisca de granos gruesos
Areniscas con intercalaciones:	Arenisca con lutita Arenisca con bandeamientos de asfalto
Lutitas	

## Cuadro B/6

Formación Hollín

Mecánica de rocas en laboratorio

## RESUMEN DE LOS ENSAYOS EJECUTADOS

Ubicación	Análisis petrográfico	Peso específico	Porosidad	Compresión simple	Compresión monoaxial	Compresión triaxial	Carga puntual	Martillo Schmidt	Velocidad sónica	Corte directo	Abrasión	Absorción	Durabi- lidad	Hincha- miento
<u>Embalse Compensador</u>														
SC9	1	12	12	5	4	-	16	6	12	5	-	3	-	2
SC10	-	12	12	5	4	2	14	8	11	4	1	3	1	1
SC11	1	6	6	4	2	-	9	6	6	1	-	1	-	1
SC12	-	4	4	3	1	-	6	1	4	1	-	-	-	-
Galería GT3	1	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-
<u>Chimenea de Equilibrio</u>														
SCE1	1	10	10	4	3	-	15	-	8	5	1	6	3	2
TOTALES	4	44	44	21	14	2	66	21	41	16	2	13	4	6

Cuadro B/7  
Formación Hollín  
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Sondeo	Muestra No.	Profundidad (m)	Propiedades generales			Resistencia a la Compresión					Deforma- bilidad		Velocidad Sónica (m/s)	Resistencia al Corte		Desgaste a la Abrasión		Absor- ción	Hinchamiento (kg/cm2)	Durabilidad (%)
			Peso Específico natural (g/cm3)	Peso Específico seco (g/cm3)	Porosidad (%)	Monoaxial (MPa)	Puntual		Resistencia Schmidt (MPa)	Dureza Schmidt (No. rebotes)	Módulo Elástico (MPa)	Coeficiente de Poisson		φ Máximo (°)	φ Residual (°)	Pérdida (%)	Coeficiente de Uniformidad	Inmersión Total (%)		
							Axial (MPa)	Diametral (MPa)												
SC9	18	31.45	2.580	2.610	8.9	32.3	-	-	45.0	38.0	3845	0.22	2440	-	-			7.4	-	
	19	35.50	2.080	2.070	19.6	41.0	-	0.8	43.0	37.5	9234	0.36	2273	-	-			-	-	
	20	37.60	2.180	2.180	13.9	-	3.5	1.7	-	-	-	-	-	45.0	34.0			-	-	
	21	39.50	2.380	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1178	54.5	33.0			-	-	
	22	43.35	2.230	2.280	12.5	22.6	3.8	-	32.5	31.5	-	-	3348	-	-			3.8	-	
	23	48.70	2.310	2.320	7.5	40.8	-	-	-	-	-	-	1977	61.0	45.0			-	-	
	24	54.50	2.230	2.250	12.5	106.7	-	-	45.0	38.5	75141	0.14	2309	-	-			-	-	
	25	58.50	2.280	2.200	12.8	55.2	2.7	1.7	26.0	28.0	-	-	1983	-	-			-	-	
	26	66.70	2.220	2.200	12.7	46.3	0.7	2.1	-	-	-	-	2134	-	-			-	-	
	27	76.75	2.450	2.440	3.0	61.2	2.2	0.4	-	-	27200	0.18	1641	55.0	29.0			-	-	1.06
	28	89.20	2.430	2.470	3.7	-	5.7	0.8	-	-	-	-	2086	-	-			-	-	
	29	95.35	2.560	2.500	3.0	16.4	2.2	0.6	-	-	-	-	1819	-	-			-	-	1.07
	30	106.35	2.220	2.200	13.4	-	4.1	3.1	16.6	31.0	-	-	3013	52.0	33.5			4.3	-	
SC10	31	24.30	2.480	2.330	4.7	148.1	5.2	1.6	48.5	40.5	11067	0.10	1997	-	-	-	-	-	-	-
	32	26.05	2.260	2.220	7.5	28.1	2.6	2.0	27.0	28.5	-	-	2867	-	-	-	-	2.1	-	-
	33	29.30	1.900	1.900	9.1	-	-	2.0	51.0	42.0	1772	0.04	2507	-	-	-	-	-	-	-
	34	34.50	2.500	2.200	5.1	-	-	-	-	-	-	-	3607	-	-	-	-	-	-	-
	35	37.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35.7	28.0	-	-	-	-	-
	36	44.40	2.090	2.080	13.3	53.1	2.9	-	34.0	32.0	12068	0.20	2075	-	-	-	-	5.4	-	-
	37	60.30	2.160	2.130	11.1	40.3	1.7	1.6	13.0	20.5	-	-	1118	-	-	78.10	0.42	5.3	-	97.30
	38	64.60	2.390	2.300	2.1	69.9	-	-	-	-	19835	0.24	2392	-	-	-	-	-	0.36	-
	39	73.35	2.480	2.420	5.4	-	-	-	-	-	-	-	1455	38.5	28.0	-	-	-	-	-
	39	73.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38.8	32.0	-	-	-	-	-
	39	73.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	22.0	19.0	-	-	-	-	-
	40	81.80	2.240	2.210	8.8	88.1	3.8	1.8	33.0	31.5	-	-	2252	-	-	-	-	-	-	-
	41	88.00	2.680	2.580	2.9	19.2	0.8	0.8	-	-	-	-	3098	-	-	-	-	-	-	-
42	102.00	2.160	2.080	16.4	42.3	1.7	1.7	13.4	20.6	-	-	2693	-	-	-	-	-	-	-	
SC11	43	11.80	2.220	2.220	12.8	68.0	3.8	1.9	13.4	20.6	30853	0.32	1546	-	-			4.3	-	
	44	11.80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47.0	35.0			-	-	
	45	19.25	2.170	2.160	14.6	89.7	5.0	-	6.0	16.4	-	-	2490	-	-			-	-	
	46	32.00	2.520	2.650	5.5	11.3	-	-	-	-	-	-	1111	-	-			-	-	0.52
	47	34.90	2.510	2.470	2.6	34.3	4.0	1.3	-	-	7298	0.12	1929	-	-			-	-	
	48	40.65	2.230	2.200	12.7	46.3	3.4	2.5	11.2	19.0	-	-	2449	-	-			-	-	
	49	43.90	2.190	2.170	14.2	37.0	4.6	1.6	3.9	15.0	-	-	2365	-	-			-	-	
GT3		0+005						0.6												
		0+010						0.9												
		0+023						1.3												
		0+045						1.4												
		0+083						2.1												
	0+099						1.4													
SC12	51	31.90	2.380	2.370	6.6	77.5	-	-	-	-			2444	-	-					
	52	33.20	2.270	2.260	9.8	46.5	40.1	22.2	-	-	22682	0.01	2298	-	-					
	53	36.70	-	-	-	-	-	-	-	-			-	47.5	36.0					
	54	45.10	2.220	2.210	13.3	70.4	28.0	24.0	32.0	31.0			2261	-	-					
	55	47.65	2.470	2.460	5.0	41.4	25.9	9.1	-	-			2833	-	-					
SCE1	1	31.00	-	2.310	10.7	25.1	0.6	-	22.4	25.7	3177	0.02	1266	-	-	-	-	-	0.19	90.30
	2	50.30	-	2.470	6.6	20.1	2.5	2.1	36.4	33.7	-	-	3685	-	-	-	-	2.7	-	-
	3	63.75	-	2.490	7.5	-	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.0	-	54.10
	4	79.20	-	2.420	8.7	21.0	1.1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.6	2.20	91.70
	5	82.75	-	2.510	2.9	109.7	-	-	51.0	42.0	-	-	2726	46.0	40.0	-	-	-	-	-
	6	93.90	2.500	2.350	2.4	-	-	-	27.0	28.5	-	-	1759	45.0	33.5	-	-	-	-	-
	6	93.90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42.0	29.5	-	-	-	-	-
	7	105.35	2.140	2.130	17.2	32.1	1.4	0.8	28.6	29.0	13850	0.33	2652	-	-	-	-	4.9	-	-
	8	106.60	-	-	-	-	-	1.3	-	-	-	-	-	31.0	22.0	-	-	-	-	-
	9	124.35	2.470	2.470	4.5	69.7	1.1	0.4	-	-	10890	0.08	1272	-	-	-	-	1.0	-	-
	10	132.50	2.210	2.200	9.5	-	2.2	0.5	-	-	-	-	1922	35.0	25.0	-	-	-	-	-
11	157.50	2.290	2.290	12.8	64.1	2.8	1.8	28.0	29.0	-	-	3006	-	-	87.90	0.47	3.2	-	-	





Cuadro B/9  
Formación Hollín  
SINTESIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO POR LITOTIPO (Fase A y B)

Litotipo	Propiedades generales			Resistencia a la Compresión					Deforma- bilidad		Velocidad Sónica (m/s)	Resistencia al Corte		Desgaste a la Abrasión		Absorción por Inmersión (%)	Hinchamiento (kg/cm2)	Durabilidad (%)	Fase
	Peso Específico natural (g/cm3)	Peso Específico seco (g/cm3)	Porosidad (%)	Monoaxial (MPa)	Puntual		Resistencia Schmidt (MPa)	Dureza Schmidt (No. rebotes)	Módulo Elástico (MPa)	Coeficiente de Poisson		φ Máximo (°)	φ Residual (°)	Pérdida (%)	Coeficiente de Uniformidad				
					Axial (MPa)	Diametral (MPa)													
Arenisca de granos gruesos  i	2.210 2.200	2.180 2.180	8.9 14.3	50.0 49.0	- 3.0	- 1.9	- 31.5	- 25.0	18623 13850	0.125 0.330	3120 2634	58.0 52.0	- 33.5	98.3 87.9	0.49 0.47	4.3 4.1	- -	- -	A B
	2.200	2.180	11.6	49.0	3.0	1.9	31.5	25.0	16235	0.220	2877	55.0	33.5	93.1	0.48	4.2	-	-	
	2.200 2.590	2.180 2.450	11.7 5.7	49.0 34.5	- 2.0	- 1.3	- 43.2	- 29.7	12983 5237	0.124 0.070	2360 2495	51.5 -	35.0 -	- -	- -	4.3 2.7	0.19	90.3	A B
Arenisca de granos finos  i	2.200 2.590 2.400	2.180 2.450 2.300	11.7 5.7 8.7	49.0 34.5 42.0	- 2.0 2.0	- 1.3 1.3	- 43.2 43.2	- 29.7 29.7	12983 5237 9110	0.124 0.070 0.097	2360 2495 2427	51.5 - 51.5	35.0 - 35.0	- - -	- - -	4.3 2.7 3.5	0.19	90.3	
	2.170	2.160	13.8	54.0	3.3	1.5	35.5	26.6	10650	0.290	2120	-	-	78.0	0.42	4.7	-	-	B
	2.390 2.370 2.380	2.370 2.310 2.340	4.1 5.7 4.8	54.0 44.0 49.0	- 3.3 3.3	- 1.5 1.5	- 60.0 60.0	- 36.5 36.5	16634 - 14100	0.100 0.150 0.125	2610 2307 2458	47.0 41.0 44.0	32.5 30.6 31.5	- - -	- - -	1.7 4.2 2.9	- 0.36 0.36	- - -	A B
Arenisca con asfalto  i	2.180 2.300 2.240	2.140 2.300 2.220	9.6 8.9 9.2	3.8 62.0 50.0	- 2.8 2.8	- 1.4 1.4	- 48.5 48.5	- 35.0 35.0	16356 16780 16570	0.090 0.070 0.080	2300 2096 2198	44.5 45.5 45.0	29.5 33.6 31.5	- - -	- - -	8.5 - 8.5	- - -	- - -	A B
	2.430 2.480 2.450	2.430 2.480 2.450	6.7 5.5 6.1	59.0 33.0 46.0	- 1.5 1.5	- 0.4 0.4	- - -	- - -	9382 27200 18290	0.100 0.180 0.140	2420 1523 1971	- 55.0 55.0	34.5 29.0 31.7	- - -	- - -	- 3.3 3.3	- 1.20 1.20	- 72.9 72.9	A B
	2.300	2.270	9.0	48.5	2.6	1.3	43.7	30.5	14380	0.160	2342	50.0	32.5	93.1	0.48	4.5	0.58	81.5	

Las areniscas con cemento oxidado de color rojizo, presentan abundante óxido de hierro como cemento de los granos y no como producto de alteración.

Las intercalaciones de lutita son, en general, milimétricas a centimétricas pero, a veces, pasan a decimétricas y métricas manteniéndose bastante compactas.

Las intercalaciones de asfalto en forma de bandeamientos son predominantemente milimétricas, pero en algunos casos fueron observados estratos de asfalto de varios centímetros, hasta de pocos decímetros.

Las lutitas constituyen capas lentiformes de unos metros de espesor, más frecuentes en la parte superior de la formación. En la parte intermedia han sido atravesadas capas de 2 a 4 m de espesor, mientras resultan ausentes en la parte inferior de la formación donde predominan las areniscas de granos gruesos macizas y compactas.

## 6.2 Características físicas

Los parámetros físicos determinados en laboratorio fueron los siguientes:

- . peso específico natural
- . peso específico seco
- . porosidad
- . velocidad sónica
- . absorción
- . hinchamiento
- . durabilidad
- . desgaste a la abrasión

El peso específico natural (o peso de volumen) de la arenisca varía de 2,00 a 2,70 g/cm<sup>3</sup> (valor promedio 2,30 g/cm<sup>3</sup>).

El peso específico seco varía de 2,00 a 2,65 g/cm<sup>3</sup> (valor promedio 2,27 g/cm<sup>3</sup>), que no difiere del anterior debido a que las muestras, al llegar al laboratorio, habían perdido gran parte de su contenido líquido.

La porosidad varía de 2 a 20% (valor promedio 9%) correspondiendo los valores más bajos a las lutitas, a las areniscas con intercalaciones de lutita y a las areniscas de granos finos. Los valores más altos caracterizan las areniscas de granos gruesos. La Figura B/12 evidencia que los litotipos menos porosos presentan peso específico más alto mientras que las areniscas de granos gruesos y con cemento oxidado son las de peso específico más bajo.

El estado de alteración de los litotipos seleccionados ha sido determinado mediante la medición de la velocidad sónica que varía de 1.115 a 3.700 m/s (valor promedio 2.340 m/s). Los valores más bajos corresponden a las lutitas y los más altos a las areniscas de granos gruesos y finos. En la Figura B/13 se evidencia como la velocidad sónica se relaciona más con la variación litológica que con el peso específico natural de las muestras. El diagrama entre el cuadrado de

la velocidad sónica ( $V_p^2$ ) y el módulo de deformación ( $E_{DEF}$ ), presentado en la Figura B/14, no permite evidenciar una correlación de estos dos parámetros debido a la heterogeneidad de los litotipos.

La absorción de agua después de una hora de inmersión, expresada como porcentaje de la masa seca inicial, se relaciona muy bien con la porosidad, según lo indicado en la Figura B/15. A continuación se presentan los valores de absorción de los diferentes litotipos:

Litotipo	Absorción (%)	Porosidad (%)
Areniscas con cemento oxidado	3,8	12,5
	5,4	13,3
	5,3	11,1
	4,3	12,8
Areniscas de granos finos	2,7	6,6
Areniscas de granos gruesos	4,3	13,4
	4,9	17,1
	3,2	12,8
Areniscas con lutita	7,4	8,9
	2,1	7,5
Lutitas	3,0	7,5
	3,6	8,7

El comportamiento mecánico de las lutitas y areniscas, sometidas a ciclos de humedecimiento y secado, ha sido determinado mediante ensayos de hinchamiento, midiendo la presión necesaria para contrastar el aumento de volumen de las muestras. Se confirma así que las lutitas manifiestan una elevada presión de hinchamiento ( $0,5-1,1 \text{ kg/cm}^2$ ) mientras que, para las areniscas de granos finos, es de  $0,2 \text{ kg/cm}^2$ .

La resistencia a la progresiva desintegración de la roca sujeta a ciclos de humedecimiento y secado ha sido determinada mediante el ensayo de durabilidad. Las areniscas presentan en general un elevado índice de durabilidad (90-97%), mientras que las lutitas presentan valores muy variables (de 54 a 92%), probablemente en relación a su composición mineralógica.

El desgaste a la abrasión Los Angeles es muy elevado para las areniscas en general, variando el porcentaje de pérdida de 78 a 98%, con un coeficiente de uniformidad de 0,42 a 0,49.

### 6.3 Resistencia a la compresión

Los ensayos de laboratorio realizados para determinar la resistencia a la compresión de los litotipos de roca intacta de la formación Hollín fueron los siguientes:

- . Ensayo de carga puntual
- . Prueba con martillo Schmidt
- . Compresión monoaxial
- . Compresión triaxial

y los parámetros medidos fueron:

- . Carga de ruptura o esfuerzo máximo de ruptura  $\sigma$
- . Angulo de fricción  $\phi$
- . Cohesión  $c$

#### . Resistencia a la carga puntual

Los valores de resistencia a la carga puntual obtenidos de diferentes litotipos de la formación Hollín llevados a ruptura mediante un esfuerzo de compresión axial y diametral, y los valores de resistencia a la compresión monoaxial ( $\sigma_c$ ) calculados con la ecuación  $\sigma_c = 24 I_{s(50)}$  son los siguientes:

Litotipo	$I_{s(50)}$ (MPa)		$\sigma_c$ (MPa)	Coeficiente de correlación	
	axial	diametral		axial	diametral
Areniscas de granos gruesos	3,0	1,9	49,3	16,4	26,0
Areniscas de granos finos	2,0	1,3	41,7	20,8	32,0
Areniscas con cemento oxidado	3,3	1,5	54,0	16,4	36,0
Areniscas con lutita	3,3	1,5	49,0	14,8	32,6
Areniscas con asfalto	2,7	1,3	53,5	19,4	39,6
Lutitas	1,5	0,4	43,2	28,8	108,0
Formación Hollín (en conjunto)	2,6	1,3	48,5	18,6	37,3

La relación entre el índice  $I_{s(50)}$  axial y el índice  $I_{s(50)}$  diametral se ilustra gráficamente en la Figura B/16, mientras que en la Figura B/17 se presenta la relación entre  $I_{s(50)}$  y la resistencia última a la compresión monoaxial ( $\sigma_c$ ).

Se puede afirmar que el índice  $I_{s(50)}$  evidencia la anisotropía de toda la formación Hollín que presenta dos direcciones, vertical y horizontal, de mayor y menor resistencia a la compresión. En particular, las areniscas con intercalaciones y las lutitas presentan una mayor anisotropía debido a las alternancias litológicas y a la microestratificación como indican las siguientes relaciones:

$$\begin{array}{rcl} I_{s(50)} \text{ axial} / I_{s(50)} \text{ diametral} & = & 2 \\ \sigma_c / I_{s(50)} \text{ axial} & = & 18,6 \\ \sigma_c / I_{s(50)} \text{ diametral} & = & 37,3 \end{array}$$

#### Prueba con martillo Schmidt

Los valores de resistencia obtenidos de las pruebas con martillo Schmidt ( $\sigma$ ) se relacionan bien con la resistencia a la compresión monoaxial ( $\sigma_c$ ). La relación obtenida para los diferentes litotipos es la siguiente (Figura B/18):

- Areniscas de granos gruesos y finos  $\sigma_c = 1,3 \sigma$
- Areniscas con asfalto
- Areniscas con cemento oxidado  $\sigma_c = 0,7 \sigma$
- Areniscas con lutita

Es decir que, para la formación Hollín en conjunto, la resistencia Schmidt promedio es prácticamente igual a la resistencia a la compresión axial.

#### Compresión monoaxial

Los valores de resistencia última a la compresión monoaxial obtenidos para los diferentes litotipos que constituyen el macizo están representados en los histogramas de Figura B/19.

Como consecuencia de la heterogeneidad de los litotipos, los valores de resistencia no son muy homogéneos variando de 42 a 54 MPa. Como valor promedio de la formación se obtiene  $\sigma_c = 48,5$  MPa.

#### Compresión triaxial

Para determinar la envolvente de ruptura, el ángulo de fricción y la cohesión de la roca intacta se ensayó una muestra típica de arenisca con intercalaciones delgadas de lutita considerada representativa de la parte superior de la formación.

Los resultados del ensayo son:

Sondeo	Muestra No.	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)
SC10	34	15,0 30,0	173,0 207,3

y se presentan en la Figura B/20 donde los semicírculos de Mohr delimitan la envolvente de ruptura resultante que permite obtener, para diferentes valores de  $\sigma$ , los parámetros de resistencia:

$\sigma$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)
15	54	15
30	42	25

Estos resultados, analizados según el criterio lineal de Coulomb (Brown, 1981), permiten obtener los siguientes parámetros (Figura B/21):

$$\phi = 47,5^\circ \quad c = 9 \text{ MPa}$$

#### 6.4 Deformabilidad

Los ensayos de compresión monoaxial instrumentada de especímenes de roca intacta de diferentes litotipos, han permitido calcular los módulos de deformación secante ( $E_s$ ) y tangente ( $E_t$ ), además del coeficiente de Poisson. En la Figura B/22 se ilustra el esquema de referencia para determinar el módulo de deformación.

Los valores obtenidos se detallan en el Cuadro B/10.

Cuadro B/10

Formación Hollín

Ensayo de compresión monoaxial

## MODULOS DE DEFORMACION Y COEFICIENTE DE POISSON

Sondeo	Litotipo	$E_s$ (MPa)	$E_t$ (MPa)	$\nu_s$	$\nu_t$
ST4	Arenisca con lutita	18.788	23.130	0,08	0,13
ST4	Arenisca con asfalto	22.682	(37.780)	0,07	0,15
SC2	Arenisca con asfalto	18.270	25.099	0,06	0,10
SC2	Arenisca con lutita	14.480	24.145	0,12	0,14
SC4	Arenisca de granos gruesos	22.254	32.202	0,18	0,30
SC4	Arenisca de granos gruesos	14.993	18.581	0,12	0,23
SC6	Arenisca con asfalto	19.126	(32.717)	0,13	0,30
SC6	Arenisca de granos finos	16.111	16.111	0,23	0,23
SC6	Arenisca de granos finos	8.874	12.480	0,04	0,10
SC6	Lutita	9.382	18.228	0,10	0,14
SC8	Arenisca con asfalto	11.672	17.822	0,09	0,19
SC8	Arenisca de granos finos	13.865	23.688	0,10	0,20
SCE1	Arenisca de granos finos	3.177	3.786	0,02	0,05
SCE1	Arenisca de granos gruesos	13.850	17.930	0,33	0,45
SCE1	Arenisca con asfalto	10.830	13.244	0,08	0,13
SC9	Arenisca con lutita	3.845	6.237	0,22	-
SC9	Arenisca con cemento oxidado	9.234	13.063	0,36	-
SC9	Arenisca con asfalto	(75.141)	(61.880)	0,14	0,09
SC9	Lutita	27.200	42.201	0,18	-
SC10	Arenisca con lutita	11.067	13.930	0,10	0,18
SC10	Arenisca con lutita	(1.772)	(1.742)	0,04	0,10
SC10	Arenisca con cemento oxidado	12.068	20.144	0,20	0,30
SC10	Arenisca con lutita	19.835	20.475	0,26	0,26
SC11	Arenisca con cemento oxidado	(30.853)	(40.341)	0,32	0,33
SC11	Arenisca con granos finos	7.298	16.236	0,12	0,16
SC12	Arenisca con asfalto	22.682	30.909	0,01	0,01

Los valores entre paréntesis no se consideran confiables

Los valores promedio de los diferentes litotipos se resumen a continuación y, gráficamente, con los histogramas de la Figura B/23:



Litotipo	$E_s$ (MPa)	$E_t$ (MPa)	$\nu_s$	$\nu_t$
Areniscas de granos gruesos	17.580	22.900	0,22	0,32
Areniscas de granos finos	9.110	14.460	0,10	0,15
Arenisca con cemento oxidado	10.650	16.588	0,29	0,30
Arenisca con lutita	14.100	17.583	0,13	0,18
Arenisca con asfalto	16.570	18.720	0,08	0,13
Lutita	18.290	18.228	0,14	0,14
Formación Hollín	$\bar{x}$ 14.380	18.080	0,16	0,20
	s 3.790	2.800	0,08	0,08

El módulo de deformación secante varía de 9.110 a 18.290 MPa y el módulo de deformación tangente varía de 14.460 a 22.900 MPa.

Los módulos más bajos caracterizan las areniscas de granos finos, mientras que los más altos caracterizan las areniscas de granos gruesos y las lutitas.

Cabe anotar que, de ser bastante homogéneo el conjunto de datos obtenidos, resultan significativos los valores promedio indicados.

#### 6.5 Resistencia al corte

Las discontinuidades más representativas encontradas en los litotipos seleccionados han sido sometidas a ensayos de corte directo para determinar el ángulo de fricción máximo y residual.

Los valores obtenidos se detallan en los Cuadros B/8 y B/9.

A continuación se presentan los valores promedio relativos a cada uno de los litotipos.

Litotipo	Angulo de fricción máximo $\phi_{MAX}$ (°)	Angulo de fricción residual $\phi_R$ (°)
Arenisca de granos gruesos	55	33,5
Arenisca de granos finos	51,5	35
Arenisca con cemento oxidado	-	-
Arenisca con lutita	44	31,5
Arenisca con asfalto	45	31,5
Lutita	55	31,7
Formación Hollín	$\bar{x}$ 50	32,5
	s 5,3	1,5

---

En resumen, el ángulo de fricción máximo varía de  $44^{\circ}$  a  $55^{\circ}$  y el ángulo de fricción residual varía de  $31^{\circ}$  a  $35^{\circ}$ .

Los valores más elevados pertenecen a las areniscas de granos gruesos y finos y a la lutita; los más bajos a las areniscas con intercalaciones.

## 7. CARACTERISTICAS GEOMECHANICAS DEL MACIZO

La resistencia de un macizo rocoso y su comportamiento deformacional bajo carga son los principales problemas geomecánicos que se deben enfrentar para el análisis de las cimentaciones de una presa y para la estabilidad de las obras subterráneas.

Para la evaluación de los parámetros del macizo rocoso de la formación Hollín han sido utilizados los siguientes métodos.

- . El método de Bieniawski que, mediante la evaluación del índice RMR (rock mass rating), permite la clasificación geomecánica de un macizo y proporciona datos generales de resistencia y deformabilidad.
- . El método de Hoek-Brown que, mejorando el anterior, proporciona datos más detallados.
- . El método de Barton que define la resistencia de las discontinuidades del macizo.

Todos estos métodos se basan en las observaciones y determinaciones de campo y en los resultados de los ensayos de laboratorio. Para la evaluación de las características geomecánicas de la formación Hollín se utilizaron los datos obtenidos del mapeo geoestructural de la galería GT3 y de los sondeos rotativos que atravesaron el macizo.

### 7.1 Clasificación del macizo

El objetivo de la clasificación geomecánica de Bieniawski (1979) es estimar, en forma cuantitativa, los parámetros para el diseño de las obras. Esta clasificación establece una evaluación del índice RMR, variable de 0 a 100, obtenido mediante la suma de los coeficientes numéricos atribuidos a las características geomecánicas del macizo que se indican a continuación, y la definición de la calidad y tipo de roca.

Las características del macizo consideradas son:

- A. Resistencia a la compresión monoaxial (o a la carga puntual)
- B. Índice RQD
- C. Espaciamiento de las discontinuidades
- D. Condiciones de las discontinuidades (rugosidad, alteración, abertura, relleno)
- E. Condiciones hidráulicas
- F. Orientación de las discontinuidades

Con base en estos criterios, la información más completa para la clasificación del macizo de la formación Hollín es la que se obtiene del mapeo geoestructural de la galería exploratoria GT3. En el Cuadro B/11, los parámetros que permiten cuantificar el índice RMR, han sido evaluados por tramos homogéneos de longitud variable.

En resumen, la roca del macizo en el área investigada resulta ser en un 34% de mala calidad en el tramo superficial descomprimido y en los tramos fallados; en un 59% de calidad regular y solamente en un 7%, en el interior del macizo, de buena calidad.

## 7.2 Parámetros de deformabilidad del macizo

La deformabilidad del macizo puede ser evaluada a través del índice RMR, mediante la determinación del índice RQD sobre los testigos de perforación y con los ensayos de carga directa "in situ".

Como lo mencionado anteriormente el índice RMR se relaciona con el módulo de deformabilidad in situ  $E_M$  mediante la ecuación de Bieniawski (1978):

$$E_M = 2 \text{ RMR} - 100 \text{ GPa} \quad (\text{para RMR} > 50)$$

modificada posteriormente por Serafim-Pereira (1983), para valores de RMR < 50, en:

$$E_M = 10 \frac{\text{RMR}-10}{40} \text{ GPa}$$

En base a estas relaciones, los módulos de deformabilidad, a lo largo de la galería GT3, son:

Tipo de roca	Calidad de la roca	RMR	$E_M$ (GPa)
II	buena	62	13
III	regular	46-58	9-12
IV	mala	20-34	2-6

## Cuadro B/11

Galería exploratoria GT3

## CLASIFICACION GEOMECANICA SEGUN BIENIAWSKI

Parámetro	0+000-0+006 m		0+006-0+024 m		0+024-0+033 m		0+033-0+040 m		0+040-0+046 m	
	Indice									
A	25-50 MPa	4	25-50 MPa	4	25-50 MPa	4	25-50 MPa	4	40-60 MPa	6
B	25-50%	5	25-50%	8	50-75%	13	25-50%	7	50-75%	13
C	5-15 cm	7	5-30 cm	10	5-30 cm	10	5 cm	8	5-30 cm	10
D	Fracturas abiertas con arcilla	2	Fracturas abiertas oxidadas	6	Fracturas cerradas, irregulares	20	Falla con arcilla y brecha	2	Fracturas cerradas, lisas y estriadas	20
E	Goteos continuos	7	Goteos continuos	8	Seco	10	Seco	10	Seco	10
F	Favorable	-2	Favorable	-2	Favorable	-2	Favorable	-2	Favorable	-2
RMR		23		34		55		29		57
Tipo	Roca mala	IV	Roca mala	IV	Roca regular	III	Roca mala	IV	Roca regular	III
	0+046-0+049 m		0+049-0+067 m		0+067-0+083 m		0+083-0+093 m		0+093-0+100 m	
A	10-25 MPa	2	50-75 MPa	7	50-75 MPa	7	40-60 MPa	5	50-75 MPa	7
B	< 25%	3	50-75%	13	50-75%	13	60-80%	15	75-90%	17
C	< 5 cm	5	5-30 cm	10	5-30 cm	10	5-30 cm	10	5-30 cm	10
D	Falla con brecha, arcilla óxidos	2	Fracturas cerradas, estriadas, abiertas con brecha	8	Fracturas cerradas, rugosas	20	Fracturas cerradas, rugosas, oxidadas	15	Fracturas cerradas, rugosas	20
E	Seco	10	Seco	10	Seco	10	Seco	10	Seco	10
F	Favorable	-2	Favorable	-2	Favorable	-2	Favorable	-2	Favorable	-2
RMR		20		46		58		53		62
Tipo	Roca mala	IV	Roca regular	III	Roca regular	III	Roca regular	III	Roca buena	II

Tomando en cuenta los valores promedios del índice RQD determinados en los testigos recuperados en los sondeos del sector Embalse Compensador, que proporciona un factor de reducción del módulo de deformabilidad obtenido en laboratorio ( $E_L = 14.380$  MPa), se puede estimar el módulo de deformabilidad ( $E_M$ ) del macizo (Figura A/14).

Para el nivel superficial descomprimido (tipo de roca IV)  $E_M$  varía de 1.400 a 1.800 MPa, mientras que en el interior del macizo (tipo de roca III)  $E_M$  varía de 1.700 a 4.300 MPa.

Los módulos de deformabilidad obtenidos de los ensayos de carga in situ (carga directa sobre placa y gato plano en pared) fueron los siguientes:

- Carga directa sobre placa:  $E_M$  vertical 593 MPa,  $E_M$  horizontal 2.017 MPa
- Gato plano en pared:  $E_M$  vertical 438 MPa,  $E_M$  vertical 1.755 MPa

Si se comparan estos valores con los obtenidos a través del índice RMR se observa que los módulos obtenidos de los ensayos in situ resultan ser mucho más bajos, en una relación de 1 a 5. Esto se justifica si se considera que la clasificación propuesta por Bieniawski considera el macizo como un medio continuo siendo la formación Hollín, al contrario, fuertemente anisótropa y, en el área de la galería, muy afectada por el proceso de excavación. Además los módulos obtenidos de los ensayos in situ han sido medidos en la parte superficial de la sección excavada, mientras que los módulos obtenidos a través del índice RMR representan los valores promedios de la roca en su conjunto.

Por otro lado, los módulos de deformabilidad determinados mediante el índice RQD, concuerdan bastante bien con los módulos resultantes de los ensayos directos.

### 7.3 Parámetros de resistencia del macizo

También la resistencia al corte en un macizo rocoso puede ser evaluada a través del índice RMR en base a los siguientes criterios de ruptura:

El criterio de ruptura de Coulomb, presentado anteriormente, permite estimar los parámetros de cohesión ( $c$ ) y el ángulo de fricción ( $\phi$ ) para los diferentes tipos de roca.

	$c$ (MPa)	$\phi$ (°)
Roca buena	0,20-0,30	40-45
Roca regular	0,15-0,20	35-40
Roca mala	0,10-0,15	30-35

El criterio de Hoek-Brown permite evaluar la resistencia al corte mediante la siguiente ecuación (Figura A/15):

$$\sigma_1/\sigma_c = \sigma_3/\sigma_c \cdot (m \sigma_3/\sigma_c + s)^{0,5}$$

donde:

$\sigma_1, \sigma_3$  son los esfuerzos principales de ruptura

$\sigma_c$  es la resistencia a la compresión monoaxial de la roca intacta

m, s son coeficientes relacionados al tipo de roca obtenidos en función del índice RMR (Figura A/16)

Tipo de roca	II	III	IV
m	1,20	0,28	0,07
s	0,004	$10^{-4}$	$10^{-5}$

Las envolventes de ruptura de la roca de tipo III y IV, en el plano  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ , conforme a la ecuación de Hoek-Brown, se ilustra en la Figura B/24, donde el valor  $\sigma_c = 48,5$  MPa es el valor promedio de la compresión monoaxial de la roca intacta.

Las envolventes de la roca de tipo III y IV en el plano  $\sigma$ - $\tau$ , en base a las cuales se obtienen las relativas curvas de cohesión y ángulo de fricción, se ilustran en la Figura B/25.

Para valores de  $\sigma = 0-0,5-1,0$  MPa, se obtienen entonces los siguientes valores de cohesión y ángulo de fricción representativos del macizo de la formación Hollín en el área del Embalse Compensador.

- Nivel superficial descomprimido - Tipo de roca IV

$\sigma$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	c (MPa)	$\phi$ (°)
0	0,02	0,02	65
0,5	0,42	0,15	28
1,0	0,65	0,24	22

- Interior del macizo - Tipo de roca III

$\sigma$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	c (MPa)	$\phi$ (°)
0	0,05	0,05	67
0,5	0,65	0,21	42
1,0	1,04	0,34	35

#### 7.4 Parámetros de resistencia de las discontinuidades

El método de Hoek-Brown y los resultados presentados en el capítulo anterior se refieren al macizo entendido en su conjunto como un medio continuo y uniforme. Ahora se pretende analizar el comportamiento de las discontinuidades naturales bajo esfuerzo que, especialmente en el sitio de cierre, podrían afectar la estabilidad de las obras.

El método de Barton (1973) es el más indicado porque proporciona una razonablemente exacta evaluación de los valores de resistencia de una discontinuidad rugosa bajo esfuerzos normales.

Los datos básicos a considerarse para el cálculo de la resistencia según Barton son aquellos obtenidos de los ensayos de corte directo en laboratorio. Para el sitio de cierre del Embalse Compensador han sido tomados en cuenta los resultados más representativos de los ensayos ejecutados sobre litotipos de los sondeos perforados en los estribos (SC9 y SC10) y al fondo de la quebrada (SC11), que se resumen en el Cuadro B/12.

Cuadro B/12

#### Sitio de cierre del Embalse Compensador ENSAYOS DE CORTE DIRECTO EN LABORATORIO

Sondeo	Cota (m snm)	Litotipo	Discontinuidad	$\phi_{MAX}$ (°)	$\phi_R$ (°)
SC9	1.223	Arenisca con asfalto	ondulada-lisa	45	34
SC9	1.221	Arenisca con lutita	ondulada-limpia	54	33
SC9	1.212	Arenisca con asfalto	ondulada-rugosa	61	45
SC9	1.184	Lutita	ondulada-lisa	55	29
SC9	1.154	Arenisca de granos gruesos	plana-rugosa	52	34
SC10	1.217	Arenisca de granos finos	ondulada	36	28
SC10	1.181	Arenisca con lutita	ondulada-lisa	38	28
SC10	1.181	Arenisca con lutita	ondulada	39	32
SC10	1.181	Arenisca con lutita	ondulada-lisa	22	19
SC11	1.180	Arenisca con cemento oxidado	ondulada-rugosa	47	35

Los valores promedio para  $\phi_{MAX}$  son:

Arenisca de granos finos y gruesos	= $\phi_{MAX}$ 45°
Arenisca con asfalto	= $\phi_{MAX}$ 54°
Arenisca con lutita	= $\phi_{MAX}$ 33°



Siendo que, en el área de interés predominan las discontinuidades en arenisca de granos finos se asume como representativos el valor  $\phi_{MAX} = 45^\circ$ , aumentado a  $\phi_{MAX} = 47^\circ$  para tomar en cuenta las intercalaciones de lutita y asfalto.

Los valores promedio para  $\phi_R$  son:

. Arenisca de granos finos y gruesos	= $\phi_R 32^\circ$
. Arenisca con asfalto	= $\phi_R 35^\circ$
. Arenisca con lutita	= $\phi_R 27^\circ$

Para la arenisca de granos finos predominante se asume  $\phi_R = 32^\circ$  como valor representativo, rebajado a  $\phi_R = 28^\circ$  porque los ensayos en laboratorio se ejecutaron con desplazamientos reducidos.

Cabe anotar que estos valores están de acuerdo con los datos experimentales que para las areniscas indican ángulos de fricción residual de  $25^\circ$  a  $35^\circ$  (ISMES, 1988).

Para el estudio de la resistencia de una superficie de discontinuidad, Barton propuso la siguiente ecuación:

$$\tau = \sigma \tan (\phi_R + JRC \log_{10} JCS/\sigma)$$

donde:

$\phi_R$	ángulo de fricción residual
JRC	(Joint Roughness Coefficient), coeficiente de rugosidad de las discontinuidades que varía de 0 a 20 (Figura B/26)
JCS	(Joint wall Compressive Strength), resistencia a la compresión de las paredes de las discontinuidades
$\sigma$	esfuerzo normal efectivo sobre la discontinuidad
$\tau$	esfuerzo de corte

De esta ecuación se obtiene:

$$\phi_{MAX} = JRC \log_{10} JCS/\sigma + \phi_R$$

$$\begin{aligned} \phi_{MAX} &= 47^\circ, \phi_R = 28^\circ \\ JCS &\approx \sigma_c = 48,5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$\sigma \approx 1 \text{ MPa}$  valor promedio del primer ciclo de carga, habiéndose calculado  $\phi_{MAX}$  solo con el primer ciclo de carga,

se obtiene:

$$\log_{10} JCS/\sigma = \log_{10} 48,5/1 = 1,68$$

$$JRC = 47-28/1,68 = 11,3$$

que es un valor que concuerda muy bien con las observaciones de campo.

En base a lo indicado se procede ahora a los siguientes cálculos a ser utilizados para fines de diseño:

- a. Cálculo de la envolvente de Barton para el nivel superficial descomprimido (tipo de roca IV).
- b. Cálculo de la envolvente de Barton para el diseño de la presa.
- c. Cálculo de la envolvente de Barton para el interior del macizo (tipo de roca III).
- a. Para este cálculo se considera que:

- La dilatación de la discontinuidad natural sea más baja que la del laboratorio:

$$i = JRC \log_{10} JCS/\sigma = \phi_{MAX} - \phi_R \quad (\text{siendo } i \text{ la dilatación})$$

$$i_{LAB} = 47^\circ - 28^\circ = 19^\circ$$

Considerando adecuado un factor de reducción de 0,6 se obtendrá:

$$i_{LAB} = 12^\circ$$

- Se considera también que JCS en el sitio sea más bajo respecto a lo del laboratorio; puesto que en campo prevalecen fracturas más abiertas y alteradas. Entonces:

$$\begin{aligned} JCS/4 &= 48,5/4 \approx 12 \text{ MPa} && \text{y, en base a la ecuación anterior,} \\ 12 &= JRC \log_{10} 12/\sigma \end{aligned}$$

- El esfuerzo normal efectivo  $\sigma$  varía en el sitio de cierre en relación al peso de la presa. Entonces:

$$\sigma = 0 \div 1,25 \text{ MPa} \quad \text{siendo } 1,25 \text{ MPa el peso de una presa en RCC}$$

Al fondo de la sección de cierre se tendrá:

$$\sigma = 0,74 \text{ MPa (promedio)}$$

y en los estribos:

$$\sigma = 0,50 \text{ MPa}$$

- El valor de pico del coeficiente JRC varía en función de las cargas aplicadas. Siendo

en la sección de cierre:

$$\log_{10} 12/0,75 = 1,20$$

$$JRC = 10$$

en los estribos:

$$\log_{10} 12/0,5 = 1,38$$

$$JRC = 8,7$$

Si se considera como valor promedio  $JRC = 9$  se obtiene:

$$\phi_{MAX} = 9 \log_{10} 12/\sigma + \phi_R \quad \text{y para}$$

$$\begin{array}{lll} \sigma = 0,75 \text{ MPa} & \phi_{MAX} = 39^\circ & \phi_R = 28^\circ \\ \sigma = 0,50 \text{ MPa} & \phi_{MAX} = 40^\circ & \phi_R = 28^\circ \end{array}$$

Finalmente, resolviendo la ecuación de Barton:

$$\begin{array}{ll} \text{para } JCS = 12 \text{ MPa} \\ JRC = 9 \text{ de pico} \end{array}$$

$\sigma$ (MPa)	0	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
$\tau$ (MPa)	0	0,19	0,35	0,49	0,63	0,77

Estos datos están representados gráficamente en la Figura B/27 y comparados con los obtenidos según Hoek-Brown. Cabe resaltar la buena correspondencia de las curvas envolventes.

b. Para este cálculo se considera que:

- En el fondo de la quebrada Granadillas y en los estribos prevalecen las discontinuidades en un proceso de ruptura.
- La movilización de la discontinuidad deberá ocurrir sobre una superficie tan amplia para que encuentre puentes de roca; o sea habrá una contribución de la cohesión.
- En la ecuación de Barton se aumente el parámetro cohesión.

Tomando en cuenta que la cohesión del macizo calculada con el método de Hoek-Brown, para la roca descomprimida superficial, ha resultado ser 0,02 MPa, si se considera la calidad de la roca y las dimensiones de la obra de cierre, este valor podría ser demasiado conservador siendo razonable asumir un valor doble de 0,04 MPa.

Por lo tanto, introduciendo este valor en la ecuación de Barton:

$$\tau = 0,04 + \sigma \tan (JRC \log_{10} JCS/\sigma + \phi_R)$$

$$\tau = 0,04 + \sigma \tan (JRC \log_{10} 12/\sigma + 28^\circ)$$

se obtendrá:

para JRC = 9

para JRC = 7

$\sigma$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi_{MAX}$ (°)	$\tau$ (MPa)	$\phi_{MAX}$ (°)
0,0	0,04	44	0,04	40
0,2	0,23	39	0,21	35
0,4	0,39	35	0,35	35
0,6	0,53	35	0,49	33
0,8	0,67	35	0,62	33
1,0	0,81		0,75	

Estos datos están representados gráficamente en la Figura B/28.

Para el diseño de las obras de cierre y, en particular, para el cálculo de estabilidad, los esfuerzos normales que actúan debajo de la presa fueron considerados comprendidos entre:

$$0,5 < \sigma < 0,1$$

En base a eso, los valores de pico del ángulo de fricción y de la cohesión adoptados fueron:

$$\phi_{MAX} = 36^\circ$$

$$c = 0,10 \text{ MPa}$$

- c. El cálculo de la envolvente de Barton para el interior del macizo, en roca tipo III, se refiere al tramo final de 2,5 km, aproximadamente, del Túnel de Aducción y al primer tramo de la Tubería de baja presión.

Para este cálculo se considera que:

- Los parámetros geomecánicos, evaluados para el tipo de roca III en la galería GT3, podrían ser asumidos para el interior del macizo. Sin embargo, se supone que más al interior del macizo las discontinuidades serán más cerradas y menos alteradas.

Resulta entonces conveniente modificar los valores de JCS y de dilatancia  $i$ , asumiendo:

$$JCS = 48,5 \times 0,7 = 35 \text{ MPa}$$

(siendo 0,7 un factor de reducción)

$$i = 19^\circ \times 0,5 = 9,5^\circ$$

(siendo 0,5 un factor de reducción)

- El esfuerzo máximo  $\sigma$  sobre la sección del Túnel de Aducción es:

$$\sigma = 2,5 \gamma z = 5 \text{ MPa}$$

donde:

$z$  = espesor de roca sobre el último tramo del Túnel de Aducción, variable de 50 a 150 m

$\gamma$  = peso específico promedio de la arenisca =  $2,3 \text{ g/cm}^3$ .

Entonces resolviendo la ecuación  $i = \text{JRC} \log_{10} \text{JCS}/\sigma$  se obtiene  $\text{JRC} = 11$ , en concordancia con las observaciones de campo; y de la ecuación  $\phi_{\text{MAX}} = \text{JRC} \log_{10} \text{JCS}/\sigma + \phi_r$ , se obtiene:

para $\sigma$ = 2 MPa	$\phi_{\text{MAX}}$ = 40°	$\phi_R$ = 28°
5 MPa	= 37°	= 28°
8 MPa	= 35°	= 28°

En fin, de la ecuación de Barton, resulta:

para  $\text{JCS} = 35 \text{ MPa}$   
 $\text{JRC} = 11 \text{ MPa}$

$\sigma$ (MPa)	0	0,50	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00
$\tau$ (MPa)	0	0,56	1,00	1,78	2,49	3,16	3,80

Estos datos están representados gráficamente en la Figura B/27, donde la curva de Barton se compara con la de Hoek-Brown.

- Aumentando, en la ecuación de Barton, la cohesión  $c = 0,05 \text{ MPa}$ , calculada con la ecuación de Hoek-Brown, se obtienen los siguientes valores:

$\sigma$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi_{\text{MAX}}$ (°)
0,0	0,05	
0,5	0,61	48
1,0	1,05	41
2,0	1,83	38
3,0	2,54	35
4,0	3,21	34
5,0	3,85	33

Estos valores están representado gráficamente en la Figura B/29, donde se ilustran la envolvente de pico y la adoptada para el diseño que proporcionan los siguientes parámetros de resistencia de las discontinuidades en la roca tipo III en el interior del macizo:

$\phi_{\text{MAX}} = 37^\circ$        $c = 0,25 \text{ MPa}$

- Los parámetros geomecánicos del interior del macizo de la formación Hólln pueden ser extrapolados también analizando los tipos de roca atravesada.

dos con los sondeos rotativos perforados en sitios próximos al tramo final del Túnel de Aducción y al primer tramo de la Tubería de baja presión.

En base a las determinaciones contenidas en los registros de sondeos, a las pruebas de campo efectuadas en las perforaciones y a los resultados de los ensayos de laboratorio, y aplicando los criterios de síntesis presentados en el Plano 0209-G-2900, se determina la siguiente clasificación geomecánica del macizo que se resume a continuación:

Sondeo	Tipo de roca II	Tipo de roca III	Tipo de Roca IV
SC10	54%	46%	-
SC11	-	54%	46%
SC9	51%	20%	29%
SCE2	32%	61%	7%
SCE1	48%	52%	-

La distribución de estos tipos de roca en el macizo interesado por las obras citadas, se presenta gráficamente en la Figura B/30.

Cabe anotar que los tipos de roca evidenciados con los sondeos son prácticamente los mismos encontrados en la galería GT3 y que, a lo largo de estas obras subterráneas, predomina la roca de tipo III es decir la misma considerada para el cálculo de la envolvente de Barton para el interior del macizo.

## 8. RESUMEN DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS PARA DISEÑO

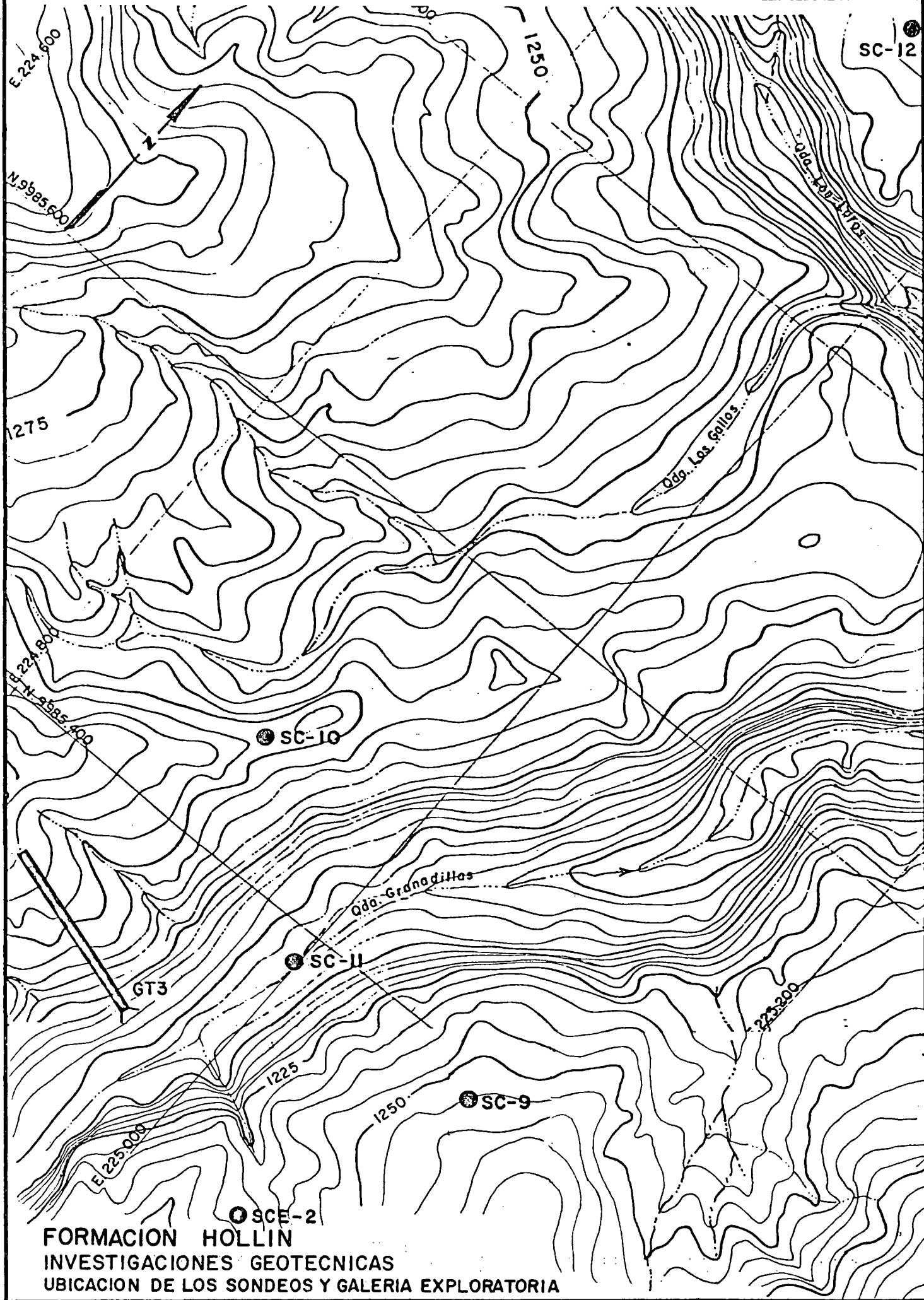
Para fines de diseño, se presenta a continuación una síntesis de los principales parámetros obtenidos de todas las investigaciones y ensayos ejecutados y relativos a la roca descomprimida de las laderas y del interior del macizo.

Parámetro	Ubicación	Valores
<u>Permeabilidad</u>		
	Sitio de cierre	
	Nivel superficial	muy alta (> > 20 UL)
	Nivel interno	baja (1-5 UL)
	Interior del macizo	variable
<u>Deformabilidad</u>		
- Módulo de deformación	Galería GT3	
	0+090 m	600 MPa (vertical)
	0+075 m	2.000 MPa (horizontal)
- Módulo de elasticidad	Galería GT3	
	0+090 m	1.900 MPa (vertical)
	0+075 m	4.500 MPa (horizontal)
<u>Resistencia</u>		
- Angulo de fricción	Sitio de cierre	
	Nivel superficial	36°
	Nivel interno	37°
- Cohesión	Nivel superficial	0,10 MPa
	Nivel interno	0,25 MPa

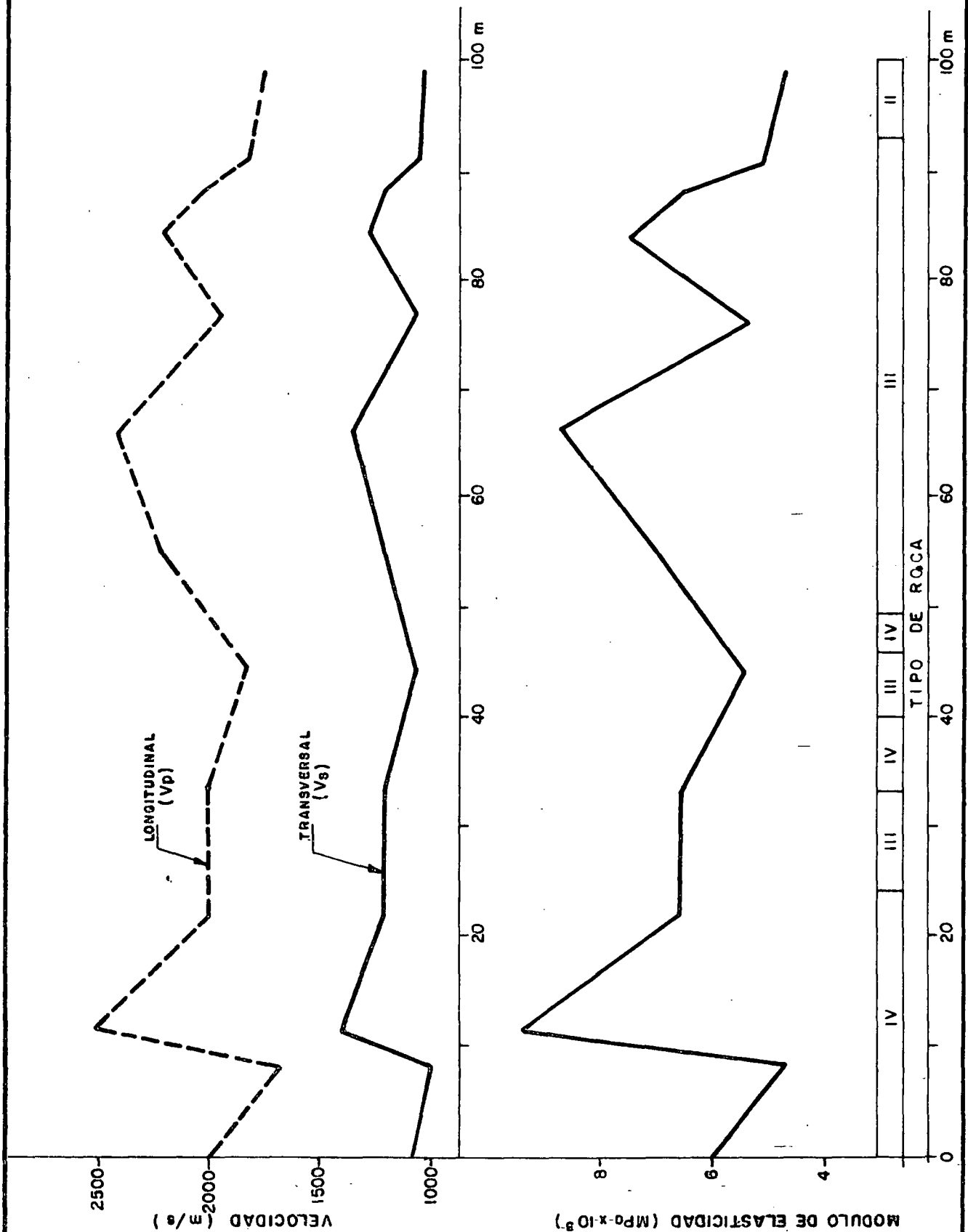
PARTE B

FIGURAS

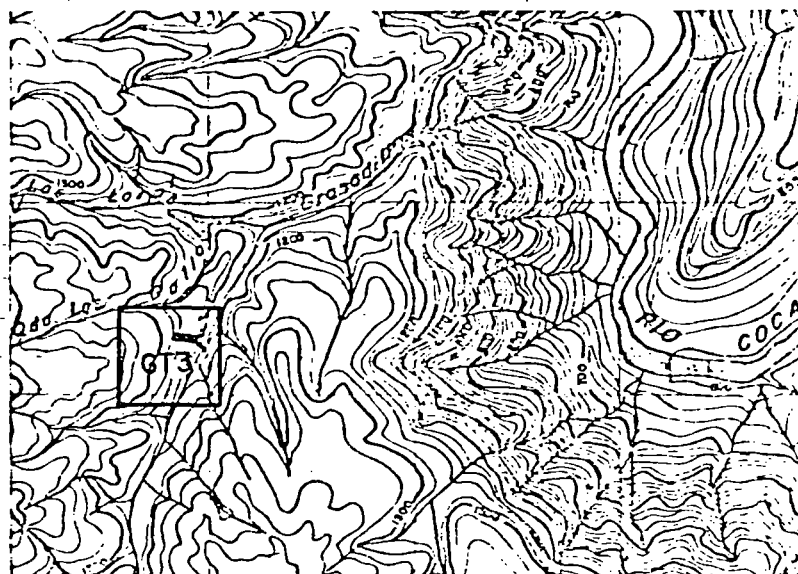
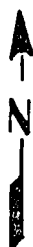




FORMACION HOLLIN  
 INVESTIGACIONES GEOTECNICAS  
 UBICACION DE LOS SONDEOS Y GALERIA EXPLORATORIA

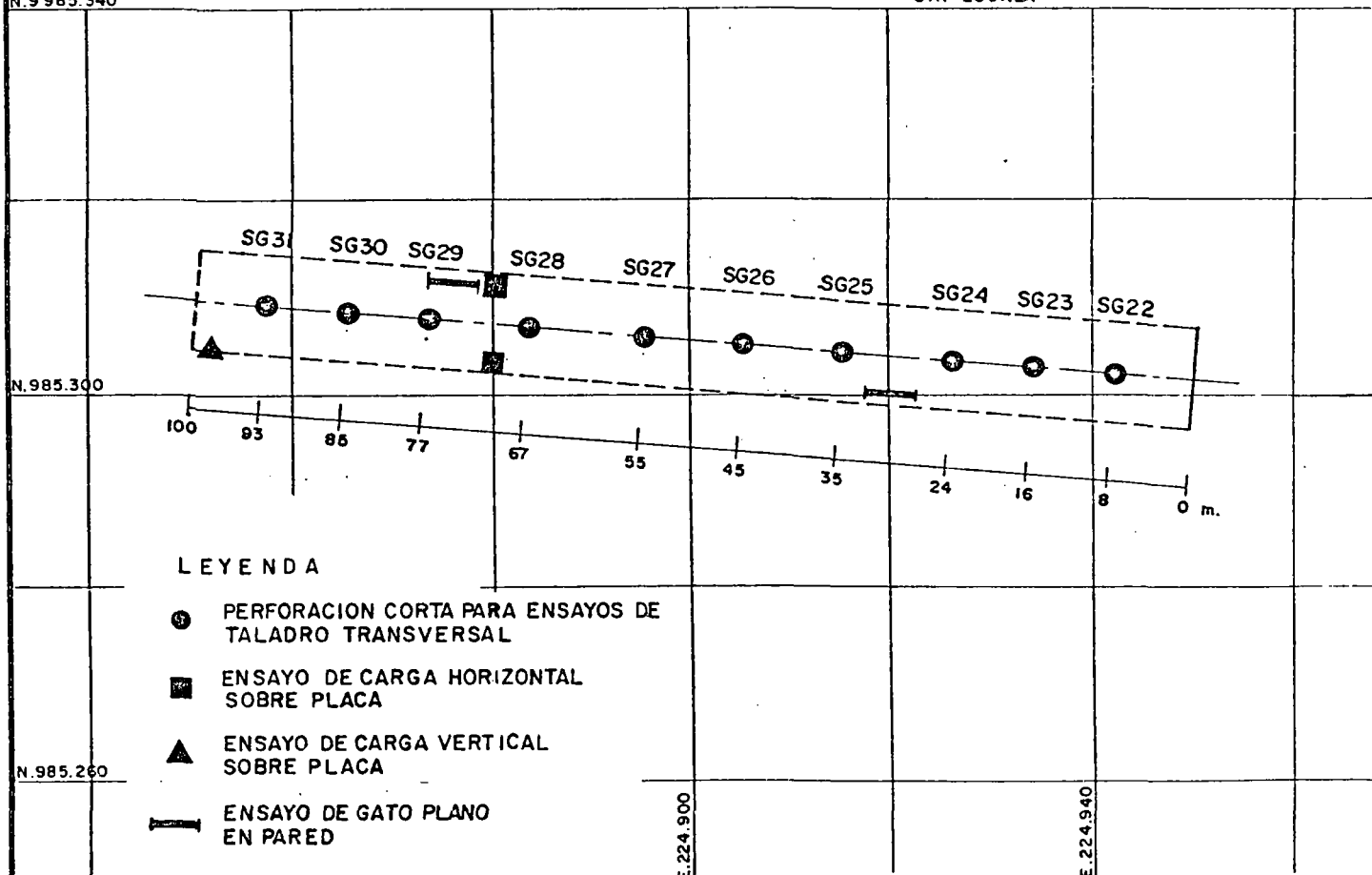


FORMACION HOLLIN  
GALERIA EXPLORATORIA GT3  
INVESTIGACION SISMICA DE REFRACCION



UBICACION  
SIN ESCALA

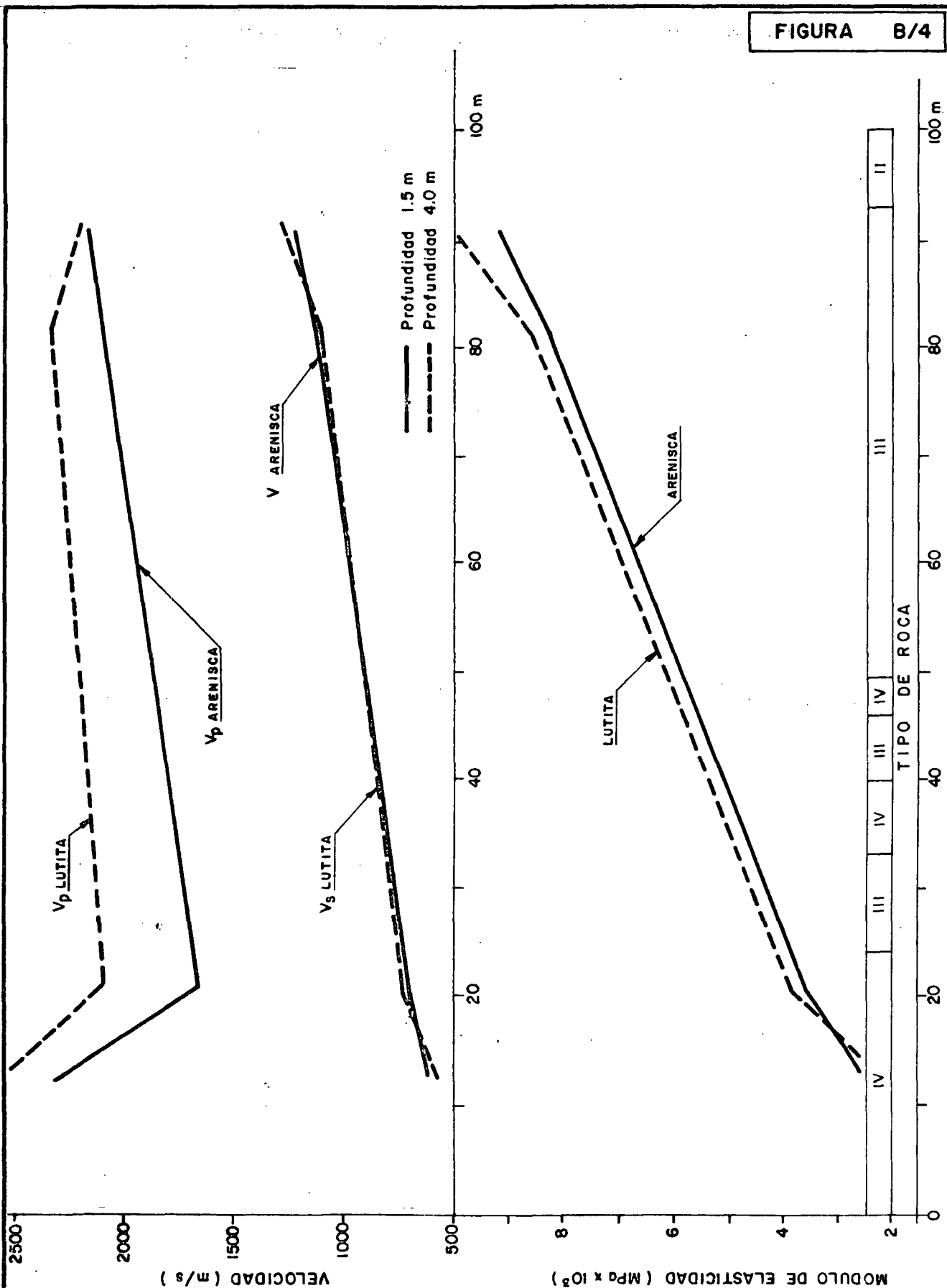
N.9'985.340



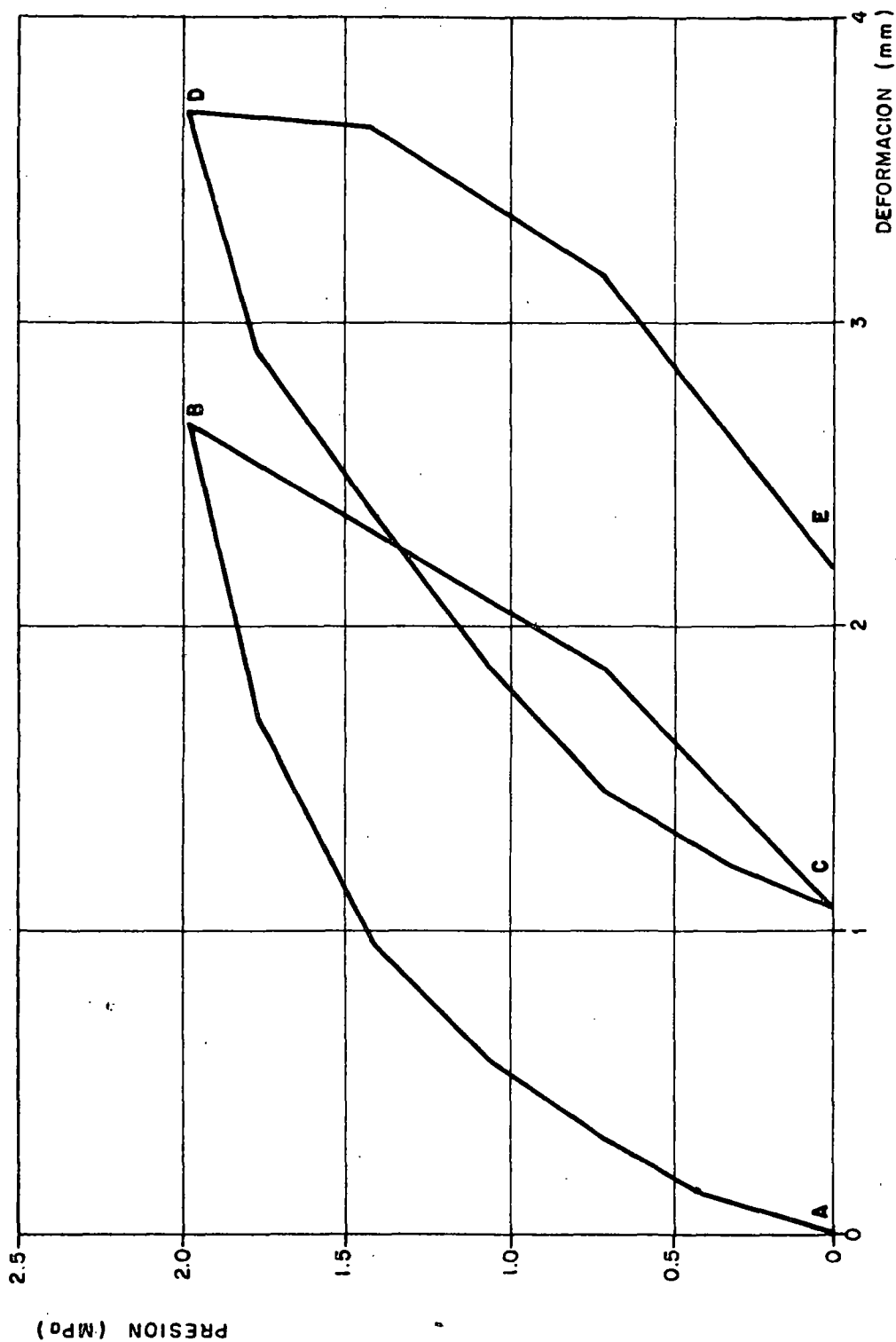
# FORMACION HOLLIN

## GALERIA EXPLORATORIA GT3

UBICACION DE LAS PERFORACIONES CORTAS Y DE LOS ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS

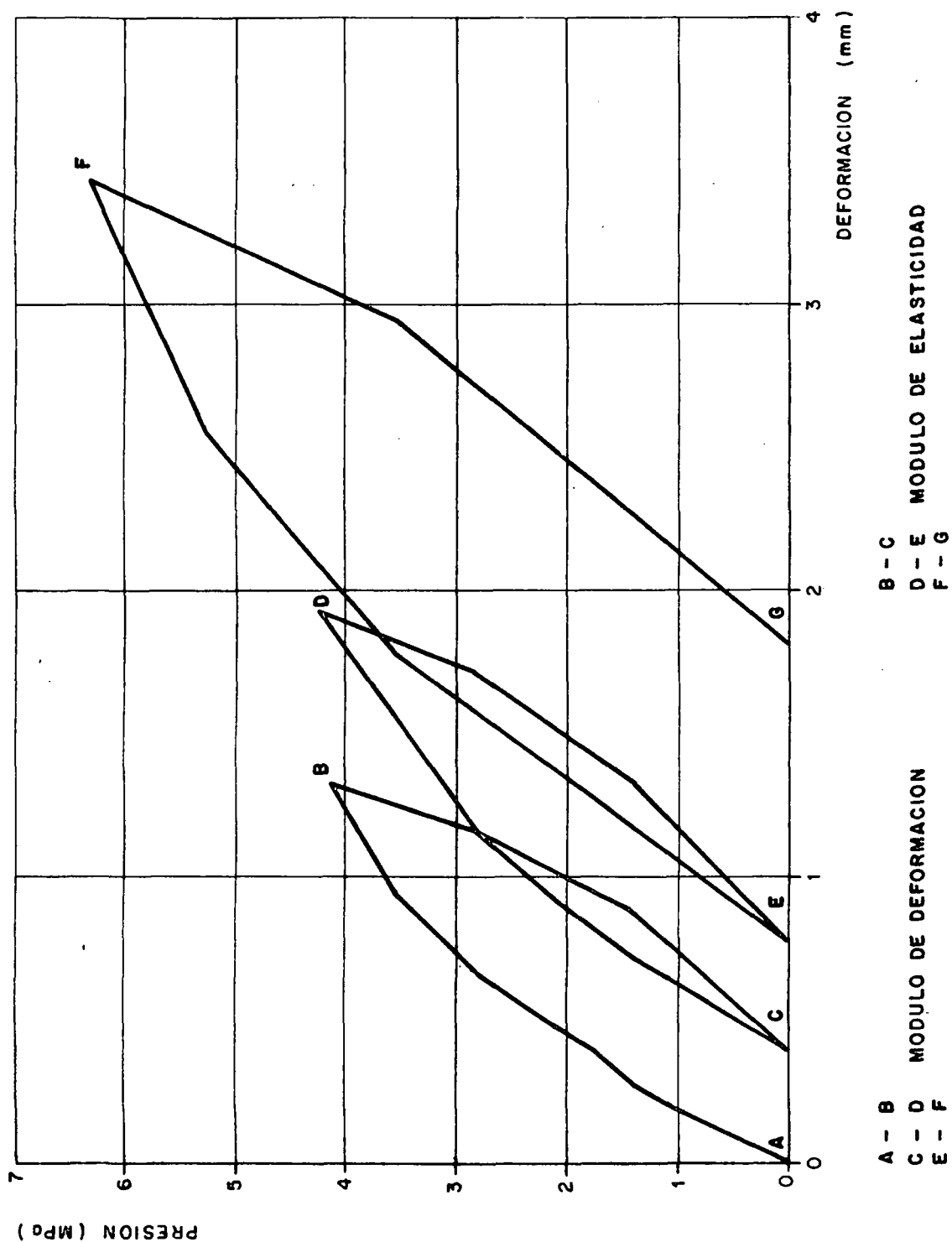


**FORMACION HOLLIN**  
**GALERIA EXPLORATORIA GT 3**  
 PARAMETROS DINAMICOS OBTENIDOS CON EL METODO DEL TALADRO TRANVERSAL



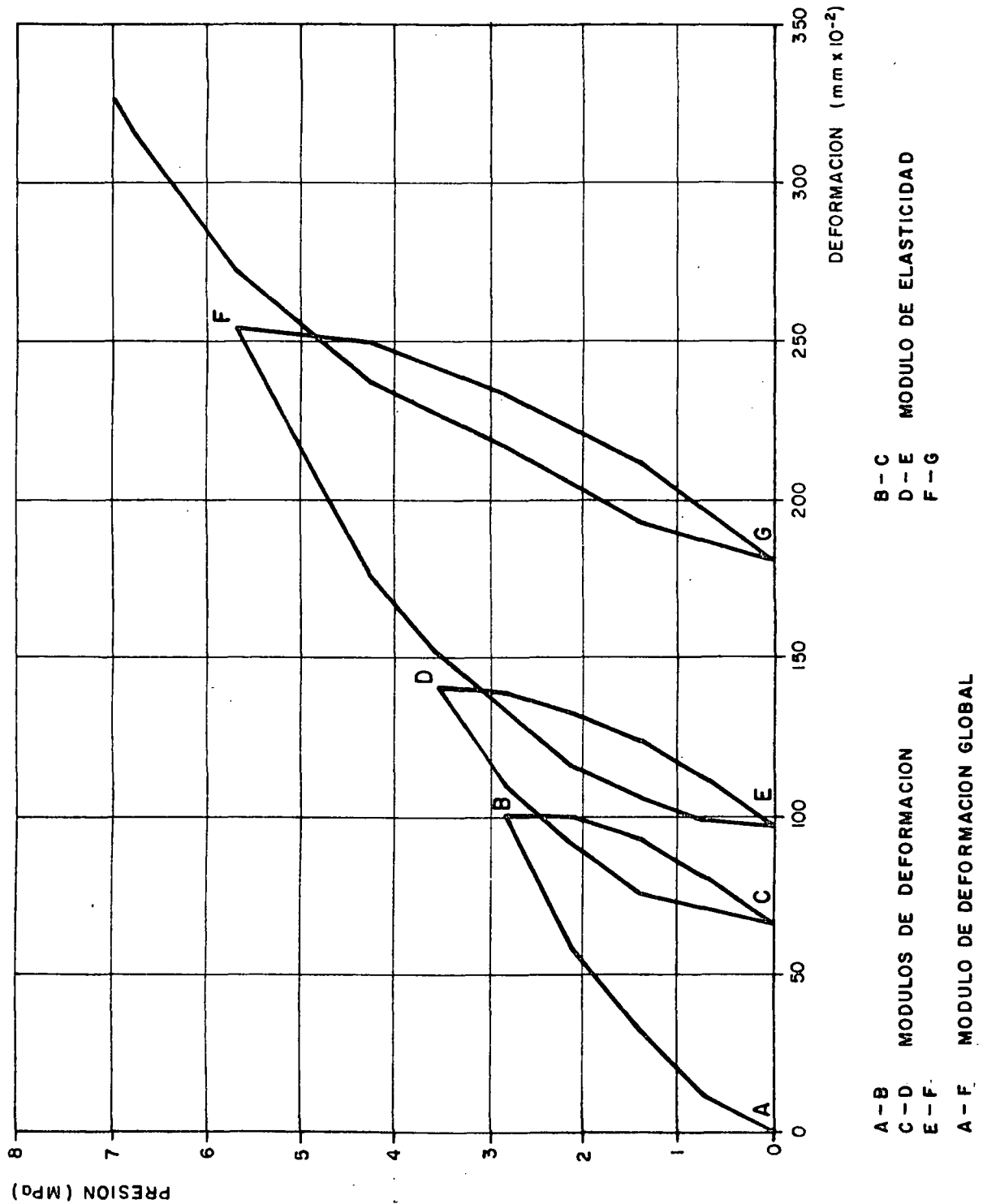
A-B MODULO DE DEFORMACION  
C-D MODULO DE ELASTICIDAD  
B-C MODULO DE DEFORMACION  
D-E MODULO DE ELASTICIDAD

FORMACION HOLLIN  
GALERIA EXPLORATORIA GT3 - ABSCISA 0+0 30 m  
ENSAYO DE DEFORMABILIDAD CON GATO PLANO EN PARED



# FORMACION HOLLIN

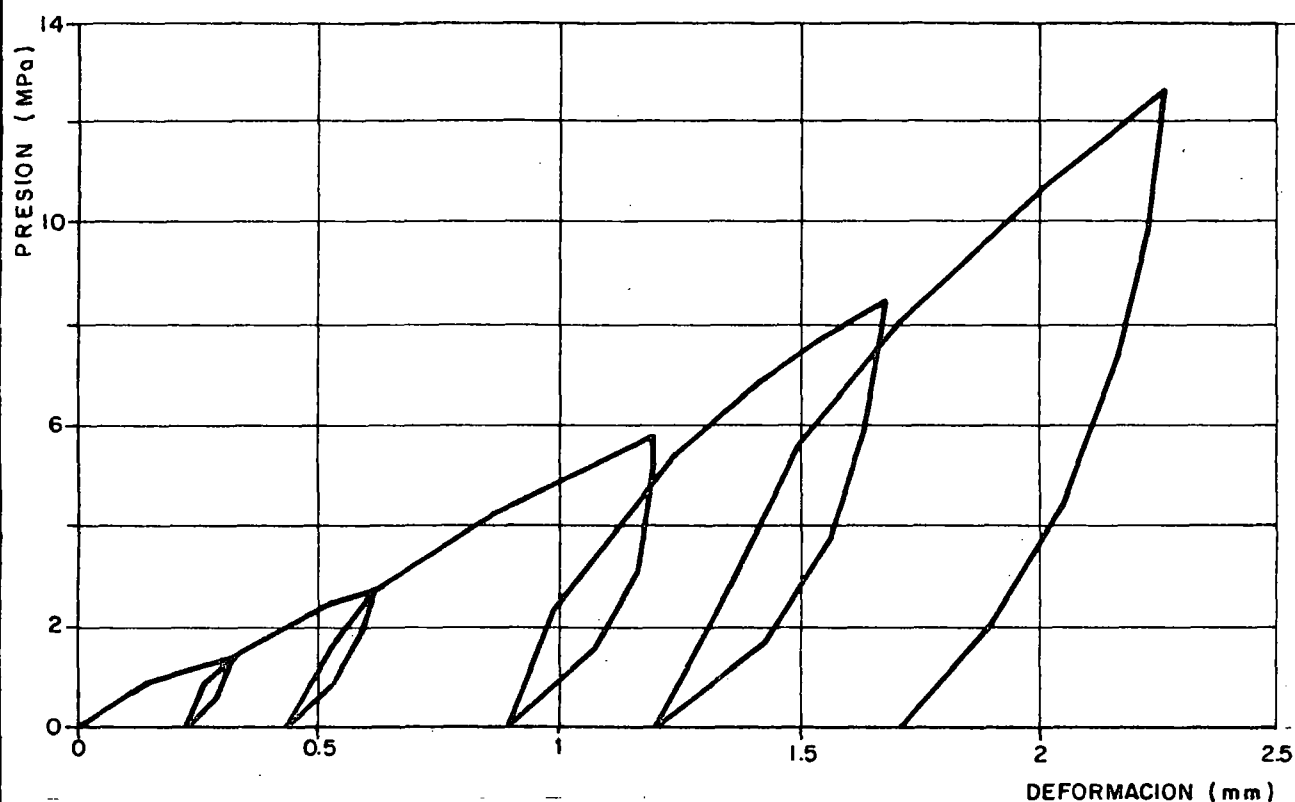
GALERIA EXPLORATORIA GT3 - ABSCISA 0 + 0 75 m  
 ENSAYO DE DEFORMABILIDAD CON GATO PLANO EN PARED



FORMACION HOLLIN

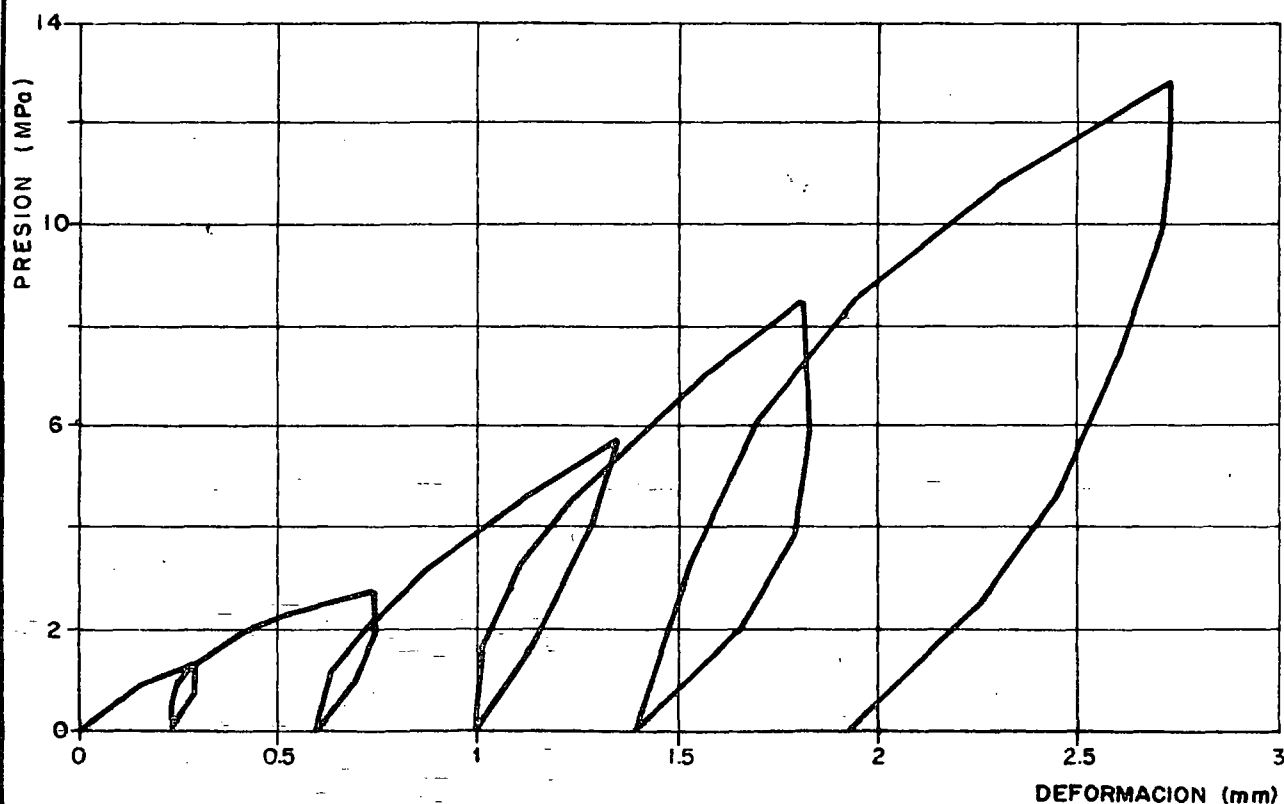
GALERIA EXPLORATORIA GT3 - ABSCISA 0+099

ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA



**FORMACION HOLLIN**

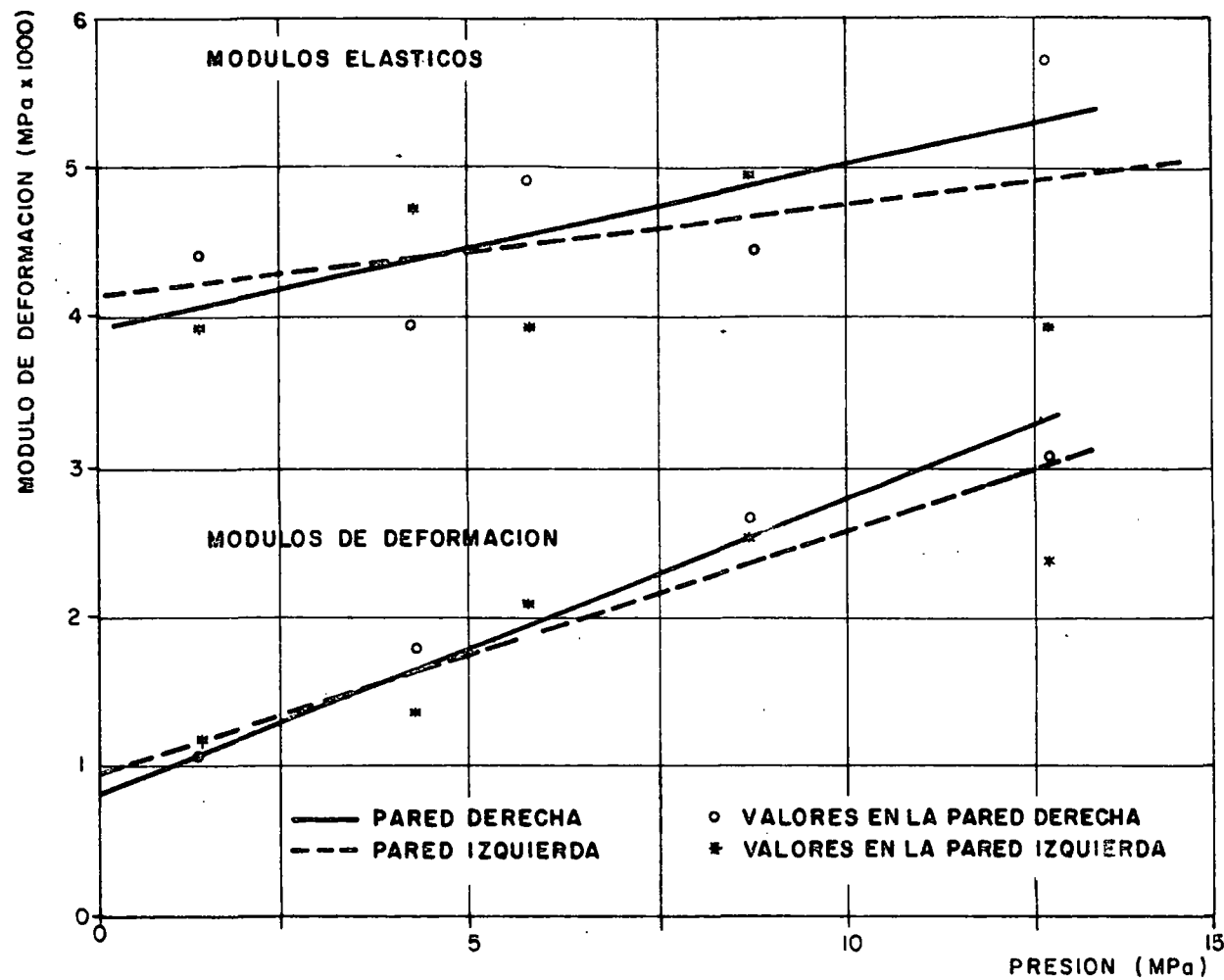
GALERIA EXPLORATORIA GT3 - ABSCISA 0+070 m, PARED DERECHA  
 ENSAYO DE CARGA HORIZONTAL SOBRE PLACA



**FORMACION HOLLIN**

GALERIA EXPLORATORIA GT3 - ABSCISA 0+070 m, PARED IZQUIERDA  
 ENSAYO DE CARGA HORIZONTAL SOBRE PLACA

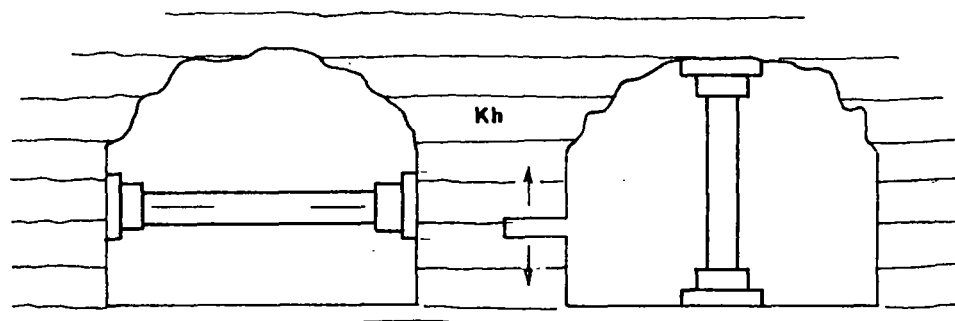




**FORMACION HOLLIN**  
**GALERIA EXPLORATORIA GT3 — ABSCISA 0 + 070 m**  
**ENSAYO DE CARGA HORIZONTAL SOBRE PLACA**  
**RELACION ENTRE CARGA APLICADA Y DEFORMABILIDAD**

GALERIA EXPLORATORIA GT3  
ESTRATOS SUBHORIZONTALES DE ARENISCA  
DE LA FORMACION HOLLIN (Kh)

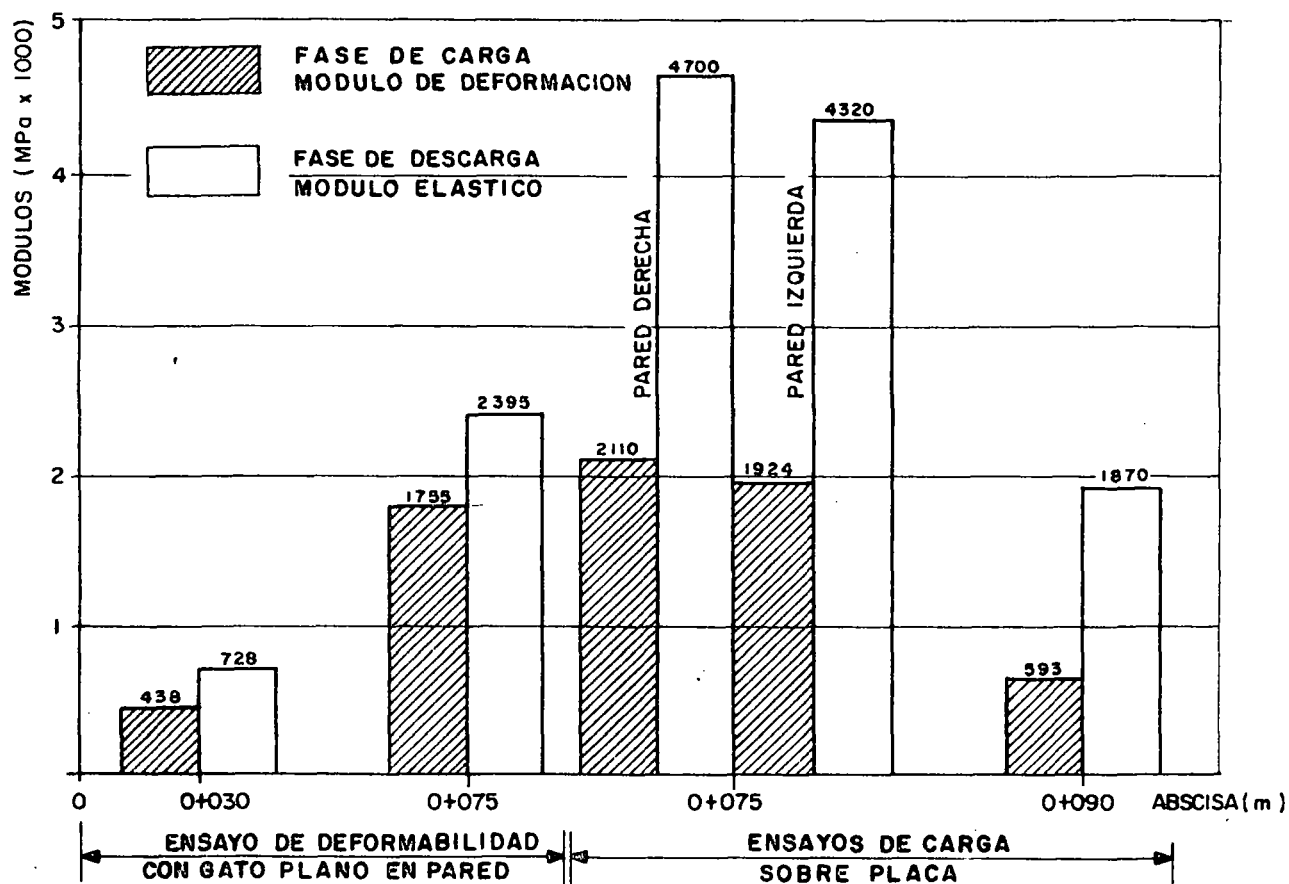
ESQUEMAS DE LOS ENSAYOS



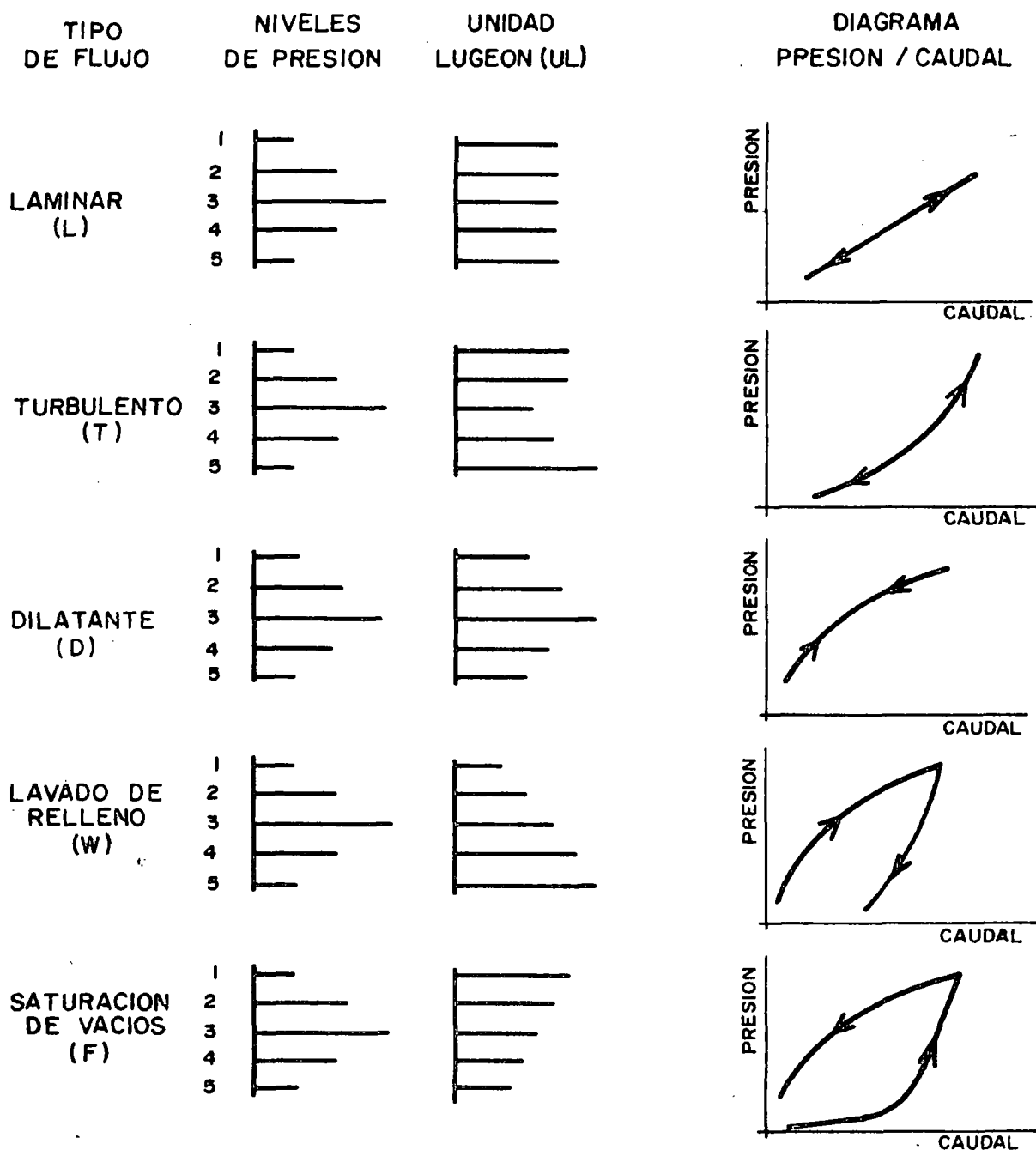
ENSAYO DE CARGA HORIZONTAL  
SOBRE PLACA

ENSAYO DE CARGA VERTICAL  
SOBRE PLACA

ENSAYO DE DEFORMABILIDAD  
CON GATO PLANO EN PARED

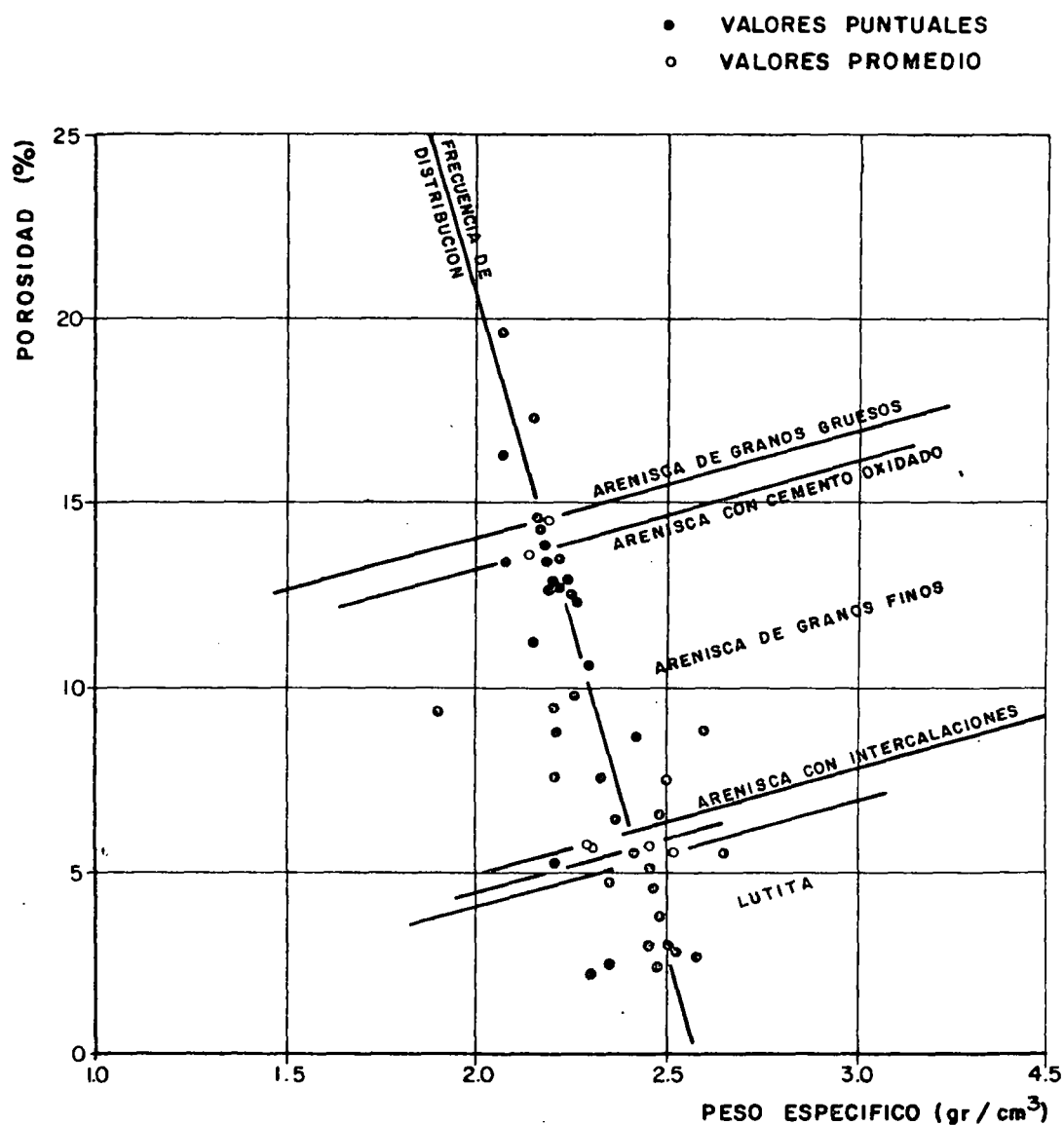


FORMACION HOLLIN  
GALERIA EXPLORATORIA GT3  
ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS "IN SITU"  
HISTOGRAMA DE LOS MODULOS

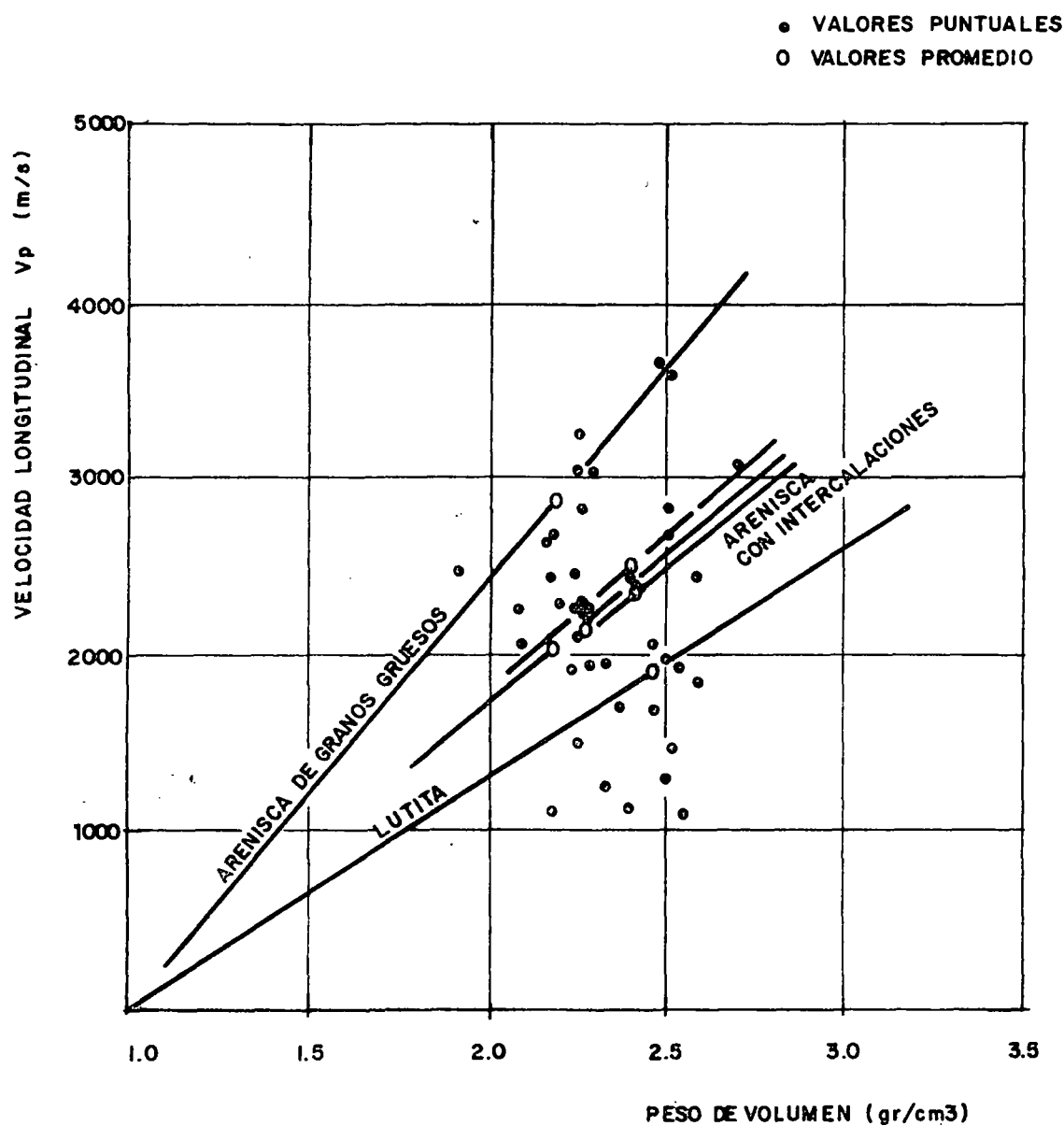


# CLASIFICACION DE LOS ENSAYOS DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON

(Según A. C. HOULSBY, 1976)



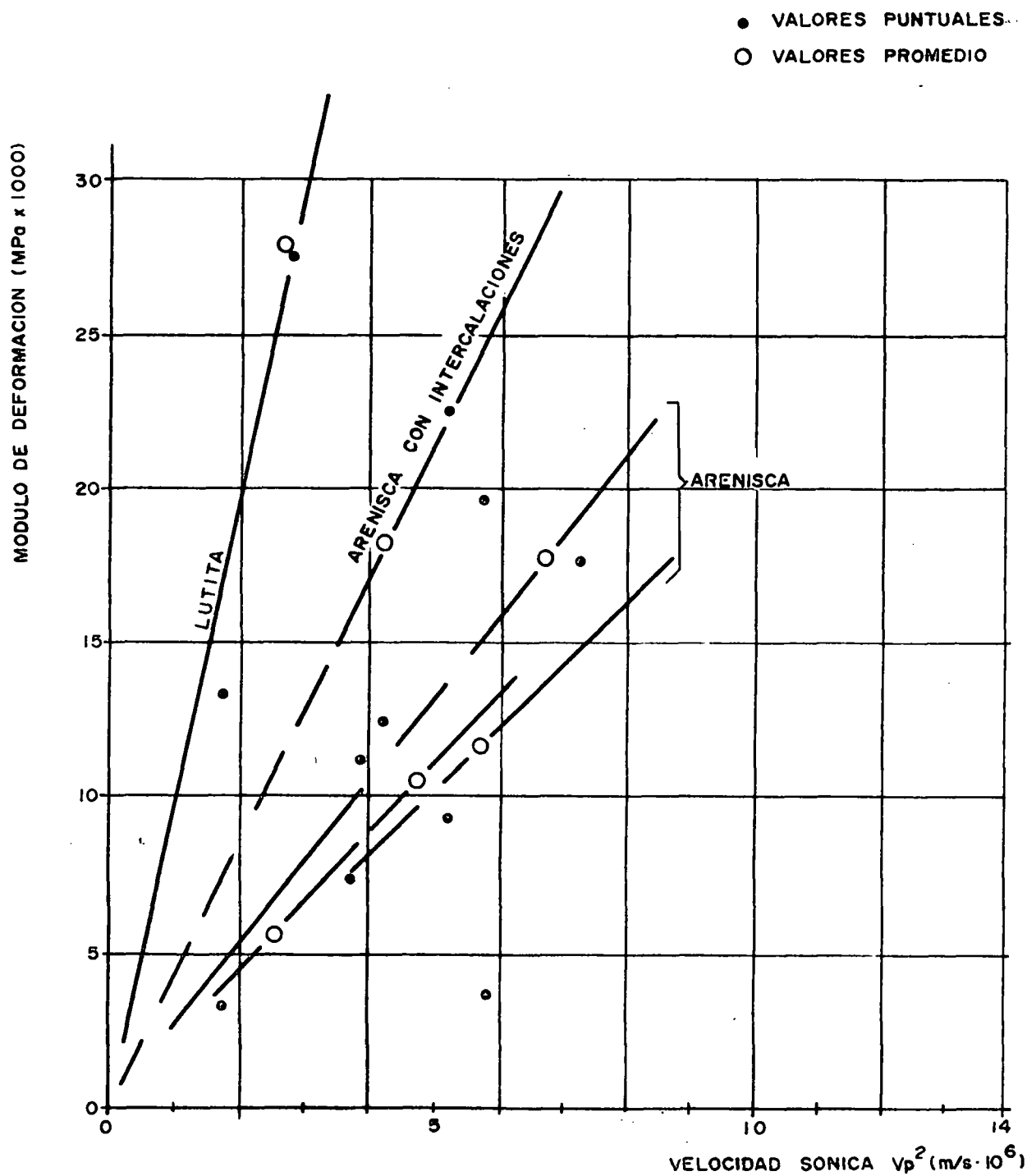
FORMACION HOLLIN  
ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
CORRELACION ENTRE POROSIDAD Y PESO ESPECIFICO



# FORMACION HOLLIN

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

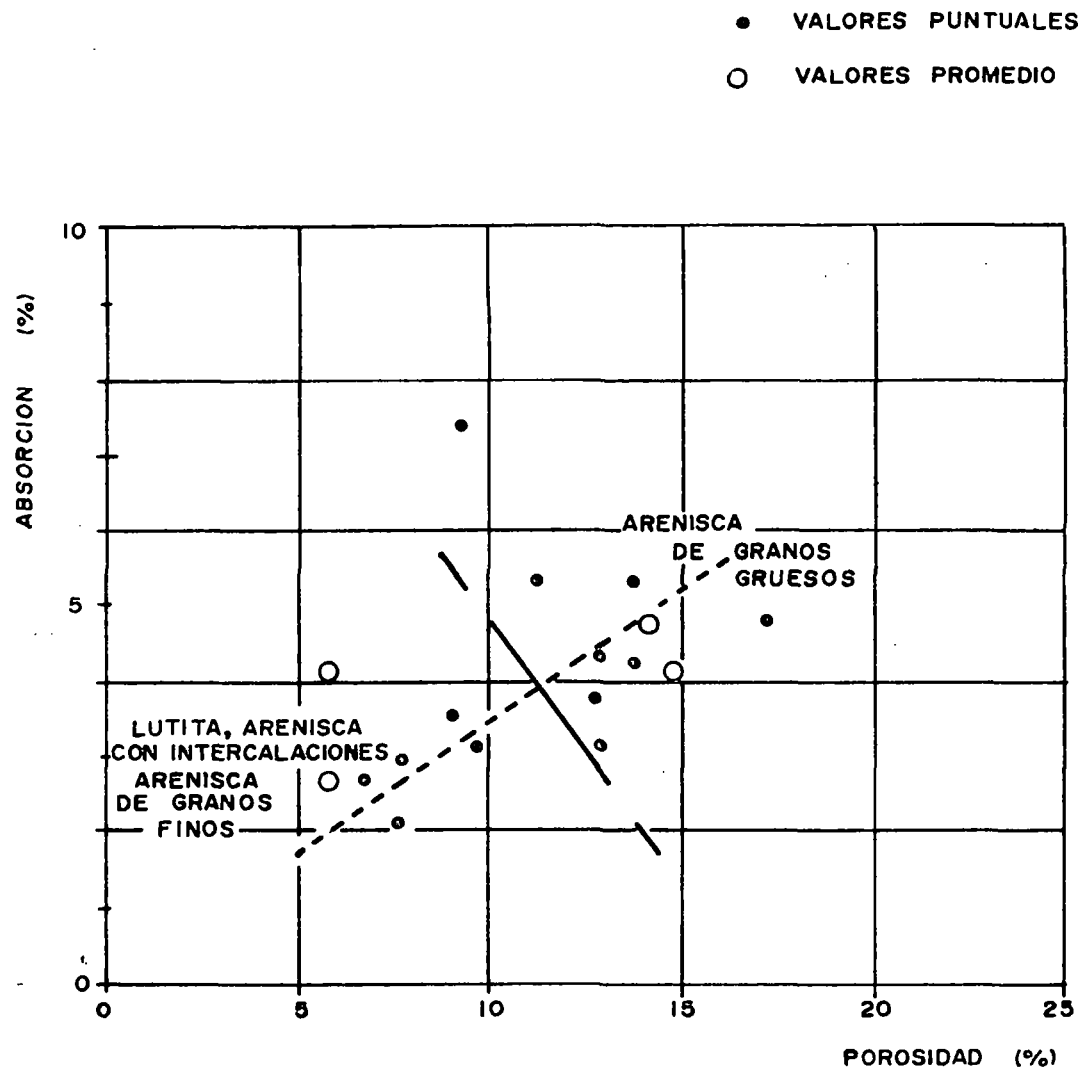
CORRELACION ENTRE VELOCIDAD SONICA Y PESO DE VOLUMEN



## FORMACION HOLLIN

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

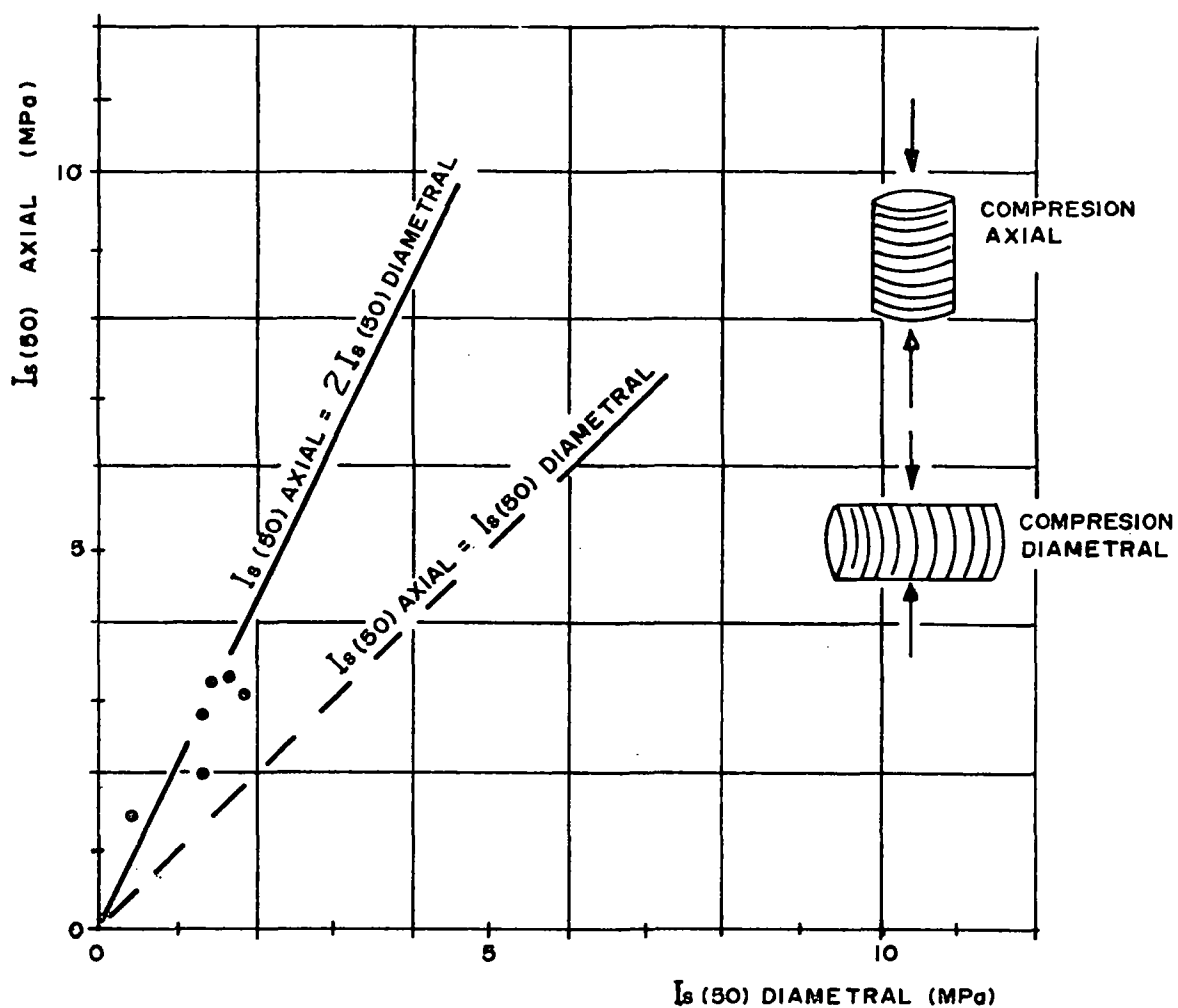
CORRELACION ENTRE MODULO DE DEFORMACION Y VELOCIDAD SONICA  $V_p^2$



## FORMACION HOLLIN

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

CORRELACION ENTRE POROSIDAD Y ABSORCION



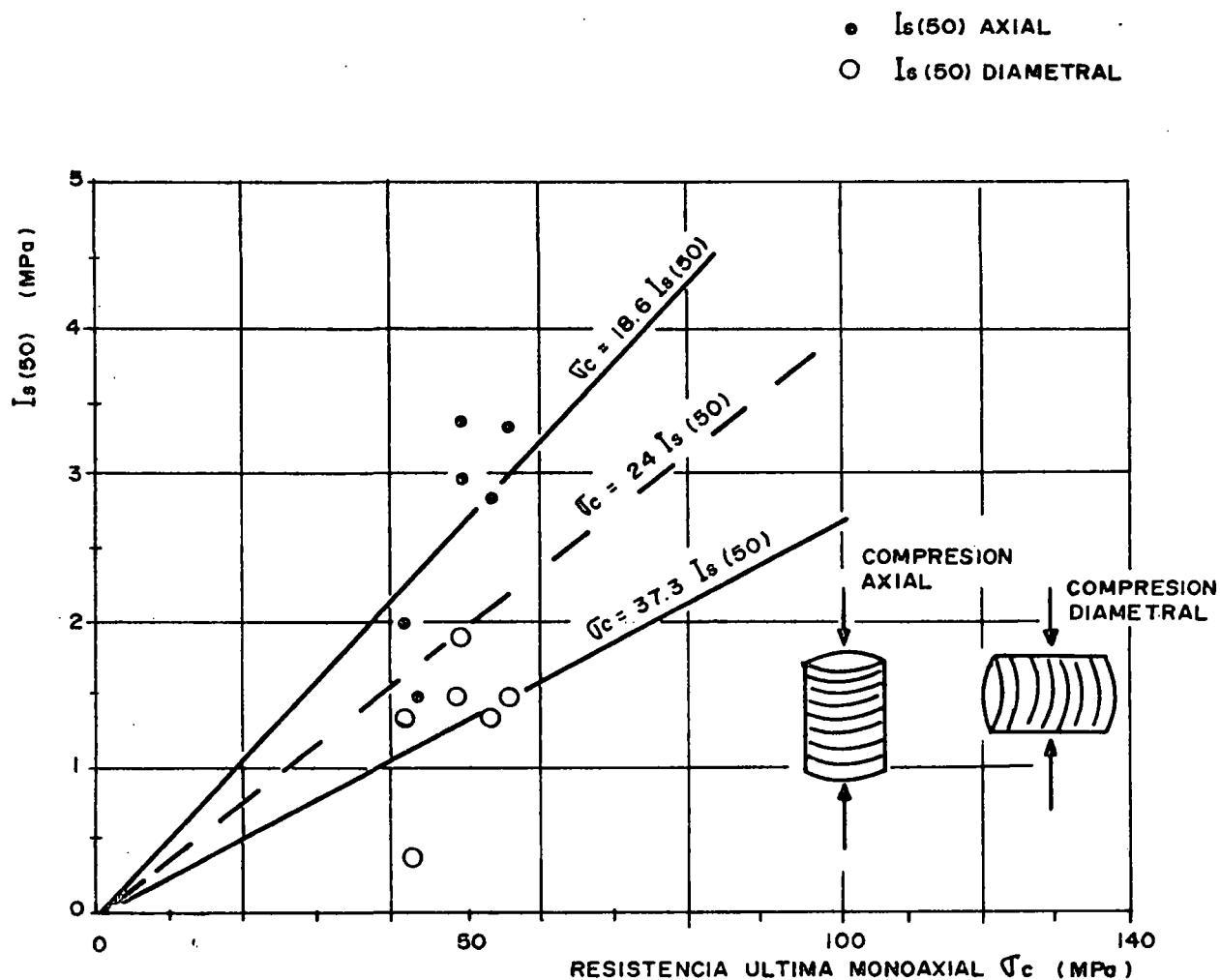
## FORMACION HOLLIN

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

COMPRESION PUNTUAL

RELACION ENTRE EL INDICE  $I_s(50)$  AXIAL Y EL INDICE  $I_s(50)$  DIAMETRAL

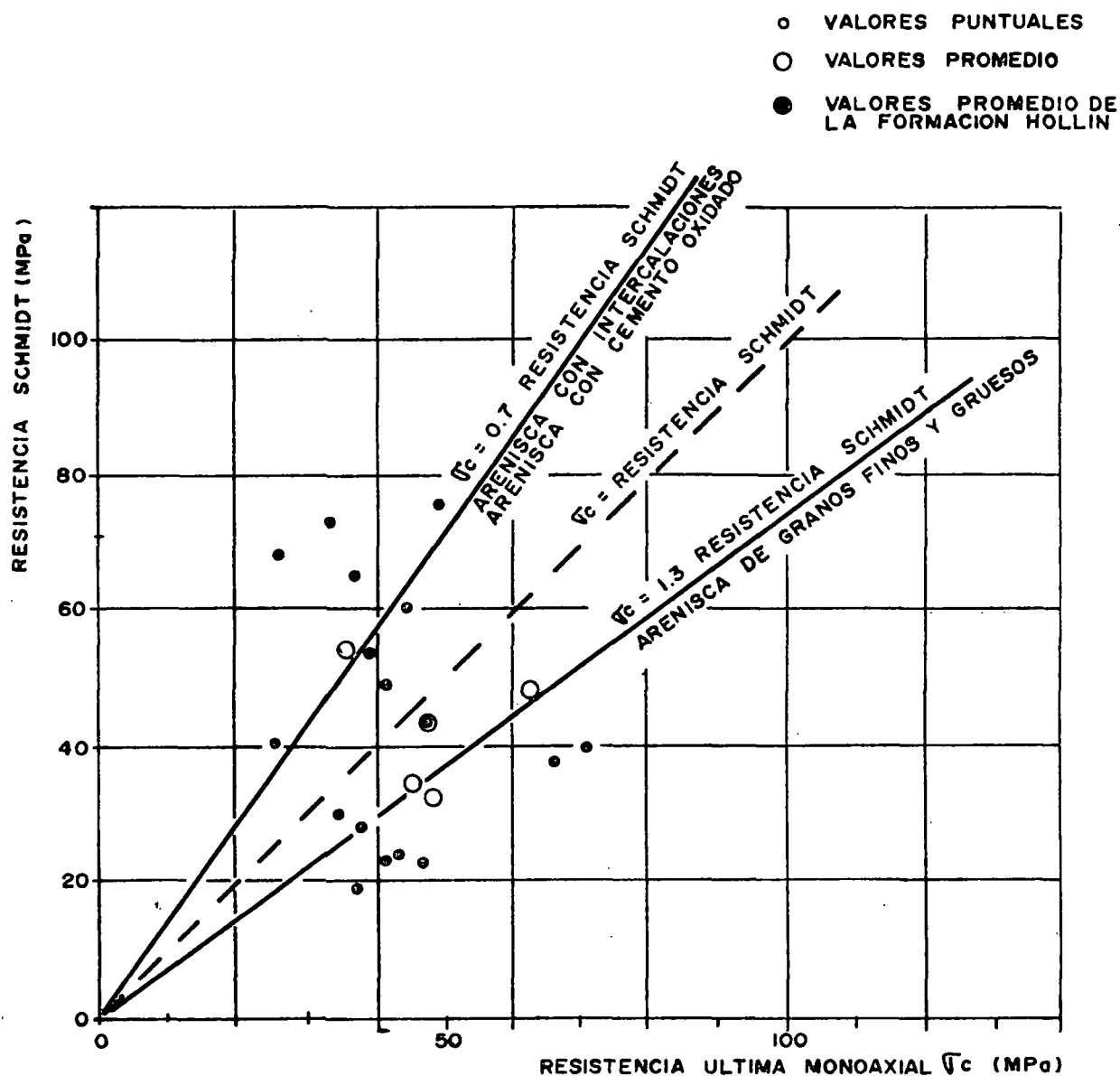




## FORMACION HOLLIN

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
COMPRESION PUNTUAL

RELACION ENTRE EL INDICE  $I_s(50)$  Y LA RESISTENCIA  
ULTIMA A LA COMPRESION MONOAXIAL ( $\sigma_c$ )

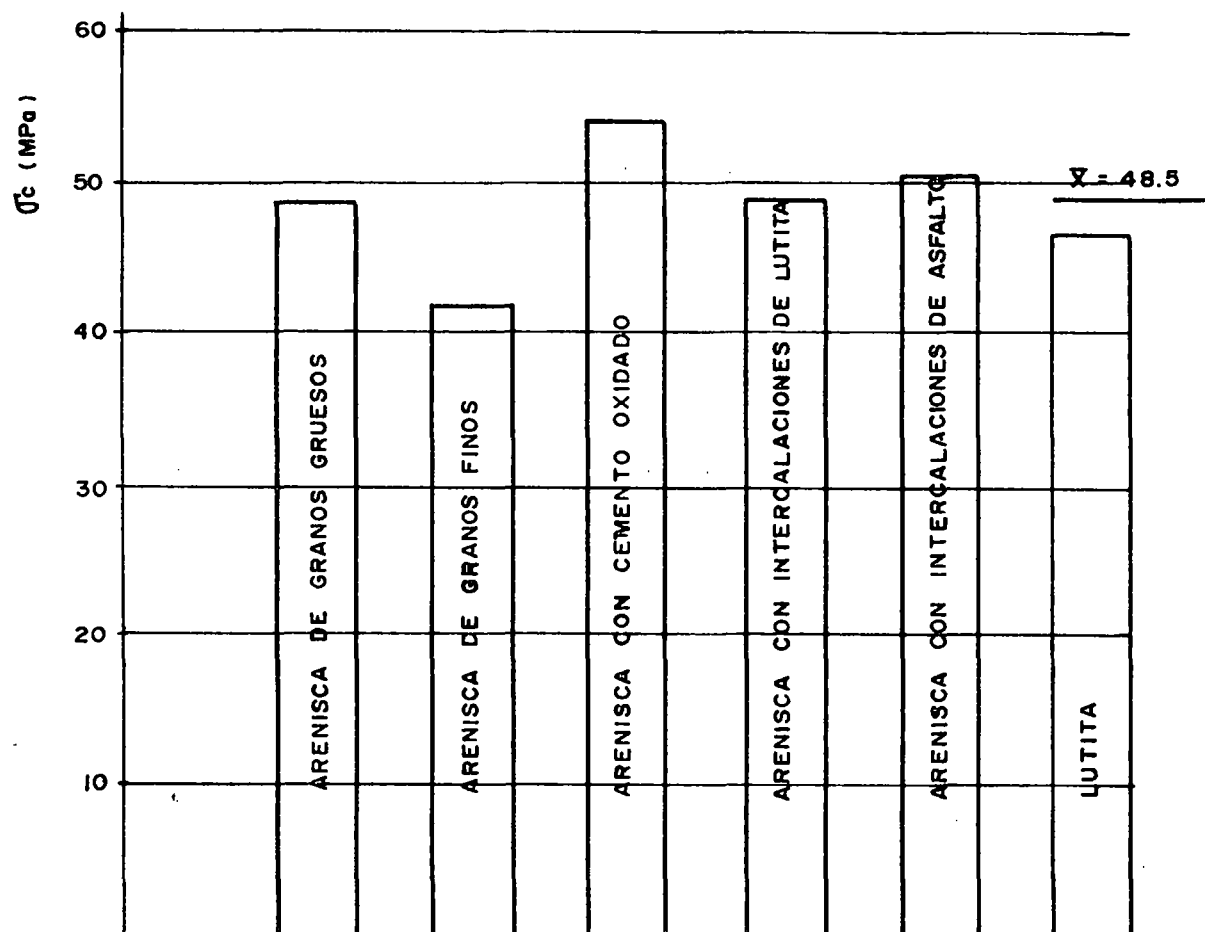


### FORMACION HOLLIN

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

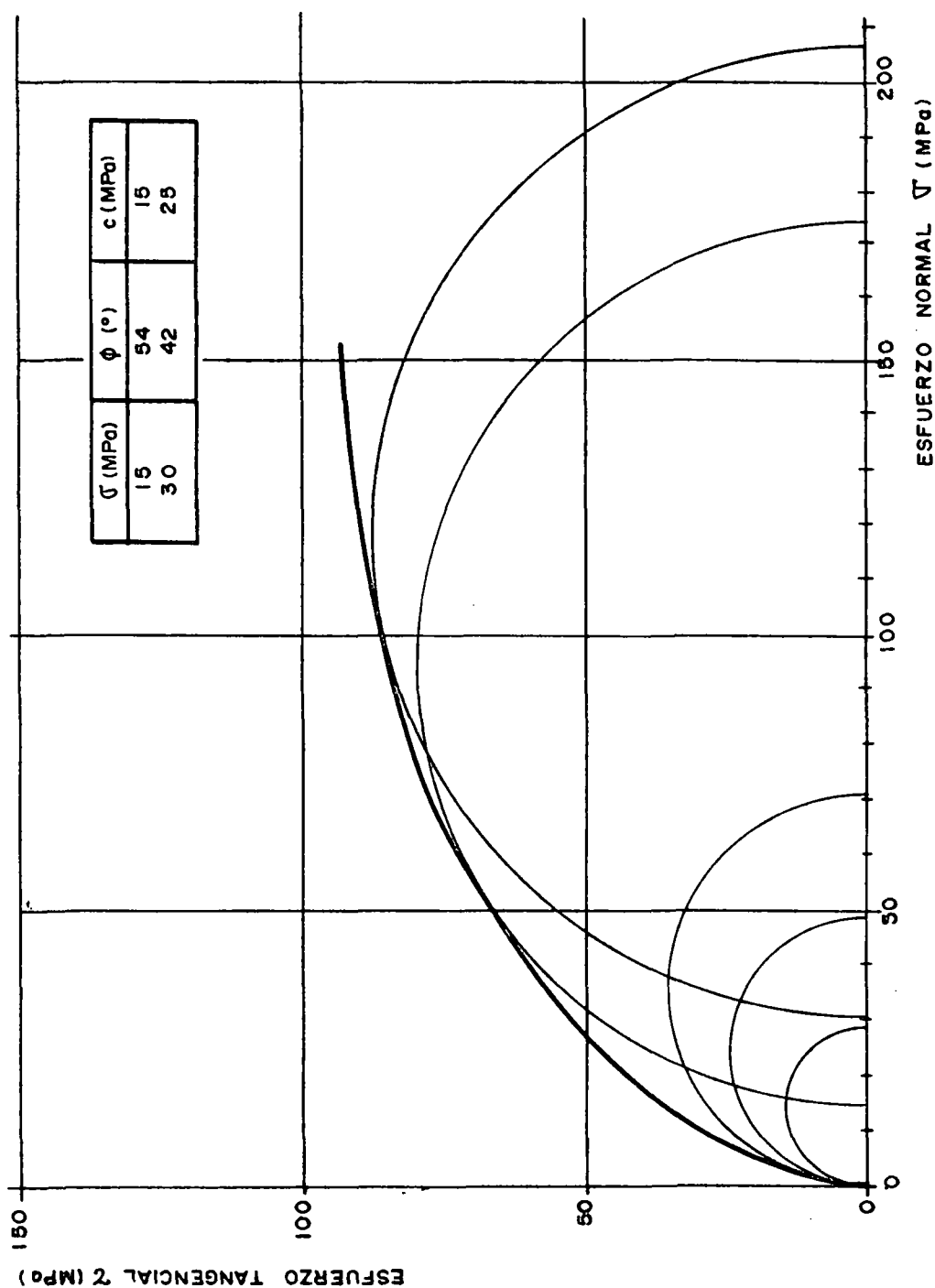
PRUEBA CON MARTILLO SCHMIDT

RELACION ENTRE RESISTENCIA SCHMIDT Y LA RESISTENCIA ULTIMA A LA COMPRESION MONOAXIAL ( $f_c$ )



### FORMACION HOLLIN

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
HISTOGRAMAS DE LA RESISTENCIA ULTIMA A LA COMPRESION MONOAXIAL ( $\sigma_c$ ) DE LOS LITOTIPOS



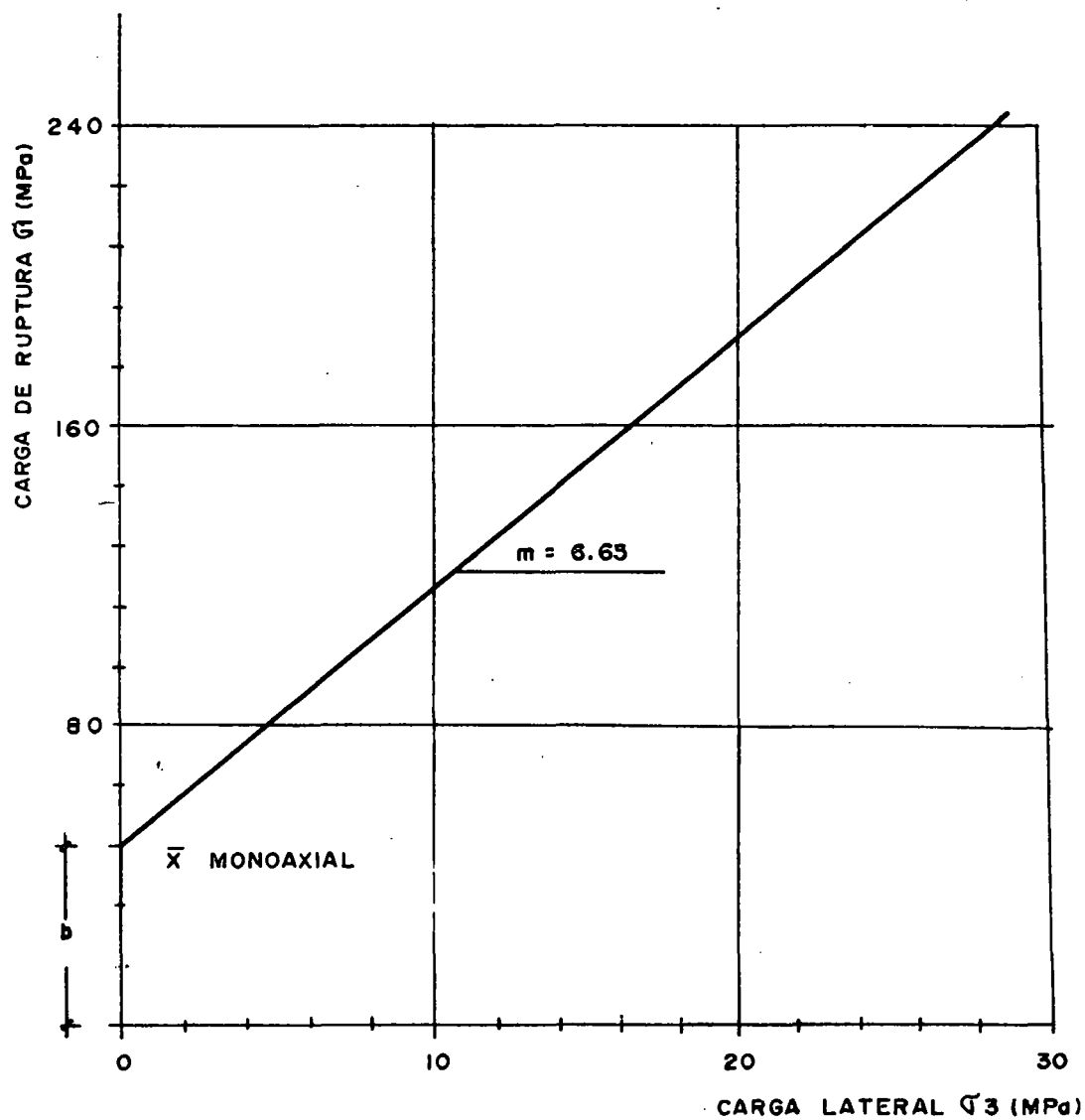
## FORMACION HOLLIN

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
COMPRESION TRIAXIAL -ARENISCAS CON LUTITA DEL  
SONDEO SC10

SEMICIRCULOS DE MOHR Y ENVOLVENTE DE RUPTURA  
EN EL PLANO  $\tau - \sigma$

$$\text{ANGULO DE FRICCION } \phi = \arcsin \frac{m-1}{m+1}$$

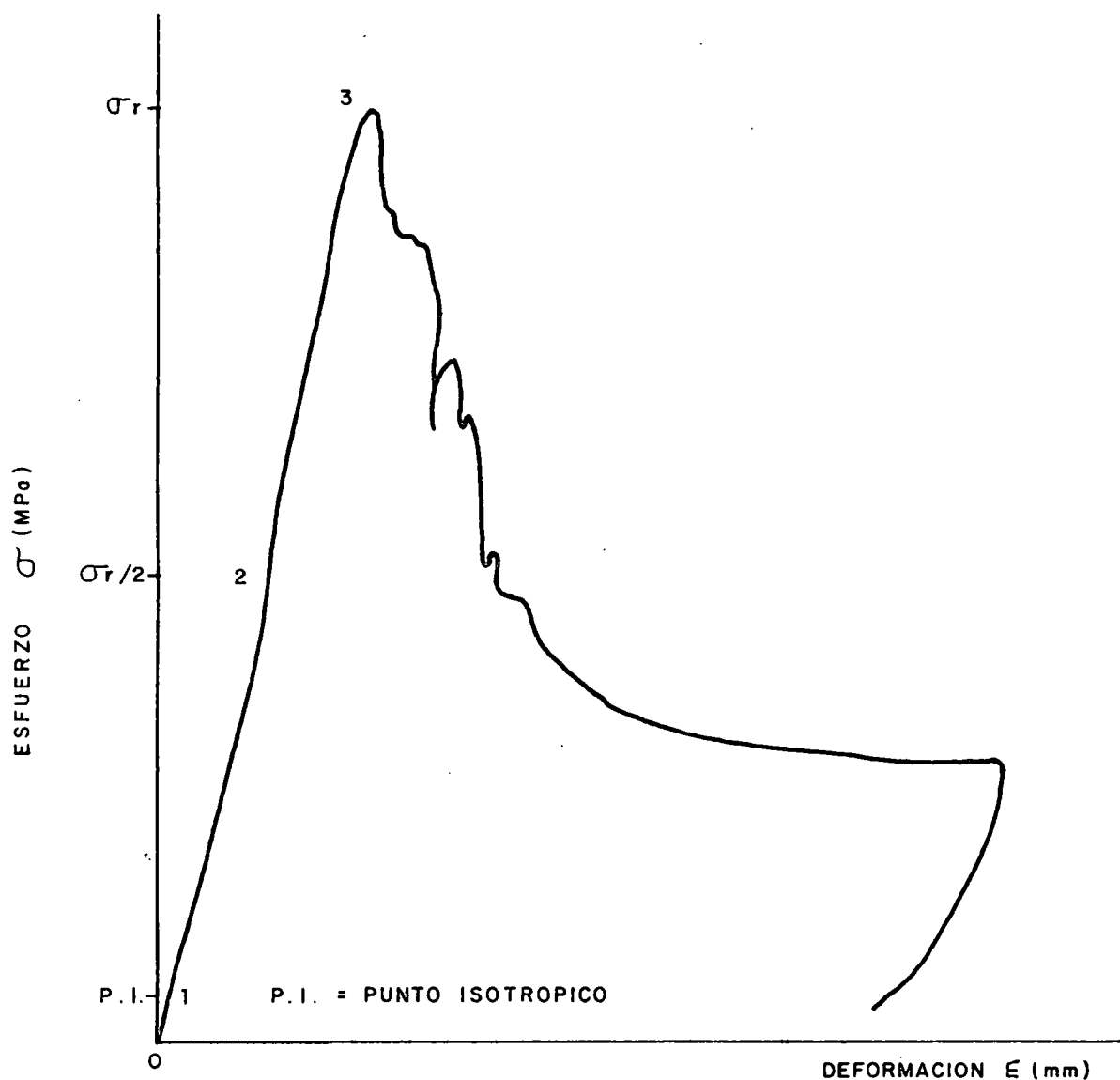
$$\text{COHESION } C = b \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi}$$



### FORMACION HOLLIN

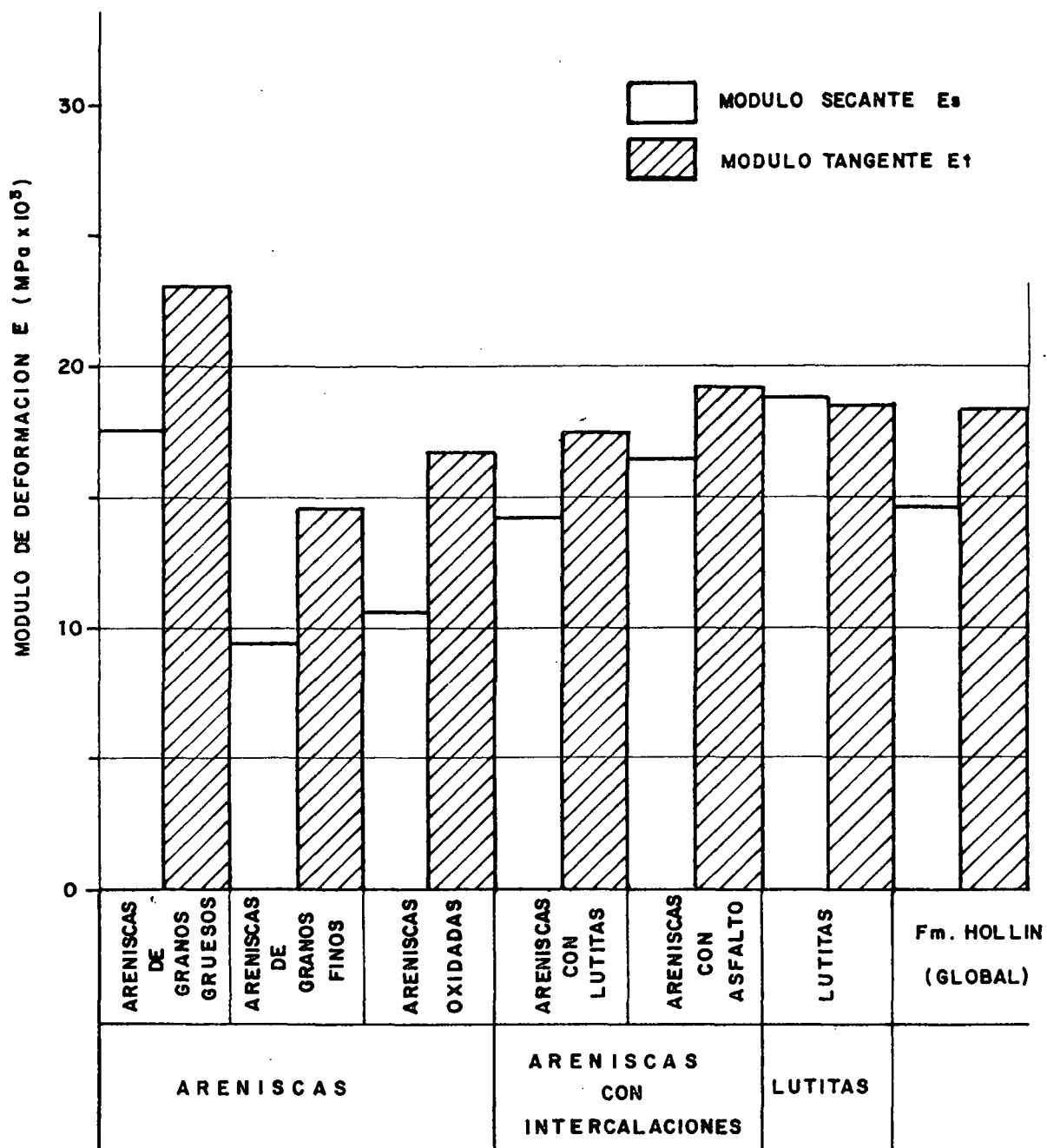
ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
COMPRESION TRIAXIAL

PARAMETROS DE RESISTENCIA SEGUN EL CRITERIO DE  
RUPTURA LINEAL DE COULOMB (Brown, 1981)



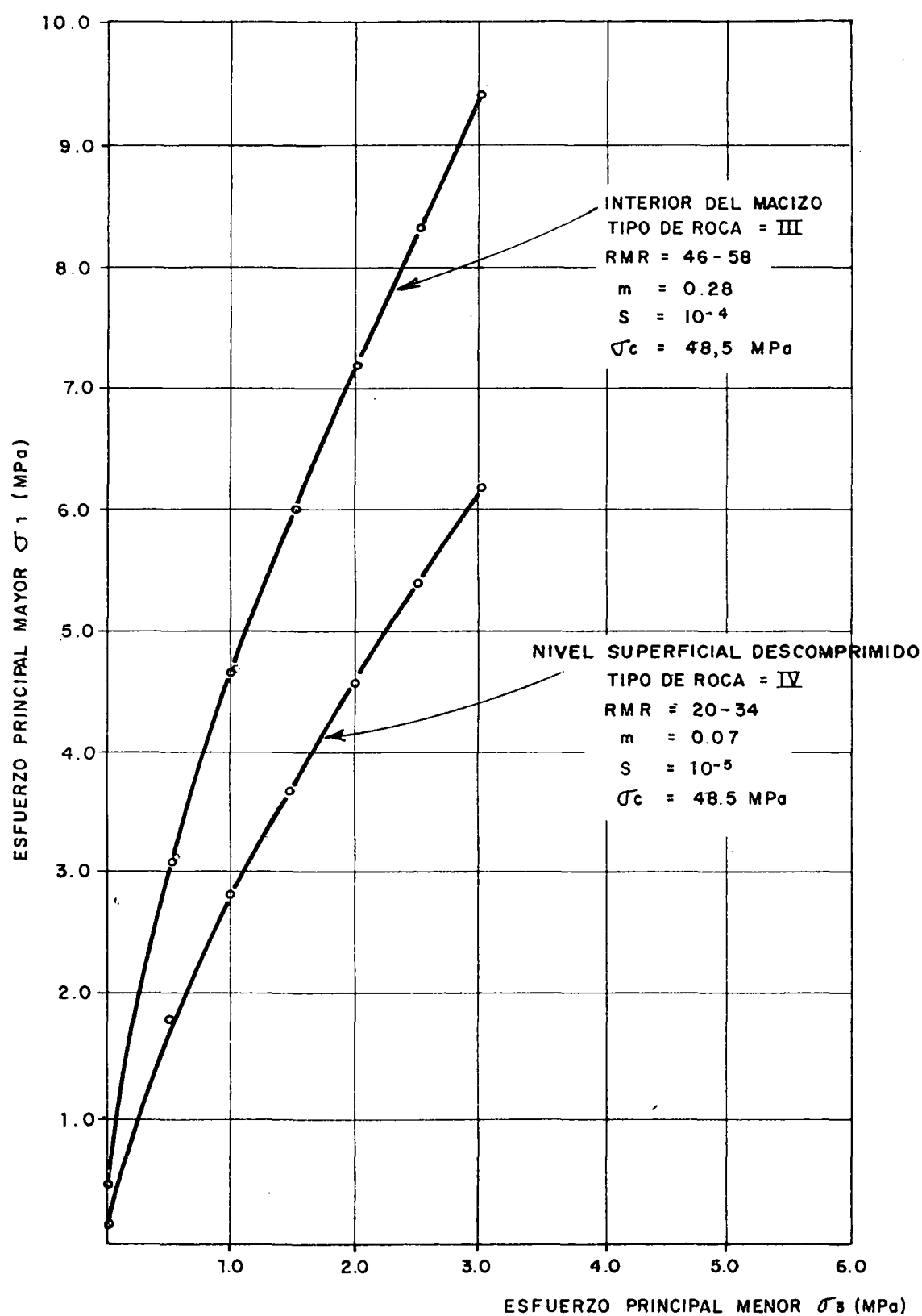
- MODULO DE DEFORMACION SECANTE = CALCULADO EN EL NIVEL DE CARGA COMPENDIDO ENTRE LOS PUNTOS 1 - 2 (COMPRESION TRIAXIAL) Y 0 - 2 (COMPRESION MONOAXIAL)
- MODULO DE DEFORMACION TANGENTE = CALCULADO ALREDEDOR DEL PUNTO 2

DIAGRAMA DE REFERENCIA PARA LA DETERMINACION DEL  
MODULO DE DEFORMACION



# FORMACION HOLLIN

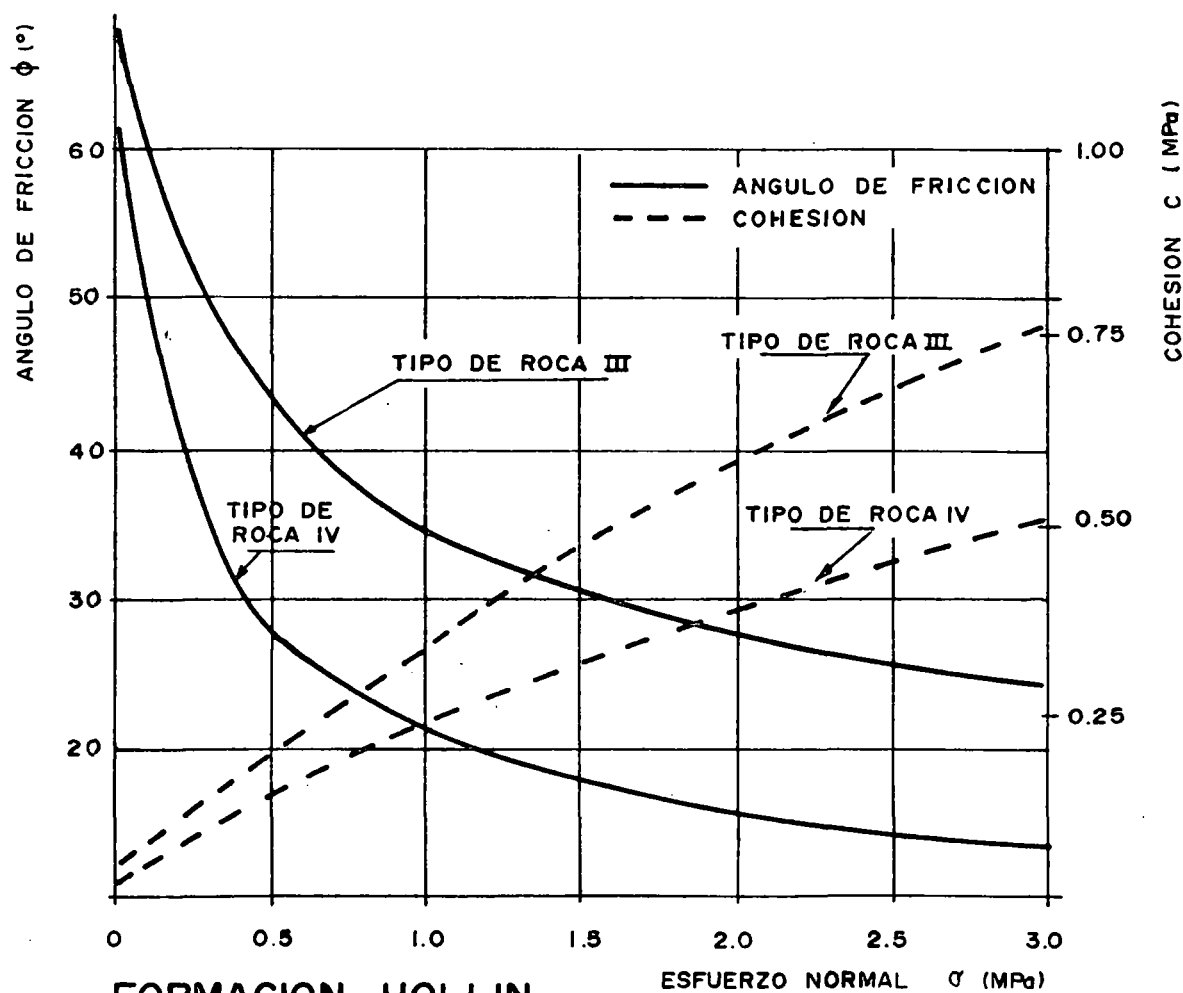
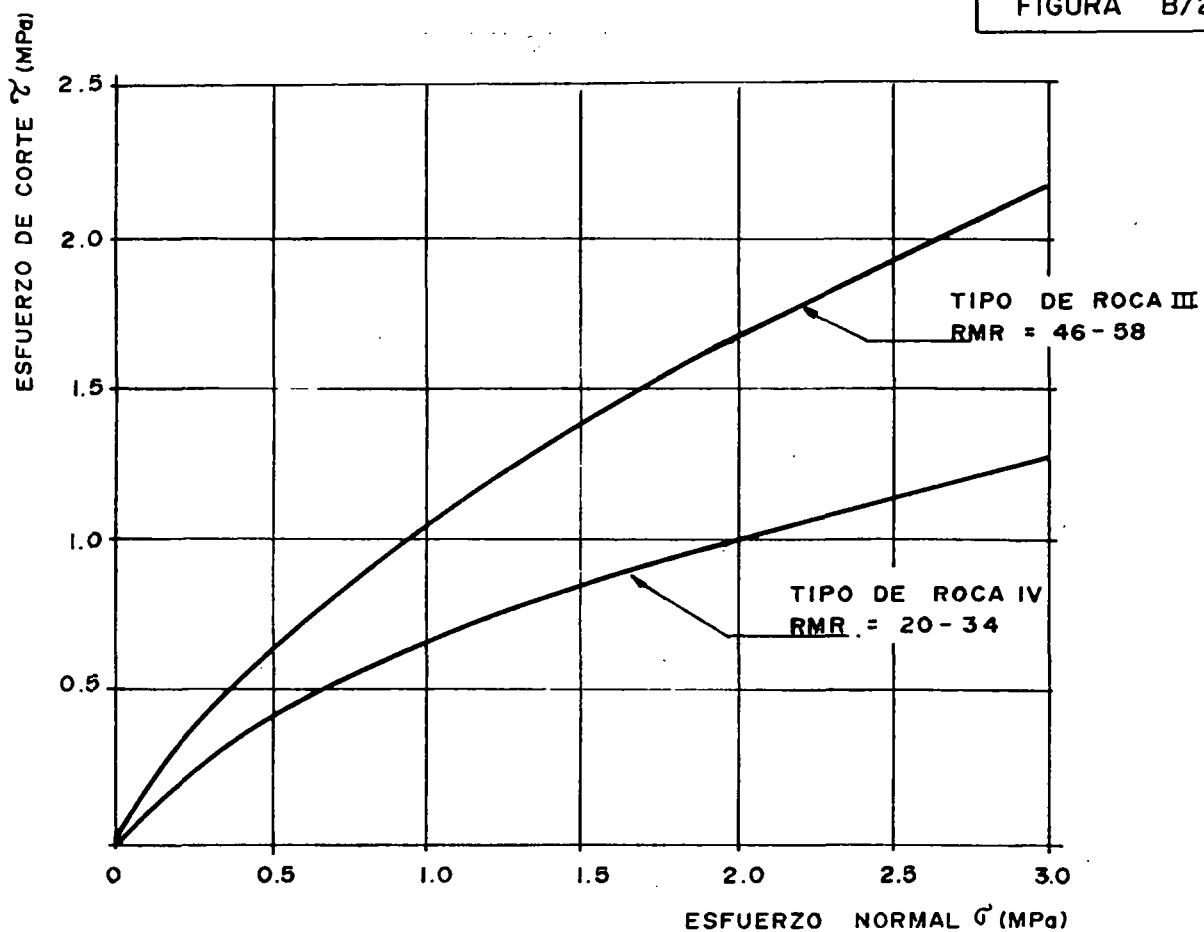
## HISTOGRAMAS DE MODULOS DE DEFORMACION



FORMACION HOLLIN

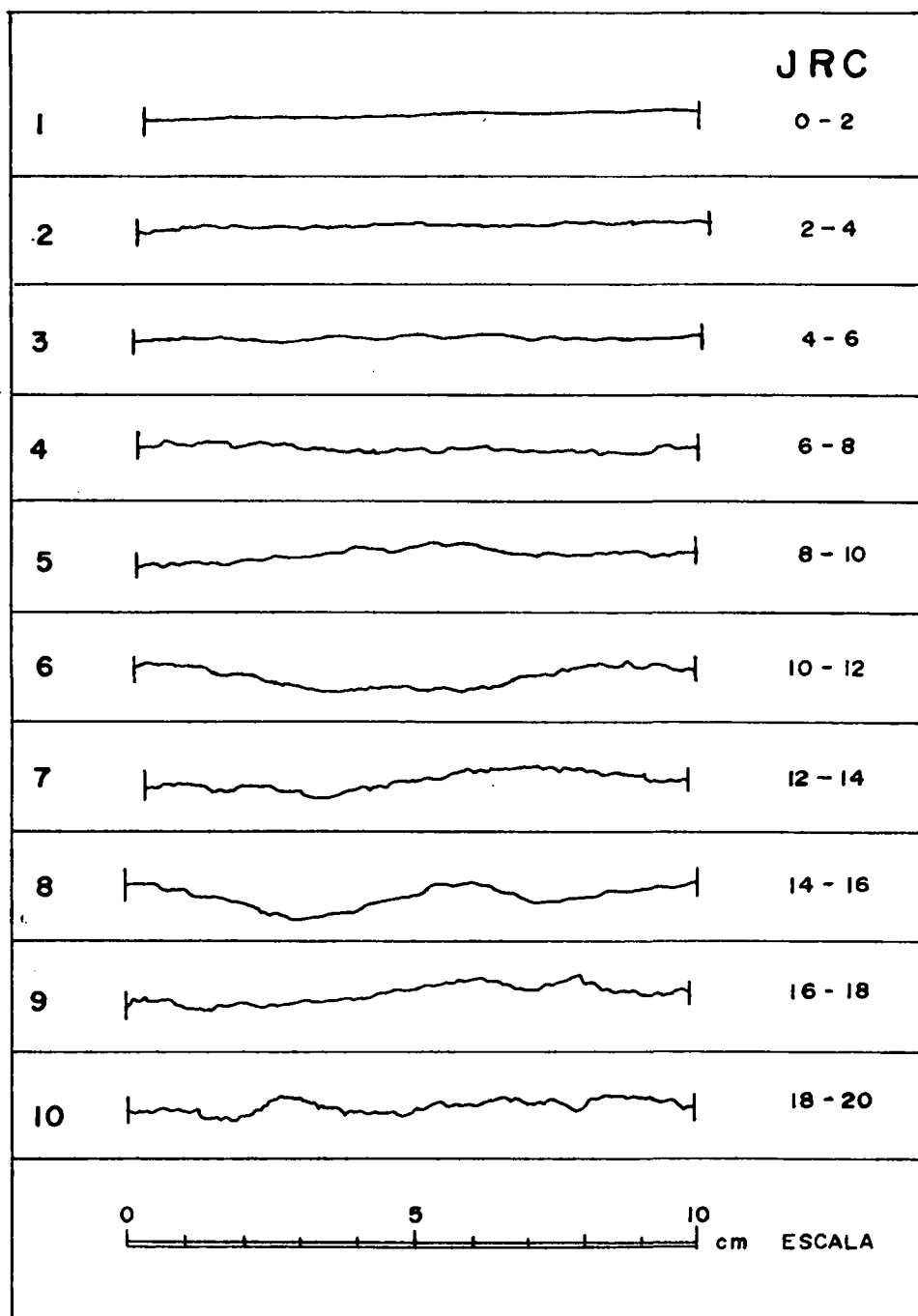
ENVOLVENTE DE RUPTURA EN EL PLANO  $\sigma_1 - \sigma_3$





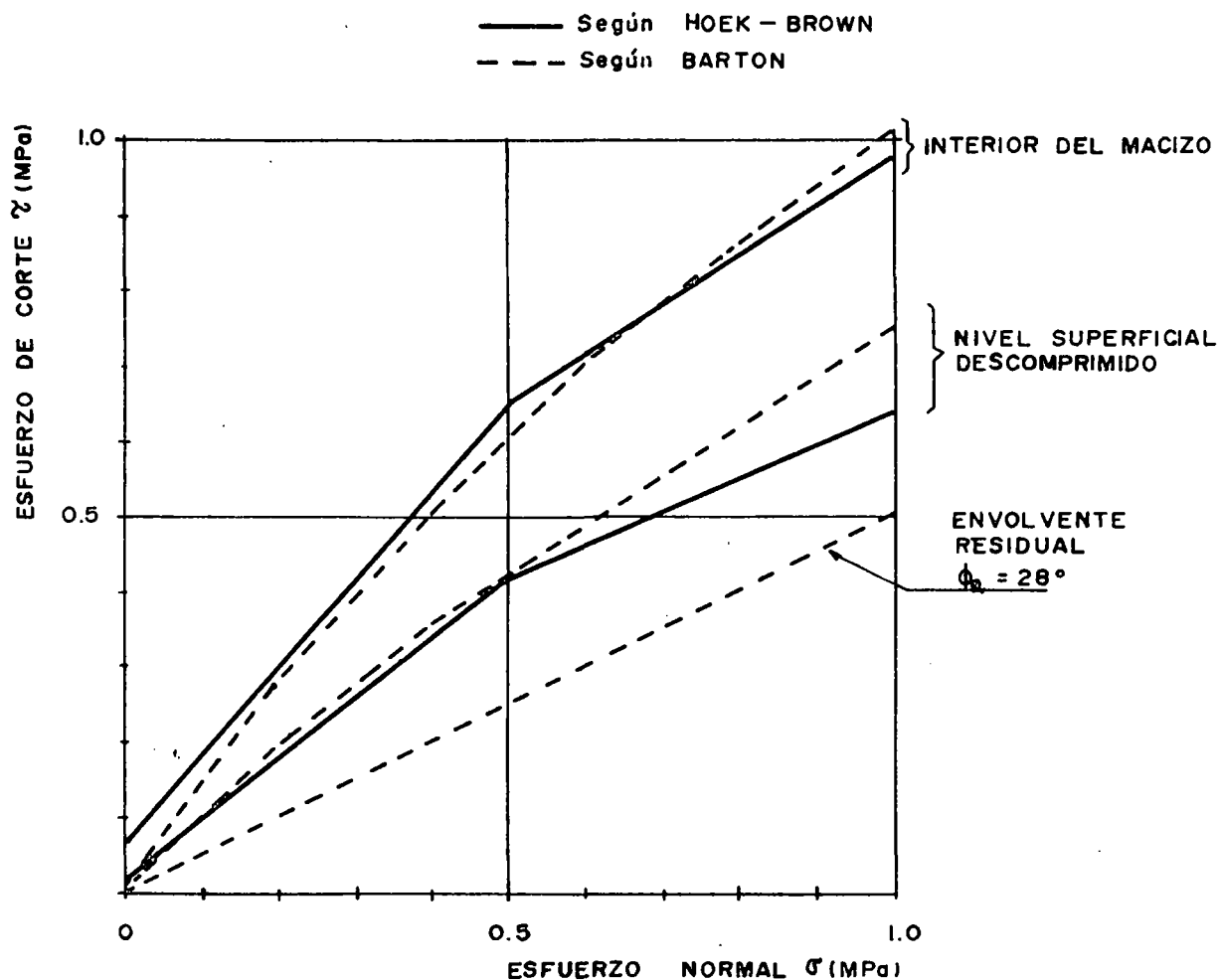
FORMACION HOLLIN

ENVOLVENTE DE RUPTURA EN EL PLANO  $\tau - \sigma$   
Y CURVAS  $\phi - c$



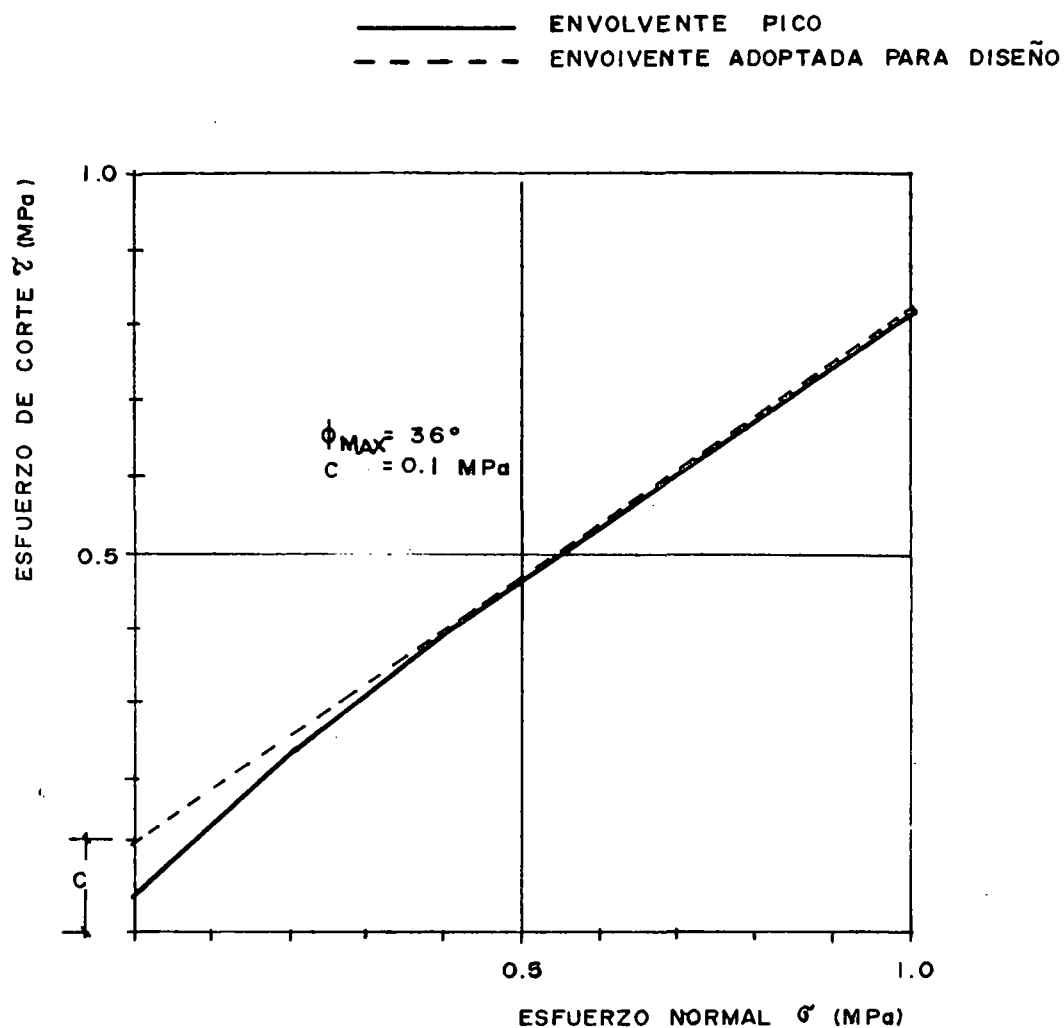
CLASIFICACION DE LOS PERFILES DE RUGOSIDAD  
DE DISCONTINUIDADES Y CORRESPONDIENTES  
COEFICIENTES JRC

( Según BARTON, 1977 )



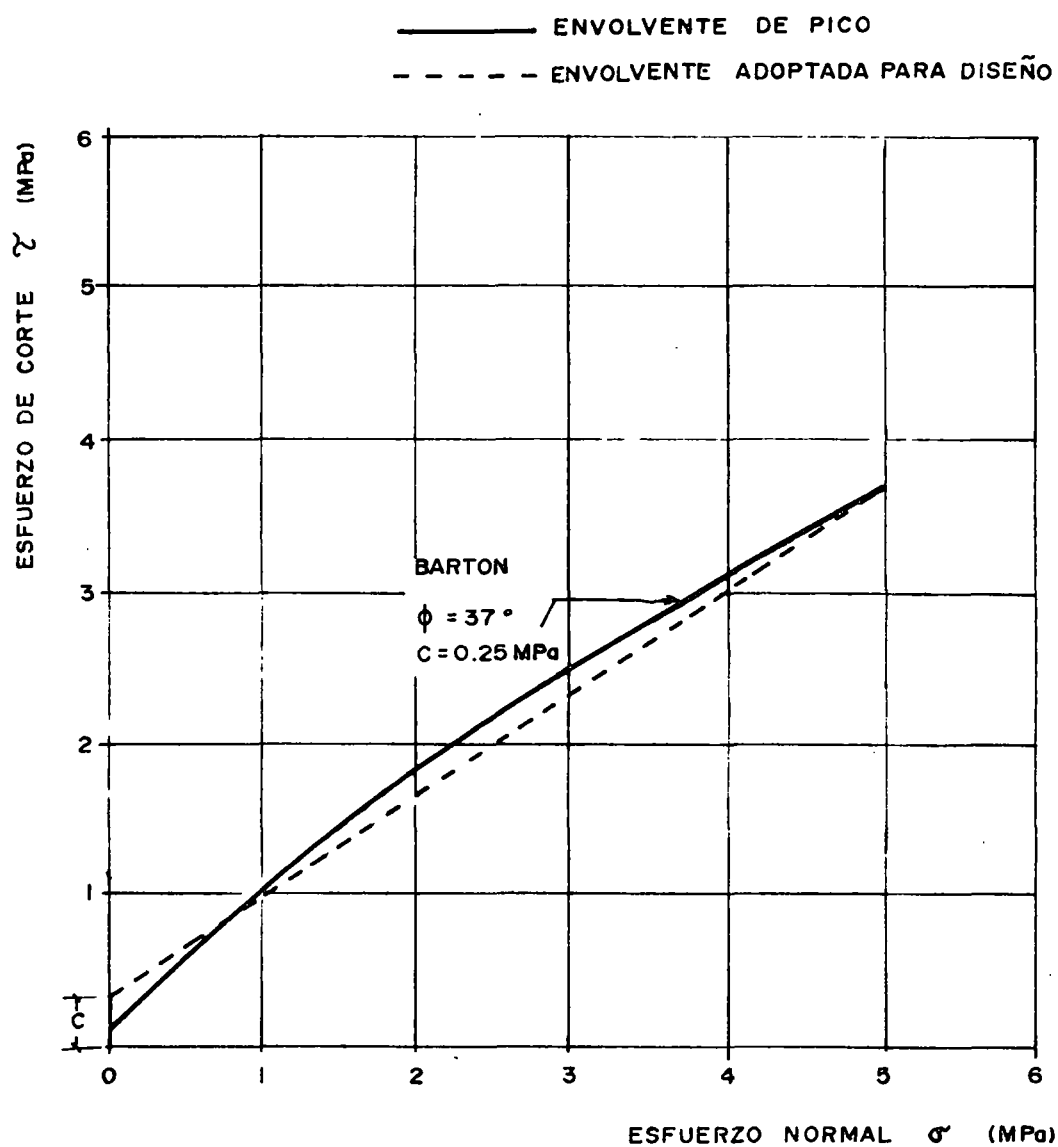
### FORMACION HOLLIN

ENVOLVENTES DE RUPTURA DE LAS DISCONTINUIDADES, SEGUN BARTON COMPARADAS CON LAS ENVOLVENTES DE RUPTURA DEL MACIZO, SEGUN HOEK Y BROWN



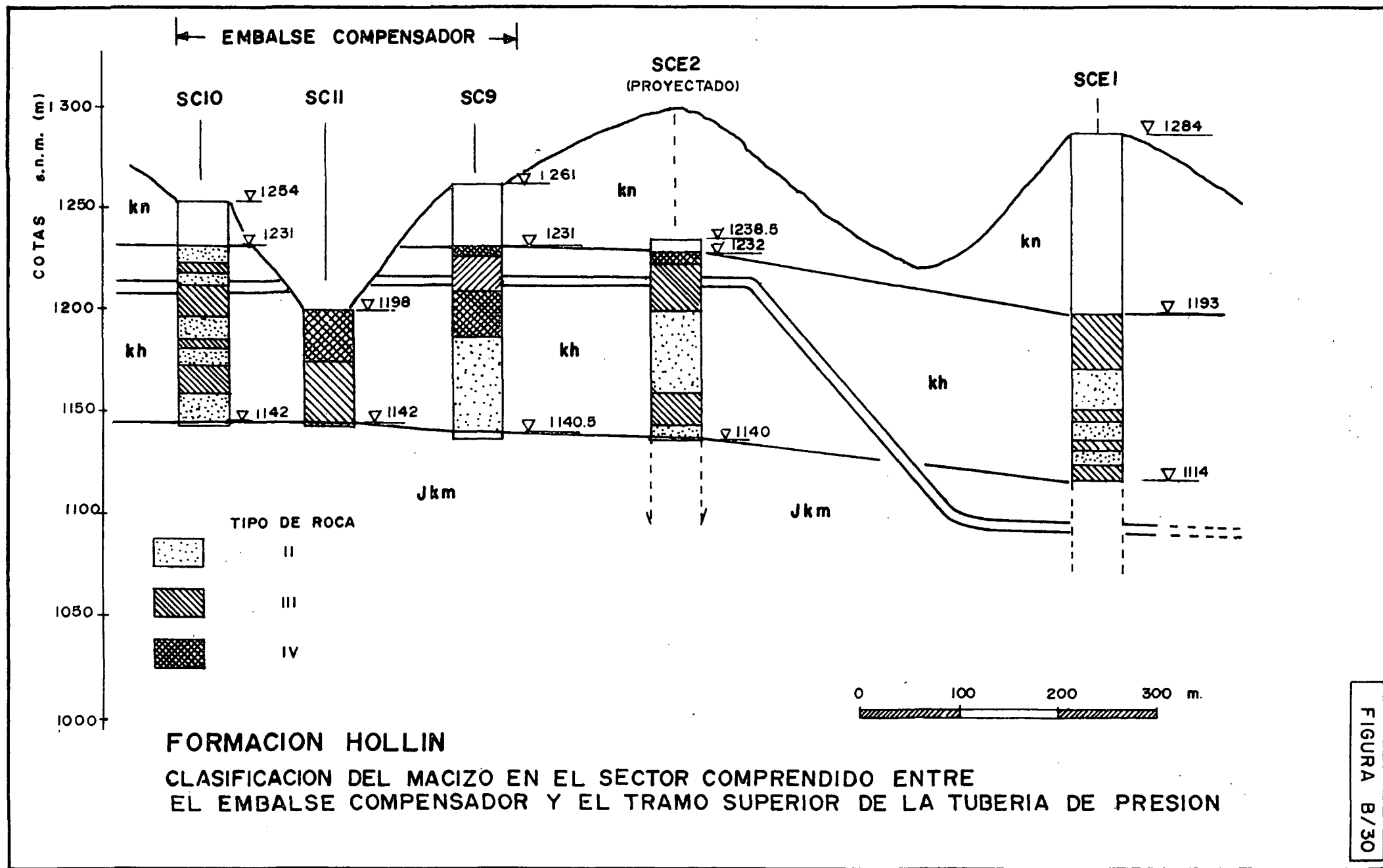
### FORMACION HOLLIN

ENVOLVENTE DE RUPTURA DE LAS DISCONTINUIDADES DE LA ROCA TIPO IV EN LA SECCION DE CIERRE DEL EMBALSE COMPENSADOR



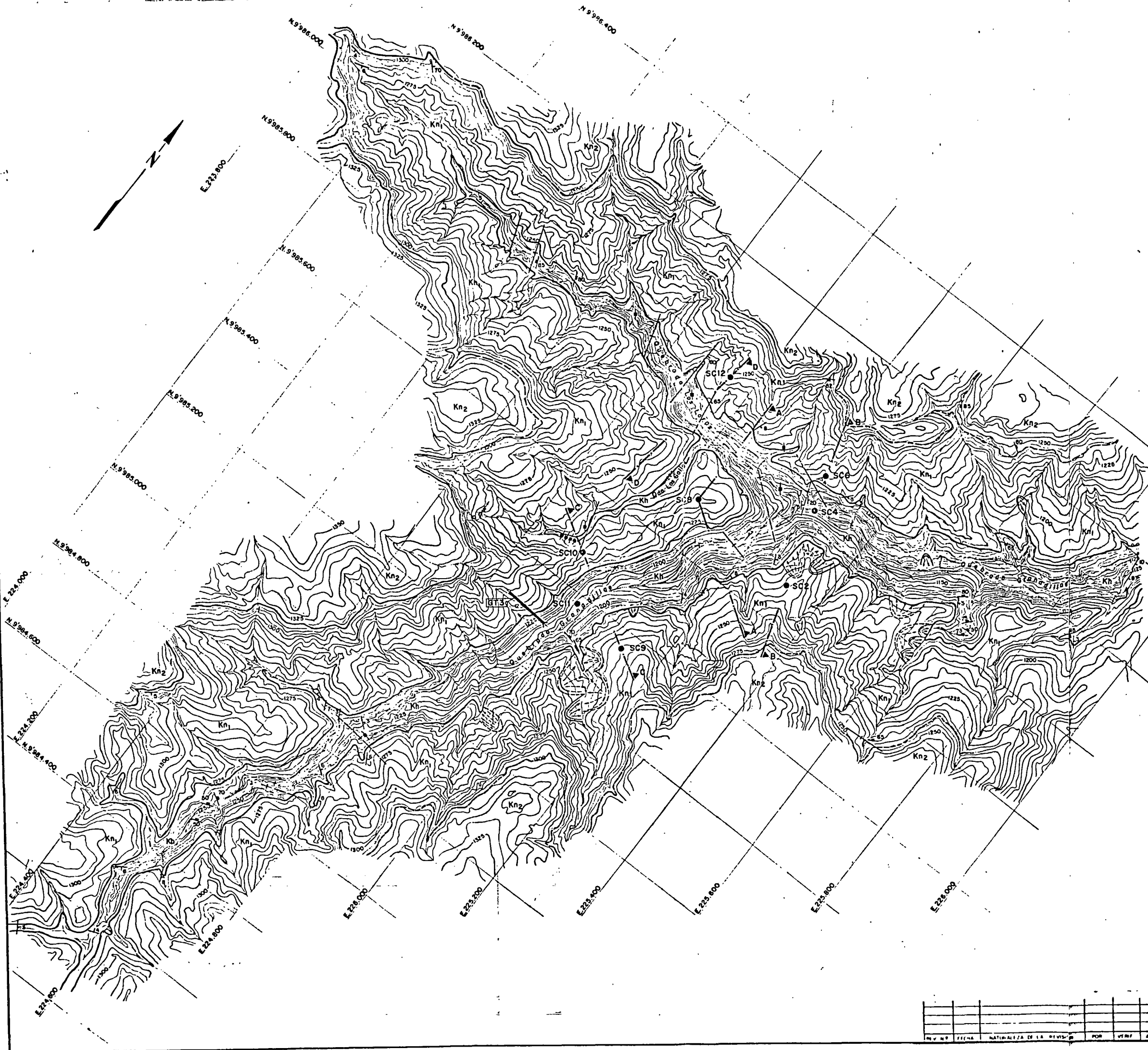
### FORMACION HOLLIN

ENVOLVENTES DE RUPTURA DE LAS DISCONTINUIDADES  
DE LA ROCA TIPO III EN EL INTERIOR DEL MACIZO



PARTE B

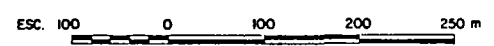
PLANOS



**LEYENDA**

- |  |   |  |  |
|--|---|--|--|
|  | FORMACION NAPO                            |  | MIEMBRO MEDIO<br>(MARGAS, CALIZAS Y LUTITAS)                       |
|  | FORMACION HOLLIN<br>(Areniscos)           |  | MIEMBRO INFERIOR<br>(LUTITAS Y LUTITAS CON<br>ARENISCAS CALCAREAS) |
|  | CONTACTO OBSERVADO                        |  |  |
|  | CONTACTO INFERIDO                         |  |  |
|  | FALLA NORMAL                              |  |  |
|  | ESTRATIFICACION INCLINADA Y HORIZONTAL    |  |  |
|  | FRACTURAS INCLINADA, VERTICAL, HORIZONTAL |  |  |
|  | DESIZAMIENTOS ACTIVOS Y POTENCIALES       |  |  |
|  | PUNTOS DE AGUA                            |  |  |
|  | PERFORACION ROTATIVA                      |  |  |

**NOTAS.-**  
 - LOS CORTES GEOLOGICOS SE PRESENTAN EN LOS PLANOS 0209 - G - 2037 Y 0209 - G - 2038  
 - EN ESTE PLANO NO ESTAN REPRESENTADOS LOS SUELOS RESIDUALES Y DEPOSITOS COLUVIALES

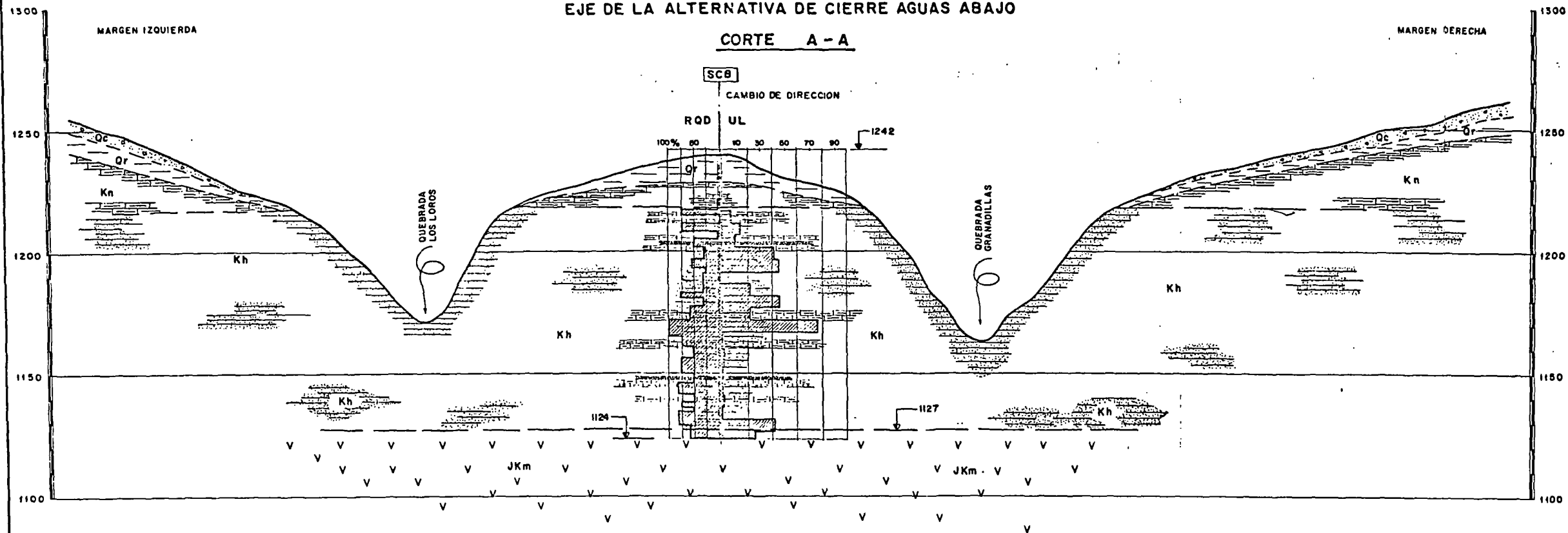


ELECTROCONSULT-TRACTIONEL-RODIO ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES			
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION QUITO - ECUADOR			
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE <b>GEOLOGIA</b> EMBALSE COMPENSADOR MAPA GEOLOGICO			
HOJA DE		ESC 1:4000	
ELABORADO	W.H.H. / H.S.B.	RECOMENDADO	
DISEÑADO	M.M.I. / V.H.A.	APROBADO	
REVISADO	SAC	FECHA	MAYO / 1981
REP 0209 - G - 2036			



# EJE DE LA ALTERNATIVA DE CIERRE AGUAS ABAJO

## CORTE A - A

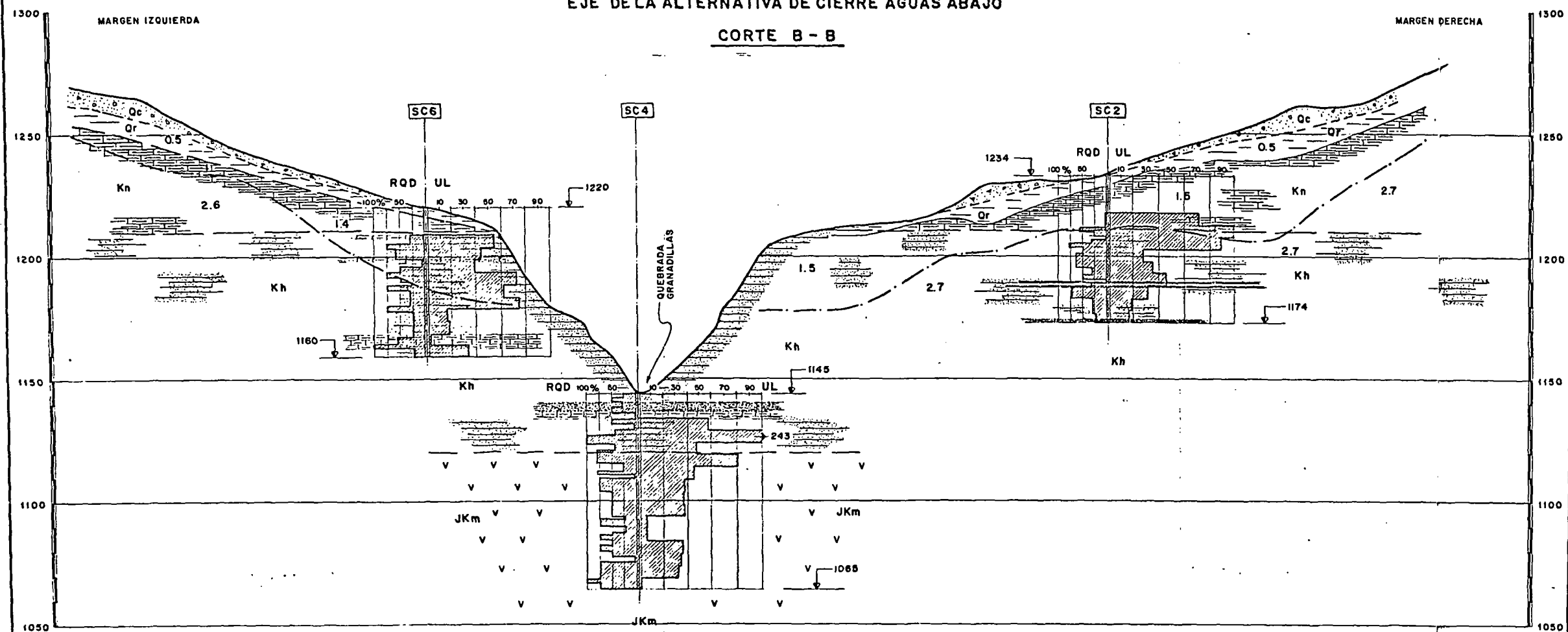


## LEYENDA

- Qc DEPOSITOS COLUVIALES
- Or SUELOS RESIDUALES
- Kn FORMACION NAPO (Lutitas)
- Kh FORMACION HOLLIN (Areniscas con intercalaciones de lutitas y asfalto)
- JKm FORMACION MISAHUALI (Rocas volcanicas)
- V HORIZONTE SISMICO Y VELOCIDADES SISMICAS (en Km/seg)
- LUTITAS
- ASFALTO

# EJE DE LA ALTERNATIVA DE CIERRE AGUAS ABAJO

## CORTE B - B



- NOTAS:
- LA UBICACION DE LOS CORTES SE PRESENTA EN EL PLANO 0209-G-2038
  - LOS CORTES GEOLOGICOS DE LAS ALTERNATIVAS AGUAS ARRIBA SE PRESENTAN EN EL PLANO 0209-G-2038

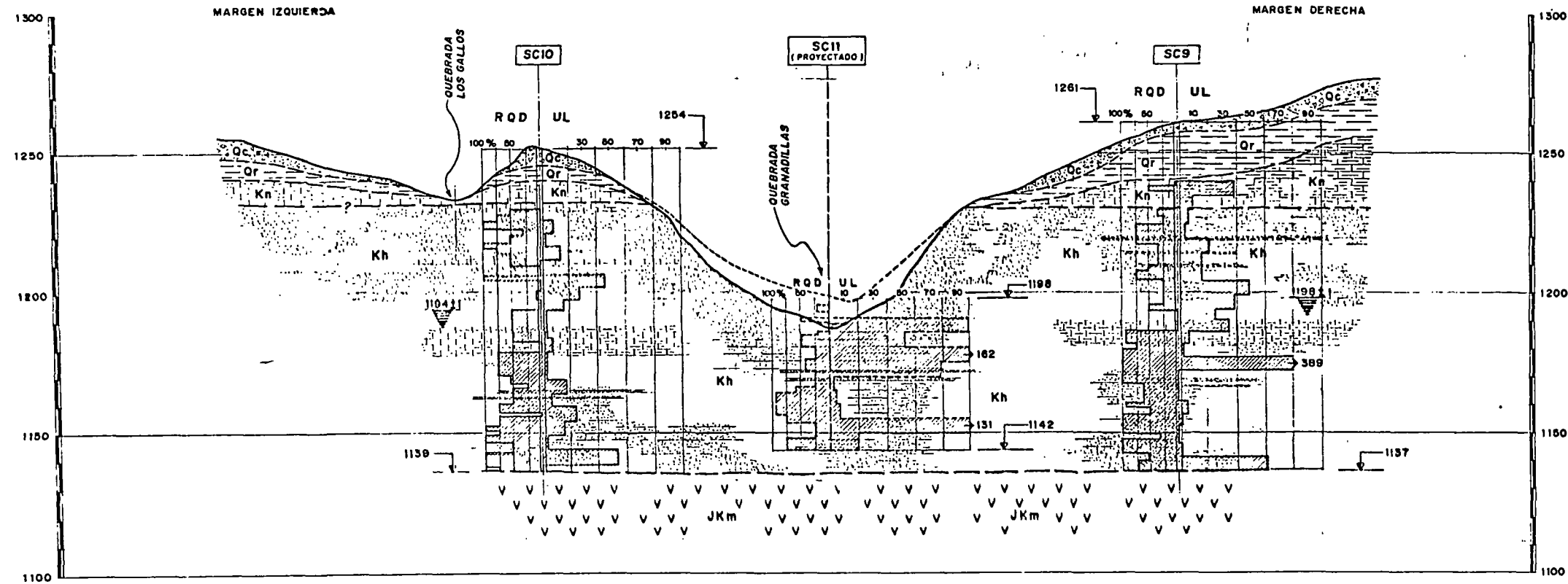
ESC. 10 0 20 40 60 m

ELECTROCONSULT-TRACTIONEL-RODIO  
ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES  
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION  
QUITO - ECUADOR  
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CCDO SINCLAIR  
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"  
GEOLOGIA  
PRESA DEL EMBALSE COMPENSADOR  
ALTERNATIVAS AGUAS ABAJO  
CORTES GEOLOGICOS

DISERADO	SAL	RECOMENDADO	ESC
DISEÑADO	M. M. L. V. N. A.	APROBADO	
REVISADO	SAL		
FECHA	JUNIO - 1991	REF.	0209 - G - 2037

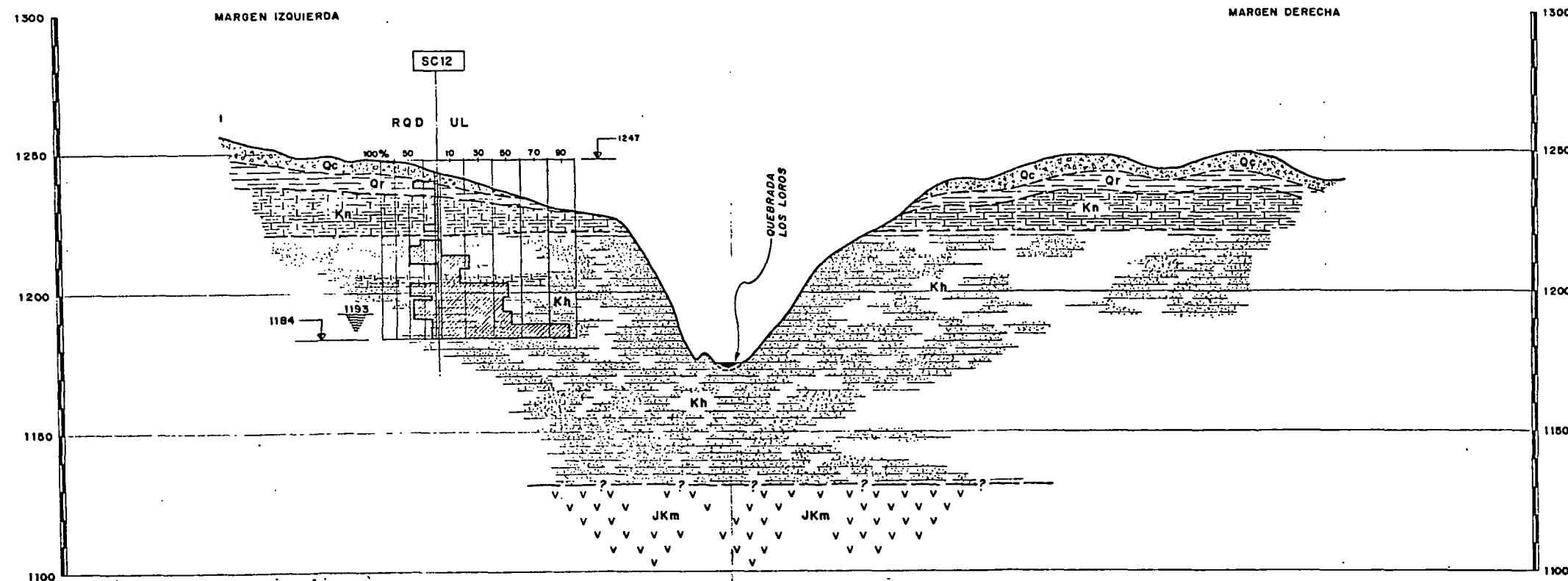
# EJE DE ALTERNATIVA DE CIERRE EN LA QDA. GRANADILLAS

## CORTE C-C



# EJE DE ALTERNATIVA DE CIERRE EN LA QDA. LOS LOROS

## CORTE D-D



## LEYENDA

- DEPOSITOS COLUVIALES
- SUELOS RESIDUALES
- FORMACION NAPO (Lutitas)
- FORMACION HOLLIN (Areniscas con intercalaciones de lutitas y asfalto)
- FORMACION MISAHUALLI (Rocas volcánicas)
- LUTITAS
- ASFALTO
- SONDEO ROTATIVO
- SONDEO ROTATIVO PROYECTADO

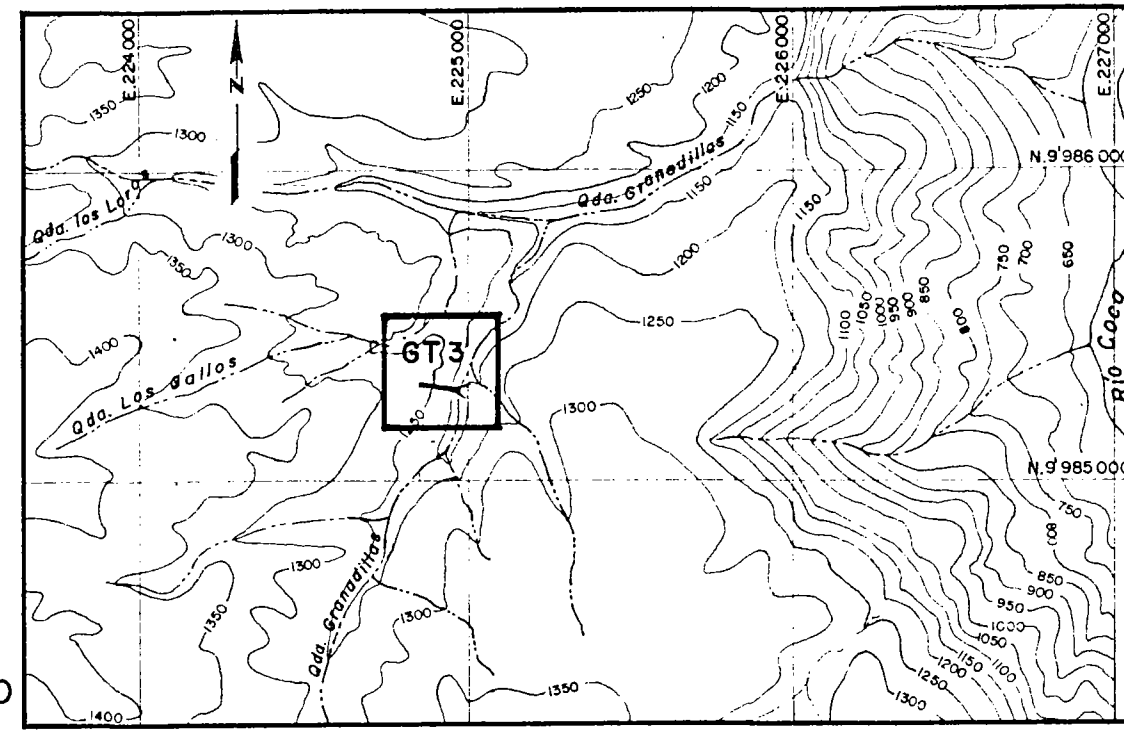
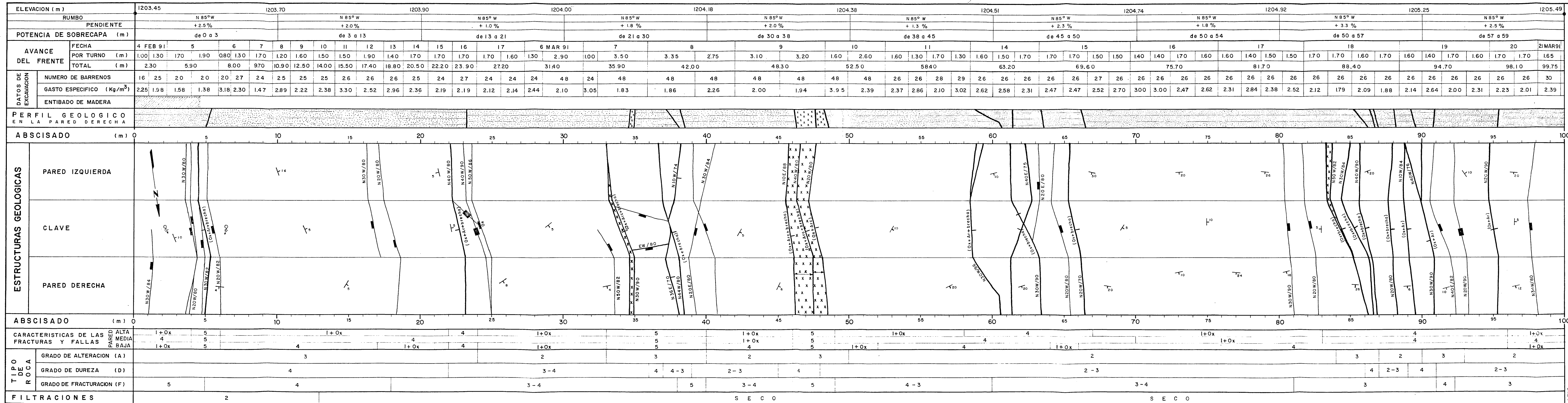
## NOTAS:

- LA UBICACION DE LOS CORTES SE PRESENTA EN EL PLANO 0209-G-2036
- LOS CORTES GEOLOGICOS DE LAS ALTERNATIVAS AGUAS ABAJO SE PRESENTA EN EL PLANO 0209-G-2037

ESC. 10 0 20 40 60 m

ELECTROCONSULT-TRACTIONEL-RODIO  
ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES  
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION  
QUITO - ECUADOR  
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR  
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"  
GEOLOGIA  
PRESA DEL EMBALSE COMPENSADOR  
ALTERNATIVAS AGUAS ARRIBA  
CORTES GEOLOGICOS

HOJA	DE	ESC
DESEÑADO	SA	RECOMENDADO
DIBUJADO	M.A.	APROBADO
REVISADO	SA	
FECHA	JUNIO - 1991	REF 0209-G-2038



**ZONA DEL EMBALSE COMPENSADOR**  
UBICACION SIN ESCALA

**LEYENDA**

- FORMACION HOLLIN (Arenisca con intercalaciones de lutitas y asfalta)
- CONTACTO OBSERVADO
- FALLA
- ZONA DE BRECHA
- ZONA DE ROCA MUY FRACTURADA
- ESTRATIFICACION INCLINADA, VERTICAL, HORIZONTAL
- FRACTURA INCLINADA, VERTICAL, HORIZONTAL

CLASE	SIMBOLO	FILTRACIONES	CAUDAL ESTIMADO
1	○	GOTEO AISLADO	—
2	○	GOTEO CONTINUO	—
3	○	CHORRO DEBIL	hasta 1 lit/min
4	○	CHORRO FUERTE	hasta 10 lit/min
5	●	FLUJO ABUNDANTE	> 10 lit/min

1.- PARA LA DESCRIPCION DE LOS PARAMETROS GEOMECANICOS, VER PLANO 0209-G-2900  
2.- LOS ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES DE LA GALERIA GT3 SE PRESENTAN EN EL PLANO 0209-G-2904  
3.- LOS VALORES DE ORIENTACION CORRESPONDEN A MEDICIONES PUNTALES, LAS MISMAS QUE, POR LAS ESCALAS UTILIZADAS, NO CONCUERDAN CON LAS TRAZAS DIBUJADAS EN EL REGISTRO

ELECTROCONSULT-TRACTINEL-RODIO  
ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES

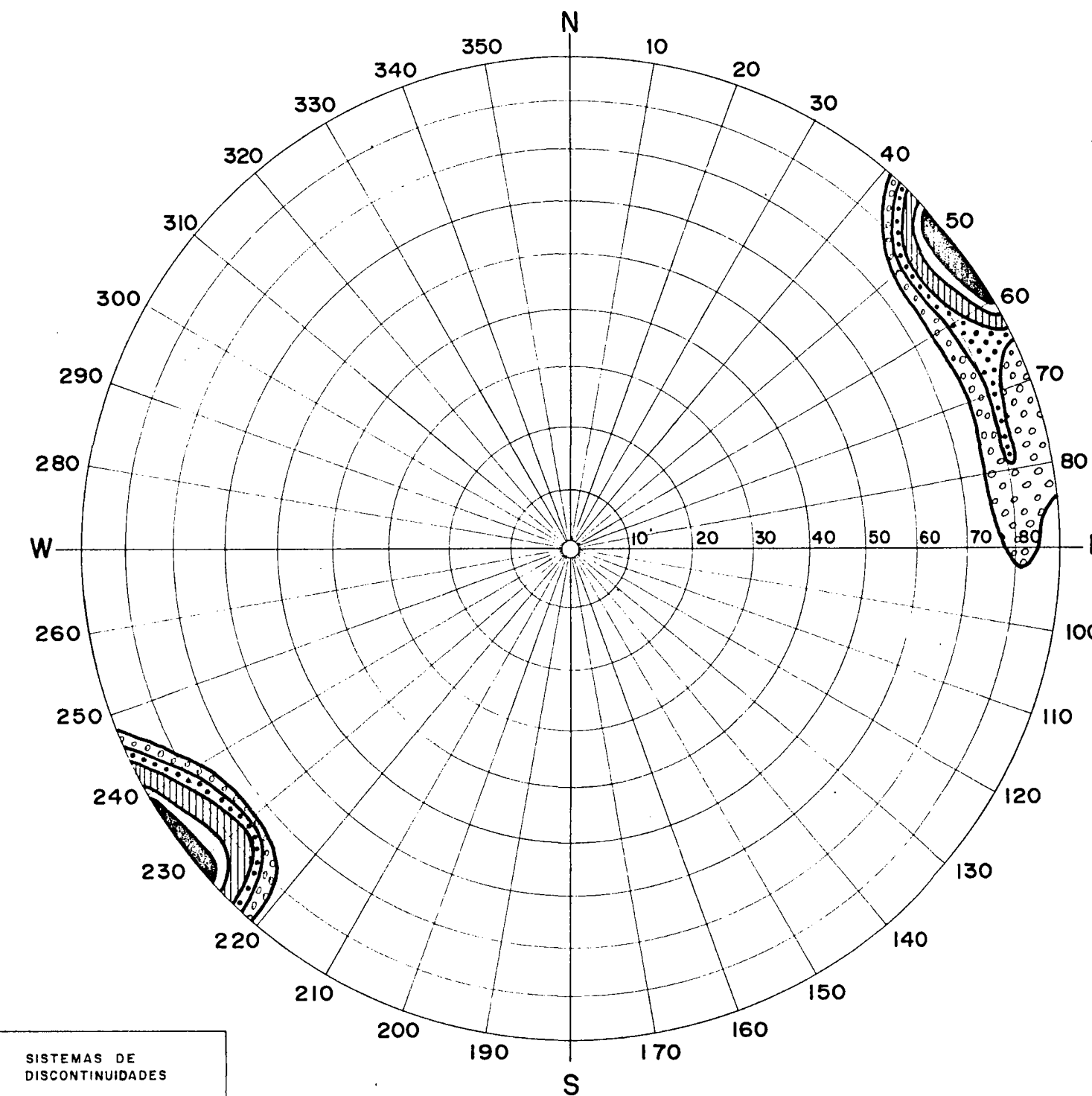
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION

PROYECTO HIDROELECTRICO COCA CODO SINGLAIR  
EST. 20 DE JULIO, 2004  
MECANICA DE ROCAS  
GALERIA EXPLORATORIA GT 3  
MAPEO GEOESTRUCTURAL

ENCARGADO: W.B.H.-H.S.2  
ELABORADO: L.B.H.  
REVISADO: S.H.  
FECHA: MARZO 1991  
ESC. 1:100  
PROYECTO: 0209-G-2903

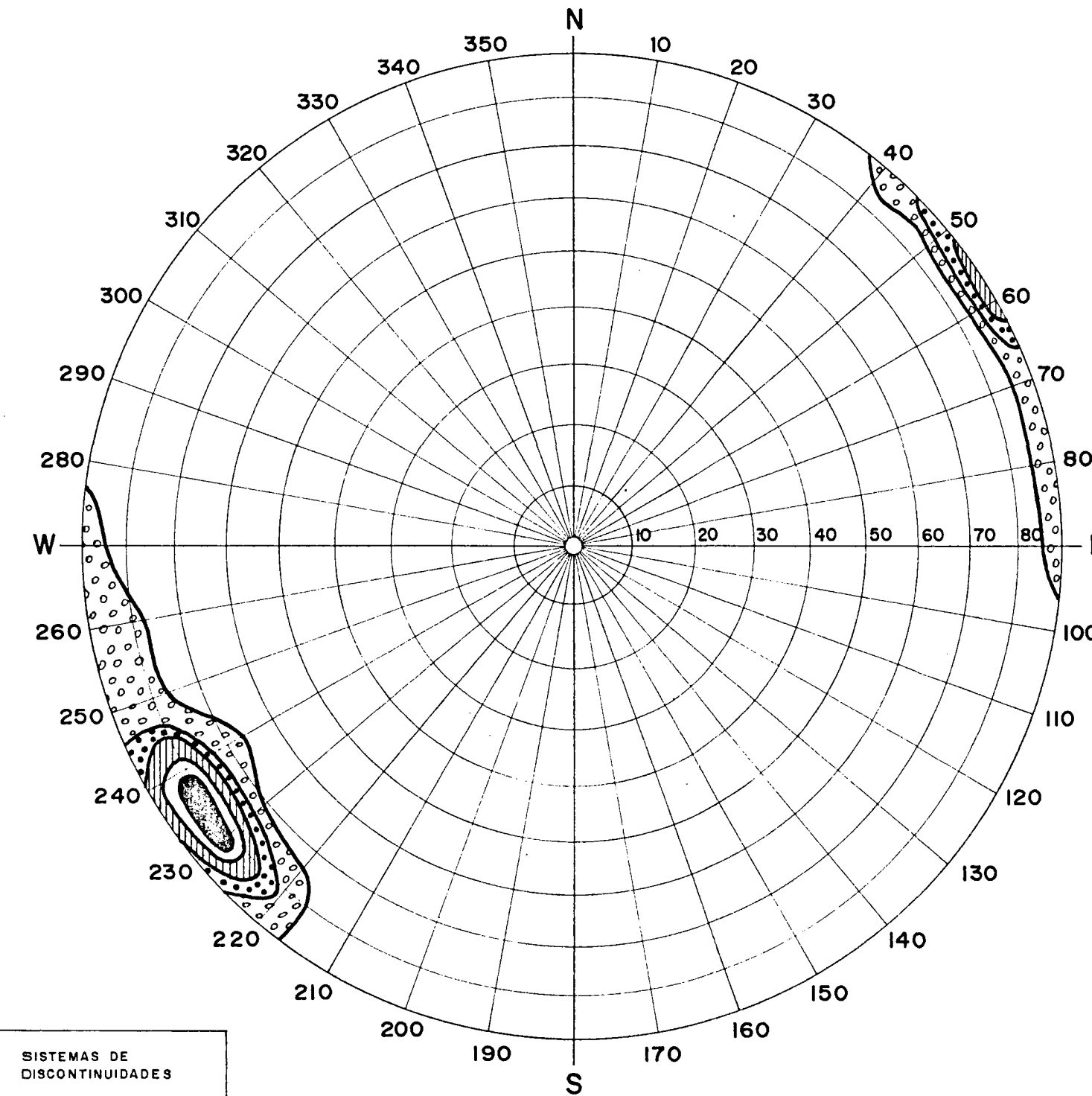
# FORMACION HOLLIN ZONA DEL EMBALSE COMPENSADOR GALERIA EXPLORATORIA GT 3

ABSCISA DE 0 + 000 A 0 + 030m



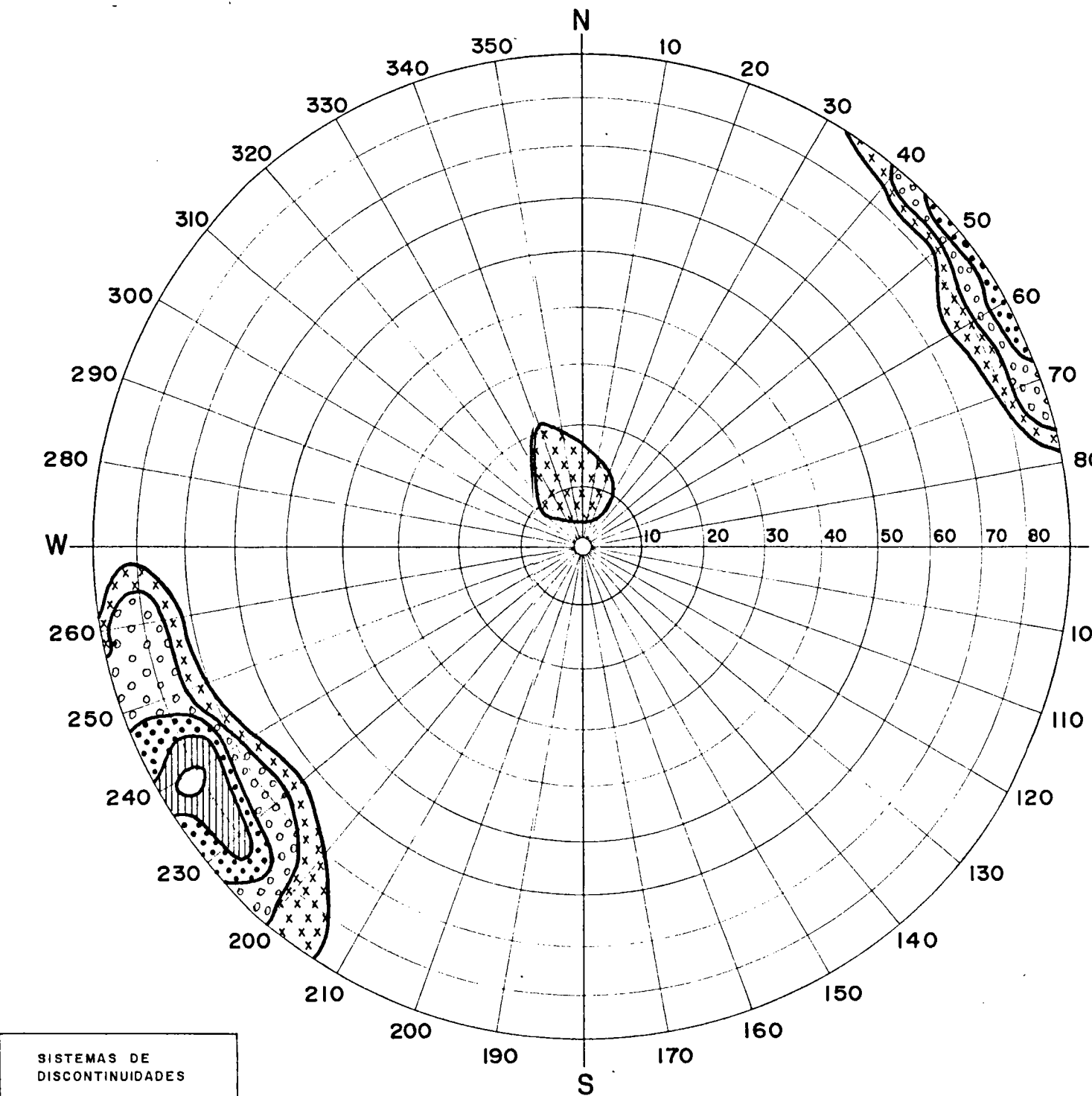
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 100  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

ABSCISA DE 0 + 030 A 0 + 060m

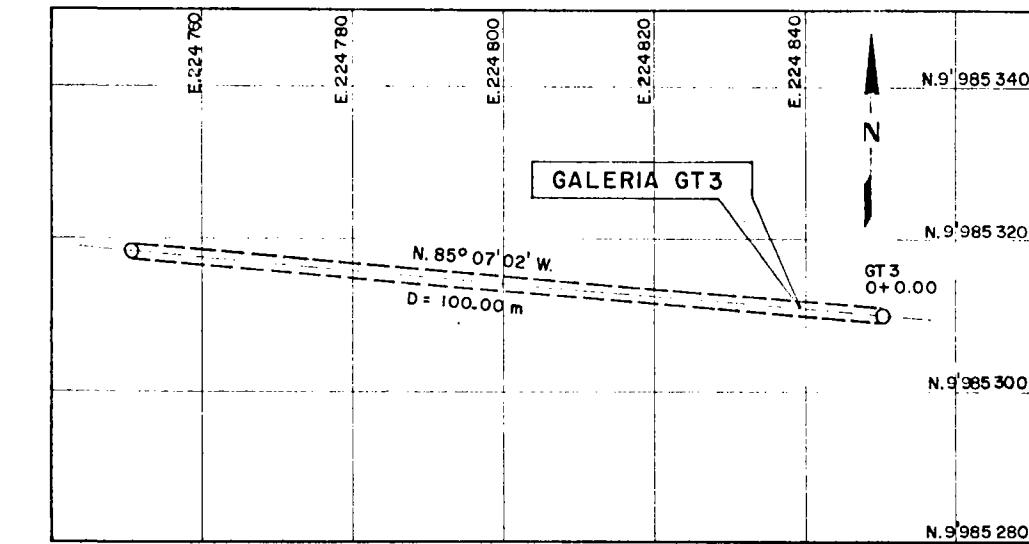


NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 100  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

ABSCISA DE 0 + 060 A 0 + 100m



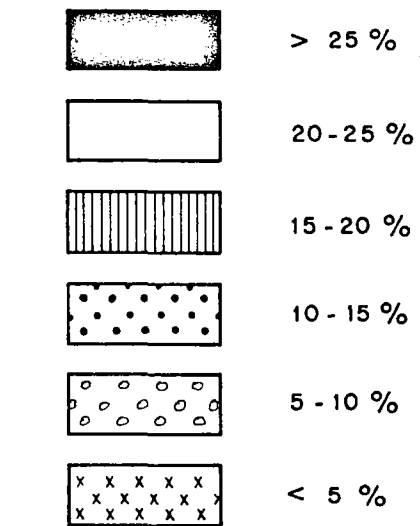
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 100  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR



UBICACION  
ESCALA: 1:1000

## LEYENDA

CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS



## NOTA:

- PARA EL MAPEO GEOESTRUCTURAL DE LA GALERIA GT3, VER PLANO 0209-G-2903
- PARA LA INVESTIGACION SISMICA DE LA GALERIA GT3, VER PLANO 0209-G-2234

ELECTROCONSULT-TRACTIONEL - RODIO	
ASTEC-INELIN - INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES	
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION	
QUITO - ECUADOR	
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA - CODO SINCLAIR	
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"	
MECANICA DE ROCAS	
GALERIA EXPLORATORIA GT 3	
ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES	
HOJA DE	ESC.
DISEÑADO H.S.G. / W.B.H.	RECOMENDADO
DEBUIADO V.H.A.	APROBADO
REVISADO S.H.	
REV. N°	FECHA
NATURALEZA DE LA REVISION	PCN
VERIF. APRORADO	FECHA
MARZO-1991	
REF 0209-G-2904	

PARTE C

FORMACION MISAHUALLI

## PARTE C

FORMACION MISAHUALLI

## INDICE

	Página
1. INVESTIGACIONES GEOTECNICAS	1
1.1 Perforaciones rotativas	1
1.2 Galería exploratoria GTP1	3
1.3 Galería exploratoria GCM1	4
2. INVESTIGACIONES GEOFISICAS	9
2.1 Prospección sísmica de refracción	9
2.2 Ensayos de taladro transversal	12
3. INVESTIGACIONES DE MECANICA DE ROCAS IN SITU	16
3.1 Ensayos de carga sobre placa	16
3.2 Comparación entre los parámetros estáticos y dinámicos	20
4. PERMEABILIDAD DEL MACIZO	22
4.1 Túnel de Aducción	22
4.2 Obras de generación	25
5. ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO	31
5.1 Interpretación de los resultados obtenidos	33
5.2 Orientación de los esfuerzos principales	34
5.3 Distribución de los esfuerzos principales en la Casa de Máquinas	37
6. ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO	39
6.1 Análisis petrográficos	39
6.2 Características físicas	44
6.3 Resistencia a la compresión	45
6.4 Deformabilidad	48
6.5 Resistencia al corte	49
7. CARACTERISTICAS MECANICAS DEL MACIZO	51
7.1 Túnel de Aducción	51
7.1.1 Resistencia monoaxial y sobrecarga	52

7.1.2	Clasificación del macizo	53
7.1.3	Parámetros de deformabilidad y resistencia	55
7.2	Tubería de baja presión y Chimenea de Equilibrio	56
7.3	Tubería inclinada de alta presión	58
7.3.1	Clasificación del macizo	58
7.3.2	Parámetros de deformabilidad y resistencia	61
7.4	Tubería de presión con pozo vertical	66
7.4.1	Clasificación del macizo	67
7.4.2	Parámetros de deformabilidad y resistencia	68
7.5	Casa de Máquinas	71
7.5.1	Clasificación del macizo	71
7.5.2	Parámetros de deformabilidad y resistencia	75
8.	RESUMEN DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS PARA DISEÑO	86
CUADROS		
Cuadro C/1	Galería exploratoria GTP1 Prospección sísmica de refracción Velocidad de las ondas y módulos dinámicos	10
Cuadro C/2	Galería exploratoria GCM1 Prospección sísmica de refracción Velocidad de las ondas y módulos dinámicos	11
Cuadro C/3	Galería exploratoria GTP1 Ensayos de taladro transversal Velocidad de las ondas y módulos dinámicos	12
Cuadro C/4	Galería exploratoria GCM1 Ensayos de taladro transversal Velocidad de las ondas y módulos dinámicos	14
Cuadro C/5	Formación Misahuallí Túnel de Aducción Ensayos de permeabilidad tipo Lugeon	22
Cuadro C/6	Formación Misahuallí Tubería de presión con pozo vertical Ensayos de permeabilidad tipo Lugeon	26

Cuadro C/7	Formación Misahuallí Chimenea de Equilibrio y Tubería de baja presión Ensayos de permeabilidad tipo Lugeon	27
Cuadro C/8	Formación Misahuallí Tubería inclinada de alta presión Ensayos de permeabilidad tipo Lugeon	28
Cuadro C/9	Formación Misahuallí Tubería de Presión y Casa de Máquinas Ensayos de hidrofracturamiento	32
Cuadro C/10	Formación Misahuallí Tubería de Presión y Casa de Máquinas Valores de $\sigma_1$ y $\sigma_3$ calculados con el método de Chowdury	36
Cuadro C/11	Formación Misahuallí Mecánica de rocas en laboratorio Resumen de los ensayos ejecutados	40
Cuadro C/12	Formación Misahuallí Resultados de los ensayos de laboratorio	41
Cuadro C/13	Formación Misahuallí Síntesis de los resultados de laboratorio por litotipo (Fase B)	42
Cuadro C/14	Formación Misahuallí Síntesis de los resultados de laboratorio por litotipo (Fase A y B)	43
Cuadro C/15	Formación Misahuallí Mecánica de rocas en laboratorio Ensayos de compresión triaxial	47
Cuadro C/16	Formación Misahuallí Ensayos de compresión monoaxial Módulos de deformación y coeficiente de Poisson	48
Cuadro C/17	Formación Misahuallí Ensayos de corte directo en laboratorio Angulo de fricción máximo y residual	50
Cuadro C/18	Formación Misahuallí Túnel de Aducción Resistencia a la compresión monoaxial	52



Cuadro C/19	Formación Misahuallí Túnel de Aducción Esfuerzo tangencial en secciones del túnel	53
Cuadro C/20	Formación Misahuallí Túnel de Aducción Clasificación geomecánica del macizo	54
Cuadro C/21	Formación Misahuallí Clasificación geomecánica según Bieniawski	72

## FIGURAS

Figura C/1	Formación Misahuallí Investigaciones geotécnicas Túnel de Aducción Ubicación de los sondeos	
Figura C/2	Formación Misahuallí Investigaciones geotécnicas Obras de generación Ubicación de los sondeos y galerías exploratorias	
Figura C/3	Formación Misahuallí Galería exploratoria GTP1 Investigación sísmica de refracción	
Figura C/4	Formación Misahuallí Galería exploratoria GCM1 Investigación sísmica de refracción	
Figura C/5	Formación Misahuallí Galería exploratoria GTP1 Ubicación de las perforaciones cortas y de los ensayos de Mecánica de Rocas	
Figura C/6	Formación Misahuallí Galería exploratoria GCM1 Ubicación de las perforaciones cortas y de los ensayos de Mecánica de Rocas	
Figura C/7	Formación Misahuallí Galería exploratoria GTP1 Parámetros dinámicos obtenidos con el método del taladro transversal	
Figura C/8	Formación Misahuallí Galería exploratoria GCM1 Parámetros dinámicos obtenidos con el método del taladro transversal	

---

Figura C/9	Formación Misahuallí Galería exploratoria GTP1 Ensayos de carga vertical sobre placa
Figura C/10	Formación Misahuallí Galería exploratoria GCM1 - Tramo recto Ensayos de carga vertical sobre placa
Figura C/11	Formación Misahuallí Galería exploratoria GCM1 - Crucero Ensayos de carga vertical sobre placa
Figura C/12	Formación Misahuallí Túnel de Aducción Correlación entre permeabilidad y tipos de roca
Figura C/13	Formación Misahuallí Tubería de presión con pozo vertical Correlación entre permeabilidad y tipos de roca
Figura C/14	Formación Misahuallí Tubería inclinada de alta presión Correlación entre permeabilidad y tipos de roca
Figura C/15	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Ubicación de los ensayos en los sondeos verticales
Figura C/16	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Ubicación de los ensayos en el sondeo horizontal SCM7
Figura C/17	Formación Misahuallí Resultados de los ensayos de hidrofracturamiento
Figura C/18	Formación Misahuallí Esquema tectónico en el sector Codo Sinclair
Figura C/19	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Equilibrio de un elemento unitario de roca en proximidad de un plano inclinado infinito
Figura C/20	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Distribución de los esfuerzos en proximidad de una ladera

---

Figura C/21	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Diagramas circulares de Mohr relativos a los esfuerzos $\sigma_x$ - $\sigma_z$ - $\tau_{xz}$
Figura C/22	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Orientación de los esfuerzos principales $\sigma_1$ - $\sigma_3$ cerca de la ladera
Figura C/23	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Orientación de las componentes principales de tensión
Figura C/24	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Casa de Máquinas Esquema del estado tensional y sistema de coordenadas utilizadas para la rotación de $\sigma_1$ - $\sigma_3$
Figura C/25	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Casa de Máquinas Esquema de los esfuerzos horizontal y vertical actuantes en el plano transversal de Casa de Máquinas
Figura C/26	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Casa de Máquinas Gráficos de transformación de $\sigma_1$ - $\sigma_m$ en $\sigma'_1$ $\sigma'_3$ en la sección transversal
Figura C/27	Formación Misahuallí Ensayos de hidrofracturamiento Casa de Máquinas Distribución de los esfuerzos principales $\sigma'_1$ - $\sigma'_3$ en la sección transversal
Figura C/28	Formación Misahuallí Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Correlación entre porosidad y peso específico seco
Figura C/29	Formación Misahuallí Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Correlación entre velocidad sónica y peso de volumen
Figura C/30	Formación Misahuallí Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Correlación entre módulo de deformación y velocidad sónica $V_p^2$

Figura C/31	Formación Misahualf Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Compresión puntual Relación entre el índice $I_{s(50)}$ y la resistencia última a la compresión monoaxial $\sigma_c$
Figura C/32	Formación Misahualf Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Prueba con martillo Schmidt Relación entre resistencia Schmidt y resistencia última a la compresión monoaxial $\sigma_c$
Figura C/33	Formación Misahualf Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Compresión triaxial Tobas de los sondeos ST6-SCE2-SCM8 Semicírculos de Mohr determinantes de la envolvente de ruptura en el plano $\tau$ - $\sigma$
Figura C/34	Formación Misahualf Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Compresión triaxial Brecha del sondeo SCE1 Semicírculos de Mohr determinantes de la envolvente de ruptura en el plano $\tau$ - $\sigma$
Figura C/35	Formación Misahualf Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Compresión triaxial Brechas del sondeo SCE2 Semicírculos de Mohr determinantes de la envolvente de ruptura en el plano $\tau$ - $\sigma$
Figura C/36	Formación Misahualf Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Compresión triaxial Andesita y riolita de los sondeos SCM4 y SCM7 Semicírculos de Mohr determinantes de la envolvente de ruptura en el plano $\tau$ - $\sigma$
Figura C/37	Formación Misahualf Ensayos de Mecánica de Rocas en laboratorio Compresión triaxial Envoltentes de ruptura
Figura C/38	Formación Misahualf Histogramas de módulos de deformación

---

Figura C/39	Formación Misahuallí Túnel de Aducción Corte geomecánico esquemático
Figura C/40	Formación Misahuallí Túnel de Aducción Corte litológico esquemático
Figura C/41	Formación Misahuallí Túnel de Aducción Clasificación geomecánica del macizo
Figura C/42	Formación Misahuallí Túnel de Aducción Envolventes de ruptura en el plano $\tau$ - $\sigma$
Figura C/43	Formación Misahuallí Obras de generación Envolventes de ruptura en el plano $\tau$ - $\sigma$
Figura C/44	Formación Misahuallí Tubería inclinada de alta presión Clasificación geomecánica del macizo
Figura C/45	Formación Misahuallí Tubería inclinada de alta presión Galería exploratoria GTP1 Envolventes de ruptura del macizo en el plano $\tau$ - $\sigma$
Figura C/46	Formación Misahuallí Tubería inclinada de alta presión Sondeos rotativos Envolventes de ruptura del macizo en el plano $\tau$ - $\sigma$
Figura C/47	Formación Misahuallí Tubería inclinada de alta presión Galería exploratoria GTP1 Envolventes de ruptura de las discontinuidades en el plano $\tau$ - $\sigma$
Figura C/48	Formación Misahuallí Tubería de presión con pozo vertical Clasificación geomecánica del macizo
Figura C/49	Formación Misahuallí Tubería de presión con pozo vertical Sondeo SCE2 Curvas $\sigma_1$ - $\sigma_3$ obtenidas de los ensayos de laboratorio sobre roca intacta

---

- Figura C/50      Formación Misahuallí  
Tubería de presión con pozo vertical  
Tramo superior  
Envolventes de ruptura del macizo en el plano  $\tau$ - $\sigma$
- Figura C/51      Formación Misahuallí  
Tubería de presión con pozo vertical  
Tramo inferior  
Envolventes de ruptura del macizo en el plano  $\tau$ - $\sigma$
- Figura C/52      Formación Misahuallí  
Casa de Máquinas  
Clasificación geomecánica del macizo
- Figura C/53      Formación Misahuallí  
Casa de Máquinas  
Curvas  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  obtenidas de los ensayos de laboratorio sobre roca intacta
- Figura C/54      Formación Misahuallí  
Casa de Máquinas  
Envolventes de ruptura del macizo en el plano  $\sigma_1$ - $\sigma_3$
- Figura C/55      Formación Misahuallí  
Casa de Máquinas  
Envolventes de ruptura del macizo en el plano  $\tau$ - $\sigma$
- Figura C/56      Formación Misahuallí  
Casa de Máquinas  
Envolventes de ruptura de las discontinuidades en el plano  $\tau$ - $\sigma$

## PLANOS

- 0209-G-2040      Geología  
Zona de caída  
Mapa geológico
- 0209-G-2042      Geología  
Casa de Máquinas  
Mapa geológico
- 0209-G-2043      Geología  
Casa de Máquinas  
Cortes geológicos
- 0209-G-2044      Geología  
Obras de generación  
Corte geológico típico

---

0209-G-2905	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GTP1 Maapeo geoestructural (hoja 1 de 2)
0209-G-2906	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GTP1 Maapeo geoestructural (hoja 2 de 2)
0209-G-2907	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GTP1 Estereogramas de discontinuidades
0209-G-2908	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GCM1 Maapeo geoestructural (hoja 1 de 5)
0209-G-2909	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GCM1 Maapeo geoestructural (hoja 2 de 5)
0209-G-2910	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GCM1 Maapeo geoestructural (hoja 3 de 5)
0209-G-2911	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GCM1 Maapeo geoestructural (hoja 4 de 5)
0209-G-2912	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GCM1 Maapeo geoestructural (hoja 5 de 5)
0209-G-2913	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GCM1 Estereograma de discontinuidades (hoja 1 de 5)
0209-G-2914	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GCM1 Estereograma de discontinuidades (hoja 2 de 5)
0209-G-2915	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GCM1 Estereograma de discontinuidades (hoja 3 de 5)
0209-G-2916	Mecánica de Rocas Galería exploratoria GCM1 Estereograma de discontinuidades (hoja 4 de 5)

---

0209-G-2917      Mecánica de Rocas  
                         Galería exploratoria GCM1  
                         Estereogramã de discontinuidades (hoja 5 de 5)

0209-G-2918      Mecánica de Rocas  
                         Galería exploratoria GCM1  
                         Estereogramas generales



## 1. INVESTIGACIONES GEOTECNICAS

La formación Misahuallí ha sido investigada mediante perforaciones profundas a lo largo del Túnel de Aducción y en el sector Codo Sinclair donde estará afectada por la Tubería de baja y alta presión, por las obras de generación y restitución y, eventualmente, por la Chimenea de Equilibrio (Plano 0209-G-2023-1 y Figuras C/1 y C/2).

En todos estos sondeos, los tramos relacionados con las obras subterráneas, han sido ensayados con pruebas de absorción de agua, y, a veces, como en la zona de la Tubería de Presión y de Casa de Máquinas, con pruebas de hidrofracturamiento.

Estas investigaciones han sido complementadas con la excavación de dos galerías exploratorias, denominadas GTP1 y GCM1, de 147 y 481 m de longitud, ubicadas a media ladera en la margen derecha del río Coca, en el sector Codo Sinclair, y en la parte inferior de la misma ladera, respectivamente. En estas galerías fueron llevados a cabo mapeos geoestructurales detallados, sondeos profundos y perforaciones cortas para ensayos de mecánica de rocas.

A continuación se resumen las determinaciones de campo relativas a los sondeos rotativos y se presentan los aspectos geoestructurales obtenidos de las observaciones en las galerías.

### 1.1 Perforaciones rotativas

En el sector Túnel de Aducción durante la Fase A de los estudios, fueron ejecutados cuatro sondeos ubicados en el tramo entre la Ventana de Acceso y el Embalse Compensador. En la Fase B se completó la investigación del trazado del túnel con dos sondeos ubicados en el tramo entre la Ventana de Acceso y la Presa Derivadora Salado.

En la zona de caída, en el sector Codo Sinclair, durante la Fase A se ejecutó un solo sondeo que alcanzó, aproximadamente, el sitio de Casa de Máquinas. La investigación de esta zona fue concluida en la Fase B mediante la perforación de seis sondeos profundos de los cuales dos horizontales, a partir de la galería exploratoria GCM1.

Para cada uno de estos sondeos se resumen los principales parámetros definidos en base a los criterios presentados en el Plano 0209-G-2900.

Sector Túnel de Aducción

Sondeo		ST6	ST7	ST1
Profundidad	(m)	485,0	390,0	217,3
Cota inicial		1.725,5	1.624,3	1.462,1
Inclinación		vertical	vertical	vertical
Cota final		1.240,5	1.234,0	1.244,8
Cota del nivel de agua		1.641,0*	1.536,0*	1.396,0*
Recuperación	(%)	95-100	70-100	100
RQD	(%)	50-100	0-40; 60-100	25-60
Alteración	(A)	1	4-5; 1-2	3-2
Fracturación	(F)	2	4-5; 3-1	4-5; 3-2
Permeabilidad	(UL)	4-5	8-12	1-39
Sondeo		ST2	ST3	ST4
Profundidad	(m)	230,0	345,2	218,0
Cota inicial		1.455,8	1.567,6	1.434,3
Inclinación		vertical	vertical	vertical
Cota final		1.225,8	1.222,4	1.216,3
Cota del nivel de agua		1.400,8*	1.449,8 o	1.399,9-1.290,0 o
Recuperación	(%)	100	100	100
RQD	(%)	0-50	30-75	75-100
Alteración	(A)	3-2	2	2
Fracturación	(F)	4-3	3-2	2-1
Permeabilidad	(UL)	7-34	9-12	19-33

\*: Medido al finalizar la perforación  
o: Lectura piezométrica

Sector Codo Sinclair

Sondeo		SCE2	SCE1	SCM2
Profundidad	(m)	420,3	300,0	200,0
Cota inicial		1.238,5	1.284,1	861,7
Inclinación		vertical	vertical	vertical
Cota final		818,2	948,1	661,7
Cota del nivel de agua		1.185,2*	1.136,4*	775,6*
Recuperación	(%)	90-100	100	100
RQD	(%)	25-100	100	0-50
Alteración	(A)	3-1	1	4-2
Fracturación	(F)	3-1	1	5-3
Permeabilidad	(UL)	0-4	10-20	13-56

Sondeo		SCM9	SCM8	SCM7	SCM4
Profundidad	(m)	150,0	220,0	100,0	80,0
Cota inicial		831,9	874,6	639,3	639,9
Inclinación		vertical	vertical	vertical	vertical
Cota final		681,9	654,6	639,3	639,9
Cota del nivel de agua		830,0*	791,0*	-	-
Recuperación	(%)	90-100	80-100	95-100	90-100
RQD	(%)	50-60	40-90	50-60	50-60
Alteración	(A)	2-1	2-1	1	1
Fracturación	(F)	3-2	3-2	3-2	3-2
Permeabilidad	(UL)	5-22	0-4	-	-

\* Medido al finalizar la perforación

## 1.2 Galería exploratoria GTP1

La galería de exploración GTP1 se encuentra ubicada a media ladera en la margen derecha del río Coca, hallándose el portal de entrada en la cota 830 m. La galería se desarrolló con dirección N 69°W y con una longitud de 146,8 m en un macizo de rocas volcánicas jurásicas de la formación Misahuallí, siendo principalmente tobas de grano fino de coloración verdosa a rojo pardo y marrón.

El mapeo geoestructural realizado (Planos 0209-G-2905 y 0209-G-2906) muestra, en lo referente a la alteración, que de la abscisa 0+000 a 0+095 m la roca está de medianamente alterada a muy alterada, predominando la primera, mientras que en los sitios de falla, la alteración varía de muy alterada a totalmente alterada. De la

abscisa 0+095 m hasta el fondo de la galería, la roca varía de poco alterada a medianamente alterada.

En lo referente al grado de fracturamiento, a todo lo largo de la galería, la roca varía de muy fracturada, característica ésta que se puede considerar predominante, a extremadamente fracturada y fragmentada, en los tramos comprendidos entre las fallas y fracturas abiertas.

En general, casi todas las fracturas tienen inclinación en el sentido del talud; las fracturas abiertas contienen vestigios de arcilla y óxidos. Las fallas en las abscisas 0+058 y 0+064 m, con inclinaciones opuestas entre sí, presentan espesores decimétricos con relleno de arcilla, brecha y óxidos. La falla más importante, con potencia de dos metros e inclinación hacia el interior del macizo, se halla entre las abscisas 0+091-0+093 m. Después de esta falla, y hasta el final de la galería, solo existen fracturas en su gran mayoría abiertas hasta 10 cm.

Las filtraciones en el tramo de 0+000 a 0+060 m son goteos aislados; a partir de la abscisa 0+060 m hasta 0+130 m son goteos continuos y chorros débiles en los sitios de fracturas abiertas; en el último tramo de la galería se registran abundantes chorros débiles y fuertes localizados en las fracturas abiertas y goteos débiles y continuos en los tramos intermedios.

El caudal total de las filtraciones, medido en la embocadura de la galería, varía de 130 a 150 l/min.

En base al análisis de laboratorio el agua se clasifica como bicarbonática cálcica.

Las discontinuidades mapeadas fueron analizadas en estereogramas, por tramos de 50 m de longitud y se presentan en el Plano 0209-G-2907, con excepción de los primeros 50 m donde las fuertes presiones obligaron a colocar un entibado de madera continuo, lo cual impidió realizar mediciones estructurales en este tramo.

El mapeo estructural evidencia los siguientes sistemas:

Abscisa (m)	Sistemas de discontinuidades	
	Principal	Secundario
0+000 a 0+050	-	-
0+050 a 0+100	N 40°W/80°SW	N 60°E/80°NW
0+100 a 0+147	N 50°E/70°NW	N 30°W/85°SW

Además, para evidenciar la preminencia de los sistemas en la galería en su totalidad, también se realizó un análisis de todas las discontinuidades medidas desde la abscisa 0+050 hasta 0+147 m, obteniéndose lo siguiente (Plano 0209-G-2907):

Abscisa (m)	Sistemas de discontinuidades
-------------	------------------------------

	Principal	Secundario
0+050 a 0+147	N 50°E/80°NW	N 40°W/80°SW

### 1.3 Galería exploratoria GCM1

Esta galería, cuyo portal de entrada está en la cota 636 m, tiene una longitud total de 481 m, de los cuales 420,4 m corresponden a un tramo recto con dirección general E-W y 60,6 m corresponden a un crucero con dirección N 9°W. El tramo recto en sus primeros 110 m tiene dirección S 42°W y luego hasta los 420,4 m tiene dirección S 89°W. El crucero se inicia en la abscisa 0+380 m, después del tramo fallado más importante encontrado a lo largo de la galería.

La galería se desarrolla en un macizo de rocas tobáceas correspondientes a la formación Misahuallí. El mapeo geoestructural (Planos 0209-G-2908 a 0209-G-2912) evidencia, hasta la abscisa 0+100 m, rocas sanas a poco alteradas, siendo muy alteradas en todos los sitios de fallas. Entre las abscisas 0+100 y 0+200 m las rocas son, en general, poco alteradas a medianamente alteradas, manteniéndose muy alteradas en los tramos fallados los cuales, por otro lado, disminuyen notablemente a partir de la abscisa 0+160 m. Entre las abscisas 0+200 y 0+300 m la roca se muestra, en general, sana a poco alterada, siendo muy alterada a totalmente alterada en el segmento correspondiente a la falla entre las abscisas 0+285 y 0+300 m. En el tramo de 0+300 a 0+420,4 m la roca es sana, con sectores limitados de roca poco alterada y con excepción del tramo entre las abscisas 0+350 y 0+385 m, donde, por la presencia de una falla, la roca está de muy alterada a totalmente alterada y con desprendimientos de fragmentos desde el techo y las paredes.

En lo referente al crucero, desde su inicio hasta la abscisa 0+045 m, la roca se encuentra sana a poco alterada y de 0+045 a 0+053 m, correspondiente a la presencia de un "nudo" de fallas, la roca se presenta de medianamente alterada a muy alterada. Luego en el tramo de 0+053 a 0+059 m la roca se encuentra ligeramente alterada, terminando en la frente en roca muy alterada y tectonizada.

El fracturamiento de la galería en sus primeros 200 m es constante, variando de muy fracturada a fracturada, llegando a extremadamente fracturada en los sitios de fallas menores. La abertura de las fracturas es milimétrica en el tramo de galería hasta la abscisa 0+160 m y centimétrica en el tramo hasta la abscisa 0+200 m.

Entre las abscisas 0+200 a 0+300 m la roca continúa de fracturada a muy fracturada hasta la abscisa 0+283 m, después hasta 0+300 m, se muestra muy fracturada con un corto tramo fragmentado de 0+286 a 0+288 m.

Todo el conjunto de fallas entre 0+283 y 0+300 m presenta aberturas centimétricas a decimétricas con relleno de arcilla y brecha, a más de estar acompañadas de un fracturamiento con aberturas hasta algunos centímetros.

Entre las abscisas 0+300 y 0+420,4 m el macizo rocoso se mantiene de muy fracturado a fracturado; en los sectores comprendidos entre las abscisas 0+300 a

0+354 m y 0+374 a 0+420,4 m, la roca se presenta fragmentada a extremadamente fracturada predominando la primera.

Las fallas en el tramo comprendido entre las abscisas 0+317 y 0+327 m son centimétricas, oxidadas, con arcilla y relleno de cuarzo; entre 0+350 y 0+375 m se presenta la falla más importante encontrada a lo largo de toda la galería, tanto por su potencia, más de 4 m, como por la presencia de arcilla (espesor 30-40 cm) acompañada de brecha, por las filtraciones y por el microfracturamiento en los costados de la falla. Después de la falla principal, en las abscisas 0+396, 0+407 y 0+420 m, se presentan otras fallas menores con arcilla y óxidos, siendo la primera de 10 cm de espesor y las subsiguientes centimétricas.

En el crucero norte la roca varía de fracturada a muy fracturada, predominando esta última, con excepción del tramo fallado entre las abscisas 0+045 y 0+060 m donde la roca es extremadamente fracturada. En los últimos metros del crucero las fallas presentan varias direcciones, cortándose entre ellas y formando, de 0+049 a 0+052 m, prácticamente un "nudo" de fallas; el espesor de ellas es de algunos decímetros con relleno de arcilla, óxidos y brecha.

Las filtraciones de agua en la galería están directamente relacionadas con las fracturas abiertas y con los sectores tectonizados. Desde el inicio hasta 0+160 m existe solamente goteo aislado con tramos secos de 5 a 15 m y presencia de chorros débiles en sitios puntuales correspondientes a fracturas abiertas; desde 0+160 m los chorros de agua aumentan presentándose débiles hasta la abscisa 0+173 m y luego fuertes con caudales no menores a 3 l/min, especialmente en el tramo de 0+185 a 0+210 m relacionados a la presencia de fracturas abiertas. Hasta la abscisa 0+283 m, nuevamente el goteo se presenta de débil a continuo, excluyendo el tramo de 0+262 a 0+275 m que es seco. En la zona fallada, entre las abscisas 0+283 y 0+292 m, se presentan chorros débiles a fuertes y posteriormente, hasta el fin de la galería, se registra solamente goteo débil con excepción de dos tramos de 0+314 a 0+317 m y de 0+369 a 0+372 m, donde existen chorros débiles a fuertes, respectivamente.

El caudal total de las filtraciones, medido en la embocadura de la galería, varía de 500 a 600 l/min.

Los análisis de laboratorio realizados han permitido clasificar el agua, tomada en varios puntos en el tramo recto de la galería y en el crucero, como bicarbonática cálcica.

Las discontinuidades mapeadas y analizadas estadísticamente a través de estereogramas y por tramos de galería de 50 m de longitud, evidencian la existencia de los siguientes sistemas (Planos 0209-G-2913 a 2916):

Abscisa (m)	Sistemas de discontinuidades	
	Principal	Secundario
0+000 a 0+050	N 60°E/85°SE	N 20°E/85°SE
0+050 a 0+100	N-S/85°E	N 70°E/80°SE
0+100 a 0+150	N 60°E/80°SE	N 50°W/70°SW
0+150 a 0+200	N 50°E/90°	N 20°W/90°
0+200 a 0+250	N 80°E/80°SSE	N 5°E/85°ESE
0+250 a 0+300	N 50°E/80°SE	
0+300 a 0+350	N 50°E/80°SE	N 80°E/50°NNW
0+350 a 0+420,40	E-W/90°	N 70°E/70°NNW

En el crucero los sistemas de discontinuidades, por tramos de 30 m, son los siguientes (Plano 0209-G-2917):

Abscisa (m)	Sistemas de discontinuidades	
	Principal	Secundario
0+000 a 0+030	N 20°W/80°WSW	N 50°E/90°
0+030 a 0+060,60	N 30°W/70°SW	N 60°E/80°SE

Con la finalidad de esclarecer la presencia de los sistemas de discontinuidades en el macizo rocoso en su totalidad, se realizó un análisis estadístico de todas las fracturas y fallas mapeadas a lo largo del tramo recto de la galería y otro análisis para las fracturas y fallas registradas en el crucero norte, obteniéndose lo siguiente (Plano 0209-G-2918):

Abscisa (m)	Sistemas de discontinuidades	
	Principal	Secundario
Tramo recto	0+000 a 0+420	N 60°E/85°SE
Crucero	0+000 a 0+060,60	N 30°W/70°SW
		N 50°E/80°SE

Adicionalmente, en el mismo plano, se elaboró también un estereograma de intersección de estos sistemas de discontinuidades en relación con el eje de Casa de Máquinas, evidenciando los planos de las fallas más importantes.

Los planos de fallas presentados corresponden a los siguientes alineamientos principales:

---

	Abscisa (m)	Fallas
Tramo recto	0+365 a 0+375	N 80°E/70°NNW
Crucero	0+045	N 20°W/55°ENE
	0+050	N 40°E/55°SE
	0+060	N 50°E/65°SE



## 2. INVESTIGACIONES GEOFISICAS

En las galerías exploratorias del sector Codo Sinclair, después de concluidos los estudios geoestructurales, fueron programadas campañas de investigaciones geofísicas mediante prospecciones sísmica de refracción y ensayos con el método del taladro transversal, en perforaciones rotativas, para la medición de la velocidad de las ondas de corte.

### 2.1 Prospección sísmica de refracción

A lo largo de ambas galerías fueron efectuadas investigaciones sísmicas instalando en el piso geófonos cada metro y aplicando una fuente de energía (golpes de martillo) cada 4 m. Con este método, que determina la velocidad de propagación de las ondas longitudinales ( $V_p$ ) y transversales ( $V_s$ ), se evalúan solamente las características geomecánicas del nivel más superficial de la roca en la sección de la galería. Aunque los valores medidos sean los de la roca descomprimida y disturbada por el proceso de excavación, se considera útil su conocimiento para fines comparativos con los otros parámetros del macizo.

La velocidad de propagación de las ondas medida en la galería GTP1 y los módulos de corte dinámico ( $G_{DIN}$ ) y de elasticidad ( $E_{DIN}$ ) calculados, además del coeficiente de Poisson ( $\nu_{DIN}$ ), se presentan en el Cuadro C/1.

## Cuadro C/1

Galería exploratoria GTP1

Prospección sísmica de refracción

## VELOCIDAD DE LAS ONDAS Y MODULOS DINAMICOS

Abscisa (m)	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$G_{DIN}$ (MPa)	$E_{DIN}$ (MPa)	$\nu_{DIN}$
0+000	1.900	1.050	2.646	6.775	0,28
0+000 - 0+005	1.360	670	1.077	2.887	0,34
0+005 - 0,015	2.556	1.127	3.048	8.409	0,38
0+015 - 0+025	1.815	812	1.582	4.351	0,37
0+025 - 0+040	2.503	1.185	3.370	9.137	0,36
0+040 - 0+060	3.092	1.812	7.880	19.518	0,24
0+060 - 0+075	3.804	1.573	5.938	16.590	0,40
0+075 - 0+090	2.250	1.194	3.422	8.923	0,30
0+090 - 0+100	1.910	1.023	2.826	7.340	0,30
0+100 - 0+120	3.050	1.590	6.826	17.930	0,31
0+120 - 0+130	3.211	1.796	8.709	22.162	0,27
0+130 - 0+145	4.770	2.700	19.683	49.796	0,26
0+145 - 0+150	4.580	2.363	15.076	39.760	0,32

En la Figura C/3 se evidencia la variación de la velocidad  $V_p$ , entre 1.360 y 4.770 m/s y de la velocidad  $V_s$ , entre 670 y 2.700 m/s, correspondiendo los valores mínimos al tramo inicial de la galería y los más elevados al tramo final.

Los módulos calculados varían como sigue:

$G_{DIN}$  de 1.080 a 19.680 MPa  
 $G_{DIN}$  de 2.890 a 49.980 MPa

Estos valores, que corresponden a una roca de pobres características geomecánicas, van mejorando hacia el fondo de la galería donde corresponden a una roca de regular a buena.

En el Cuadro C/2 están resumidos los valores de velocidad de las ondas medidas a lo largo de la galería GCM1 y los módulos dinámicos calculados.

## Cuadro C/2

Galería exploratoria GCM1

Prospección sísmica de refracción

## VELOCIDAD DE LAS ONDAS Y MODULOS DINAMICOS

Abscisa (m)	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$G_{DIN}$ (MPa)	$E_{DIN}$ (MPa)	$\nu_{DIN}$
<u>Tramo recto</u>					
0+000	2.750	300	4.563	12.376	0,36
0+000 - 0+010	3.615	1.850	9.241	24.443	0,32
0+010 - 0+030	3.875	2.090	11.794	30.543	0,29
0+030 - 0+050	4.110	2.295	14.221	36.220	0,27
0+050 - 0+100	3.900	2.370	15.166	37.293	0,23
0+100 - 0+130	4.400	2.415	15.747	40.452	0,28
0+130 - 0+160	3.600	2.050	11.347	28.595	0,26
0+160 - 0+200	4.700	2.670	19.248	48.572	0,26
0+200 - 0+260	4.825	2.825	21.548	53.404	0,24
0+260 - 0+300	3.415	1.800	8.748	22.879	0,31
0+300 - 0+320	3.850	2.030	11.126	29.095	0,31
0+320 - 0+340	4.665	2.690	19.537	48.880	0,25
0+340 - 0+360	3.700	1.900	9.747	25.750	0,32
0+360 - 0+420	5.000	2.890	22.551	56.339	0,25
<u>Crucero</u>					
0+000	4.400	2.540	17.419	43.552	0,25
0+000 - 0+030	4.575	2.650	18.961	47.309	0,25
0+030 - 0+050	4.290	2.500	16.875	41.947	0,24
0+050 - 0+060	4.600	2.660	19.104	47.715	0,25

Estos valores representados gráficamente en la Figura C/4 evidencian que a velocidad  $V_p$  varía entre 2.750 y 50.000 m/s y la velocidad  $V_s$  entre 300 y 2.890 m/s.

Los valores más bajos corresponden al portal de la galería; en los tramos fallados y muy fracturados  $V_p$  varía de 3.400 a 3.800 m/s y  $V_s$  de 1.800 a 2.000 m/s; en roca regular a buena  $V_p$  varía de 4.000 a 5.000 m/s y  $V_s$  de 2.000 a 3.000 m/s.

El módulo de corte dinámico varía de 4.560 a 21.550 MPa y el módulo de elasticidad de 12.380 a 56.340 MPa.

Los valores más bajos corresponden al tramo inicial de la galería; en los tramos fallados y muy fracturados  $G_{DIN}$  varía de 8.000 a 11.000 MPa y  $E_{DIN}$  de 22.000 a 28.000 MPa; en roca regular a buena  $G_{DIN}$  varía de 14.000 a 22.000 MPa y  $E_{DIN}$  de 30.000 a 55.000 MPa.

Estos valores corresponden, en general, a una roca de buenas características, aún estando referidos al nivel superficial de la sección de la galería afectado por el proceso de excavación.

## 2.2 Ensayos de taladro transversal

Para la ejecución de estos ensayos, en el piso de la galería GTP1, a partir de la abscisa 0+100 m hasta el fondo, fueron perforados seis sondeos cortos verticales, de 5 m de profundidad y de diámetro NW, espaciados entre ellos 8 m (Figura C/5). Para la medición de la velocidad media de las ondas en el macizo, el martillo de impacto en los sondeos fue colocado a la profundidad de 2,0 y 4,5 m.

En el Cuadro C/3 se presentan las velocidades medidas a estas profundidades y los valores de los módulos dinámicos calculados.

Cuadro C/3

Galería exploratoria GTP1

Ensayos de taladro transversal

VELOCIDAD DE LAS ONDAS Y MODULOS DINAMICOS

Parámetro	Profundidad (m)	Abscisa (m)			
		0+100-0+108	0+108-0+116	0+116-0+124	0+124-0+132
$V_p$ (m/s)	2,0	5.210	2.925	2.139	3.420
	4,5	3.635	2.847	2.920	2.580
$V_s$ (m/s)	2,0	2.175	1.473	1.284	1.645
	4,5	2.235	1.858	1.415	1.292
$E_{DIN}$ (MPa)	2,0	35.575	15.610	10.880	19.780
	4,5	32.405	21.105	14.635	12.015
$G_{DIN}$ (MPa)	2,0	12.795	5.870	4.460	7.325
	4,5	13.500	9.335	5.420	4.515
$\nu$	2,0	0,39	0,33	0,22	0,35
	4,5	0,20	0,13	0,35	0,33

Estos resultados están gráficamente ilustrados en la Figura C/7. Del análisis de los datos obtenidos de esta investigación se destaca que los valores obtenidos a mayor profundidad son más elevados, en relación al esperado mejoramiento de la roca. Sin embargo, esto no ocurre en el tramo entre las abscisas 0+130 y 0+140 m, por la probable presencia de un nivel muy fracturado o fragmentado en profundidad.

Por otro lado, los módulos dinámicos presentan un comportamiento anómalo, con tendencia a disminuir a partir de la abscisa 0+100 m hasta 0+130 m, que difiere de lo obtenido con las prospecciones geofísicas.

En la galería exploratoria GCM1 fueron perforados 21 sondeos cortos de 5 m de longitud, de los cuales 13 verticales y 8 horizontales en la pared, espaciados entre ellos 7-8 m, cuya ubicación se presenta en la Figura C/6. En cada uno de estos sondeos fueron ejecutadas dos pruebas a la profundidad de 2,0 m y 4,5 m.

Debido al ruido producido por el agua de filtración que fluía a lado de los sondeos y que chorreaba en el interior de los mimos, no fue posible medir la velocidad de propagación de las ondas longitudinales  $V_p$  y consecuentemente calcular el módulo elástico  $E_{DIN}$  y el coeficiente de Poisson.

En el Cuadro C/4 se recopilan los datos medidos en el tramo recto de la galería GCM1 y en el crucero lateral.

## Cuadro C/4

Galería exploratoria GM1

Ensayos de taladro transversal

## VELOCIDAD DE LAS ONDAS Y MODULOS DINAMICOS

Abscisa (m)	V <sub>p</sub> (m/s)		G <sub>DIN</sub> (MPa)	
	2,0 m	4,5 m	2,0 m	4,5 m
<u>Tramo recto</u>				
Ensayos verticales				
0+410 - 0+402	2.125	2.215	12.210	13.280
0+402 - 0+394	3.030	2.537	24.830	17.385
0+394 - 0+386	2.145	2.325	12.475	14.625
0+325 - 0+318	2.760	2.750	20.620	20.415
Ensayos horizontales				
0+042 - 0+394	2.400	2.320	15.605	14.540
0+325 - 0+318	1.545	3.300	6.460	29.480
0+318 - 0+310	1.980	3.965	10.585	42.550
<u>Crucero</u>				
Ensayos verticales				
0+042 - 0+034	3.010	2.275	24.460	14.020
0+034 - 0+026	3.530	3.015	33.735	24.580
0+026 - 0+018	3.305	3.075	29.550	25.600
Ensayos horizontales				
0+026 - 0+018	2.305	3.505	14.375	33.195

Estos resultados están gráficamente ilustrados en la Figura C/8. Del análisis de los datos obtenidos se evidencia que:

En los ensayos verticales la diferencia entre los valores a 2,0 m y a 4,5 m de profundidad, es pequeña (menor de un 10%). Solamente los ensayos realizados en el crucero indican una marcada diferencia entre los valores obtenidos a diferente profundidad, probablemente en relación a la presencia de roca muy fracturada.

En los ensayos horizontales, la diferencia entre los valores superficiales y profundos, es siempre notable debido a que, en las paredes, el relajamiento de la

roca consecuente a la excavación alcanza probablemente una profundidad mayor de 2 m.

Cabe anotar que en el último tramo de la galería, entre las abscisas 0+380 y 0+420 m, no se nota esta diferencia y los valores obtenidos resultan ser muy bajos también a la profundidad de 4,5 m. Esto depende de la proximidad del crucero (10-15 m de distancia), cuya excavación afectó aún más la roca alrededor.

### 3. INVESTIGACIONES DE MECANICA DE ROCAS IN SITU

Para la determinación de las características mecánicas de deformabilidad del macizo rocoso de la formación Misahuallí fueron ejecutados, en las galerías exploratorias, ensayos de carga vertical sobre placa midiendo las deformaciones en la clave de la galería.

#### 3.1 Ensayos de carga sobre placa

- En la galería GTP1 fueron efectuados dos ensayos, ubicados en las abscisas 0+128 y 0+140 m como se indica en la Figura C/5.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

- Ensayo de carga vertical (Figura C/9)

Abscisa 0+128 m

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-5,1	6.261	43.830
0-10,1	11.423	26.272
0-15,2	14.079	-
0-20,3	23.884	43.787
$\bar{x}$	13.912	$\bar{x}$ 37.963

Módulo de deformación global = 7.100 MPa



- Ensayo de carga vertical (Figura C/9)

Abscisa 0+140 m

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-5,1	5.977	16.436
0-10,1	6.914	-
0-15,2	13.140	26.281
0-20,3	11.422	27.655
$\bar{x}$	9.363	$\bar{x}$ 23.457

Módulo de deformación global = 4.910 MPa

De los resultados indicados y del análisis de los gráficos relativos se concluye que:

- Los ensayos sobre placa evidencian la existencia de fracturas abiertas que se cierran bajo carga.
- La presencia de fracturas abiertas en esta galería está relacionada con el proceso de excavación y, sobre todo, con la descompresión de la ladera del valle.
- El fenómeno de cierre de las fracturas resulta más evidente en la abscisa 0+128 m donde probablemente la presión aplicada alcanzó una fractura muy abierta; mientras que, en la abscisa 0+140 m, se verifica el cierre de las fracturas superficiales con una carga de 15 MPa y luego se desarrolla el cierre de las fracturas más profundas.
- Asumiendo una carga vertical sobre la galería de 5-10 MPa, se pueden considerar representativos los siguientes módulos:

Abscisa (m)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0+128	8.000	30.000
0+140	6.500	20.000
$\bar{x}$	7.000	$\bar{x}$ 25.000

En la galería GCM1 fueron realizados cuatro ensayos de carga vertical sobre placa ubicados, como se indica en la Figura C/6, en las abscisas 0+310 y 0+410 m del tramo recto y en las abscisas 0+025 y 0+055 m del cruce.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

- Ensayo de carga vertical (Figura C/10)

Abscisa 0+310 m

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-7,6	5.873	24.638
0-12,7	7.302	15.647
0-17,8	13.524	26.272
$\bar{x}$	8.933	$\bar{x}$ 22.185

Módulo de deformación global = 5.420 MPa

- Ensayo de carga vertical (Figura C/10)

Abscisa 0+410 m

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-3,8	2.403	14.079
0-7,6	3.942	13.140
0-11,4	7.040	14.783
0-20,3	7.843	17.515
$\bar{x}$	5.307	$\bar{x}$ 14.879

Módulo de deformación global = 4.105 MPa

- Ensayo de carga vertical (Figura C/11)

Crucero. Abcisa 0+025 m

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-3,8	4.480	16.425
0-7,6	4.807	19.711
0-11,4	5.686	22.743
0-20,3	8.757	26.272
$\bar{x}$	5.932	$\bar{x}$ 21.288

- Módulo de deformación global = 3.600 MPa

- Ensayo de carga vertical (Figura C/11)

Crucero. Abcisa 0+055 m

Ciclos de carga (MPa)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0-5,1	3.867	11.954
0-10,1	6.407	-
0-15,2	14.079	20.748
0-20,3	11.676	21.893
$\bar{x}$	9.008	$\bar{x}$ 18.198

- Módulo de deformación global = 5.200 MPa

De los resultados obtenidos y del análisis de los gráficos relativos se concluye que:

- Todos los ensayos indican el cierre de las fracturas. Esto se evidencia en los diagramas presión/deformación y por el aumento progresivo de los módulos con el incremento de la carga aplicada.
- Este comportamiento se observa en los ensayos realizados en la abscisa 0+310 m y, en el crucero, en la abscisa 0+055 m.

El ensayo en la abscisa 0+410 m midió la deformabilidad del macizo en sentido paralelo a las discontinuidades verticales existentes en el sitio.

El ensayo ejecutado en el crucero en la abscisa 0+025 m, midió la deformación del macizo en sentido perpendicular a las deformaciones subhorizontales existentes en el sitio.

Los resultados obtenidos no indican anisotropía en el macizo.

- A lo largo de toda la galería está por lo tanto presente una capa de roca descomprimida consecuente al proceso de excavación.
- Asumiendo una carga vertical sobre la galería de 15 MPa, se pueden considerar representativos los siguientes módulos:

Abscisa (m)	$E_{DEF}$ (MPa)	$E_{EL}$ (MPa)
0+310	10.000	15.000-20.000
0+410	7.000-8.000	15.000
0+025 crucero	7.000-8.000	20.000-25.000
0+055 crucero	10.000-15.000	20.000
	$\bar{x}$ 10.000	$\bar{x}$ 20.000

### 3.2 Comparación entre los parámetros estáticos y dinámicos

Los módulos estáticos obtenidos de los ensayos de carga sobre placas comparados con los módulos dinámicos obtenidos de las prospecciones sísmicas y de los ensayos de taladro transversal evidencian las siguientes relaciones:

#### Galería GCM1

Abscisa (m)	Prospección sísmica $E_{DIN}$ (MPa)	Ensayo de taladro transversal $E_{DIN}$ (MPa)	Ensayo carga $E_{DEF}$ $E_{EL}$ (MPa)		$E_{DIN}/E_{DEF}$	$E_{DIN}/E_{EL}$
0+310	25.000	-	10.000	17.500	2,5	1,4
0+410	50.000	-	7.500	15.000	6,6	3,3
Crucero						
0+025	45.000	-	7.500	22.500	6,0	2,0
0+055	45.000	-	12.500	20.000	3,6	2,5

Galería GTP1

Abscisa (m)	Prospección sísmica	Ensayo de taladro transversal	Ensayo carga		$E_{DIN}/E_{DEF}$	$E_{DIN}/E_{EL}$
	$E_{DIN}$ (MPa)	$E_{DIN}$ (MPa)	$E_{DEF}$	$E_{EL}$ (MPa)		
0+128	22.000	20.000	8.000	30.000	2,5	0,7
0+140	45.000	-	6.500	20.000	7,0	2,2

Esta comparación indica que la relación entre módulos estáticos y módulos dinámicos es muy variable y, consecuentemente, poco confiable debido, tal vez, a la escasez de datos de carga y de taladro transversal disponibles y al hecho que la investigación sísmica de refracción resulta siempre demasiado afectada por la presencia de un nivel de roca superficial aliviado por el proceso de excavación.

#### 4. PERMEABILIDAD DEL MACIZO

Para estimar la permeabilidad del macizo rocoso de la formación Misahuallí se recopilarán y analizarán todos los resultados de los ensayos de absorción de agua tipo Lugeon ejecutados en los sondeos profundos en el sector Túnel de Aducción y en el sector Codo Sinclair para las obras de generación.

Estos ensayos fueron ejecutados de acuerdo a las modalidades especificadas adaptadas, en algunos casos, a las condiciones locales. Los valores de unidad Lugeon (UL) registrados fueron interpretados mediante el método de Houlby (1976), presentado anteriormente (Figura B/11).

En los capítulos siguientes se presentan, por separado, los valores UL medidos en los sondeos realizados en los dos sectores mencionados, la interpretación del correspondiente tipo de flujo y la permeabilidad del macizo investigado.

##### 4.1 Túnel de Aducción

En este sector fueron perforados en total seis sondeos profundos de los cuales cuatro en la Fase A de los estudios y dos en la Fase B. Los ensayos de absorción de agua fueron siempre ejecutados en los últimos 50 m de los sondeos, próximos al trazado del túnel.

A continuación se recopilan en el Cuadro C/5, por cada sondeo, los valores UL medidos. En la Figura C/12 se evidencia la distribución de la permeabilidad en el macizo en relación con los tipos de roca identificados.

Cuadro C/5

Formación Misahuallí

Túnel de Aducción

#### ENSAYOS DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON

Ubicación	Sondeo	Profundidad de referencia (m)	Cota (m snm)	Unidad Lugeon (UL)	Tipo de flujo
Abscisa km 3+500	ST6	437	1.288	5	L
		442	1.283	5	L
		447	1.278	4	L
		452	1.273	5	L
		457	1.268	4	L
		462	1.263	4	L

467	1.258	5	L
472	1.253	4	L
477	1.248	4	L
482	1.243	5	L

Cota del piso del túnel: 1.244

Fracturas: poco abiertas, lisas, limpias

Permeabilidad del macizo: 4-5 UL - Baja

Abscisa km	ST7	342	1.281	11	F
6+100		347	1.276	12	F
		352	1.271	12	F
		357	1.266	11	F
		362	1.261	10	F
		367	1.256	11	F
		372	1.251	11	F
		377	1.246	10	F
		382	1.241	10	F
		387	1.236	8	W

Cota del piso del túnel: 1.234

Fracturas: abiertas con relleno

Permeabilidad del macizo: 8-12 UL - Mediana-alta

Abscisa km	ST1	170	1.292	1	F
8+400		175	1.287	31	T
		180	1.282	25	L
		185	1.277	17	L
		190	1.272	19	L
		195	1.267	31	F
		200	1.262	40	F
		205	1.257	39	F
		210	1.252	36	T
		215	1.247	23	L

Cota del piso del túnel: 1.225

Fracturas: abiertas, en general limpias, cerrándose hacia abajo

Permeabilidad del macizo: 17-40 UL - Muy Alta

Abscisa km	ST2	165	1.291	20	W
10+900		180	1.276	27	T
		185	1.271	18	D
		190	1.266	34	F
		195	1.261	20	F
		200	1.256	11	L
		205	1.251	17	L
		210	1.246	7	L
		215	1.241	14	L
		220	1.236	16	L

		225	1.231	18	L
Cota del piso del túnel:			1.216		
Fracturas:		abiertas, con relleno (hasta cota 1.265); hacia el fondo cerradas, limpias y lisas			
Permeabilidad del macizo:		(hasta cota 1.265) 20-34 UL - Muy alta (hacia el fondo) 7-20 UL - Alta			
Abscisa km	ST3	140	1.248	28	F
16+700		298	1.271	12	L
		303	1.266	10	L
		308	1.261	11	W
		313	1.256	12	L
		318	1.251	10	L-F
		323	1.246	10	F
		328	1.241	9	L-D
		333	1.236	9	L
		338	1.231	9	L
		343	1.226	9	L-F
Cota del piso del túnel:			1.214		
Fracturas:		abiertas y limpias			
Permeabilidad del macizo:		(hasta cota 1.245) 10-28 UL - Alta (hacia el fondo) 9 UL - Mediana			
Abscisa km	ST4	203	1.231	33	L
21+700		208	1.226	19	L
		213	1.221	24	L
		218	1.216	24	L
Cota del piso del túnel:			1.207		
Fracturas:		abiertas, lisas y limpias			
Permeabilidad del macizo:		19-33 UL - Muy alta			

En resumen, a pesar del espaciamiento de los sondeos perforados sobre el trazado del Túnel de Aducción, se puede reconocer un tramo entre los sondeo ST1 y ST2 (abscisa 8+000 a 11+000 km) con permeabilidad de muy alta a alta (de 30 a 15 UL) y roca de calidad regular a mala.

Otro tramo con elevada permeabilidad (25 UL) se encuentra hacia la parte final del túnel (abscisa 21+000 a 22+000 km) en proximidad del sondeo ST4, a pesar de la buena calidad de la roca. La fuerte permeabilidad estaría relacionada con la abertura de las fracturas, debido a la descompresión de la ladera del valle el río Coca.



#### 4.2 Obras de generación

En el sector Codo Sinclair las obras de generación en subterráneo fueron investigadas con cinco sondeos profundos de los cuales uno realizado en la Fase A y cuatro en la Fase B (Planos 0209-G-2040 y 0209-G-2042 a 2044). Otros dos sondeos horizontales fueron ejecutados en la Fase B, a partir del fondo de la galería exploratoria GCM1 para investigar la zona de la Casa de Máquinas. Sin embargo, en estos sondeos no fueron realizados ensayos de permeabilidad pero sí fueron medidos periódicamente los caudales drenados a través del mismo sondeo.

A continuación se recopilan los valores UL medidos en el sondeo SCE2 para la Tubería de presión con pozo vertical (Cuadro C/6), en el sondeo SCE1 para la Chimenea de Equilibrio y Tubería de baja presión (Cuadro C/7) y los sondeos SCM9, SCM8 y SCM2 para la Tubería inclinada de alta presión (Cuadro C/8). La correlación entre permeabilidad, RQD, litología y tipo de roca se ilustra en las Figuras C/13 y C/14.

Cuadro C/6

Formación Misahuallí

Tubería de presión con pozo vertical

## ENSAYOS DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON

Ubicación	Sondeo	Profundidad de referencia (m)	Cota (m snm)	Unidad Lugeon (UL)	Tipo de flujo
Margen derecha del Embalse Compensador	SCE2	132	1.106	0,08	-
		137	1.101	0,05	-
		142	1.096	0,03	-
		147	1.091	0,4	L
		155	1.083	0,9	L
		160	1.078	0,6	W
		165	1.073	0,6	L
		170	1.068	0,7	W
		175	1.063	0,4	L
		180	1.058	0,4	-
		185	1.053	0,3	-
		195	1.043	0,2	L
		205	1.033	0,1	L-T
		215	1.023	1	D
		220	1.018	0,5	L
		225	1.013	0,5	L
		235	1.003	2	D
		252	986	3	W
		255	983	4	L
		260	978	3	D
		265	973	2	D
		270	968	3	D
		275	963	3	L-D
		280	958	3	D
		285	953	4	L
		290	948	3	W
		295	943	4	D
		300	938	2	W

Se puede concluir que, en este sector, el macizo de la formación Misahuallí, entre las cotas 1.100 y 1.000, es prácticamente impermeable; en cotas más bajas, hasta la cota 940 investigada, la permeabilidad es muy baja. Además, analizando la Figura C/13, no se evidencia una relación entre la fracturación, la calidad de la roca y la permeabilidad, pues los valores UL siguen siendo muy bajos también en los tramos muy fracturados. Esto se debe a la constante presencia de material fino arcilloso que rellena la mayoría de las fracturas y fallas, predominantemente inclinadas y subverticales, y que impide la circulación del agua inyectada. Se produce entonces

solamente un efecto de dilatación de las fracturas y, localmente, un parcial lavado de relleno.

Cuadro C/7

Formación Misahuallí

Chimenea de Equilibrio y Tubería de baja presión

ENSAYOS DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON

Ubicación	Sondeo	Profundidad de referencia (m)	Cota (m snm)	Unidad Lugeon (UL)	Tipo de flujo
Sector Codo Sinclair. Parte alta, sobre la meseta	SCE1	180	1.104	23	L
		185	1.099	10	L
		190	1.094	10	L
		195	1.089	8	L
		200	1.084	12	-
		205	1.079	13	L
		210	1.074	13	W
		215	1.069	26	-
		220	1.064	9	T
		225	1.059	10	T
		230	1.054	9	T
		235	1.049	10	T
		240	1.044	11	W
		245	1.039	10	L-T
		250	1.034	12	L
		255	1.029	15	T
		260	1.024	17	W
		265	1.019	18	F
		270	1.014	15	L
		275	1.009	13	F
		280	1.004	12	W
		285	999	11	L
		290	994	11	L
		295	989	2	L-T
		300	984	10	L-D

En macizo presenta valores de permeabilidad bastante homogéneos con un promedio de  $12 \pm 5$  UL, correspondientes a una permeabilidad alta. Sin embargo, esta permeabilidad no está relacionada con el tipo de roca, compacta y maciza (RQD = 100%), y con el grado de fracturación muy bajo (menos de una fractura por metro). Por otro lado, el tipo de flujo predominantemente laminar y turbulento indica la presencia de fracturas abiertas, rugosas y con escaso material de relleno. Puesto que, este sondeo está ubicado en sitio aledaño a la zona descomprimida de la ladera

del valle del río Coca, se supone que las fracturas abiertas estén relacionadas con el relajamiento general del macizo en este sector.

Cuadro C/8

Formación Misahuallí

Tubería inclinada de alta presión

ENSAYOS DE PERMEABILIDAD TIPO LUGEON

Ubicación	Sondeo	Profundidad de referencia (m)	Cota (m snm)	Unidad Lugeon (UL)	Tipo de flujo
Sector Codo Sinclair A media ladera en la galería GTP1	SCM9	102	730	16	L
		107	725	23	L
		112	720	22	L
		117	715	24	L
		122	710	4	L-D
		127	705	5	L-D
		132	700	15	-
		137	695	14	L
		142	690	15	L
		147	685	13	L-T
Sector Codo Sinclair Margen derecha, a media ladera	SCM8	143	732	5	W
		148	727	2	L
		153	722	5	L
		158	717	3	L
		163	712	5	D
		168	707	2	L
		173	702	4	L-W
		178	697	4	F
		183	692	2	L
		188	687	0,7	L-F
		193	682	0,6	D-F
		198	677	0,7	D-F
		203	672	0,6	L-T
		208	667	0,7	F
Sector Codo Sinclair Margen derecha, a media ladera	SCM2	213	662	0,8	F
		218	657	0,6	W
		118	744	19	F
		125	737	54	D
		130	732	56	T
		135	727	44	T
		140	722	20	D
		145	717	32	F
		152	710	22	D
		157	705	18	L

162	700	16	L
167	695	19	L
172	690	19	L
177	685	17	L
182	680	16	L
187	675	13	L-D
192	670	13	L-D
197	665	13	D-F

La correlación entre estos valores de permeabilidad y la calidad de la roca en esta zona de la margen derecha del sector Codo Sinclair que estaría afectada por la alternativa de Tubería inclinada de alta presión, se ilustra gráficamente en la Figura C/14.

La permeabilidad del macizo resulta ser alta a muy alta, en correspondencia de los sondeos SCM9 y SCM2, y muy baja a impermeable, en correspondencia del sondeo SCM8, estando relacionada, no solamente al grado de fracturación y al tipo de roca, sino también a la descompresión de la ladera del valle.

El macizo investigado con el sondeo SCM8 representaría una "cuña" más compacta cuya extensión alrededor no se puede evaluar.

El tipo de flujo predominante es el laminar en relación a la presencia de muchas fracturas abiertas con escaso material de relleno.

Como lo indicado anteriormente, en la zona de la Casa de Máquinas, en los dos sondeos horizontales perforados a partir del fondo de la galería exploratoria GCM1, no fueron realizados ensayos de absorción de agua. El registro de los caudales drenados indica una notable diferencia entre los dos sondeos:

Sondeo	Ubicación	Caudal (l/min)		
		máximo	mínimo	promedio
SCM4	Al fondo del tramo recto de la galería	15	10	12,5
SCM7	Al fondo del crucero norte	175	80	127,5

Esta diferencia se debe a que el macizo arriba del sondeo SCM4 está siendo drenado por la galería exploratoria GTP1 excavada casi en la misma dirección del sondeo, en una cota 190 m más alta; mientras que el sondeo SCM7, de 100 m de longitud y con dirección perpendicular al tramo recto de la galería GCM1, actúa como drenaje de una zona del macizo no investigada.

En base a los valores de caudal drenado y a la carga hidráulica existente arriba de estos sondeos, se pueden estimar las siguientes unidades Lugeon:

---

SCM4  $\approx$  1 UL      SCM7  $\approx$  2 UL

que corresponden a una permeabilidad muy baja en el macizo, parecida a la encontrada en el tramo inferior del sondeo SCM8. Por lo tanto, la parte del macizo afectado por la Casa de Máquinas, estaría caracterizado por una baja permeabilidad y delimitado hacia el norte y el oeste por zonas más permeables.

## 5. ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO

Los ensayos de hidrofracturamiento ejecutados en sondeos rotativos permiten medir el estado de esfuerzo natural de un macizo en zonas no disturbadas por el proceso de excavación de obras subterráneas o por el relajamiento de laderas.

El conocimiento del estado de esfuerzo originario de un macizo permite la evaluación del estado tensional que se produce alrededor de una obra subterránea y de las condiciones de seguridad que determinan el diseño del revestimiento relativo. Además, permite definir las condiciones hidráulicas alrededor de los túneles de presión donde pueden ocurrir importantes fugas de agua.

Una excesiva fuga de agua se verifica cuando la presión interna del túnel genera en la roca adyacente una presión hidráulica bastante grande como para producir nuevas fracturas o abrir las existentes. Este fenómeno ocurre frecuentemente en áreas de escasa cobertura vertical o lateral y los esfuerzos naturales son bajos. Estas condiciones se verifican normalmente en proximidad de las laderas de los valles profundos, donde la erosión ha reducido notablemente el esfuerzo horizontal inicial.

Fuertes fugas de agua pueden provocar la inundación de las obras subterráneas (Casa de Máquinas y obras anexas), la erosión de los soportes laterales y del revestimiento del túnel e importantes deslizamientos superficiales.

En vista de la importancia de realizar medidas del estado tensional del macizo rocoso de la formación Misahuallí en el cual se ubican prácticamente todas las obras subterráneas del proyecto, fueron programados y realizados varios ensayos de hidrofracturamiento en los sondeos para las obras de generación y en el área de Casa de Máquinas.

Los detalles de los ensayos realizados se indican en el Cuadro C/9; la ubicación de los mismos en los sondeos verticales y horizontales se ilustra en las Figuras C/15 y C/16, respectivamente.

Cuadro C/9

Formación Misahuallí  
 Tubería de Presión y Casa de Máquinas  
 ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO

Obras	Sondeo	Ensayo No.	Profundidad de referencia (m)	Cota (m snm)	Presión crítica (MPa)
Chimenea de Equilibrio y Tubería de Presión	SCE1 (vertical)	1	190	1.094	3,5
		2	210	1.074	4,0
		3	230	1.054	4,7
		4	234	1.050	3,7
		5	241	1.043	6,5
		6	256	1.028	5,6
		7	263	1.021	7,6
		8	287	997	8,6
Tubería inclinada de alta presión	SCM8 (vertical)	1	155	719	5,2
		2	168	706	4,7
		3	181	693	4,0
		4	188	686	4,0
		5	191	683	3,9
		6	205	669	3,5
		7	215	659	3,4
Tubería inclinada de alta presión	SCM9 (vertical)	1	114	717	-
		2	120	711	-
		3	129	702	-
		4	133	698	-
		5	148	683	4,9
Casa de Máquinas	SCM7 (horizontal)	1	33	640	2,0
		2	43	640	2,0
		3*	56	640	2,0
		4*	64	640	3,5
		5	80	640	4,0
		6	91	640	2,5

\* Ensayos adicionales no programados

La metodología de ensayo adoptada, los datos registrados, los gráficos de lectura y los comentarios relativos al desarrollo de cada ensayo de hidrofracturamiento, están incluidos en los informes específicos de investigación. A continuación se presentarán los resultados obtenidos y la relativa interpretación con referencia a la orientación de



los esfuerzos principales en el macizo y a su distribución en la zona de Casa de Máquinas.

Cabe anotar que las pruebas efectuadas difieren del ensayo de hidrofracturamiento sobre roca intacta, pues se ensayaron tramos con fracturas preexistentes seleccionadas previamente mediante la revisión de los testigos de perforación.

### 5.1 Interpretación de los resultados obtenidos

Los valores de tensión natural determinados durante los ensayos, con relación a la profundidad, están ilustrados en la Figura C/17.

En la interpretación de los resultados se han tomado en cuenta los valores de la presión de cierre representativa de la presión crítica  $P_c$ , o del esfuerzo que actúa normalmente a la fractura, y los valores de presión relativos a la abertura y reabertura de las fracturas y de gáteo natural (oscilaciones de presión y caudal). Estos últimos indican la presencia en el macizo de otras componentes tensionales que durante el ensayo afectan el registro de presiones.

Se obtiene así un rango de variaciones de presión que comprende las diferentes componentes de las tensiones principales, hasta las mismas tensiones principales. En efecto las fracturas objeto del hidrofracturamiento tienen diferentes orientaciones y solamente algunas serán perpendiculares a los esfuerzos principales. Por lo tanto, el ensayo proporcionará, en la mayoría de los casos, valores de  $P_c$  (o presión de cierre modificada) relativos a la componente de los esfuerzos principales, pero no estos últimos que solo en algunos casos serán detectados.

Sin embargo, la disponibilidad de muchos datos puede proporcionar una buena evaluación del valor de las tensiones principales. En lo que se refiere a los ensayos realizados en este proyecto, los datos se disponen en un rango bien definido cuyos extremos representan los niveles máximos y mínimos de tensión del macizo, o sea  $\sigma_{MAX}$  ( $\sigma_1$ ) y  $\sigma_{MIN}$  ( $\sigma_3$ ).

La tensión intermedia  $\sigma_2$  queda al interior de la faja de valores comprendida entre  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  y su valor deberá ser próximo a  $\sigma_v$ , o sea a la carga litostática  $\gamma z$ .

Seguidamente se presentan los valores de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  y  $\sigma_2$  (tomando aproximadamente igual a  $\sigma_v$ ) relativos a los diferentes sitios de obra:

	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_1/\sigma_3$
Casa de Máquinas	8,0	2,0	4,0	4,0
Tubería inclinada de alta presión	9,0	3,0	5,5	3,0
Tubería de baja presión	9,5	3,5	6,0	2,7

Estos valores indican que  $\sigma_1/\sigma_v = 1,5 \div 2,0$ , o sea el esfuerzo máximo, no corresponde a la carga litostática vertical. Esto quiere decir que existe un esfuerzo tectónico en el macizo responsable de  $\sigma_1 = 1,5-2,0 \sigma_v$ .

Los estudios de geología estructural llevados a cabo durante las dos fases de estudios, han definido que el esfuerzo tectónico regional, configurado en el sector Codo Sinclair, es subhorizontal con dirección E-W. Los alineamientos estructurales están representados por dos sistemas de fallas normales SW-NE y NW-SE, con indicios de transcurrancia, en acuerdo con un modelo de deformación regional que prevé una compresión en dirección E-W que ha dado origen a diferentes estilos tectónicos, como son los cabalgamientos y las fallas inversas en el sector Reventador-río Salado.

Por otro lado, los valores de  $\sigma_3$  coinciden con los valores  $\sigma_{v1}$ , que es la componente de  $\sigma_v$  perpendicular a la ladera de la margen derecha, en el sector Codo Sinclair (Figura C/19).

Efectivamente, si se considera a un elemento unitario de roca sobre un plano infinito inclinado de  $40^\circ$  con  $\sigma_H$  iguales, éste se encontrará en equilibrio cuando su peso  $\sigma_v$  estará neutralizado por  $\sigma_{v1} = \gamma z \cos^2 \beta$ .

Los valores de  $\sigma_3$  y  $\sigma_{v1}$  relativos a los diferentes sitios de obra son:

	Profundidad (m)	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_3$ (MPa)	
			de ensayo	calculado ( $\sigma_{v1}$ )
Casa de Máquinas	150	2,6	2,0	2,3
Tubería inclinada de alta presión	200	2,6	3,0	3,0
Tubería de baja presión	220	2,5	3,5	3,0

En primera aproximación se puede entonces tomar  $\sigma_3$  igual a  $\sigma_{v1}$ , con dirección perpendicular a la ladera. En realidad, la superficie paralela a la ladera sobre la cual actúa  $\sigma_{v1}$  no es una superficie principal porque allí se desarrolla también un esfuerzo de corte  $\tau$ .

En fin, cabe anotar que la relación entre los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  disminuye hacia el interior del macizo o sea desde la zona de Casa de Máquinas hacia la Tubería de baja presión.

## 5.2 Orientación de los esfuerzos principales

Las pruebas de hidrofracturamiento no permiten determinar la dirección de los esfuerzos principales existentes en el macizo: los únicos datos ciertos son los valores de las tensiones naturales medidos y la existencia de un esfuerzo tectónico regional.

Para definir la orientación de estos esfuerzos se ha utilizado el método de Chowdury (ASCE, 1976) que analiza la distribución de los esfuerzos a lo largo de un plano inclinado infinito.

Este método considera un elemento unitario deformado de roca cerca de la ladera, sobre el cual actúan los esfuerzos totales:  $\sigma_v$  vertical (peso de la roca) y  $\sigma_\beta$  paralelo a la ladera (Figura C/20). La descomposición de estos esfuerzos en los planos de un elemento unitario cartesiano, evidencia las dos componentes normales  $\sigma_x$  y  $\sigma_z$  y la componente tangencial  $\tau_{xz}$ , cuyos valores están definidos por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= K\gamma z \cos^2\beta \\ \sigma_z &= \gamma z (1 + K \sin^2\beta) \\ \tau_{xz} &= K\gamma z \sin\beta \cos\beta\end{aligned}\quad \text{donde } K = \sigma_\beta/\sigma_v$$

Resulta por lo tanto, que los planos horizontales y verticales (o sea las dos caras del elemento unitario) no son planos principales y que, consecuentemente,  $\sigma_z$  vertical no puede ser un  $\sigma$  principal intermedio, o sea  $\sigma_2$ .

En base a las ecuaciones presentadas y con diferentes valores de K, se utiliza un procedimiento de petroanálisis para llegar a los valores de campo.

Siendo  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  y  $\tau_{xz}$  esfuerzos totales, mientras que los  $\sigma$  de hidrofracturamiento son esfuerzos efectivos, se debe reducir los primeros de un valor igual a la carga hídrica que actúa en el sitio. Los valores considerados son los siguientes:

	$\beta$ (°)	K	$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	z (m)	z' (m)
Casa de Máquinas	40	2	2,6	150	70
Tubería inclinada de alta presión	40	2,5	220	125	
Tubería de baja presión	40	2	2,6	200	100

donde:

$K = \sigma_\beta/\sigma_v = 2$	compatible con la presencia de $\sigma_1 > \sigma_v$ perpendicular a la dirección del valle
$\beta$	inclinación de la ladera
$\gamma$	peso específico de la roca
z	profundidad de ensayo
z'	columna de agua encima del sitio ensayado

Utilizando los diagramas circulares de Mohr (Figura C/21) con los valores de  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  y  $\tau_{xz}$ , se obtienen  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  que, para los diferentes sitios de obra, se presentan en el Cuadro C/10.

## Cuadro C/10

Formación Misahuallí

Tubería de Presión y Casa de Máquinas

Valores de  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  calculados con el método de ChowduryCasa de Máquinas

$\sigma_x$	=	3,8	MPa	$\sigma_3$	=	1,8	MPa	$2\alpha$	=	$66^\circ$
$\sigma_z$	=	6,5	MPa	$\sigma_1$	=	8,4	MPa	$2\alpha'$	=	$114^\circ$
$\tau_{xz}$	=	3,0	MPa							

Tubería inclinada de alta presión

$\sigma_x$	=	5,0	MPa	$\sigma_3$	=	2,4	MPa	$2\alpha$	=	$66^\circ$
$\sigma_z$	=	8,5	MPa	$\sigma_1$	=	11,0	MPa	$2\alpha'$	=	$114^\circ$
$\tau_{xz}$	=	4,0	MPa							

Tubería de baja presión

$\sigma_x$	=	5,2	MPa	$\sigma_3$	=	2,5	MPa	$2\alpha$	=	$66^\circ$
$\sigma_z$	=	9,2	MPa	$\sigma_1$	=	12,0	MPa	$2\alpha'$	=	$114^\circ$
$\tau_{xz}$	=	4,4	MPa							

Los valores calculados con este método coinciden aproximadamente con los resultados de los ensayos.

En particular, cabe anotar que los valores teóricos relativos a las obras más superficiales (Casa de Máquinas), se aproximan más a los resultados de los ensayos. En efecto, el modelo de Chowdury de un plano inclinado infinito, es válido sobre todo en proximidad de la ladera.

Además, se observa que en los tres sitios ensayados varía solamente la magnitud de los esfuerzos, mientras que los valores angulares quedan iguales.

Utilizando las propiedades del círculo de Mohr para la representación del estado tensional en el plano, se pueden encontrar las direcciones de los esfuerzos calculados  $\sigma_x$  y  $\sigma_z$  y los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ .

En particular, utilizando el valor  $\alpha$  de  $\sigma_x$ , se encuentra su dirección respecto a los ejes normales sobre los cuales actúan  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ . Luego, verticalizando  $\sigma_x$ , se obtiene también la rotación de los esfuerzos principales y su definitiva orientación (Figura C/22).

Los resultados de este proceso se presentan a continuación:

Esfuerzo principal	Magnitud (MPa)			Inclinación	Dirección
	Casa de Máquinas	Tubería de alta presión	Tubería de baja presión		
$\sigma_1$	8,0	9,0	9,5	33°	90°
$\sigma_2$	4,0	5,5	6,0	subhorizontal	N-S
$\sigma_3$	2,0	3,0	3,5	57°	270°

Estos resultados se ilustran gráficamente en la Figura C/23, respecto a la dirección del eje de la Casa de Máquinas y de la Tubería de presión.

Del análisis de dicha información se concluye lo siguiente:

- El esfuerzo  $\sigma_3$  es casi perpendicular a la ladera, de acuerdo a la estimación antes indicada ( $\sigma_3 \approx \sigma_{v1}$ ).
- El esfuerzo  $\sigma_1$  resulta paralelo al perfil de la ladera y parece representar una combinación entre el esfuerzo tectónico y la carga litostática.
- El esfuerzo  $\sigma_2$  presenta una magnitud estimada próxima a la carga litostática  $\sigma_v$ . Según el modelo de Chowdury, su orientación es la del valle del río Coca (N-S en el sector Codo Sinclair).
- El esfuerzo máximo principal forma un ángulo de 45° con el eje longitudinal de Casa de Máquinas y es casi paralelo al eje de la Tubería de presión.
- La magnitud de  $\sigma_3$  ( $2 \div 3,5$  MPa) es inferior a la presión interna en la parte inferior de la Tubería de alta presión ( $4 \div 6$  MPa), resultando una situación desfavorable para la seguridad de la obra que deberá ser obviada con un revestimiento adecuado.

### 5.3 Distribución de los esfuerzos principales en la Casa de Máquinas

Para el cálculo del estado de tensión en una caverna normalmente se considera una sección transversal a la misma sobre la cual actúan los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ .

Para la Casa de Máquinas los esfuerzos determinados actúan en forma oblicua respecto a su eje longitudinal (Figura C/24).

Resulta, por lo tanto, necesario efectuar una rotación de los esfuerzos utilizando los ejes cartesianos de referencia l, m, n, donde el eje n coincide con el eje longitudinal de la caverna, el eje l con el eje transversal de la misma.

Las componentes  $\sigma_l$  y  $\sigma_m$ , horizontal y vertical, se calculan mediante las siguientes ecuaciones de transformación:

$$\sigma_1 = l_x^2 \sigma_x + l_y^2 \sigma_y + l_z^2 \sigma_z$$

$$\sigma_m = m_x^2 \sigma_x + m_y^2 \sigma_y + m_z^2 \sigma_z$$

donde:

$$\sigma_x - \sigma_y - \sigma_z = \sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2$$

$$l_x - m_x = \text{coseno del ángulo entre los ejes l-m y x}$$

$$l_y - m_y = \text{coseno del ángulo entre los ejes l-m y y}$$

$$l_z - m_z = \text{coseno del ángulo entre los ejes l-m y z}$$

En la Figura C/24  $\sigma_t$  y  $z$  son perpendiculares al dibujo.

Los valores de los cosenos calculados son:

$$l_x = 0,38$$

$$m_x = 0,83$$

$$l_y = 0,58$$

$$m_y = 0,54$$

$$l_z = 0,70$$

$$m_z = 0$$

Resolviendo las ecuaciones de transformación se obtiene:

$$\sigma_1 = 4,8 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = 3,7 \text{ MPa}$$

que representan los esfuerzos efectivos que actúan en el plano transversal de Casa de Máquinas como se muestra en la Figura C/25. Es preciso indicar que  $\sigma_2$  y  $\sigma_m$  no son esfuerzos principales y que por lo tanto conllevan la presencia de un esfuerzo de corte  $\tau_{lm}$  que actúa en la sección transversal y se calcula mediante la siguiente ecuación de transformación:

$$\tau_{lm} = l_x m_x \sigma_x + l_y m_y \sigma_y + l_z m_z \sigma_z$$

Utilizando los parámetros conocidos se obtiene:

$$\tau_{lm} = -1,9 \text{ MPa}$$

En la Figura C/26 se indica la distribución de los esfuerzos sobre la cara horizontal y vertical de un elemento unitario.

Del círculo de Mohr para los parámetros obtenidos se encuentran los valores de los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  que actúan en la sección transversal cuya magnitud y dirección se presentan en las Figuras C/26 y C/27 y se resumen a continuación:

Esfuerzo principal	Magnitud (MPa)	Inclinación	Dirección
$\sigma_1$	6,2	35°	45°
$\sigma_3$	2,2	55°	225°

## 6. ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

Los ensayos de mecánica de rocas "in situ" y las pruebas de permeabilidad y de hidrofracturamiento fueron acompañadas por ensayos de laboratorio sobre los litotipos de la formación Misahuallí seleccionados entre los testigos de perforación.

Los resultados de estos ensayos han sido comparados con los obtenidos durante la Fase A y están resumidos en los siguientes cuadros. En el Cuadro C/11 se presenta la cantidad de ensayos de laboratorio ejecutados y en el Cuadro C/12 el resumen de todos los resultados obtenidos. Los resultados relativos a los diferentes litotipos han sido reunidos por litotipo y se presentan en el Cuadro C/13. En fin, para conseguir una mejor caracterización del macizo rocoso de la formación Misahuallí se han reconsiderado los datos de laboratorio de la Fase A y, en particular, los de deformación y de resistencia. El conjunto de todos los resultados de laboratorio relativos a este macizo está resumido en el Cuadro C/14 donde cada litotipo está identificado con sus parámetros físicos y mecánicos promedio. Sin embargo, cabe destacar que, en general, los valores promedio no caracterizan los varios litotipos en el sentido que, dentro de esta unidad litológica, se encuentran valores casi iguales para muchas de las rocas volcánicas estudiadas. Por otro lado, en un mismo litotipo los resultados obtenidos, a veces, son bastante diferentes abarcando rangos de valores muy amplios. Esto se explica considerando la variación estructural de los litotipos volcánicos, la presencia de microfisuras en las muestras próximas a zonas falladas y a las diferencias litológicas que caracterizan las rocas de tipo brechoide.

Entonces, para una evaluación geomecánica del macizo y para el cálculo de los parámetros característicos, se considera más significativo utilizar los resultados analíticos relativos a cada sitio investigado.

### 6.1 Análisis petrográficos

El análisis petrográfico mediante láminas delgadas de los litotipos identificados macroscópicamente ha permitido definir las siguientes rocas volcánicas en los sitios investigados: tobas, brechas, andesitas, dacitas y riolitas, riolitas y basaltos.

Las tobas volcánicas representan el litotipo más frecuente a lo largo del Túnel de Aducción y en el sector de Casa de Máquinas. Es una roca de textura intergranular o porfírica compuesta por raros fenocristales de feldespato, en una matriz microcristalina de arcilla, cuarzo, sericita y productos de alteración de los feldespatos, que frecuentemente es de tipo brechoide.

## Cuadro C/11

Formación Misahuallí

Mecánica de rocas en laboratorio

## RESUMEN DE LOS ENSAYOS EJECUTADOS

Ubicación	Análisis petrográfico	Peso específico	Porosidad	Compresión simple	Compresión monoaxial	Compresión triaxial	Carga puntual	Martillo Schmidt	Velocidad sónica	Corte directo	Abrasión
<u>Túnel de Aducción</u>											
ST6	8	9	9	16	1	1	16	14	15	-	1
ST7	3	9	9	9	1	-	11	11	10	-	1
<u>Embalse Compensador</u>											
SC11	-	1	1	1	-	-	2	-	1	-	-
<u>Tubería de Alta Presión con Pozo Vertical</u>											
SCE2	-	10	10	6	5	2	16	9	10	-	2
<u>Tubería de Baja Presión y Chimenea de Equilibrio</u>											
SCE1	3	5	5	2	3	1	8	6	5	-	1
<u>Casa de Máquinas y Tubería Inclínada de Alta Presión</u>											
SCM8	-	5	5	4	2	1	6	6	7	-	-
SCM9	-	4	4	2	4	-	5	5	5	-	-
SCM4	-	3	3	3	-	1	3	3	3	2	-
SCM7	-	3	3	3	2	1	4	5	5	-	-
GCM1	5	11	11	-	-	-	15	-	-	-	1
GTP1	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTALES	19	62	62	46	18	7	89	59	61	2	6



Cuadro C/12  
Formacion Mishauli  
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Sondeo	Muestra No.	Profundidad (m)	Propiedades Generales			Resistencia a la Compresión				Deformabilidad		Velocidad Sónica (m/s)	Resistencia al Corte		Desgaste a la Abrasión		
			Peso Específico (g/cm³) natural	Peso Específico (g/cm³) seco	Porosidad (%)	Monoxial (MPa)	Axial (MPa)	Puntual (MPa)	Resistencia Schmidt (MPa)	Dureza Schmidt (No. rebotes)	Módulo Elástico (MPa)		Coefficiente de Poisson	φ Máximo (%)	φ Residual (%)	Pérdida (%)	Coefficiente de Uniformidad
S16	56	121.90	-	-	-	105.4	4.3	-	75.8	38.0	-	4304	-	-	-	-	
	57	127.20	2.691	2.674	2.1	134.9	-	6.1	80.0	39.0	-	4976	-	-	-	-	
	58	148.40	-	-	-	87.3	-	3.0	74.3	37.6	-	3801	-	-	-	-	
	59	155.25	2.628	2.617	2.1	92.0	-	3.3	63.3	34.6	-	4760	-	-	-	-	
	60	175.45	2.378	2.371	5.6	37.2	4.4	-	-	-	-	4429	-	-	-	-	
	61	204.00	-	-	-	14.9	-	1.8	-	-	-	2970	-	-	-	-	
	62	223.75	-	2.514	6.4	76.6	4.0	-	-	-	-	4251	-	-	-	-	
	63	249.00	-	-	-	41.9	-	6.2	77.5	38.4	-	-	-	-	-	-	
	64	270.60	-	-	-	40.5	-	4.3	79.1	38.8	-	-	-	-	-	-	
	65	290.00	-	-	-	109.7	-	5.3	63.3	34.6	-	4467	-	-	-	-	
	66	330.00	2.738	2.728	2.3	24.3	-	5.3	47.7	29.3	-	4392	-	-	-	-	
	70	363.50	2.640	2.620	2.6	80.1	-	1.0	73.0	37.3	-	4396	-	-	-	-	
	71	381.80	-	-	-	30.6	-	5.0	85.7	40.3	-	5264	-	-	-	-	
	72	393.20	2.731	2.725	0.6	99.9	-	6.7	95.4	42.3	-	5406	-	-	-	-	
	73	399.20	2.694	2.672	3.5	50.2	-	2.2	63.0	34.5	-	3889	-	-	-	-	
	74	429.90	-	-	-	25.1	-	5.4	84.4	40.0	-	5193	-	-	-	-	
	75	458.65	2.693	2.688	1.0	66.9	-	-	-	73200	0.07	4936	-	-	25.24	0.41	
	76	477.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
i s		2.650	2.620	2.9	65.7	4.2	4.3	70.5	35.8	-	4507	-	-	-	-	-	
		0.110	0.110	1.9	35.0	0.2	1.8	17.8	6.4	-	661	-	-	-	-	-	
S17	66	113.20	2.821	2.817	0.8	85.4	-	8.2	121.1	45.4	-	5682	-	-	-	-	
	67	137.15	2.797	2.796	1.2	112.0	-	9.1	83.0	38.5	-	4956	-	-	-	-	
	68	160.15	2.700	2.686	1.7	106.4	-	6.3	110.9	43.8	-	5357	-	-	-	-	
	77	192.75	2.742	2.732	1.7	31.6	-	5.7	86.6	36.6	-	4976	-	-	-	-	
	78	229.80	2.727	2.724	0.9	71.3	-	3.1	77.6	37.3	-	5406	-	-	-	-	
	79	271.20	2.702	2.697	4.1	184.1	-	8.7	59.6	32.5	-	4957	-	-	-	-	
	80	327.70	-	-	-	42.2	-	2.0	66.1	34.4	-	4692	-	-	-	-	
	81	346.25	2.759	2.757	0.5	49.9	-	7.6	140.5	48.1	-	6068	-	-	-	-	
	82	376.00	2.701	2.698	3.8	51.1	-	4.0	87.1	39.4	-	5395	-	-	13.54	0.45	
	83	384.00	-	-	-	-	-	5.2	81.1	38.1	-	-	-	-	-	-	
	84	389.55	2.642	2.636	1.8	103.1	-	6.3	67.3	34.7	-	4672	-	-	-	-	
	i s		2.730	2.720	1.8	83.7	-	6.0	88.6	39.0	-	5214	-	-	-	-	-
			0.050	0.050	1.3	45.0	-	2.3	25.0	4.8	-	444	-	-	-	-	-
SC11	50	54.50	-	-	-	-	-	2.9	1.3	-	-	-	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SC12	107	140.40	2.653	2.647	2.6	68.3	-	4.1	63.7	33.0	-	55056	-	-	-	-	
	107	-	-	-	-	-	-	4.7	59.2	33.6	-	-	-	-	-	-	
	108	171.40	2.630	2.616	3.2	44.6	-	4.2	59.2	33.6	-	4434	-	-	-	-	
	108	-	-	-	-	-	-	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
	109	212.25	2.654	2.645	3.0	15.6	-	-	-	-	-	4860	-	-	0.08	0.29	
	109	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	110	240.80	2.606	2.592	3.5	51.5	-	-	87.5	41.0	-	5053	-	-	19.63	0.31	
	111	268.00	2.655	2.644	2.6	26.5	-	4.1	102.0	44.0	-	5456	-	-	-	-	
	111	-	-	-	-	-	-	4.8	-	-	-	-	-	-	-	-	
	112	306.00	2.518	2.499	2.5	113.6	-	5.4	78.3	38.9	-	4498	-	-	-	-	
	112	-	-	-	-	-	-	4.3	-	-	-	-	-	-	-	-	
	113	339.00	2.635	2.614	2.9	72.2	-	2.9	68.3	36.3	-	4667	-	-	30.85	0.31	
	113	-	-	-	-	-	-	5.0	-	-	-	-	-	-	-	-	
	114	361.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	115	393.00	2.594	2.577	2.6	62.7	-	5.0	70.8	37.0	-	4397	-	-	-	-	
	115	-	-	-	-	-	-	4.9	-	-	-	-	-	-	-	-	
SC13	116	409.60	2.741	2.721	2.7	85.8	-	7.1	87.5	41.0	-	5323	-	-	-	-	
	116	-	-	-	-	-	-	5.9	-	-	-	-	-	-	-	-	
	117	417.70	2.650	2.630	2.6	83.9	-	8.4	109.4	45.2	-	5441	-	-	-	-	
	117	-	-	-	-	-	-	9.1	-	-	-	-	-	-	-	-	
	i s		2.630	2.610	2.8	62.1	-	5.3	80.7	39.0	-	57572	-	-	19.63	0.29	
		0.050	0.050	0.3	28.0	-	1.6	17.0	3.9	-	501	-	-	30.85	0.31	-	
SC14	12	188.00	2.614	2.607	0.5	164.3	6.4	4.1	60.0	33.9	-	44405	-	-	-	-	
	13	218.20	2.609	2.602	1.3	-	-	-	50.6	31.0	-	5303	-	-	-	-	
	14	248.00	2.564	2.557	1.8	63.8	2.3	5.9	52.5	31.7	-	87397	-	-	-	-	
	15	265.00	-	-	-	221.9	6.4	5.0	64.0	35.5	-	5225	-	-	16.33	0.23	
	16	280.70	2.625	2.617	1.2	119.0	6.6	4.9	97.4	43.5	-	5322	-	-	-	-	
	17	295.00	2.626	2.619	1.1	188.7	-	-	86.2	41.2	-	5306	-	-	-	-	
	i s		2.610	2.600	1.2	151.5	-	5.4	68.5	36.0	-	5270	-	-	-	-	
		0.020	0.020	0.4	61.7	2.0	0.7	19.0	5.0	-	565	-	-	-	-	-	
SC18	85	131.80	2.738	2.734	0.6	122.7	-	2.8	99.5	42.3	-	5429	-	-	-	-	
	86	151.50	-	-	-	107.4	-	12.3	112.2	44.5	-	5603	-	-	-	-	
	87	171.30	2.622	2.519	10.7	42.0	-	6.9	82.3	38.8	-	5724	-	-	-	-	
	88	183.00	2.709	2.594	11.8	188.8	-	11.0	88.3	40.1	-	5697	-	-	-	-	
	89	189.80	-	-	-	50.5	-	-	-	-	-	5396	-	-	-	-	
	105	196.00	2.734	2.730	1.6	159.3	-	4.2	107.4	43.7	-	5098	-	-	-	-	
	106	219.20	2.758	2.745	1.8	180.0	-	3.2	105.7	43.4	-	5492	-	-	-	-	
	i s		2.700	2.660	5.3	121.5	-	6.7	99.2	42.0	-	5491	-	-	-	-	
		0.050	0.100	5.4	59.0	-	4.0	11.6	2.2	-	215	-	-	-	-	-	
SC19	100	55.50	2.733	2.727	0.8	72.6	-	3.6	60.3	32.7	-	4994	-	-	-	-	
	101	76.50	2.731	2.724	0.8	88.0	-	9.									

Cuadro C/14  
Formación Misahuallí  
SINTESIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO POR LITOTIPO (Fase A y B)

Litotipo	Propiedades generales			Resistencia a la Compresión					Deforma- bilidad		Velocidad Sónica (m/s)	Resistencia al Corte		Desgaste a la Abrasión		Fase
	Peso Específico natural (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Específico seco (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad (%)	Monoaxial (MPa)	Puntual		Resistencia Schmidt (MPa)	Dureza Schmidt (No. rebotes)	Módulo Elástico (MPa)	Coeficiente de Poisson		φ Máximo (°)	φ Residual (°)	Pérdida (%)	Coeficiente de Uniformidad	
					Axial (MPa)	Diametral (MPa)										
Tobas volcánicas	2.650	2.650	1.9	89.0	-	13.9	-	-	61663	0.19	4990	49.0	41.0	17.80	0.30	A
	2.680	2.680	2.7	82.0	4.2	7.6	77.5	37.0	40597	0.14	4893	-	-	16.70	0.42	B
	2.660	2.660	2.3	85.5	4.2	10.7	77.5	37.0	51130	0.16	4941	49.0	41.0	17.20	0.36	
Brechas volcánicas	2.640	2.620	1.9	86.5	4.8	5.2	78.7	38.2	63727	0.11	4855	-	-	20.00	0.32	B
Andesitas	2.640	2.600	2.9	116.0	-	6.2	-	-	34385	0.16	4941	54.0	45.5	22.70	0.31	A
	2.760	2.750	1.2	130.5	-	6.3	95.3	40.3	69464	0.19	5664	50.5	44.0	-	-	B
	2.700	2.670	2.0	123.2	-	6.3	95.3	40.3	51924	0.17	5302	52.2	44.7	22.70	0.31	
Dacitas	2.630	2.630	0.9	92.0	-	8.3	-	-	86515	0.30	5130	48.0	33.0	14.70	0.28	A
	2.730	2.720	2.2	69.6	-	8.0	113.2	44.0	42231	0.05	5688	-	-	-	-	B
	2.680	2.670	1.5	80.8	-	8.2	113.2	44.0	64373	0.17	5409	48.0	33.0	14.70	0.28	
Riolitas	2.650	2.620	1.0	99.0	-	5.7	-	-	34977	0.20	5250	31.0	15.0	-	-	A
	2.560	2.540	3.4	109.6	-	8.0	114.5	45.2	20827	0.10	5189	-	-	-	-	B
	2.600	2.580	2.2	99.8	-	6.8	114.5	45.2	27902	0.15	5219	31.0	15.0	-	-	

Cuadro C/13  
Formación Misahuallí  
SINTESIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO POR LITÓTIPO (Fase B)

Litotipo	Sondeo	Muestra No.	Propiedades generales			Resistencia a la Compresión					Deformabilidad		Velocidad Sónica (m/s)	Resistencia al Corte		Desgaste a la Abrasión		
			Peso Específico natural (g/cm³)	Peso Específico seco (g/cm³)	Porosidad (%)	Monoaxial (MPa)	Puntual		Resistencia Schmidt (MPa)	Dureza Schmidt (No. rebotes)	Módulo Elástico (MPa)	Coeficiente de Poisson		ψ Máximo (°)	ψ Residual (°)	Pérdida (%)	Coeficiente de Uniformidad	
							Axial (MPa)	Diametral (MPa)										
TOBAS VOLCANICAS	ST6	57	2.691	2.674	2.1	134.9	-	6.1	80.0	39.0	-	-	4976			-	-	
		59	2.628	2.617	2.1	92.0	-	3.3	63.3	34.6	-	-	4760			-	-	
		60	2.378	2.371	5.6	37.2	4.4	-	-	-	-	-	4429			-	-	
		61	-	-	-	14.9	-	1.8	-	-	-	-	-			-	-	
		62	-	2.514	6.4	76.6	4.0	-	-	-	-	-	2970			-	-	
		63	-	-	-	41.9	-	6.2	77.5	38.4	-	-	4251			-	-	
		73	2.694	2.672	3.5	50.2	-	2.2	63.0	34.5	-	-	3869			-	-	
		75	2.693	2.688	1.0	66.9	-	-	-	-	73280	0.07	4936			-	-	
		76	-	-	-	-	-	-	24.2	16.6	-	-	-			25.24	0.41	
		ST7	66	2.821	2.817	0.8	85.4	-	8.2	121.1	45.4	-	-	5662			-	-
			67	2.797	2.796	1.2	112.0	-	9.1	83.0	38.5	-	-	4956			-	-
			68	2.700	2.686	1.7	106.4	-	6.3	110.9	43.8	-	-	5357			-	-
	77		2.742	2.732	1.7	31.6	-	5.7	80.6	38.0	-	-	4976			-	-	
	78		2.727	2.724	0.9	71.3	-	3.1	77.6	37.3	-	-	5406			-	-	
	79		2.782	2.697	4.1	184.1	-	8.7	59.6	32.5	-	-	4957			-	-	
	80		-	-	-	42.2	-	2.0	66.1	34.4	-	-	4692			-	-	
	SCE2		112	2.518	2.499	2.5	113.6	-	5.4	78.3	38.9	50909	0.18	4498			-	-
		112	-	-	-	-	-	4.3	-	-	-	-	-			-	-	
		115	2.594	2.577	2.6	62.7	-	5.0	70.8	37.0	-	-	4397			-	-	
		115	-	-	-	-	-	4.9	-	-	-	-	-			-	-	
		116	2.741	2.721	2.7	85.8	-	7.1	87.5	41.0	-	-	5323			-	-	
		116	-	-	-	-	-	5.9	-	-	-	-	-			-	-	
	SCH8	85	2.738	2.734	0.6	122.7	-	2.8	99.5	42.3	-	-	5429			-	-	
		87	2.622	2.519	10.7	42.0	-	6.9	82.3	38.8	14000	0.09	5724			-	-	
		88	2.709	2.594	11.8	188.8	-	11.0	88.3	40.1	-	-	5697			-	-	
		89	-	-	-	50.5	-	-	-	-	-	-	5396			-	-	
	SCH9	100	2.733	2.727	0.8	72.6	-	3.6	60.3	32.7	24200	0.25	4994			-	-	
		GCH1	1	-	2.800	1.5	-	-	6.8	-	-	-	-	-			-	-
	2		-	2.616	2.3	-	-	9.7	-	-	-	-	-			-	-	
	3		-	2.765	1.8	-	-	8.8	-	-	-	-	-			-	-	
	4		-	2.730	1.7	-	-	16.0	-	-	-	-	-			-	-	
	5		-	2.850	1.3	-	-	9.0	-	-	-	-	-			-	-	
	6		-	2.778	2.0	-	-	10.3	-	-	-	-	-			-	-	
	7		-	2.739	1.9	-	-	13.2	-	-	-	-	-			-	-	
	8		-	-	-	-	-	9.2	-	-	-	-	-			-	-	
	9		-	2.724	1.8	-	-	9.2	-	-	-	-	-			-	-	
	10		-	-	-	-	-	3.1	-	-	-	-	-			-	-	
	11		-	2.820	0.6	-	-	9.3	-	-	-	-	-			8.23	0.43	
	GTP1	12	-	-	-	-	-	13.4	-	-	-	-	-			-	-	
		13	-	-	-	-	-	7.8	-	-	-	-	-			-	-	
		14	-	2.667	1.4	-	-	10.8	-	-	-	-	-			-	-	
		15	-	2.830	0.8	-	-	14.1	-	-	-	-	-			-	-	
		26	-	2.660	5.4	-	-	14.0	-	-	-	-	-			-	-	
		26	-	-	-	-	-	14.0	-	-	-	-	-			-	-	
		26	-	-	-	-	-	7.1	-	-	-	-	-			-	-	
T s		-	2.680	2.680	2.7	82.0	4.2	7.6	77.5	37.0	40597	0.14	4893			16.70	0.42	
		-	0.100	0.100	2.6	45.5	0.2	3.7	20.8	6.2	26775	0.08	654			12.00	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	
ST6		56	-	-	-	105.4	4.3	-	75.8	38.0	-	-	4304			-	-	
		58	-	-	-	87.3	-	3.0	74.3	37.6	-	-	3801			-	-	
	65	-	-	-	109.7	-	5.3	63.3	34.6	-	-	4467			-	-		
	69	2.738	2.728	2.3	24.3	-	5.3	47.7	29.3	-	-	4392			-	-		
	70	2.640	2.620	2.6	80.1	-	1.0	73.0	37.3	-	-	4396			-	-		
	71	-	-	-	30.6	-	5.0	85.7	40.3	-	-	5264			-	-		
	72	2.731	2.725	0.6	99.9	-	6.7	95.4	42.3	-	-	5606			-	-		
	74	-	-	-	25.1	-	5.4	84.4	40.0	-	-	5193			-	-		
	ST7	83	-	-	-	-	-	5.2	81.1	38.1	-	-	-			33.34	0.45	
		84	2.642	2.636	1.8	103.1	-	6.3	67.3	34.7	-	-	4672			-	-	
	BRECHAS VOLCANICAS	SCE1	50	-	2.490	1.5	-	2.9	1.3	-	-	-	-	5548			-	-
			SCE2	107	2.653	2.636	2.6	68.3	-	4.1	63.7	35.0	55056	0.06	4273			-
107				-	-	-	-	-	4.7	-	-	-	-	-			-	-
108				2.630	2.616	3.2	64.6	-	4.2	59.7	33.6	-	-	4434			-	-
108				-	-	-	-	-	4.0	-	-	-	-	-			-	-
109				2.654	2.645	3.0	15.6	-	-	-	-	4860	0.08	4158			-	-
109				-	-	-	38.4	-	-	-	-	-	-	-			-	-
110			2.606	2.592	3.5	51.5	-	-	87.5	41.0	-	-	5053			-	-	
111			2.655	2.644	2.6	26.5	-	4.1	102.0	44.0	74556	0.12	5456			19.63	0.29	
111			-	-	-	-	-	4.8	-	-	-	-	-			-	-	
113			2.635	2.614	2.9	72.2	-	2.9	68.3	36.3	-	-	4667			-	-	
113			-	-	-	-	-	5.0	-	-	-	-	-			-	-	
114		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-		
117		2.650	2.630	2.6	83.9	-	8.4	109.4	45.2	102482	0.08	5491			30.85	0.31		
117		-	-	-	-	-	9.1	-	-	-	-	-			-	-		
SCE1		12	2.614	2.607	0.5	164.3	6.4	4.1	60.0	33.9	44405	0.13	5195			-	-	
		13	2.609	2.602	1.3	-	-	-	50.6	31.0	-	-	5303			-	-	
		14	2.564	2.557	1.8	63.8	2.3	5.9	52.5	31.7	87397	0.18	5225			-	-	
		15	-	-	-	221.9	6.4	5.0	64.0	35.5	-	-	-			16.33	0.25	
		16	2.625	2.617	1.2	119.0	6.6	4.9	97.4	43.5	-	-	5322			-	-	
		17	2.626	2.619	0.8	188.7	-	-	86.2	41.2	77336	0.06	5306			-	-	
SCH9		101	2.731	2.724	0.8	88.0	-	9.4	105.5	42.9	-	-	5434			-	-	
		SCH7	97	2.611	2.604	0.7	144.4	-	10.3	135.9	49.3	-	5627			-	-	
T s		-	2.640	2.629	1.9	86.5	4.8	5.2	78.7	38.2	63727	0.11	4855			20.00	0.32	
	-	0.040	0.050	0.9	53.2	1.9	2.2	21.3	4.9	32348	0.05	595			7.60	0.08		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-		
ANDESITAS	SCH8	105	2.734	2.730	1.6	159.3	-	4.2	107.4	43.7	45543	0.14	5098			-	-	
		106	2.758	2.745	1.8	180.0	-	3.2	105.7	43.4	65516	0.10	5492			-	-	
		SCH9	102	2.802	2.776	1.6	118.7	-	9.6	87.1	39.4	75668	0.20	5626			-	-
			103	-	-	-	58.4	-	5.0	136.6	47.6	-	-	5516			-	-
	SCH4	104	2.683	2.667	0.8	89.7	-	3.4	74.7	36.6	60096	0.20	5052			-	-	
		90	2.842	2.836	0.7	75.6	-	-	-	-	-	-	-	45.0	40.0	-	-	
		91	-	-	-	-	-	8.1	46.0	27.8	-	-	6162			-	-	
		93	2.775	2.768	0.9	-	-	8.2	41.5	25.9	-	-	5979			-	-	
	SCH7	94	-	-	-	98.0	-	-	-	-	-	-	-	56.0	48.0	-	-	
		95	2.745	2.740	0.8	201.0	-	7.1	151.8	51.4	100500	0.32	5939			-	-	
		96	-	-	-	230.0	-	7.9	86.6	40.8	-	-	5926			-	-	
		99	-	-	-	93.7	-	6.9	117.8	46.6	-	-	5852			-	-	
T s	-	2.760	2.750	1.2	130.5	-	6.3	95.3	40.3	69484	0.19	5664			50.5	44.0		
	-	0.050	0.050	0.4	58.3	-	2.2	35.8	8.2	20477	0.08	376			7.7	-		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-		
DACITAS	ST7	81	2.759	2.757	0.5	49.9	-	7.6	140.5	48.1	-	-	6068			-	-	
		82	2.701	2.698	3.8	51.5	-	4.0	87.1	39.4	42231	0.05	5395			-	-	
	SCH8	86	-	-	-	107.4	-	12.3	112.2	44.5	-	-	5603			-	-	
T s		-	2.730	2.720	2.2	69.6	-	8.0	113.2	44.0	42231	0.05	5688			-	-	
RIOLITAS	SCH4	92	2.587	2.581	0.7	98.5	-	8.0	118.0	45.0	-	-	5593			-	-	
		98	2.534	2.511	6.1	120.8	-	-	111.1	45.5	20827	0.10	4786			-	-	
		T s	-	2.560	2.540	3.4	109.6	-	8.0	114.5	45.2	20827	0.10	5189			-	-
		-	0.030	0.050	3.8	15.7	-	-	4.8	0.4	-	-	570			-	-	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	

Las tobas volcánicas representan el litotipo más frecuente a lo largo del Túnel de Aducción y en el sector de Casa de Máquinas. Es una roca de textura intergranular o porfirítica compuesta por raros fenocristales de feldespato, en una matriz microcristalina de arcillas, cuarzo, sericita y productos de alteración de los feldespatos, que frecuentemente es de tipo brechoide.

Las brechas son el litotipo más abundante en la zona de la Chimenea de Equilibrio y de la Tubería de presión con pozo vertical. Es una roca conglomerática de clastos grandes de rocas lávicas, en general, muy bien cementada, compacta y maciza.

Las andesitas se encuentran a lo largo del Túnel de Aducción y, en forma subordinada, en la zona de Casa de Máquinas. Es una roca de textura porfirítica compuesta por fenocristales de feldespatos y raros cristales máficos en una matriz sericitizada y cloritizada con abundantes óxidos de hierro y vidrio volcánico.

Las dacitas y riolitas representan mayormente xenolitos o intercalaciones lávicas en las tobas y se encuentran difundidas en todos los niveles de la formación Misahualli. Son rocas de textura granular y porfirítica, compuestas por cuarzo, feldespatos y por cantidades subordinadas de minerales máficos, con frecuentes procesos de cloritización y sericitización.

Los basaltos han sido encontrados raramente en forma de intercalaciones, a lo largo del Túnel de Aducción. Es una roca granular hipidiomorfa compuesta por plagioclasa y piroxeno, cuarzo subordinado y epidota entrelazados entre sí formando una masa bien compacta.

## 6.2 Características físicas

Los parámetros físicos determinados en laboratorio fueron los siguientes:

- . peso específico natural
  - . peso específico seco
  - . porosidad
  - . velocidad sónica
  - . desgaste a la abrasión
- . El peso específico natural de las rocas volcánicas varía de 2,5 a 2,8 g/cm<sup>3</sup> (valor promedio 2,65 g/cm<sup>3</sup>).
  - . El peso específico seco varía dentro del mismo rango de valores.
  - . La porosidad varía en función de la fracturación: en general varía de 0,5 a 3,0%. Valores más elevados están relacionados con la estructura brechoide de las tobas. En la Figura C/28 se presenta la correlación entre la porosidad y el peso específico seco para algunos de los litotipos más frecuentes.

La velocidad sónica, o sea la velocidad de las ondas elásticas  $V_p$ , en especímenes moldeados de roca, proporciona datos sobre su estado de alteración y puede ser relacionada a otros parámetros característicos de la roca.

Los valores medidos varían de 4.000 a 6.000 m/s (valor promedio alrededor de 5.000 m/s).

La relación entre la velocidad sónica y el peso de volumen de algunos litotipos volcánicos se ilustra en la Figura C/29 donde se evidencia que las tobas y las brechas presentan una amplia dispersión de valores por la presencia de litotipos alterados y de composición litológica variada, mientras que las rocas lávicas (andesitas, dacitas, riolitas) presentan valores más concentrados por ser litotipos más compactos.

La relación entre la velocidad sónica y el módulo de deformación se ilustra en la Figura C/30 donde se indica que, a pesar de la heterogeneidad de las rocas volcánicas, los valores se ubican en un rango bien determinado cuya línea mediana está definida por la ecuación  $E_{DEF} = 3,5x-36,75$  que corresponde al alineamiento de las andesitas.

El desgaste a la abrasión Los Angeles muestra un cierto comportamiento uniforme de los litotipos al desgaste y una resistencia elevada a los procesos erosivos. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Litotipo	Porcentaje de pérdida (%)	Coefficiente de uniformidad
Toba	17,2	0,36
Brecha	20,0	0,32
Andesita	22,7	0,31
Dacita-Riolita	14,7	0,28

### 6.3 Resistencia a la compresión

Los ensayos de laboratorio realizados para determinar la resistencia a la compresión de los litotipos volcánicos fueron los siguientes:

- Ensayos de carga puntual
- Prueba con martillo Schmidt
- Compresión monoaxial
- Compresión triaxial

y los parámetros medidos fueron

- Carga de ruptura o esfuerzo máximo de ruptura  $\sigma_c$
- Ángulo de fricción  $\phi$
- Cohesión  $c$

Los resultados obtenidos de los ensayos de carga puntual y de las pruebas con martillo Schmidt han sido relacionados a los de compresión monoaxial, tal es así que estos ensayos podrán ser ejecutados en obra, durante la etapa de construcción, para determinar en forma rápida el valor de la carga de ruptura  $\sigma_c$ .

#### Resistencia a la carga puntual

Como lo indicado anteriormente, el índice  $I_{s(50)}$  se relaciona a  $\sigma_c$  mediante la ecuación  $\sigma_c = 24 I_{s(50)}$ , donde el coeficiente 24 varía en función de la litología y de la anisotropía de la formación. Analizando la Figura C/31 se observa:

- La notable dispersión de los valores.
- Un cierto alineamiento predominante sobre todo por los litotipos lávicos definido por la ecuación  $\sigma_c = 11 I_{s(50)}$ .
- Otro alineamiento secundario definido por la ecuación  $\sigma_c = 38 I_{s(50)}$ .
- Resulta razonable considerar un coeficiente de correlación de 10 a 20 entre el índice  $I_{s(50)}$  y la carga de ruptura:

$$10 I_{s(50)} < \sigma_c < 20 I_{s(50)}$$

#### Prueba con martillo Schmidt

Los resultados de esta prueba se relacionan con la carga de ruptura mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = 10 \times 10^{(0,00874\gamma \cdot R)}$$

donde:

- $\gamma$  = peso de volumen
- $R$  = valor del rebote
- $\sigma_c$  = resistencia última a la compresión monoaxial

La correlación entre la resistencia Schmidt ( $\sigma$ ) obtenida en laboratorio y la resistencia  $\sigma_c$  se presenta en la Figura C/32 donde se observa una gran dispersión de valores que, sin embargo, están incluidos en un rango delimitado por las siguientes rectas:  $\sigma_c = 0,4 \sigma$  y  $\sigma_c = 1,8 \sigma$ , siendo el valor promedio  $\sigma_c = \sigma$ .

#### Compresión monoaxial

La resistencia a la compresión de los diferentes litotipos determinada en laboratorio resulta ser la prueba más segura y confiable. En efecto, a pesar que los valores obtenidos son muy variables por un mismo sondeo y por un mismo litotipo, como se indica en los Cuadros C/13 y C/14, los valores promedio no difieren mucho entre sí y aunque no caractericen los varios litotipos (salvo la andesita), resultan ser reales.

Litotipo	Resistencia última $\sigma_c$ (MPa)
Toba	86
Brecha	87
Dacita	81
Riolita 100	
Andesita	123

### Compresión triaxial

Para determinar la envolvente de ruptura, el ángulo de fricción y la cohesión de los más representativos litotipos de la formación Misahuallí fueron realizados los siguientes ensayos de compresión triaxial:

Cuadro C/15

Formación Misahuallí  
Mecánica de rocas en laboratorio  
ENSAYOS DE COMPRESION TRIAXIAL

Sondeo	Cota (m s.n.m.)	Litotipo	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)
ST6	1.267	toba	67	15 30	170,7 246,2
SCE1	1.019	brecha	222	20 40	331,5 417,1
SCE2	997	toba brechosa	51,5	10 20 30	109,5 177,7 231,3
	877	brecha	72	10 20 30	110,9 186,2 210,2
SCM8	685	toba	50,5	15 20 30	210,5 220,0 244,7
SCM7	639	riolita	121	10 20	162,3 198,6
SCM4	640	andesita	98	5 10 20	213,0 246,4 333,4

Los semicírculos de Mohr determinantes de la envolvente de ruptura de las tobas, de las brechas y de las andesitas y riolitas están representados en las Figuras C/33, C/34, C/35 y C/36. Las envolventes de ruptura de cada uno de estos litotipos se muestran en la Figura C/37. Se observa que los litotipos más resistentes son las brechas de clastos grandes encontrados en el sondeo SCE1 para la Chimenea de Equilibrio y las andesitas y riolitas de Casa de Máquinas. Las tobas de la Tubería inclinada de alta presión son de mediana resistencia como las tobas brechoide y las brechas de la Tubería de presión con pozo vertical.

#### 6.4 Deformabilidad

Con los ensayos de compresión monoaxial instrumentada sobre especímenes de los diferentes litotipos se midieron las deformaciones diametrales y axiales y se calcularon los módulos de deformación secante ( $E_s$ ) y tangente ( $E_t$ ), además del coeficiente de Poisson.

Los valores obtenidos se detallan en el Cuadro C/16.

Cuadro C/16

Formación Misahuallí

Ensayo de compresión monoaxial

MODULOS DE DEFORMACION Y COEFICIENTE DE POISSON

Sondeo	Litotipo	$E_s$ (MPa)	$E_t$ (MPa)	$\nu_s$	$\nu_t$
<u>Fase A</u>					
ST1	Basalto	73.077	88.562	0,35	0,36
	Riolita	34.977	41.820	0,20	0,20
ST2	Dacita	113.460	100.000	0,20	0,37
ST3	Dacita	72.800	68.554	0,40	0,37
	Dacita	73.285	64.112	0,35	0,30
	Basalto	43.842	51.173	0,14	0,18
ST4	Andesita	34.385	40.478	0,16	0,07
SC4	Toba	56.285	58.851	0,25	0,29
SCM2	Toba	33.281	37.837	0,16	0,20
	Toba	88.431	88.431	0,21	0,21
	Toba	68.658	68.658	0,17	0,17



Sondeo	Litotipo	$E_s$ (MPa)	$E_t$ (MPa)	$\nu_s$	$\nu_t$
<u>Fase B</u>					
ST6	Toba	73.282	86.354	0,07	0,13
ST7	Dacita	42.231	35.796	0,05	0,05
SCE2	Brecha	55.056	33.429	0,06	0,02
	Brecha	4.860	11.760	0,08	0,35
	Brecha	74.556	67.200	0,12	0,12
	Toba	50.909	33.043	0,18	0,13
	Brecha	102.482	64.545	0,08	0,06
SCE1	Brecha	44.405	42.410	0,13	0,10
	Brecha	87.397	79.984	-	-
	Brecha	77.336	64.215	0,06	0,04
SCM8	Toba	14.000	14.018	0,09	0,03
	Andesita	45.543	31.806	0,14	0,15
	Andesita	65.516	60.677	0,10	0,18
SCM9	Toba	24.200	29.931	0,25	0,13
	Andesita	75.668	82.722	0,20	0,17
	Andesita	60.096	63.050	0,20	0,23
SCM7	Andesita	100.500	95.835	0,32	0,38
	Riolita	20.827	31.320	0,10	0,20

Los valores promedio de  $E_s$  y  $E_t$  se resumen gráficamente con los histogramas de la Figura C/38.

Se observa que los dos módulos de deformación de un mismo litotipo presentan valores próximos entre ellos y que además los módulos de los diferentes litotipos no difieren mucho entre sí, salvo el caso de las riolitas.

## 6.5 Resistencia al corte

Algunas discontinuidades representativas encontradas en los testigos de perforación han sido ensayadas en laboratorio, obteniéndose valores de ángulo de fricción máximo ( $\phi_{MAX}$ ) y residual ( $\phi_R$ ) que han sido comparados con los valores obtenidos de los ensayos ejecutados en la Fase A. A continuación se resumen todos estos valores en el Cuadro C/17.

## Cuadro C/17

Formación Misahuallí

Ensayos de corte directo en laboratorio

## ANGULO DE FRICCION MAXIMO Y RESIDUAL

Sondeo	Litotipo	$\phi_{MAX}$ (°)	$\phi_R$ (°)
<u>Fase A</u>			
ST3	Riolita	31	15
	Dacita	48	33
	Basalto	42	32
	Basalto	35,5	26,5
	Andesita	48	42
	Andesita	51	35,5
ST4	Andesita	63	59
SC4	Toba	63	57
	Toba	45	40
	Toba	51	31
SCM2	Toba	38,5	36
<u>Fase B</u>			
SCM4	Andesita	45	40
	Andesita	56	48

Los valores promedio de los ángulos de fricción de cada litotipo son:

Litotipo	$\phi_{MAX}$ (°)	$\phi_R$ (°)
Toba	49	42,5
Dacita	48	33
Andesita	52,5	45
Riolita	31	15
Basalto	39	29

Cabe anotar que los valores bajos del basalto y riolita se deben al tipo de discontinuidad ensayada, plana o poco rugosa.

## 7. CARACTERISTICAS MECANICAS DEL MACIZO

Para evaluar los parámetros de deformación y resistencia del macizo rocoso de la formación Misahuallí, que por su potencia será afectado por la mayoría de las obras subterráneas del Proyecto, se utilizaron los siguientes métodos descritos anteriormente para la formación Hollín:

- El método de Bieniawski para la determinación del índice RMR (rock mass rating) del macizo.
- El método de Hoek-Brown.
- El método de Barton para la determinación de la resistencia de las discontinuidades en el macizo.

Como es notorio estos métodos se basan sobre los resultados de los ensayos de laboratorio, sobre las observaciones y determinaciones de campo y sobre los ensayos "in situ" para la medición de los parámetros de resistencia y deformación de la roca en gran escala.

Para el estudio del macizo de la formación Misahuallí fueron procesados los datos obtenidos de los mapeos geoestructurales de las galerías exploratorias GTP1, para la Tubería de Presión, y GCM1, para la Casa de Máquinas, además de todos los registros de sondeo relativos a las perforaciones rotativas ejecutadas en los sitios de obra.

En los capítulos siguientes se presentará la evaluación de las características geomecánicas del macizo que estará afectado por las siguientes obras:

- . Túnel de Aducción
- . Tubería de baja presión y Chimenea de Equilibrio
- . Tubería inclinada de alta presión
- . Tubería de presión con pozo vertical
- . Casa de Máquinas

### 7.1 Túnel de Aducción

El Túnel de Aducción será excavado desde la margen derecha del sitio Presa Salado hasta la margen izquierda del Embalse Compensador y tendrá una longitud de 24,9 km.

El túnel atravesará, en casi toda su longitud, la formación Misahuallí, con excepción del tramo inicial de 0,5-0,6 km en roca intrusiva granodiorítica, del tramo final de 3,5 km en rocas de la formación Hollín y de un tramo intermedio, de longitud desconocida, en la roca granodiorítica de otro cuerpo intrusivo.

El macizo de rocas volcánicas de la formación Misahuallí fue investigado con seis sondeos profundos que alcanzaron la cota de diseño del túnel. En la Figura C/39 se ilustra, en forma esquemática, un corte geomecánico del túnel y la distribución de los tipos de roca encontrados en los sondeos, mientras que, en la Figura C/40, se presenta un corte litológico con la distribución de los litotipos reconocidos a lo largo del trazado.

**7.1.1 Resistencia monoaxial y sobrecarga** Los valores promedio  $\sigma_c$  de resistencia a la compresión monoaxial para los principales litotipos investigados a lo largo del trazado del túnel están resumidos en el siguiente cuadro.

Cuadro C/18

Formación Misahuallí

Túnel de Aducción

## RESISTENCIA A LA COMPRESION MONOAXIAL

Litotipo	$\sigma_c$ (MPa)		Posición
	$\bar{x}$	s	
Toba	70	36	Cota del túnel
	67	-	
	81	32	
Brecha	37	17	Cota del túnel
	113	100	
Riolita	147	10	20 m arriba de la cota del túnel
	62	23	
Dacita	51	-	Cota del túnel
	40	25	Cota del túnel
	117	47	
Andesita	103	-	Cota del túnel
	168	3	
	97	19	Cota del túnel
	94	84	
Basalto	95	-	
	77	11	
Granodiorita	123	75	Cota del túnel

Entonces los litotipos de menor resistencia a la compresión resultan ser las tobas, las brechas poco cementadas y las dacitas.

Tomando en cuenta la carga litostática sobre el túnel y una relación entre esfuerzo horizontal y vertical de  $K = 0,5$ , se puede calcular el esfuerzo tangencial sobre la sección circular del túnel en correspondencia de los sondeos (Cuadro C/19).

Cuadro C/19

Formación Misahuallí

Túnel de Aducción

## ESFUERZO TANGENCIAL EN SECCIONES DEL TUNEL

Sondeo	Litotipo	$\sigma_c$ (MPa)	Sobre- carga z (m)	JKm espesor $\gamma z$ (m)	espesor (MPa)	Kh+Kn $\gamma z$ (m)	$\gamma z$ (MPa)	$\Sigma$ tangencial (MPa)	Esfuerzo $\sigma_\theta$ (MPa)
ST6	Toba	67	550	500	13,0	50	1,2	14,2	35,3
ST7	Dacita	51	550	450	11,7	100	2,3	14,0	35,0
ST1	Riolita	147	650	400	10,4	250	5,8	16,2	40,3
ST2	Dacita	40	550	350	9,1	200	4,6	13,7	34,2
ST3	Granodiorita	123	350	200	5,2	150	3,5	8,7	21,6
ST4	Andesita	97	225	25	0,7	200	4,6	5,3	13,1

JKm = Formación Misahuallí:  $\gamma = 2,6 \text{ t/m}^3$ Kh+Kn = Formaciones Hollín y Napo:  $\gamma = 2,3 \text{ t/m}^3$ 

Comparando estos esfuerzos tangenciales con el esfuerzo monoaxial, resulta evidente que, por ejemplo, en la zona del sondeo ST1 donde existe la posibilidad de encontrar rocas dacíticas, la resistencia de estas puede ser superada. En este caso podrán ocurrir desprendimientos de bloques y hasta derrumbes en la clave y en los hastiales del túnel.

Lo mismo puede ocurrir en la zona del sondeo ST2 donde, aunque la cobertura sea menor, el esfuerzo tangencial  $\sigma_\theta$  resulta ser muy próximo a la resistencia de la roca dacítica.

7.1.2 Clasificación del macizo Las determinaciones geomecánicas efectuadas sobre los testigos recuperados de las perforaciones a lo largo del túnel, interpretadas en base a los criterios indicados en el Plano 0209-G-2900, permiten la definición del índice RMR, determinados en cada sondeo, se presentan en el Cuadro C/20 y se ilustran gráficamente en la Figura C/41.

Cuadro C/20

Formación Misahuallí

Túnel de Aducción

## CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO

Formación Misahuallí			Tipo de roca	Calidad de la roca	RMR
<u>Sondeo ST6</u>					
Cota superior	m	1.610			
Cota inferior	m	1.240			
Cota túnel	m	1.244			
Tramo	m	1.610-1.240	II	buena	70
<u>Sondeo ST7</u>					
Cota superior	m	1.618			
Cota inferior	m	1.234			
Cota túnel	m	1.234			
Tramos	m	1.618-1.594	IV	mala	30
		1.594-1.524	III	regular	50
		1.524-1.481	II	buena	70
		1.481-1.464	III	regular	50
		1.464-1.448	II	buena	70
		1.448-1.404	V	muy mala	<20
		1.404-1.234	II	buena	70
<u>Sondeo ST1</u>					
Cota superior	m	1.379			
Cota inferior	m	1.245			
Cota túnel	m	1.225			
Tramos	m	1.379-1.330	IV	mala	30
		1.330-1.245	III	regular	50
<u>Sondeo ST2</u>					
Cota superior	m	1.427			
Cota inferior	m	1.226			
Cota túnel	m	1.216			
Tramos	m	1.427-1.402	IV	mala	30
		1.402-1.306	-	-	- Faltan datos
		1.306-1.226	IV	mala	50
<u>Sondeo ST3</u>					
Cota superior	m	1.429			
Cota inferior	m	1.223			
Cota túnel	m	1.214			
Tramo	m	1.429-1.223	II	buena	70
<u>Sondeo ST4</u>					
Cota superior	m	1.235			
Cota inferior	m	1.216			
Cota túnel	m	1.207			
Tramo	m	1.235-1.216	II	buena	70

En resumen, desde la embocadura del túnel hasta el Embalse Compensador la secuencia de litotipos sería la siguiente:

Sondeo	Litotipo	Tipo de roca	Calidad de la roca
SR-18	Granodiorita	II	buena
ST6	Toba	II	buena
ST7	Dacita	II	buena
ST7	Andesita	II	buena
ST1	Riolita*	III	regular
ST2	Dacita	IV	mala
ST3	Granodiorita	II	buena
ST4	Andesita	II	buena

\* Correspondiente a una cota 20 m más alta de la cota del túnel

Por lo tanto, el túnel cruzará, en un 70% de su longitud, roca buena, salvo eventuales tramos fallados no investigados con los sondeos. En el tramo central, de unos 5 km de longitud, cruzará roca regular a mala, caracterizada por una elevada permeabilidad y una menor resistencia a los esfuerzos tangenciales sobre la sección del túnel.

7.1.3 Parámetros de deformabilidad y resistencia El índice RMR proporciona los siguientes parámetros de deformación y resistencia:

Tipo de roca	RMR	Módulo de deformación (GPa)	Módulo de resistencia $\phi$ (°)	c (MPa)
II	70	30-40	40-45	0,20-0,30
III	50	10	35-40	0,15-0,20
IV	30	3-4	30-35	0,10-0,15

Por otro lado, aplicando el método de Hoek-Brown, en base a la tabla comentada anteriormente (Figura A/16), se obtienen por cada litotipo y clase de roca, los siguientes valores de  $\underline{m}$  y  $\underline{s}$ :

Litotipo	Clase de roca	m	s
Toba	II	1,5	0,004
Dacita	II	1,7	0,004
Andesita	II	1,7	0,004
Riolita	III	0,34	$10^{-4}$
Dacita	IV	0,25	$10^{-4}$
Granodiorita	II	2,5	0,004

Asumiendo como valor  $\sigma_c$  representativo de cada litotipo el siguiente:

Litotipo	$\sigma_c$ (MPa)
Toba	67
Dacita	40-50
Andesita	100
Riolita	147
Granodiorita	123

se traza el diagrama  $\tau$ - $\sigma$  de Hoek-Brown con las envolventes características del macizo (Figura C/42) donde se evidencia otra vez que la roca de menor resistencia corresponde a los litotipos riolíticos y dacíticos de los sondeos ST1 y ST2.

Los valores promedio del ángulo de fricción y de la cohesión son los siguientes:

Sondeo	Litotipo	Tipo de roca	$\phi$ (°)	c (MPa)
ST6	Toba	II	30-37	0,50
ST7	Dacita	II	30-36	0,33
ST7	Andesita	II	36-42	0,70
ST1	Riolita	III	28-33	0,13
ST2	Dacita	IV	15-20	0,05
ST3	Granodiorita	II	46-51	0,75
ST4	Andesita	II	36-42	0,70

## 7.2 Tubería de baja presión y Chimenea de Equilibrio

El macizo de la formación Misahuallí que será afectado por la Tubería de baja presión y, eventualmente, por la Chimenea de Equilibrio, fue investigado con el sondeo SCE1 que atravesó, en una longitud de 130 (entre cota 1.114 y 984 m) solo litotipo de brecha de clastos grandes muy bien cementada, extraordinariamente compacta y maciza (Figura C/2).



De la elaboración y procesamiento de los datos de campo y de los resultados de laboratorio se obtiene la clasificación geomecánica de la roca investigada en base al índice RMR:

Datos de campo:	Recuperación	100%		
	RQD	100%		
	Fracturación	F-1 (< 1 fractura por metro)		
	Alteración	A-1 (roca sana)		
	Permeabilidad	13-18 UL		
Datos de laboratorio:	Compresión monoaxial	Cota (m)	$\sigma_c$ (MPa)	
		1.096	164	
		1.036	64*	
		1.019	222	
		1.004	119	
		989	189	
	* Espécimen fisurado	$\bar{x}$	174 $\pm$ 43	
	Compresión triaxial		$\sigma_1$	$\sigma_3$
		1.019	332	20
			417	40

La elevada permeabilidad de este litotipo muy compacto y macizo está relacionada a la presencia de pocas fracturas abiertas, rugosas y oxidadas.

El índice RMR = 75 que se obtiene es típico de una roca de buena a muy buena calidad.

A continuación se dan los parámetros de deformabilidad y resistencia estimados a partir del índice RMR:

RMR	$E_M$ (GPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	m	s
75	42	45	0,3	3,8	0,015

Las constantes m y s se obtuvieron reduciendo el valor  $m'_1$  calculado a partir de los resultados de compresión monoaxial y triaxial. Estos valores se relacionan muy bien a la tabla de Hoek-Brown para la determinación de m y s.

La envolvente de resistencia que caracteriza este macizo se presenta en la Figura C/43 donde, para fines de comparación, se indican también las envolventes del macizo de la Tubería de alta presión y de Casa de Máquinas descritos en los siguientes capítulos. Los valores de resistencia relativos:

$\sigma$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)
0,0	2,0	68,3	2,0
0,5	3,1	65,0	2,0
1,1	4,0	62,9	2,0
2,0	5,9	59,3	2,5
3,0	7,4	57,0	2,7
4,0	9,0	55,0	3,2
5,0	10,4	53,4	3,6
7,0	12,8	51,0	4,1
10,0	16,4	48,0	5,2

Los valores promedio, en el rango de esfuerzos normales  $\sigma = 0-10$  MPa, son los siguientes:

$$\phi = 55^{\circ}-60^{\circ}, \quad c = 2,0 \text{ MPa}$$

### 7.3 Tubería inclinada de alta presión

El macizo de la formación Misahuallí, en la margen derecha del sector Codo Sinclair, en el cual está diseñada la alternativa de Tubería inclinada de alta presión, fue investigada con una galería exploratoria de 147 m de longitud, denominada GTP1, y con tres sondeos verticales profundos. Desde el punto de vista litológico el macizo está constituido por tobas volcánicas rojizas y verdosas con inclusiones lávicas de riolitas y andesitas.

7.3.1 Clasificación del macizo La clasificación de este macizo se define a través del estudio del mapeo geoestructural de la galería y de los registros de perforación de los sondeos.

En base a las diferentes características geomecánicas observadas, la galería se puede dividir en tres tramos:

#### Abscisa (m)

0+000-0+095	Roca muy descomprimida, alterada, muy fracturada, con fracturas abiertas, rellenadas de material arcilloso, tramos fallados. Filtraciones abundantes: de goteos continuos a chorros. Entibado continuo de 0+000 a 0+040 m y luego, por tramos, hasta la abscisa 0+075 m.
0+095-0+120	Roca descomprimida, medianamente alterada y fracturada, disminuye la abertura de las fracturas y el relleno. Filtraciones: chorros debidos a fuertes y goteos continuos.

0+120-0+147 Roca poco alterada, fracturada, con escaso material de relleno en las fracturas.

Filtraciones: chorros débiles y goteos intercalados a tramos secos.

La relativa clasificación geomecánica según Bieniawski es la siguiente:

Abscisa	Indice RMR	Tipo de roca	Calidad de roca
0+000-0+095	< 20	V	muy mala
0+095-0+120	30	IV	mala
0+120-0+147	50	III	regular

Por efecto de la descompresión de la ladera del valle que ha determinado una intensa fracturación de la roca, el 80% de la galería está caracterizado por la presencia de roca mala a muy mala. La alteración de la roca y el relleno en las fracturas está relacionado a la intensa circulación hídrica que acarrea material arcilloso y arenoso.

De los tres sondeos que investigaron el macizo de la Tubería inclinada hasta alcanzar casi la cota superior de la Casa de Máquinas, uno fue ejecutado durante la Fase A (SCM2) y dos en la Fase B (SCM8 y SCM9). Debido a la inestabilidad de la ladera y consecuentes problemas de instalación de los equipos, el sondeo SCM9 fue perforado a partir de la galería GTP1.

La clasificación geomecánica de la roca encontrada, basada en las determinaciones de campo y en los criterios de interpretación presentados anteriormente (Plano 0209-G-2900), es la siguiente:

Cota (m s.n.m.)	Espesor (m)	Tipo de roca	Calidad de roca
Sondeo SCM2 Cota inicial 862 m			
851-772	80	V	muy mala
772-765	7	II	buena
765-748	17	IV	mala
748-662	86	III	regular
Sondeo SCM8 Cota inicial 875 m			
861-809	52	V	muy mala
809-791	18	IV	mala
791-781	10	II	buena
781-775	6	V	muy mala
775-770	5	III	regular
770-767	3	IV	mala
767-739	28	III	regular
739-725	14	II	buena
725-721	4	III	regular
721-715	6	II	buena
715-705	10	III	regular
705-654	51	II	buena
Sondeo SCM9 Cota inicial 831 m			
831-797	34	III	regular
797-784	13	II	buena
784-780	4	IV	mala
780-761	19	II	buena
761-756	5	IV	mala
756-749	7	II	buena
749-709	40	III	regular
709-704	5	IV	mala
704-696	8	II	buena
696-687	9	III	regular
687-681	6	II	buena

En resumen, la repartición de cada tipo de roca en estos sondeos es la siguiente:

	SCM2	SCM8	SCM9
Tipo II (%) 7	60	35	
Tipo III (%) 78	34	55	
Tipo IV (%) 16	7	10	

El tipo de roca predominante en esta zona del macizo resulta ser el tipo III; el tipo II es también abundante sobre todo en las cotas más bajas. La Tubería inclinada de alta presión cruzará ambos tipos de roca como se ilustra gráficamente en la Figura C/44.

### 7.3.2 Parámetros de deformabilidad y resistencia

- Los parámetros de deformabilidad del macizo pueden ser evaluados en forma indirecta en base al índice RMR determinado por cada tramo de la galería exploratoria GTP1 caracterizados por diferentes tipos de roca.

Abscisa (m)	Tipo de roca	RMR	Módulo de deformación (GPa)
0+000-0+095	V	< 20	< 3
0+095-0+120	IV	30	3
0+120-0+147	III	50	10

Por otro lado, de los ensayos de carga directa sobre placa llevados a cabo en esta galería en roca tipo III, se obtuvieron valores  $E_{DEF}$  variables de 6.500 a 8.000 MPa.

Estos valores de deformabilidad, relativos a la parte superficial del macizo, se complementan con el valor relativo al interior del macizo y a una roca de tipo II, obtenido de los sondeos mencionados, que, para un índice de RMR = 70, es de 30 GPa.

- Los parámetros de resistencia del macizo obtenidos en base a los métodos de Bieniawski y de Hoek-Brown son los siguientes, para los tipos de roca III, IV y V encontrados en la galería GTP1:

#### Método de Bieniawski

Tipo de roca	Angulo de fricción $\phi$ (°)	Cohesión c (MPa)
III 35-40	0,15-0,20	
IV 30-35	0,10-0,15	
V	< 30	< 0,10

#### Método de Hoek-Brown

	m	s
III 0,60	$10^{-3}$	
IV 0,15	$10^{-4}$	
V	0,08	$10^{-5}$

Con estos valores de  $m$  y  $s$ , en base a la ecuación de Hoek-Brown, se obtienen los envolventes de ruptura del macizo en el plano  $\sigma$ - $\tau$  ilustrados en la Figura C/45.

El valor promedio de  $\sigma_c$ , resultado de los ensayos de compresión monoaxial en laboratorio sobre muestras tomadas de los sondeos SCM2, SCM8 y SCM9, es el siguiente:

Sondeo	Cota (m s.n.m.)	$\sigma_c$ (MPa)
SCM2	736	154
	713	107
	698	109
	687	108
	687	62
	682	130
	668	49
SCM8	743	123
	723	107
	704	42
	692	189
	685	51
	679	159
	656	180
SCM9	775	73
	755	88
	713	119
	700	58
	693	90
		$\bar{x}$ 105
		$s$ 44

Entonces, los parámetros de resistencia, calculados según el método de Hoek-Brown, para los tipos de roca III, IV y V son los siguientes:

$\sigma$ (MPa)	Tipo de Roca III			Tipo de roca IV			Tipo de roca V		
	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)
0,0	0,3	65	0,3	0,1	61	0,1	0,1	67	0,1
0,5	1,1	54	0,4	0,1	42	0,3	0,6	37	0,2
1,0	1,6	49	0,5	1,1	36	0,4	0,9	31	0,3
2,0	2,7	43	0,9	1,7	30	0,6	1,4	24	0,5
5,0	5,0	34	1,6	3,1	22	1,1	2,4	17	0,9
8,0	6,9	30	2,3	4,1	18	1,5	3,2	14	1,2
10,0	8,0	28	2,8	4,7	17	1,7	3,7	13	1,5

Los valores promedio, en el rango de esfuerzos normales  $\sigma = 0-10$  MPa en la sección de la tubería, asumiendo  $\sigma = 2,5\gamma z$  donde  $\gamma = 2,6 \text{ t/m}^3$  y  $z = 100-200$  m, son los siguientes:

		Tipo de roca		
		III	IV	V
Angulo de fricción	$\phi$ (°)	38-44	25-30	20-25
Cohesión	c (MPa)	0,30	0,14	0,04

Los parámetros de resistencia del macizo obtenidos de los sondeos rotativos para la roca de tipo III, IV y V son iguales a los valores obtenidos para la galería GTP1. Pero a estos parámetros se pueden añadir aquellos relativos a la roca tipo II no atravesada en galería y, al contrario, encontrada, en las perforaciones:

Tipo de roca	m	s	$\sigma_c$ (MPa)
II	1,60	0,0029	105

Los parámetros  $\tau$ ,  $\phi$ , c, calculados según el método de Hoek-Brown para el tipo de roca II, son los siguientes:

$\sigma$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)
0,0	0,5	69	0,5
0,5	1,5	61	0,6
1,0	2,3	57	0,7
2,0	3,4	52	0,8
5,0	6,8	44	2,0
8,0	9,6	39	3,1
10,0	11,0	37	3,5

En la Figura C/46 se ilustra la envolvente de ruptura para la roca tipo II comparada con la envolvente de los tipos III y IV.

Los valores promedio del ángulo de fricción y cohesión del macizo afectado por la Tubería inclinada de alta presión, en el rango de esfuerzos normales  $\sigma = 0-10$  MPa en la sección de la tubería, son los siguientes:

Tipo de roca II		
Angulo de fricción	$\phi$ (°)	52-47
Cohesión	c (MPa)	0,50

- Para determinar los parámetros de resistencia de las discontinuidades en la roca tipo III, es decir en el tipo de roca probablemente más afectado por la Tubería inclinada, se utilizará el método propuesto por Barton. Al respecto anotamos que, para rocas de peor calidad correspondiente al nivel más superficial de macizo, descomprimido y fracturado, este método no sería representativo.

En base a los ensayos de corte en laboratorio sobre litotipos análogos, tomados en sitios aledaños a la tubería, se obtuvieron los siguientes resultados:

Sondeo	Cota (m snm)	Litología	Perfil de rugosidad	$\phi_{MAX}$ (°)	$\phi_R$ (°)
SCM2	668	Toba	ondulada/lisa	38	36
SCM4	640	Toba	ondulada/lisa	45	40
	640	Toba	plana/lisa	56	47
SC4	1.119	Toba	ondulada/rugosa	63	57
	1.112	Toba	ondulada/rugosa	45	40
	1.095	Toba	ondulada/rugosa	51	31
				$\bar{x}$	49
					41

Para los cálculos de JCS y JRC que seguirán, se asume  $\phi_{MAX} = 49^\circ$  y  $\phi_R = 36$  (en vista de que los ensayos de corte fueron efectuados con desplazamientos reducidos) y  $\sigma_c = 90$  MPa:

$$JCS = \sigma_c \times 0,7 \quad (\text{siendo } 0,7 \text{ un factor de reducción})$$

$$JCS = 90 \times 0,7 = 60 \text{ MPa}$$

En base a la ecuación de Barton:  $\phi_{MAX} = JRC \log_{10} JCS/\sigma + \phi_R$ , siendo  $\log_{10} JCS/\sigma = 60/1 = 1,75$ , donde  $\sigma \approx 1$  MPa (valor promedio del primer ciclo de carga para determinar  $\phi_{MAX}$ ), se obtendrá:



$$JRC = \frac{\phi_{MAX} - \phi_R}{\log_{10} \frac{JCS}{\sigma}} = \frac{49-36}{1,57} = 7_{aprox.}$$

que corresponde muy bien a las observaciones de laboratorio que evidencian valores de JRC de 4 a 10.

Para el cálculo de la envolvente de pico de Barton, considerando que:

- la dilatancia  $i$  determinada en laboratorio es:

$$i_{LAB} = \phi_{MAX} - \phi_R = 49^\circ - 36^\circ = 13^\circ$$

- por ser las fracturas in situ más abiertas y, eventualmente, con algo de relleno, resulta conveniente introducir un factor de reducción de 0,5, por lo cual:

$$i = 13^\circ \times 0,5 = 6,5^\circ$$

- JCS in situ se asume reducido de un 0,75 respecto al JCR de laboratorio

$$JCS = 60 \times 0,75 = 45 \text{ MPa}$$

- en base a la ecuación  $i = JRC \log_{10} JCS/\sigma$ , siendo  $\sigma = 10 \text{ MPa}$  el esfuerzo máximo que actúa en el sector,

$$6,5 = JRC \log_{10} 45/10$$

$$JRC = 6,5/0,65 = 10, \quad \text{compatible con las observaciones de campo,}$$

finalmente, se obtendrá de la ecuación de Barton:

$$\phi_{MAX} = 42,5^\circ \quad \phi_R = 36^\circ$$

Introduciendo en la ecuación de Barton un valor de cohesión de 0,2 MPa se obtendrá (para JCS = 45 MPa y JRC = 10):

$\sigma$ (MPa)	$\tau$ (MPa) Barton	$\tau+c$ (MPa) Hoek-Brown
0,0	0,0	0,2
0,5	0,7	0,7
1,0	1,3	1,5
2,0	2,3	2,5
3,0	3,3	3,5
4,0	4,2	4,4
5,0	5,0	5,2
10,0	9,0	9,2

Las envolventes de ruptura de las discontinuidades según Barton y según Hoek-Brown están representadas en la Figura C/47. Los valores promedio de resistencia, en el rango de  $\sigma = 0-10$  MPa, resultan entonces muy próximos entre ellos:

Según Barton

$$\begin{aligned}\phi &= 42^{\circ}-45^{\circ} \\ c &= 0,2 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Según Hoek-Brown

$$\begin{aligned}\phi &= 38^{\circ}-44^{\circ} \\ c &= 0,3 \text{ MPa}\end{aligned}$$

#### 7.4 Tubería de presión con pozo vertical

El macizo de la formación Misahuallí que será afectado por la alternativa de Tubería de presión con pozo vertical, fue investigado con el sondeo SCE2, desde la cota 1.140 hasta la cota 818 m.

Los litotipos atravesados fueron los siguientes (Figura C/48):

- . Toba dacítica (18%)
- . Brecha tobácea (58%)
- . Brecha de clastos grandes (24%)

La brecha tobácea se correlaciona con la roca encontrada en la zona de la Tubería inclinada y de Casa de Máquinas. La brecha de clastos grandes con la roca encontrada en la zona de la Tubería de baja presión y de la Chimenea de Equilibrio.

Sin embargo, a lo largo de todo el sondeo SCE2, los litotipos se presentaron bastante fracturados y fallados en sentido predominantemente inclinado a subvertical.

Los valores de resistencia a la compresión monoaxial ( $\sigma_c$ ) obtenidos en laboratorio y presentados en la Figura C/48, diferencian bien los litotipos citados.

Los valores promedio de  $\sigma_c$ , correspondientes a estos dos litotipos, en los diferentes sitios de obra son:

Sitio de obra	Brecha tobácea	Brecha de clastos grandes
Tubería de alta presión con pozo vertical	44	83
Tubería de baja presión	-	174
Tubería inclinada	103	-
Casa de Máquinas	91	-

Cabe anotar que, para ambos litotipos, los valores de resistencia a la compresión, en la zona de la Tubería con pozo vertical, resultan netamente más bajos.

7.4.1 Clasificación del macizo El procesamiento de los datos de campo obtenidos del sondeo SCE2 y de los ensayos de laboratorio permite la clasificación geomecánica de los litotipos encontrados:

Sondeo SCE2 Cota inicial 1.238 m

Cota (m s.n.m.)	Espesor (m)	Tipo de roca	Calidad de roca	RMR
1.140-1.130	10	IV	mala	30
1.130-1.125	5	V	muy mala	<20
1.125-1.113	12	IV	mala	30
1.113-1.110	13	II	buena	70
1.110-1.099	1	IV	mala	30
1.099-1.081	18	II	buena	70
1.081-1.075	6	III	regular	50
1.075-1.070	5	IV	mala	30
1.070-1.065	5	III	regular	50
1.065-1.055	10	IV	mala	30
1.055-1.025	30	II	buena	70
1.025-1.019	6	III	regular	50
1.019-1.010	9	V	muy mala	<20
1.010-1.002	8	III	regular	50
1.002-995	7	II	buena	70
995-983	12	III	regular	50
983-968	15	II	buena	70
968-950	18	III	regular	50
950-948	2	IV	mala	30
948-937	11	III	regular	50
937-912	25	V	muy mala	<20
917-894	18	II	buena	70
894-885	9	V	muy mala	<20
885-862	23	II	buena	70
862-845	17	V	muy mala	<20
845-840	5	II	buena	70
840-830	10	V	muy mala	<20
830-818	12	II	buena	70

Resumiendo, la repartición de los tipos de roca por litotipos es la siguiente:

Litotipo	II		III		IV		V		Total	
	Longitud (m)	%	Longitud (m)	%	Longitud (m)	%	Longitud (m)	%	m	%
Toba dacítica	5	9	17	31	10	18	24	43	56	18
Brecha tobácea	83	45	66	35	29	16	9	5	187	58
Brecha de clastos grandes	54	68	-	-	-	-	26	32	80	24
Totales	142	44	83	26	39	12	58	18	322	100

En conclusión, el macizo afectado por esta obra resulta estar constituido en un 70% de rocas buenas a regulares y en un 30% de rocas malas a muy malas.

Las rocas malas son mayormente tobas dacíticas y, en las cotas más bajas, brechas de clastos grandes falladas.

Las rocas buenas y regulares son mayormente brecha tobácea y brecha de clastos grandes cuando no están afectadas por fallas.

7.4.2 Parámetros de deformabilidad y resistencia Para los cuatro tipos de roca identificados, los parámetros de deformabilidad y resistencia, en base al índice RMR, son:

Tipo de roca	RMR	Módulo de deformación (GPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)
II	70	31	40-45	0,20-0,30
III	50	10	35-40	0,15-0,20
IV	30	3	30-35	0,10-0,15
V	<20	<3	<30	<0,10

Aplicando el criterio de Hoek-Brown, se puede determinar los parámetros de resistencia para los litotipos predominantes; brechas tobáceas en la parte superior del macizo y brechas de clastos grandes en la parte inferior, y para cada tipo de roca, utilizando los siguientes resultados de laboratorio:

	Compresión triaxial		Compresión monoaxial
	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)
Brecha tobácea	10	110	$\bar{x} = 44$
	20	178	
	30	231	
Brecha de clastos grandes	10	116	$\bar{x} = 83$
	20	186	
	30	210	

Introduciendo estos valores en la ecuación de Hoek-Brown  $\sigma_1 = \sigma_3 + (m_1 \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2)^{0.5}$ , asumiendo  $s = 1$ , se obtiene el valor  $m_1$  ( $m$  de la roca intacta), Figura C/49.

Para determinar el valor de las constantes de resistencia  $m$  y  $s$  se utilizarán las siguientes relaciones de Hoek-Brown, 1988:

$$m = m_1 \cdot \exp \frac{\text{RMR}-100}{14}$$

$$s = \exp \frac{\text{RMR}-100}{6}$$

Los valores calculados de  $m$  y  $s$  para los diferentes tipos de rocas son:

Litotipo		Tipo de roca			
		II	III	IV	V
Brecha tobácea $m_i = 23$	$m$	2,70	0,64	0,15	0,075
	$s$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Brecha de clastos grandes $m_i = 10$	$m$	1,17	0,28	0,067	0,033
	$s$	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$

Los valores de resistencia de las envolventes de estos litotipos se presentan a continuación, mientras que los gráficos de las ecuaciones asociadas al criterio de ruptura no lineal de Hoek-Brown, para la parte superior del macizo con brecha tobácea predominante y para la parte inferior con brecha de clastos grandes, se ilustran en las Figuras C/50 y C/51, respectivamente.

## Tubería de presión con pozo vertical

Valores de resistencia de las envolventes de la brecha tobácea

$\sigma$ (MPa)	Tipo de Roca II			Tipo de roca III			Tipo de roca IV		
	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\tau$ (MPa)
0	68,7	0,39	0,39	70,0	0,08	0,08	72,5	0,01	0,01
2	48,4	1,03	3,30	35,4	0,65	2,08	22,0	0,46	1,27
5	40,2	1,90	6,20	26,7	1,28	3,80	15,2	0,88	2,24
8	36,0	2,50	8,40	22,6	1,87	5,20	12,3	1,22	2,97
10	33,7	3,10	9,80	20,8	2,20	6,00	11,1	1,43	3,40
15	29,2	5,00	13,50	17,6	2,90	7,70	9,2	1,87	4,30
20	27,2	5,40	15,70	15,6	3,60	9,20	8,0	2,20	5,00

## Tubería de presión con pozo vertical

Valores de resistencia de las envolventes de la brecha de clastos grandes

$\sigma$ (MPa)	Tipo de Roca II			Tipo de Roca V		
	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	c (MPa)	$\tau$ (MPa)
0	64,0	0,50	0,50	65,6	0,01	0,01
2	45,5	1,30	3,40	15,5	0,34	0,90
5	37,6	2,20	6,10	10,2	0,66	1,60
8	33,5	2,90	8,20	8,2	0,87	2,00
10	31,5	3,20	9,40	7,5	0,98	2,30
15	27,7	4,40	12,30	6,0	1,30	2,90
20	25,2	5,40	14,80	5,2	1,50	3,40

En el rango de  $\sigma = 0-20$  MPa, los parámetros promedio de resistencia son:Brecha tobácea (Parte superior del macizo)

Tipo de roca		II	III	IV
$\phi$	(°) 38-43	24-30	15-19	
c	(MPa)	0,39	0,08	0,01

Brecha de clastos grandes y toba dacítica (Parte inferior del macizo)

Tipo de roca	II	V
$\phi$ (°) 35-41	10-13	
c (MPa)	0,50	0,01

Como conclusión se puede establecer lo siguiente:

- Los parámetros de resistencia de la roca de buena calidad (tipo II) son los mismos para todos los litotipos.
- En la parte superior del macizo se identifica una alternancia de diferentes tipos de roca de II a V.
- En la parte inferior del macizo solamente se identifican los tipos II y V. Este último tipo de roca, con sus bajos parámetros de resistencia, condiciona el comportamiento geomecánico de esta parte del macizo.

## 7.5 Casa de Máquinas

El macizo de la formación Misahuallí, en la parte inferior de la margen derecha del río Coca en el sector Codo Sinclair, estará afectado por la excavación de la caverna donde se ubicará la Casa de Máquinas y los túneles de acceso y descarga.

Esta parte del macizo ha sido investigado por medio de la galería exploratoria GCM1 de 420 m de longitud y dirección E-W, y de un crucero de 60 m de longitud, con dirección N-S, ubicado casi al fondo del tramo recto de la galería.

Este macizo ha sido investigado también con dos sondeos horizontales perforados a partir del fondo de la galería (SCM4, profundidad 80 m) y del fondo del crucero (SCM7, profundidad 100 m). Además los sondeos verticales SCM2, SCM8 y SCM9, en sus tramos finales, alcanzaron parcialmente las cotas superiores de la futura caverna y la zona de unión entre la Casa de Máquinas y el tramo final de la Tubería de Presión.

El mapeo geoestructural detallado de la galería GCM1 ha sido tomado como base para la clasificación geomecánica del macizo.

7.5.1 Clasificación del macizo La roca atravesada con la galería exploratoria GCM1 es en gran mayoría una toba volcánica compacta, fracturada, sana, con xenolitos de riolita en el primer tramo de 0+100 a 0+120 m. La clasificación geomecánica se realizó en base a los estudios geoestructurales y a los resultados de los ensayos in situ y en laboratorio.

A lo largo de la galería se han identificado tramos con condiciones geológicas y estructurales homogéneas: para todos estos se han evaluado los parámetros que permiten cuantificar el valor RMR de Bieniawski (Cuadro C/21).

Cuadro C/21

Galería exploratoria GCM1

## CLASIFICACION GEOMECANICA SEGUN BIENIAWSKI

Parámetro	0+000-0+125 m		0+125-0+165 m		0+165-0+280 m		0+280-0+300 m		0+300-0+350 m	
	Indice									
A	70 MPa	12	109 MPa	15	109 MPa	15	115 MPa	12	90-100 MPa	10
B	50%	10	25-50%	8	50-75%	13	0-25%	3	50-75%	13
C	0,3-0,6 m	15	0,3-0,5 m	15	0,6-1,0 m	22	<0,05-0,3 m	7	0,5-1,0 m	20
D	Fracturas onduladas, poco rugosas abiertas	20	Fracturas onduladas lisas, rugosas abiertas c/mi- lonita	3	Fracturas onduladas, lisas a rugo- sas abrt. mm	20	Zona fallada, alterada	0	Fracturas onduladas poco rugosas abert. mm	18
E	Seco- goteos	10	Chorros débiles	5	Goteos débiles	7	Chorros débi- les a fuertes	4	Goteos débiles	6
F	Regular	-5	Regular	-5	Regular	-5	Regular a a favorable	-3	De regular a favorable	-3
RMR		62		41		72		23		64
Tipo	Roca buena	II	Roca regular	III	Roca buena	II	Roca mala	IV	Roca buena	II
	0+350-0+380 m		0+380-0+420 m		Crucero 0+000-0+047 m		Crucero 0+047-0+053 m		Crucero 0+053-0+060 m	
A	31 MPa	4	101 MPa	15	124 MPa	15	40 MPa	7	50-60 MPa	12
B	0-50%	6	50-75%	13	50-75%	13	0-25%	5	25-50%	8
C	0,1-0,2 m	7	0,3-1,0 m	20	0,2-1,0	20	<0,05-0,2 m	7	0,05-0,3 m	10
D	Zona fallada alterada	0	Fracturas onduladas, poco rugosas	18	Fracturas onduladas, poco rugosas abert. mm	20	Zona de falla alteración	0	Fracturas onduladas, lisas, poco rugosas, oxid.	10
E	Chorros fuertes	4	Goteos	7	Goteos	7	Chorros débiles	5	Goteos contin.	7
F	De regular a favorable	-3	De regular a favorable	-3	Regular	-5	Regular	-5	Regular	-5
RMR		18		70		70		19		42
Tipo	Roca muy mala	V	Roca buena	II	Roca buena	II	Roca muy mala	V	Roca regular	III



A continuación se presentan, en forma resumida, los resultados de la clasificación geomecánica del macizo rocoso investigado con la galería:

Abscisa (m)	RMR	Tipo de roca	Calidad de la roca
Tramo recto			
0+000-0+125	62	II	buena
0+125-0+165	41	III	regular
0+165-0+280	72	II	buena
0+280-0+300	23	IV	mala
0+300-0+350	64	II	buena
0+350-0+380	18	V	muy mala
0+380-0+420	70	II	buena
Crucero			
0+000-0+047	70	II	buena
0+047-0+053	19	V	muy mala
0+053-0+069	42	III	regular

El macizo rocoso se presenta, en general, homogéneo y constituido de rocas de buenas características geomecánicas. Solamente en unos cortos tramos fallados la calidad de la roca es de mala a muy mala. Las condiciones generales de la roca presentan un empeoramiento también entre la abscisas 0+125 y 0+165 m en el tramo recto y al final del crucero donde la calidad de la roca es solo regular.

Como lo mencionado anteriormente, el macizo de la Casa de Máquinas fue investigado también con los dos sondeos horizontales SCM4 y SCM7, los cuales evidenciaron la misma litología compuesta predominantemente por tobas volcánicas con inclusiones de grandes xenolitos de riolita y andesita.

Con base en los criterios de identificación ya presentados (Plano 0209-G-2900), se efectuó una clasificación geomecánica de los sondeos, comparable a la de Bieniawski para la galería, que sirve para verificar y complementar las evaluaciones antes comentadas.

Con base en los registros de sondeo y en los datos analíticos de laboratorio se obtiene lo siguiente (Figura C/52):

Longitud (m)	Espesor (m)	Tipo de roca	Calidad de roca
Sondeo SCM4 Cota 640 m			
0-14	14	II	buena
14-20	6	III	regular
20-28	8	II	buena
28-31	3	V	muy mala
31-49	18	II	buena
49-52	3	III	regular
52-58	6	II	buena
58-61	3	V	muy mala
61-69	8	III	regular
69-80	11	II	buena
Sondeo SCM7 Cota 639 m			
0-2	2	III	regular
2-12	10	II	buena
12-16	4	III	regular
16-22	6	II	buena
22-25	3	III	regular
25-35	10	II	buena
35-39	4	IV	mala
39-44	5	II	buena
44-50	6	III	regular
50-59	9	II	buena
59-63	4	IV	mala
63-66	3	II	buena
66-71	5	III	regular
71-95	24	II	buena
95-100	5	III	regular

En resumen, la repartición de cada tipo de roca en estos sondeos es la siguiente:

		SCM4	SCM7
Tipo II	(%)	71	67
Tipo III	(%)	21	25
Tipo IV	(%)	-	8
Tipo V	(%)	8	-

El tipo de roca predominante en esta zona del macizo es el tipo II que, sin embargo, se alterna frecuentemente con el tipo III. La roca de tipo V, en el sondeo SCM4, y de tipo IV, en el sondeo SCM7, corresponde a tramos fallados.

La roca investigada con estos sondeos no difiere de la encontrada en la galería y, por lo tanto, quedan válidos los parámetros calculados para los diferentes tipos de roca de la galería.

7.5.2. Parámetros de deformabilidad y resistencia Como lo indicado, la clasificación de Bieniawski permite evaluar, por medio de correlaciones de tipo empírico, los parámetros de deformabilidad y de resistencia de un macizo rocoso.

El índice RMR está relacionado directamente con el módulo de deformabilidad in situ  $E_M$ , por medio de la relación propuesta por Bieniawski (1978).

$$E_M = 2 \text{ RMR} - 100 \text{ (GPa)} \quad \text{para RMR} > 50;$$

para valores de RMR < 50 vale la relación modificada por Serafim-Pereira (1983):  $E_M = 10 \frac{\text{RMR}-10}{40} \text{ GPa}$ .

A continuación se presentan los valores de los módulos de deformabilidad relativos a la roca de la galería GCM1:

Calidad de la roca	RMR	$E_M$ (GPa)
Buena	62-70	20-32
Regular	41-42	6
Mala	23	2
Muy mala	18-19	< 2

Los ensayos de carga vertical sobre placa ejecutados en la galería, arrojaron los siguientes valores de módulo:

$$E_{DEF} = 7.000-15.000 \text{ MPa} \quad (\text{Tipo de roca II})$$

que, sin embargo, reflejan la descompresión que se originó en la galería por el proceso de excavación.

El índice RMR está relacionado también con los parámetros aproximados de resistencia al corte que, para los diferentes tipos de roca, son los siguientes:

Tipo de roca	Módulos de resistencia	
	$\phi$ (°)	c (MPa)
II	40-45	0,20-0,30
III	35-40	0,15-0,20
IV	30-35	0,10-0,15
V	< 30	< 0,10

Los parámetros de resistencia pueden ser evaluados también por medio del método propuesto por Høek-Brown a través de la relación entre los esfuerzos principales ya presentada anteriormente:

$$\sigma = \sigma_3 + (m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2)^{0.5}$$

donde:

$\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos máximo y mínimo de ruptura  
 $\sigma_c$  es la resistencia última a la compresión monoaxial de la roca intacta  
 $m$  y  $s$  son las constantes relacionadas al ángulo de fricción y cohesión y que dependen del tipo de roca

Estas constantes de resistencia  $m$  y  $s$  se obtienen en función del índice RMR, o bien se determinan en base a la relación indicada, introduciendo los valores de resistencia a la compresión monoaxial y triaxial obtenidos en laboratorio y considerando  $s = 1$  para la roca intacta. Del valor  $m_i$  resultante, serán determinados:

$$m = m_i \exp \frac{\text{RMR}-100}{14}; \quad s = \exp \frac{\text{RMR}-100}{6} \quad (\text{Hoek-Brown, 1988})$$

Aplicando este método a las rocas tipo II y III de Casa de Máquinas, se presenta a continuación el proceso para la adquisición de los parámetros de resistencia. Los datos de laboratorio para la definición de las constantes  $m$  y  $s$ , obtenidos de ensayos realizados sobre muestras tomadas en los sondeos próximos a la zona de Casa de Máquinas, son los siguientes:

Ensayos de compresión monoaxial:

Nota: Se toman en cuenta solamente los datos de este sondeo por ser el más próximo a la Casa de Máquinas y por tener  $\sigma_c$  menores.

Sondeo	$\sigma_c$ (MPa)	
SCM4	76	
	99	
	98	$\bar{x} = 90 \text{ MPa}$

## Ensayos de compresión triaxial:

Sondeo	Litotipo	$\sigma_1$ MPa	$\sigma_3$ (MPa)
ST6	Toba	171	15
		246	30
SCM8	Toba	211	15
		220	20
		245	30
SCM4	Andesita	213	5
		246	10
		333	20
SCM7	Riolita	162	10
		199	20

Estos datos fueron graficados en el diagrama  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  de la Figura C/53 y relacionados a una curva obtenida de la ecuación de Hoek-Brown, la más adecuada a la curva de ajuste óptima. Después de calculado  $m_i = 20$ , se obtiene para el tipo de roca II:  $m = 1,6$ ,  $s = 0,0029$  y para el tipo de roca III:  $m = 0,3$ ,  $s = 0,00006$ . Las correspondientes envolventes de ruptura en el diagrama  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  se presentan en la Figura C/54.

Con las siguientes ecuaciones asociadas al criterio de ruptura de Hoek-Brown, las envolventes en el diagrama  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  se pueden trazar en el diagrama  $\tau$ - $\sigma$  (Figura C/55):

$$\tau = (\cotan \phi - \cos \phi) m \sigma_c / 8$$

$$c = \tau - \sigma \tan \phi$$

donde:

$$\phi = \arctan [4 h \cos^2 (30 + \frac{1}{2} \arcsin h^{-1,5}) - 1]^{-0,5}$$

$$h = 1 + \frac{16 (m \sigma + s \sigma_c)}{3 m^2 \sigma_c}$$

Para las dos clases de roca consideradas en el macizo de Casa de Máquinas, los valores de resistencia de las envolventes de ruptura son:

$\sigma$ (MPa)	Tipo de Roca II			Tipo de Roca V		
	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	$c$ (MPa)	$\tau$ (MPa)	$\phi$ (°)	$c$ (MPa)
0,0	0,5	67,5	0,5	0,1	70,5	0,1
1,0	2,3	55,0	0,8	1,3	41,5	0,4
5,0	6,6	42,0	2,0	3,8	26,0	1,3
10,0	10,6	35,5	3,4	5,9	20,5	2,2
15,0	14,0	31,5	4,8	7,6	17,5	2,9

Los valores promedio, en el rango  $\sigma = 0-15$  MPa (donde  $15 \text{ MPa} \approx 2,5\gamma z$ ), son:

Tipo de roca II  $\phi = 42^\circ-47^\circ$   
 $c = 0,5 \text{ MPa}$

Tipo de roca III  $\phi = 26^\circ-33^\circ$   
 $c = 0,1 \text{ MPa}$

Los resultados presentados se refieren al macizo rocoso en su conjunto, entendido como medio continuo y uniforme.

Para investigar el comportamiento bajo esfuerzo de las discontinuidades naturales, las cuales prácticamente determinan las características de resistencia del macizo y por último la estabilidad de las obras, se utilizará el método de Barton que proporciona una razonable y bastante precisa predicción de los valores de resistencia de una fractura rugosa bajo esfuerzos normales.

Los ensayos de corte en laboratorios sobre litotipos del macizo de Casa de Máquinas han proporcionado los siguientes resultados:

Sondeo	Cota	Litotipo	Perfil de la discontinuidad	$\phi_{\text{MAX}}$	$\phi_{\text{R}}$
SCM2	668	Toba	ondulada/lisa	38,5	36
SCM4	640	Toba	ondulada/lisa	45	40
	640		plana/lisa	56	47,5
$\bar{x}$				46,5	41

Para fines de cálculos sucesivos,  $\phi_R$  se asume igual a  $38^\circ$  puesto que los ensayos de laboratorio se realizaron con desplazamientos reducidos.

La ecuación de Barton ya utilizada anteriormente es:

$$\tau = \sigma^{\text{TAN}} (\phi_R + \text{JRC} \log_{10} \text{JCS}/\sigma)$$

donde:

JRC es el coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (variable de 0 a 20)  
 JCS es la resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad  
 $\sigma$  es el esfuerzo normal sobre la discontinuidad  
 $\tau$  es el esfuerzo de corte  
 $\phi_R$  es el ángulo de fricción residual

De la ecuación de Barton se obtiene:

$$\phi_{\text{MAX}} = \text{JRC} \log_{10} \text{JCS}/\sigma + \phi_R$$

En base a los ensayos de laboratorio:

$$\begin{aligned}\phi_{\text{MAX}} &= 46,5^\circ \\ \phi_R &= 38^\circ \text{ (asumido en lugar de } 41^\circ \text{ medido)} \\ \sigma_c &= 90 \text{ MPa}\end{aligned}$$

y, multiplicando  $\sigma_c$  por un factor de reducción estimado de 0,6, se obtiene JCS =  $90 \times 0,6 = 54$  MPa.

JRC se obtiene de la relación arriba indicada, siendo

$\phi_{\text{MAX}} - \phi_R = i$  dilatancia:

$$\text{JRC} = \frac{i}{\log_{10} \frac{\text{JCS}}{\sigma}} = \frac{8,5}{1,7} = 5$$

Este valor corresponde al coeficiente de rugosidad estimado en las muestras ensayadas en laboratorio que varía de 2 a 8.

En fin, para el cálculo de la envolvente de pico de una discontinuidad in situ; se asume que la dilatancia relativa  $i = \text{JRC} \log_{10} \text{JCS}/\sigma$  sea más baja que la dilatancia obtenida en laboratorio por ser mayor el valor de  $\sigma$  y la alteración:

$$i = 8,5 \times 0,5 \approx 4 \quad (\text{siendo } 0,5 \text{ m factor de reducción})$$

Consecuentemente JCS debe ser reducido para que corresponda a las condiciones de mayor alteración de las fracturas in situ: se considera adecuado asumir un factor de reducción de 0,75 puesto que en la zona de Casa de Máquinas la alteración de las fracturas, en general, es igual a la alteración de las fracturas ensayadas.

Siendo:  $\text{JCS} = 54 \times 0,75 = 40$  MPa, será:

$$JRC = \frac{4}{\log_{10} \frac{40}{\sigma}}$$

asumiendo un esfuerzo sobre la sección de la caverna 2,5 veces el peso de la roca:

$$\sigma = 2,5 \gamma z = 2,5 \times 2,6 \text{ t/m}^3 \times 250 \text{ m} \approx 15 \text{ MPa},$$

JRC será igual a 9 que corresponde a las observaciones de campo.

Resolviendo la ecuación de Barton por  $\sigma = 15 \text{ MPa}$ ,  $\phi_{\text{MAX}} = 42^\circ$  y  $\phi_R 38^\circ$ , se obtiene, para  $JRC = 9$  y  $JCS = 40 \text{ MPa}$  (Figura C/56):

$\sigma$ (MPa)	0	0,5	1	3	5	8	10	12	15
$\tau$ (MPa)	0	0,7	1,3	3,4	5,2	7,8	9,5	11,1	13,4

y, tomando en cuenta una cohesión  $c = 0,4 \text{ MPa}$ :

$\sigma$ (MPa)	0	0,5	1	3	5	8	10	12	15
$\tau$ (MPa)	0,4	1,1	1,7	3,7	5,6	8,2	9,9	11,5	13,8
$\phi_{\text{MAX}} (^\circ)$		54	50	46	43	41	40	39	38

Los valores promedio, en el rango  $\sigma = 0-15 \text{ MPa}$ , son:

$$\begin{aligned}\phi_{\text{MAX}} &= 42^\circ-45^\circ \\ c &= 0,4 \text{ MPa}\end{aligned}$$

que, prácticamente, son los mismos parámetros de resistencia obtenidos con el método de Hoek-Brown para el macizo rocoso con  $\text{RMR} = 65$ .



## 8. RESUMEN DE LOS PRINCIPALES PARAMETROS PARA DISEÑO

Para fines de diseño se presenta en este capítulo una síntesis de los principales parámetros que caracterizan el macizo de la formación Misahuallí: permeabilidad, deformabilidad, resistencia y estado tensional del macizo.

Puesto que los aspectos geomecánicos de la formación Misahuallí fueron analizados por sectores, los parámetros que se indican a continuación están resumidos en función de las diferentes obras subterráneas del proyecto:

- Túnel de Aducción
- Tubería de baja presión y Chimenea de Equilibrio
- Tubería inclinada de alta presión
- Tubería de presión con pozo inclinado
- Casa de Máquinas

---

TUNEL DE ADUCCION

---

Parámetros	Valores	Ubicación/Sondeo
<u>Permeabilidad</u> (UL)	Baja	1-4 ST6
	Mediana	5-10 ST7
	Muy alta	> 20 ST1
	Alta	10-20 ST2
	Mediana	5-10 ST3
	Muy alta	> 20 ST4
<u>Deformabilidad</u>		
Módulo de Deformación (MPa)	30.000-40.000	ST6-ST7-ST3-ST4
	20.000	ST1
	3.000-4.000	ST2
<u>Resistencia</u>	Angulo de fricción (°)	Cohesión (MPa)
	30-37	0,50 ST6
	30-36	0,30 ST7
	36-42	0,70 ST7
	28-33	0,13 ST1
	15-20	0,04 ST2
	46-51	0,70 ST3
	36-42	0,70 ST4

---

---

TUBERIA DE BAJA PRESION Y CHIMENEA DE EQUILIBRIO

---

Parámetros		Valores	Ubicación/Sondeo
<u>Permeabilidad (UL)</u>		Alta 10-20	SCE1
<u>Deformabilidad</u>			
Módulo de Deformación	(MPa)	40.000	SCE1
<u>Resistencia</u>			
Angulo de Fricción	(°)	55-60	SCE1
Cohesión	(MPa)	2,0	SCE1
<u>Estado tensional del macizo</u>			
$\sigma_1$	(MPa)	9,5	SCE1
$\sigma_2$	(MPa)	6,0	
$\sigma_3$	(MPa)	3,5	

---

---

TUBERIA INCLINADA DE ALTA PRESION

---

Parámetros	Valores		Ubicación Sondeo/Galería
<u>Permeabilidad</u> (UL)	Alta-muy alta	10-20+	SCM9
	Baja-impermeable	5-0	SCM8
	Alta-muy alta	10-20	SCM2
<u>Deformabilidad</u>			
Módulo de Deformación (MPa)		7.000	GTP1
		30.000	SCM8-SCM9
Módulo de Elasticidad (MPa)		25.000	GTP1
<u>Resistencia</u>	Angulo de fricción (°)	Cohesión (MPa)	
	20-25	0,04	Nivel superficial des- comprimido
	25-30	0,14	Nivel descomprimido
	38-44	0,30	Nivel más interno
	47-52	0,50	Interior del macizo
<u>Estado tensional del macizo</u>			
$\sigma_1$ (MPa)	9,0		SCM8-SCM9
$\sigma_2$ (MPa)	5,5		
$\sigma_3$ (MPa)	3,0		

---

TUBERIA DE PRESION CON POZO VERTICAL

---

Parámetros	Valores		Ubicación Sondeo/Galería
<u>Permeabilidad</u> (UL)	Baja-impermeable	5-0	SCE2
<u>Deformabilidad</u>			SCE2
Módulo de Deformación (MPa)		30.000	Tramo superior
		10.000	
		3.000	
		30.000	Tramo inferior
		< 3.000	
<u>Resistencia</u>	Angulo de fricción (°)	Cohesión (MPa)	
	38-43	0,39	SCE2 Tramo superior
	24-30	0,08	
	15-19	0,01	
	36-41	0,50	Tramo inferior
	10-13	0,01	

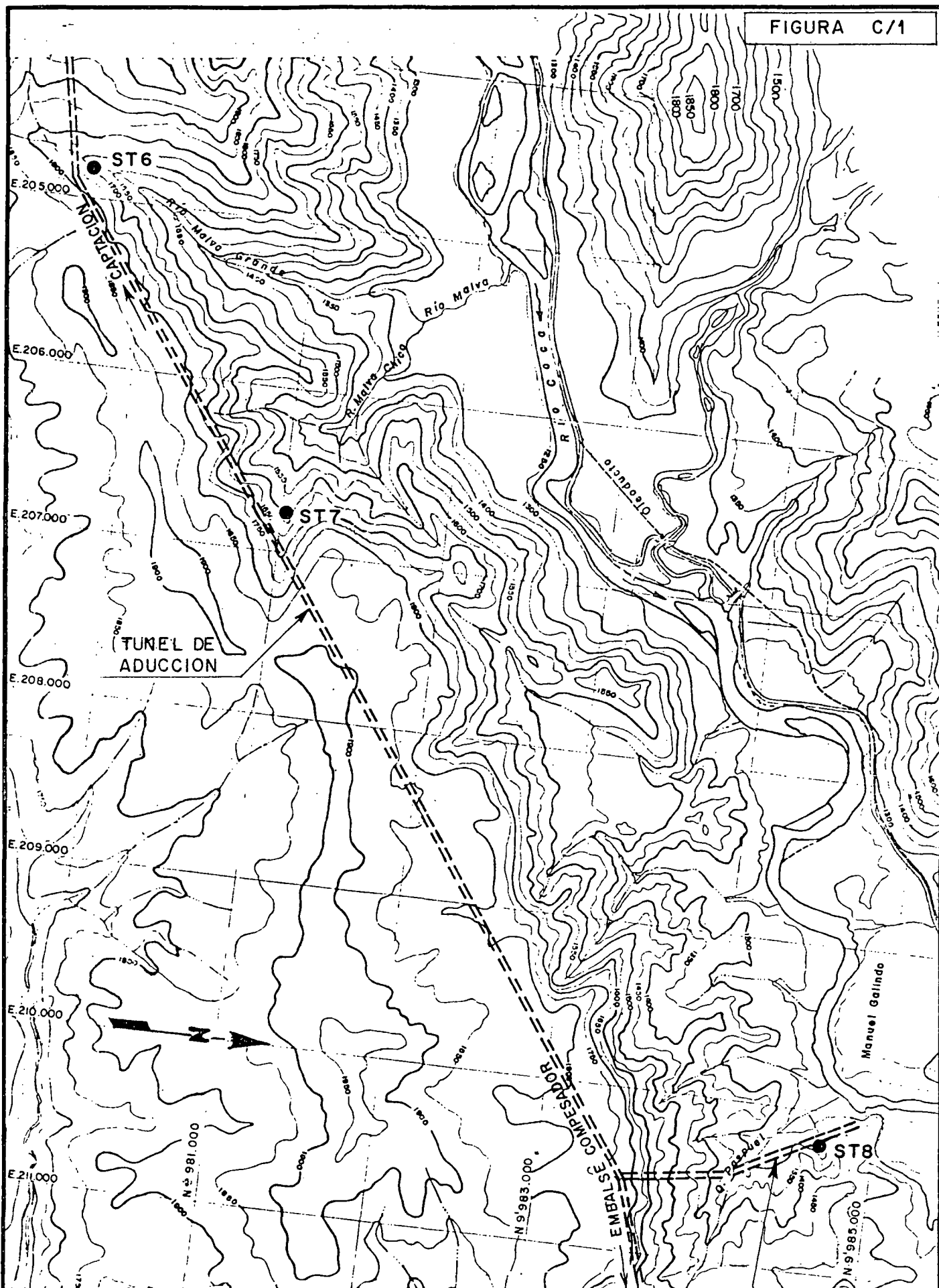
---

## CASA DE MAQUINAS

Parámetros		Valores		Ubicación Sondeo/Galería
<u>Permeabilidad (UL)</u>		Baja	1-5	GCM1
<u>Deformabilidad</u>				
Módulo de Deformación (MPa)			10.000	GCM1
Módulo de Elasticidad (MPa)			20.000	GCM1
<u>Resistencia</u>	Angulo de fricción (°)	Cohesión (MPa)		
	42-47	0,50		GCM1
	26-33	0,10		
<u>Estado tensional del macizo</u>				
$\sigma_1$	(MPa)	8,0		SCM7
$\sigma_2$	(MPa)	4,0		
$\sigma_3$	(MPa)	2,0		

PARTE C

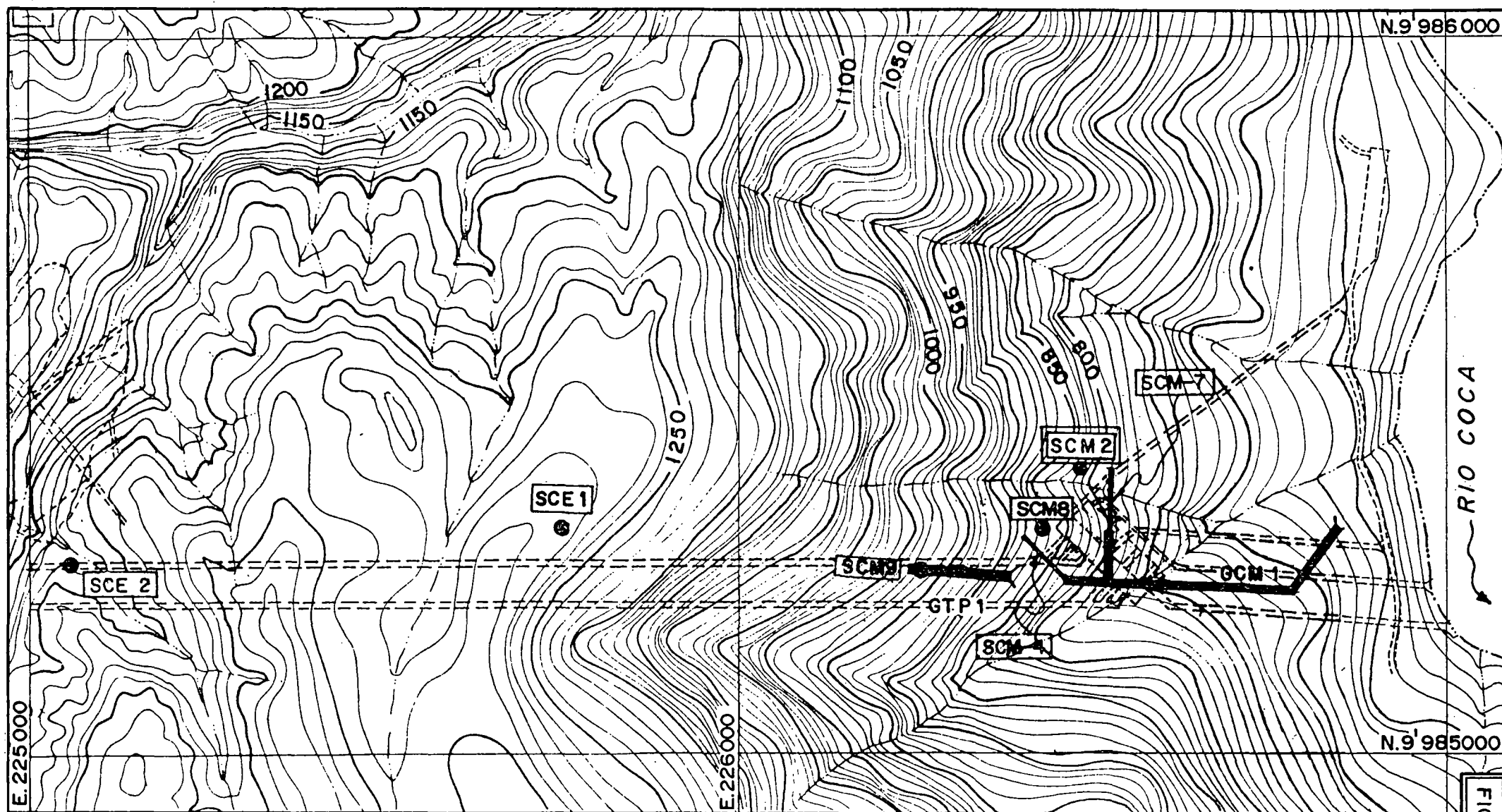
FIGURAS



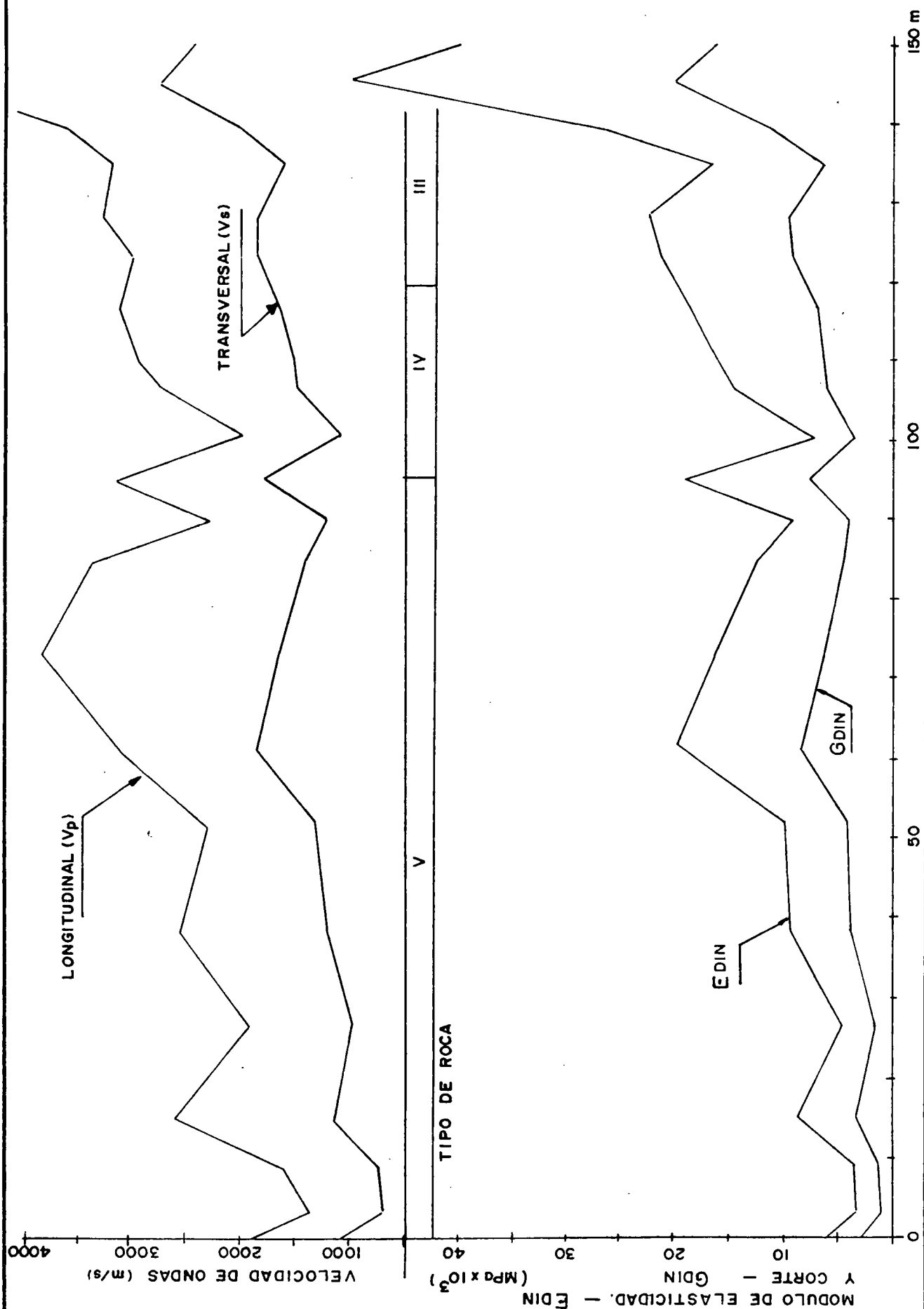
FORMACION MISAHUALLI  
 INVESTIGACIONES GEOTECNICAS  
 TUNEL DE ADUCCION  
 UBICACION DE LOS SONDEOS

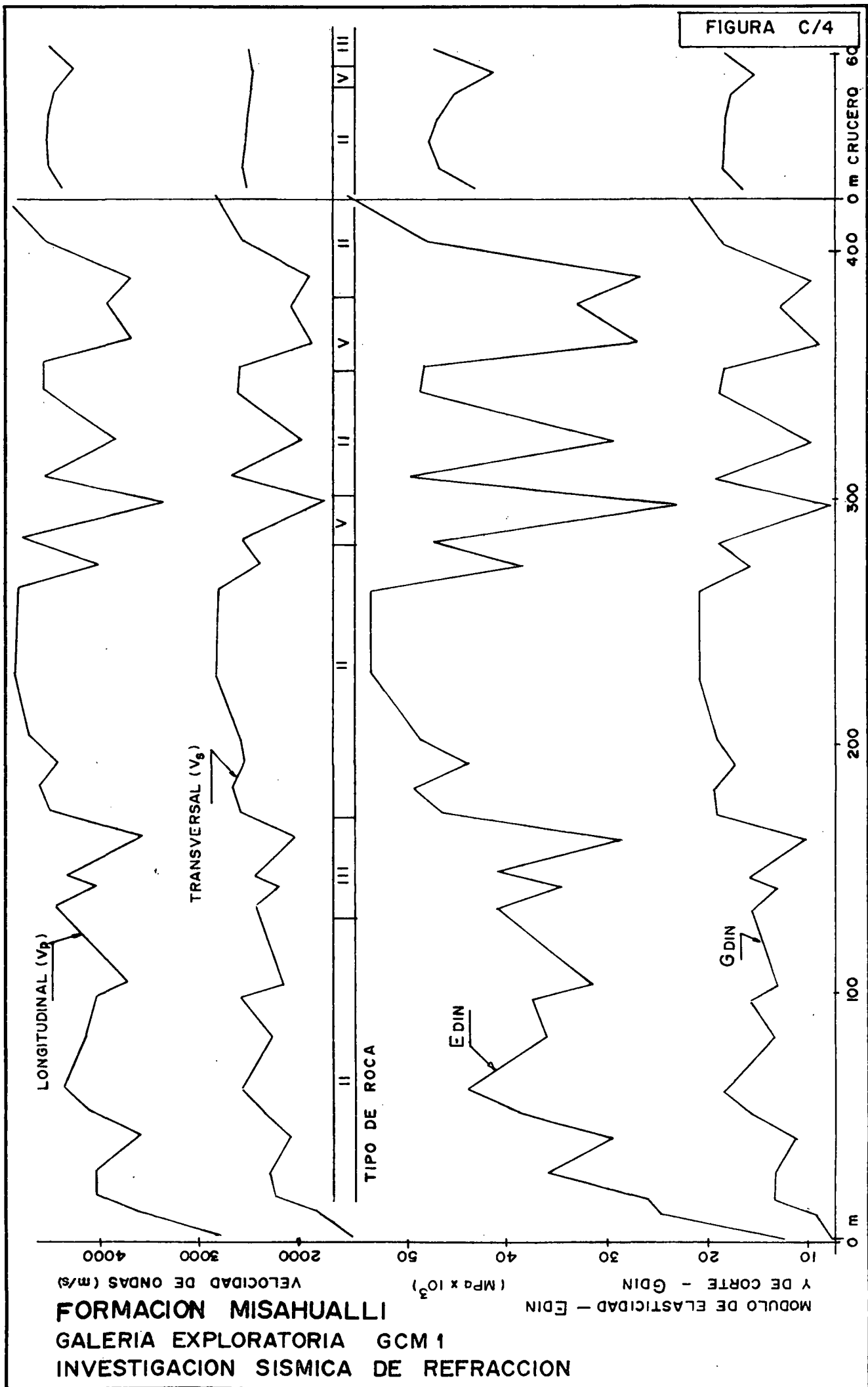
VENTANA  
 DE ACCESO





FORMACION MISAHUALLI  
INVESTIGACIONES GEOTECNICAS  
OBRAS DE GENERACION  
UBICACION DE LOS SONDEOS Y GALERIAS EXPLORATORIAS





FORMACION MISAHUALLI

GALERIA EXPLORATORIA GCM 1

INVESTIGACION SISMICA DE REFRACCION

MODULO DE ELASTICIDAD -  $E_{DIN}$

Y DE CORTE -  $G_{DIN}$  ( $\text{MPa} \times 10^3$ )

VELOCIDAD DE ONDAS (m/s)

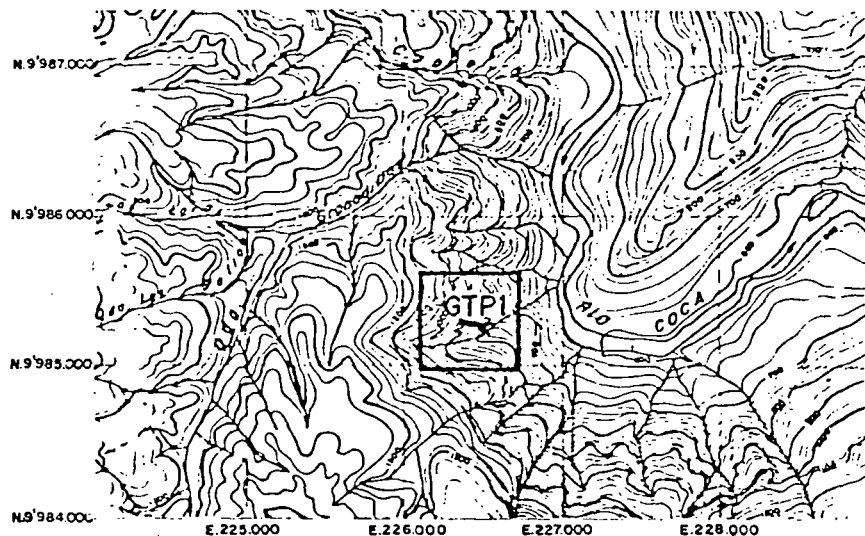
TIPO DE ROCA

TRANSVERSAL ( $V_s$ )

LONGITUDINAL ( $V_p$ )

$E_{DIN}$

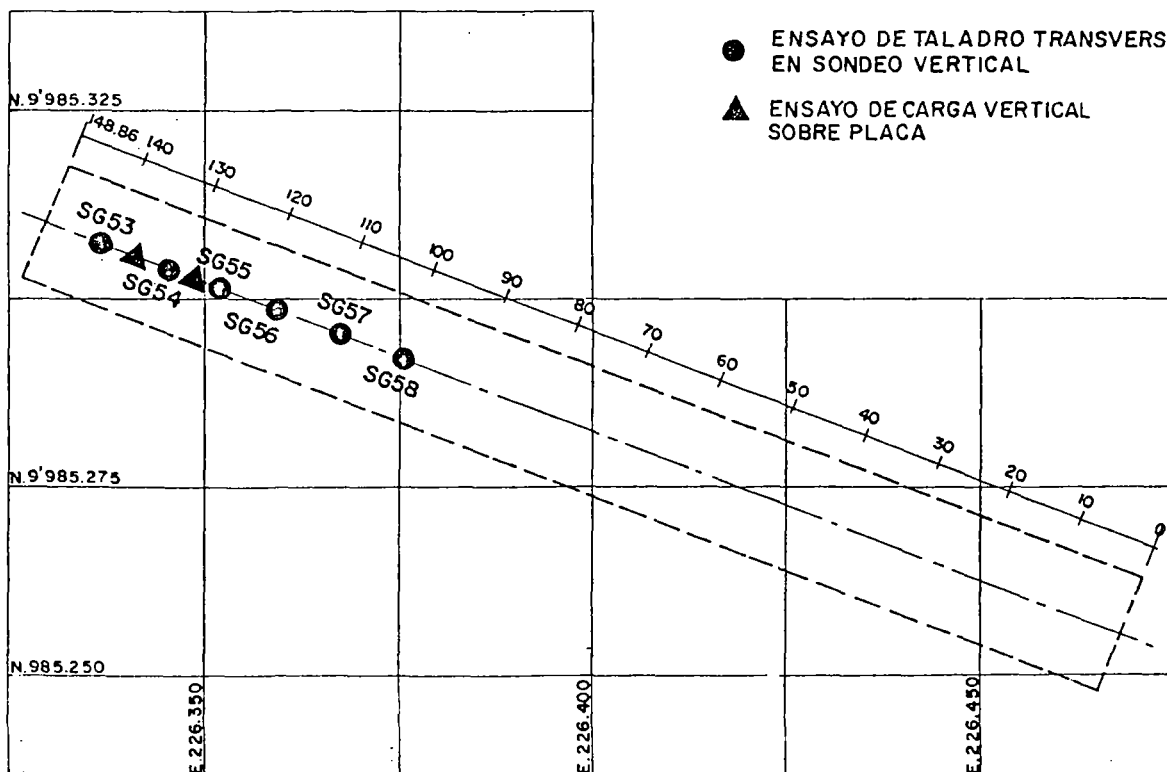
$G_{DIN}$



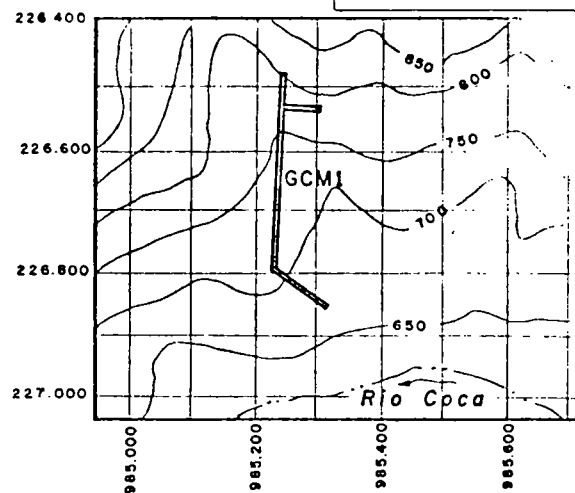
UBICACION  
SIN ESCALA

LEYENDA

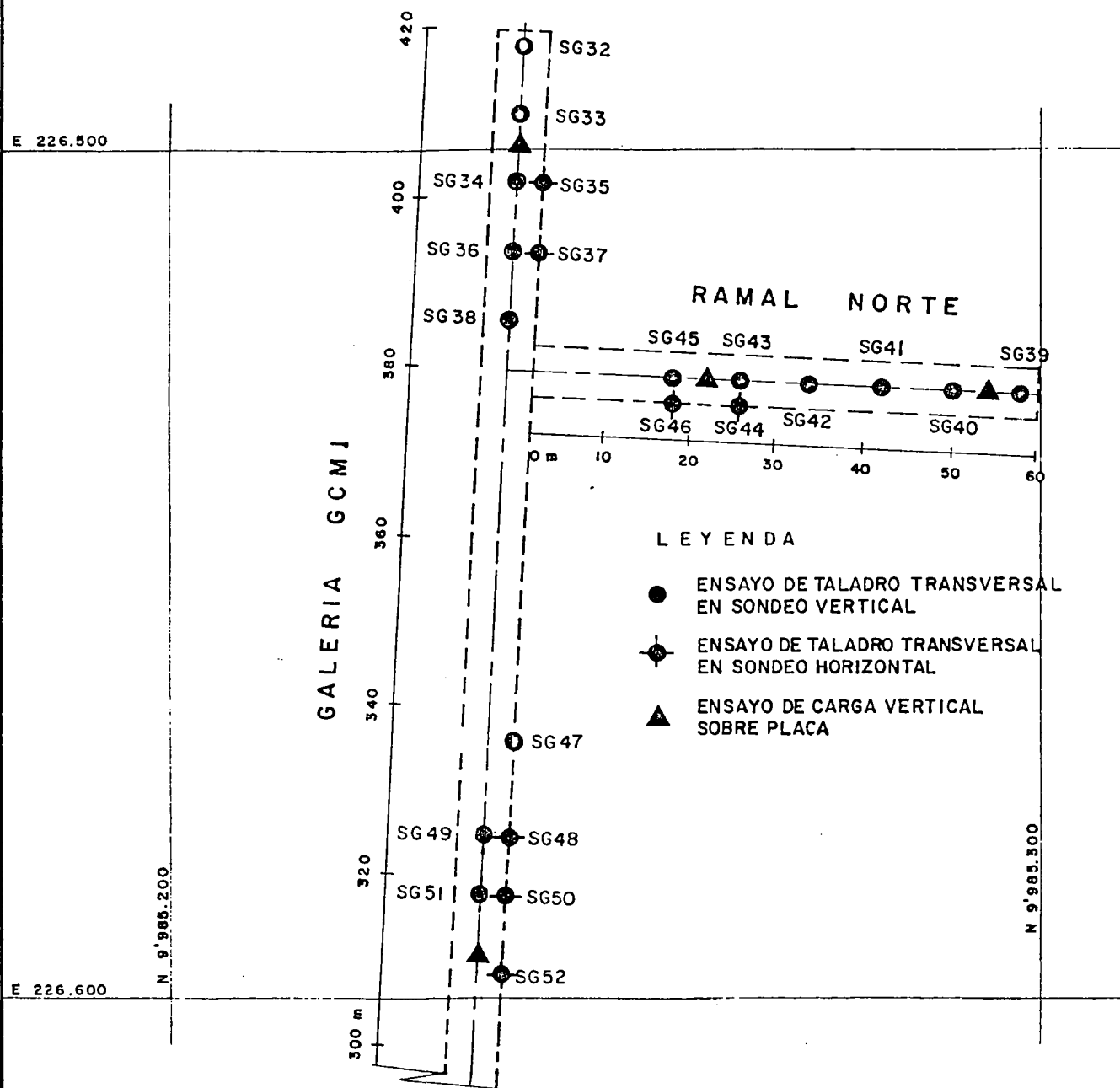
- ENSAYO DE TALADRO TRANSVERSAL EN SONDEO VERTICAL
- ▲ ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA



FORMACION MISAHUALLI  
GALERIA EXPLORATORIA GTP 1  
UBICACION DE LAS PERFORACIONES CORTAS Y DE LOS  
ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS



UBICACION



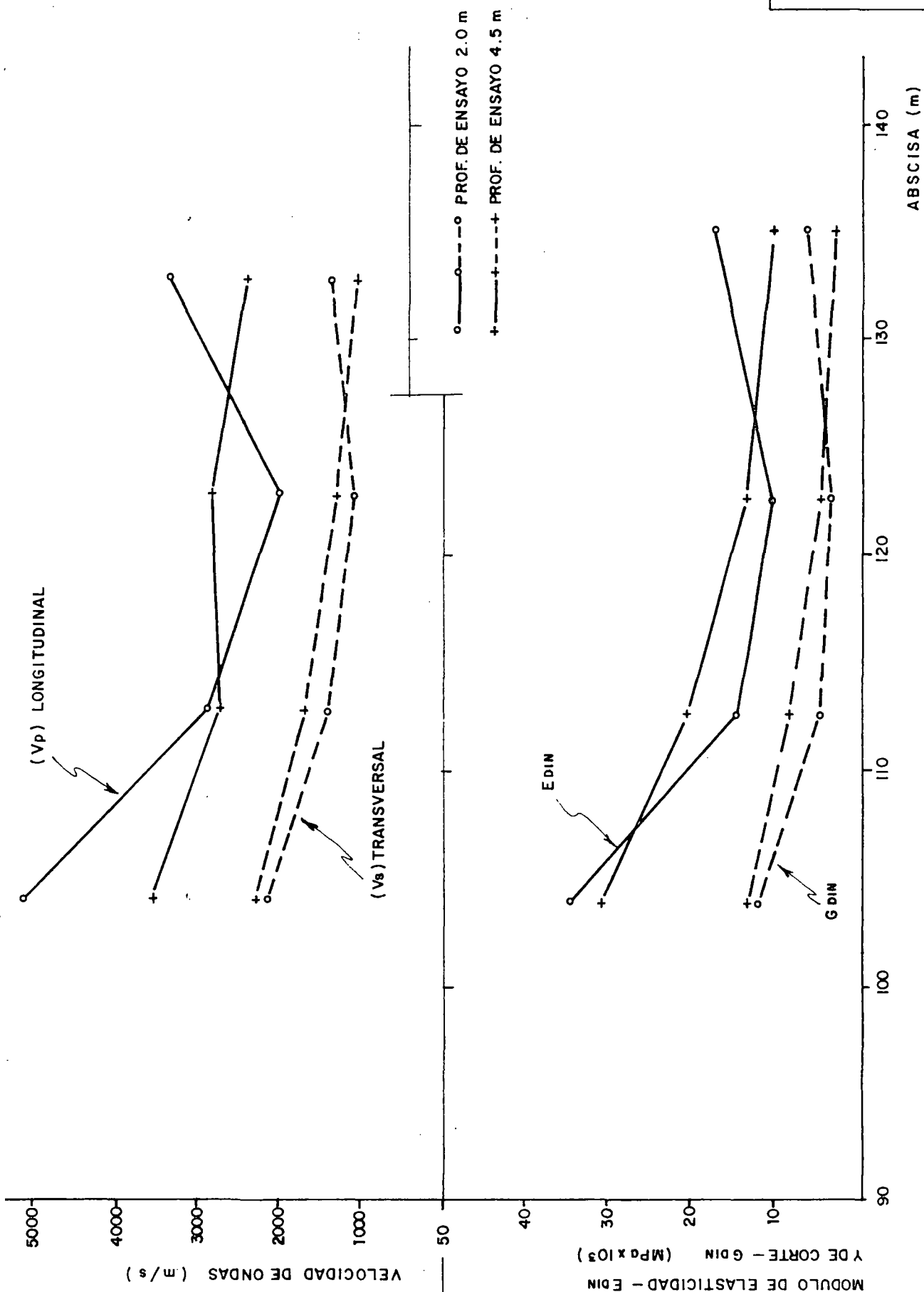
LEYENDA

- ENSAYO DE TALADRO TRANSVERSAL EN SONDEO VERTICAL
- ⊗ ENSAYO DE TALADRO TRANSVERSAL EN SONDEO HORIZONTAL
- ▲ ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA

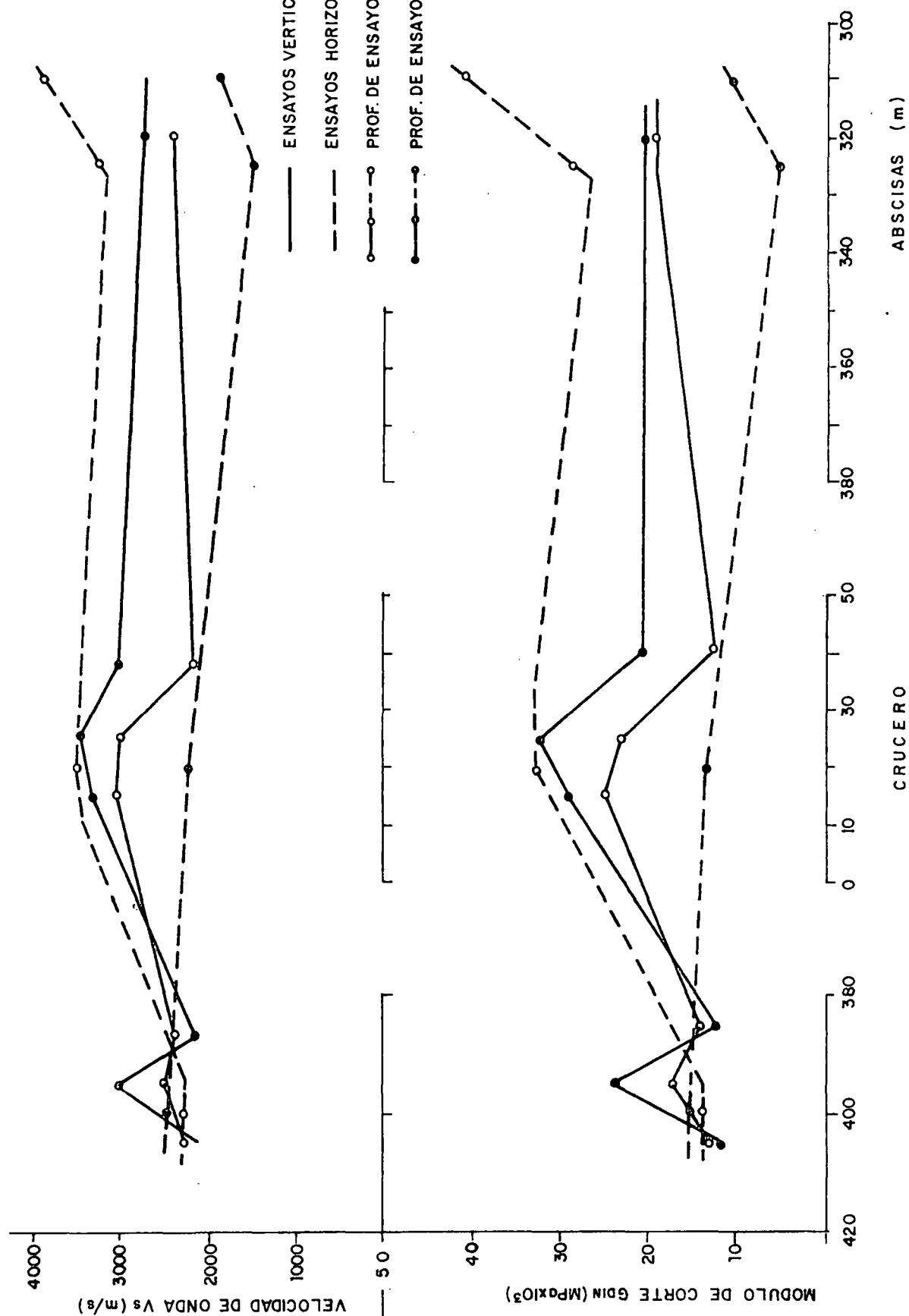
FORMACION MISAHUALLI

GALERIA EXPLORATORIA GCM1

UBICACION DE LAS PERFORACIONES CORTAS Y DE LOS ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS



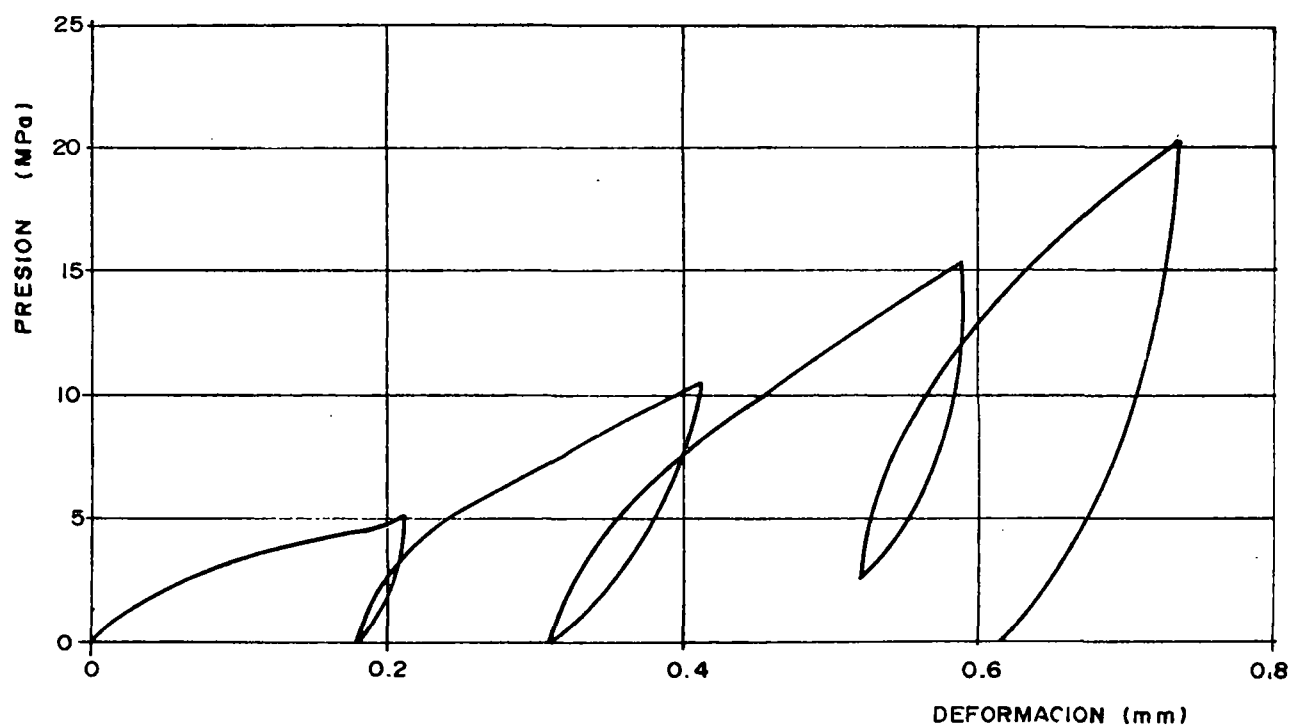
**FORMACION MISAHUALLI**  
**GALERIA EXPLORATORIA GTP1**  
**PARAMETROS DINAMICOS OBTENIDOS CON EL METODO DEL**  
**TALADRO TRANSVERSAL**



# FORMACION MISAHUALLI

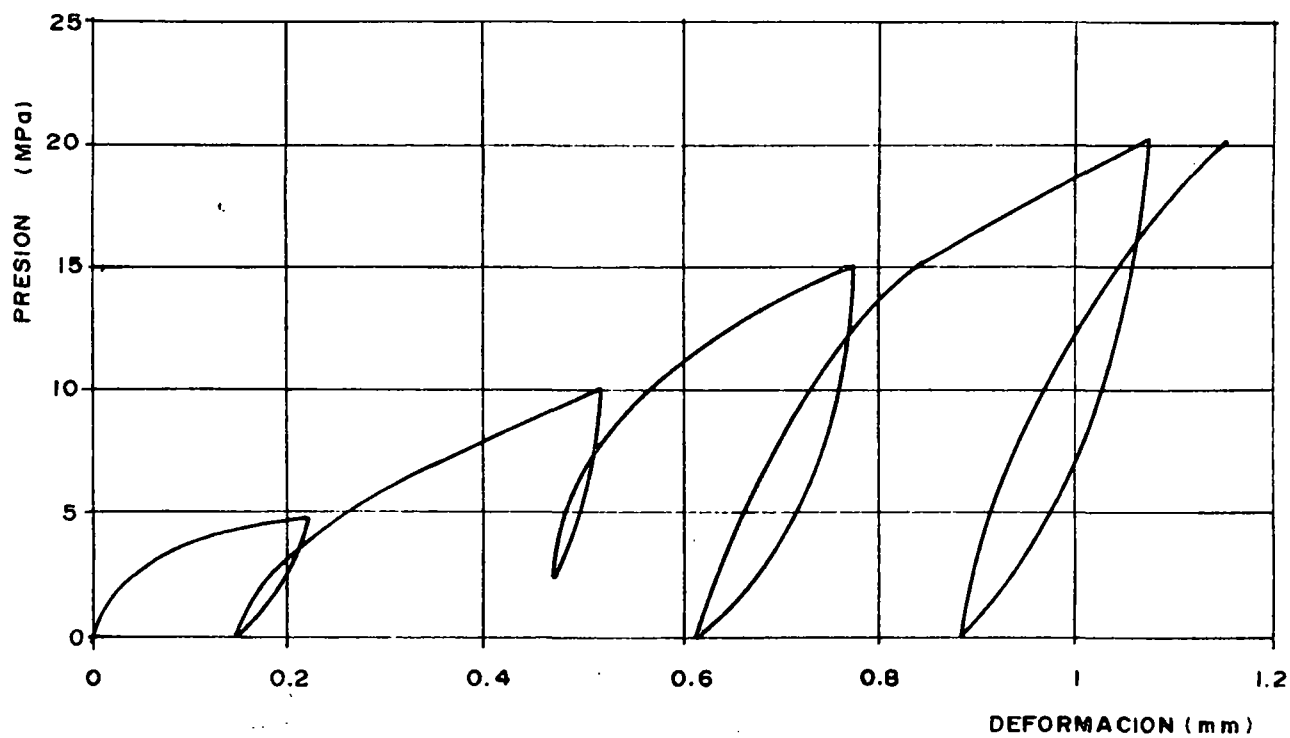
GALERIA EXPLORATORIA GCM 1

PARAMETROS DINAMICOS OBTENIDOS CON EL METODO DEL TALADRO TRANSVERSAL

**FORMACION MISAHUALLI**

GALERIA EXPLORATORIA GTP 1 - ABSCISA 0+128 m

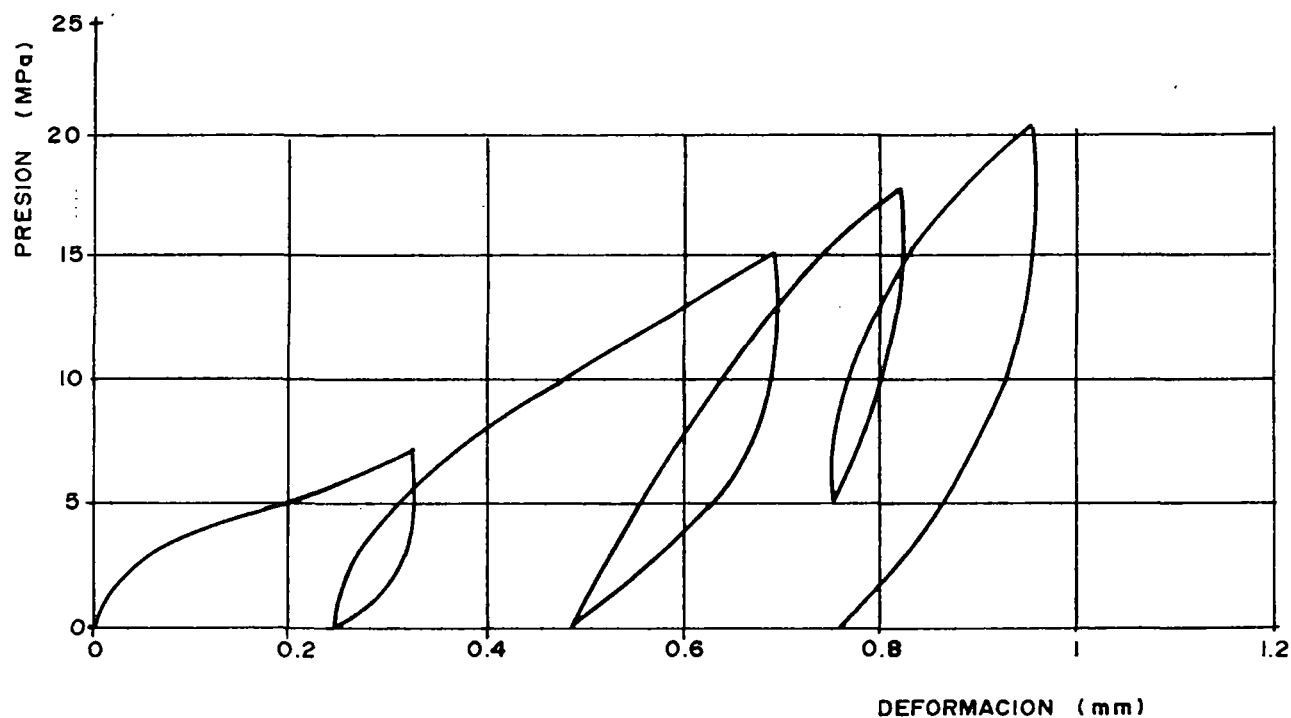
ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA

**FORMACION MISAHUALLI**

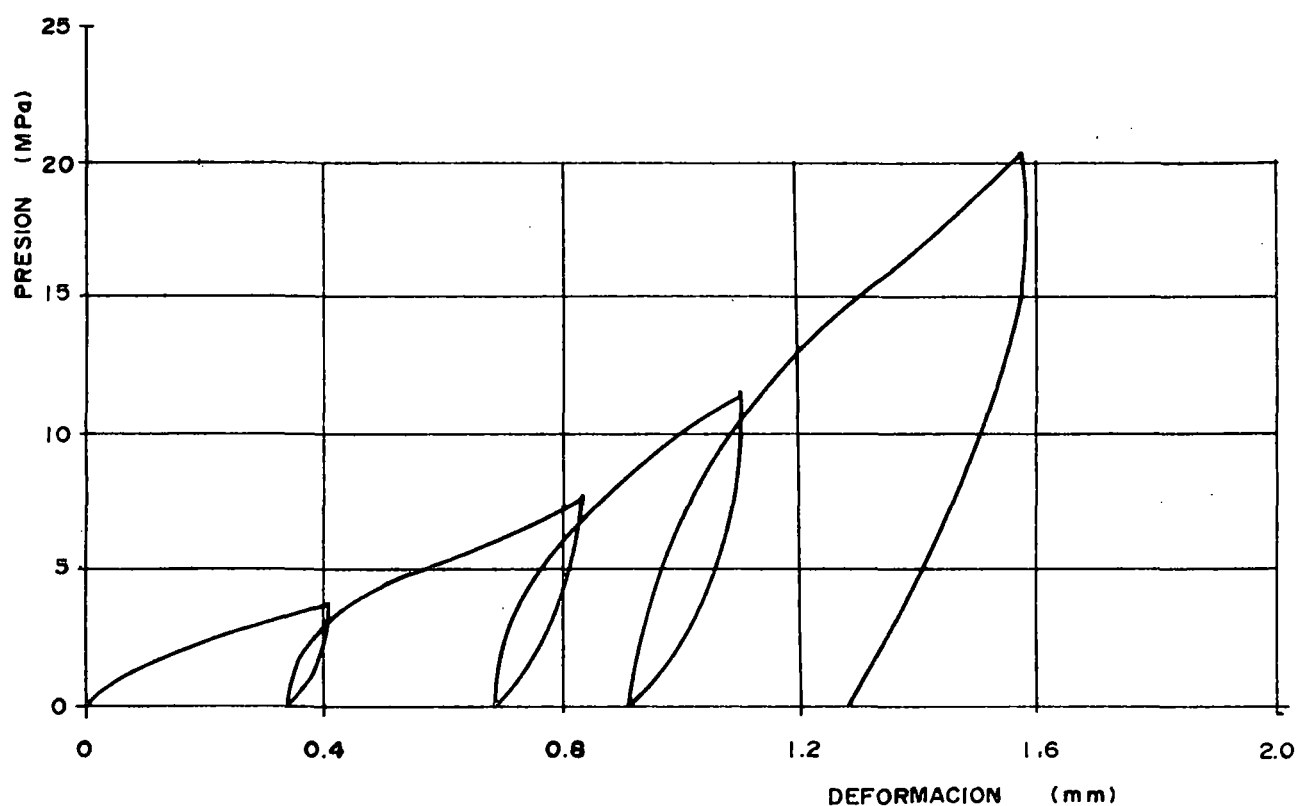
GALERIA EXPLORATORIA GTP1 - ABSCISA 0+140 m

ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA

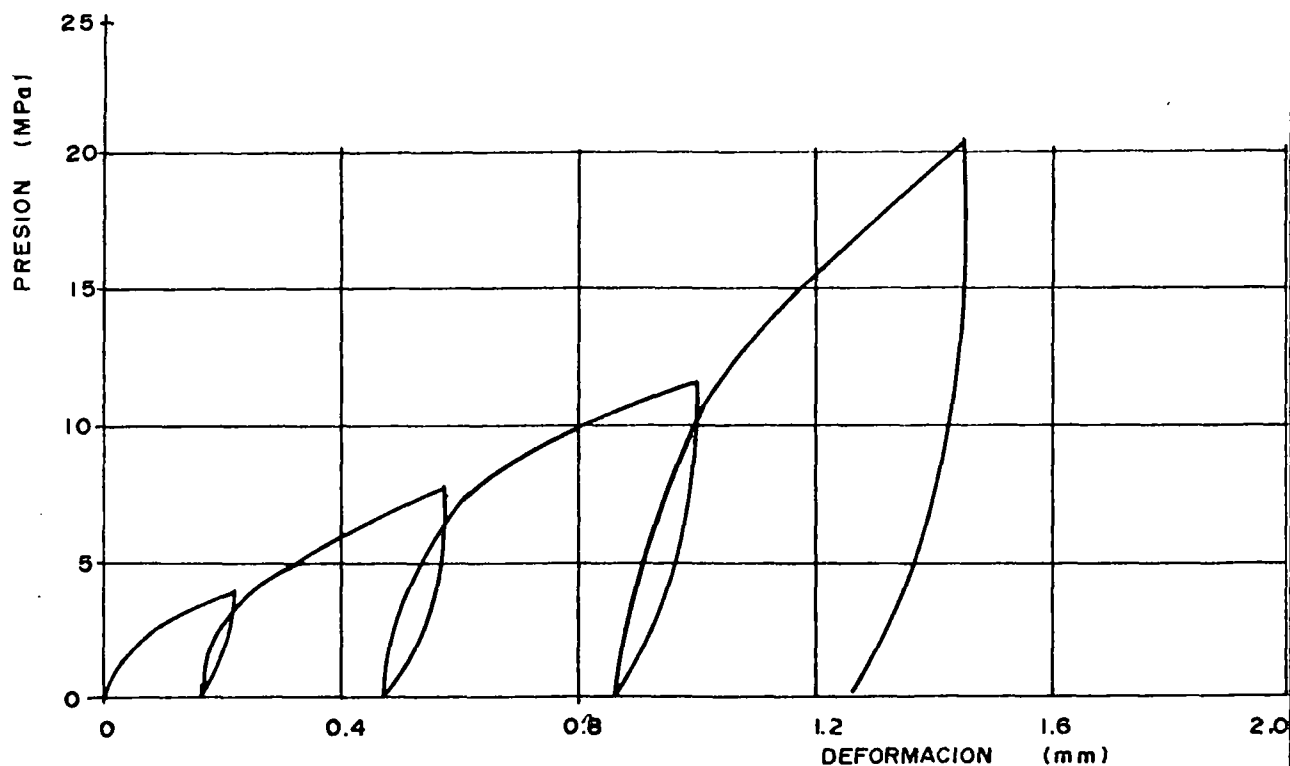


**FORMACION MISAHUALLI**

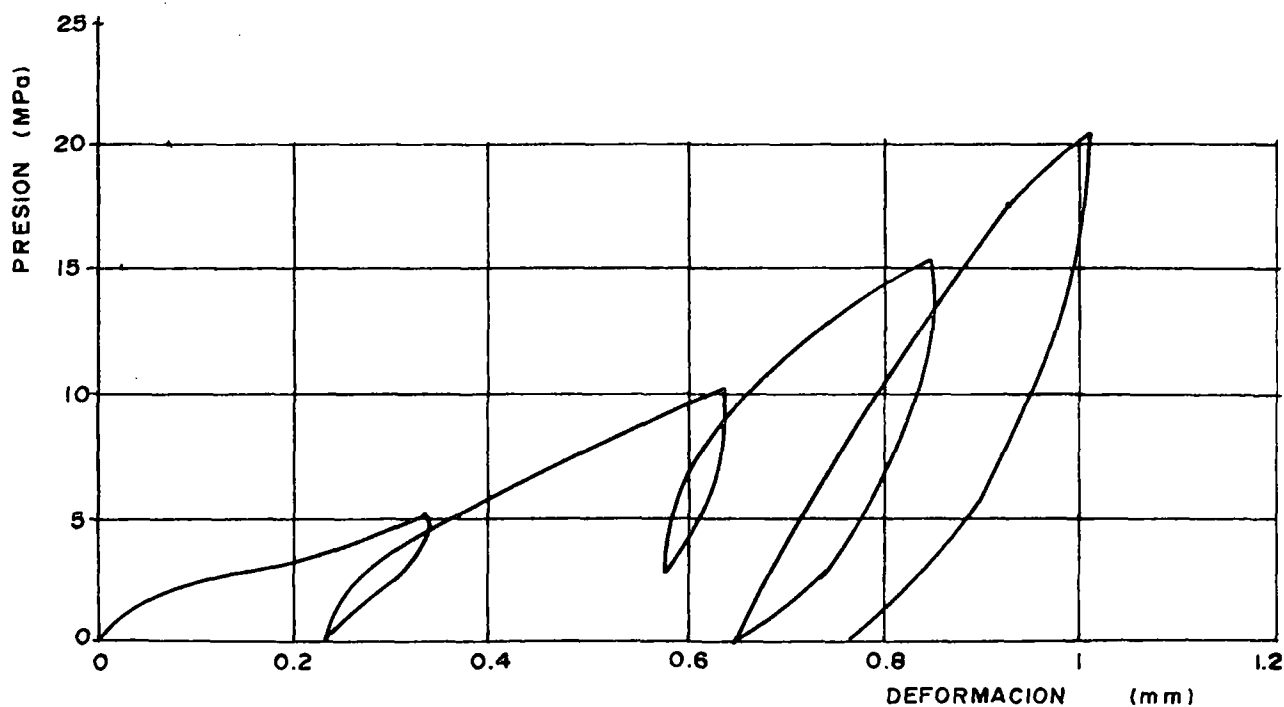
GALERIA EXPLORATORIA GCM1 - ABSCISA 0 + 310 m  
ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA

**FORMACION MISAHUALLI**

GALERIA EXPLORATORIA GCM 1 - ABSCISA 0+410 m  
ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA

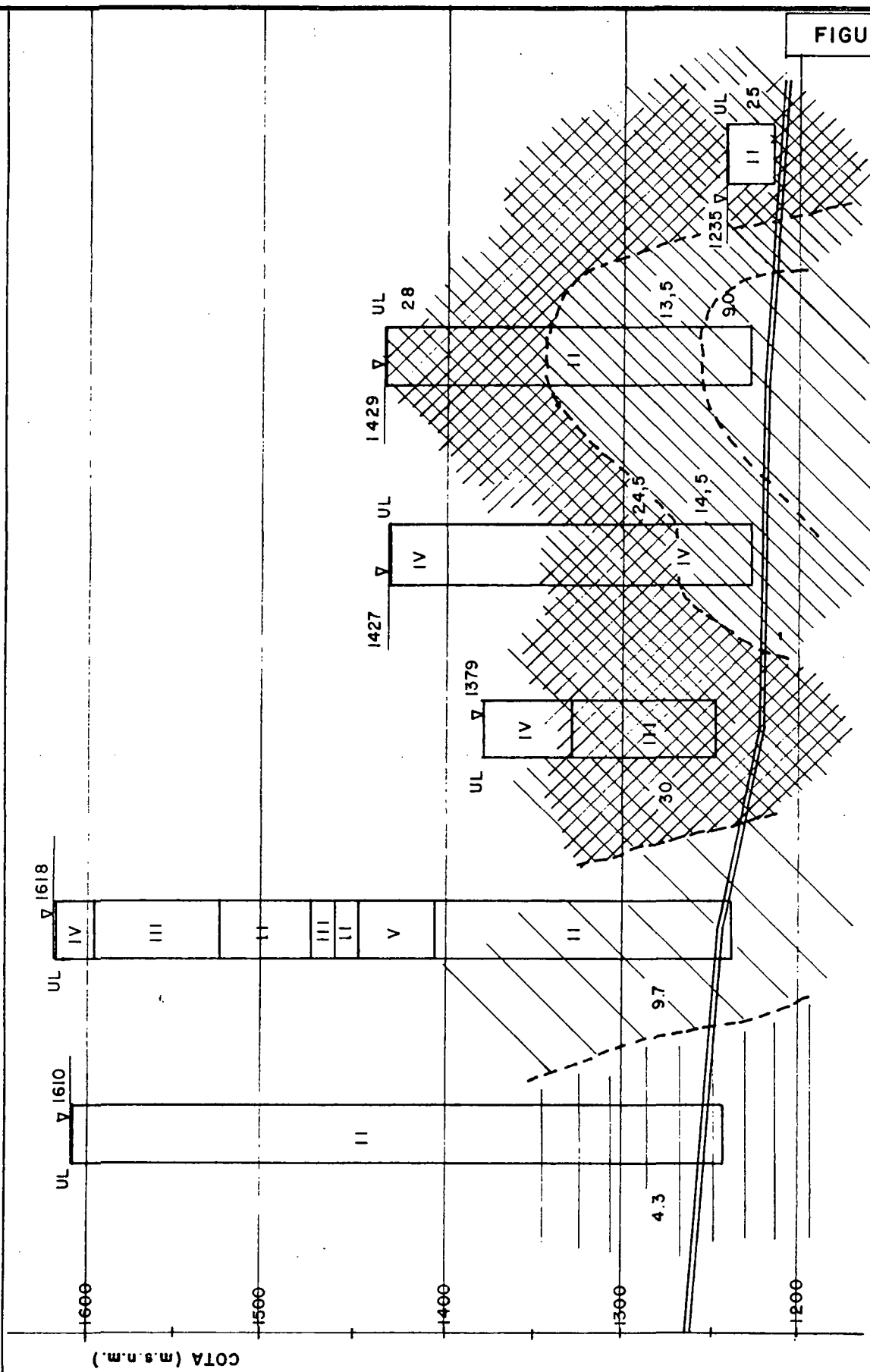
**FORMACION MISAHUALLI**

GALERIA EXPLORATORIA GCM1-CRUCERO: ABSCISA 0+025 m  
ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA

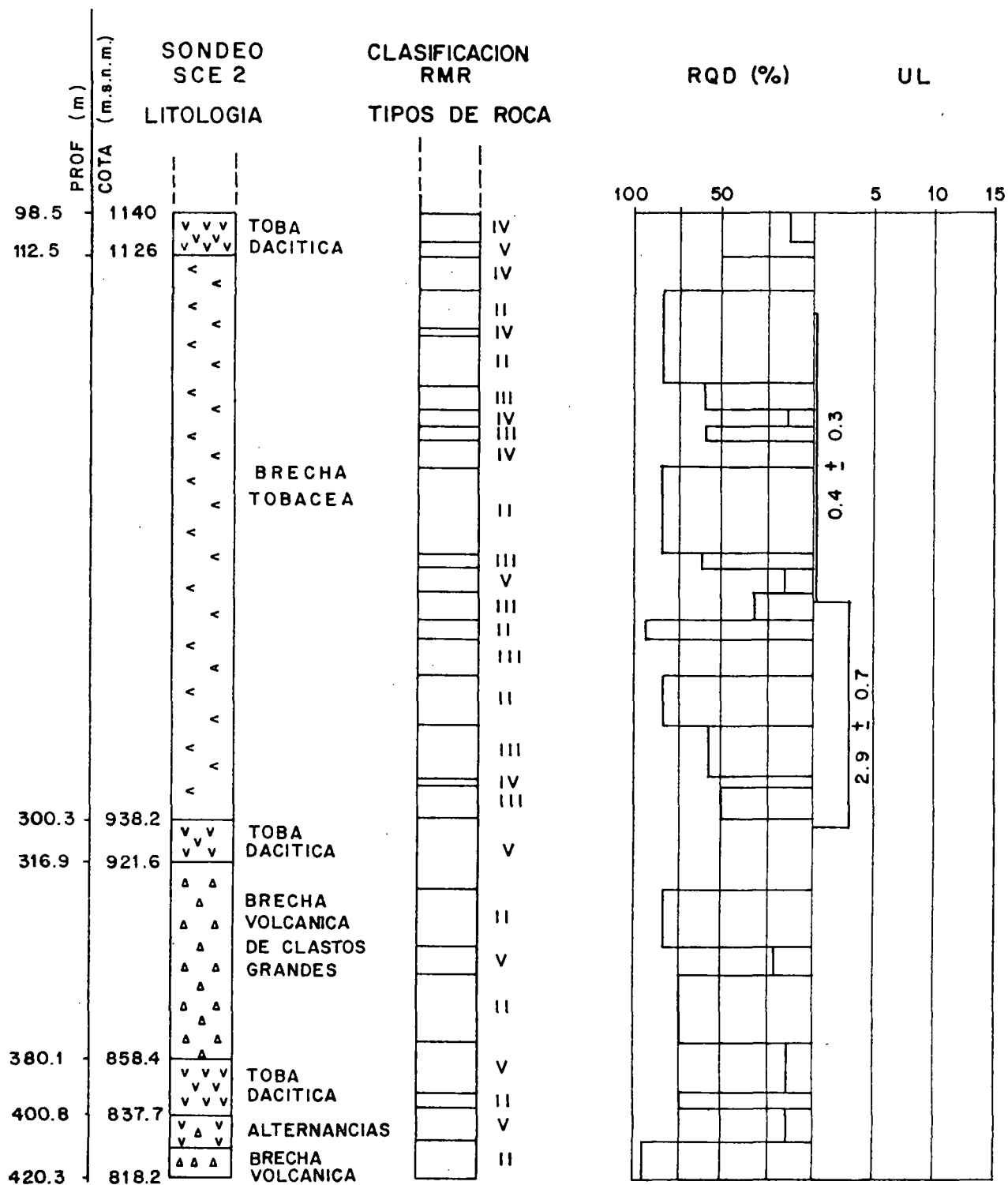
**FORMACION MISAHUALLI**

GALERIA EXPLORATORIA GCM1 - CRUCERO: ABSCISA 0+055 m  
ENSAYO DE CARGA VERTICAL SOBRE PLACA

SONDEOS ST6 ST7 ST1 ST2 ST3 ST4



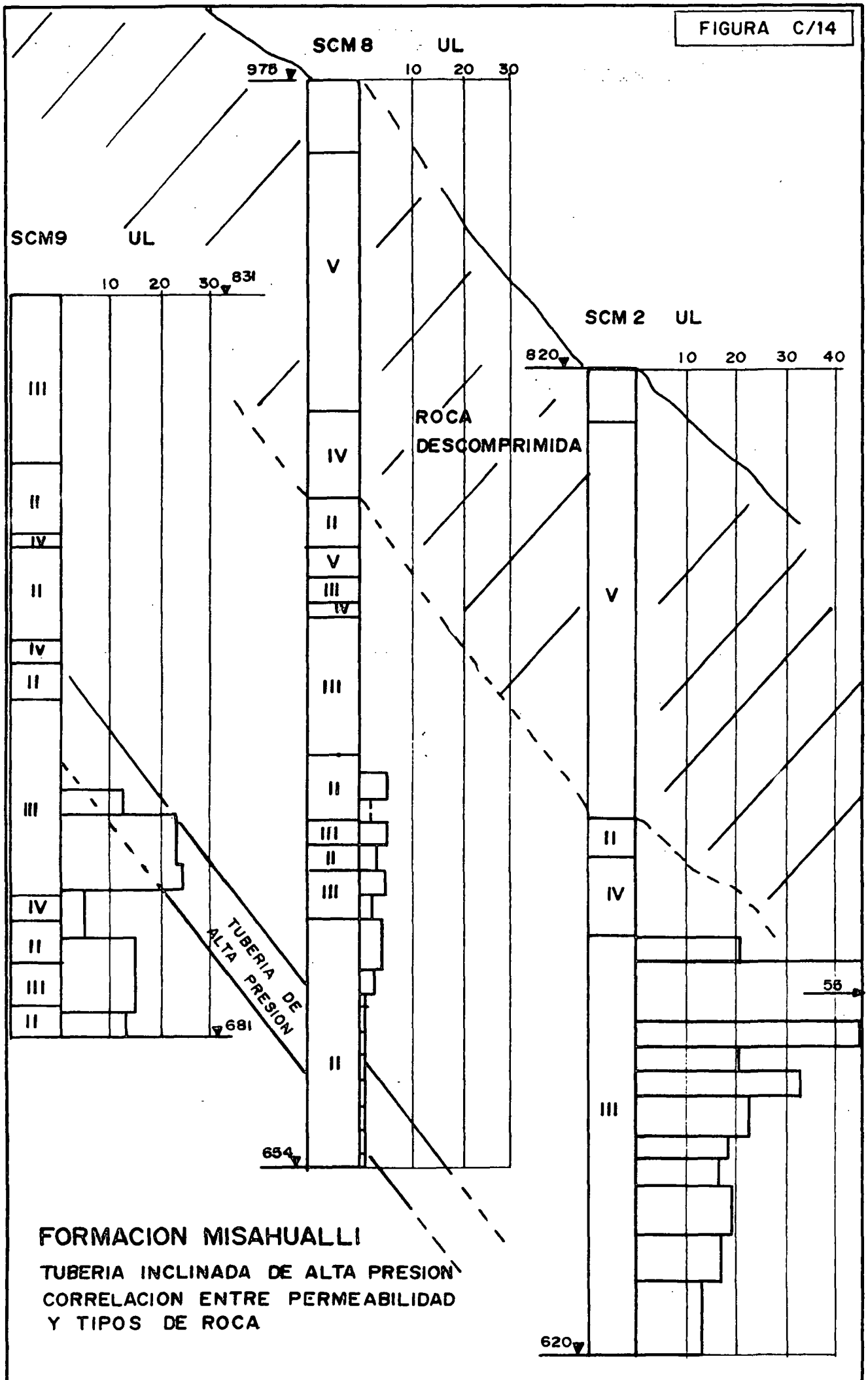
FORMACION MISAHUALI  
TUNEL DE ADUCCION  
CORRELACION ENTRE PERMEABILIDAD Y TIPOS DE ROCA

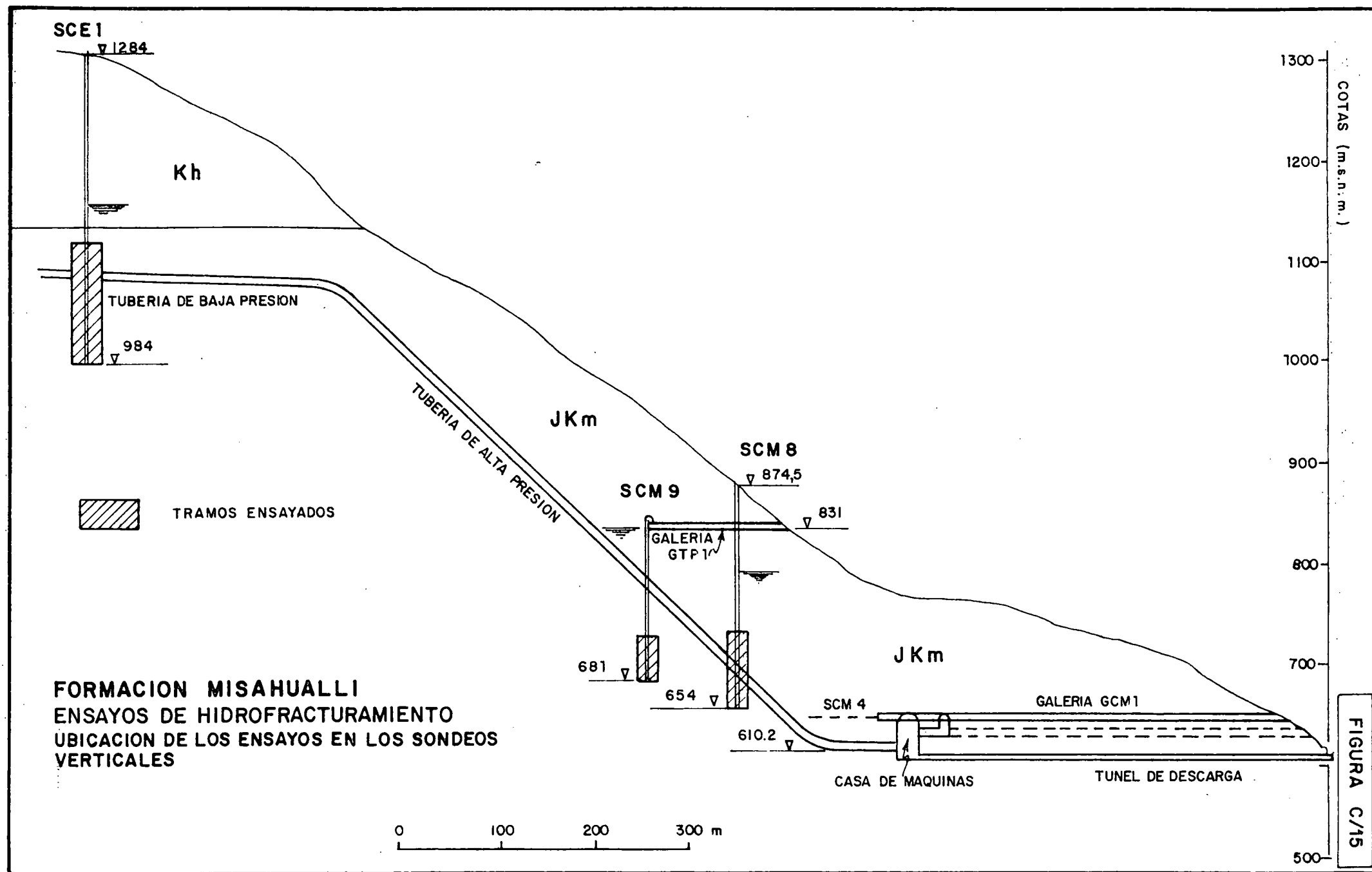


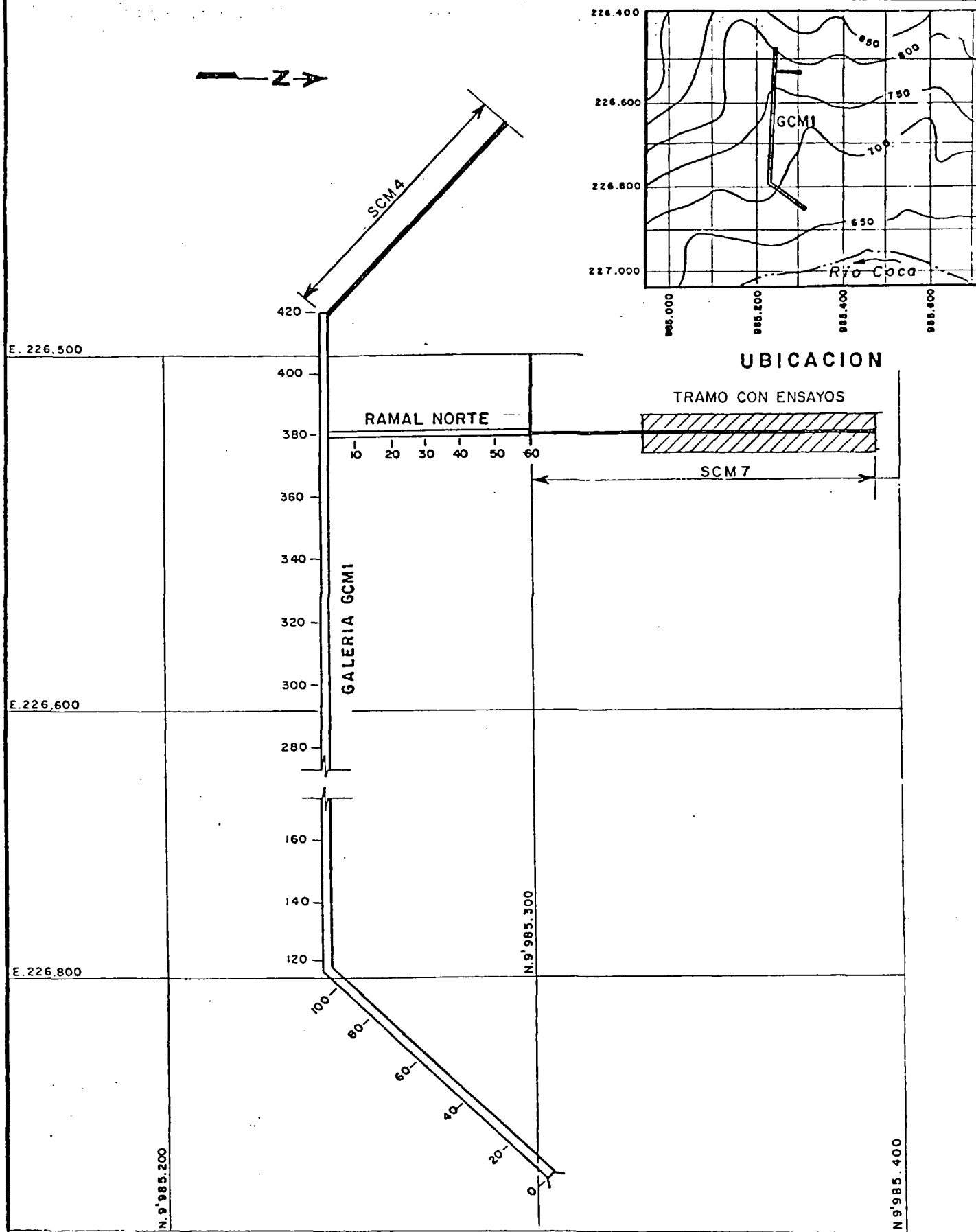
# FORMACION MISAHUALLI

TUBERIA DE PRESION CON POZO VERTICAL  
SONDEO SCE 2

CORRELACION ENTRE PERMEABILIDAD Y TIPOS DE ROCA



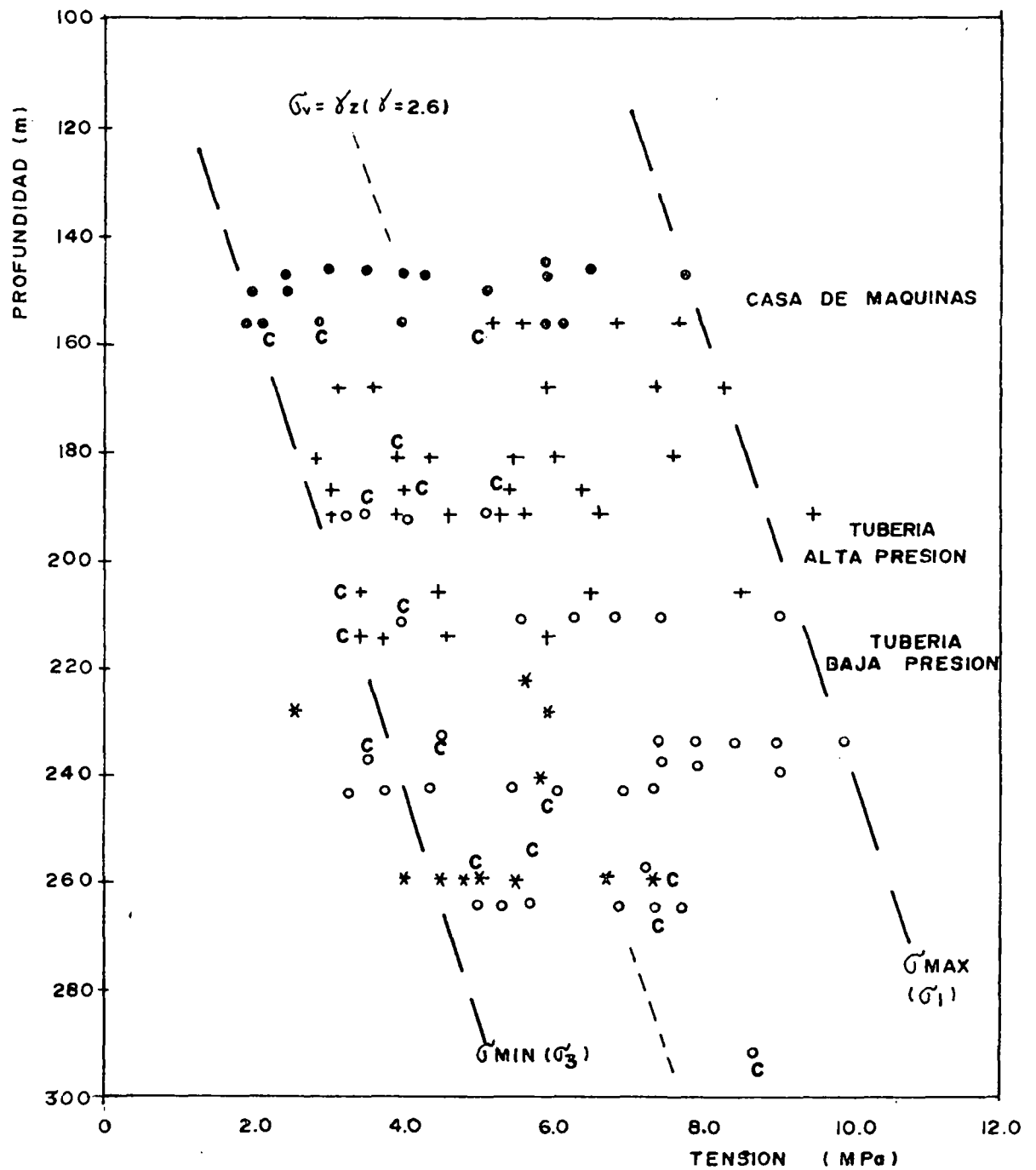




FORMACION MISAHUALLI

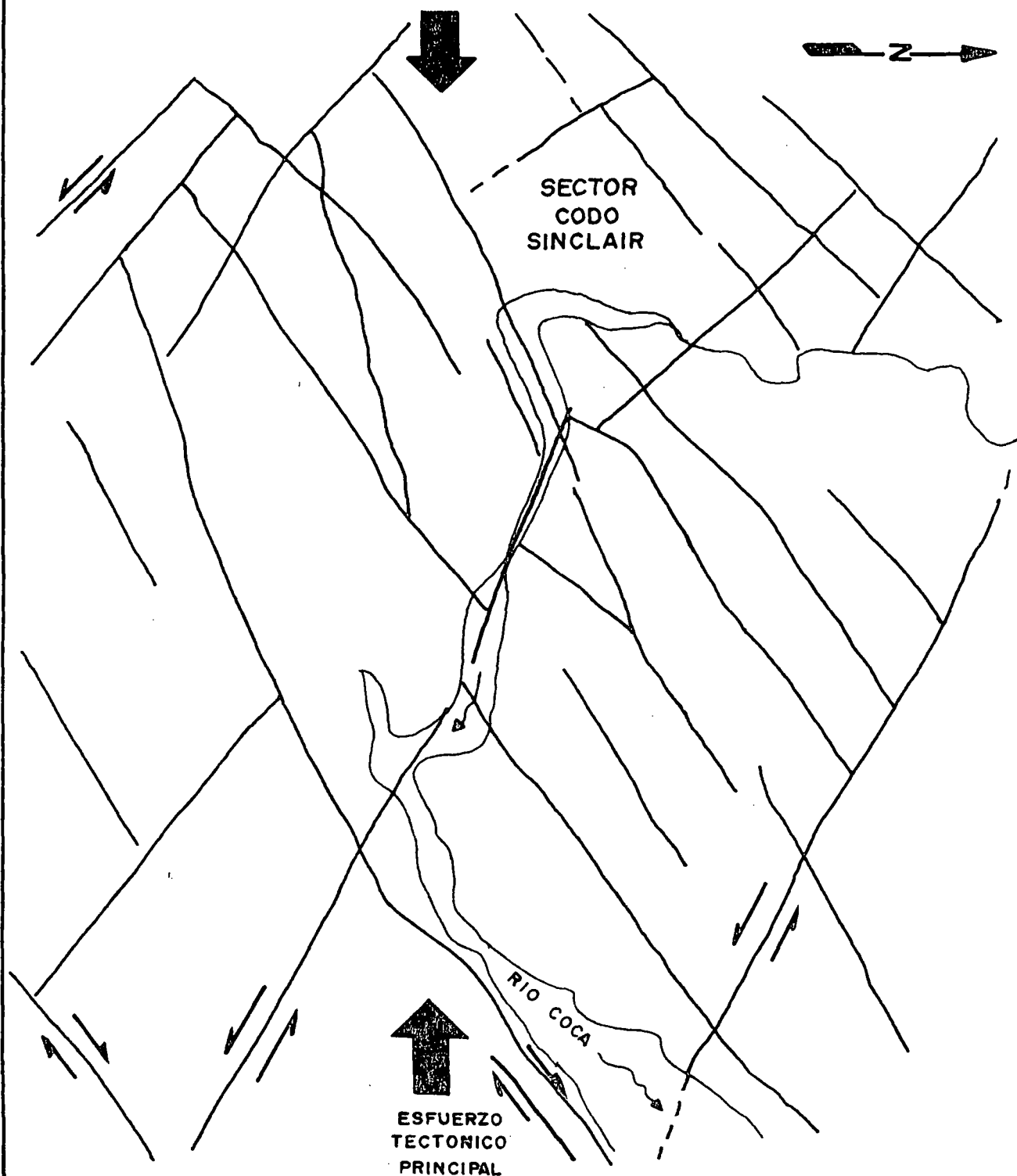
ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO

UBICACION DE LOS ENSAYOS EN EL SONDEO HORIZONTAL SCM7



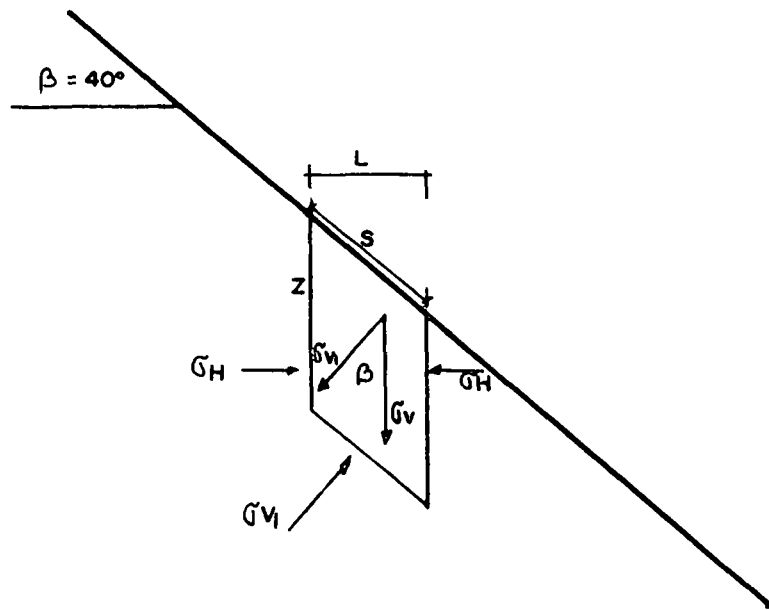
# FORMACION MISAHUALLI RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO





**FORMACION MISAHUALLI**

**ESQUEMA TECTONICO EN EL SECTOR CODO SINCLAIR**



ESFUERZO QUE ACTUA EN LA BASE  
DEL ELEMENTO

$$S \cdot G_{VI} = \gamma \cdot Z \cdot \cos \beta \cdot \cos \beta \cdot S$$

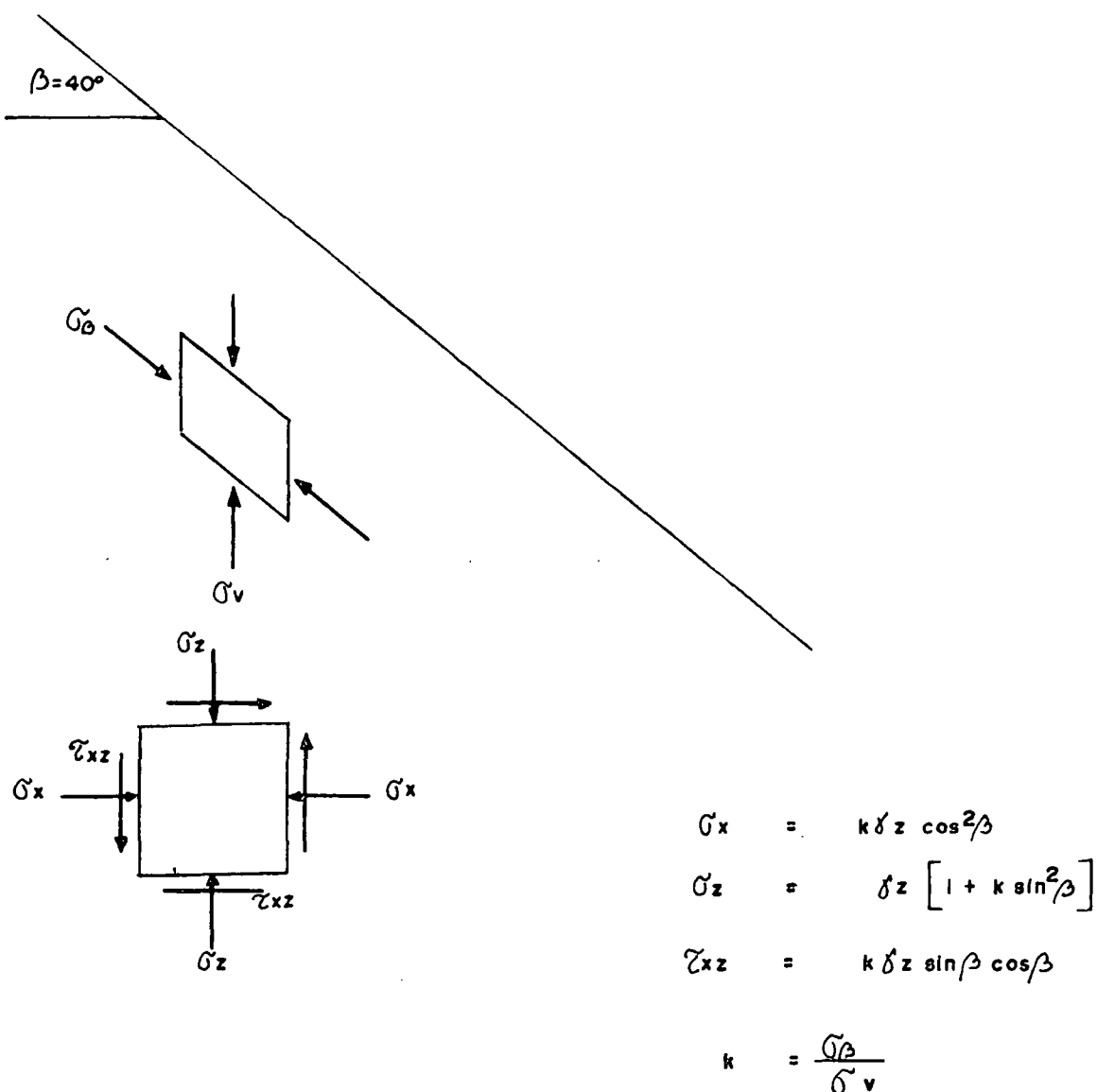
$$G_{VI} = \gamma \cdot Z \cdot \cos^2 \beta$$

donde:  $Z \cdot \cos \beta = L$

$\gamma$  = peso específico

## FORMACION MISAHUALLI

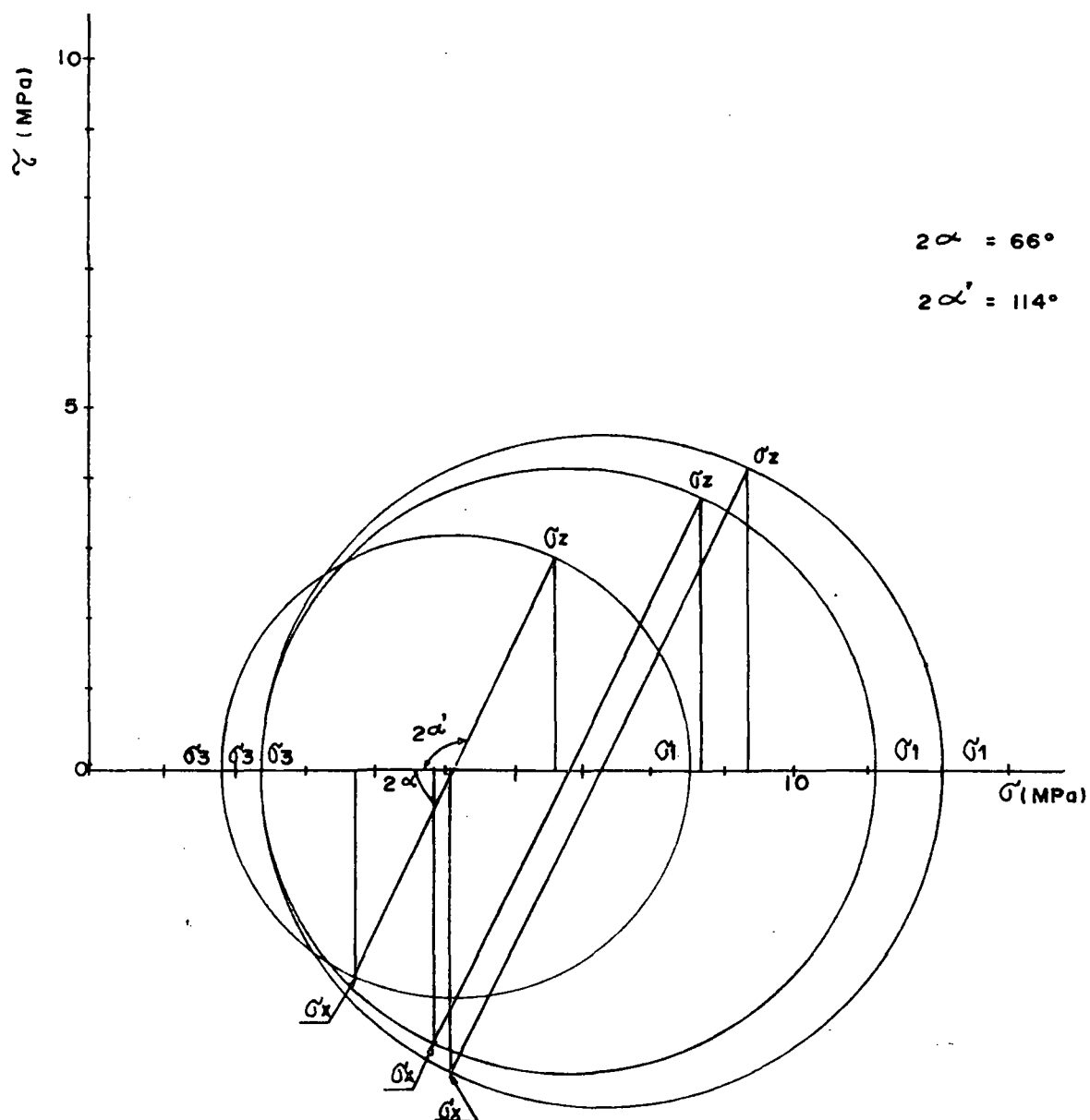
ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO  
EQUILIBRIO DE UN ELEMENTO UNITARIO DE ROCA EN  
PROXIMIDAD DE UN PLANO INCLINADO INFINITO



## FORMACION MISAHUALLI

### ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO

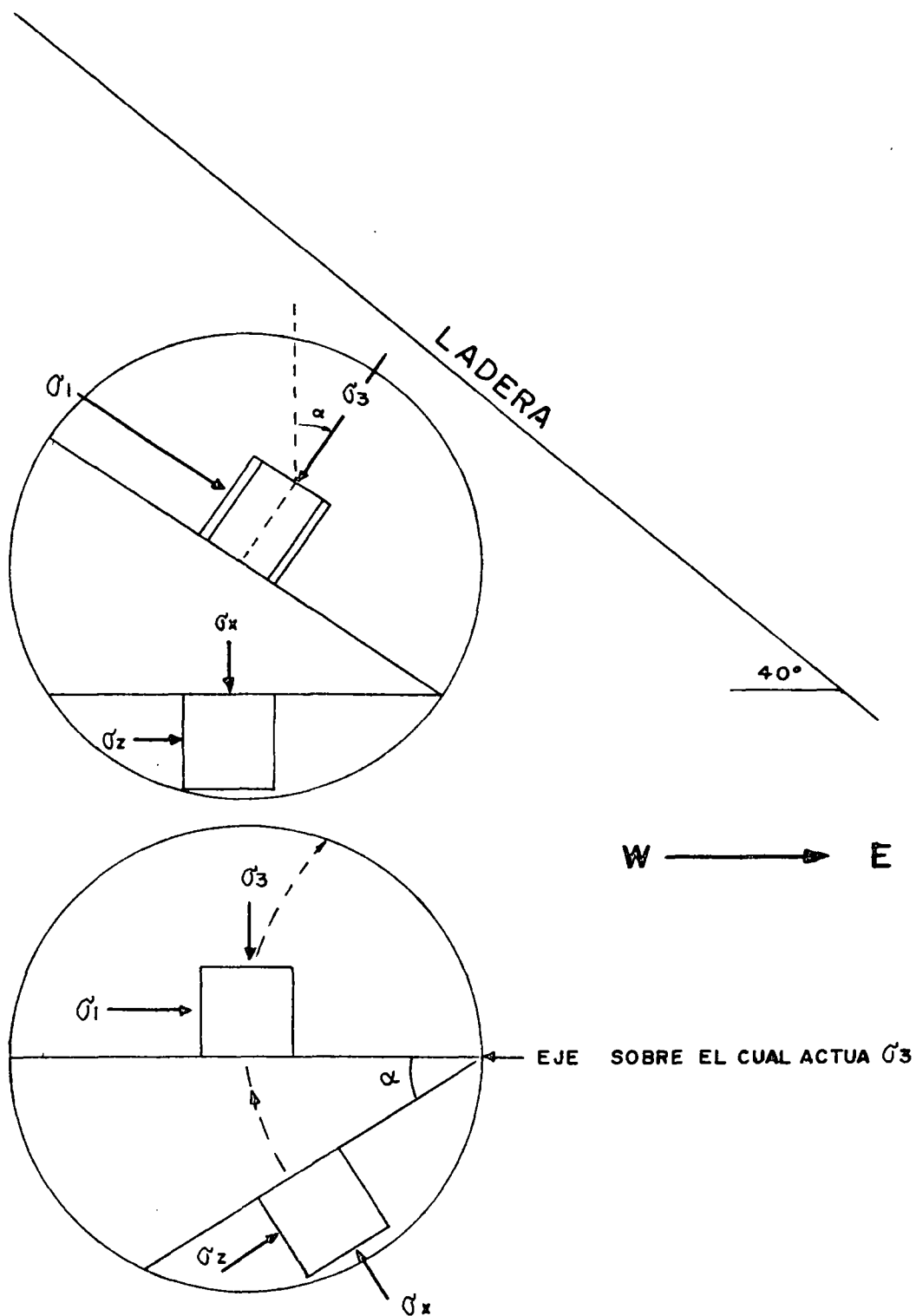
DISTRIBUCION DE LOS ESFUERZOS EN PROXIMIDAD DE  
UNA LADERA (Según Chowdury, ASCE, 1979)



# FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO

DIAGRAMAS CIRCULARES DE MOHR RELATIVOS A LOS  
ESFUERZOS  $\sigma_x - \sigma_z - \tau_{xz}$  (Según Chowdury)

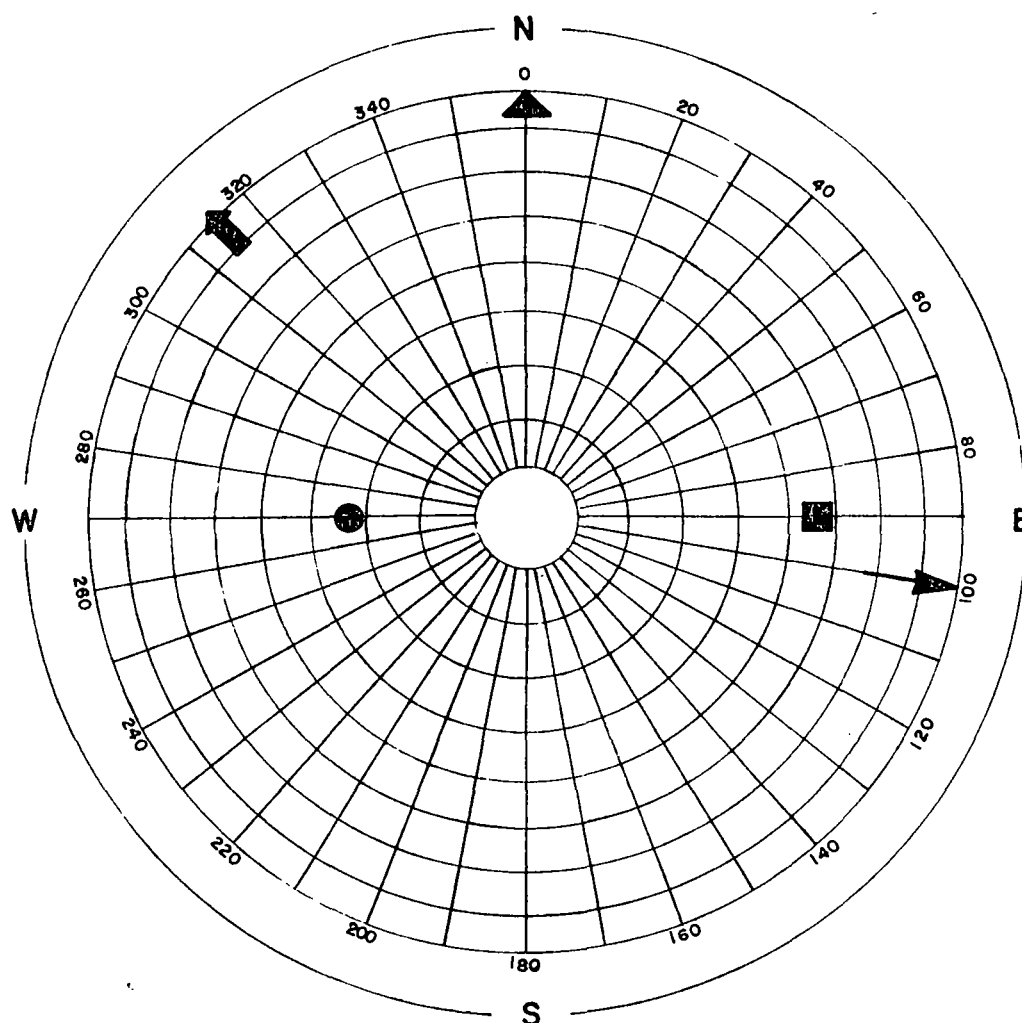


# FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO

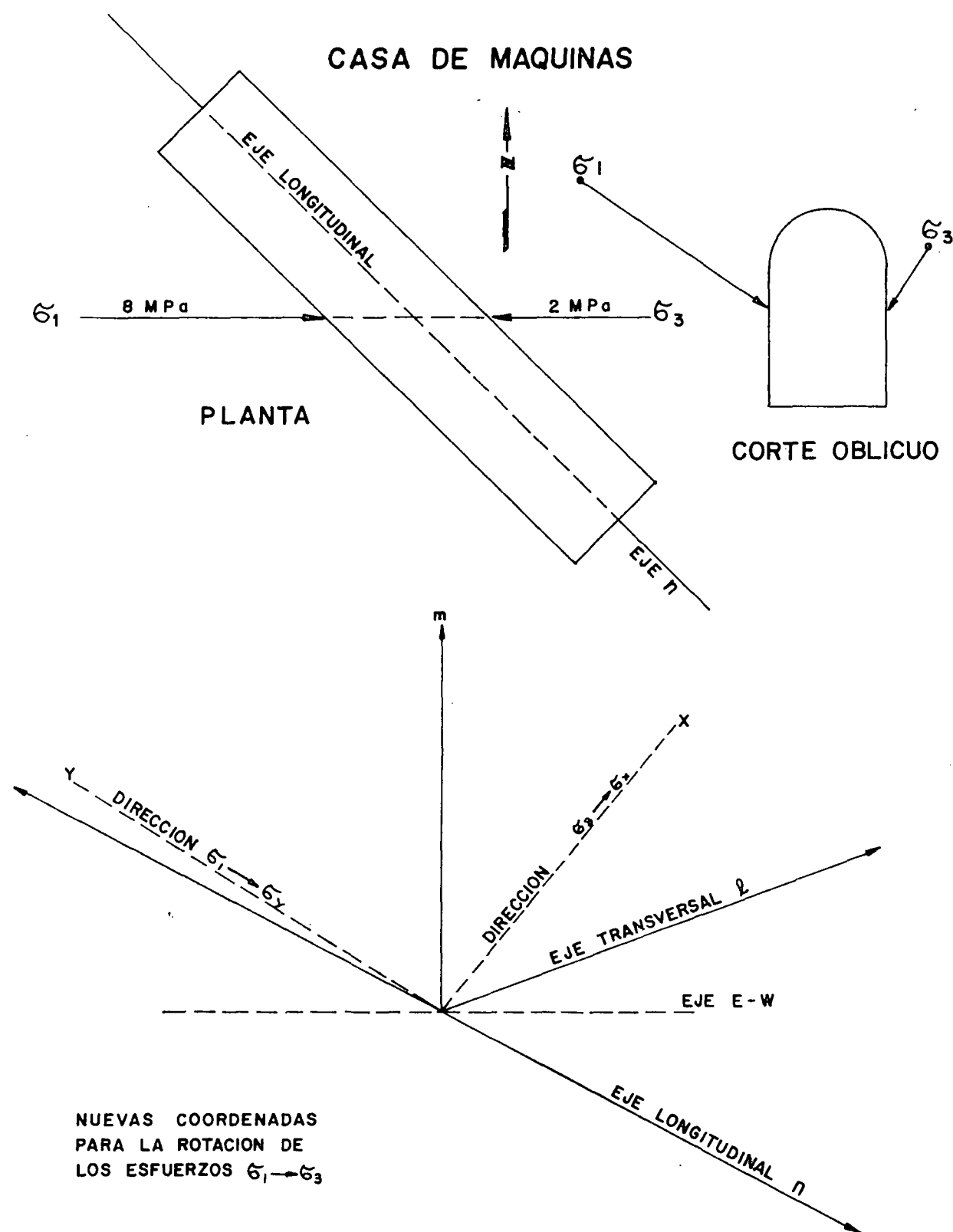
ORIENTACION DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES  $\sigma_1 - \sigma_3$   
CERCA DE LA LADERA

# RETICULO EQUIAREAL DE SCHMIDT EMISFERIO INFERIOR



## FORMACION MISAHUALLI ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO ORIENTACION DE LAS COMPONENTES PRINCIPALES DE TENSION

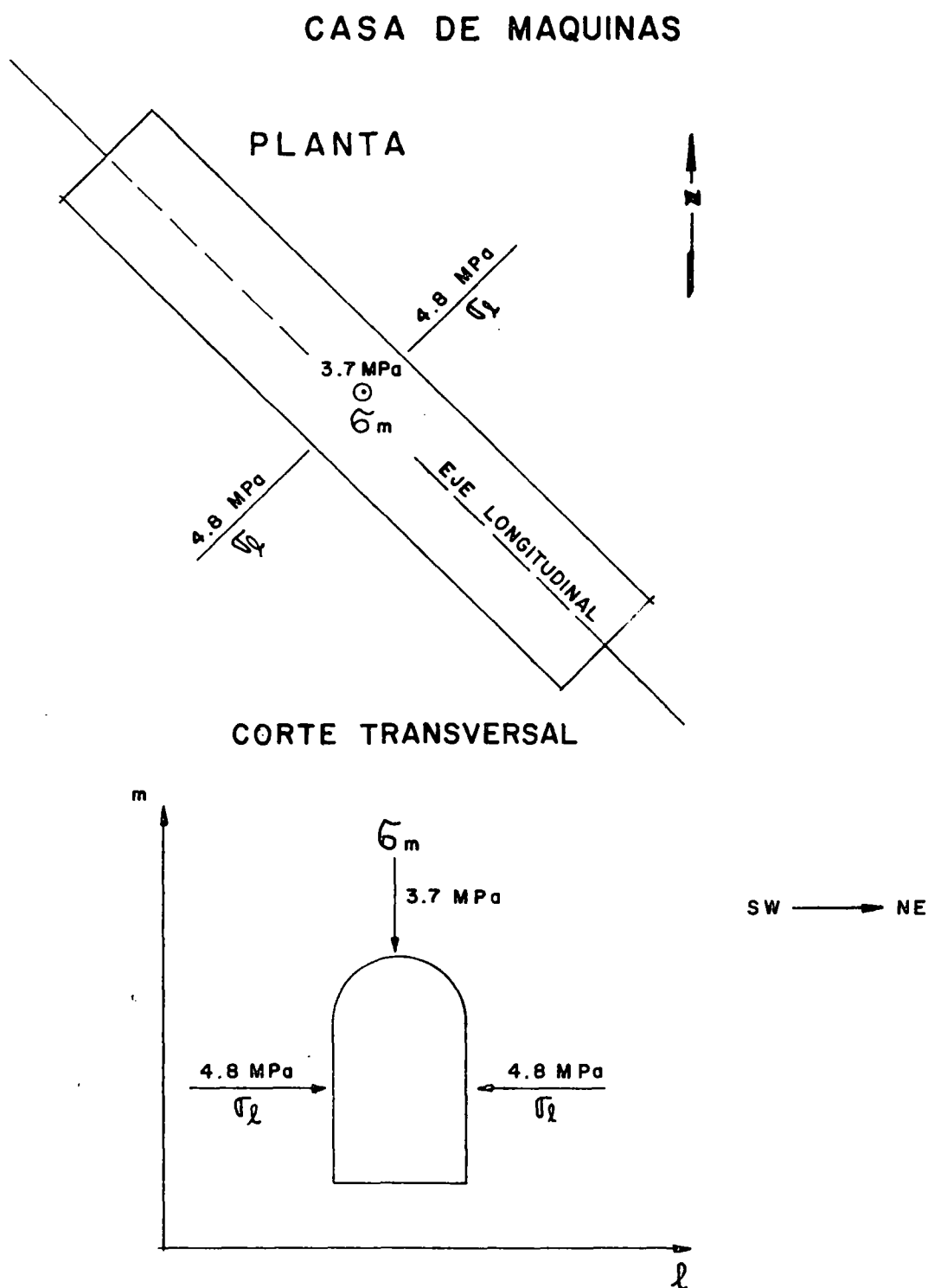
CASA DE MAQUINAS	TUBERIA DE ALTA PRESION	TUBERIA DE BAJA PRESION
<div>■</div> $\sigma_1 = 8,0 \text{ MPa}$	9,0 MPa	9,5 MPa
<div>▲</div> $\sigma_2 = 4,0 \text{ MPa}$	5,5 MPa	6,0 MPa
<div>●</div> $\sigma_3 = 2,0 \text{ MPa}$	3,0 MPa	3,5 MPa
<div>➡</div> EJE CASA DE MAQUINAS	<div>➡</div> EJE TUBERIA DE PRESION	



### FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO  
CASA DE MAQUINAS

ESQUEMA DEL ESTADO TENSIONAL Y SISTEMA DE COORDENADAS  
UTILIZADAS PARA LA ROTACION DE  $\sigma_1 \rightarrow \sigma_3$



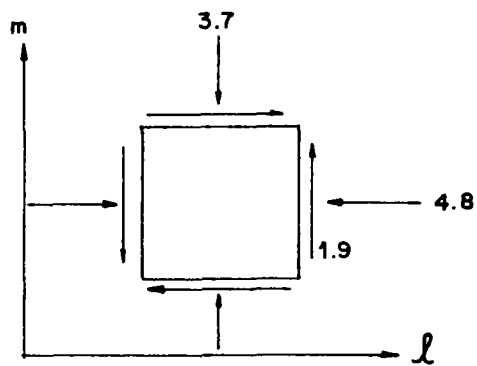
FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO

CASA DE MAQUINAS

ESQUEMA DE LOS ESFUERZOS HORIZONTAL Y VERTICAL  
ACTUANTES EN EL PLANO TRANSVERSAL DE CASA DE  
MAQUINAS





ELEMENTO UNITARIO CON LOS ESFUERZOS ACTUANTES EN LAS CARAS

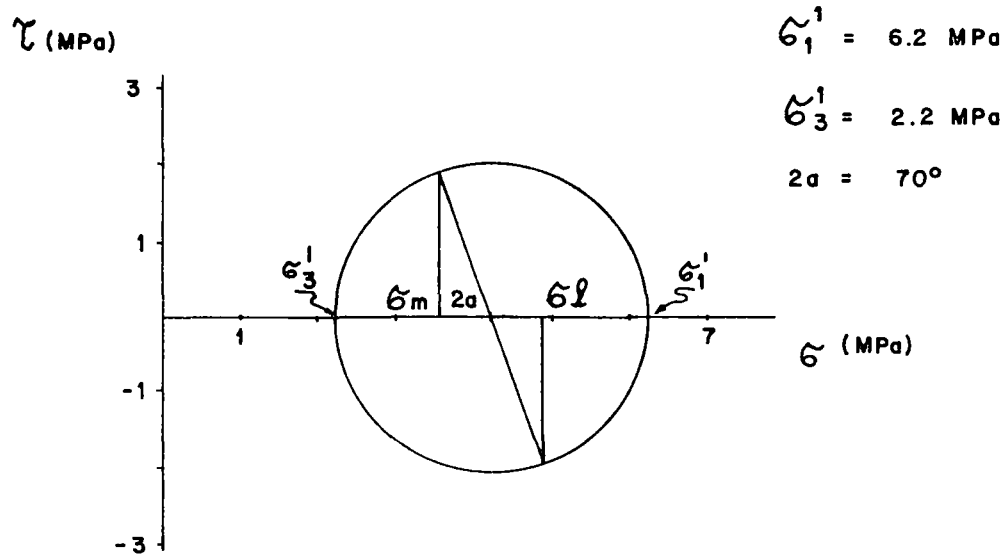
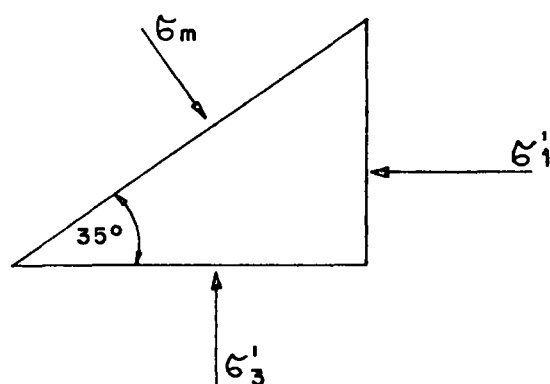


DIAGRAMA CIRCULAR DE MOHR

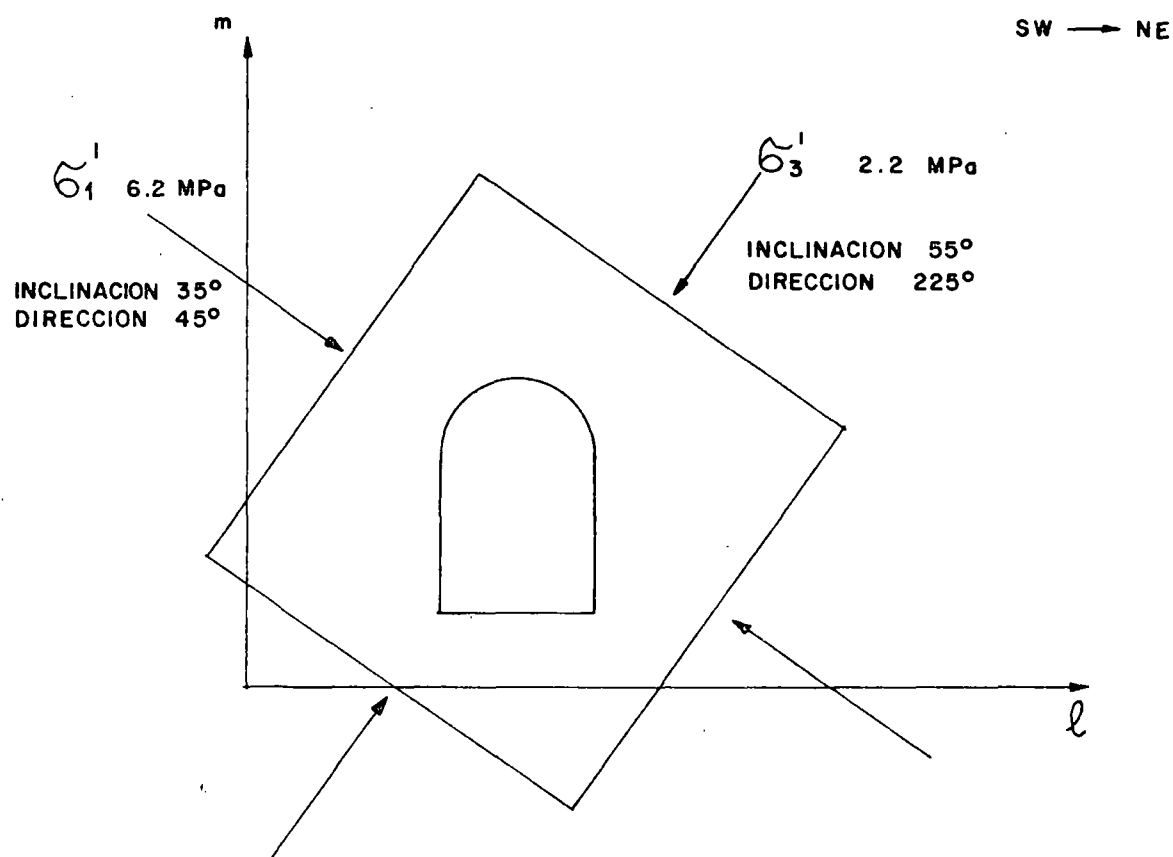


FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO

CASA DE MAQUINAS

GRAFICOS DE TRANSFORMACION DE  $\sigma_l - \sigma_m$  EN  $\sigma_1' - \sigma_3'$   
EN LA SECCION TRANSVERSAL

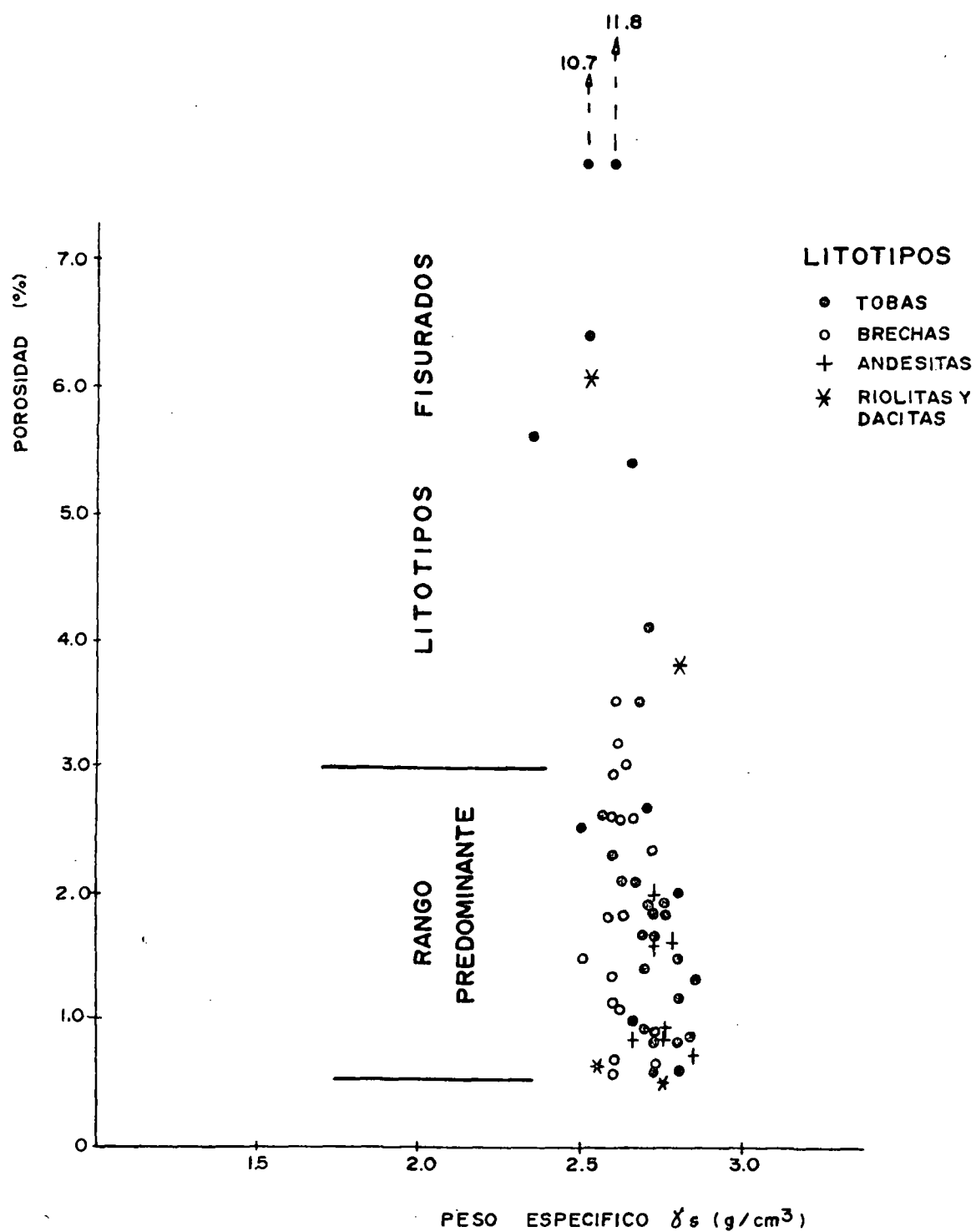


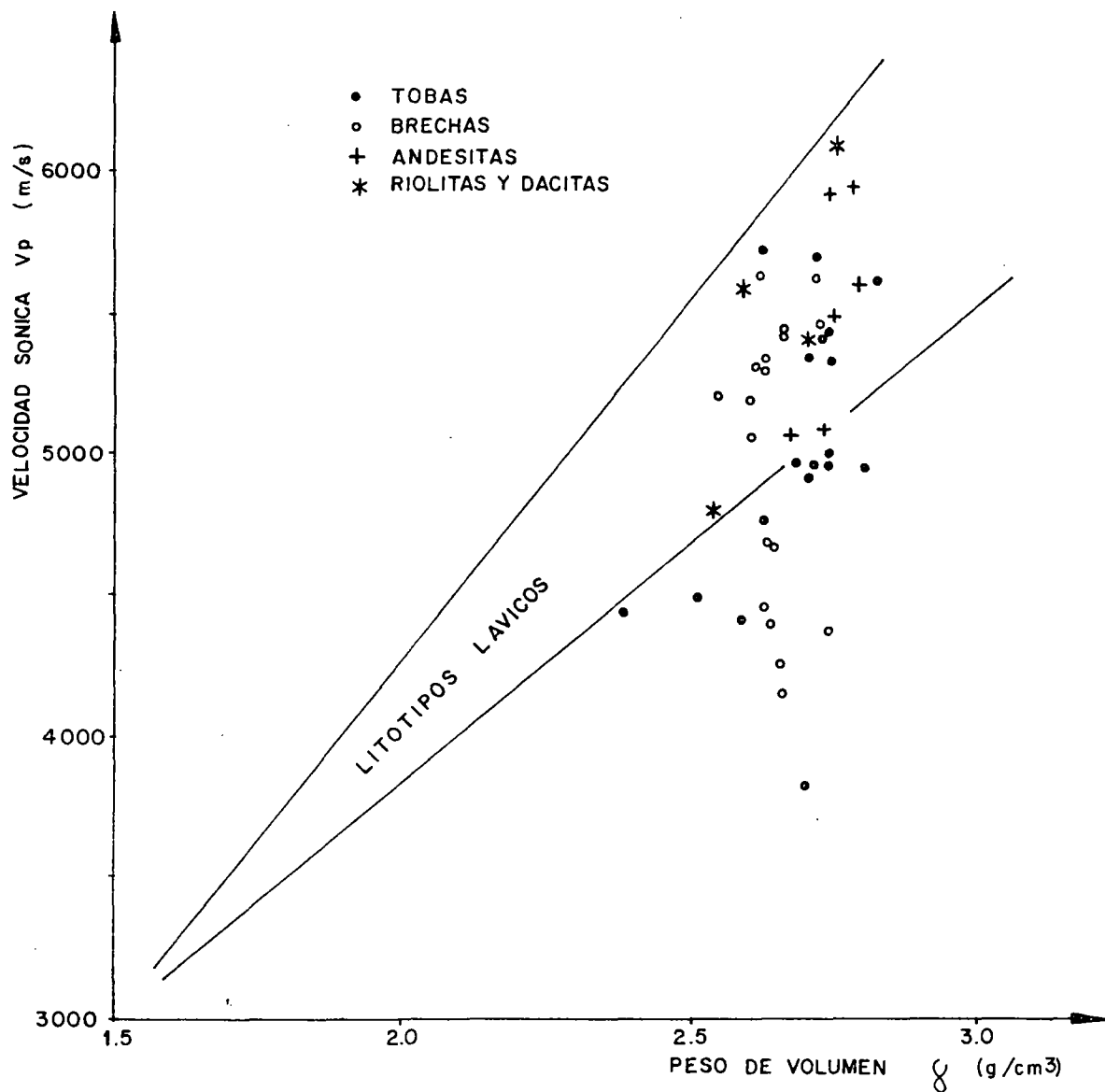
FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE HIDROFRACTURAMIENTO

CASA DE MAQUINAS

DISTRIBUCION DE LOS ESFUERZOS PRINCIPALES  $\sigma_1' - \sigma_3'$   
EN LA SECCION TRANSVERSAL

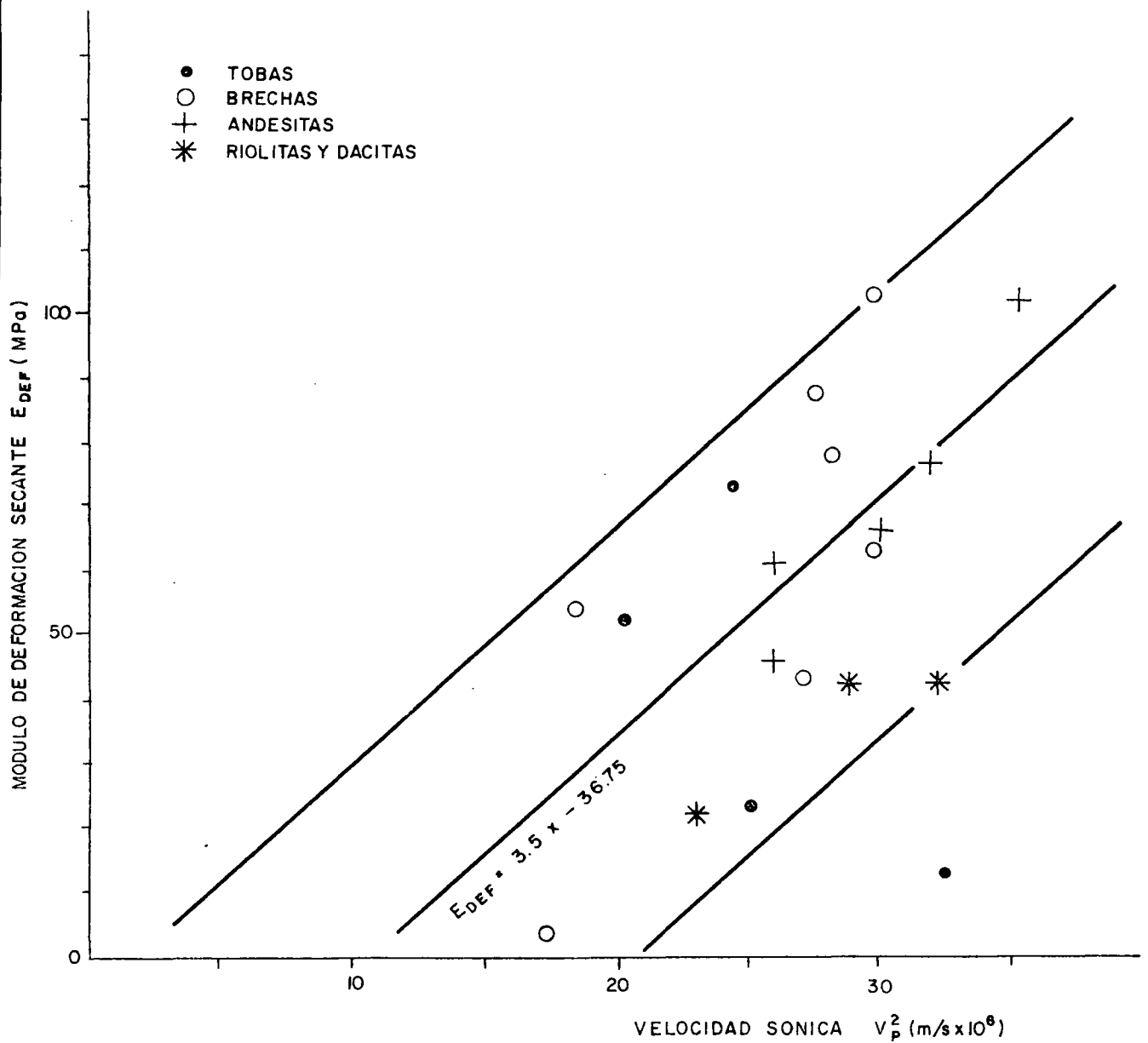




FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

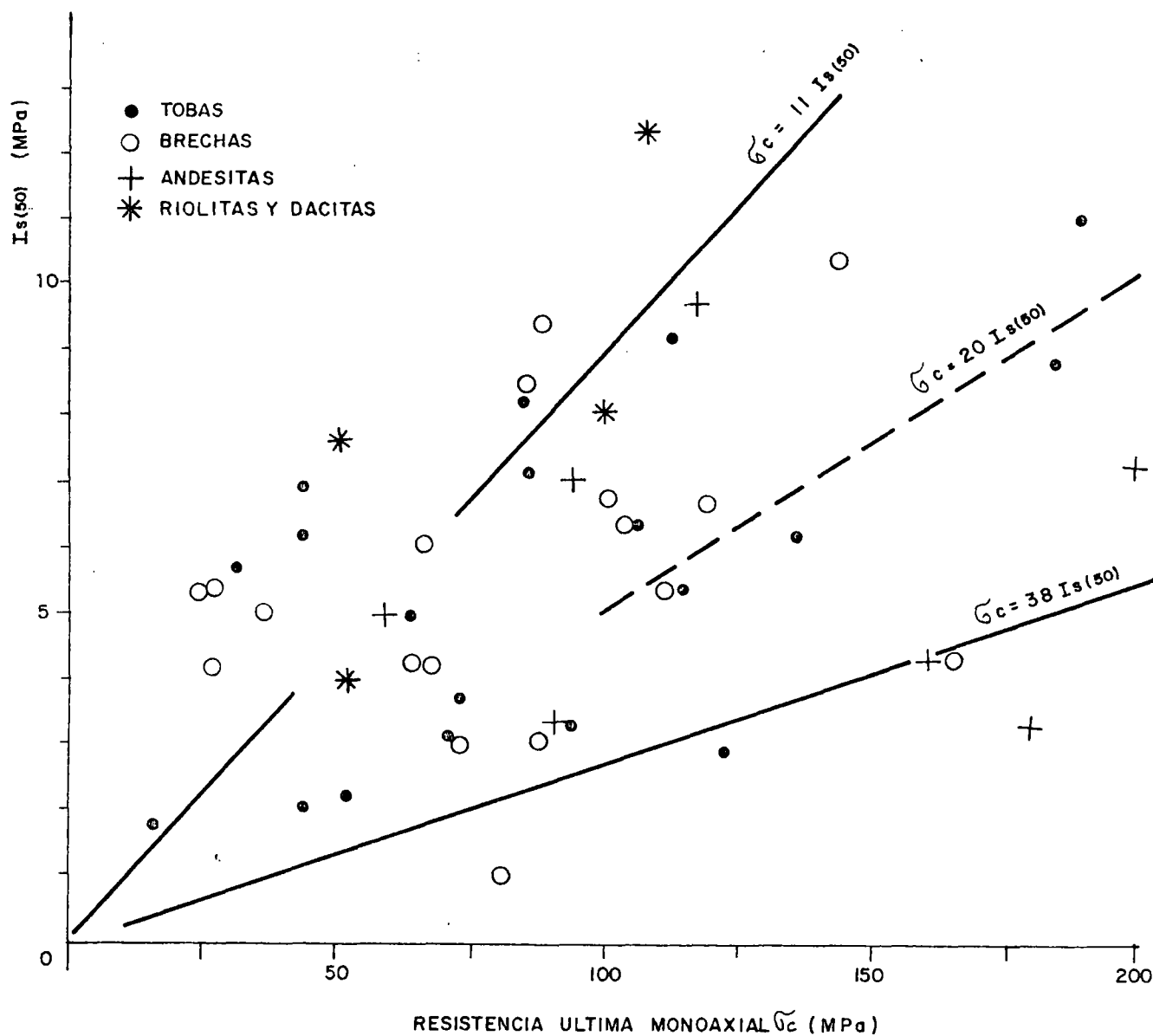
CORRELACION ENTRE VELOCIDAD SONICA Y PESO DE VOLUMEN



# FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

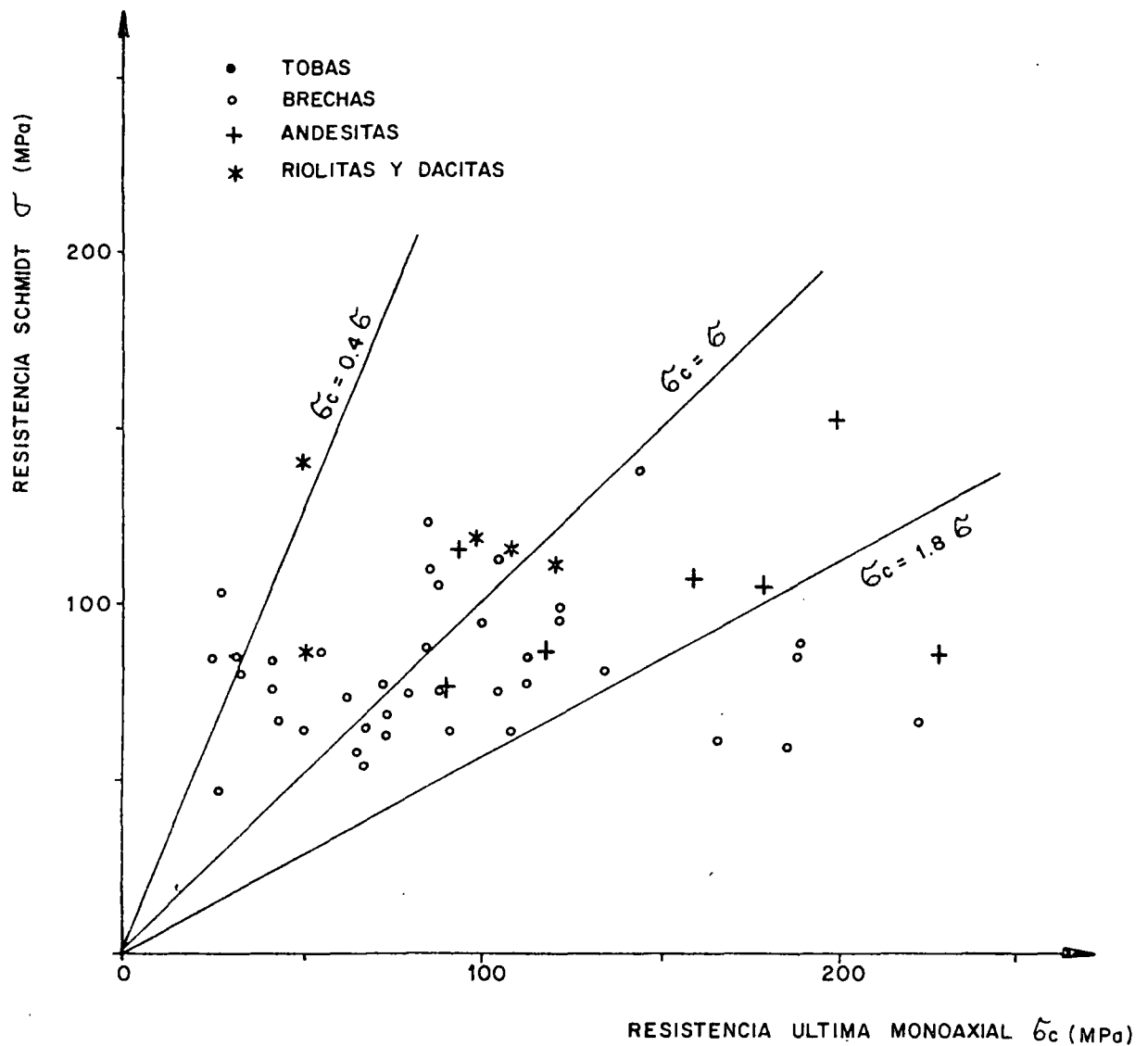
CORRELACION ENTRE MODULO DE DEFORMACION Y VELOCIDAD SONICA  $V_p^2$



## FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
COMPRESION PUNTUAL

CORRELACION ENTRE EL INDICE  $I_{s(50)}$  Y LA RESISTENCIA ULTIMA  
A LA COMPRESION MONOAXIAL  $\sigma_c$

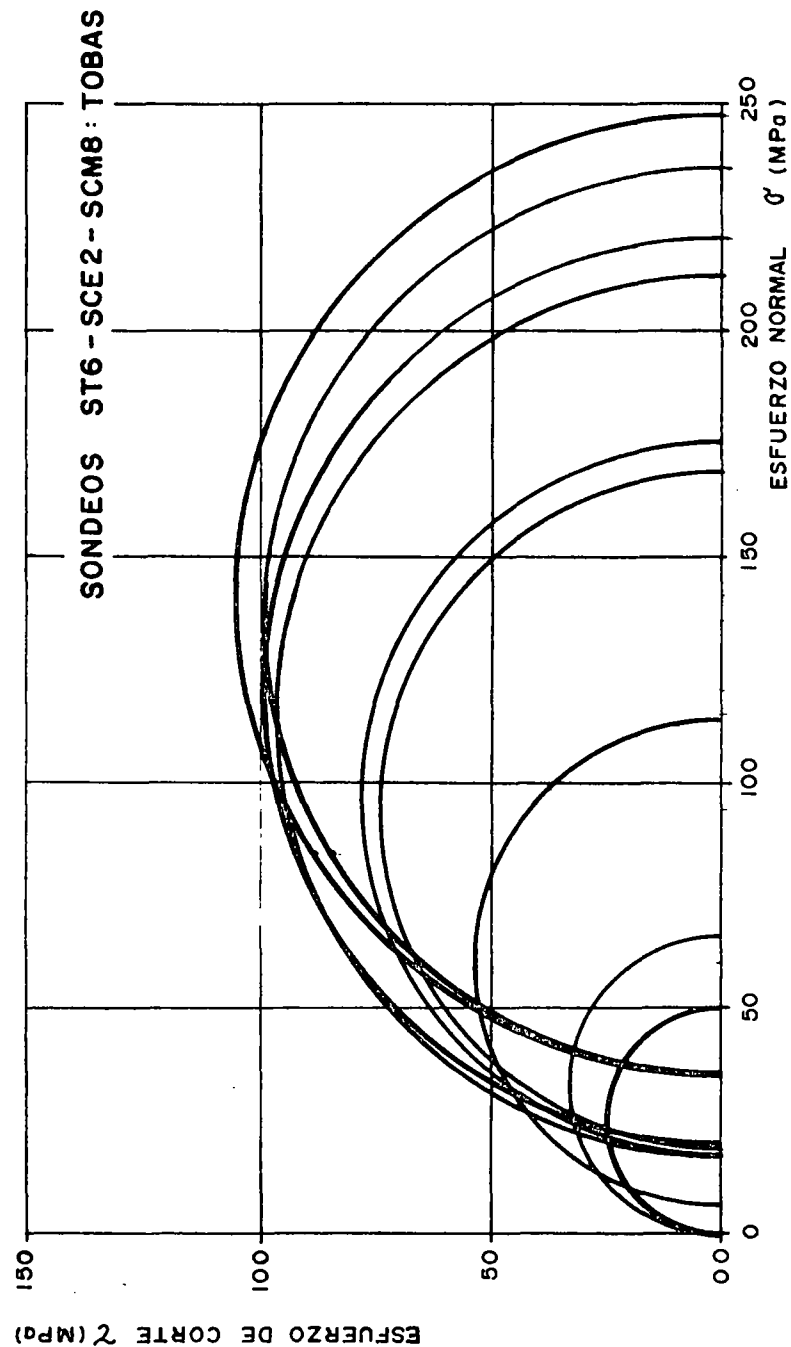


FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO

PRUEBA CON MARTILLO SCHMIDT

CORRELACION ENTRE RESISTENCIA SCHMIDT Y RESISTENCIA  
ULTIMA A LA COMPRESION MONOAXIAL  $\sigma_c$

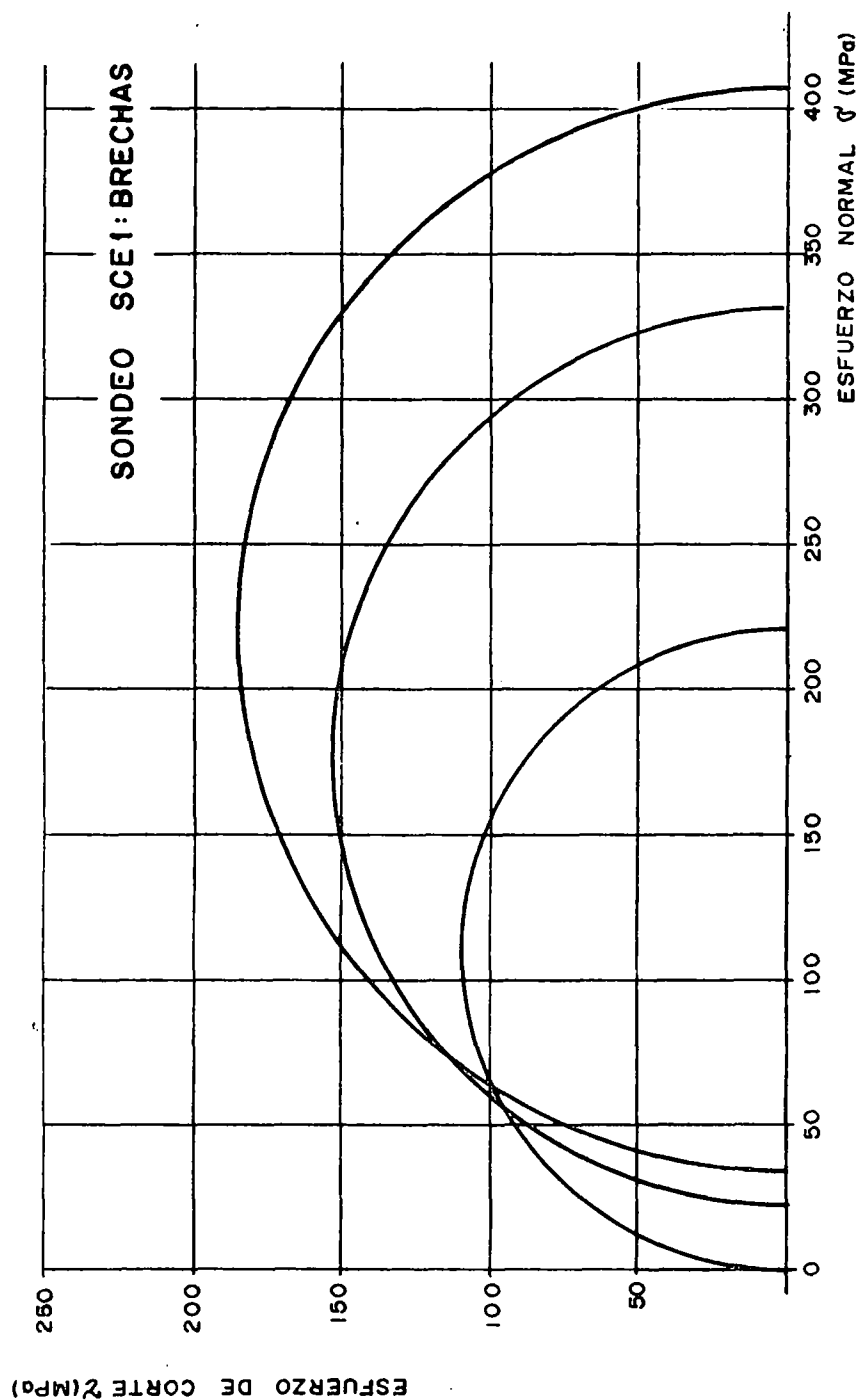


# FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
 COMPRESION TRIAXIAL - TOBAS DE LOS SONDEOS ST6 -  
 SCE2 - SCM8

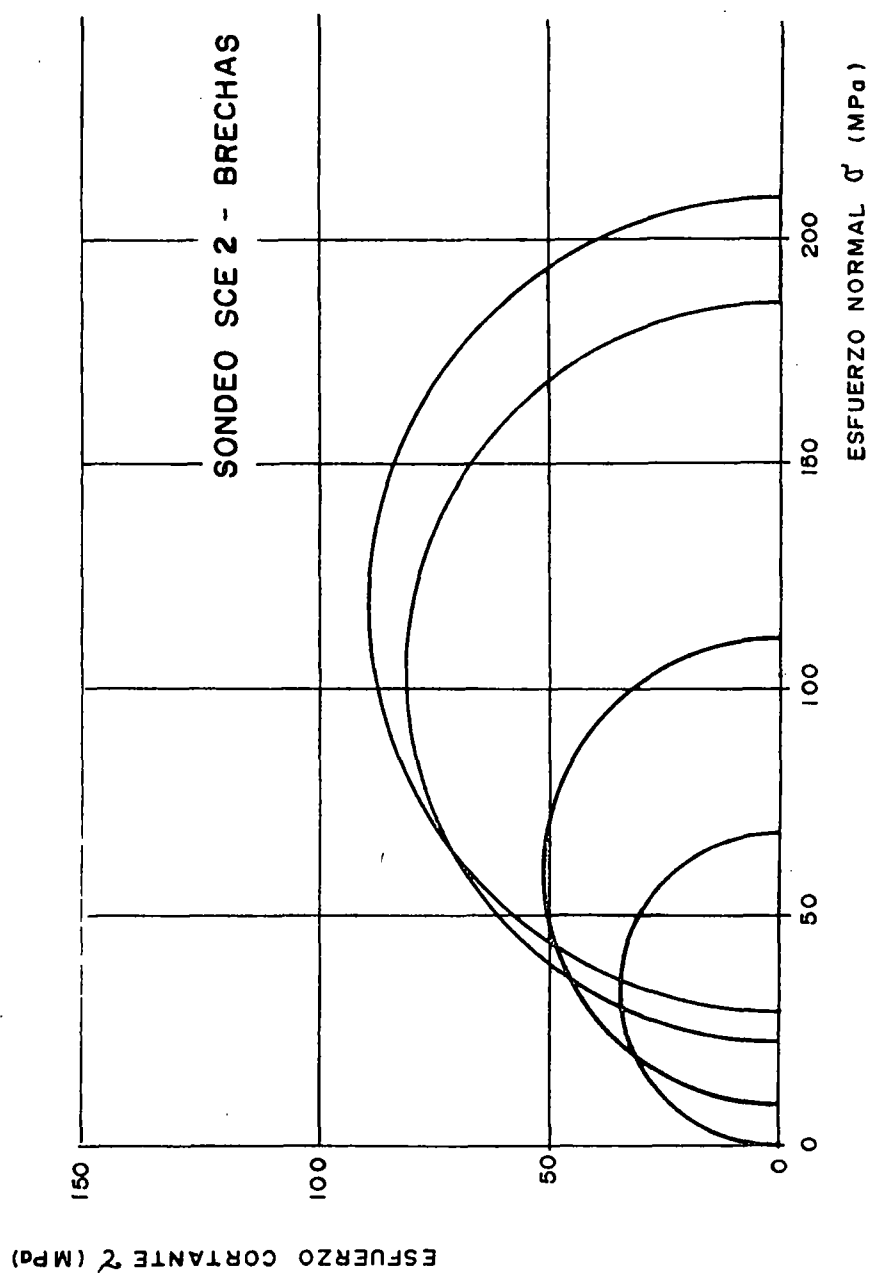
SEMICIRCULOS DE MOHR DETERMINANTES DE LA ENVOL-  
 VENTE DE RUPTURA EN EL PLANO  $\tau$ - $\sigma'$





### FORMACION MISAHUALLI

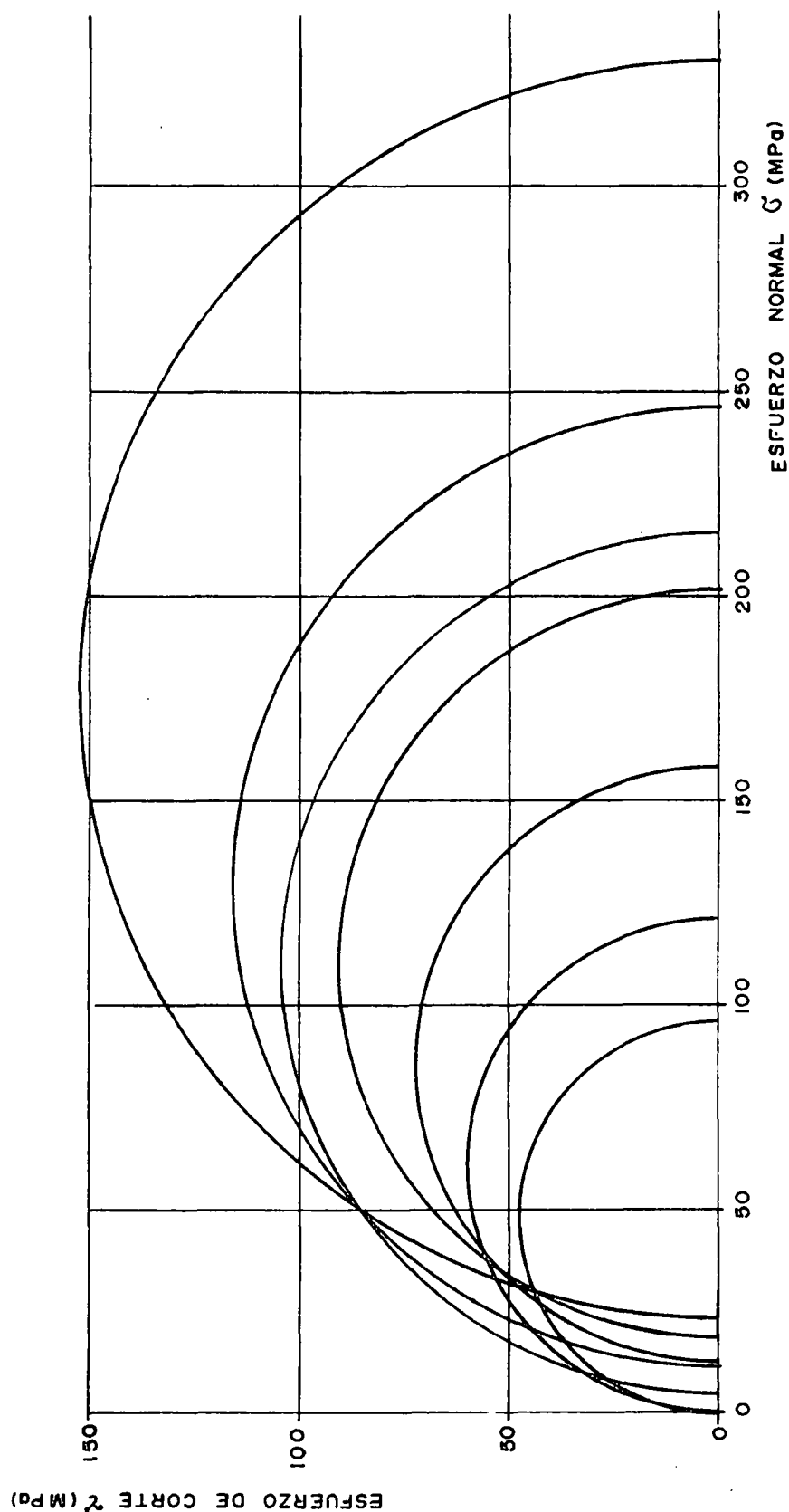
ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
 COMPRESION TRIAXIAL - BRECHAS DEL SONDEO SCE 1  
 SEMICIRCULOS DE MOHR DETERMINANTES DE LA EN-  
 VOLVENTE DE RUPTURA EN EL PLANO  $\tau$ - $\sigma$



### FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
 COMPRESION TRIAXIAL - BRECHAS DEL SONDEO SCE 2  
 SEMICIRCULOS DE MOHR DETERMINANTES DE LA ENVOL-  
 VENTE DE RUPTURA EN EL PLANO  $\tau - \sigma$

SONDEOS SCM 4 - SCM 7: ANDESITA - RIOLITA



## FORMACION MISAHUALLI

ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
 COMPRESION TRIAXIAL - ANDESITA Y RIOLITA DE LOS  
 SONDEOS SCM 4-7

SEMICIRCULOS DE MOHR DETERMINANTES DE LA EN-  
 VOLVENTE DE RUPTURA EN EL PLANO  $\tau - \sigma$

FORMACION MISAHUALLI  
ENSAYOS DE MECANICA DE ROCAS EN LABORATORIO  
COMPRESION TRIAXIAL  
ENVOLVENTES DE RUPTURA

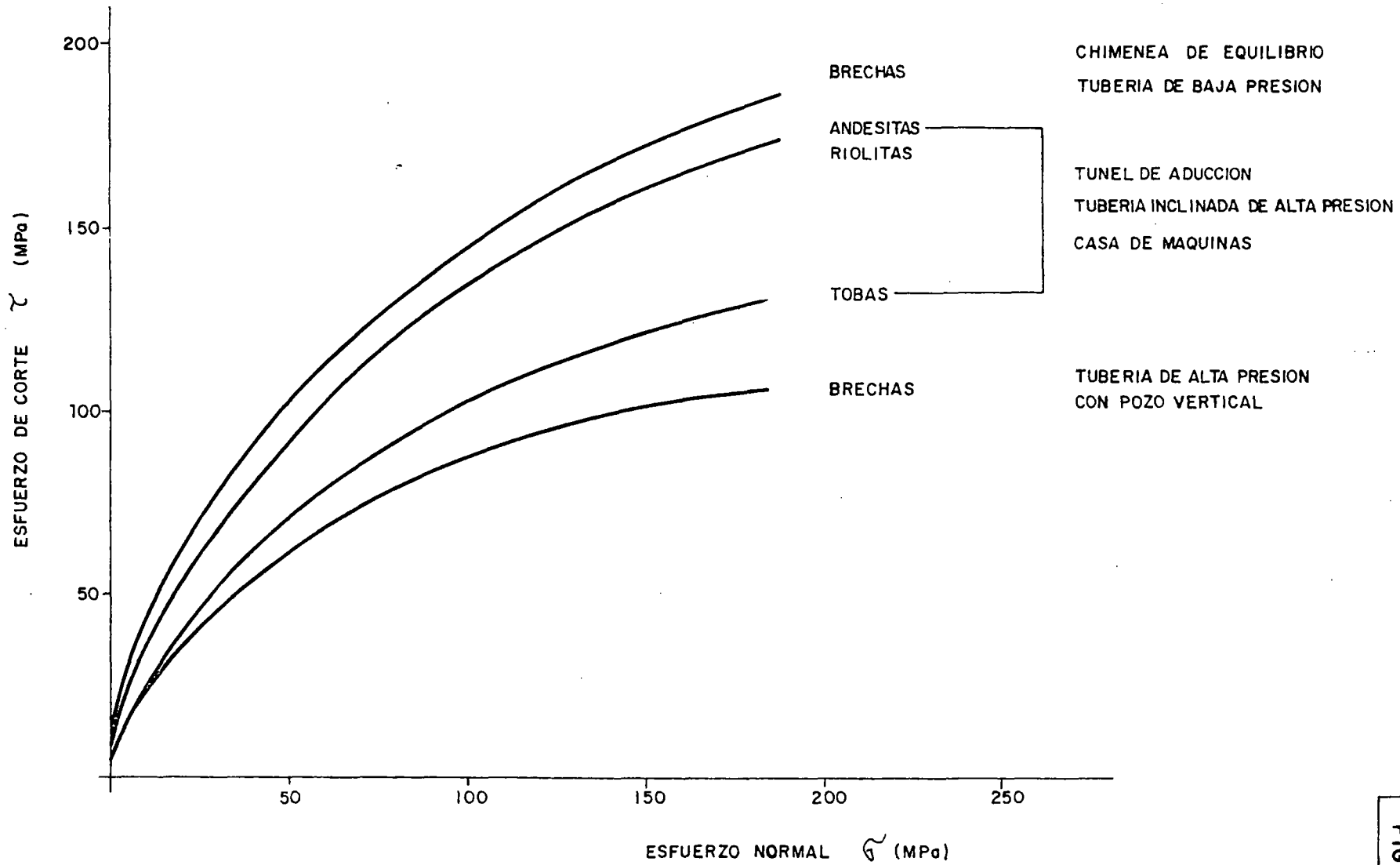
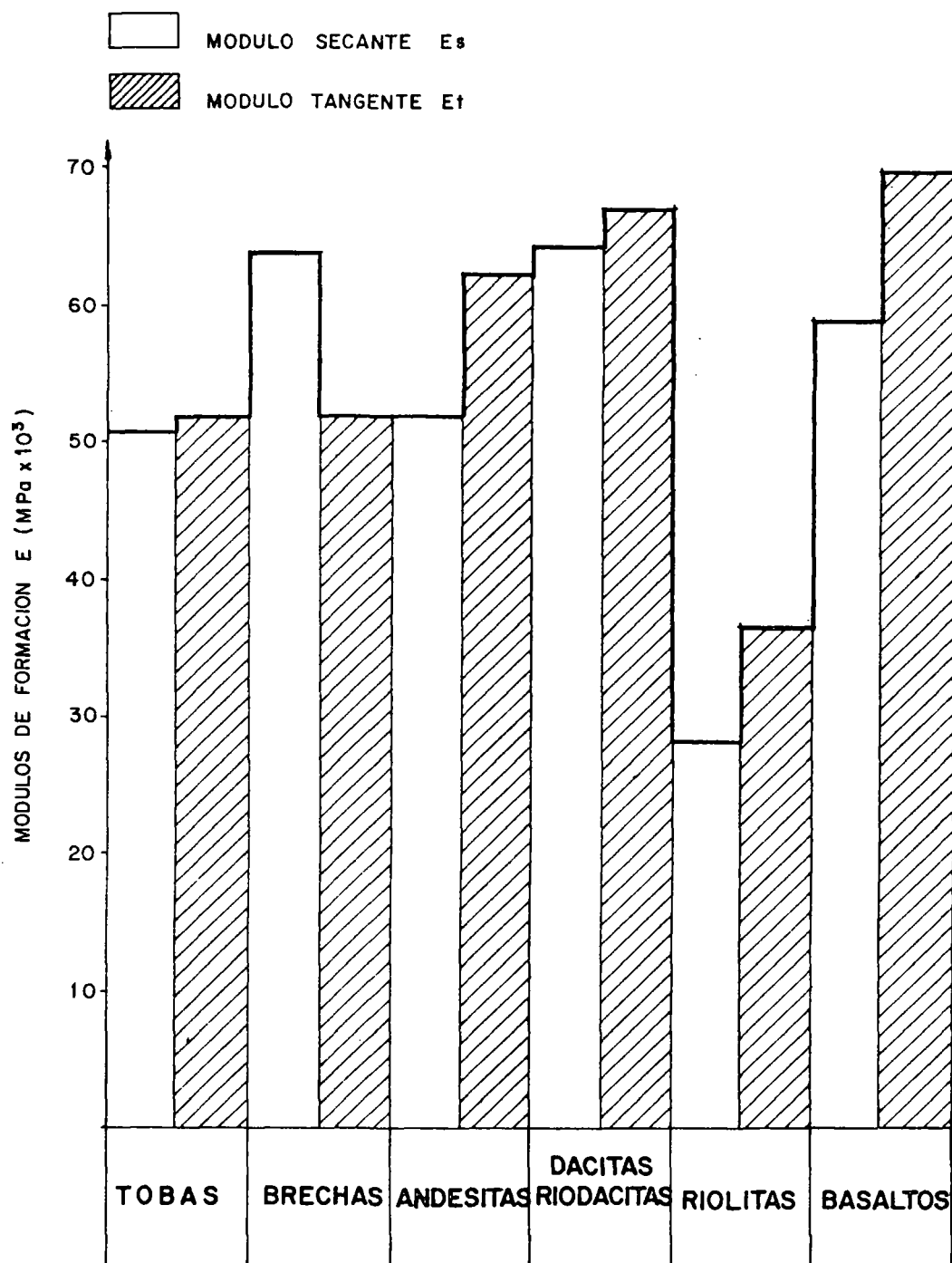
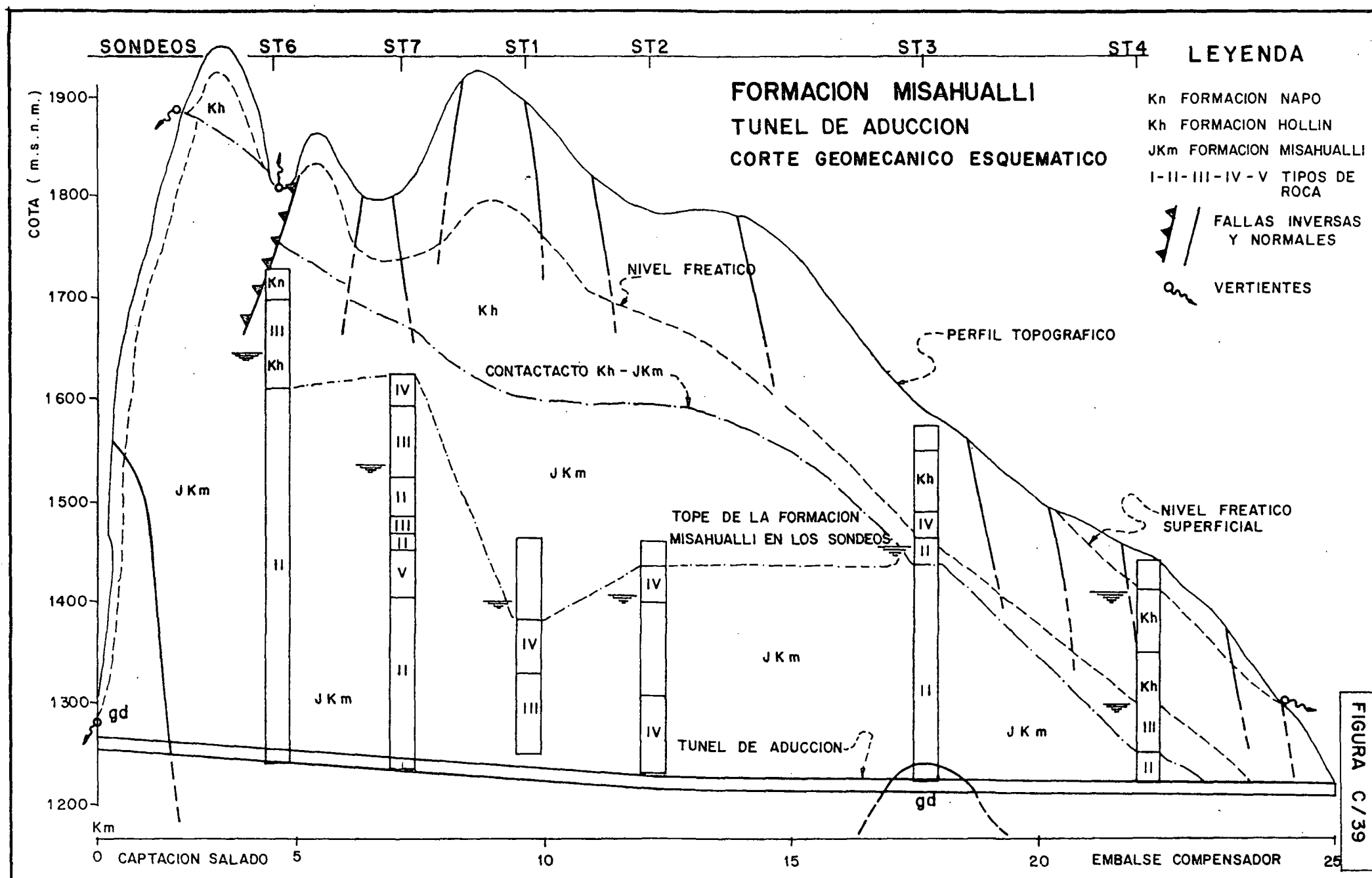


FIGURA C/37



FORMACION MISAHUALLI  
HISTOGRAMAS DE MODULOS DE DEFORMACION



FORMACION MISAHUALLI  
TUNEL DE ADUCCION  
CORTE LITOLOGICO ESQUEMATICO

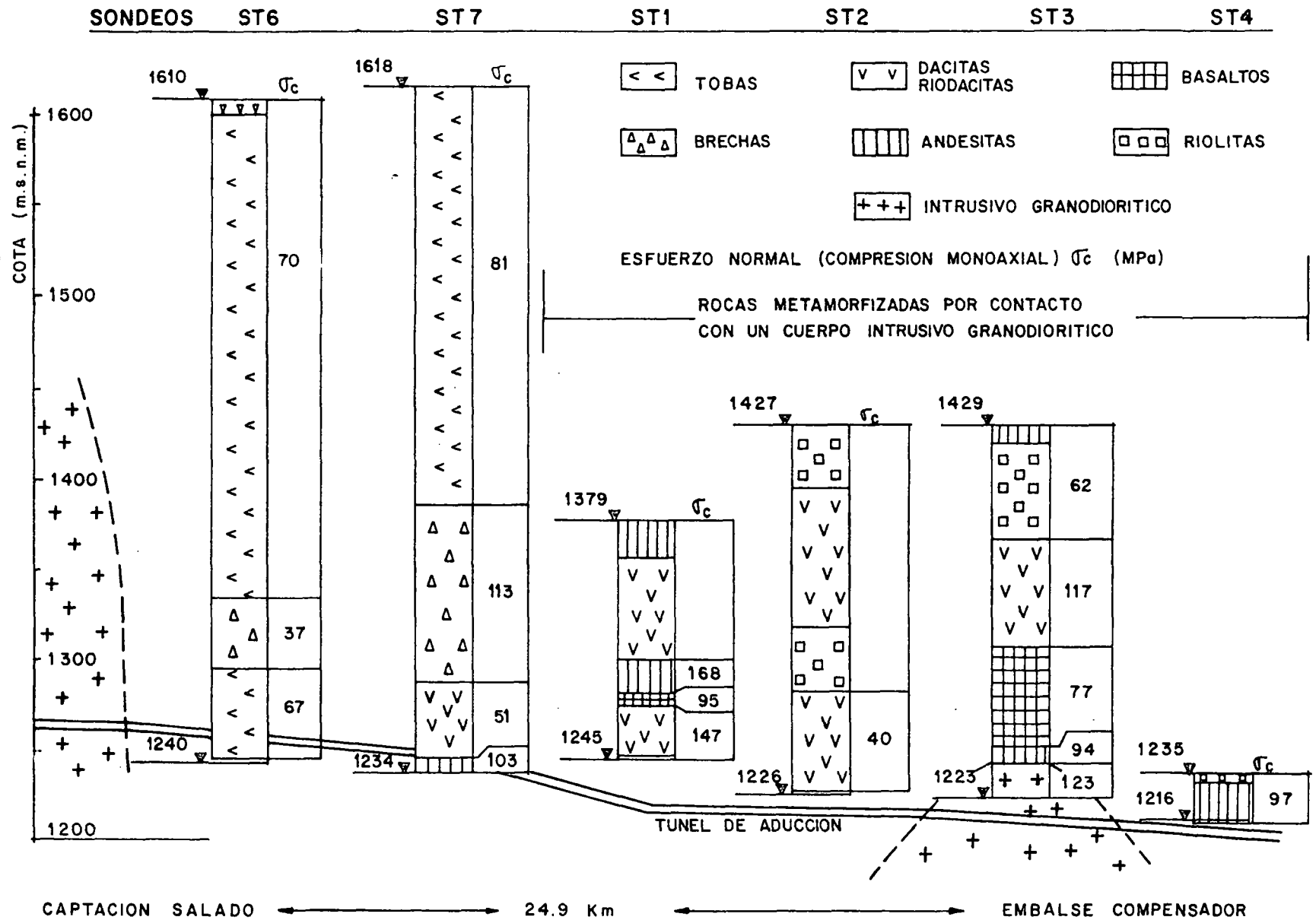
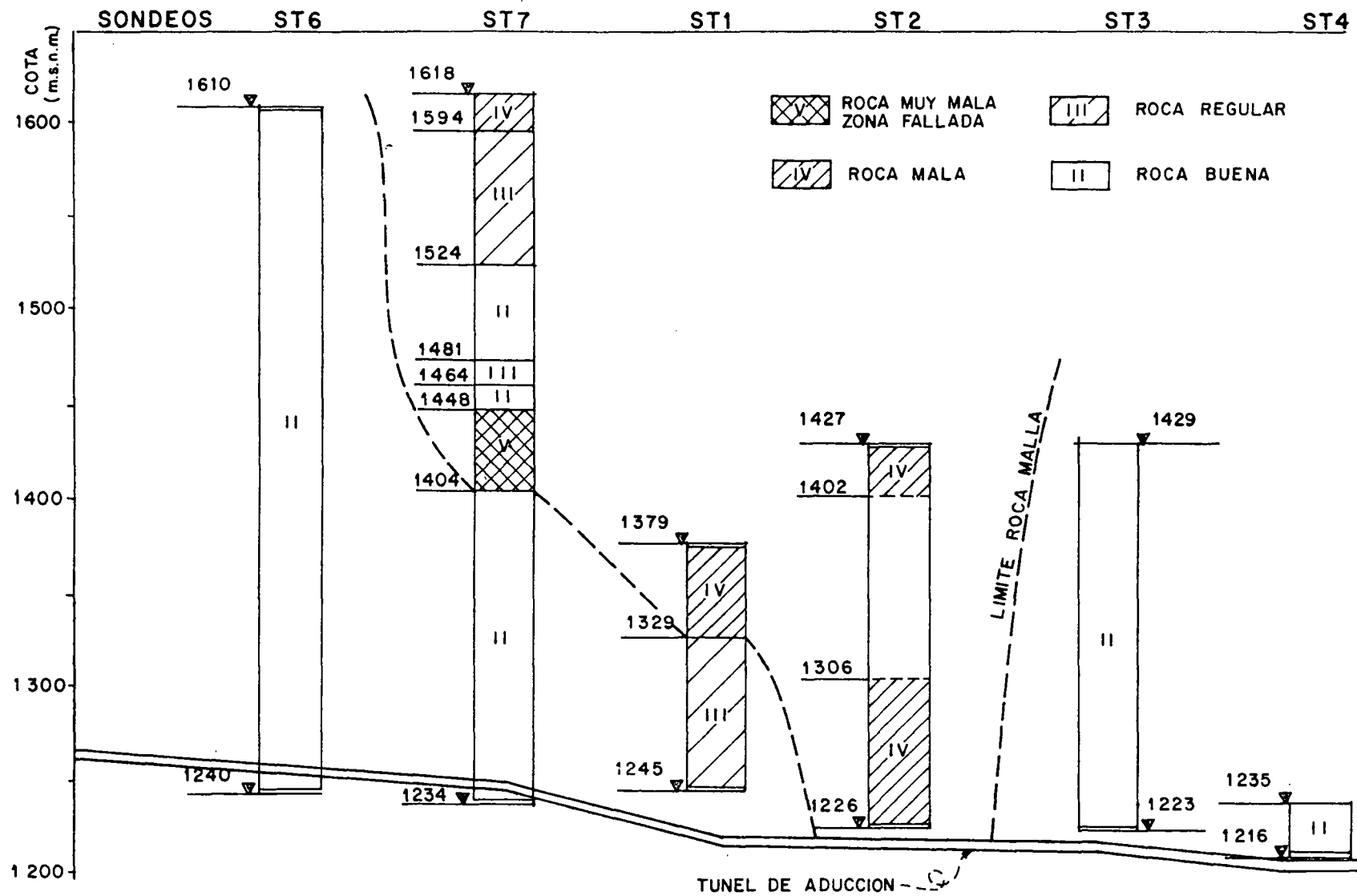
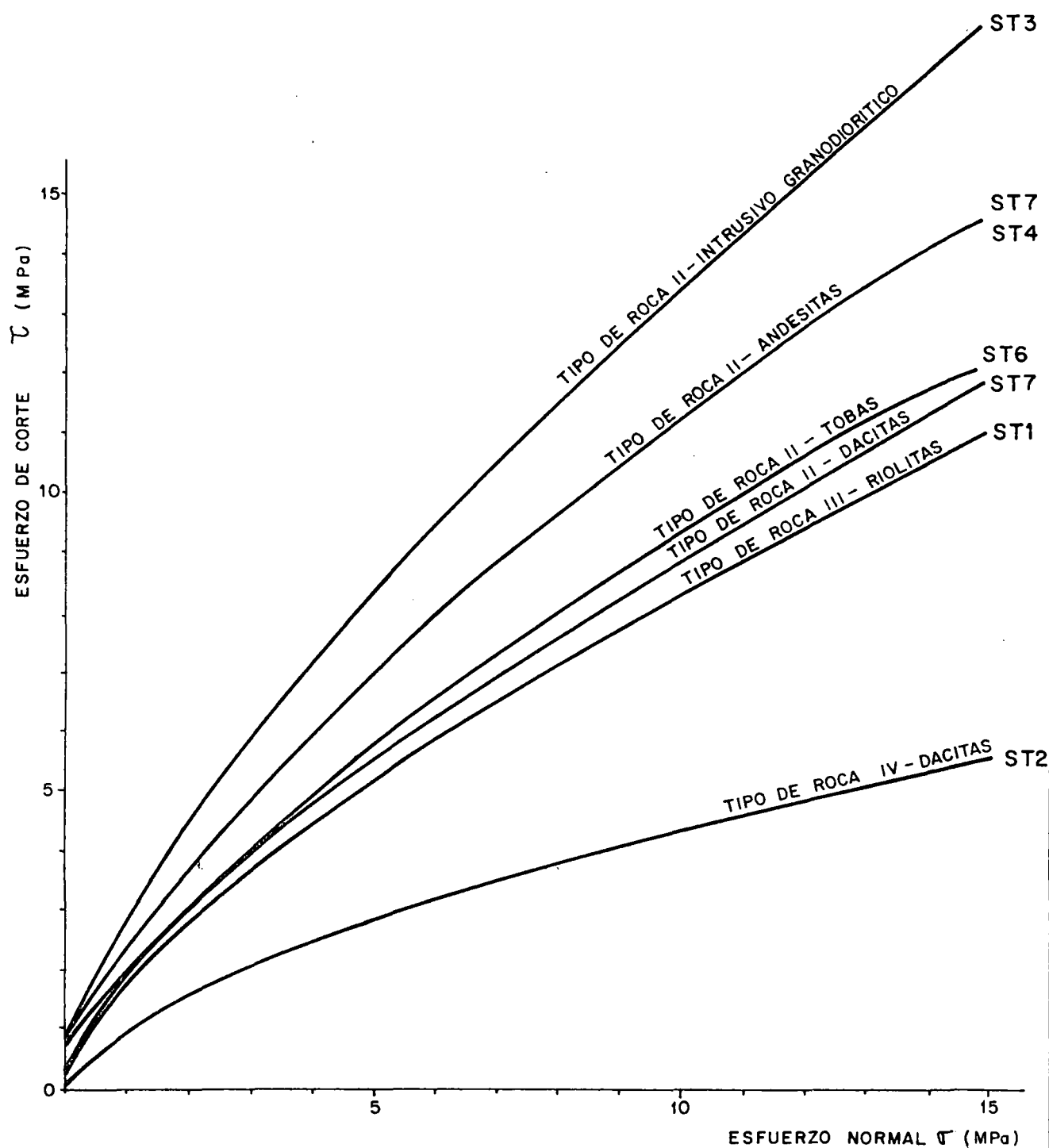


FIGURA C/40

**FORMACION MISAHUALLI**  
**TUNEL DE ADUCCION**  
**CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO**



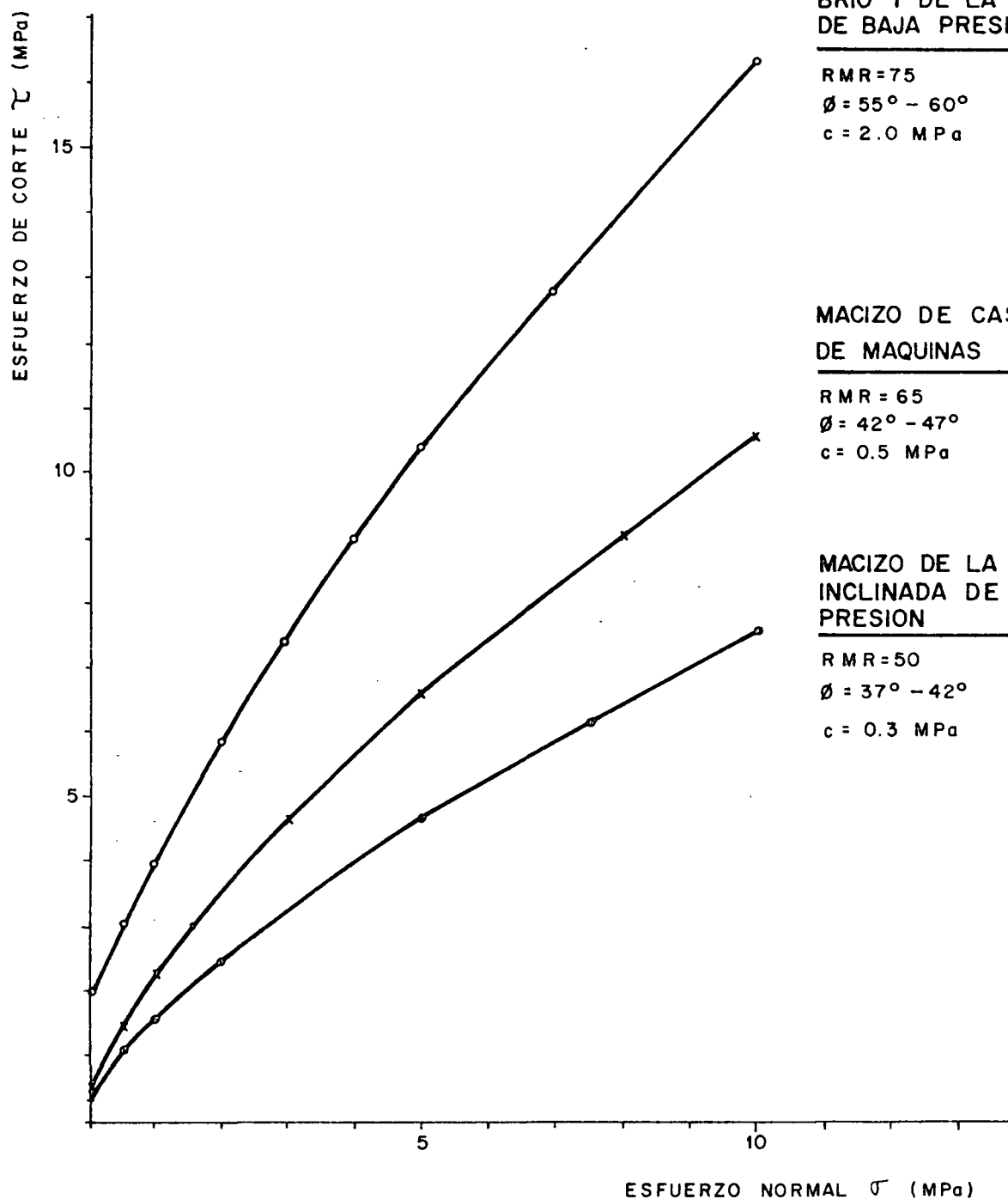




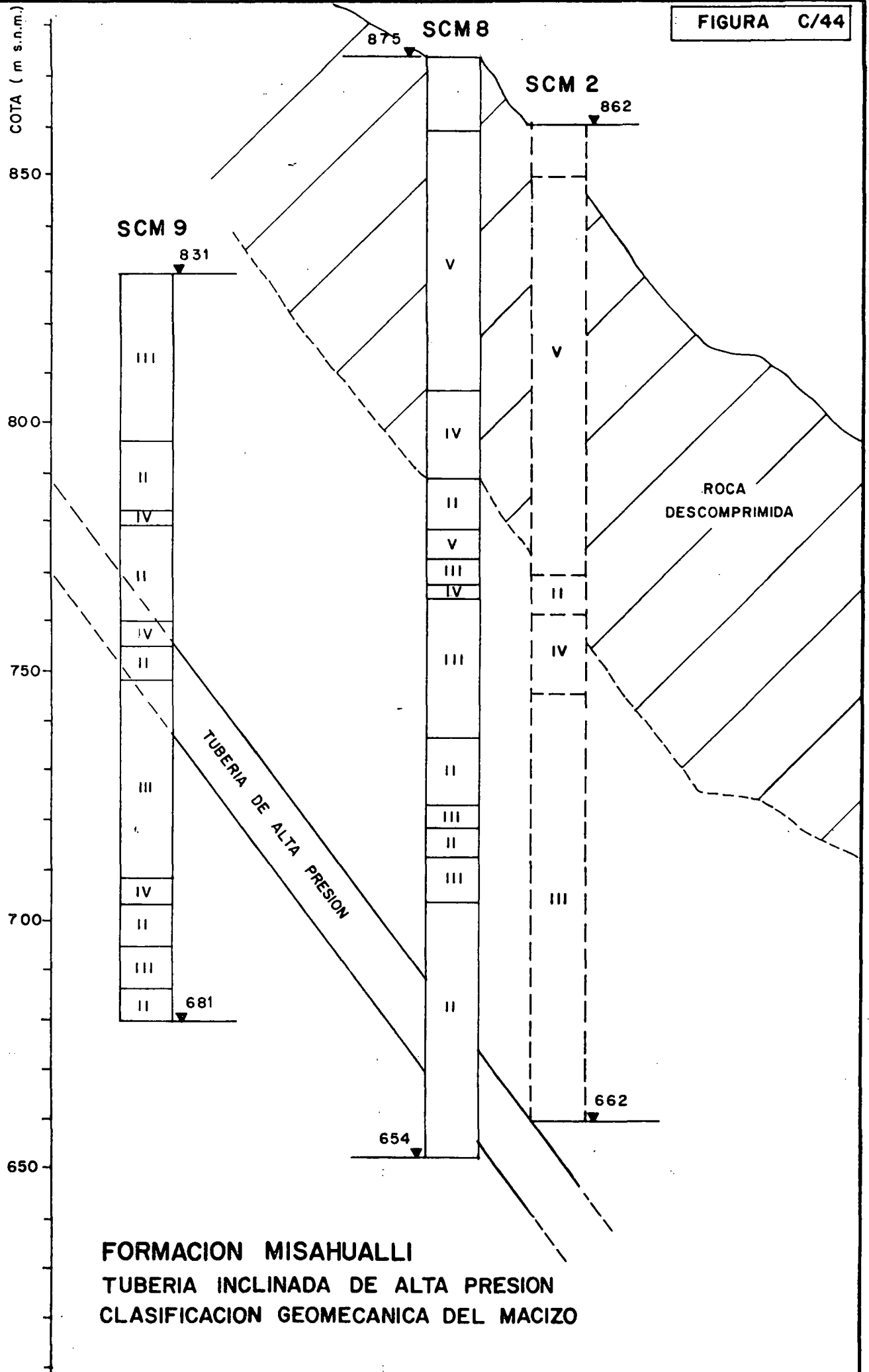
FORMACION MISAHUALLI

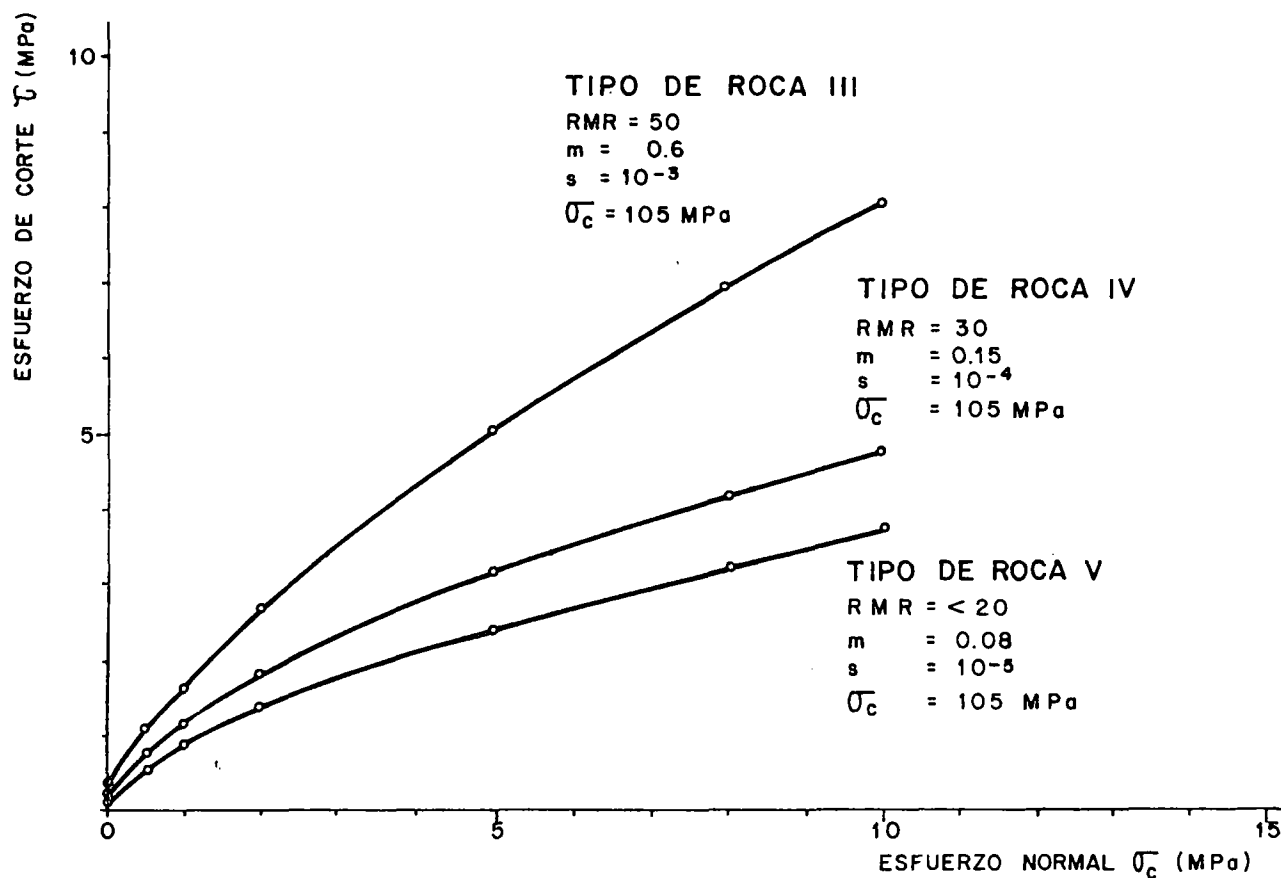
TUNEL DE ADUCCION

ENVOLVENTES DE RUPTURA EN EL PLANO  $\tau - \sigma$



FORMACION MISAHUALLI  
 OBRAS DE GENERACION  
 ENVOLVENTES DE RUPTURA EN EL PLANO  $\tau - \sigma$



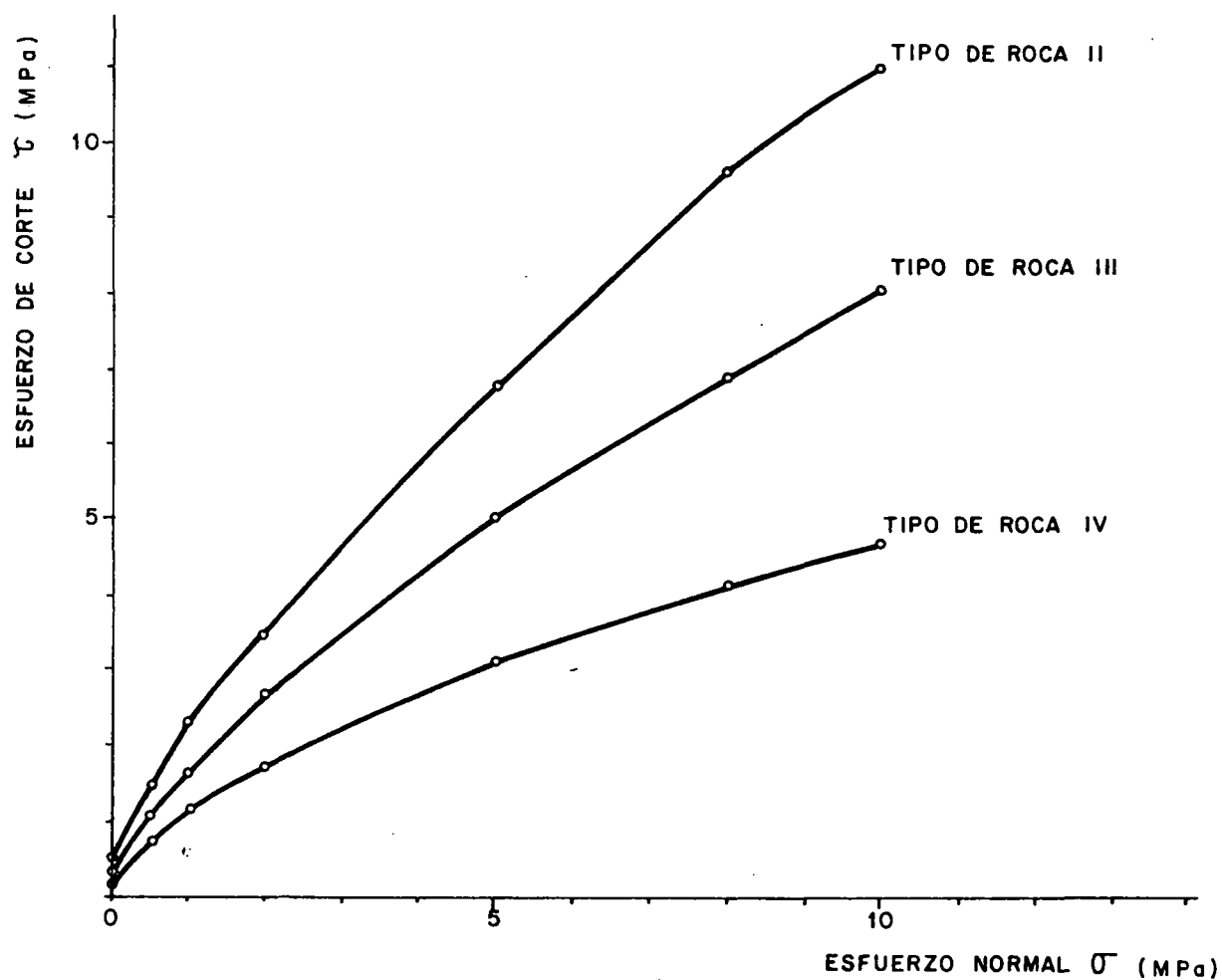


FORMACION MISAHUALLI

TUBERIA INCLINADA DE ALTA PRESION

GALERIA EXPLORATORIA GTP 1

ENVOLVENTES DE RUPTURA DEL MACIZO EN EL PLANO  $\sigma$ - $\tau$

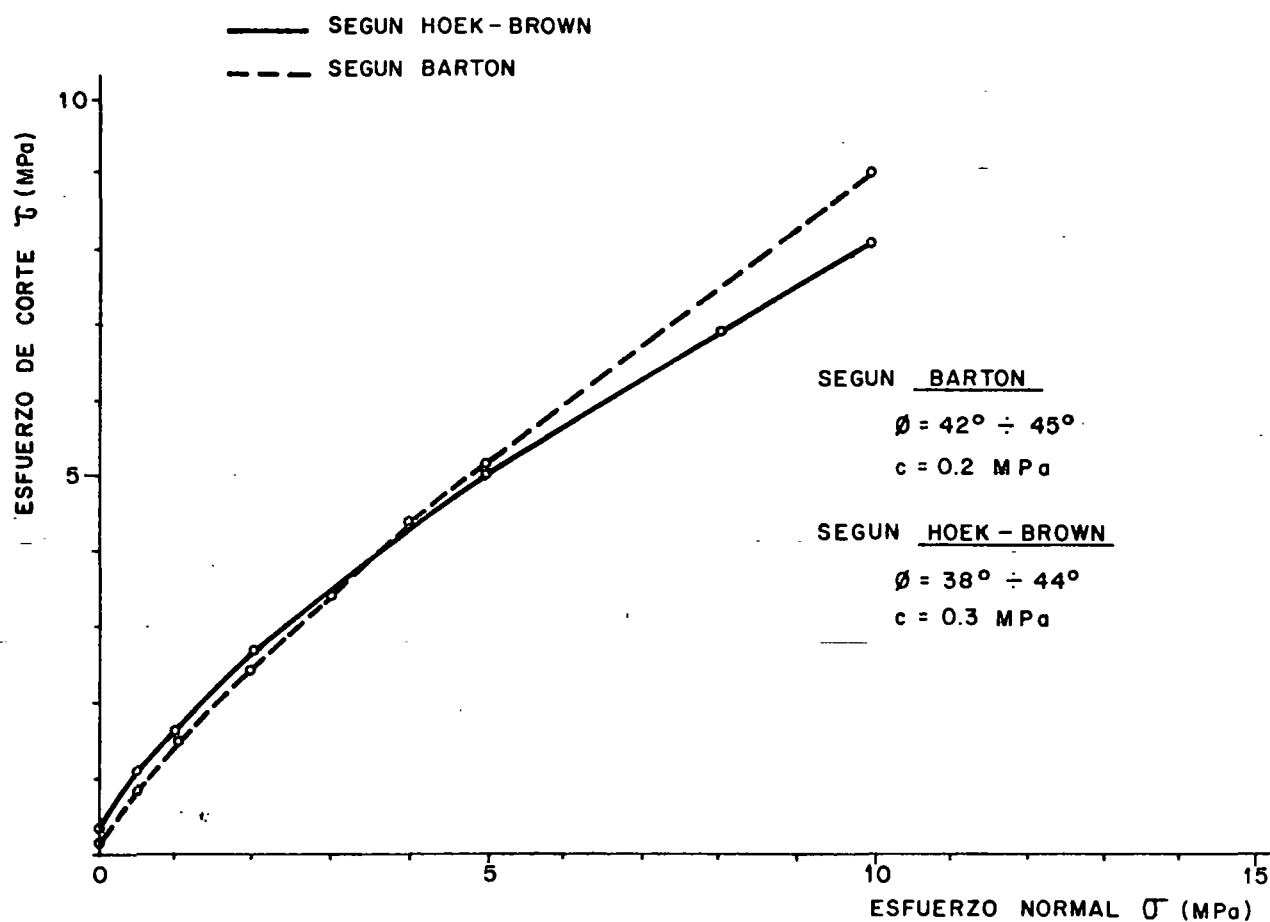


FORMACION MISAHUALLI

TUBERIA INCLINADA DE ALTA PRESION

SONDEOS ROTATIVOS

ENVOLVENTES DE RUPTURA DEL MACIZO EN EL PLANO  $\tau - \sigma$



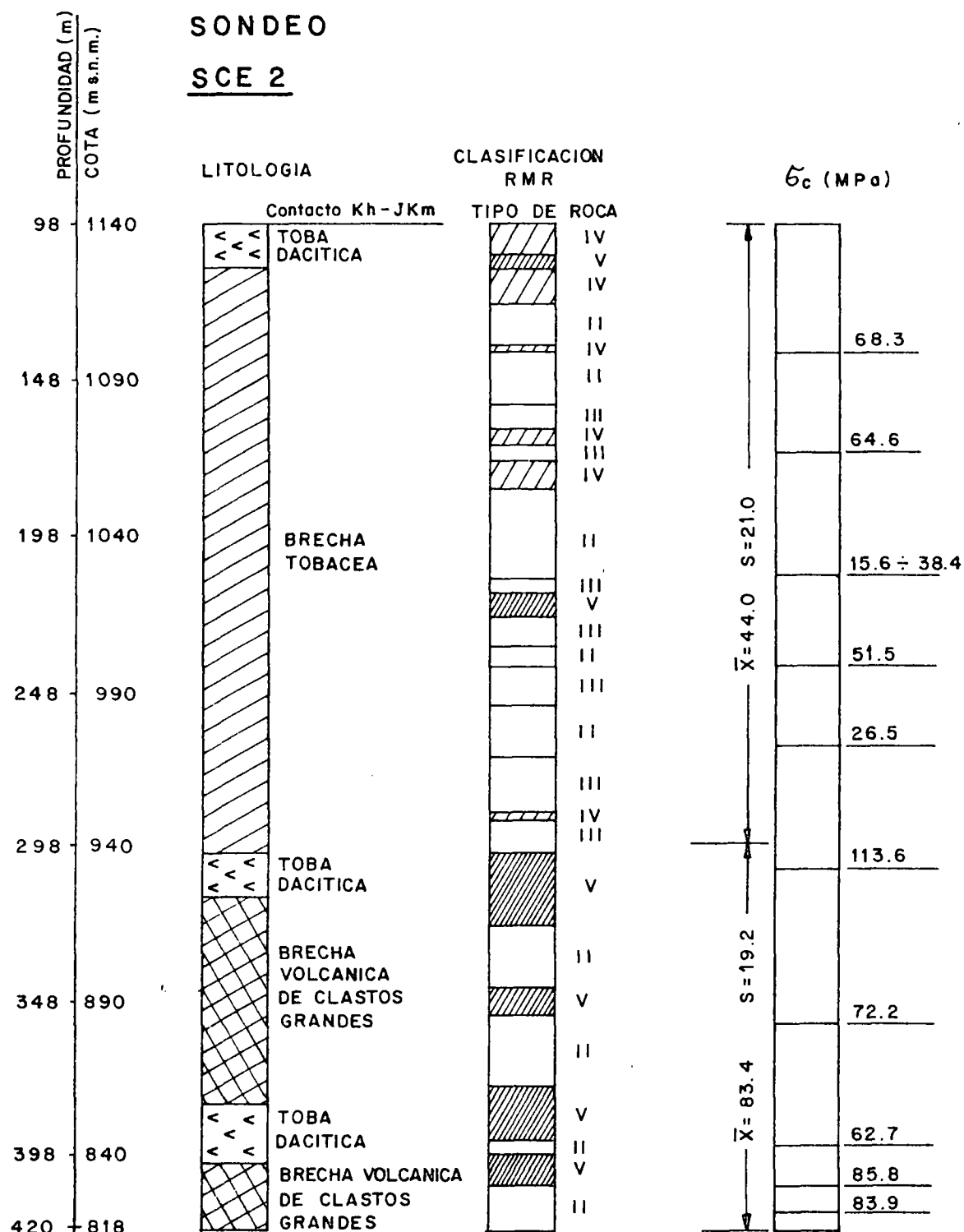
FORMACION MISAHUALLE

TUBERIA INCLINADA DE ALTA PRESION

GALERIA EXPLORATORIA GTP 1

ENVOLVENTES DE RUPTURA DE LAS DISCONTINUIDADES

EN EL PLANO  $\tau - \sigma$



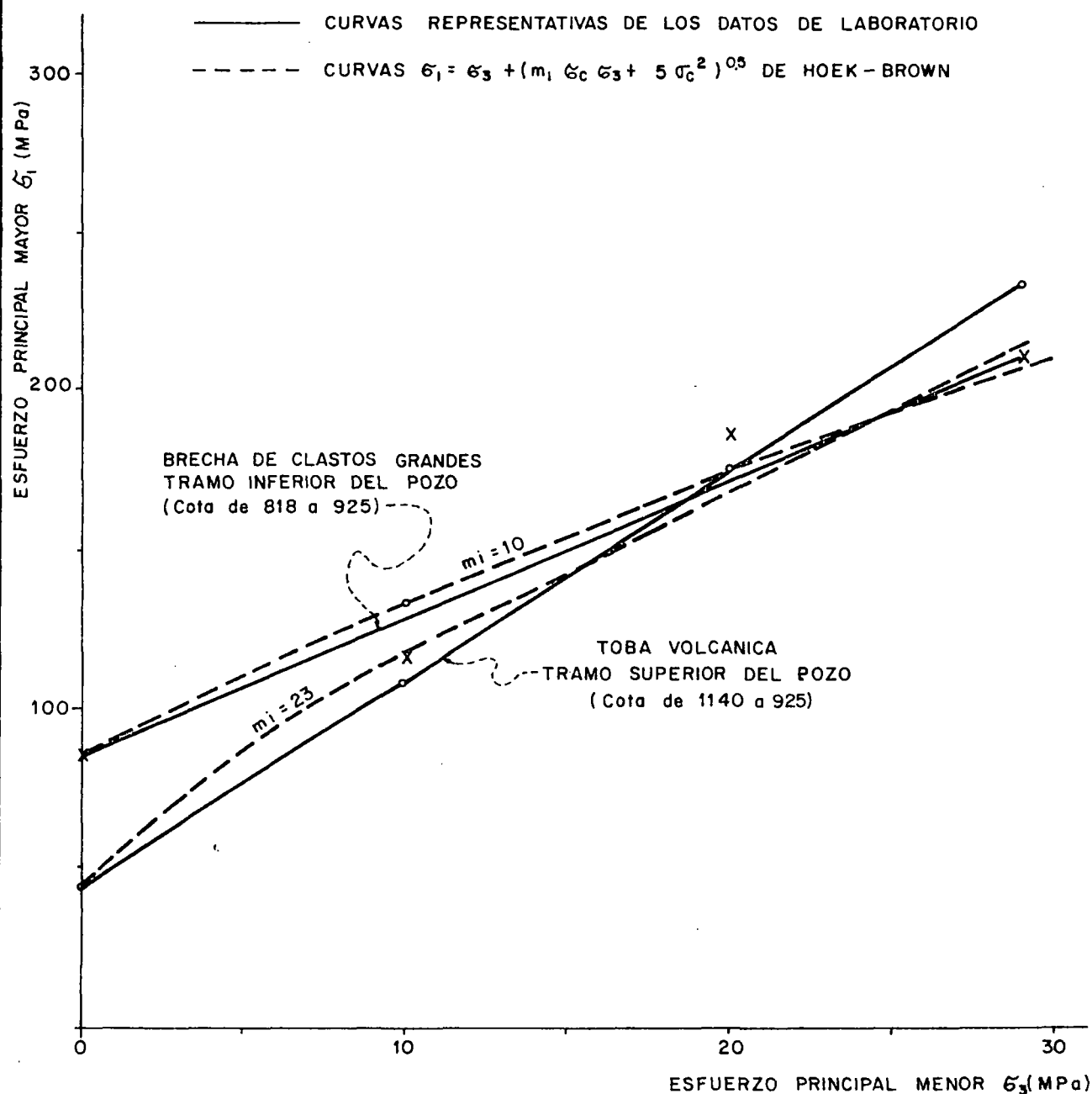
FORMACION MISAHUALLI

TUBERIA DE PRESION CON POZO VERTICAL

CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO

## SONDEO SCE 2

## ENSAYOS DE COMPRESION MONOAXIAL Y TRIAXIAL



FORMACION MISAHUALLI

TUBERIA DE PRESION CON POZO VERTICAL

SONDEO SCE 2

CURVAS  $\sigma_1 - \sigma_3$  OBTENIDAS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO  
SOBRE ROCA INTACTA



TRAMO SUPERIOR DEL POZO  
SONDEO SCE 2  
LITOTIPO PREDOMINANTE: TOBA VOLCANICA

ESFUERZO DE CORTE  $\tau$  (MPa)

ESFUERZO NORMAL  $\sigma$  (MPa)

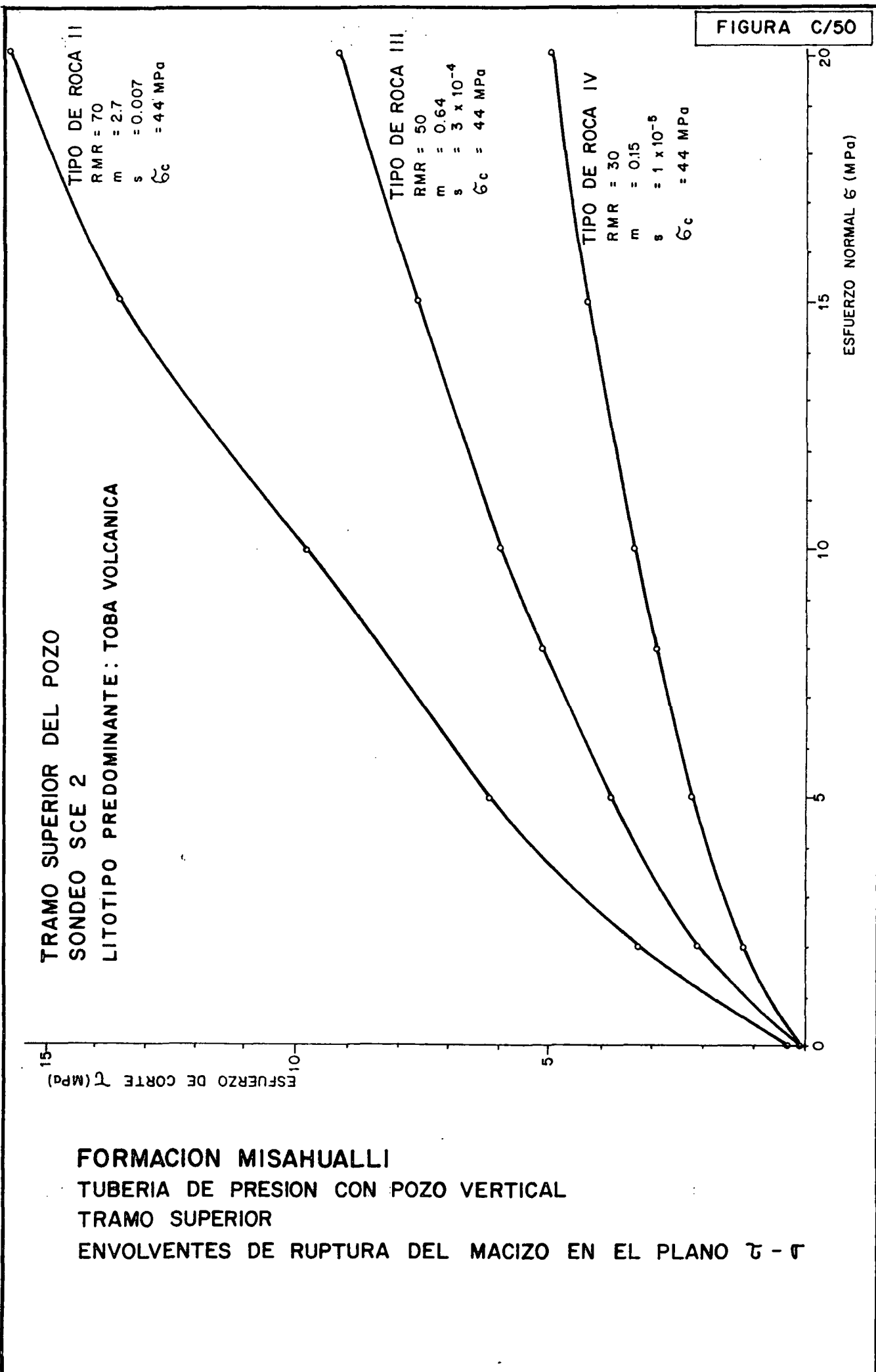
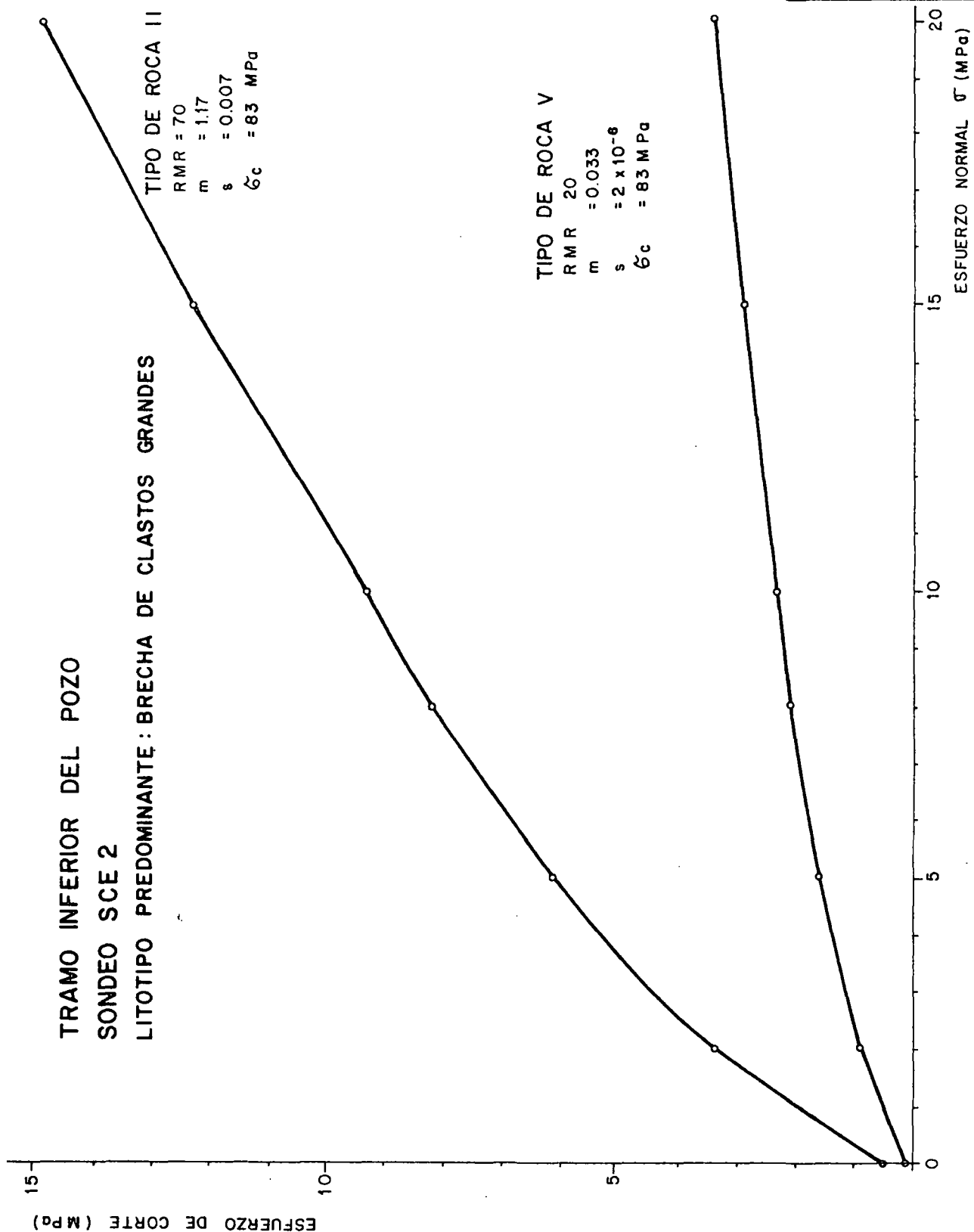


FIGURA C/51

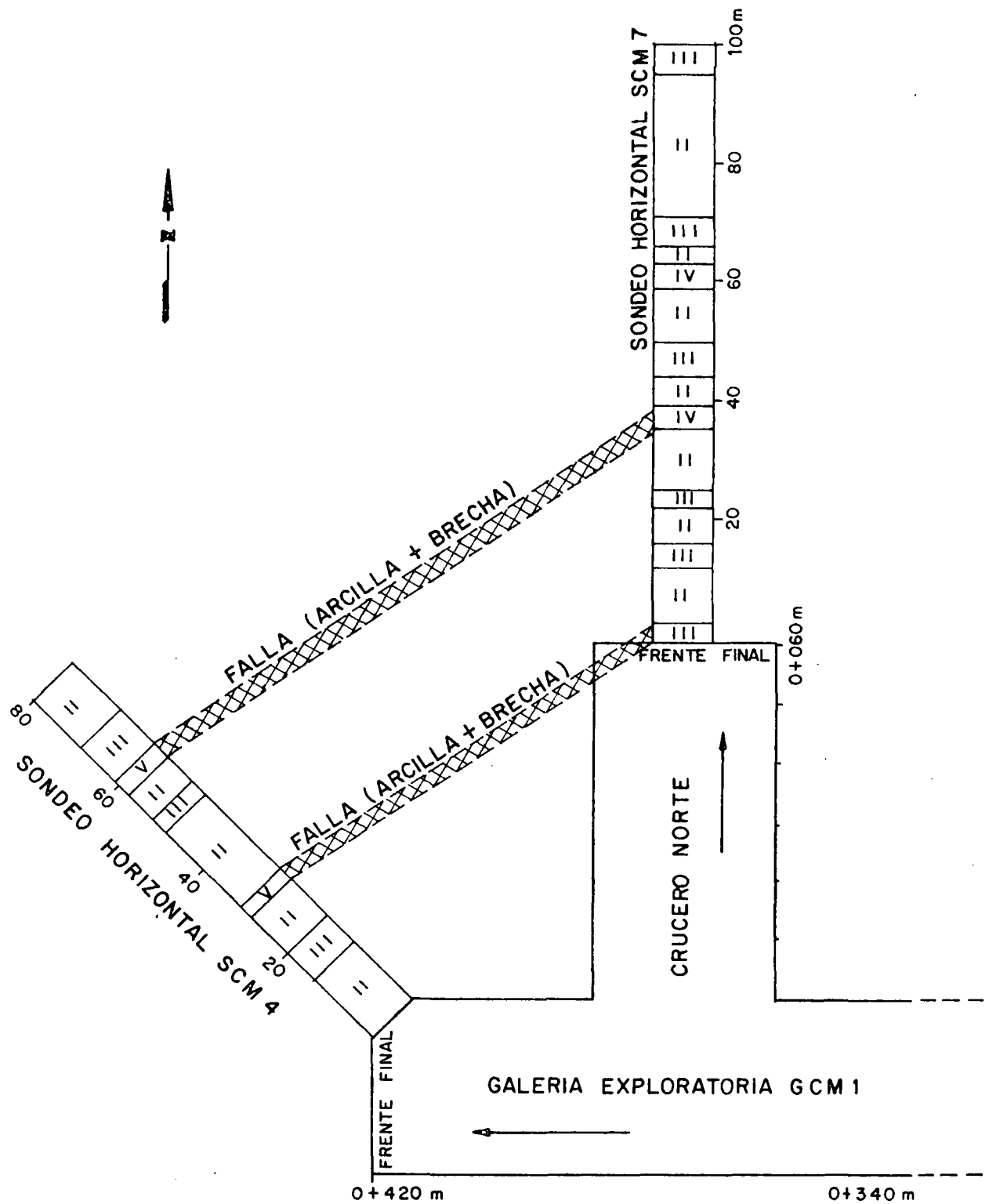


FORMACION MISAHUALLI

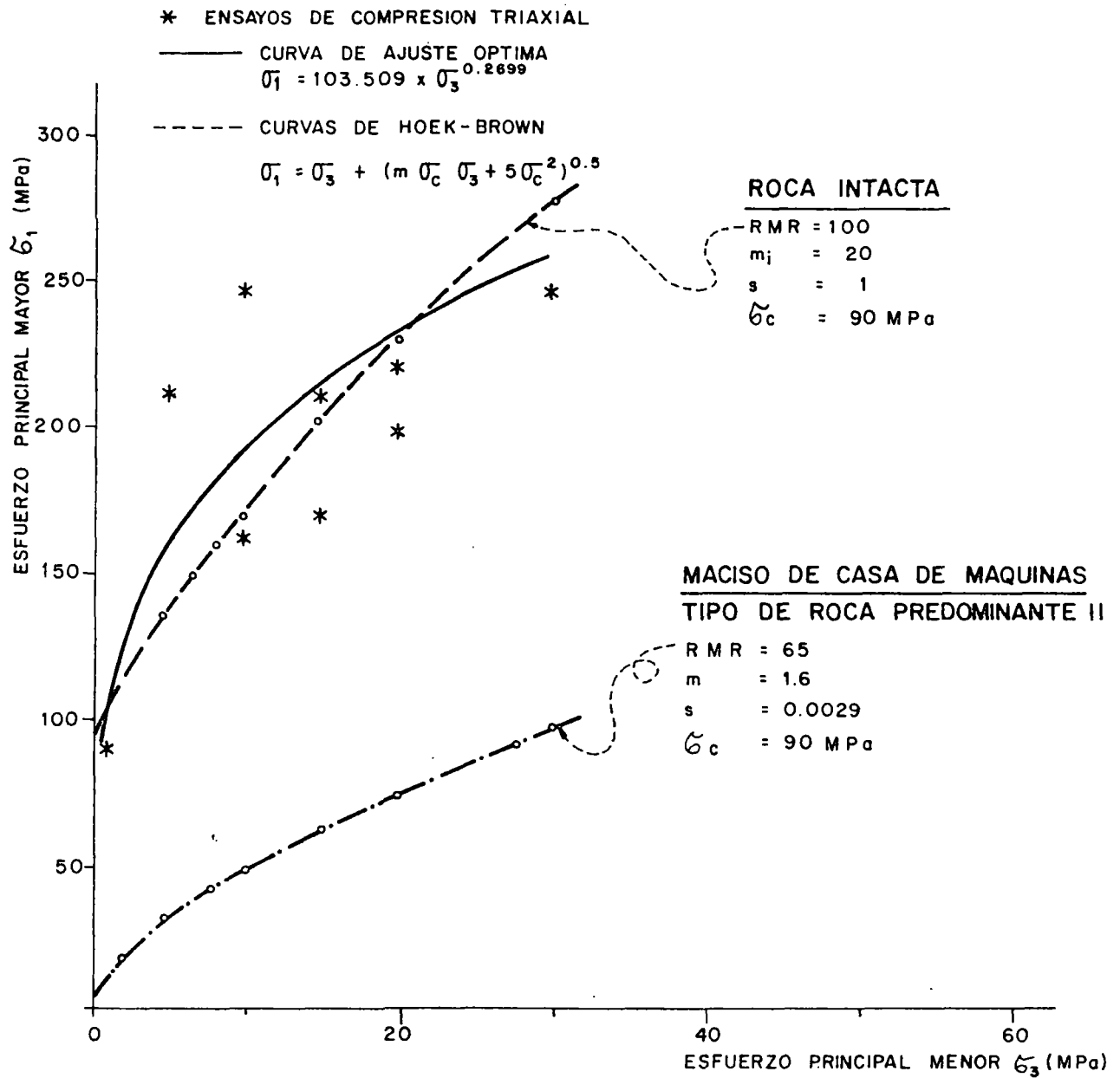
TUBERIA DE PRESION CON POZO VERTICAL

TRAMO INFERIOR

ENVOLVENTES DE RUPTURA DEL MACIZO EN EL PLANO  $\tau - \sigma$



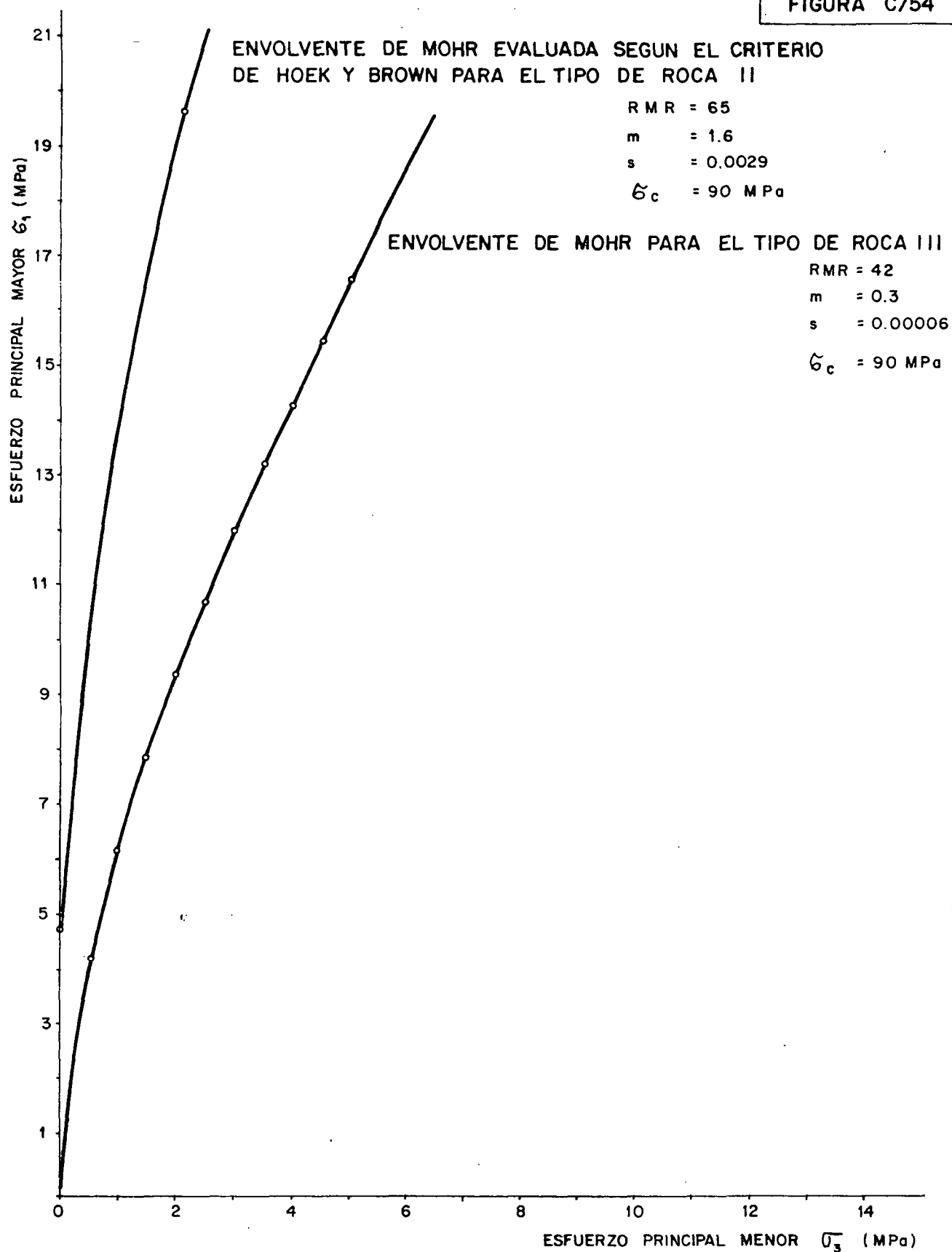
FORMACION MISAHUALLI  
CASA DE MAQUINAS  
CLASIFICACION GEOMECANICA DEL MACIZO



FORMACION MISAHUALLI

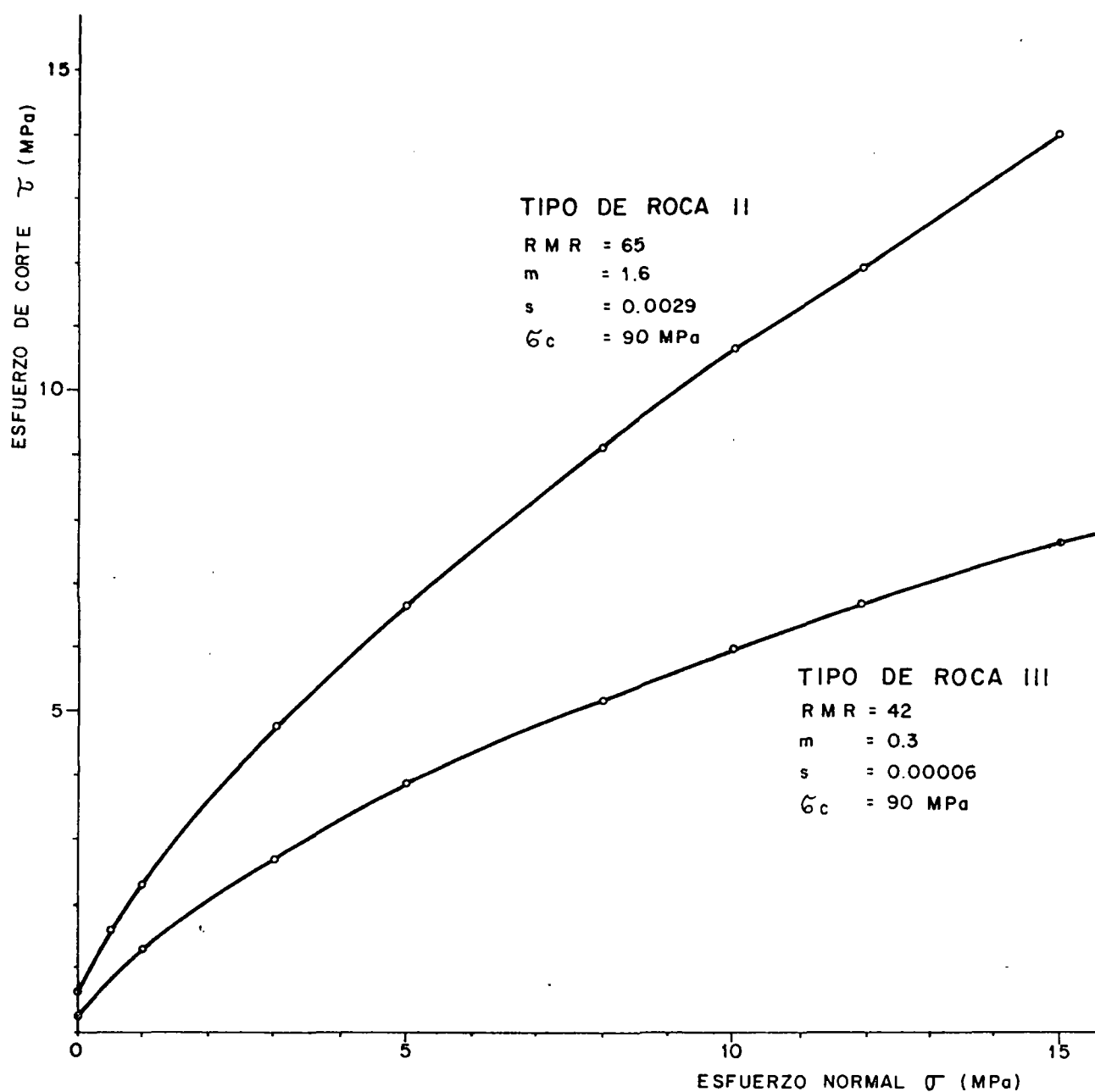
CASA DE MAQUINAS

CURVAS  $\sigma_1$ - $\sigma_3$  OBTENIDAS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO  
 SOBRE ROCA INTACTA



FORMACION MISAHUALLI  
 CASA DE MAQUINAS

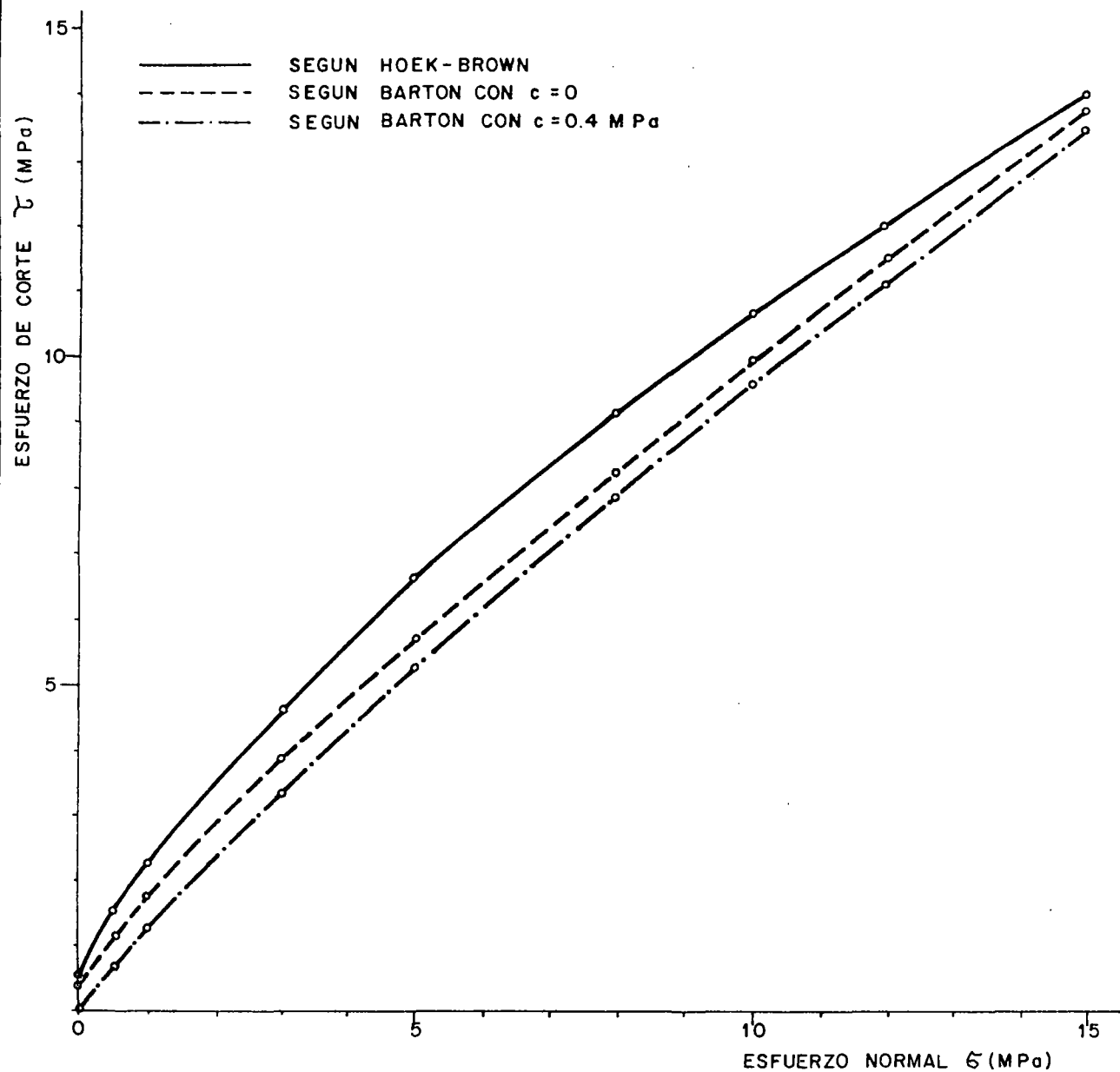
ENVOLVENTES DE RUPTURA DEL MACIZO EN EL PLANO  $\sigma_1 - \sigma_3$



FORMACION MISAHUALLI

CASA DE MAQUINAS

ENVOLVENTES DE RUPTURA DEL MACIZO EN EL PLANO  $\tau - \sigma$



FORMACION MISAHUALLI

CASA DE MAQUINAS

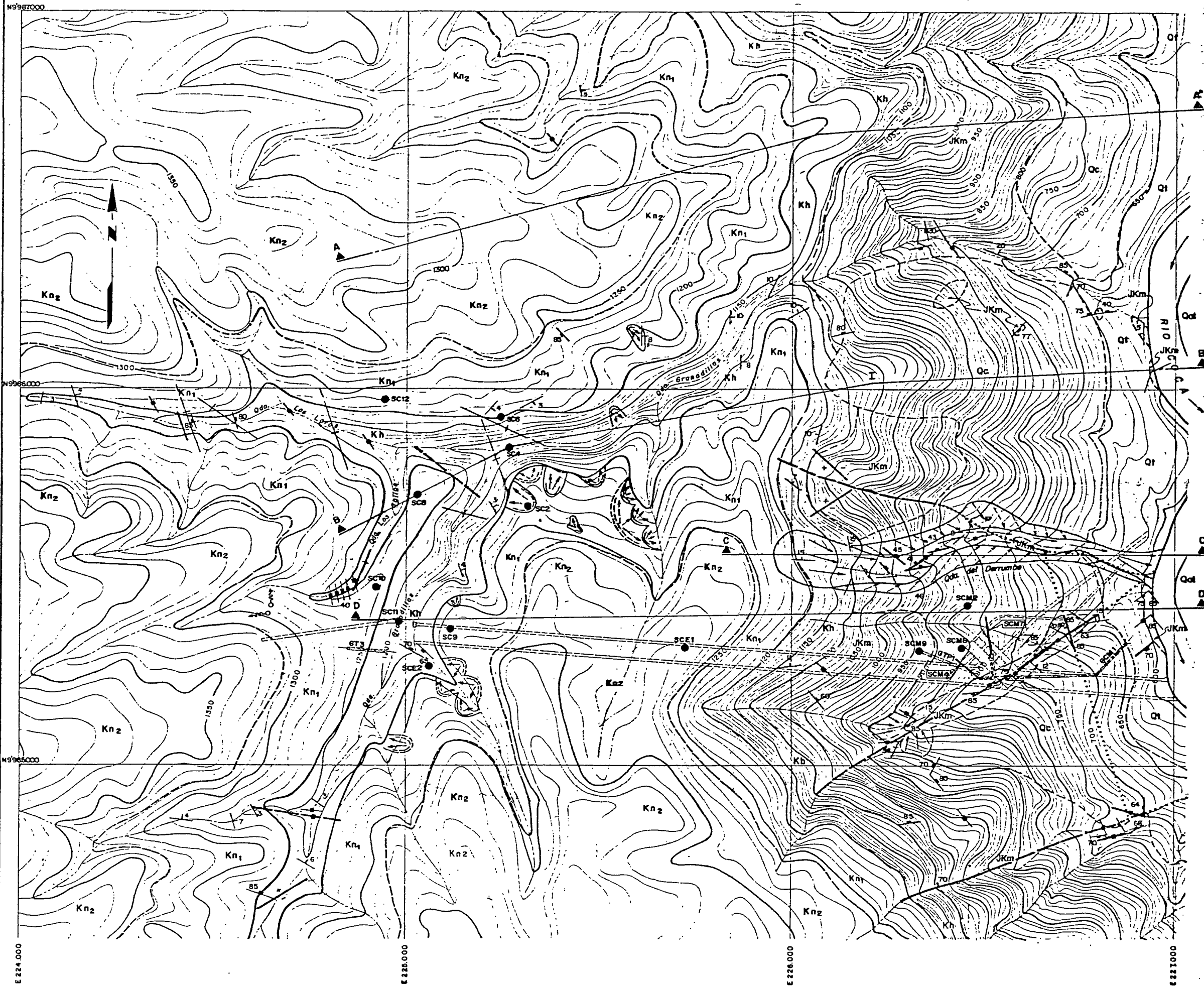
ENVOLVENTES DE RUPTURA DE LAS DISCONTINUIDADES

EN EL PLANO  $\tau - \sigma$

PARTE C

PLANOS





# LEYENDA

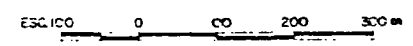
- MATERIALES SUELTOS**
- Qc** DEPOSITO COLUVIALES
  - Qal** DEPOSITOS ALLUVIALES ACTUALES Y RECIENTES (gravas, arenas, limas)
  - Qf** TERRAZAS ALLUVIALES ANTIGUAS (gravas, arenas, limas)
- ROCAS SEDIMENTARIAS E IGNEAS**
- Kn** FORMACION NAPO
  - Kh** FORMACION HOLLIS
  - JKm** FORMACION MESAMILLI (rocas volcánicas)
- Kn2** MIEMBRO MEDIO (areniscas, calizas y lutitas)
- Kn1** MIEMBRO INFERIOR (areniscas con intercalaciones de lutita y caliza)

## SIMBOLOGIA

- CONTACTO INFERIDO
- CONTACTO OBSERVADO
- FALLA INFERIDA
- FALLA CUBIERTA
- FALLA NORMAL + BLOQUE LIMITADO - BLOQUE NUMERO
- ESTRATIFICACION INCLINADA Y HORIZONTAL
- FRATURAS INCLINADA, VERTICAL, HORIZONTAL
- DESPLAZAMIENTOS ACTIVOS Y POTENCIALES
- PUNTOS DE AGUA

**NOTAS:**

- DEBIDO A LAS LIMITACIONES QUE PRESENTA LA TOPOGRAFIA INDICADA, ESTE PLANO ES SOLAMENTE ILUSTRATIVO
- EL MAPA GEOLOGICO DE DETALLE DEL EMBALSE COMPENSADOR SE PRESENTA EN EL PLANO 0209 - G - 2036
- LOS CORTES GEOLOGICOS SE PRESENTAN EN EL PLANO 0209 - G - 2041

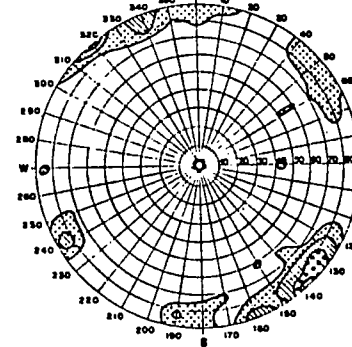
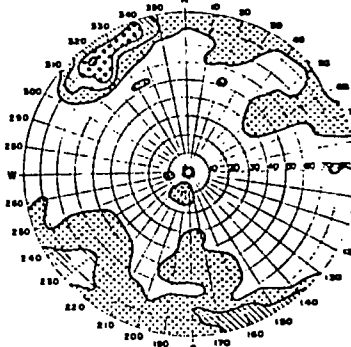
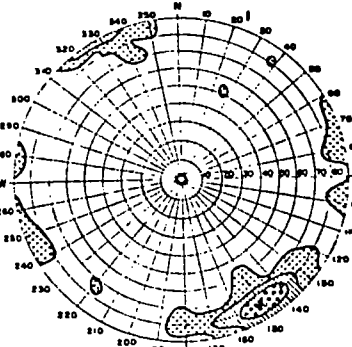


ELECTROCONSULT-TRACTIONEL - RODIO	
ASTEC - INELIN - INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES	
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION	
QUITO - ECUADOR	
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR.	
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"	
GEOLOGIA	
ZONA DE CAIDA	
MAPA GEOLOGICO	
ESC. INDICADA	
DISEÑADO A.C.H.-W.B.	RECOMENDADO
REVISADO J.D.B. / M.A.S.-V.O.A.	APROBADO
FECHA MARZO-1982	PROYECTO 0209-G-2040

# FORMACION MISAHUALI ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES GALERIA GTP1

GALERIA GCM1

EN SUPERFICIE



SISTEMA DE DISCONTINUIDADES PRINCIPAL  
N 60° E / 80° SE

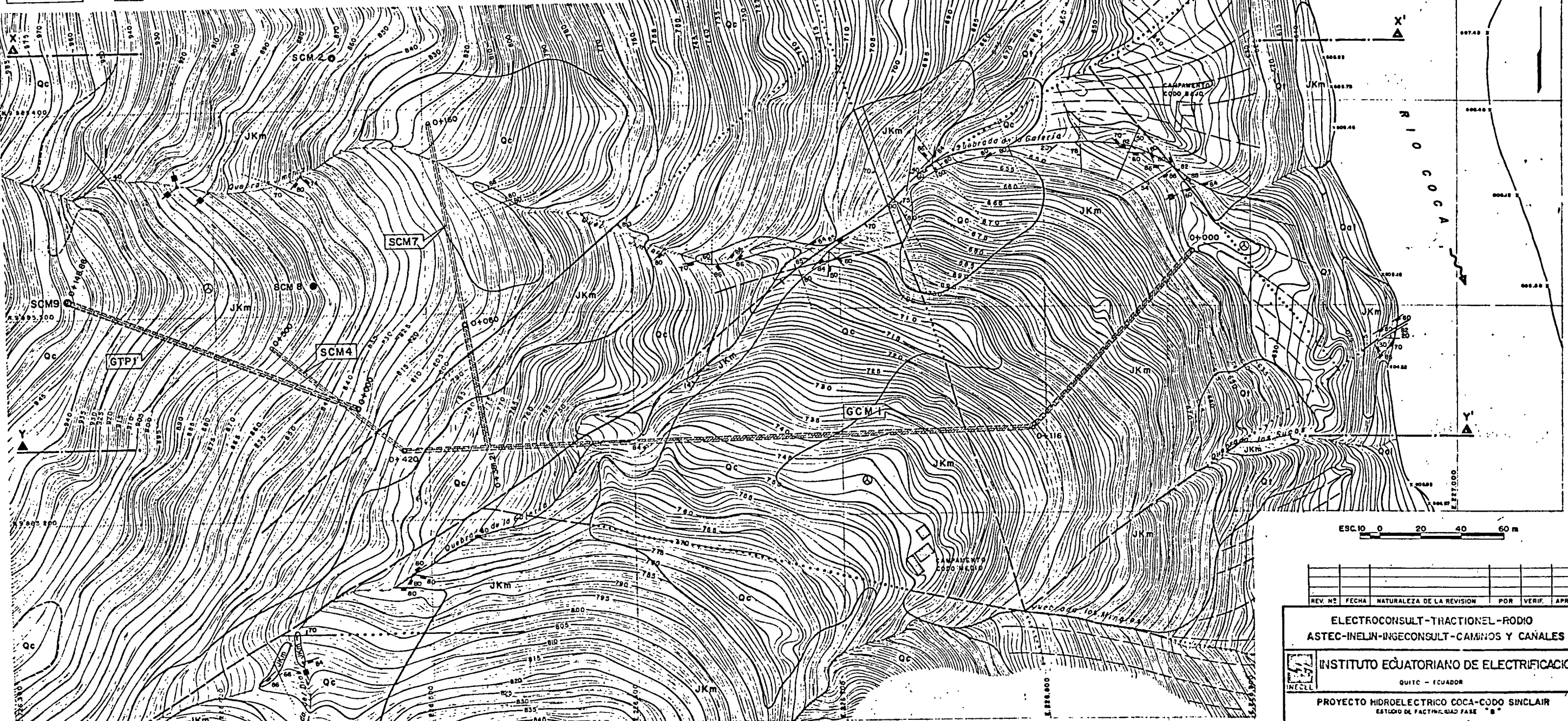
CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS  
> 8 %  
6-8 %  
4-6 %  
< 4 %

SISTEMA DE DISCONTINUIDADES PRINCIPAL  
N 50° E / 80° NW  
SECUNDARIO  
N 40° W / 80° SW

CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS  
> 8 %  
6-8 %  
3-6 %  
< 3 %

SISTEMA DE DISCONTINUIDADES PRINCIPAL  
N 50° E / 90°  
SECUNDARIO  
N 30° W / 80° SW

CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS  
> 8 %  
6-8 %  
4-6 %  
< 4 %



ESC. 10 0 20 40 60 m

LEYENDA:

- Qc DEPOSITOS COLUVIALES
- Qal DEPOSITOS ALUVIALES
- Qt TERRAZAS ALUVIALES
- Qlh DEPOSITOS LAHARITICOS
- JKm FORMACION MISAHUALI (Tobos volcanicos, raptos, brechas)

SIMBOLOGIA:

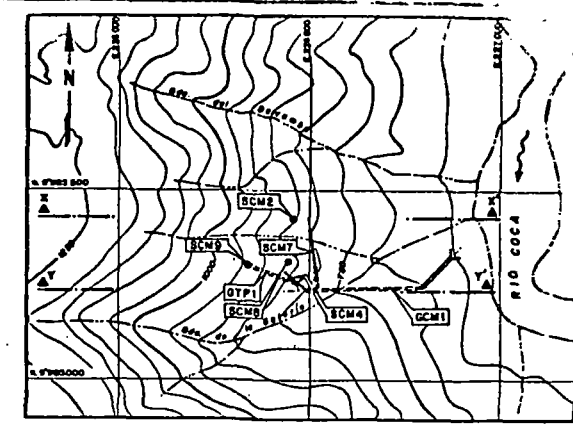
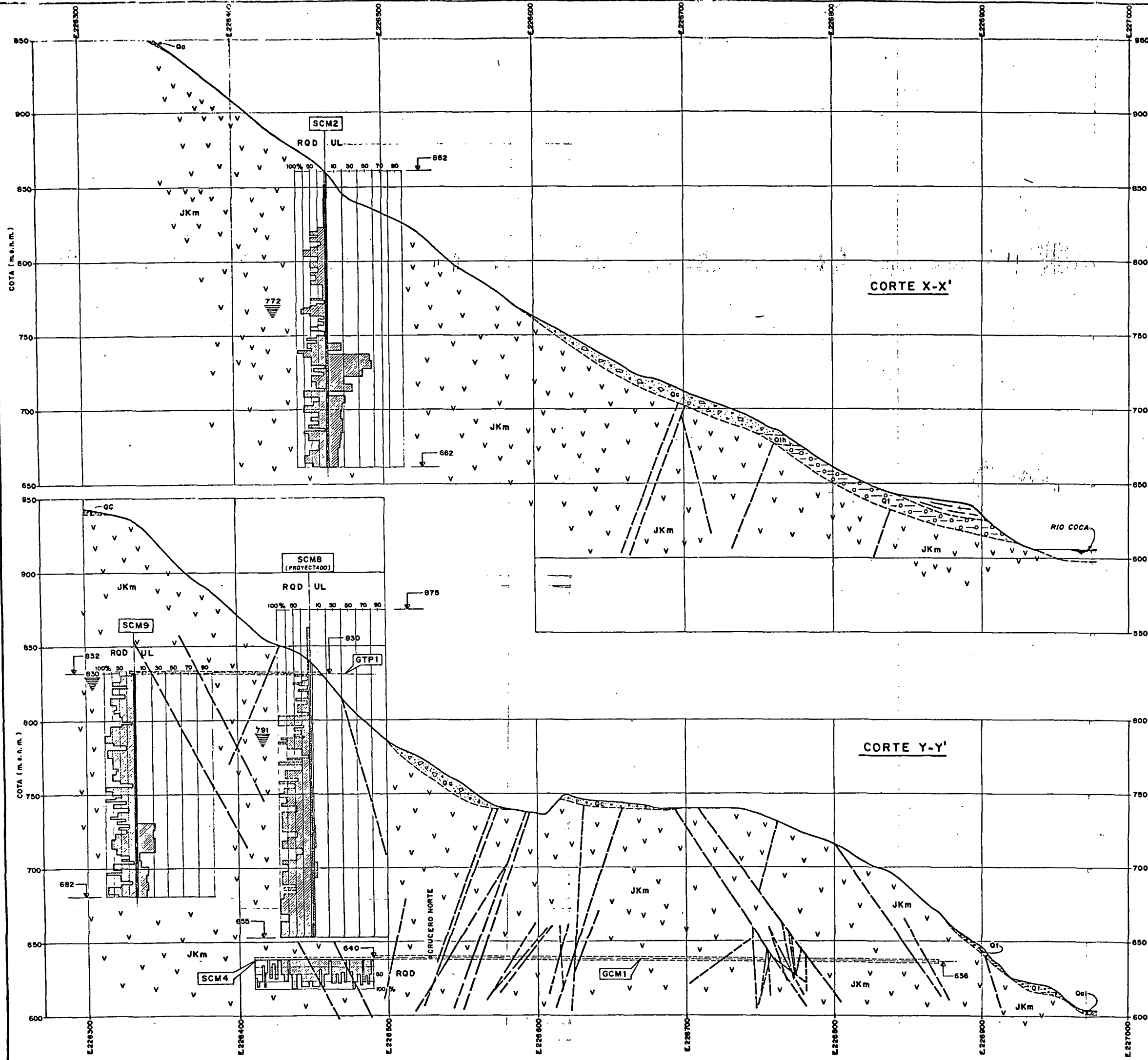
- CONTACTO OBSERVADO
- CONTACTO INFERIDO
- FALLA NORMAL
- FALLA INFERIDA
- FALLA CUBIERTA

- ESTRATIFICACION INCLINADA, VERTICAL
- FRACTURA INCLINADA, VERTICAL
- DESPLAZAMIENTO ACTIVO
- CONO DE DEYECCION
- HELIPUERTO

- PERFORACION ROTATIVA VERTICAL
- PERFORACION HORIZONTAL
- GALERIA EXPLORATORIA

NOTA:  
LOS CORTES GEOLOGICOS SE PRESENTAN EN EL PLANO 0209-G-2043

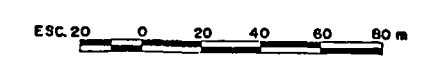
ELECTROCONSULT-TRACTIONEL-RODIO ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES				
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION QUITO - ECUADOR				
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"				
GEOLOGIA CASA DE MAQUINAS MAPA GEOLOGICO				
HOJA 1 DE 1 ESC. 1:1000				
ELABORADO	W.B.M. - H.S.B.	RECOMENDADO		
DISEÑADO	V.H.A.	APROBADO		
REVISADO	S.C.			
FECHA	NOV. - 1991	Nº 0209-G-2042		



### LEYENDA

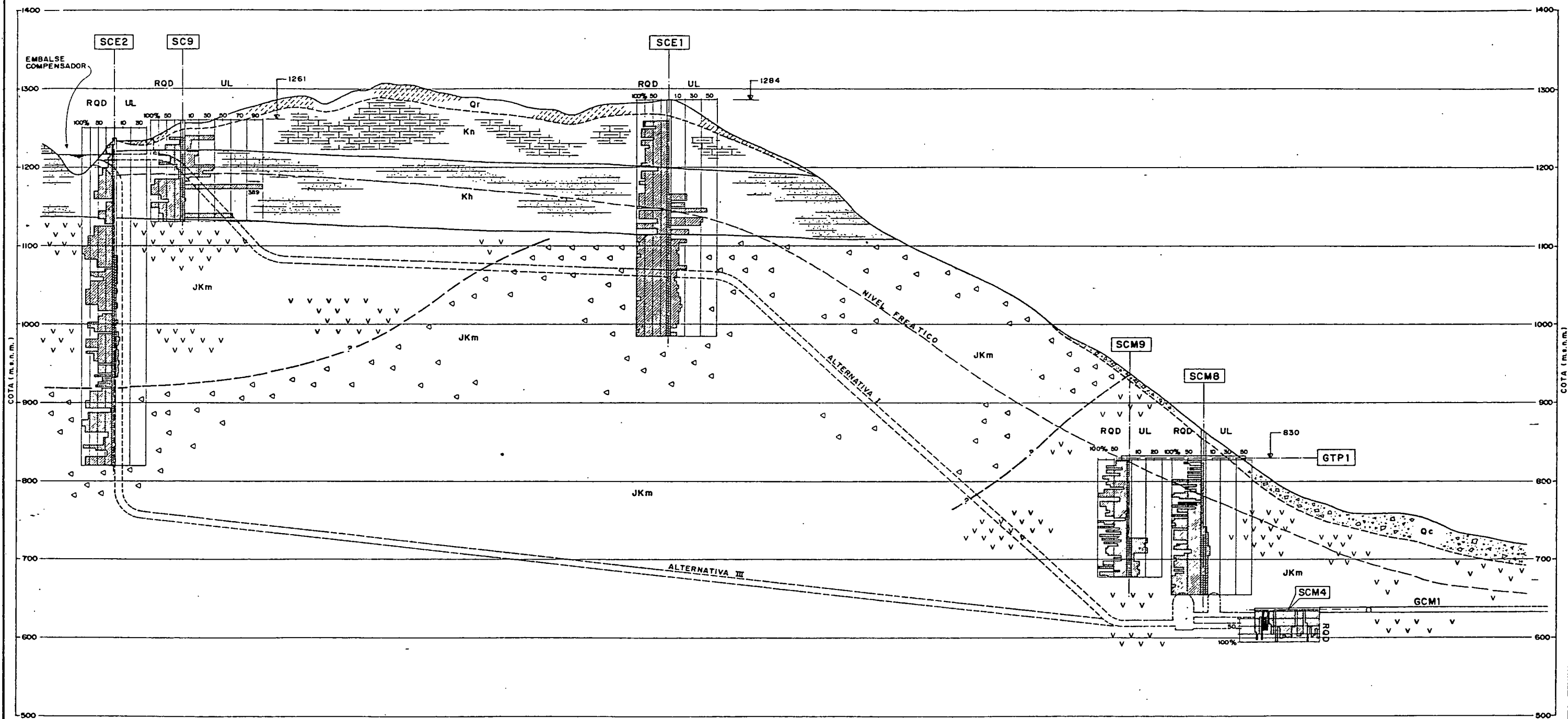
- DEPOSITOS COLUVIALES
- DEPOSITOS ALUVIALES
- TERRAZAS ALUVIALES
- DEPOSITOS LAHARITICOS
- FORMACION MISAHUALLI  
(Tobas volcánicas, riolitas, brechas)
- CONO DE DEYECCION
- CONTACTO OBSERVADO
- CONTACTO INFERIDO
- FALLA NORMAL
- FALLA INFERIDA

NOTA:  
- EL MAPA GEOLOGICO SE PRESENTA EN EL PLANO 0209 - G - 2042



ELECTROCONSULT-TRACCIONEL-RODIO ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES			
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION QUITO - ECUADOR			
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"			
GEOLOGIA CASA DE MAQUINAS CORTES GEOLOGICOS			
HOJA DE			
DISCERADO	W.B.M. - N.B.B.	RECOMENDADO	
DIBUJADO	V.H.A.	APROBADO	
REVISADO	SAC		
FECHA	NOV. - 1991	REF	0209 - G - 2043



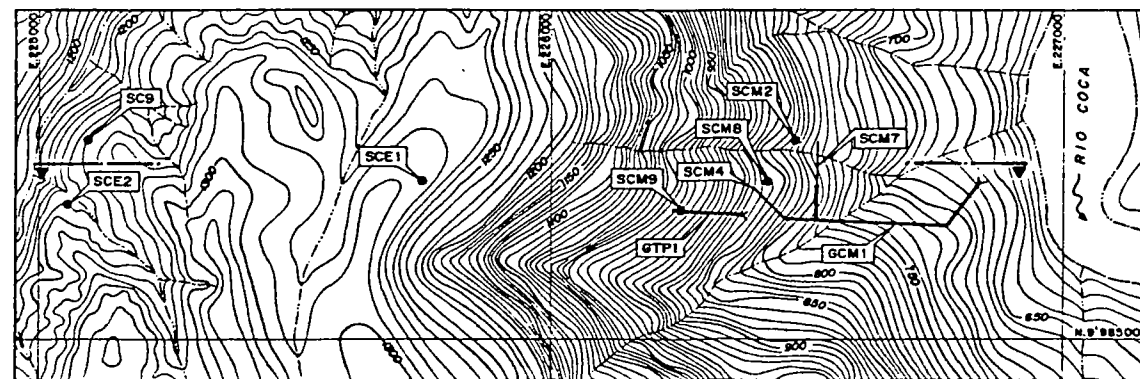


# LEYENDA

- BUELOS RESIDUALES
- DEPOSITOS COLUVIALES
- FORMACION NAPO
- FORMACION HOLLIN
- FORMACION MISAHUALLI (TOSAS VOLCANICAS Y RIOLITAS)
- FORMACION MISAHUALLI (BRECHAS VOLCANICAS DE CLASTOS GRANDES)
- CONTACTO OBSERVADO
- CONTACTO INFERIDO

# MAPA DE UBICACION

ESC. 200 100 0 200 400 m



# NOTAS:

- EL MAPA GEOLOGICO DE LA ZONA DE CAIDA SE PRESENTA EN EL PLANO 0209-G-2040
- EL MAPA GEOLOGICO DEL AREA DE LA CASA DE MAQUINAS SE PRESENTA EN EL PLANO 0209-G-2042

REV	Nº	FECHA	NATURALEZA DE LA REVISION	POR	VERIF	APRUE

ESC. 50 0 50 100 150 m

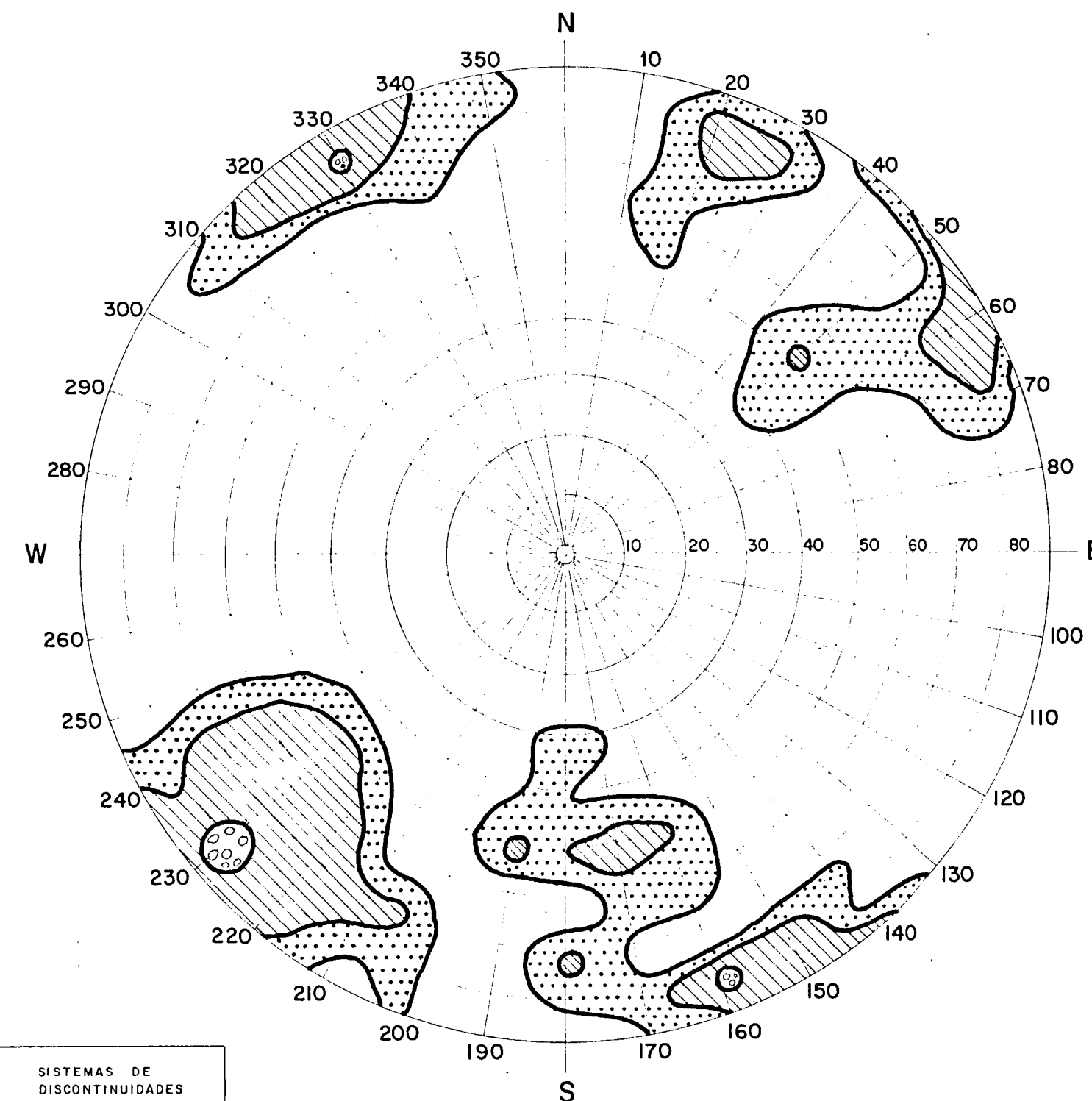
ELECTROCONSULT-TRACTIONEL-RODIO			
ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES			
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION			
QUITO - ECUADOR			
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR			
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"			
GEOLOGIA			
OBRAS DE GENERACION			
CORTE GEOLOGICO TIPICO			
HOJA DE		ESC.	
ELABORADO	W.B.H. - H.B.S.	RECOMENDADO	
REVISADO	V.H.A.	APROBADO	
FECHA		REV.	0209-G-2044





# FORMACION MISAHUALLI TUBERIA DE PRESION GALERIA EXPLORATORIA GTP1

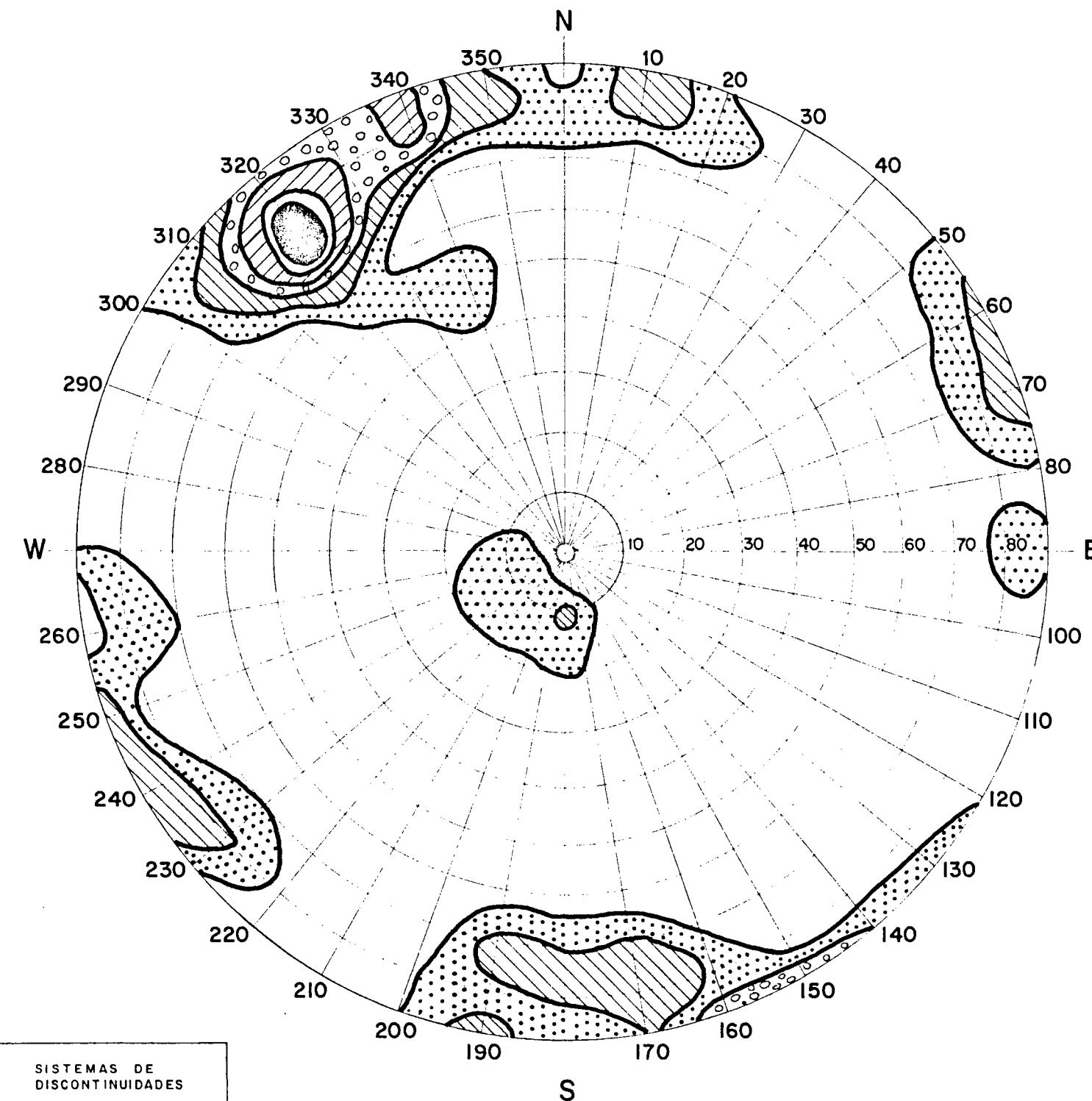
ABSCISA DE 0 + 050 A 0 + 100 m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
**PRINCIPAL**  
N 40° W / 80° SW  
**SECUNDARIO**  
N 60° E / 80° NW

NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 130  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

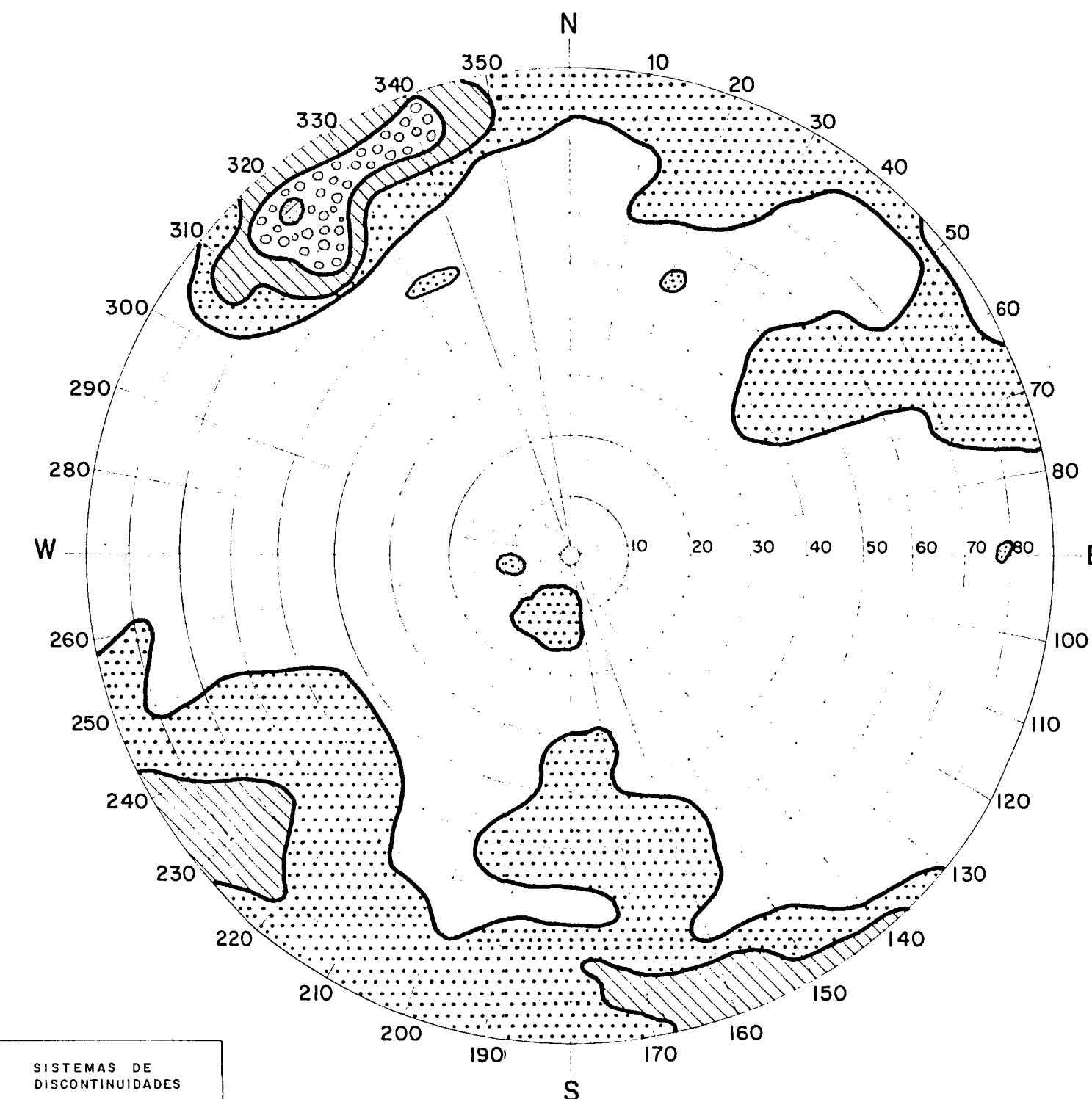
ABSCISA DE 0 + 100 A 0 + 147 m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
**PRINCIPAL**  
N 50° E / 70° NW  
**SECUNDARIO**  
N 70° E / 85° NNW

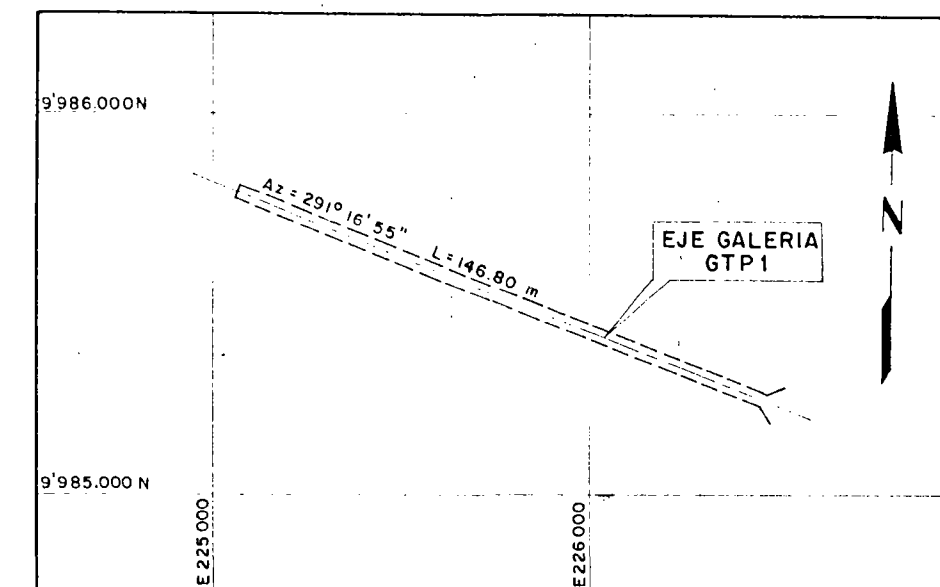
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 100  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

ABSCISA DE 0 + 050 A 0 + 147 m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
**PRINCIPAL**  
N 50° E / 80° NW  
**SECUNDARIO**  
N 40° W / 80° SW

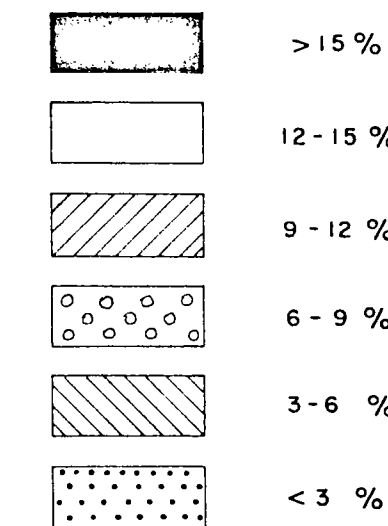
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 230  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR



UBICACION  
ESCALA 1:20.000

## LEYENDA

CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS



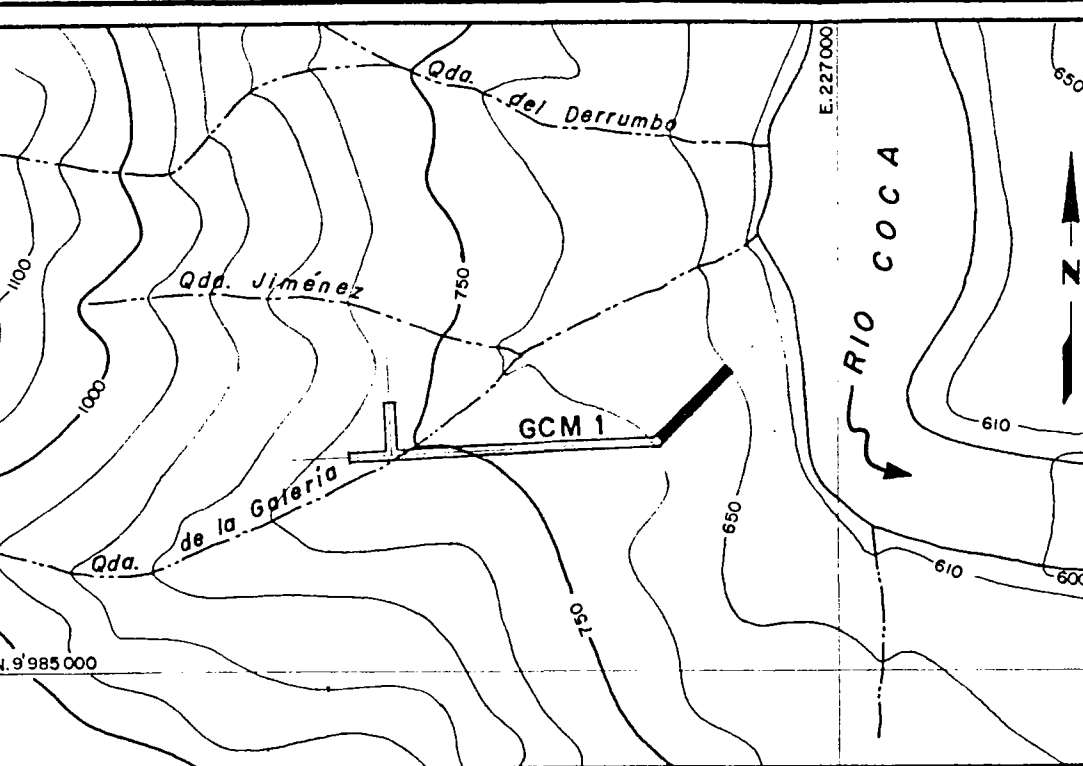
- 1.- PARA EL MAPEO GEOESTRUCTURAL DE LA GALERIA GTP1, VER PLANOS 0209-G-2905, 0209-G-2906
- 2.- PARA LA INVESTIGACION SISMICA DE LA GALERIA GTP1, VER PLANOS 0209-G-2240, 0209-G-2241
- 3.- TRAMO DE 0+000 A 0+050 m ENTIBADO

ELECTROCONSULT TRACCIONEL - RODIO  
ASTEC-INELIN - INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES  
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION  
QUITO - ECUADOR  
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR  
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"  
MECANICA DE ROCAS  
GALERIA EXPLORATORIA GTP1  
ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES

						HOJA DE		ESC	
						DISEÑADO		HS	
						DIBUJADO		MMI	
						REVISADO		SAC	
						RECOMENDADO			
						APROBADO			
REV N°		FECHA		NATURALEZA DE LA REVISION		POR		VERIF. APROB.	
								FECHA	
								OCTUBRE - 1991	
								REF 0209 - G - 2907	



ELEVACION (m)		635.99		636.20		636.31		636.34		636.37		636.45		636.55		636.64		636.71		636.75		636.80	
RUMBO		S 42° W		S 42° W		S 42° W		S 42° W		S 42° W		S 42° W		S 42° W		S 42° W		S 42° W		S 42° W		S 42° W	
PENDIENTE		+ 2.1 %		+ 1.1 %		+ 0.3 %		+ 0.3 %		+ 0.8 %		+ 1.0 %		+ 0.9 %		+ 0.7 %		+ 0.4		+ 0.5 %			
POTENCIA DE SOBRECARPA (m)		de 0 a 24		de 24 a 34		de 34 a 46		de 46 a 56		de 56 a 70													
AVANCE DEL FRENTE		FECHA		6 OCT 90		7		8		9		10		11		12		13		14		15	
		POR TURNO (m)		1		1		1		1		1		1		1		1		1		1	
		TOTAL (m)		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
DATOS DE EXCAVACION		NUMERO DE BARRENOS		8		44		13		34		48		34		34		34		34		39	
		GASTO ESPECIFICO (Kg/m³)		0.71		4.90		0.32		0.59		2.16		2.90		3.24		2.49		2.87		2.87	
		ENTIBADO DE MADERA																					
PERFIL GEOLOGICO EN LA PARED DERECHA																							
ABSCISADO (m)		0		5		10		15		20		25		30		35		40		45		50	
ESTRUCTURAS GEOLOGICAS		PARED IZQUIERDA																					
		CLAVE																					
		PARED DERECHA																					
ABSCISADO (m)		0		5		10		15		20		25		30		35		40		45		50	
CARACTERISTICAS DE LAS FRACTURAS Y FALLAS		GRADO DE ALTERACION (A)		2		2		2		2		2		2		2		2		2		2	
		GRADO DE DUREZA (D)		2		2		2		2		2		2		2		2		2		2	
		GRADO DE FRACTURACION (F)		3		4		3		2		3		4		3		2		3		4	
FILTRACIONES		1		3		1		3		1		3		1		3		1		3		1	



### SITIO DE LA CASA DE MAQUINAS

UBRICACION SIN ESCALA

--

CONTACTO OBSERVADO

CONTACTS OBSERVED

ALLA

## ONA DE BRECHA






[illegible]

ONA DE ROCA MUY P

STRATIFICACION INCLIN

### Statistical Analysis

RACTURA INCLINADA, V

CLASE	SIMBOLO	FILTRACIONES	CAUDAL ESTIMADO
1		GOTEO AISLADO	—
2		GOTEO CONTINUO	—
3		CHORRO DEBIL	hasta 1 lt / min
4		CHORRO FUERTE	hasta 10 lt / min
5		FLUJO ABUNDANTE	> 10 lt / min

NOTAS:

- 1- PARA LA DESCRIPCION DE LOS PARAMETROS GEOMECANICOS, VER PLANO 0209 - G - 2900
- 2- LOS ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES SE PRESENTAN EN LOS PLANOS 0209 - G - 2913 A 0209 - G - 2918
- 3- LOS VALORES DE ORIENTACION CORRESPONDEN A MEDICIONES PUNTUALES, LAS MISMAS QUE, POR LAS ESCALAS UTILIZADAS, NO CONCUERDAN CON LAS TRAZAS DIBUJADAS EN EL REGISTRO

ELECTROCONSULT TRACTION: BASIS

ELECTROCONSULT-TRACTIONEL-RADIO  
 10750 W. 10TH AVE. - DENVER, CO 80231 - 303-751-1100

ASTEC-INELIN-INGECONSULT- CAMINOS Y CANALES

[illegible]

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACIÓN

QUITO - ECUADOR

RECEL \_\_\_\_\_

PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR  
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD BASE "B"

MECANICA DE BOCAS

MECANICA DE ROCAS  
GALERIA EXPLORATORIA GCM IGALERIA EXPLORATORIA SCM I  
MAPEO GEOESTRUCTURAL

NO. 1 OF 5 FSC V.

INSEAD M.B.C. (K.M.M.)

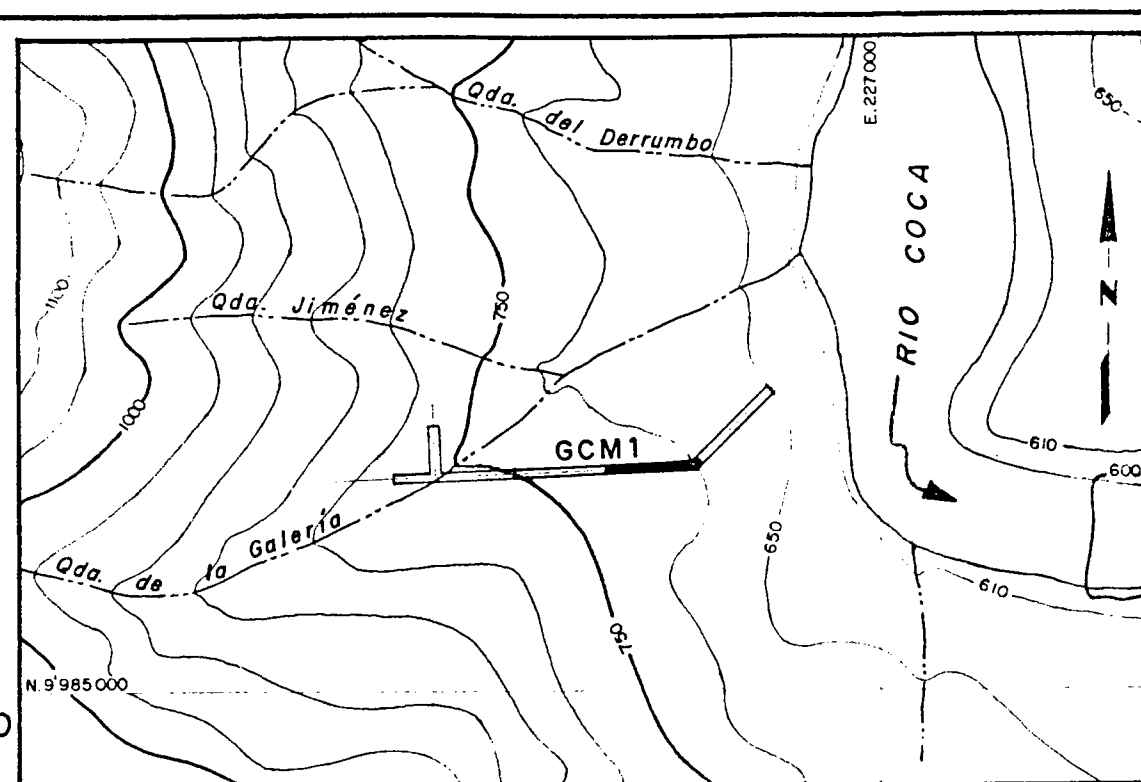
ASEGURADO	A. S. S. / W. B. K.	RECOMENDADO
-----------	---------------------	-------------

NEUJAZZO V H A

REVISAO SA SB

FECHA	MARZO / 1951	REF	0209-G-2908
-------	--------------	-----	-------------



[illegible]

SITIO DE LA CASA DE MAQUINAS

UBICACION SIN ESCALA

### FOOD

FORMACION

MISAHUALI I TORRA

MISARUALLI TOBA

050 00000000

CTO OBSERVADO






DE BRECHA

DE BOCA MUY FRACTUR

DE ROCA MOT TRACTOR

TIFICACION INCLINADA, V

URA INCLINADA, VERTIC

CLASE	SÍMBOLO	FILTRACIONES	CAUDAL ESTIMADO
1		GOTEÓ AISLADO	_____
2		GOTEÓ CONTINUO	_____
3		CHORRO DÉBIL	hasta 1 lit/min
4		CHORRO FUERTE	hasta 10 lts/min
5		FLUJO ABUNDANTE	> 10 lts/min

## NOTAS

1.- PARA LA DESCRIPCION DE LOS PARAMETROS GEOMECANICOS, VER PLANO

0209 - G - 2900

2.- LOS ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES SE PRESENTAN EN LOS

PLANOS 0209 - G - 2913 A 0209 - G - 2918  
LOS PLANOS DE ORIENTACION CORRESPONDEN A MEDICIONES PUNTUALES

3.- LOS VALORES DE ORIENTACION CORRESPONDEN A MEDICIONES PUNTUALES LAS MISMAS QUE POR LAS ESCALAS UTILIZADAS NO CONCUERDA

LES, LAS MISMAS QUE, POR LAS ESCALAS OTIENIENDAS, NO CONCORDAN CON LAS TRAZAS DIBUJADAS EN EL REGISTRO

CON LAS TRAZAS CIRCUNSCRITAS EN EL REGISTRO

ELECTROCONSULT - TRACTIONEL - RODIO

ASTEC-INELIN-INGECONSULT- CAMINOS Y CANALES

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRICIDAD

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACIÓN

INECEL QUITO - ECUADOR

PROYECTO HIDROELECTRICO COCA CODO SINCLA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE II  
MECANICA DE BOCASMECÁNICA DE ROCAS  
GALERÍA EXPLORATORIA GCM 1

MAPEO GEOSTRUCTURAL H

HOJA 2 DE 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

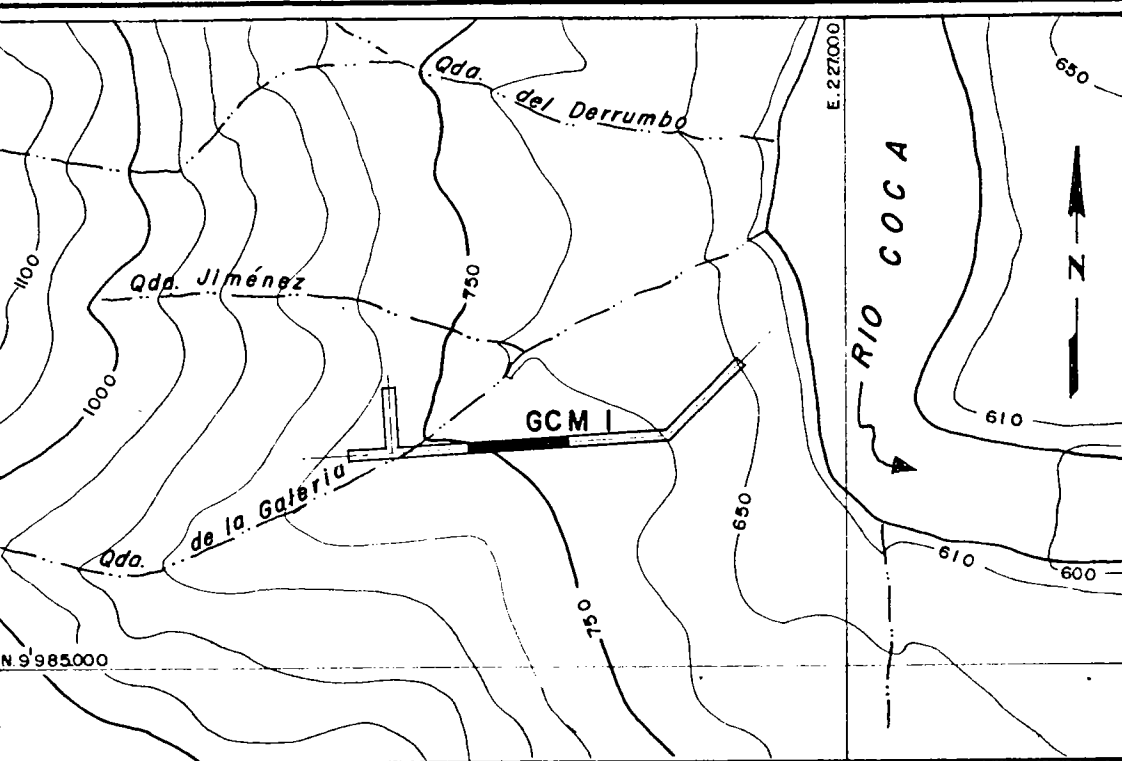
DECLASSIFIED BY: 6032  
 DATE: 10/10/2013  
 AUTHORITY: 25X

RE: [redacted] SA [redacted] SB [redacted]

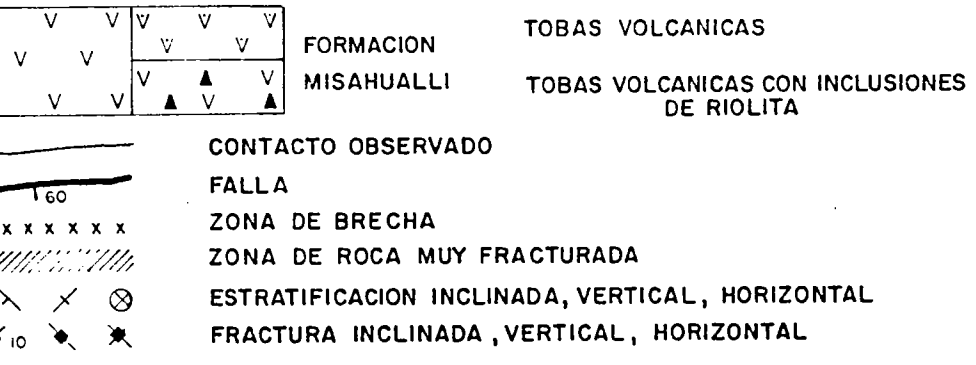
FECHA	NATURALEZA DE LA REVISION	PCR	VERIF.	AUTOR	FECHA	MARZO / 1991	REF	0209-G-290
-------	---------------------------	-----	--------	-------	-------	--------------	-----	------------

1000

ELEVACION (m)		637.53		637.63		637.65		637.68		637.74		637.83		637.82		637.86		637.92		638.02		638.03																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
RUMBO		S 89° W		S 89° W		S 89° W		S 89° W		S 89° W		S 89° W		S 89° W		S 89° W		S 89° W		S 89° W		S 89° W																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
PENDIENTE		+ 1.3 %		+ 0.2 %		+ 0.3 %		+ 0.6 %		+ 0.9 %		- 0.1 %		+ 0.4 %		+ 0.8 %		+ 1.0 %		+ 0.1 %																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
POTENCIA DE SOBRECAPA (m)		102		de 102 a 105		de 105 a 107		de 107 a 109		de 109 a 111																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
AVANCE DEL FRENTE	FECHA	1 FEB 91	2 FEB 91	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	5 MAR 91	6	7	8	9	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	6 ABR 91	7 ABR 91																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
	POR TURNO (m)	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.40	1.40	1.50	1.50	1.40	1.40	1.50	1.20	1.40	1.40	1.40	1.20	1.50	1.50	1.50	1.50	1.40	1.40	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.20	1.50																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
	TOTAL (m)	202.00	203.50	205	208.00	210.80	213.80	216.60	219.30	222.10	224.70	227.70	230.70	233.70	236.70	239.70	241.70	244.40	247.30	248.50	250.00	251.50	254.50	257.50	259.00	262.00	264.90	267.90	270.90	273.80	276.50	279.00	282.00	285.00	288.00	291.00	294.00	297.00	298.20	301.20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
DATOS DE EXCAVACION	NUMERO DE BARRENOS	29	31	37	28	28	29	28	56	37	29	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	GASTO ESPECIFICO (Kg/m³)	3.05	3.51	3.05	3.05	3.05	3.26	3.26	6.09	3.69	3.90	3.26	3.14	4.03	3.36	3.36	3.26	3.81	3.17	3.14	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.26	3.26	3.84	6.53	3.05	5.56	3.12	3.34	3.96	3.05	3.05	3.05	3.05	3.21	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.05	3.0



**SITIO DE LA CASA DE MAQUINAS**  
UBICACION SIN ESCALA



CLASE	SIMBOLO	FILTRACIONES	CAUDAL ESTIMADO
1	○	GOTEO AISLADO	—
2	○	GOTEO CONTINUO	—
3	○	CHORRO DEBIL	hasta 1 lit/min
4	○	CHORRO FUERTE	hasta 10 lts/min
5	○	FLUJO ABUNDANTE	> 10 lts/min

**NOTAS:**  
 1.- PARA LA DESCRIPCION DE LOS PARAMETROS GEOMECANICOS, VER PLANO 0209-G-2900  
 2.- LOS ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES SE PRESENTAN EN LOS PLANOS 0209-G-2913 A 0209-G-2918  
 3.- LOS VALORES DE ORIENTACION CORRESPONDEN A MEDICIONES PUNTUALES, LAS MISMAS QUE, POR LAS ESCALAS UTILIZADAS, NO CONCORDAN CON LAS TRAZAS DIBUJADAS EN EL REGISTRO

ELECTROCONSULT - TRACTIONEL - RODIO  
 ASTEC-INELIN-INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES

QUITO - ECUADOR

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION

PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR  
 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"

MECANICA DE ROCAS  
 GALERIA EXPLORATORIA GCM I  
 MAPEO GEOSTRUCTURAL

HOJA 3 DE 5

DISEÑADO (H.S.) M.H.  
 DISEÑADO (L.S.) M.H.

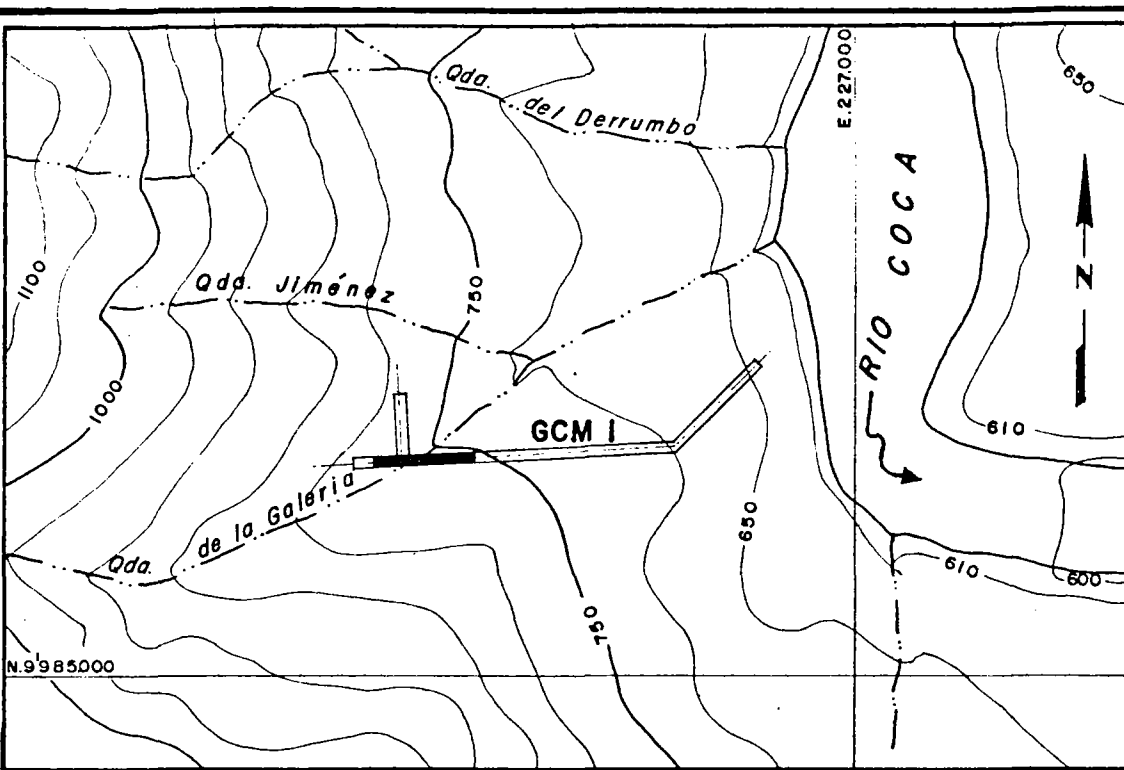
REVISADO (S.A.) M.H.  
 REVISADO (S.A.) M.H.

APROBADO (S.A.) M.H.

FECHA MAYO / 1991

REF 0209-G-2910



[illegible]

SITIO DE LA CASA DE MAQUINAS

LEYENDA: UBICACION SIN ESCALA

	<p>FORMACION</p> <p>MISAHUALI</p>	<p>TOBAS VOLCANICAS</p> <p>TOBAS VOLCANICAS CON INCLUSIONES DE ROLITA</p>
--	-----------------------------------	---

CONTACTO OBSERVADO

\_\_\_\_\_

---






.....

XXXXXXXXXXXX

☐ ☐ ☐

20   

10

CLASE	SÍMBOLO	FILTRACIONES	CAUDAL ESTIMADO
1		GOTEÓ AISLADO	—
2		GOTEÓ CONTINUO	—
3		CHORRO DÉBIL	hasta 1 lt / min
4		CHORRO FUERTE	hasta 10 lts / min
5		FLUJO ABUNDANTE	> 10 lts / min

## NOTAS:

PARA LA DESCRIPCION DE LOS PARAMETROS GEOMECANICOS, VER PLANO 0209 - G - 2900

1.- LOS ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES SE PRESENTAN EN LOS PLANOS 0209 - G - 2913 A 0209 - G - 2918

2.- LOS VALORES DE ORIENTACION CORRESPONDEN A MEDICIONES PUNTUALES, LAS MISMAS QUE, POR LAS ESCALAS UTILIZADAS, NO CONCUERDAN CON LAS TRAZAS DIBUJADAS EN EL REGISTRO

ELECTROCONSULT, TRACTION, RADIO

ELECTROCONSULT - TRACTIONEL - RADIO

ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CAN.

[illegible]

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRICIDAD

QUITO - ECUADOR

\_\_\_\_\_

PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCE  
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD BASE "B"

MECANICA DE BOCAS

MECANICA DE ROCAS  
GALERIA EXPLORATORIA GCM I

MAPEO GEOESTRUTURAL

HOJA 4 DE 5

DISCARD	HSG / WAB		
---------	-----------	--	--

RECOMENDADO
-------------

ELABORADO	CBM/VH.A.		
REVISADO	CA	EB	APROBADO

REVISADO	SAC	86
FECHA	NOMBRE	VALOR


FECHA	MAY 6 / 1991	REF. 0209-G-29
-------	--------------	----------------

© 2004 Blackwell Publishing Ltd, *Journal of Internal Medicine* 255: 113–121

The topographic map shows the study area with contour lines indicating elevation. Key features include:

- Oda del Derrumbado**: A road or path running horizontally across the upper part of the map.
- Oda Jiménez**: A road or path running horizontally across the middle of the map.
- Oda de la Galería**: A road or path running horizontally across the lower part of the map.
- GCM 1**: A road or path running horizontally across the lower part of the map, below Oda de la Galería.
- RIO COCA**: A river flowing vertically along the right side of the map.
- Contour Lines**: Lines indicating elevation, with labels such as 1100, 1050, 750, 650, 610, and 590.
- North Arrow**: A vertical arrow pointing upwards, labeled 'N'.
- Scale Bar**: A horizontal line with a label '0 200' indicating distance.



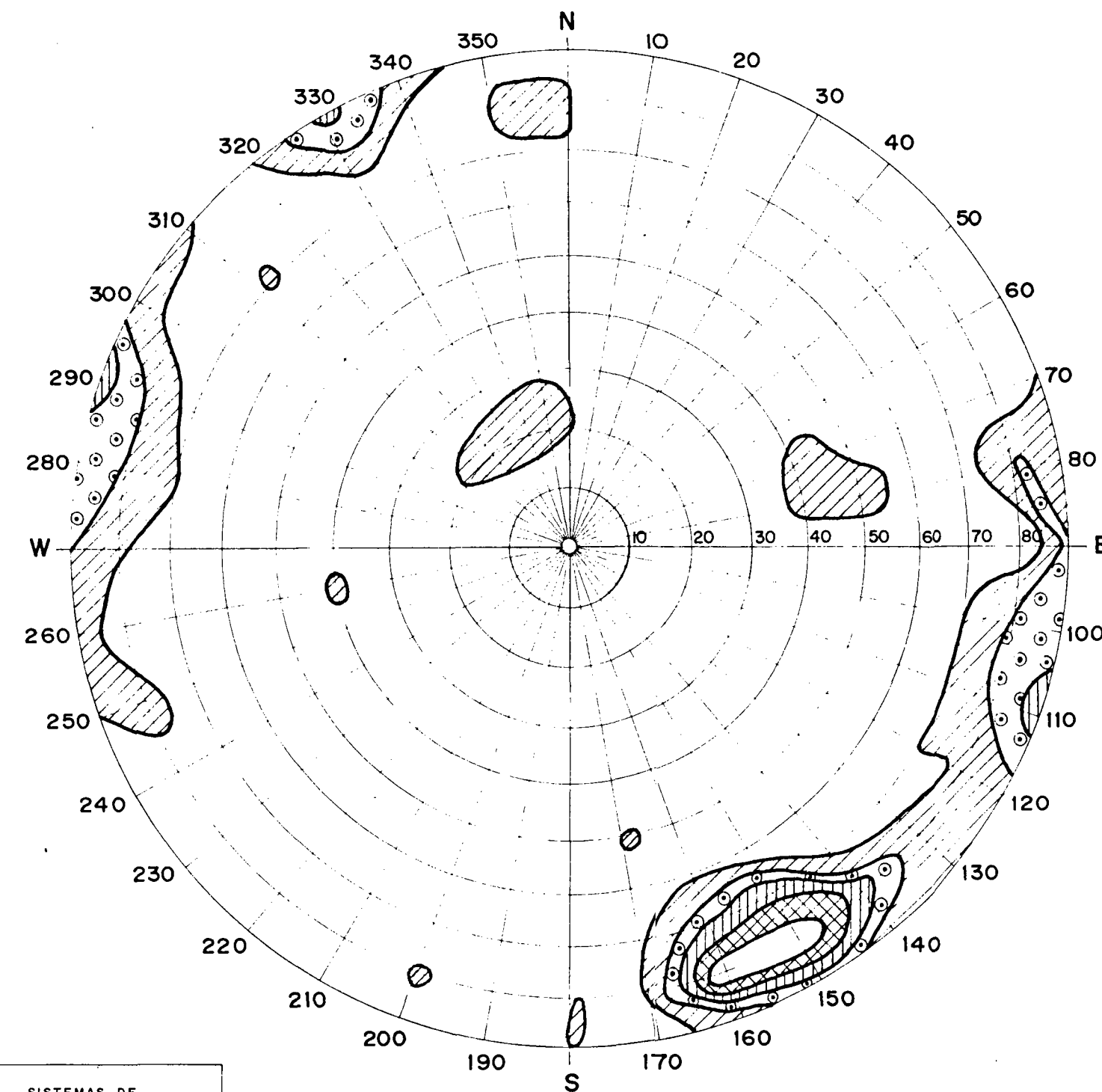
		ELECTROCONSULT-TRACTIOELECT- RUDIO ASTEC-INELIN-INGECONSULT- CAMINOS Y CANALES	
		 <b>INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION</b> QUITO - ECUADOR	
		PROYECTO HIDROELECTRICO COCA CODO SINCLAIR ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA MECANICA DE ROCAS CALEHA EXPLORATORIA GCM1 MAPEO GEOSTRUCTURAL	
		HOJA 5 DE 5 <span style="float: right;">H. 1.100 ESCV. 1. 50</span>	
ELABORADO	H.S.G. / M.B.	RECOMENDADO	
DISEÑADO	L.B. MORALES	APROBADO	
REVISADO	SOL	JUNIO 1991 REF. 0209-G-2912	
FECHA	NATURALEZA DE LA REVISIÓN	POR	VERIF. APROB.

# FORMACION MISAHUALI

## SITIO CASA DE MAQUINAS

### GALERIA EXPLORATORIA GCM1 (TRAMO DE 0+000 A 0+100 m)

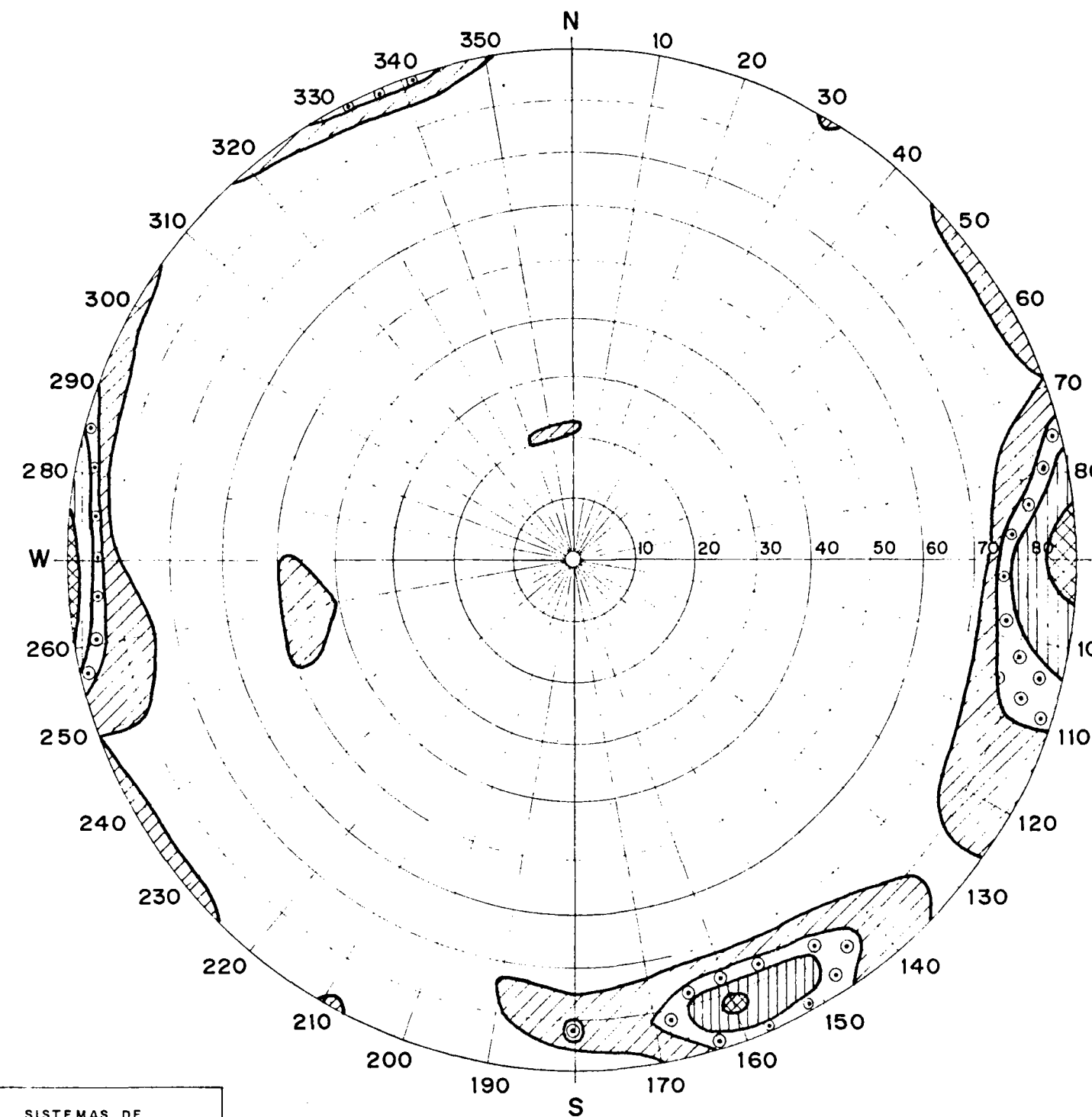
ABSCISA DE 0+000 A 0+050 m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 60° E / 80° SE  
SECUNDARIO  
N 20° E / 85° SE

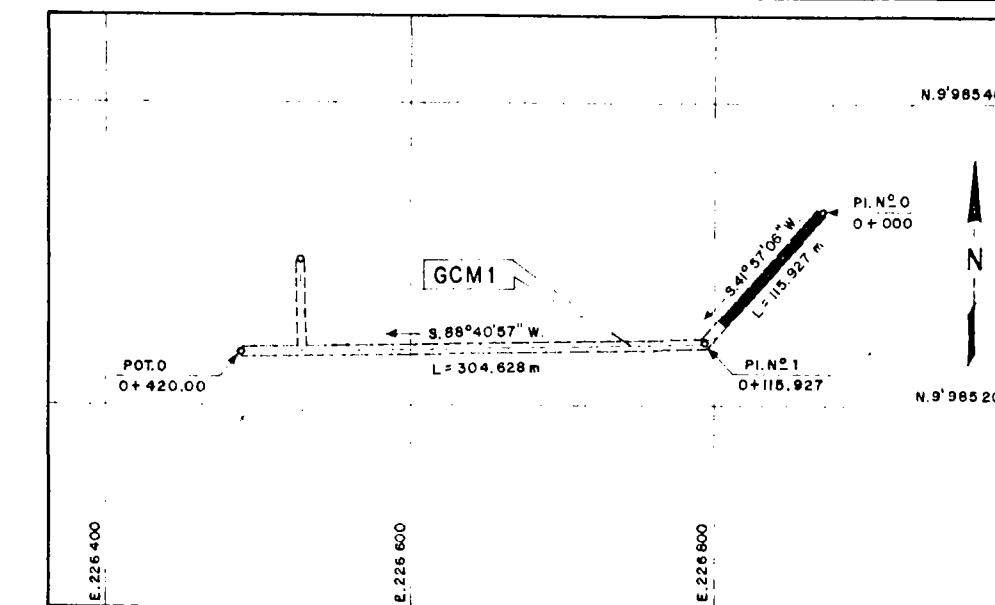
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 100  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

ABSCISA DE 0+050 A 0+100 m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPALES  
N-S / 90° E  
N 70° E / 80° SE

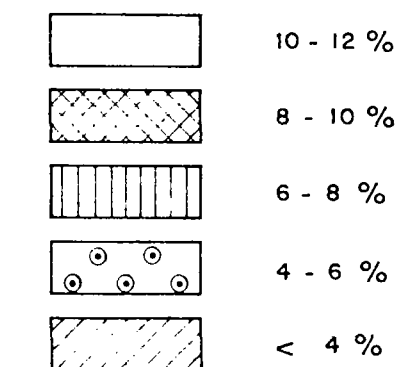
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 117  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR



UBICACION  
ESCALA: 1:5000

#### LEYENDA

CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS



#### NOTAS:

- PARA EL MAPEO GEOESTRUCTURAL DE LA GALERIA GCM1 (TRAMO DE 0+000 A 0+100 m), VER PLANO 0209-G-2908
- PARA LA INVESTIGACION SISMICA DE LA GALERIA GCM1, VER PLANOS 0209-G-2235 A 0209-G-2239

ELECTROCONSULT - TRACCIONEL - RODIO  
ASTEC-INELIN-INGECONSULT- CAMINOS Y CANALES

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION  
QUITO-ECUADOR

PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR  
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"  
MECANICA DE ROCAS  
GALERIA EXPLORATORIA GCM1  
ESTEREOGRAMA DE DISCONTINUIDADES

HOJA 1 DE 5

ESC.

RECOMENDADO

FECHA

0209-G-2913

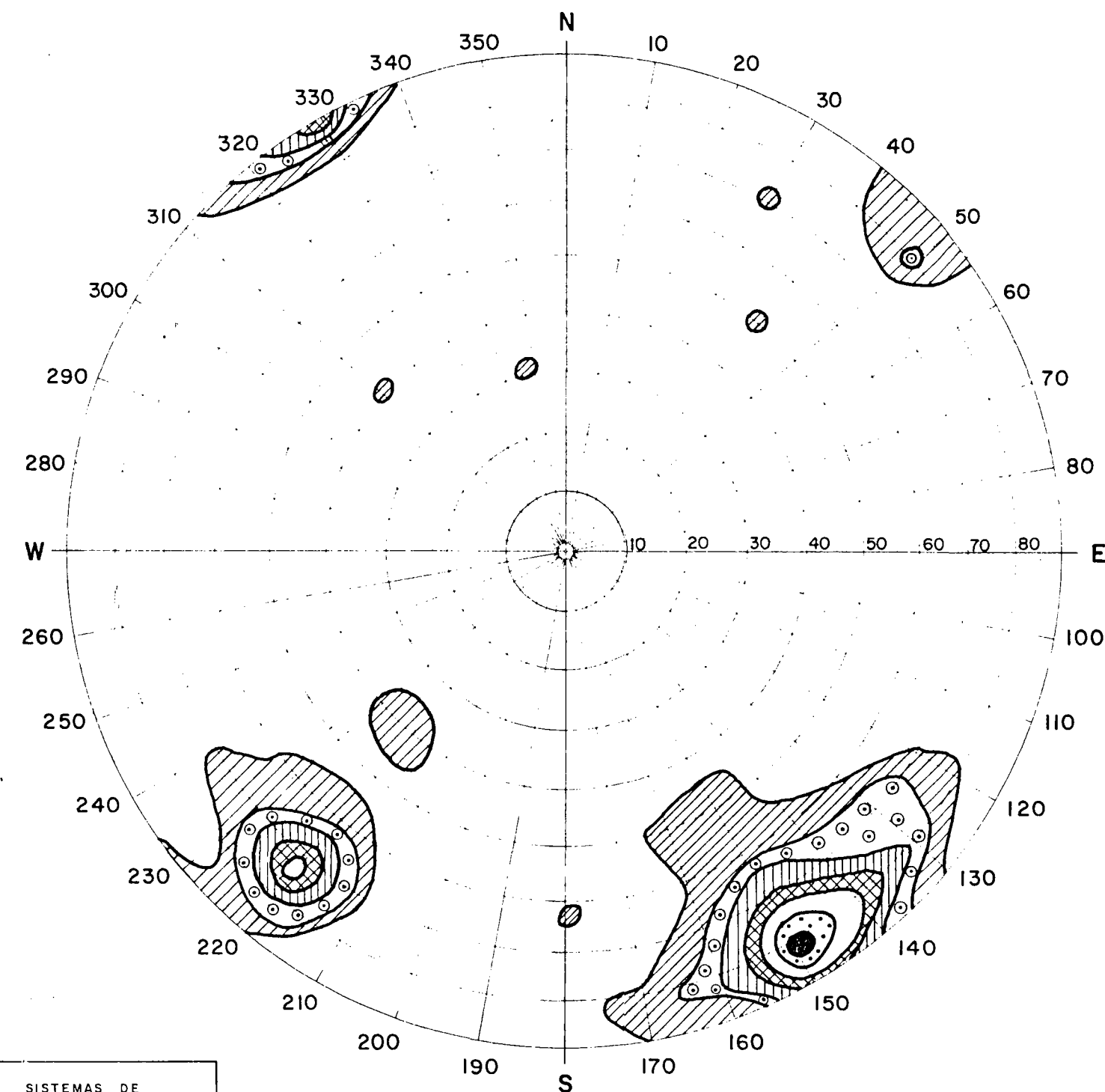


# FORMACION MISAHUALLI

## SITIO CASA DE MAQUINAS

### GALERIA EXPLORATORIA GCM1 (TRAMO DE 0+100 A 0+200)

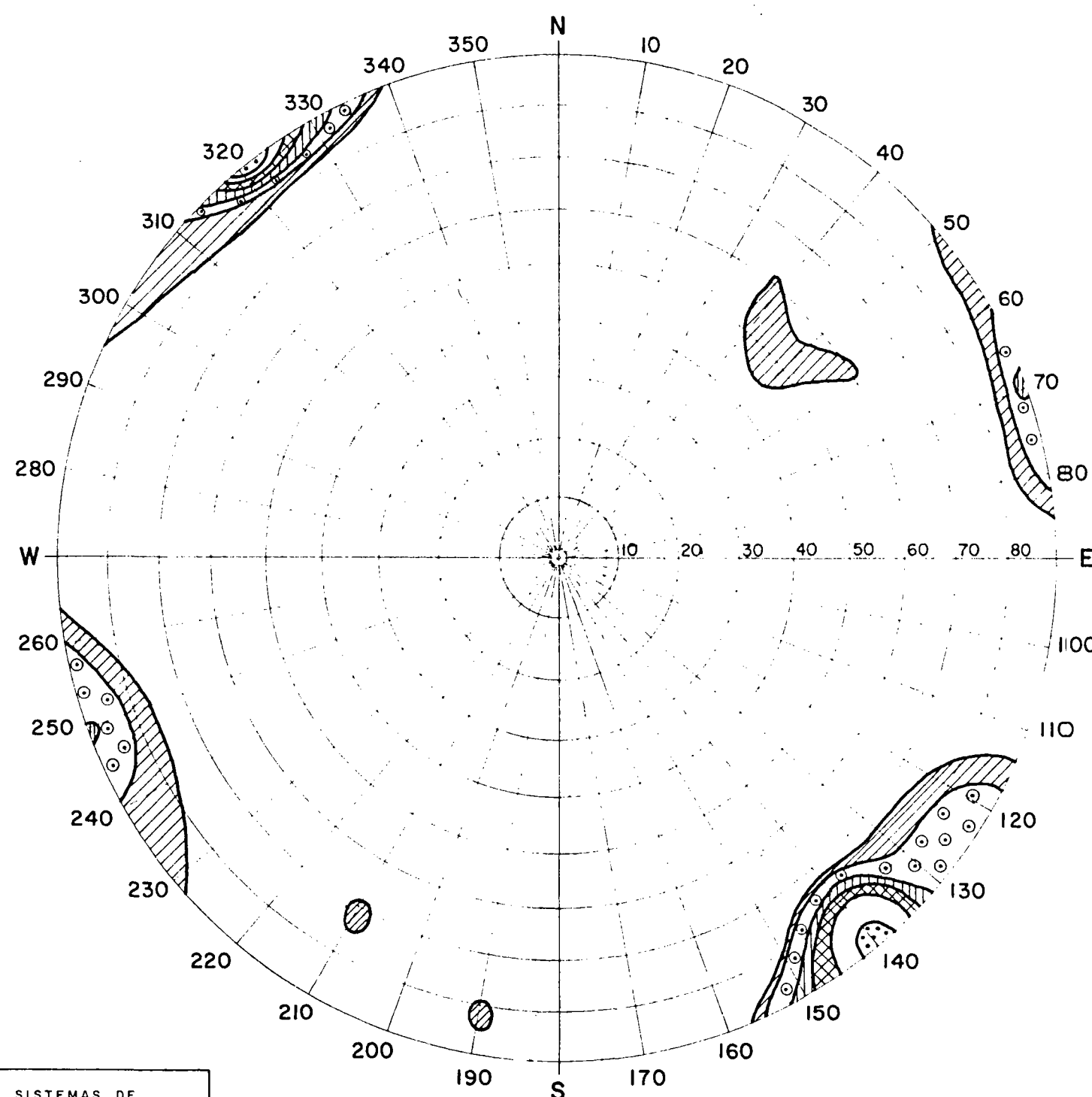
ABSCISA DE 0+100 A 0+150 m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 60° E / 80° SE  
SECUNDARIO  
N 50° W / 70° SW

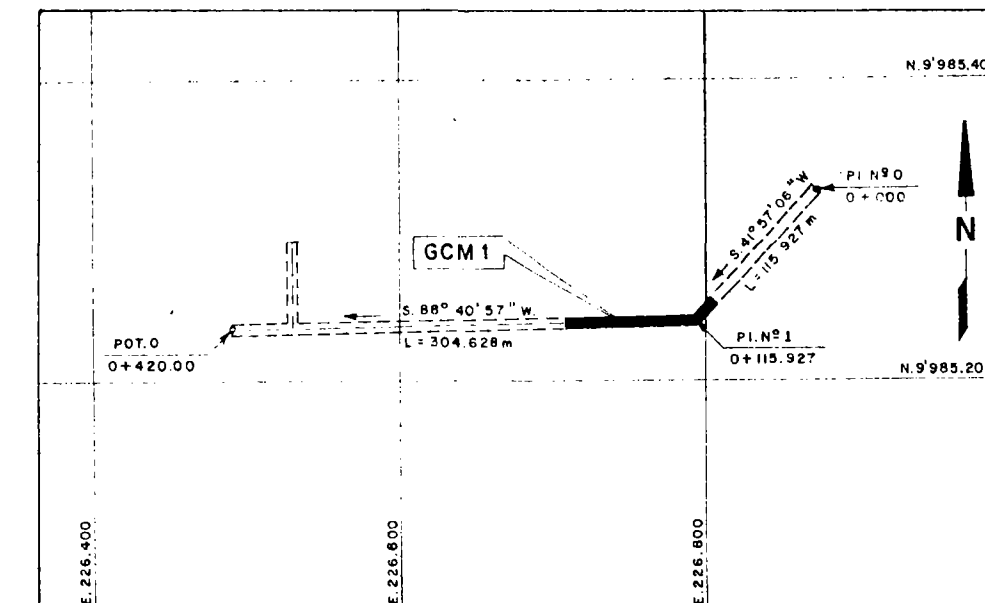
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 100  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

ABSCISA DE 0+150 A 0+200 m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 50° E / 90° SE  
SECUNDARIO  
N 20° W / 90°

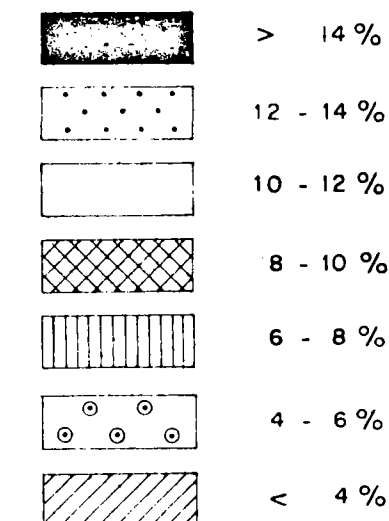
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 160  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR



UBICACION  
ESCALA: 1:5000

#### LEYENDA

CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS



#### NOTAS:

- PARA EL MAPEO GEOESTRUCTURAL DE LA GALERIA GCM1 (TRAMO DE 0+100 A 0+200 m), VER PLANO 0209-G-2909
- PARA LA INVESTIGACION SISMICA DE LA GALERIA GCM1, VER PLANOS 0209-G-2235 A 0209-G-2239

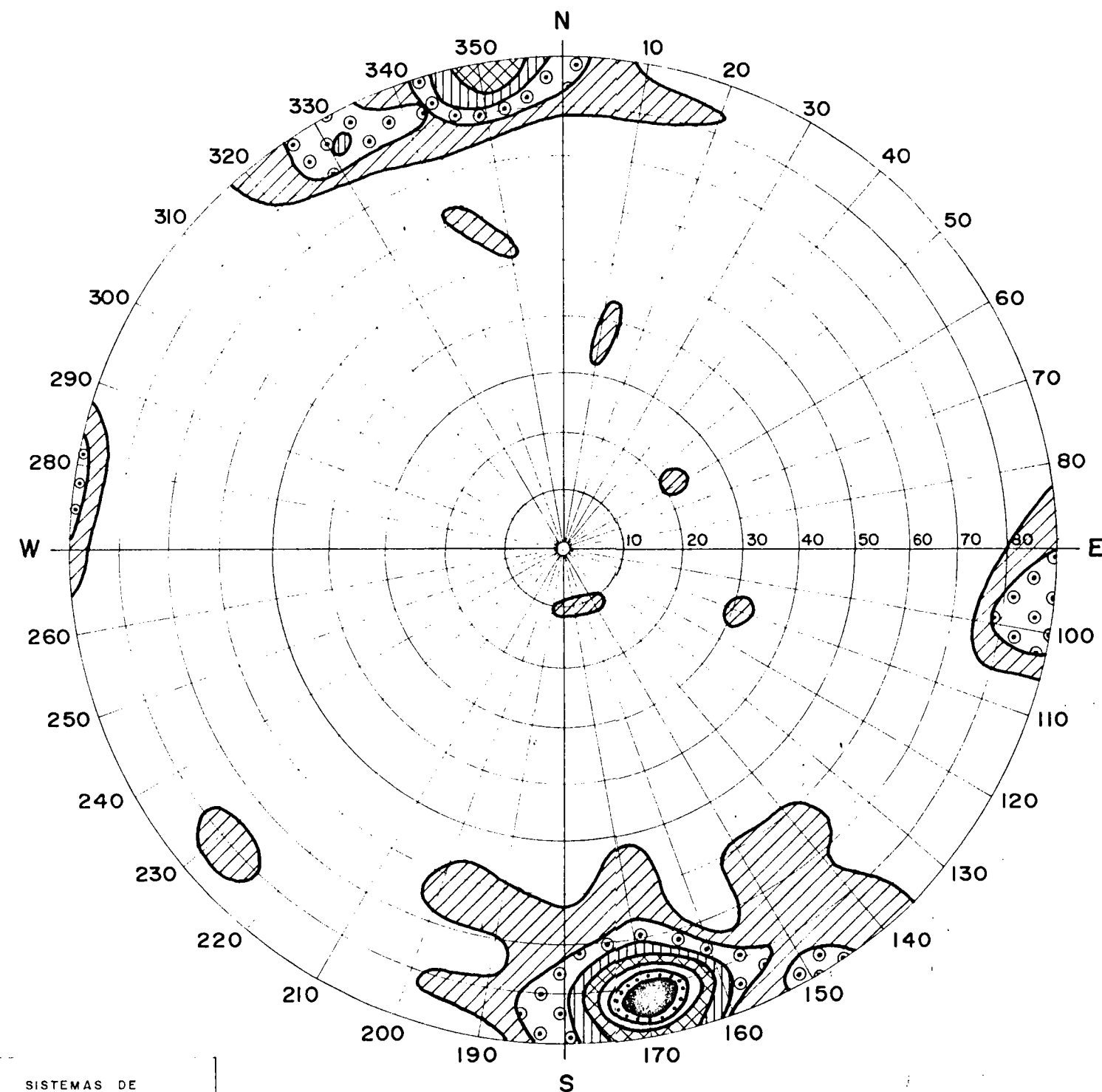
ELECTROCONSULT - TRACCIONEL - RODIO ASTEC-INELIN-INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES			
<b>INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION</b> QUITO - ECUADOR			
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA - CODO SINCLAIR ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B" <b>MECANICA DE ROCAS</b> GALERIA EXPLORATORIA GCM1 ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES			
HUJA 2 DE 5	ESC.		
DISEÑADO W.B.H./H.S.G.	RECOMENDADO		
DIBUJADO M.M.I.	APROBADO		
REVISADO S.A.			
FECHA JUNIO 1991	REF 0209-G-2914		

# FORMACION MISAHUALLI

## SITIO CASA DE MAQUINAS

### GALERIA EXPLORATORIA GCM1 (TRAMO DE 0 + 200 A 0 + 300m)

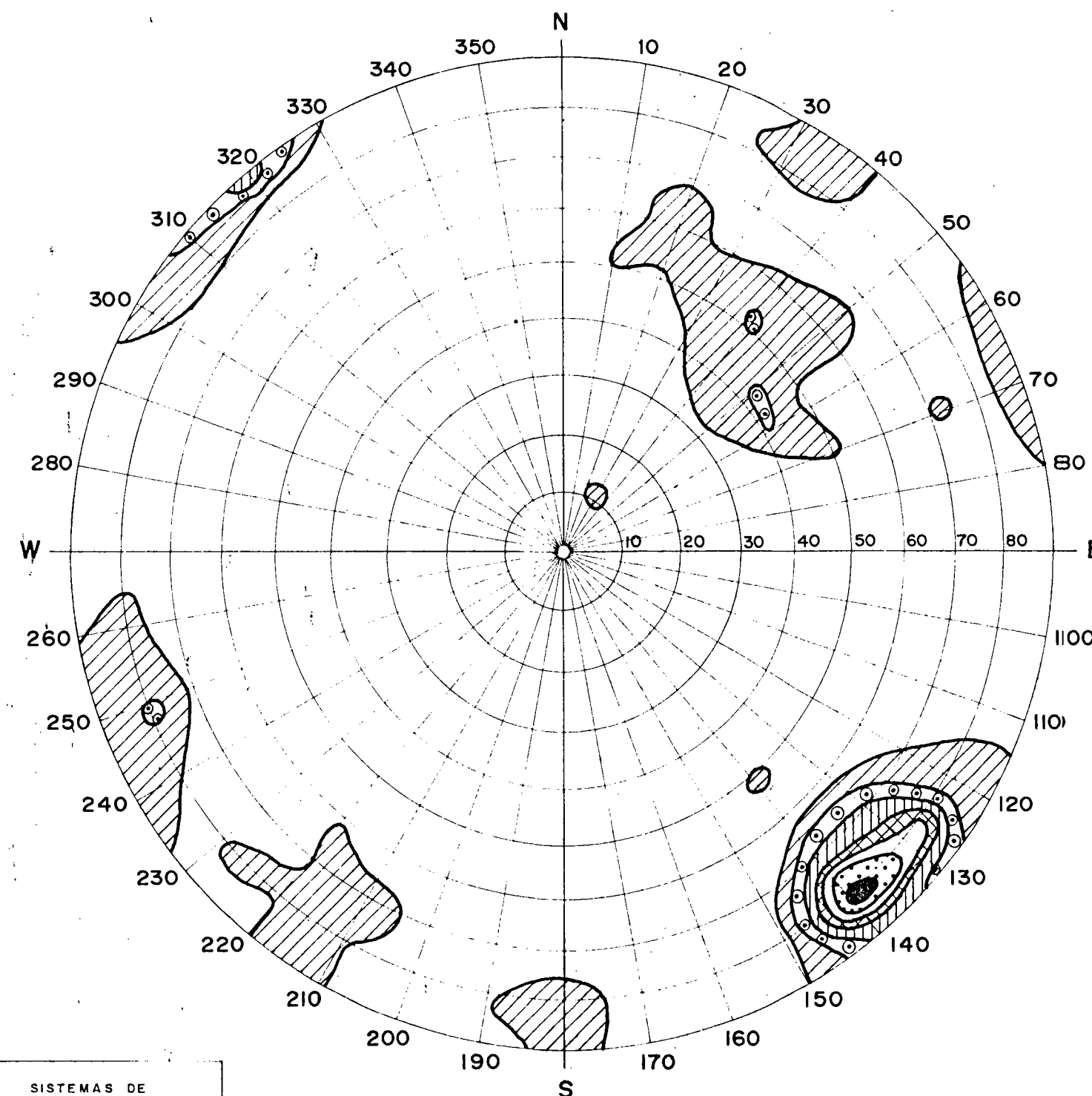
ABSCISA DE 0 + 200 A 0 + 250m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 80° E / 80° SSE  
SECUNDARIO  
N 5° E / 85° ESE

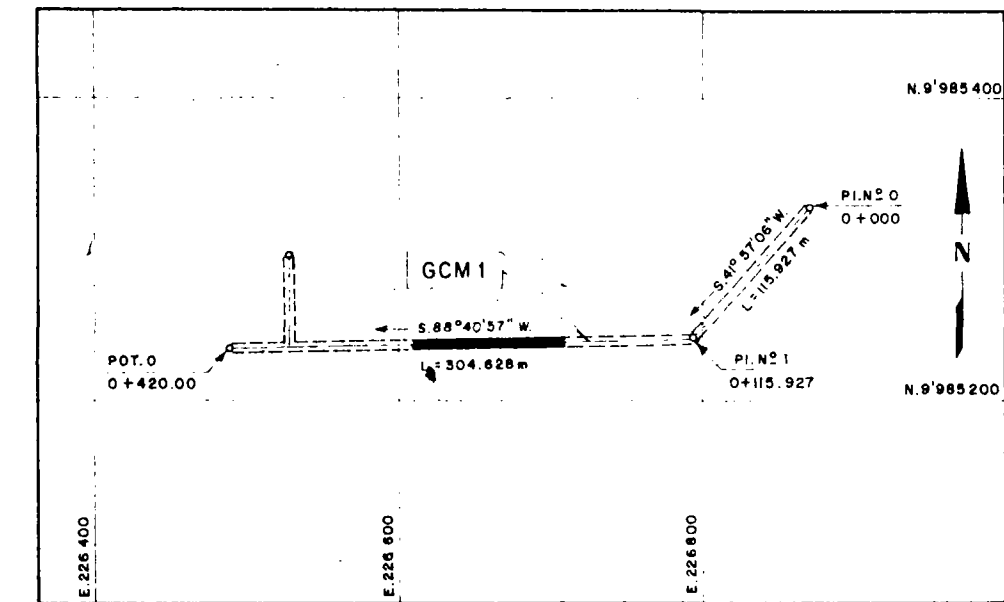
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 100  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

ABSCISA DE 0 + 250 A 0 + 300m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 50° E / 80° SE

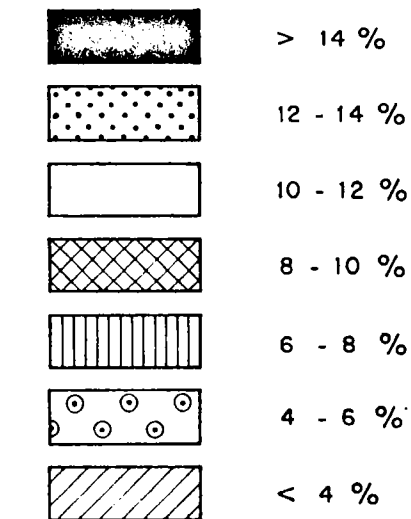
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 120  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR



UBICACION  
ESCALA: 1:5000

#### LEYENDA

CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS



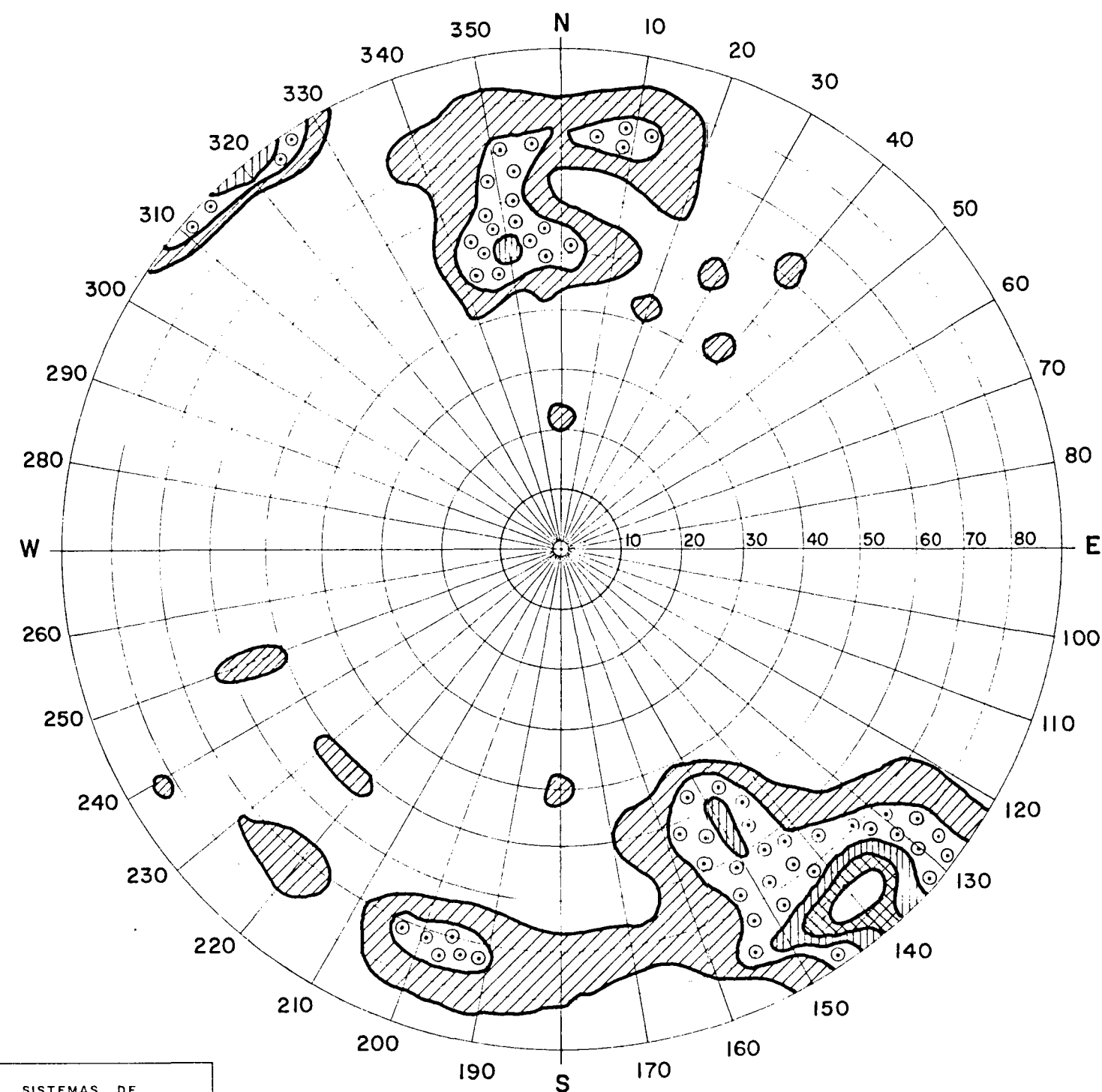
#### NOTAS:

- PARA EL MAPEO GEOESTRUCTURAL DE LA GALERIA GCM1 (TRAMO DE 0 + 200 A 0 + 300m) VER PLANO 0209 - G - 2910
- PARA LA INVESTIGACION SISMICA DE LA GALERIA GCM1, VER PLANOS 0209 - G - 2235 A 0209 - G - 2239

ELECTROCONSULT - TRACCIONEL - RODIO	
ASTEC-INELIN - INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES	
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION	
QUITO - ECUADOR	
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR	
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"	
MECANICA DE ROCAS	
GALERIA EXPLORATORIA GCM1	
ESTEREOGRAMA DE DISCONTINUIDADES	
HOJA 3 DE 5	
DISEÑADO: W.R.H./H.S.G.	REVISADO: SAC
APROBADO: SAC	FECHA: JUNIO 1991

FORMACION MISAHUALLI  
SITIO CASA DE MAQUINAS  
GALERIA EXPLORATORIA GCM1 (TRAMO DE 0+300 A 0+420.40m)

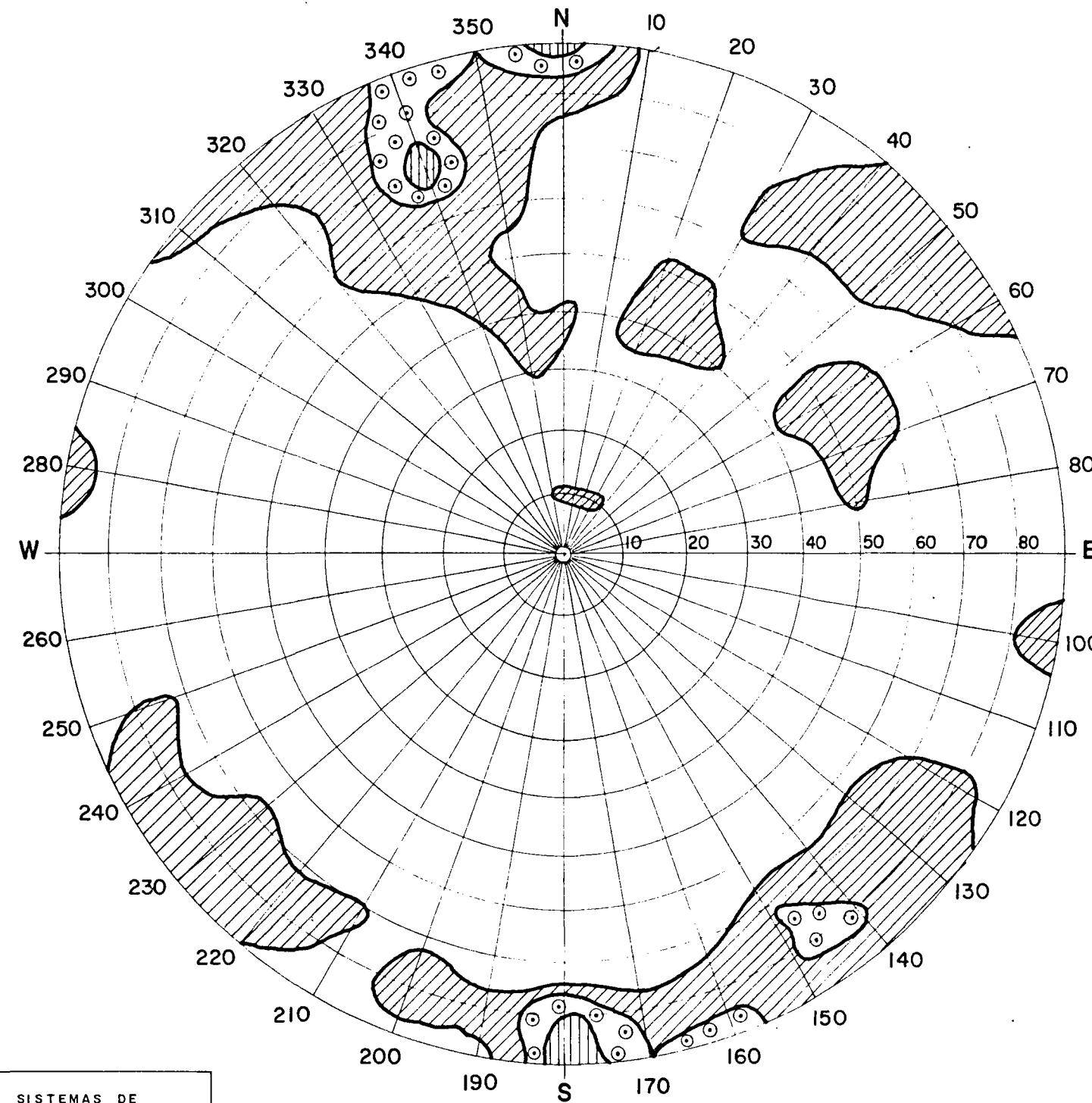
ABSCISA DE 0+300 A 0+350 m



NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 112  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

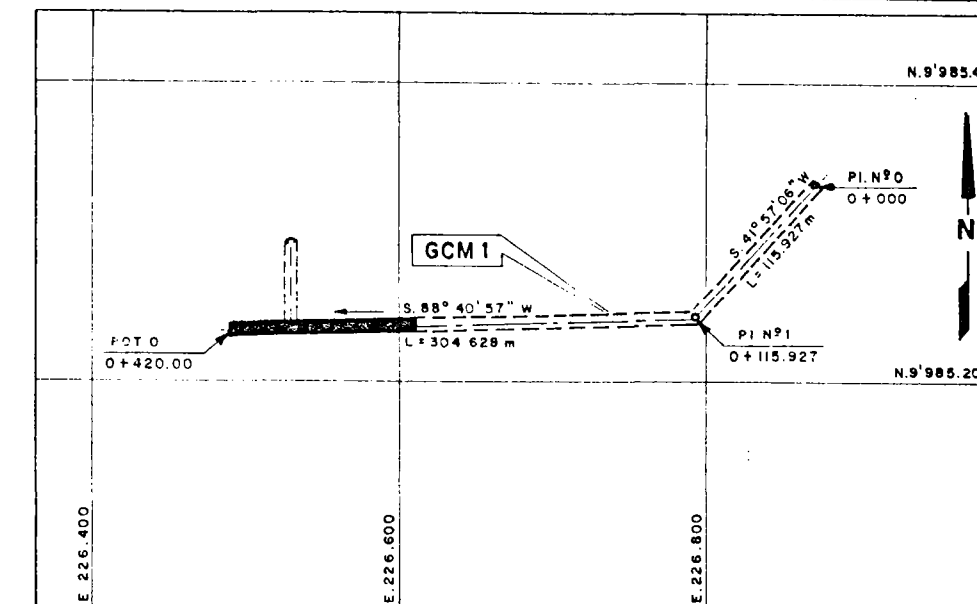
SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 50° E / 80° SE  
SECUNDARIO  
N 80° E / 50° NNW

ABSCISA DE 0+350 A 0+420.40 m



NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 150  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

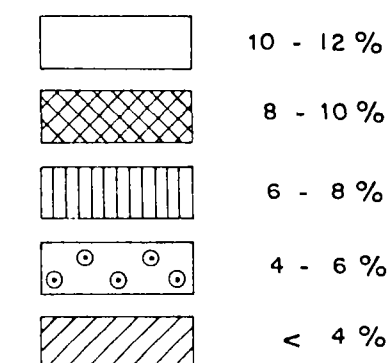
SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPALES  
E - W / 90°  
N 70° E / 70° NW



UBICACION

LEYENDA

CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS



NOTAS:

- PARA EL MAPEO GEOESTRUCTURAL DE LA GALERIA GCM1 (TRAMO DE 0+300 A 0+420 m), VER PLANOS 0209 - G - 2911 Y 0209 - G - 2912
- PARA LA INVESTIGACION SISMICA DE LA GALERIA GCM1, VER PLANOS 0209 - G - 2235 A 0209 - G - 2239

ELECTROCONSULT - TRACCIONEL - RODIO	
ASTEC-INELIN-INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES	
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION	
QUITO - ECUADOR	
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA - CODO SINCLAIR	
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"	
MECANICA DE ROCAS	
GALERIA EXPLORATORIA GCM1	
ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES	
HOJA 4 DE 5	
ESC.	
DISEÑADO W.B.H. / H.S.G.	RECOMENDADO
DIBUJADO M.M.I.	APROBADO
REVISADO S.C.	
REV. N°	FECHA
NATURALEZA DE LA REVISION	POR
VERIF	APROB
FECHA	JUNIO / 1991
REF. 0209 - G - 2916	



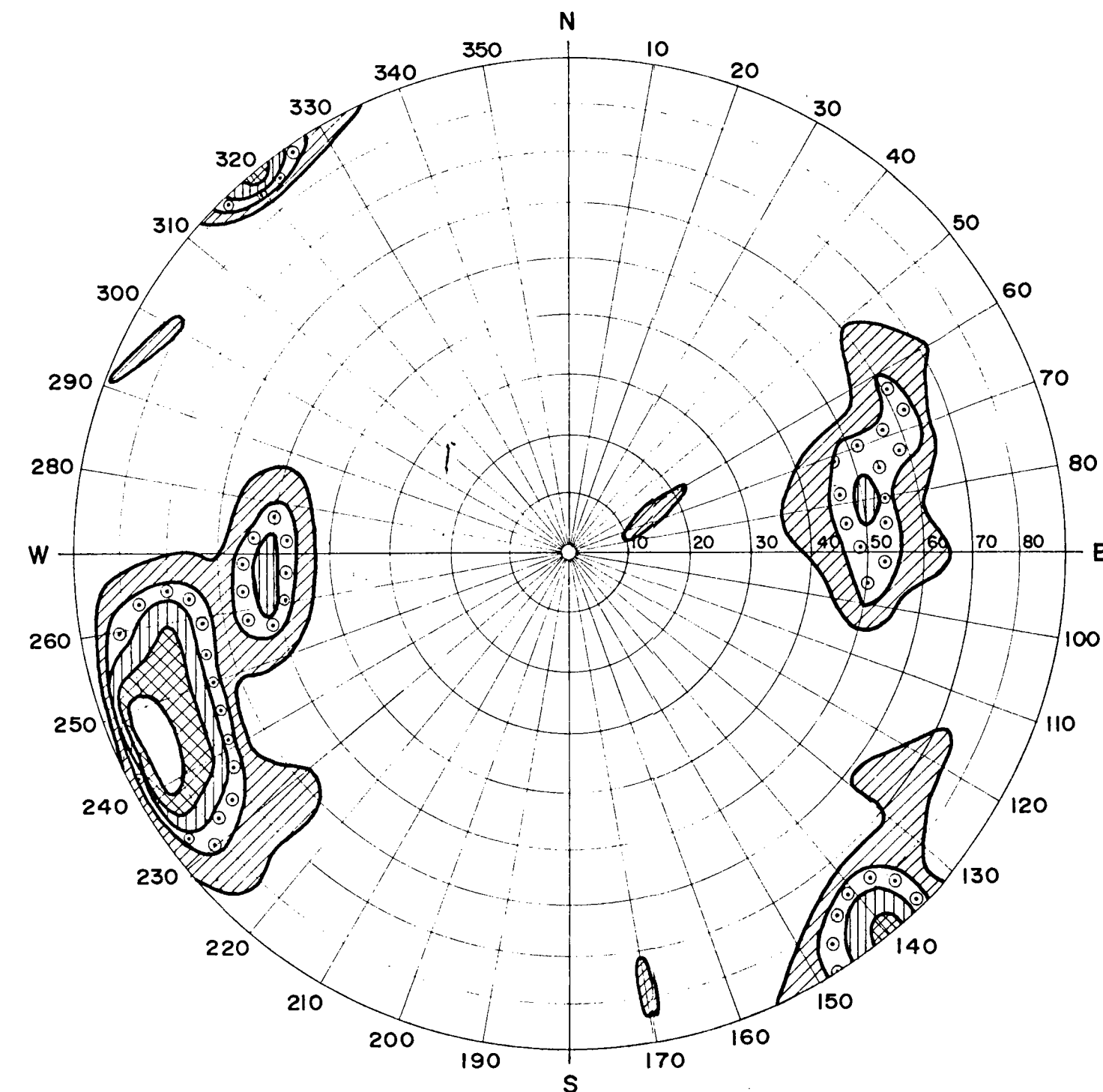
# FORMACION MISAHUALLI

## SITIO CASA DE MAQUINAS

### GALERIA EXPLORATORIA GCM1 (CRUCERO NORTE DE 0 + 000 A 0 + 060.60 m)

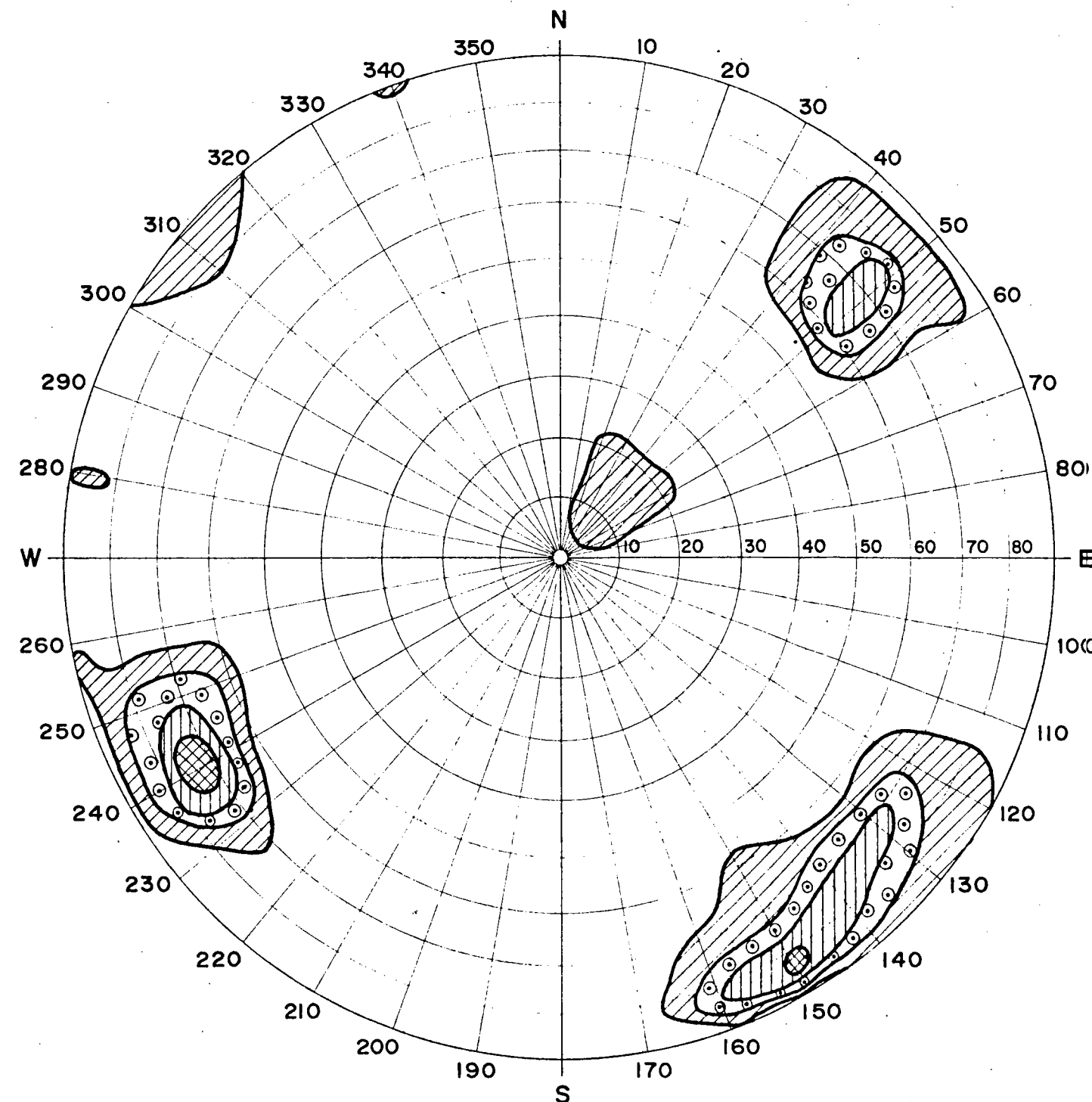
ABSCISA DE 0 + 000 A 0 + 030 m

ABSCISA DE 0 + 030 A 0 + 060.60 m



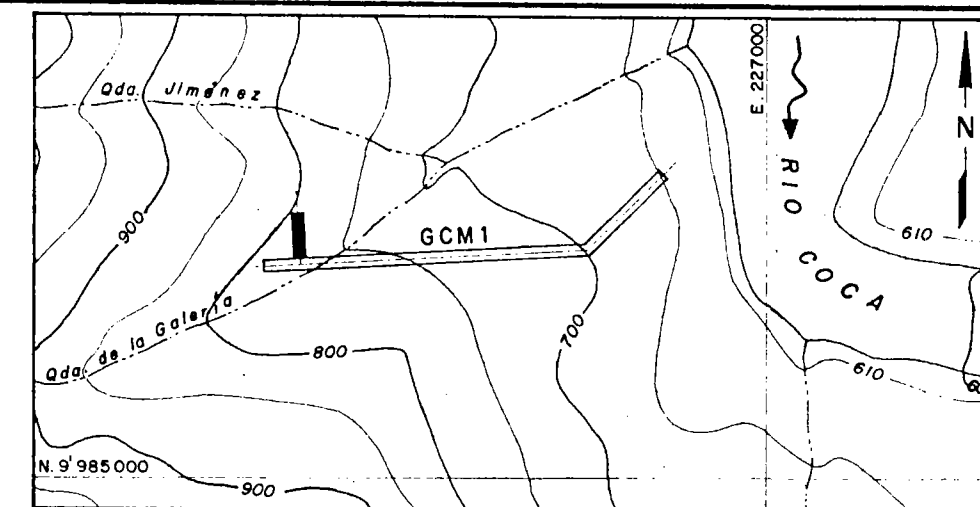
SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 20° W / 80° WSW  
SECUNDARIO  
N 50° E / 90°

NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 100  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 30° W / 70° SW  
SECUNDARIO  
N 60° E / 80° SE

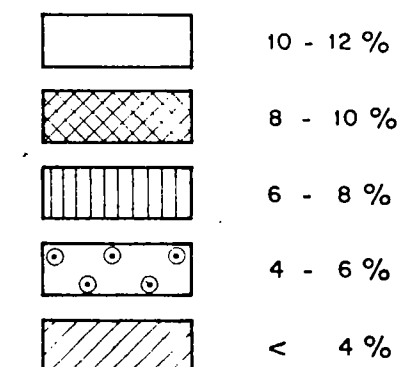
NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 100  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR



UBICACION  
SIN ESCALA

#### LEYENDA:

##### CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS



#### NOTA:

- PARA EL MAPEO GEOESTRUCTURAL DE LA GALERIA GCM1 (CRUCERO NORTE DE 0 + 000 A 0 + 060.60) VER PLANO 0209 - G - 2912
- PARA LA INVESTIGACION SISMICA DE LA GALERIA GCM1, VER PLANOS 0209 - G - 2235 A 0209 - G - 2239

ELECTROCONSULT - TRACCIONEL - RODIO  
ASTEC-INELIN - INGECONSULT - CAMINOS Y CANALES

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION  
QUITO - ECUADOR

PROYECTO HIDROELECTRICO COCA - CODO SINCLAIR  
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"  
MECANICA DE ROCAS  
GALERIA EXPLORATORIA GCM1  
ESTEREOGRAMAS DE DISCONTINUIDADES

HOJA 5 DE 5

ESC.

DISEÑADO H.S.G./W.B.M. RECOMENDADO

DIBUJADO V.H.A. APROBADO

REVISADO S.H. APROBADO

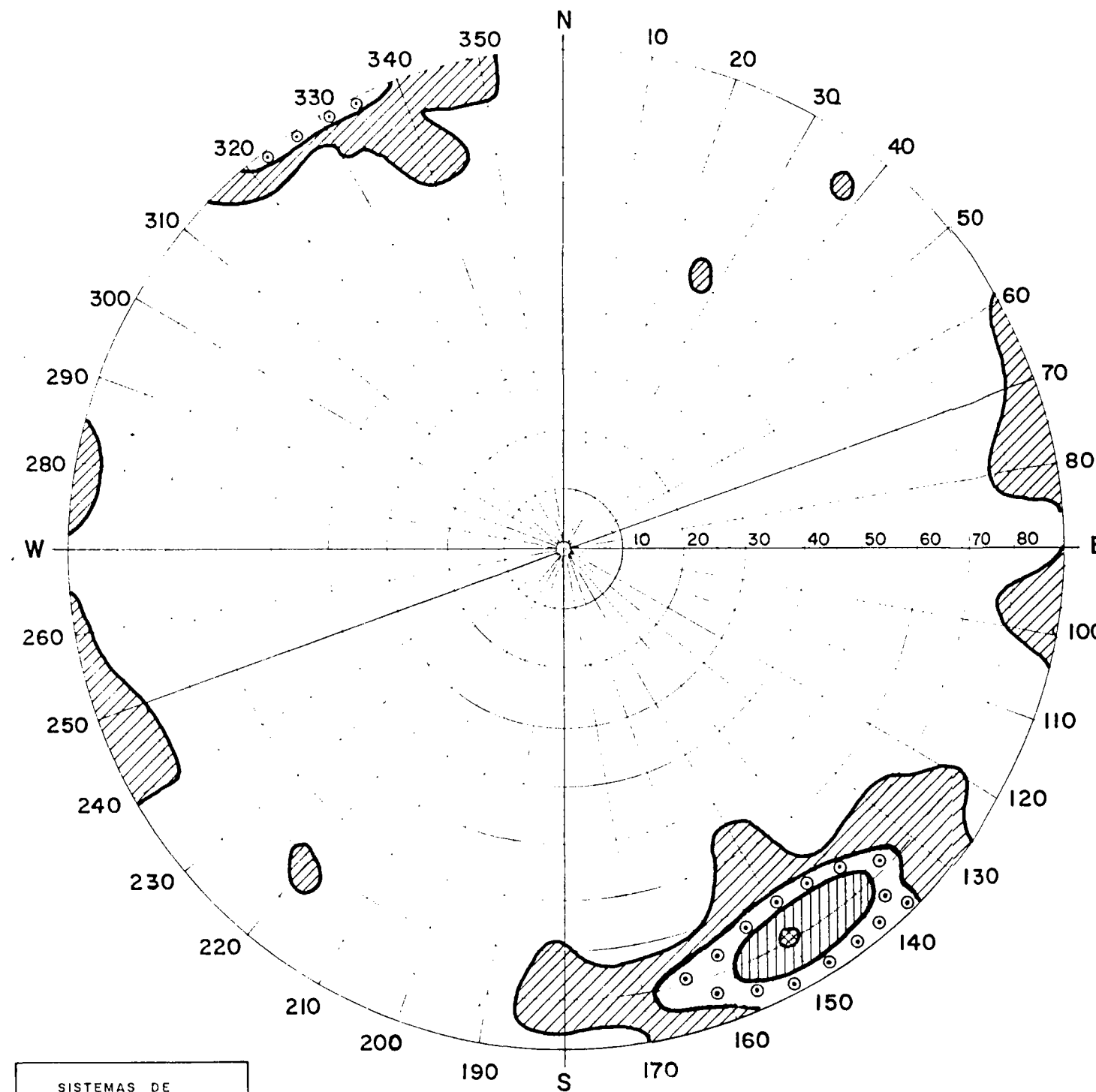
FECHA JUNIO - 1991 REF. 0209 - G - 2917

# FORMACION MISAHUALLI

## SITIO CASA DE MAQUINAS

### GALERIA EXPLORATORIA GCM1

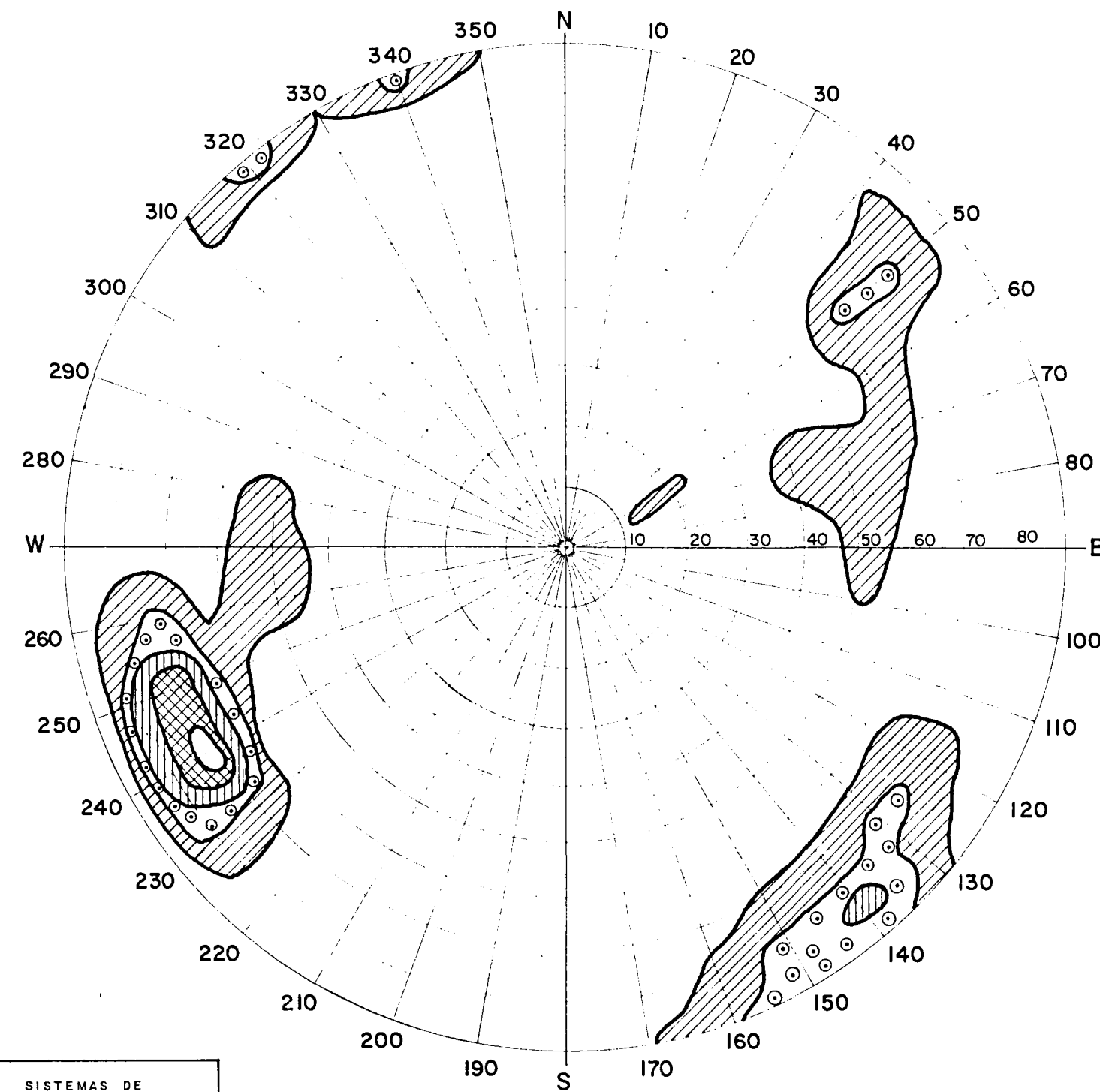
ABSCISA DE 0+000 A 0+420.20m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N60° E / 80° SE

NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 400  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

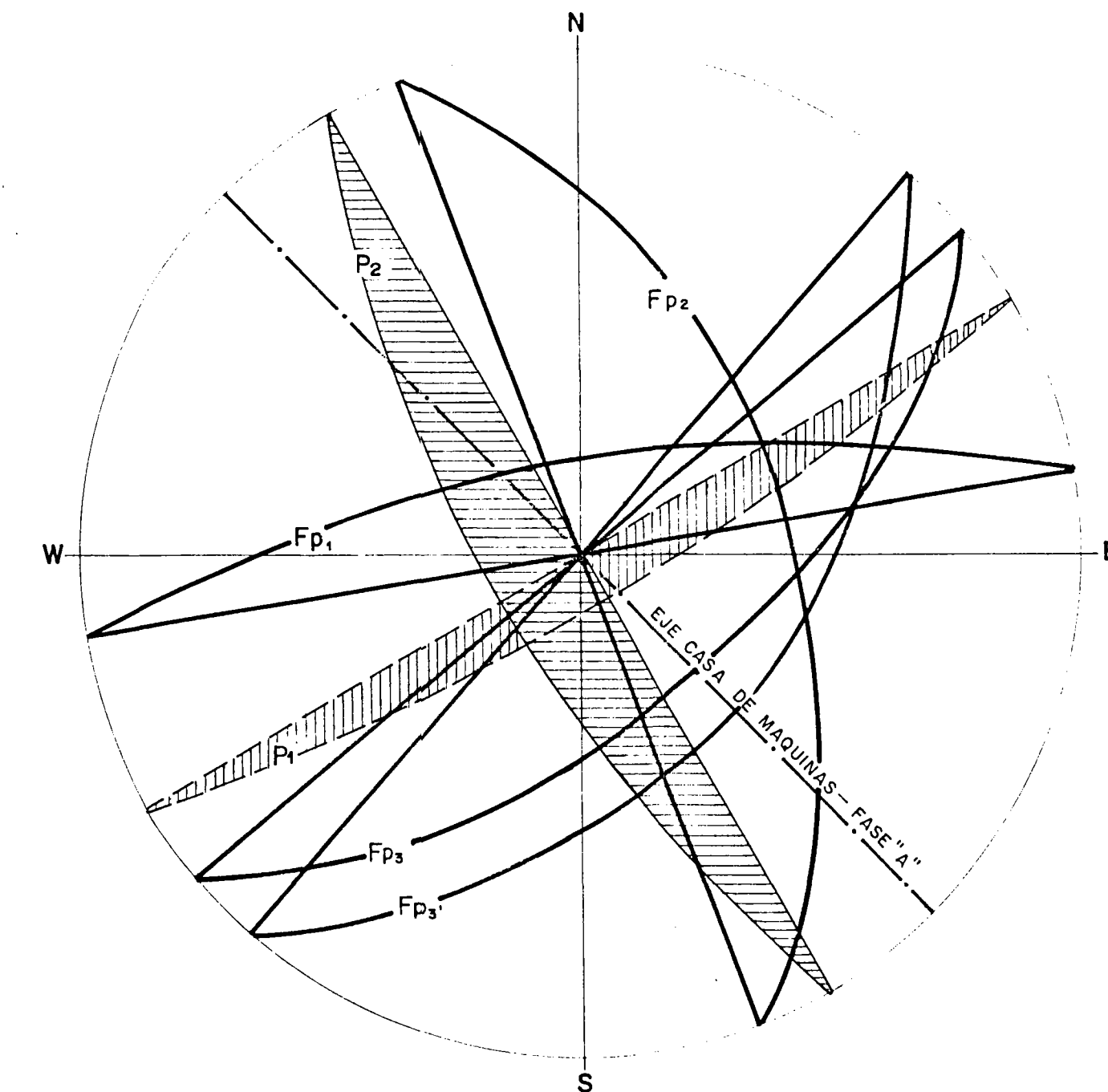
CRUCERO NORTE ABSCISA DE 0+000 A 0+060.60 m



SISTEMAS DE DISCONTINUIDADES  
PRINCIPAL  
N 30° W / 70° SW  
SECUNDARIO  
N 50° E / 80° SE

NUMERO DE PUNTOS REGISTRADOS: 200  
PROYECCION ESTEREOGRAFICA O DE WULFF  
REPRESENTACION EN EL HEMISFERIO SUPERIOR

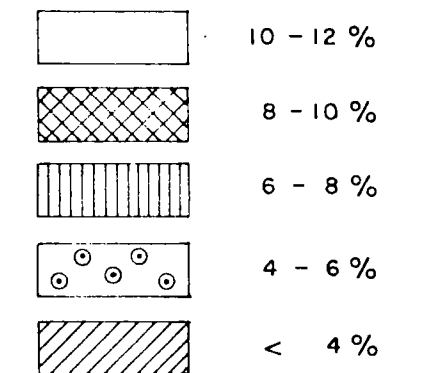
ESTEREOGRAMA DE INTERSECCION DE PLANOS DE DISCONTINUIDADES  
EN RELACION CON EL EJE DE CASA DE MAQUINAS (Fase "A")



P1 SISTEMA PRINCIPAL DE DISCONTINUIDADES EN LA GALERIA (0+000 A 0+420 m): N60° E / 80° SE  
P2 SISTEMA PRINCIPAL DE DISCONTINUIDADES EN EL CRUCERO NORTE: N 30° W / 70° SW

Fp FALLAS PRINCIPALES: Fp1 (0+365 A 0+375m): N80° E / 70° NNW  
Fp2 (0+045m): N 20° W / 55° ENE  
Fp3 (0+050 / 0+060m): N40° E / 55° SE  
Fp3': N50° E / 65° SE

LEYENDA  
CONCENTRACION DE PUNTOS REGISTRADOS



ELECTROCONSULT-TRACCIONEL-RODIO ASTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES			
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION QUITO - ECUADOR			
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B" MECANICA DE ROCAS GALERIA EXPLORATORIA GCM1 ESTEREOGRAMAS GENERALES			
HOJA DE	DISENADO W.B.H. / H.S.G.	RECOMENDADO	ESC.
REVISADO M.M.I.	APROBADO		
FECHA JUNIO / 1991		REF 0209-6-2918	