

PÚBLICO

DOCUMENTO DEL BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO

## **ECUADOR**

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

#### **ESTUDIOS DE FACTIBILIDAD**

(EC0123)

#### **ANEXO G VULCANOLOGÍA**

**MARZO 1992**





**INECEL**

**REPUBLICA DEL ECUADOR**

**MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS**

**INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION**

---

**PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD**

**ANEXO G  
VULCANOLOGIA**

**BORRADOR**

---

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

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

---

**0209-B-157**

**FINANCIAMIENTO: INECEL - BID**



---

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 Costos de las Obras Civiles
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 G del Informe Final del Estudio de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, en el que se presentan los resultados de las investigaciones y estudios efectuados para evaluar la peligrosidad del volcán El Reventador, con relación a las obras del Proyecto.

Este volumen sustituye el informe 0209-A-157 (Anexo G del Informe Final del Estudio de Selección de Alternativas-Fase A).

Para la aclaración o complementación de algunos puntos particulares se puede recurrir al Anexo D (Geología) y al Anexo H (Sismología y Tectónica) del Informe Final del Estudio de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair.



# INDICE

	Página
1. INTRODUCCION	1
2. MARCO GEOLOGICO REGIONAL	4
2.1 Unidades geológicas principales en el área del volcán El Reventador	4
2.2 Tectónica	6
2.3 Reconstrucción paleogeográfica y geodinámica	7
3. ZONACION ESTRUCTURAL DEL AREA ESTUDIADA	10
4. GEOLOGIA DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR	13
4.1 Los edificios volcánicos	13
4.2 Las avalanchas de escomoros	17
4.3 Dataciones absolutas	19
5. TECTONICA LOCAL	24
6. PETROLOGIA	27
6.1 Petrografía	27
6.2 Geoquímica	36
6.2.1 Composición química de los productos volcánicos	38
6.2.2 Condiciones de cristalización de los magmas	45
7. MODELIZACION DEL SISTEMA ERUPTIVO DEL CONO ACTUAL	51
8. EVALUACION DEL RIESGO VOLCANICO	57
8.1 Actividad histórica del Volcán El Reventador	57
8.2 Peligros relacionados con la actividad efusiva	59
8.3 Peligros relacionados con la actividad explosiva	61
9. GASES FUMAROLICOS Y MANIFESTACIONES TERMALES	72
9.1 Muestreos	72
9.1.1 Campañas de 1987	72
9.1.2 Campaña de 1991	72
9.2 Análisis de laboratorio	75
9.2.1 Metodología	75
9.2.2 Resultados obtenidos	76



9.3	Comentarios de los resultados	80
10.	MONITOREO DEL VOLCAN EL REVENTADOR	82
10.1	Control de la sismicidad	82
10.2	Control inclinométrico	83
10.3	Monitoreo geoquímico	83
11.	SINTESIS DE LOS RESULTADOS	85
11.1	Tectónica	85
11.2	Caracterización petrológica y modelización del sistema eruptivo actual	86
11.3	Evaluación de la peligrosidad volcánica	87
11.4	Conclusiones y recomendaciones	90
12.	BIBLIOGRAFIA	92
CUADROS		
Cuadro 4/1	Resultados de las determinaciones radiométricas K/Ar	20
Cuadro 4/2	Resultados de las determinaciones radiométricas 14C	23
Cuadro 6/1	Petrografía del Complejo Volcánico Basal (CVB)	35
Cuadro 6/2	Petrografía del Volcán Paleoreventador (VPR)	36
Cuadro 6/3	Petrografía del Volcán El Reventador (VER)	37
Cuadro 6/4	Análisis químico de rocas del complejo volcánico El Reventador Parte 1: Complejo Volcánico Basal (CVB)	39
Cuadro 6/4	Análisis químico de rocas del complejo volcánico El Reventador Parte 2: Volcán Paleoreventador (VPR)	40
Cuadro 6/4	Análisis químico de rocas del complejo volcánico El Reventador Parte 3: Volcán El Reventador, cono actual (VER)	41
Cuadro 6/5	Análisis de minerales pertenecientes a rocas del complejo volcánico El Reventador	42
Cuadro 6/6	Temperaturas de cristalización estimadas por medio del geotermómetro olivino-líquido magmático	46
Cuadro 6/7	Temperaturas de cristalización estimadas por medio del geotermómetro de dos piroxenos	47



Cuadro 6/8	Contenido de agua en el magma	49
Cuadro 6/9	Viscosidad y densidad del magma	50
Cuadro 7/1	Secuencia de emisión y volumen de las coladas lávicas del Volcán El Reventador (VER)	51
Cuadro 7/2	Modelo de cristalización fraccionada para los productos más recientes del Volcán El Reventador (VER)	52
Cuadro 7/3	Modelo del sistema de alimentación del Volcán El Reventador (VER)	54
Cuadro 8/1	Velocidad del viento	62
Cuadro 8/2	Distribución porcentual de la masa piroclástica	63
Cuadro 8/3	Concentración sobre el suelo de los depósitos piroclásticos de caída	64
Cuadro 8/4	Inclinación del cono de energía	66
Cuadro 8/5	Inclinación del cono de energía adoptado en la simulación	68
Cuadro 9/1	Volcán El Reventador. Análisis químicos de aguas y gases. Cuadro resumen de los resultados Análisis de gases	73
Cuadro 9/2	Volcán El Reventador. Análisis químicos de aguas y gases. Cuadro resumen de los resultados Análisis de aguas	74

#### FIGURAS

Figura 2/1	Esquema geológico del Noreste de Ecuador
Figura 3/1	Esquema estructural regional
Figura 3/2	Zonación estructural regional
Figura 4/1	Esquema geológico del área del complejo volcánico El Reventador
Figura 4/2	Esquemas de las principales etapas de evolución del complejo volcánico El Reventador
Figura 4/3	Evolución del complejo volcánico El Reventador Perfiles esquemáticos



- 
- Figura 6/1 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama clasificativo  $K_2O/SiO_2$
- Figura 6/2 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama Alkali/ $SiO_2$
- Figura 6/3 Andesitas del Complejo Volcánico Basal (CVB)  
Composición química de los fenocristales (muestra REV-9)
- Figura 6/4 Andesitas del Complejo Volcánico Basal (CVB)  
Composición química de los fenocristales (muestra REV-86)
- Figura 6/5 Lavas del Complejo Volcánico Basal (CVB)  
Diagrama de persistencia de las fases en fenocristales
- Figura 6/6 Basaltos del Volcán Paleoreventador (VPR)  
Composición química de los fenocristales (muestra A-02)
- Figura 6/7 Andesitas del Volcán Paleoreventador (VPR)  
Composición química de los fenocristales (muestra REV-28)
- Figura 6/8 Lavas del Volcán Paleoreventador (VPR)  
Diagrama de persistencia de las fases en fenocristales
- Figura 6/9 Basaltos del Volcán El Reventador (VER)  
Composición química de los fenocristales (muestra REV-95)
- Figura 6/10 Andesitas del Volcán El Reventador (VER)  
Composición química de los fenocristales (muestra REV-14)
- Figura 6/11 Lavas del Volcán El Reventador (VER)  
Diagrama de persistencia de las fases en fenocristales
- Figura 6/12 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama resumen de persistencia de las fases en fenocristales
- Figura 6/13 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama  $K_2O/SiO_2$
- Figura 6/14 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama de variación de Mg y Ca versus  $SiO_2$
- Figura 6/15 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama de variación de Ti y Al versus  $SiO_2$
- Figura 6/16 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama de variación de Fe y Mn versus  $SiO_2$
- Figura 6/17 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama de variación de Na y P versus  $SiO_2$
-



- 
- Figura 6/18 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama álcali/hierro/magnesio (A/H/M)
- Figura 6/19 Lavas del Complejo Volcánico Basal (CVB)  
Diagrama de variación de los elementos mayores (Mg, Ca, Na, P) versus  $\text{SiO}_2$
- Figura 6/20 Lavas del Complejo Volcánico Basal (CVB)  
Diagrama de variación de los elementos mayores (Ti, Al, Fe, Mn) versus  $\text{SiO}_2$
- Figura 6/21 Lavas del Volcán Paleoreventador (VPR)  
Diagrama de variación de los elementos mayores (Mg, Ca, Na, P) versus  $\text{SiO}_2$
- Figura 6/22 Lavas del Volcán Paleoreventador (VPR)  
Diagrama de variación de los elementos mayores (Ti, Al, Fe, Mn) versus  $\text{SiO}_2$
- Figura 6/23 Lavas del Volcán El Reventador (VER)  
Diagrama de variación de los elementos mayores (Mg, Ca, Na, P) versus  $\text{SiO}_2$
- Figura 6/24 Lavas del Volcán El Reventador (VER)  
Diagrama de variación de los elementos mayores (Ti, Al, Fe, Mn) versus  $\text{SiO}_2$
- Figura 6/25 Basalto del Volcán Paleoreventador (muestra A-02) y andesita del Volcán El Reventador (muestra REV-14)  
Diagrama F-T
- Figura 6/26 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama pseudoternario diópsido/olivino/cuarzo+ortoclasa
- Figura 6/27 Lavas del complejo volcánico El Reventador  
Diagrama pseudoternario diópsido/plagioclasa/cuarzo+ortoclasa
- Figura 6/28 Lava del Volcán El Reventador (VER)  
Variación de la viscosidad en función de la temperatura (muestra REV-14)
- Figura 7/1 Lavas del Volcán El Reventador (VER)  
Variación del índice de diferenciación
- Figura 7/2 Lavas del Volcán El Reventador (VER)  
Diagrama  $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$
- Figura 7/3 Lavas del Volcán El Reventador (VER)  
Diagrama  $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$
- Figura 7/4 Volcán El Reventador (VER)  
Modelo de diferenciación por cristalización fraccionada
-



- Figura 7/5 Volcán El Reventador (VER)  
Esquema del modelo de alimentación
- Figura 8/1 Volcán El Reventador (VER)  
Simulación de la caída de los productos piroclásticos
- Figura 8/2 Volcán El Reventador (VER)  
Simulación numérica automatizada de los flujos piroclásticos  
(Caso A y B)
- Figura 8/3 Volcán El Reventador (VER)  
Simulación numérica automatizada de los flujos piroclásticos  
(Caso C y D)
- Figura 9/1 Gases fumarólicos del Volcán El Reventador (VER)  
Diagrama triangular  $\text{CO}_2/\text{N}_2/(\text{O}_2+\text{Ar})$
- Figura 9/2 Aguas del Volcán El Reventador (VER)  
Comparación entre salinidad total y cloruros+sulfatos  
Diagrama clasificativo Langelier-Ludwig
- Figura 9/3 Aguas del Volcán El Reventador (VER)  
Diagramas calcio/sodio y potasio/sodio
- Figura 9/4 Aguas del Volcán El Reventador (VER)  
Diagrama boro/cloro
- Figura 9/5 Aguas del Volcán El Reventador (VER)  
Diagrama boro/salinidad total

## PLANOS

- 0209-G-2500 Vulcanología  
Leyenda y Símbolos Geológicos
- 0209-G-2501 Vulcanología  
Sector río Dué Grande  
Mapa Geológico
- 0209-G-2502 Vulcanología  
Sector Volcán El Reventador  
Mapa Geológico
- 0209-G-2503 Vulcanología  
Sector Codo Sinclair  
Mapa Geológico
- 0209-G-2504 Vulcanología  
Volcán El Reventador  
Cortes Geológicos



- 
- 0209-G-2505 Vulcanología  
Volcán El Reventador  
Mapa Geológico del Anfiteatro
- 0209-G-2506 Vulcanología  
Volcán El Reventador  
Mapa Geovulcanológico del Cráter
- 0209-G-2507 Vulcanología  
Mapa de Ubicación de las Muestras de Rocas (Hoja 1 de 2)
- 0209-G-2508 Vulcanología  
Mapa de Ubicación de las Muestras de Rocas (Hoja 2 de 2)
- 0209-G-2509 Vulcanología  
Ubicación de las Estaciones Sísmicas



## 1. INTRODUCCION

Durante algunos siglos, después de la conquista española, la existencia de un volcán activo ubicado al este de la Cordillera Real, en la impenetrable selva amazónica ecuatoriana, originó comentarios imprecisos y fantásticos.

Solamente en las últimas décadas, después de la aventurada exploración de J. H. Sinclair (1929), se realizaron reconocimientos oficiales y se obtuvieron descripciones confiables del "misterioso" volcán El Reventador, que con sus 3.462 m de altitud, domina la región comprendida entre los ríos Coca, Salado y Dué, en las provincias del Napo y Sucumbios.

A partir del año 1970, la construcción del Oleoducto Transecuatoriano y de la carretera entre Baeza y Lago Agrio facilitó el acceso hasta la ladera oriental del volcán.

El área del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair está ubicada en la vertiente atlántica de la Cordillera Real, en la región nororiental del Ecuador. Con este proyecto se aprovecharán los recursos hidroenergéticos de la cuenca de los ríos Quijos y Coca que pertenecen al curso superior del sistema fluvial Quijos-Coca-Napo-Marañón-Amazonas.

El sitio de cierre seleccionado se encuentra ubicado en un sitio próximo al gran edificio volcánico de El Reventador, inmediatamente aguas abajo de la confluencia de los ríos Quijos y Salado, a partir de la cual el río toma el nombre de Coca.

El esquema general del Proyecto prevé la construcción de una presa derivadora a filo de agua y la excavación de un túnel de 24,9 km para conducir el agua hacia un embalse compensador en el sector del Codo Sinclair, que es como se le denomina a una curva cerrada del río Coca que se encuentra a unos 59,5 km aguas abajo de la zona de cierre. Desde dicho embalse, a través de otro tramo de túnel y una tubería de presión, el agua llegará a una casa de máquinas en subterráneo aprovechando un desnivel de 650 m.

Algunas de estas obras estarán ubicadas en zonas de posible influencia del volcán por lo que, en el ámbito del Estudio de Factibilidad del Proyecto, se ha previsto la realización de investigaciones de campo y análisis de laboratorio tendientes a evaluar la peligrosidad volcánica y su posible impacto sobre el Proyecto.



Pese a ser uno de los volcanes más activos del Ecuador, El Reventador no había sido hasta ahora objeto de estudios sistemáticos y detallados. Descripciones cualitativas de las erupciones más recientes fueron proporcionadas por Hantke y Parodi (1966) y Hall (1977); su última erupción (enero-abril de 1976) es la única descrita con algún grado de detalle.

Los riesgos potenciales relacionados con la actividad del volcán fueron tratados preliminarmente en el informe de Prefactibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca, INECEL 1977, en el mismo que se considera que el más importante está relacionado con los flujos de lodo que podrían afectar a la cuenca del río Malo, la zona del campamento San Rafael y el valle del río Coca, aguas abajo de la cascada. Esta última zona, siempre según el mismo informe, sería también vulnerable a la acción de las coladas de lava.

En los últimos años, los Estudios de Inventario del Recurso Hidroenergético de la cuenca del río Coca y de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair han inducido la necesidad de un conocimiento exhaustivo de la historia evolutiva de El Reventador, junto con una evaluación de los peligros volcánicos relacionados con la actividad de este estrato-volcán, considerado uno de los más activos del Ecuador y del mundo.

En 1986, el personal del Proyecto Geotérmico de INECEL realizó un estudio vulcanológico de El Reventador (Almeida y Cruz, 1986) que modificó profundamente los conceptos que se mantenían sobre la estructura y evolución del volcán. Su principal aporte constituyó el reconocimiento de una gigantesca avalancha de escombros que dejó como huella el anfiteatro existente alrededor del cono actual del volcán, el que anteriormente había sido interpretado como una caldera. En el mismo estudio de Almeida y Cruz, también se indica que los lahares (o flujos de lodo) constituyen el principal riesgo de El Reventador.

En el año de 1986 se celebró un contrato entre el Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) y la Asociación de Firms Consultoras formada por las compañías extranjeras ELECTROCONSULT, TRACTIO-NEL y RODIO y por las nacionales ASTEC, INELIN, INGECONSULT Y CAMINOS Y CANALES, para el estudio de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair, dentro del cual se programaron una serie de trabajos de campo y levantamientos fotogeológicos de todo el sector del volcán y del área influenciada por las obras del Proyecto y los respectivos análisis de laboratorio para el reconocimiento y definición de los principales parámetros químicos y petrográficos necesarios para la evaluación de los peligros relacionados con este volcán.

Estos trabajos comprendieron las siguientes actividades:

- Estudio de la documentación existente;
- Interpretación de fotografías aéreas;



- Trabajos de campo: levantamiento geológico a escala 1:25.000; estudios estratigráficos y tectónicos; muestreo de rocas volcánicas, aguas termales, gases fumarólicos y restos vegetales para efectuar estudios petrográficos, químicos y las dataciones radiométricas correspondientes;
- Trabajos de laboratorio y gabinete: estudios petrográficos en lámina delgada; análisis de los principales minerales por microsonda electrónica; análisis radiométricos (K-Ar y  $^{14}\text{C}$ ); cálculos petrológicos y geoquímicos; estimación de las condiciones de cristalización de los magmas; formulación de un modelo de la alimentación del volcán; digitalización de la topografía del edificio volcánico y simulación mediante un modelo numérico de las erupciones explosivas del volcán.

El día 5 de marzo de 1987, mientras se realizaban estos estudios, un fuerte terremoto sacudió a la región nororiental del Ecuador y particularmente al área del Proyecto, provocando la reactivación de muchos lineamientos tectónicos y la formación de impresionantes fenómenos de deslizamiento en masa, flujos de lodo y aluviones. Los efectos del sismo confirmaron la naturaleza activa de algunas fallas de la zona de El Reventador, que habían sido previamente identificadas como tales con base en los estudios geológicos realizados en la primera etapa de estos estudios de factibilidad.

Dicho evento hizo que algunas de las actividades de investigación del Proyecto tuvieran que ser reprogramadas. Así, por ejemplo, se decidió rediseñar la geometría de la futura red microsísmica y asignar un mayor énfasis a los estudios de neotectónica regional.

En resumen, los objetivos que perseguía el estudio vulcanológico fueron los siguientes:

- Identificar todos los tipos de fenómenos eruptivos que pueden ocurrir en relación con la actividad del volcán El Reventador;
- Proporcionar una evaluación sobre el peligro de cada uno de ellos sobre el Área del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair;
- Sugerir las eventuales medidas a adoptarse para la mitigación de esos peligros, particularmente en cuanto al monitoreo geofísico y geoquímico del volcán.



## 2. MARCO GEOLOGICO REGIONAL

### 2.1 Unidades geológicas principales en el Área del volcán El Reventador

El volcán El Reventador es uno de los centros más internos con respecto al arco magmático ecuatoriano, pues se encuentra emplazado en la zona subandina a corta distancia de la franja de los cabalgamientos de la Cordillera Real. Esto hace que el volcán se encuentre ubicado en una zona geológicamente muy compleja de los Andes del Ecuador, sujeta a grandes movimientos tectónicos compresivos debidos a la convergencia intracontinental entre la cordillera y la plataforma amazónica (Figura 2/1).

A continuación se describen las características de las unidades geológicas regionales presentes en el Área.

#### a. Cordillera Real

Es la más oriental de las dos cadenas que conforman la "sierra" ecuatoriana. Se extiende a lo largo del territorio con una dirección N30°E presentando relieves que comúnmente superan los 4.000 m.

Su prolongación hacia el norte, en territorio colombiano, adopta el nombre de Cordillera Central. Hacia el oeste se encuentra limitada por una serie de relieves volcánicos alineados a lo largo del margen de la Depresión Interandina (Figura 2/1).

En el sector septentrional, donde se encuentra el volcán El Reventador, la Cordillera Real está principalmente constituida por dos grupos de rocas afectadas por diferente grado de metamorfismo.

El grupo Cofanes, que aflora en la parte más oriental de la cadena, inmediatamente al norte de El Reventador, está constituido por migmatitas, ortogneiss y anfibolitas cuarzo-feldespáticas. Esta asociación de alto grado metamórfico indica la superposición de tres fases de deformación con un metamorfismo retrógrado y representa probablemente el núcleo más antiguo de la Cordillera Real, con una edad posiblemente precámbrica. Según Baldock (1982), corresponde a las formaciones precámbricas de la Cordillera Real.

El grupo Ambuquí que aflora en el resto de la cadena, está constituido por rocas con un menor grado de metamorfismo, representadas por esquistos sericiticos ricos en grafito, micaesquistos y prasinitas, cuyas rocas originarias serían, presumiblemente, de edad paleozoica. Según Baldock (1982), corresponde a las formaciones paleozoicas de la Cordillera Real.



b. Zona Subandina

Una franja de relieves que alcanzan hasta los 1.500 m de altura separa las altas elevaciones de la Cordillera Real, de la cuenca amazónica que se desarrolla hacia el este, sobre el escudo Guayanés. Esta franja, afectada por pliegues y fallas inversas, es más evidente en Colombia donde constituye un sistema orogénico autónomo denominado Cordillera Oriental. En el Ecuador se presenta en forma más discontinua y dividida en dos segmentos: el "levantamiento del Napo", al norte, y el "levantamiento de Cutucú", al sur.

En la región del Napo, la serie sedimentaria afectada por el levantamiento subandino, forma el basamento de varios edificios volcánicos, entre los cuales se encuentra El Reventador. En esta secuencia que se extiende entre el Jurásico y el Mioceno medio, se han reconocido seis formaciones que se describen sumariamente a continuación:

- . Formación Misahuallí (Jurásico medio-Cretácico inferior). Está constituida fundamentalmente por vulcanitas, basaltos, traquitas y tobas riolíticas muy alteradas e interestratificadas con delgados horizontes sedimentarios de grano fino. La secuencia alcanza un espesor de 2.000 m y se presenta intensamente tectonizada y, localmente, con indicios de epimetamorfismo.
- . Formación Hollín (Cretácico inferior: Aptiano-Albiano). Es una secuencia de poco espesor (de 100 a 240 m) constituida por areniscas cuarzosas con algunos horizontes arcillosos. Su contacto con la subyacente formación Misahuallí está marcado por una fuerte discordancia angular. La formación Hollín constituye la roca reservorio de los campos petroleros ubicados en el oriente ecuatoriano.
- . Formación Napo (Cretácico: Albiano-Cenoniano). Las rocas de esta formación son las que afloran más extensamente en el área subandina. Se trata de argilitas, areniscas glauconíticas y calcáreas, calizas conchíferas, margas y lutitas silicificadas con un espesor variable entre 300 y 700 m.
- . Formación Tena (Cretácico superior-Paleoceno inferior?). Está constituida por una secuencia de algunos centenares de metros de arcillas con numerosas intercalaciones de areniscas y unos pocos conglomerados de origen continental. El contacto con la formación Napo, subyacente, está marcado por un hiato o discordancia sedimentaria.

Por encima de la formación Tena y separadas por otras tantas discordancias, se encuentran dos formaciones de origen continental. La formación Tiyuyacu está constituida por conglomerados, areniscas y argilitas, en tanto que en la suprayacente y, en parte, heterópica formación Chalcaná predominan las argilitas con intercalaciones eva-



poríticas. Estas unidades estratigráficas se encuentran ampliamente detalladas en el informe geológico del Proyecto Coca-Codo Sinclair, INECOL, 1983.

#### c. Rocas Plutónicas

Algunos cuerpos intrusivos de gran tamaño, alargados en sentido NNE-SSW, ocupan parte de la zona subandina occidental a lo largo del contacto tectónico con la Cordillera Real (Figura 2/1).

El batolito de Abitagua se extiende por alrededor de 120 km desde Mera hasta el valle del río Quijos, estando cubierto a la altura del volcán Sumaco. Se trata de un cuerpo granítico-granodiorítico de edad jurásica, 160 M.a (Aspden et al, 1991) que estaría relacionado con las volcanitas de la formación Misahuallí.

Al NNE de El Reventador, ya en territorio colombiano, se extiende el batolito de La Cuchilla que está compuesto, al menos en parte, por granito rosado. Su edad sería también jurásica.

### 2.2 Tectónica

La tectónica de la Cordillera Real y de la Zona Subandina no ha sido, hasta ahora, estudiada en detalle. Se caracteriza por un complejo conjunto de lineamientos que han actuado en diversas fases tectónicas.

En la bibliografía no existen datos estructurales relativos a la parte septentrional de la Cordillera Real que, sin embargo, demuestra haber sido afectada por más de una fase de deformación y metamorfismo anteriores a la orogénesis andina.

El contacto entre la Cordillera Real y la Zona Subandina se resuelve mediante una serie de cabalgamientos de alto ángulo inclinados hacia el WNW. Al sur de El Reventador estas estructuras se desarrollan a lo largo del valle del río Quijos con una dirección NNE; en cambio, en la región del volcán sufren una torsión hacia el N dispersándose en parte para reaparecer más al norte con la orientación precedente N 30°E.

Algunos autores (Lonsdale y Klitgord, 1978; Fennington, 1981) sugieren que estos lineamientos presentan actualmente una componente transcurrente dextral y, de esta forma, constituyen el límite oriental de una microplaca andina que se extendería en el Ecuador y Colombia entre la fosa oceánica y el continente sudamericano.

La zona Subandina constituye una franja afectada por pliegues y sobrecorrimientos de retroarco ("fold thrust belt") en la que, la serie de cobertura del escudo guayanés se ha desprendido formando escamas por efectos del empuje andino.



Este modelo teórico encuentra su mejor ejemplificación en el Perú y, sobre todo, en Colombia, mientras que en el Ecuador la situación resulta bastante más compleja.

El "levantamiento del Napo" consiste principalmente en un gran anticlinorio de eje paralelo a la Cordillera Real que se encuentra limitada, hacia el oeste, por los cabalgamientos andinos, mientras que por el este se enlaza con la cuenca amazónica mediante diversos tipos de estructuras: de sur a norte se observa primero un cabalgamiento, después una flexión y, finalmente, una serie de fallas inversas.

### 2.3 Reconstrucción paleogeográfica y geodinámica

Se conoce muy poco sobre la paleogeografía pre-mesozoica del área estudiada, ya que no existen afloramientos de rocas paleozoicas no metamorfizadas.

En el Paleozoico, esta región constituía el margen del cratón brasileño-guayanés que, hacia el oeste, dejaba espacio para una depresión en la que se depositaron los sedimentos de agua profunda que actualmente forman las rocas metamórficas de la Cordillera Real. La discordancia entre las formaciones paleozoicas no metamórficas, que se observa al sur de la región del Cutucú, revela la existencia de fases tectónicas (hercínicas?) que estuvieron activas durante el Paleozoico superior (Faucher y Savoyat, 1973).

A partir de esta época, la Cordillera Real ha permanecido como un eje positivo que, durante todo el Mesozoico, constituyó una dorsal sumergida que llegó a emerger apenas en el Maestrichtiano.

Mientras tanto, en la cuenca que se encontraba ubicada más al oriente, y durante el Jurásico, tenía lugar un importante episodio magmático que produjo las vulcanitas de la formación Misahuallí y los batolitos de Abitagua y La Cuchilla. La discordancia angular entre las formaciones Misahuallí y Hollín, indica la presencia de una primera fase tectónica durante el Cretácico inferior. Se considera además que la formación Hollín es el producto de una sedimentación terrígena proveniente del NE, o sea del escudo guayanés que en dicha época debía estar sujeto a erosión por encontrarse en una posición más elevada que la actual.

Posteriormente, la cuenca marginal oriental presentó una tendencia a profundizarse y a acentuar su grado de aislamiento, tal como lo indican las facies claramente marinas y, a veces, euxínicas de la formación Napo. Hacia fines del Cretácico, el mar comenzó a retirarse, mientras que la sedimentación se hizo más terrígena, tal como lo evidencian las "capas rojas" de la formación Tena y de las formaciones posteriores.

Varias fases tectónicas se han sucedido durante el Paleógeno hasta producir el definitivo levantamiento de la Cordillera Real y el



retiro del mar de la cuenca oriental que todavía permanecía como el escenario de una sedimentación de tipo continental (formaciones Tiyuyacu y Chalcana).

En el Mio-Plioceno se presentó una ulterior fase compresiva que originó el levantamiento de la zona subandina. Las series mesozoicas depositadas sobre el basamento cratónico guayanés se despegaron y plegaron, mientras el empuje hacia el este produjo el sobrecorrimiento de la Cordillera Real sobre aquellas para formar los principales cabalgamientos andinos. La fuerte tectónica compresiva del Terciario inferior podría correlacionarse con la contemporánea acreción del arco insular Macuchi a lo largo del margen Pacífico, lo que actualmente forma la Cordillera Occidental.

Recientes investigaciones paleo-magnéticas efectuadas sobre estos terrenos (Roperch et al, 1987) han confirmado la naturaleza alóctona de este microbloque crustal que se soldó al continente durante el Terciario, por efecto de la permanente subducción hacia el este de la placa de Nazca.

Los movimientos compresivos continuaron desarrollándose durante el Cuaternario sobre todo dentro de la Zona Subandina, donde muchos lineamientos tectónicos frágiles pueden considerarse todavía activos.

Estos fenómenos estuvieron acompañados por el desarrollo de una amplia e intensa actividad volcánica que, durante el Terciario y el Cuaternario, originaron el arco magmático ecuatoriano (Barberi et al, 1987).

Importantes variaciones en las características de la litosfera oceánica subducida ejercitaron un fuerte control sobre el marco estructural de la placa sobrecorrida y sobre la distribución espacio-temporal del volcanismo.

Las reconstrucciones cinemáticas de las placas en convergencia (Pilger, 1984) indican que hace 9 millones de años se inició la subducción de la corteza oceánica generada en el centro de expansión Galápagos. La naturaleza de esta corteza, de espesores relativamente fuertes y de baja densidad, produjo importantes variaciones en el sistema convergente. Dichas variaciones se manifestaron con la migración, hacia el oriente, del frente volcánico activo.

En épocas más recientes, probablemente en el Mioceno superior, penetró en la zona de subducción la Dorsal de Carnegie que presenta una corteza oceánica todavía más potente y muy accidentada.

La deshidratación de este material que ocurre en profundidad a lo largo de una franja relativamente extensa, provoca la ampliación en sentido transversal de la zona volcánica activa.

En el transcurso de esta fase tectónica, en la que continúa actuando un régimen compresivo, se verificaron algunos efectos disten-



sivos locales sobre a Depresión Interandina y la Zona Subandina, en la que se observa el ascenso de magmas en posiciones muy internas coincidentes con las del edificio de El Reventador (Cerro Negro, Pan de Azúcar y Sumaco).



### 3. ZONACION ESTRUCTURAL DEL AREA ESTUDIADA

Dentro de la mayor parte de los sistemas de subducción cordillerana es posible determinar una zona secundaria de compresión caracterizada por la presencia de pliegues y sobrecorrimientos ("back arc fold-thrust belt") que se inclinan hacia el continente (Dickinson, 1977). Esta zona se enlaza con el cratón continental ("back-arc basin") a través de una franja en la que predominan las deformaciones dúctiles y que también presenta algunas fallas inversas y sobrecorrimientos.

La anterior subdivisión se la ha aplicado, en el caso ecuatoriano, para la zona de transición entre la Cordillera Real y el Escudo Guayanés (Lonsdale, 1978; Suárez et al, 1983), a pesar de que, por lo menos en el área estudiada, se ha determinado una situación bastante más compleja.

El estudio fotogeológico de esta área se lo efectuó a través de la interpretación de las fotografías aéreas en escala 1:30.000 y 1:60.000, de imágenes radar a escala 1:90.000, y de imágenes Landsat MSS 1:1'000.000 en la Banda 7. La mayor parte de los datos fueron verificados mediante observaciones directas sobre el terreno.

En general, el área circundante al volcán, comprendida entre las latitudes 0°07'N-0° 15'S y las longitudes 77°52'W-77°22'W, indica un predominio de las deformaciones del tipo frágil.

Los pliegues están limitados a las rocas mesozoicas, al NW del volcán y al NE del río Dué, sobre las cuales también se manifiestan densos sistemas de fallas y fracturas que se incrementan en el área de El Reventador.

Al sur-este del volcán se extiende una vasta área en la que predominan las deformaciones distensivas a través de sistemas orientados predominantemente en dirección SW-NE. Concordantemente con lo anterior, se han individualizado las siguientes zonas estructurales relacionadas con el tipo predominante de deformación (Figuras 3/1 y 3/2):

#### a. Zona de los cabalgamientos

Está constituida por el núcleo cristalino precámbrico y paleozoico de la Cordillera Real y limitada, al este, por el frente principal de los cabalgamientos andinos que la pone en contacto con las formaciones dinamometamórficas mesozoicas.



b. Zona de escamas

Tiene una forma alargada en sentido NNE-SSW y se halla limitada, al oeste, por el frente principal de los cabalgamientos andinos y, al este, por el cabalgamiento más oriental denominado cabalgamiento del Reventador. El volcán El Reventador está ubicado sobre el límite oriental de esta zona, en coincidencia con un marcado alineamiento de fallas distensivas.

c. Zona del Reventador

Tiene la forma de una franja alargada en dirección NE que se acuña al norte el volcán. Su límite occidental está definido por el cabalgamiento del Reventador que también limita a la zona sujeta a dinamometamorfismo. En esta zona están presentes todavía las deformaciones compresivas de cierta intensidad, evidenciadas por fallas inversas hasta de bajo ángulo, mientras no se observan fallas transcurrentes de importancia. Las fallas tienen predominantemente direcciones N45°E, S45°E y N30°E.

d. Zona del río Dué Grande

Está limitada al SE por el lineamiento del río Coca y, al oeste, por el cabalgamiento del Reventador. Como su principal característica se destaca una inmersión hacia el NE del monoclin al regional que, al norte del pueblo El Reventador, presenta un abombamiento local debido a la intrusión de un cuerpo plutónico terciario. El monoclin al está interrumpido por una flexura NS y un pequeño escalón N45°E, en su parte más septentrional. Las principales fallas tienen una dirección similar a la de esta estructura. También está presente una importante falla distensiva, de dirección S45°E, a la altura del curso inferior del río Dué Grande.

e. Zona del Codo Sinclair

Tiene una forma triangular limitada al norte por el cauce del río Coca, y al este, por la flexura de la zona de fracturas del Codo Sinclair. El marco estructural está determinado por la inmersión hacia el ENE del monoclin al regional, que también aquí se interrumpe por anomalías locales relacionadas con los intrusivos terciarios. Exceptuando las estructuras presentes dentro de sus límites, la zona se caracteriza por la ausencia de vistosos fenómenos de deformación. En su interior parece estar afectada únicamente por fallas verticales de dirección N65°E, N-S y N40°E.

f. Zona del Cerro Negro

Constituye la parte meridional de la faja subandina, dentro de la región del estudio y se presenta relativamente tranquila. El monoclin al regional se inclina hacia el este sin presentar accidentes de importancia. En superficie se observan solo algunas fallas, aparentemente subverticales, de dirección S60°E que constituyen una prolon-



gación del lineamiento del Salado y, en mucha menor proporción, fallas orientadas N45°E.

g. Zona de Lumbaqui

Está formada por la franja N-S más oriental del levantamiento del Napo, comprendida entre la flexura marginal al este y la flexura de la zona de fracturas del Codo Sinclair, al oeste. La primera aparece, en algunos puntos, afectada por fallas transcurrentes de separación y por pliegues menores. Aparte de los accidentes que la limitan, esta zona no presenta estructuras destacables. El monoclinal regional se inclina suavemente hacia el este.



#### 4. GEOLOGIA DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR

La serie del complejo volcánico El Reventador que recubre a las formaciones mesozoicas de la región del Napo, está constituida por una secuencia de productos efusivos y explosivos que alcanzan un espesor de alrededor de 1.000 m.

Dentro de ella se han podido distinguir tres grandes unidades correspondientes a otros tantos edificios volcánicos que representan las principales etapas de evolución del complejo volcánico El Reventador (Figura 4/1 y Planos 0209-G-2500 a 2503):

- El Complejo Volcánico Basal (CVB)
- El Volcán Paleoreventador (VPR)
- El Volcán El Reventador (VER), o cono actual

##### 4.1 Los edificios volcánicos

###### a. Complejo Volcánico Basal (CVB)

Aflora esencialmente en la parte occidental y septentrional del actual sistema eruptivo y está limitado, al este, por un gran lineamiento tectónico constituido por tres fallas arqueadas alineadas en dirección N-S.

Sus productos están constituidos por ignimbritas, lavas e intercalaciones de brechas volcánicas primarias y retrabajadas. Las ignimbritas se encuentran sobre todo en la parte basal de la secuencia donde se han reconocido cuatro unidades de flujo con intercalaciones menores de "surge" y piroclásticos de caída.

La disposición general que presentan los productos del CVB sugiere que estos fueron emitidos por un centro eruptivo ubicado cerca del actual conducto del volcán. En la parte centromeridional y oriental, el CVB se observan porciones aisladas con importantes dislocaciones tectónicas (Figuras 4/2 y 4/3).

En conjunto, la disposición general del CVB sugiere que lo que actualmente se observa son las porciones relictas de un gran estratovolcán cuyo volumen se lo estima en alrededor de 100 km<sup>3</sup>.

A este también se agregan varios centros dómicos algunos de los cuales todavía presentan bien conservada su típica morfología, sobre todo en el sector de la ladera septentrional del volcán donde los productos lávicos evidencian una composición predominantemente dacítica.



Si se considera que también en la ladera meridional se encuentran este tipo de lavas, se podría concluir que los magmas diferenciados estuvieron bastante difundidos durante la actividad inicial del CVR, aunque sus centros de emisión no resulten siempre reconocibles en la actualidad.

Al SE del cono actual se encuentra el cerro el Copete que se presenta como una masa lávica compacta, de apariencia dómica, pero con una composición menos evolucionada respecto a la de los centros dómicos antes mencionados. En tal virtud, el Copete representa probablemente el estancamiento de una masa magmática de composición andesítica en la porción cortical del CVR, descubierta por efecto de la erosión.

En la ladera septentrional, los aparatos dómicos de los cerros Líder y Mirador, por su morfología mejor conservada, parecen atribuíbles a una fase magmática tardía del CVR.

Una importante porción del edificio volcánico del CVR se la encuentra actualmente formando un gigantesco depósito de avalancha de escombros originado por el colapso que afectó a los sectores oriental y central del antiguo volcán.

El volumen de los materiales derrumbados puede estimársele en alrededor de 20 km<sup>3</sup>, considerando la parte que se encuentra todavía en el sitio y lo que habría sido arrastrada por la erosión del río Coca (Figura 4/1). Es todavía reconocible el contacto inferior de esta avalancha que forma una paleosuperficie ubicada aproximadamente en la cota 1.600 m, sobre los sedimentos cretácicos, la misma que, al momento del colapso, tenía una elevación muy próxima a la del paleo-cauce del río Coca. Se ha observado que la distancia máxima recorrida por esta enorme avalancha, a partir del cráter del CVR, es de unos 30 km, a lo largo del valle del río Due, según lo confirman los depósitos que existen cerca de la población de Lumbaqui (PETROTRANSPORTE, Universidad Central, 1991).

#### b. Volcán Paleoreventador (VPR)

Los productos del Complejo Volcánico Basal, fuertemente desmembrados y erosionados, están cubiertos por una secuencia mixta de productos explosivos y efusivos cuya zona de emisión estuvo más o menos coincidente con el cono actual del volcán.

La distribución areal de los productos de este centro, denominado Volcán Paleoreventador (VPR), está fuertemente condicionada por la morfología anómala del substrato, modelada por la tectónica precedente. Esto determinó la construcción de un estrato-volcán fuertemente asimétrico y alargado en dirección N-S y NE-SW, según las directrices tectónicas predominantes.



La actividad del VPR está caracterizada por una compleja alternancia de productos lávicos y piroclásticos, estos últimos a menudo retrabajados (Figuras 4/2 y 4/3).

A partir de los cortes estudiados en el borde del anfiteatro ha sido factible definir esquemáticamente una subdivisión aproximada de la serie del VPR.

En la parte más antigua del cono, que aflora en la base de la pared norte del anfiteatro, se han reconocido productos lávicos de composición básica, principalmente basaltos y andesitas basálticas.

Ascendiendo hacia las partes más altas del anfiteatro afloran productos lávicos con un quimismo andesítico y una oscilación composicional variable entre andesitas basálticas y andesitas. Intercalados con las lavas andesíticas se encuentran niveles piroclásticos, principalmente de caída y, en menor proporción, de flujo.

La más importante secuencia de productos explosivos aflora en la sección más occidental del anfiteatro y en ella pueden reconocerse dos fases de actividad separadas por un paleosuelo. La primera fase está representada principalmente por productos de caída con pequeños fragmentos de pómez y lapilli de color claro. La segunda se caracteriza por un depósito localmente muy potente, hasta 20 m, formado por niveles de pómez de caída del tipo pliniano, que posteriormente pasan a flujos piroclásticos. Ambos depósitos se encuentran dispersos hasta una distancia de alrededor de 20 km desde el cráter actual, hacia el este, sureste y suroeste.

La aparente inexistencia de estos productos en los sectores septentrionales del volcán podría relacionarse con la natural dispersión en forma no radial; o, más bien, con la erosión y/o la dificultad de acumularse sobre las fuertes pendientes del edificio.

Una erupción de este tipo implicaría la existencia de una cámara magmática de tamaño relativamente grande, cuyo volumen estaría comprendido entre 1 y 4 km<sup>3</sup>.

Fuera del anfiteatro afloran las lavas con las que, presumiblemente, concluyó la actividad del VPR. Estas presentan una composición basáltica que corresponde a la menos evolucionada del volcán; afloran directamente por debajo de los depósitos de la avalancha de escombros, o bien en el sector meridional del volcán donde han confluído las coladas más recientes.

Entre los productos del VPR aparece una masa lávica, en forma de domo, el domo Cuchilla, con una composición andesítica alta en sílice, que aflora en el borde occidental del anfiteatro dentro de la secuencia de los productos más superficiales del volcán.



El edificio del VPR fue destruido por fenómenos de colapso y deslizamiento en masa. La forma lobulada de la depresión actualmente visible indica que el edificio fue afectado por:

- Un colapso debido, probablemente, al vaciado de la cámara magmática como resultado de una violenta erupción piroclástica evidenciada por los depósitos pumíticos antes descritos.
- Una gigantesca avalancha de escombros que afectó a la vertiente oriental del cono.

No obstante, una de las principales causas de inestabilidad habría sido la acelerada erosión del río Coca actuando en la base del edificio.

El frente de la avalancha rebasó el cauce del río y ascendió por la ladera opuesta hasta recubrir, en parte, al depósito de la avalancha de escombros del CVR.

En los depósitos de la avalancha de escombros del VPR se reconocen diversas facies:

- En la parte basal se encuentran elementos lávicos muy deformados y fracturados según una dirección que se orienta a lo largo del plano del movimiento.
- En la parte media y superior se encuentran bloques decamétricos muy fracturados y englobados en una matriz limo-arcillosa.

Existen también zonas en las cuales los bloques se vuelven más escasos presentándose redondeados o subredondeados. Además, en algunas zonas, la avalancha parece haber incorporado grandes bloques pertenecientes al depósito de la avalancha precedente.

La parte terminal del anfiteatro se caracteriza por la presencia de una contrapendiente morfológica formada por los depósitos de avalancha que han obstruido en parte la depresión en la que se levantó el cono actual de El Reventador. Más tarde, esta depresión fue abierta por efecto de la acción erosiva de los ríos Reventador, Engaño y Marker.

c. Volcán El Reventador, cono actual (VER)

Está constituido por un cono regular con una altura de 3.562 m y un volumen total estimado de unos 5 km<sup>3</sup> (Figura 4/2 y 4/3).

El volcán ha generado numerosas coladas de lava, principalmente en bloques, que se han acumulado dentro de la depresión originada por la antigua avalancha. Consecuentemente, la morfología general del edificio resulta asimétrica, pues el lado oriental es el más desarrollado.



En la cima se encuentran dos cráteres de los cuales permanece activo el más oriental. Dentro del mismo cráter oriental se observan evidencias de una ulterior migración hacia el este. El diámetro del cráter activo mide cerca de 100 m y su fondo, situado a una profundidad de 40 m desde el borde, presenta varios cráteres de explosión freática.

El cono actual del VER se ha formado por una actividad moderadamente explosiva, clasificada como estromboliana con base en las observaciones de su última erupción ocurrida entre abril y mayo de 1976 (Hall, 1977).

Entre los productos emitidos predominan las coladas de andesitas basálticas con algunas brechas y depósitos laharíticos. Todos estos productos permanecen dentro del anfiteatro y, por lo tanto, nunca han alcanzado el cauce del río Coca.

En cambio, los productos piroclásticos se han distribuido sobre una extensa área ubicada principalmente al oeste del cono, según la dirección con la que soplan los vientos dominantes. La mitad superior del cono se encontraba, hasta antes del sismo del 5 de marzo de 1987, completamente cubierta por productos piroclásticos.

Por el contrario, las coladas lávicas se extienden hacia el este en la parte plana del anfiteatro, donde tienden a confluir y acumularse formando campos de lava.

#### 4.2 Las avalanchas de escombros

Tal como se ha mencionado, durante la historia evolutiva del complejo volcánico El Reventador ocurrieron dos enormes avalanchas que provocaron la destrucción de los respectivos edificios volcánicos.

El volumen total del material derrumbado se lo ha estimado en unos 28 km<sup>3</sup>.

Los dos eventos en mención estuvieron separados por un importante lapso caracterizado por el desarrollo de una fase tectónica compresiva y por grandes variaciones estructurales, morfológicas y topográficas. Es importante señalar que entre las dos avalanchas existen notable diferencias en cuanto a su volumen, composición y, desde luego, a su mecanismo desencadenante.

En forma esquemática, las principales diferencias reconocidas son las siguientes:

- El volumen de la avalancha del Complejo Volcánico Basal, denominada A-1, es de unos 20 km<sup>3</sup>, mientras el de la avalancha del Volcán Paleoreventador, denominada A-2, es de 8 km<sup>3</sup>, aproximadamente.



- La avalancha A-1 ocurrió cuando el cauce del río Coca se encontraba en una fase de madurez formando meandros poco profundos alrededor de la cota 1.600 m. Dicho cauce se encontraba, además, ubicado 2 km más cerca del volcán respecto a su posición actual.
- La avalancha A-2 se produjo después de que el cauce del río Coca se había profundizado unos 500 m desarrollando varios meandros encajonados que, posteriormente, fueron rectificadas por una sucesiva fase de rejuvenecimiento del sistema erosivo.
- La avalancha A-1 ocurrió durante la fase tectónica compresiva antes mencionada, mientras que la A-2 se produjo al final de la misma.
- La avalancha A-1 se caracteriza por presentar una textura cáctica, pero con una variación relativamente baja en cuanto al tamaño de los bloques y por una distribución homogénea de los mismos en la matriz areno-limosa. Por el contrario, la avalancha A-2 presenta bloques de dimensiones muy variables incluidos en una matriz muy heterogénea. Esta avalancha incluye también megabloques en algunos de los cuales se observan relativamente bien conservadas a las estructuras primarias. La estructura basal de la avalancha A-2 presenta intensas iso-orientaciones en flamas de los bloques microfracturados, frecuentemente fumarolizados.
- La avalancha A-1 no parece estar relacionada con cambios notables en la actividad volcánica del CVB, mientras la avalancha A-2 estuvo seguramente acompañada por importantes episodios explosivos que originaron productos de caída y de flujo piroclástico y, probablemente, un colapso caldérico que se evidencia en la zona circular ubicada en el extremo occidental del anfiteatro.
- Las observaciones expuestas inducen a plantear la hipótesis que las dos avalanchas ocurrieron dentro de un marco distinto; la A-1 parece ser una avalancha fría, de origen sismotectónico, mientras que la A-2 se caracteriza por la importante contribución de una actividad volcánica explosiva al momento de iniciarse el fenómeno.

Cabe remarcar también que la avalancha A-1 se produjo en presencia de las condiciones típicas que caracterizan a las avalanchas causadas por terremotos (Keefer, 1984); es decir:

- . Laderas con un ángulo de inclinación superior a 25° y un desnivel mayor que 150 m.
- . Erosión fluvial al pie de las laderas volcánicas.
- . Presencia de rocas heterogéneas e intensamente fracturadas.

Para la avalancha A-2, aparte de estar presentes las mismas condiciones de inestabilidad geológica que caracterizan a la A-1, se han



reconocido evidencias, al inicio del fenómeno, de una importante fase volcánica explosiva que, muy probablemente, estuvo acompañada por un colapso tectónico y una crisis sísmica.

En fin, es importante señalar que toda la actividad del complejo volcánico El Reventador, incluyendo las dos avalanchas, estuvo controlada por la presencia de la falla de El Reventador, de rumbo NNE-SSW, que separa las escamas de las rocas mesozoicas metamorfidadas, al oeste, de los pliegues que afectan a las rocas mesozoicas no metamorfidadas, al este.

#### 4.3 Dataciones absolutas

Con el propósito de adquirir datos cuantitativos sobre la edad de los principales periodos de actividad del complejo volcánico El Reventador, se seleccionaron algunas muestras de roca para efectuar dataciones radiométricas K/Ar.

Fueron también analizadas, a través del método  $^{14}\text{C}$ , algunos restos vegetales encontrados en los horizontes sedimentarios intercalados en los depósitos piroclásticos y en los sedimentos del lago que se formó después de la avalancha del Volcán Paleoreventador.

##### a. Determinaciones radiométricas K/Ar

Las determinaciones K/Ar se efectuaron sobre tres muestras de andesita y andesita basáltica del Complejo Volcánico Basal y sobre una muestra de basalto del Volcán Paleoreventador, cuya ubicación se indica en los Planos 0209-G-2507 a 2508.

La selección de las muestras se la hizo considerando su posición estratigráfica, asignando una particular atención a las muestras representativas de los niveles más bajos de la serie, en las cuales se consideraba más probable obtener resultados confiables. En efecto, la edad relativamente joven del complejo volcánico de El Reventador hacía presumir, desde el inicio, que habrían dificultades en cuanto a las determinaciones de su edad absoluta, tal como comúnmente ocurre en el caso de las vulcanitas recientes.

Las dataciones sobre plagioclasas se efectuaron en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Berna, Suiza. La determinación del Ar sobre muestras jóvenes se realizan normalmente después de un ataque con HF para eliminar al máximo el Ar atmosférico absorbido en la parte externa de la fase a analizarse. Las muestras fueron ensayadas siempre por duplicado para poder realizar determinaciones también sobre las muestras no atacadas con HF.

Los resultados de las dataciones radiométricas K/Ar que se presentan en el Cuadro 4/1, indican lo siguiente:

- Los bajos tenores de Ar radiogénico producen errores analíticos muy altos.



CUADRO 4/1

## RESULTADOS DE LAS DETERMINACIONES RADIOMETRICAS K/Ar

Tipo de roca	Unidad vulcanológica	K (%)	40 Ar rad ccm/g STP <sub>w</sub> 10 <sup>-6</sup>	40 Ar rad (%)	Edad (Mu)
Andesita (A)	CVB	0,34	-0,0045	-2,75	-0,340796 ± 0,29
Andesita (B)	CVB	0,34	0,00011	0,04	0,867850 ± 0,26
Andesita (A)	CVB	0,33	0,0041	2,31	0,318686 ± 0,25
Andesita (B)	CVB	0,33	0,0049	3,18	0,378356 ± 0,65
Andesita basáltica (A)	CVB	0,14	0,0029	0,58	0,531842 ± 0,77
Andesita basáltica (B)	CVB	0,14	-0,00068	-0,13	-0,125401 ± 0,95
Basalto (A) (100-160 mesh)	VPR	0,16	0,012	4,39	1,89837 ± 0,82
Basalto (B) (100-160 mesh)	VPR	0,16	0,0046	0,86	0,736691 ± 0,62
Basalto (A) (160-300 mesh)	VPR	0,22	0,069	23,53	8,10315 ± 0,56
Basalto (B) (160-300 mesh)	VPR	0,22	0,092	14,57	10,7126 ± 0,51

(A) = muestra original

(B) = muestra atacada con HF

Ma = millones de años



- Existe una general incongruencia entre las determinaciones efectuadas sobre muestras tratadas y no tratadas. Sólo en el caso de una muestra de andesita del CVB se observa una buena concordancia entre las dos determinaciones (319.000 y 378.000 años).
- En su conjunto los datos aparecen geológicamente incongruentes y, por lo tanto, permiten deducir la presencia de Ar atmosférico en exceso, lo que constituye un fenómeno frecuente en las lavas jóvenes.

Con el propósito de verificar esta última condición se han efectuado dos determinaciones sobre las plagioclasas de una muestra de basalto del VFR, utilizando características granulométricas distintas: 100-160 mesh y 160-300 mesh, respectivamente.

Los resultados aparecen totalmente contradictorios; en efecto, la edad aparente varía entre 10,7 y 0,7 millones de años. También dentro de cada fracción individual se presentan fuertes diferencias en la edad aparente. Esta prueba indica, con seguridad, que la muestra ha estado afectada por un exceso de Ar radiogénico que ha penetrado al interior de la fase analizada.

Las determinaciones radiométricas sobre distintas granulometrías corresponden, de hecho, a relaciones muy variables entre mineral contaminado por exceso de Ar y mineral no contaminado, que reflejan los diferentes valores de edad aparente encontrados.

En conclusión, podría afirmarse que las determinaciones efectuadas indican la presencia un exceso de Ar radiogénico que hace inutilizables a los resultados obtenidos. Además, se debe mencionar que únicamente una muestra de andesita del CVB indica dos valores de edad aparente concordantes dentro de los límites del error analítico. Esto hace que se le considere aceptable a dicha determinación y, por lo tanto, utilizable para interpretar la evolución geológica del volcán.

La edad de esta roca (alrededor de 350.000 años) que corresponde a los niveles más antiguos del CVB, próximos al basamento mesozoico, aflorantes en el valle del río Dué Grande, parece ser coherente con las observaciones geológicas de campo efectuadas en el mismo sector.

#### b. Determinaciones radiométricas $^{14}\text{C}$

Con el objeto de datar con este método las principales etapas evolutivas de las unidades que constituyen el complejo volcánico El Reventador, se recolectaron varias muestras de madera y paleosuelos incluidas en diferentes niveles estratigráficos (Planos 0209-G-2507 y 2508).



De entre ellas se analizaron ocho muestras, consideradas las más representativas y adecuadas para este tipo de determinación, en el Laboratorio de Química Isotópica de la Universidad de París, Francia.

La ubicación, posición estratigráfica y resultados relativos a cada una de las muestras estudiadas se presentan en el Cuadro 4/2.

La muestra 14C-1 es un trozo de madera que estuvo incluido en los depósitos de la avalancha de escombros del VPR. Su edad es congruente con la de 20.000 años determinada en el curso de los estudios anteriores de factibilidad del Aprovechamiento Salado (1978).

La muestra 14C-2 es un trozo de madera que estuvo incluido en la avalancha de escombros del VPR. Su edad (600 años) es inconsistente con su posición estratigráfica. Esta inconsistencia se debe, probablemente, al hecho que la muestra se la tomó en una porción recién derrumbada de la avalancha, y por lo tanto, pudo haberse mezclado con material orgánico más reciente.

La muestra 14C-6 es un trozo de madera carbonizada cuya posición estratigráfica resulta dudosa, pues no se ha podido determinar si es anterior o posterior a la avalancha del VPR. La edad relativamente reciente (8.500 años) haría disminuir la validez de la segunda posibilidad.

Las muestras 14C-17 y 18 son trozos de madera encontrados en los limos areno-arcillosos depositados en el lago formado por la avalancha de escombros del VPR. Las edades respectivas (500 y 4.000 años) son inconsistentes debido a probables contaminaciones.

La muestra 14C-19 es un trozo de madera encontrado en los depósitos piroclásticos del VPR. Su edad (19.500 años) es congruente con la edad relativa a la actividad del VPR y a su posterior colapso.

Las muestras 14C-20 y 21 son trozos de madera que se encontraron en los lahares y en los depósitos de la avalancha de escombros del CVR. Las edades respectivas (mayores de 30.000 años), que resultan ser las más antiguas determinadas en el curso de los estudios, pueden ser consideradas congruentes para la definición de la historia evolutiva de los edificios que constituyen el complejo volcánico El Reventador.

Se debe mencionar que todas las muestras datadas estuvieron incluidas en depósitos muy permeables y, por lo tanto, expuestas a la acción persistente del agua meteórica. Por estas razones los datos obtenidos deben ser tomados con cierta cautela.



CUADRO 4/2

## RESULTADOS DE LAS DETERMINACIONES RADIOMETRICAS 14C

Muestra N°	Tipo de muestra	Ubicación	Posición estratigráfica	Actividad 14C (%)	Edad BP (años)
C14-1	Madera	Sector Manuel Galindo, margen izquierda del río Coca	Avalancha de escombros A-2	9,7 ± 0,6	18.875 ± 460
C14-2	Madera	Cascada S. Rafael, margen derecha	Avalancha de escombros A-2	92,8 ± 0,6	600 ± 60
C14-6	Carbón	Cerro Copete	Parte superior del VPR o actividad posterior a la avalancha de escombros A-2	34,7 ± 0,4	8.500 ± 90
C14-17	Madera	Sector Manuel Galindo, margen izquierda del río Coca	Limo del lago formado por la avalancha de escombros A-2	93,9 ± 2,1	500 ± 180
C14-18	Madera	Sitio Salado, margen izquierda	Limos fluvio-lacustres	60,8 ± 1,0	4.000 ± 140
C14-19	Madera	Ladera septentrional, río Dantas	Depósitos piroclásticos del VPR	8,8 ± 0,3	19.500 ± 240
C14-20	Madera	Ladera occidental, cabecera del río Malo	Lahares del CVB	-	> 30.000
C14-21	Madera	Río Duó, zona del cerro Uder	Avalancha de escombros A-1	-	> 30.000

BP: Antes del presente



## 5. TECTONICA LOCAL

El complejo volcánico El Reventador está caracterizado, en su conjunto, por una intensa fracturación que refleja una notable y persistente actividad tectónica.

Con base en la geometría y distribución de las fallas y fracturas en las tres unidades del complejo volcánico, a continuación se presenta una reconstrucción de los principales eventos tectónicos (Planos 0209-G-2500 a 2503 y Plano 0209-G-2504).

### a. Complejo Volcánico Basal (CVR)

El Complejo Volcánico Basal está cortado por varios sistemas de deformación frágil originados por la superposición de varios eventos tectónicos. El sector nororiental del CVR se encuentra afectado por un enjambre de fallas NE-SW paralelas al valle del río Coca que, en los alrededores del cerro Mirador, aparecen cortando las lavas y, en la zona del río Azuela, los depósitos de avalancha de escombros. En esta zona la familia de fallas de rumbo NE-SW intercepta a otra de rumbo N-S.

El sector noroccidental del CVR está afectado por una estrecha red de fallas con rumbos NNE-SSW, WSW-ENE, N-S y NW-SE, en orden de desarrollo lineal. Además, en este sector, el CVR está atravesado en sentido N-S, por un alineamiento de fallas listricas cóncavas hacia el este. El segmento central de este sistema, situado 1,5 km al oeste del actual centro eruptivo de El Reventador, representa también la superficie de desprendimiento del derrumbe que ha movilizado, hacia el oriente, una gran parte de este antiguo centro eruptivo.

El sector meridional del CVR está cortado por fallas con rumbo NNE-SSW, NE-SW y NW-SE y se caracteriza por la presencia de altos y bajos estructurales que se encuentran limitados por las fallas NNE-SSW y NE-SW.

A causa de un importante episodio tectónico, las lavas más antiguas y el basamento mesozoico se han fracturado en bloques creando un marco morfológico para el sucesivo control que ejercitaron sobre la distribución espacial de las lavas del Volcán Paleoreventador.

Con base en la presencia de relictos de corrientes fluviales en cotas superiores a la 1.600 m, observados en la zona comprendida entre los ríos Malo y Azuela, se supone que un paleo-río Coca fluía más al NW del cauce actual. Esta suposición, explicaría también el hecho que el plano de deslizamiento frontal de la avalancha del CVR,



todavía visible, esté situado alrededor de la cota 1.600 m y que la masa de escombros, movilizándose sobre el basamento sedimentario, haya alcanzado la zona del río Isango ubicado a unos 10 km al SE del río Coca.

Los eventos tectónicos gravitacionales que afectaron al CVR, estuvieron inmediatamente seguidos por una migración hacia el SE del curso del río Coca y por una rápida erosión y profundización de su cauce en más de 500 m. Esto indicaría la presencia de un impulso ascendente de la faja subandina el que, probablemente, sería el causante de una parte de las deformaciones antes descritas.

Por otro lado, el sector ubicado en la margen derecha del río Coca se caracteriza por un comportamiento tectónico aparentemente más tranquilo. En realidad, las fallas y fracturas que afectan a los depósitos de la avalancha de escombros del CVR que alcanzaron este sector, presentan una intensidad mucho menor que en las zonas circundantes.

#### b. Volcán Paleoreventador (VPR)

El aparato del Volcán Paleoreventador comenzó a desarrollarse inmediatamente después de que concluyera la fase tectónica que afectó al Complejo Volcánico Basal.

Las lavas emitidas por el cráter del VPR, cuya posición probablemente coincidía con la del CVR, se canalizaron siguiendo dos direcciones preferenciales: NNE-SSW y E-W. Al no existir pruebas de un control tectónico derivado de morfoestructuras E-W, podría asumirse que esta dirección preferencial está relacionada con efectos gravitacionales sobre las laderas. En cambio, la dirección NNE-SSW se encuentra parcialmente controlada por la presencia de escarpes de falla orientados NE-SW y NNE-SSW.

El edificio del Volcán Paleoreventador resultó inmediatamente afectado por el reinicio de una actividad tectónica frágil, de tipo esencialmente compresivo. Las familias de fallas NW-SE y NE-SW, que están presentes principalmente sobre el flanco oriental del VPR, representan una manifestación de dicha actividad. También este aparato fue afectado por un gran colapso volcánico-tectónico en el que la acción de la gravedad fue muy importante. La superficie de desprendimiento estuvo ubicada un poco más al este que la anterior y coincide con el escarpe que limita el actual anfiteatro, a lo largo del cual afloran localmente las lavas del CVR.

Los productos de este segundo derrumbe se desplazaron hacia el oriente y alcanzaron el valle del río Coca, obstruyendo su curso y cubriendo parcialmente las laderas de la margen derecha.

La mayor parte de los depósitos de la avalancha se desplazaron a lo largo del valle del río Coca, sobre todo hacia el NE, formando un represamiento que se extendió entre los actuales ríos Malo y Salado.



En fin, se debe también notar que los depósitos de la avalancha del VPR se encuentran localmente afectados por fallas de rumbo NNE-SSW, relacionadas probablemente con una reanudación de los movimientos a lo largo de esta directriz.

c. Volcán El Reventador, cono actual (VER)

La disminución de la carga litostática que se produjo como consecuencia del desprendimiento del derrumbe del VPR pudo ser la causa directa que desencadenó la más reciente actividad explosiva.

Los nuevos productos se emitieron a través del mismo conducto y utilizaron como vía preferencial para su desplazamiento, el anfiteatro formado por el derrumbe del VPR. Las coladas de lava y los lahares encontraron como obstáculo en su descenso hacia el río Coca, el alto morfológico ubicado en el borde oriental del anfiteatro, a la altura del cerro Copete (Plano 0209-G-2504).

Este rasgo morfológico podría estar relacionado con el mismo mecanismo cinemático responsable de la acumulación del depósito de la avalancha, donde el movimiento general de la masa a lo largo de una superficie lútrica produce una mayor acumulación en los sitios en los cuales ésta emerge o adquiere una inclinación subhorizontal (Ramsay, 1987).

Con base en lo anterior resultaría que, en el ámbito del VER, la mayoría de las fallas distensivas, se hallan extremadamente localizadas y coinciden con la emersión de la superficie de desprendimiento de la avalancha. Tomando en cuenta el fuerte ángulo de inclinación que caracteriza las laderas orientales de El Reventador y la presencia de la depresión que forma el valle del Río Coca, es posible deducir que estas fallas lútricas se hallan relacionadas con el desprendimiento de masas por causas fundamentalmente gravitacionales, antes que por un campo regional de esfuerzos de carácter distensivo. Consecuentemente, en el área del volcán, el régimen tectónico predominante es del tipo compresivo y sólo localmente se forman estructuras secundarias distensivas inducidas. Se puede concluir entonces que en el Plioceno no existen evidencias de un cambio del régimen tectónico de compresivo a distensivo, como lo postulan Lara y Chávez (1987).



## 6. PETROLOGIA

### 6.1 Petrografía

Durante los levantamientos geovulcanológicos se recolectaron unas 130 muestras de rocas para los correspondientes análisis petrográficos en láminas delgadas, análisis químicos de microsonda y geoquímicos, cuyos resultados se presentan en los Cuadros 6/1, 6/2, 6/3, 6/4 y 6/5, respectivamente. La ubicación de las muestras recolectadas se presenta en los Planos 0209-G-2507 y 2508.

Siendo que los productos emitidos por el complejo volcánico El Reventador en el curso de su historia evolutiva son predominantemente lavas que se proyectan en el campo calco-alcálido del diagrama  $K_2O/SiO_2$ , para la clasificación de dichas rocas se utilizó la nomenclatura de las series orogénicas basada sobre el antes mencionado diagrama (Figura 6/1 y 6/13). Los basaltos presentan características químicas propias de una afinidad alcalina, tal como puede notarse en el diagrama álcali/ $SiO_2$  (Figura 6/2).

Las características petrográficas más significativas de los productos lávicos serán descritas agrupándolas en las tres unidades anteriormente descritas, que corresponden a las secuencias estratigráficas reconocidas en el campo, a saber: Complejo Volcánico Basal (CVB), Volcán Paleoreventador (VPR) y Volcán El Reventador (VER).

#### a. Complejo Volcánico Basal (CVB)

Las lavas del Complejo Volcánico Basal muestran un amplio espectro de variación composicional, puesto que su secuencia varía entre basaltos y riolita, pasando por andesitas basálticas, andesitas y dacitas. Los términos andesíticos son los más ampliamente difundidos, mientras las riolitas constituyen los productos más escasos.

##### - Basaltos

Todos los basaltos evidencian una estructura porfírica.

Los fenocristales están representados por plagioclasa zonada con núcleos, bitowníticos y bordes hasta de andesina, olivino y clinopiroxeno, siendo el olivino mucho más abundante que el clinopiroxeno. La magnetita se encuentra generalmente presente en forma de microfenocristales.



La pasta de fondo, cuya textura varía de intergranular a intersertal, incluye, además del vidrio, plagioclasas, piroxenos y opacos. El olivino se presenta solo esporádicamente.

- Andesitas basálticas

Las andesitas basálticas presentan características estructurales similares a aquellas de los basaltos.

Mineralógicamente se distinguen de las rocas menos evolucionadas por una mayor abundancia de clinopiroxenos y una menor difusión del olivino entre los fenocristales. Este mineral se encuentra ausente en los términos más evolucionados, en los cuales pueden aparecer escasos ortopiroxenos.

. Andesitas

La paragénesis de los fenocristales de estas rocas está dominada por la plagioclasa a la cual constantemente se asocian clinopiroxeno, ortopiroxeno y cantidades menores de magnetita. El olivino se encuentra esporádicamente presente sólo en los términos con menor contenido de  $\text{SiO}_2$ ; este mineral presenta siempre bordes corroídos, clara evidencia de reabsorción, o, en algunos casos, bordes de reacción constituidos por piroxenos.

En las andesitas ricas en  $\text{SiO}_2$  también aparece el anfíbol representado por una hornblenda pleocroica, de color verde marrón, y generalmente con bordes opacíticos.

Frecuentemente se encuentran glomerófiros constituidos por agregados de piroxenos, plagioclasas y magnetita. Algunas veces también se ha observado una hornblenda ubicada en la parte central del agregado.

La plagioclasa presenta amplios bandeamientos con núcleos básicos inestables caracterizados por una textura "tipo ceda-zo"; los contenidos en An, determinados mediante análisis con microsonda electrónica, están comprendidos entre 86 y 72%. Las partes más grandes de la plagioclasa presentan frecuentemente un bandeamiento oscilante (An entre 64 y 54%) con bordes que llegan hasta An 50%.

El clinopiroxeno augítico, que es el mineral máfico más abundante, presenta una composición bastante homogénea (An 43-45%, Fs 12-15%, Wo 41-43%). El ortopiroxeno presenta una composición bronzítico-hipersténica.

También la magnetita presenta una composición poco variable; en efecto, los contenidos en ulvo-espinela (Usp), computados según el método de Storner (1983), varían entre 23 y 27%.



La hornblenda es rica en Ca y presenta, a veces, relaciones  $\text{FeO/MgO} \approx 1$ , mientras que en otros casos se evidencia un marcado bandeamiento con núcleos más ricos en FeO ( $\text{FeO/MgO} = 1,17-1,20$ ) con respecto a los bordes ( $\text{FeO/MgO} = 0,85-0,90$ ). Consecuentemente, los núcleos de anfíbol estarían en desequilibrio respecto al magma que les contiene.

El olivino cuando está presente muestra un bandeamiento normal con núcleos más ricos en magnesio (Fo 71-72%) y bordes relativamente enriquecidos en Fa (66-68%).

Las pastas contienen generalmente poco vidrio y están caracterizadas por la asociación de los minerales anhidros presentes en los fenocristales.

Los datos microanalíticos de los fenocristales de las andesitas del Complejo Volcánico Basal están resumidos en las Figuras 6/3 y 6/4.

Entre las lavas andesíticas de esta secuencia se encuentran inclusiones de rocas intrusivas que fueron analizadas tanto para los elementos mayores, como para las fases individuales. Se trata de un gabro con hornblenda en el cual también están presentes un olivino zonado (Fo 79-70%, 1,4% en volumen) y magnetita (Usp 22%, 3,6% en volumen). El olivino se presenta fuertemente redondeado y evidencia, también, concrecimientos simplectíticos con magnetita pobre en  $\text{TiO}_2$  (Usp 12%). La plagioclasa está ligeramente bandeadada y es moderadamente básica (An 91-97%) con algunos bordes hasta An 80%. La hornblenda presenta una variación composicional con bordes relativamente enriquecidos en FeO; en efecto, el valor de la relación  $\text{FeO/MgO}$  pasa de 0,91 en los bordes, a 0,6 en los núcleos.

#### . Dacitas y riolitas

En las dacitas y riolitas todavía se observa una textura porfírica.

La plagioclasa sigue siendo el mineral más abundante, seguido por la hornblenda, el ortopiroxeno y un poco de magnetita. Al clinopiroxeno se lo encuentra solo ocasionalmente. El ortopiroxeno disminuye paulatinamente al aumentar el grado de evolución hasta desaparecer en las rocas más ricas en sílice, en las que está también, esporádicamente, presente la biotita. El cuarzo no fue jamás observado.

La persistencia de las fases mineralógicas en fenocristales de las diferentes lavas del Complejo Volcánico Basal, está reportada esquemáticamente en la Figura 6/5.



b. Volcán Paleoreventador (VPR)

Las lavas del Volcán Paleoreventador muestran un rango de variación más limitado con respecto a las del Complejo Volcánico Basal; en efecto, ellas están representadas sólo por basaltos, andesitas basálticas y andesitas que constituyen el tipo litológico más difundido.

- Basaltos

Los basaltos presentan una estructura porfírica.

Los fenocristales están constituidos por plagioclasa y olivino; el clinopiroxeno se halla también presente aunque en menor cantidad.

La plagioclasa se presenta generalmente bandeada, con núcleos muy básicos (An 94-89%) y fajas con zonación generalmente directa (An 85-80%); también aparecen delgadas zonas marginales que llegan hasta labradorita (An 62%).

El olivino también se presenta bandeado, evidenciándose núcleos con Fo 77-80 y bordes que pasan gradualmente de Fo 75 a Fo 71.

El clinopiroxeno aparece solo ligeramente bandeado. Ocasionalmente se observan delgados bordes relativamente más ricos en FeO (Fs=16%) con respecto a los núcleos que resultan bastante homogéneas.

Los microfenocristales de magnetita son escasos; este mineral se encuentra claramente más difundido en la pasta, dentro de la cual se observan los mismos minerales que forman los fenocristales, pero con relaciones entre clinopiroxeno y olivino totalmente invertidas con respecto a los fenocristales, siendo el clinopiroxeno menos abundante que el olivino.

Los glomerófiros generalmente constituidos por plagioclasa, piroxeno y opacos, son relativamente frecuentes. Ocasionalmente, se evidencian algunos fenocristales con borde opacítico y una longitud máxima de 5 mm, constituidos por agregados de plagioclasa, clinopiroxeno y opacos, entre los cuales permanecen reconocibles áreas formadas por anfíbol. Se trata probablemente de relictos de hornblenda en vías de transformación y de reequilibrio.

Los datos microanalíticos de los fenocristales de los basaltos del Volcán Paleoreventador, están resumidos en la Figura 6/6.



- Andesitas basálticas

En las andesitas basálticas se observa la misma paragénesis de los basaltos, con un incremento de la relación clinopiroxeno/olivino.

- Andesitas

En las andesitas se nota una clara variación de la paragénesis de los fenocristales; en efecto, en estas rocas que están todavía dominadas por la plagioclasa, aparece la hornblenda que se vuelve siempre más difundida según se incrementa el grado de evolución, paralelamente al ortopiroxeno y al clinopiroxeno.

También la relación orto/clinopiroxeno tiende a aumentar de acuerdo con el incremento del  $\text{SiO}_2$ . Solo en unos pocos casos el anfíbol está ausente o limitado a algunos fenocristales casi completamente transformados en minerales anhidros (plagioclasa, piroxenos, óxidos). Por otro lado, en ocasiones, los máficos están representados solo por la hornblenda.

El olivino, siempre muy estable, es frecuente, aunque en pequeñas cantidades, sobre todo en las andesitas pobres en  $\text{SiO}_2$ .

La magnetita está siempre presente tanto en forma de microfenocristales así como en la pasta.

La plagioclasa evidencia núcleos de labradorita básica (An 66-62%), fajas intermedias a menudo con variaciones de composición oscilantes (An 57-52%) y pocos bordes andesínicos (An 46%).

Los piroxenos muestran composiciones relativamente constantes; el clinopiroxeno tiene una composición augítica (En 43-42%, Fs 15-13%); el ortopiroxeno presenta la composición de una broncita rica en FeO (En 73-70%).

El anfíbol cálcico muestra relaciones FeO/MgO próximas, o ligeramente inferiores a 1 (0,83-1,0).

La magnetita se presenta moderadamente rica en  $\text{TiO}_2$  (Usp-29).

Los datos microanalíticos de los fenocristales de las andesitas del Volcán Paleoreventador están resumidos en la Figura 6/7.

La pasta se caracteriza por presentar cantidades variables de vidrio que solo esporádicamente se tornan muy abundantes.



En general, los minerales que se asocian en texturas intergranulares o intersertales, están constituidos por plagioclasa, piroxenos y óxidos; entre los minerales máficos de las andesitas ricas en  $\text{SiO}_2$  se vuelve dominante el ortopiroxeno.

El diagrama de persistencia de los fenocristales de las diferentes lavas del Volcán Paleoreventador, está reportado en la Figura 6/8.

A partir del examen de los respectivos diagramas de persistencia, se puede concluir que, en general las lavas del VPR presentan, en general, características similares a las del CVR; la principal diferencia radica en la difusión de la hornblenda que se vuelve estable en las andesitas ricas en  $\text{SiO}_2$ .

#### c. Volcán El Reventador (VER)

El espectro composicional de las lavas del cono actual es relativamente estrecho. En efecto, su variación está comprendida entre basaltos, andesitas basálticas y andesitas ligeramente evolucionadas.

##### - Basaltos

Presentan una estructura porfírica con fenocristales, olivino y clinopiroxeno; la magnetita es poco abundante. La hornblenda está presente, aunque en forma esporádica, con amplios bordes opacíticos y claras evidencias de reabsorción que se manifiestan, sobre todo, en los perfiles de corrosión.

También se encuentran algunos agregados granulares de plagioclasa, piroxeno y opacos que contienen relictos de hornblenda. La pasta incluye abundante vidrio en el que están inmersos cristales de plagioclasa, piroxeno, opacos y, en menor cantidad, olivino.

La plagioclasa es bandeada y presenta núcleos básicos, generalmente corroídos, con textura "tipo cedazo" de composición bitownítica (An 89-90%). A través de una discontinuidad composicional se pasa a bordes labradoríticos con bandas también oscilantes (An 55-61%).

El clinopiroxeno presenta una composición que se ubica sobre el límite entre salitas y augitas cálcicas; los bordes se caracterizan por una ligera tendencia hacia un enriquecimiento en hierro. En ocasiones, se evidencian unos pocos núcleos de ortopiroxeno, casi totalmente transformados en clinopiroxeno.

El olivino es inestable y presenta una composición poco variable alrededor de Fo 72-75.

También la magnetita es relativamente homogénea (Usp 30-35).



Los datos microanalíticos de los fenocristales de los basaltos del Volcán El Reventador están resumidos en la Figura 6/9.

- Andesitas basálticas

La asociación plagioclasa-clinopiroxeno junto con cantidades menores de olivino y magnetita predomina también en las andesitas basálticas.

El ortopiroxeno se halla a menudo presente en el núcleo de clinopiroxeno y el olivino aparece siempre reabsorbido.

La hornblenda, en general, se presenta transformada en agregados de minerales anhidros o con aureolas opacíticas y bordes fuertemente redondeados.

- Andesitas

Las andesitas presentan una estructura porfírica. La paragénesis de los fenocristales se caracteriza por el predominio de plagioclasa zonada, clinopiroxeno y ortopiroxeno; este último resulta más abundante en las rocas con un más alto contenido de  $\text{SiO}_2$ . La asociación de los fenocristales se completa con la presencia de magnetita, poca hornblenda y, esporádicamente, olivino. En todas estas rocas se observan evidentes indicios de un desequilibrio mineralógico, representado por:

- Núcleos de ortopiroxeno en reacción con el clinopiroxeno.
- Presencia, en todas las muestras, de olivino estable con frecuentes aureolas de reacción de piroxenos.
- Presencia de relictos de hornblenda en vías de transformación en una asociación de plagioclasa, piroxenos y opacos.
- Presencia de un anfíbol con bordes opacíticos redondeados y, a veces, corroído.

La plagioclasa evidencia un marcado bandeamiento; en algunas muestras se observa un claro salto composicional entre núcleos básicos corroídos y reabsorbidos y bordes intermedios. Los contenidos de An varían entre 66-67% y 47-48%, con oscilaciones en intervalo An 56-52%.

El clinopiroxeno, de composición augítica cálcica, presenta bordes ligeramente empobrecidos en  $\text{Wo}$ ; el ortopiroxeno es una broncita férrica.



Los datos microanalíticos de los fenocristales de las andesitas del Volcán El Reventador están resumidos en la Figura 6/10.

La persistencia de las fases mineralógicas en fenocristales de las diferentes lavas del Volcán El Reventador, está representada esquemáticamente en la Figura 6/11.

La persistencia de las fases mineralógicas en fenocristales en el ámbito de todos los productos del complejo volcánico El Reventador, está representada en el diagrama resumen de la Figura 6/12.

En los Cuadros 6/1, 6/2 y 6/3 se han sintetizado las principales determinaciones petrográficas efectuadas sobre las láminas delgadas de las muestras correspondientes a los tres edificios volcánicos.



CUADRO 6/1

PETROGRAFIA DEL COMPLEJO VOLCANICO BASAL (CVB)																								
Muestra N°	Estructura	Textura	Alteración	Fenocristales										Pasta					Otros Minerales	Minerales Secundarios	Inclusiones	Clasificación Química o Petrográfica		
				Minerales Siálicos					Minerales Máficos															
				Cuadro	Plagioclasa				Olivino	Orto - Px	Clino - Px	Anfibol	Biotita	Fe - Ti-Ox	Vidrio	Plagioclasa	Olivino	Orto - Px					Clino - Px	
					%	Anortita (%)																		
						20	40	60																80
R-18	PS	IG	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	BASALTO	
REV-9	PO	IG	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	ANDESITA BASICA	
REV-85	PS	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	DACITA	
REV-86	PS	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	ANDESITA ACIDA	
REV-87	PO	SC	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	BASALTO	
REV-88	PS	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		⊕	ANDESITA	
REV-91	PO	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○			⊕	ANDESITA	
REV-93	PO	IG	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	ANDESITA	
REV-102	PS	IS	⊕	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	DACITA	
REV-103	PS	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	⊕	○	○	○	Ap		○	DACITA	
REV-104	PO	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	DACITA	
REV-110	PS	IG	○	○	○						○	○	○	○	○	○	⊕	○	○			○	ANDESITA BASICA	
REV-112	PO	IS	○	○	○						⊕	○	○	○	○	○	○	⊕	○	Ap		○	ANDESITA BASICA	
REV-114	PS	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	ANDESITA BASALTICA	
REV-120	PO	IG	○	○	○						○	○	○	⊕	○	○	○	○	○			○	ANDESITA BASALTICA	
REV-122	PO	PI	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	ANDESITA BASICA	
REV-123	PO	PI	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	ANDESITA	
REV-124	PO	PI	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	ANDESITA BASICA	
REV-126	PO	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	DACITA	
REV-127	PS	IG	⊕	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	BASALTO	
REV-128	PO	PI	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	ANDESITA	
REV-129	PO	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	DACITA	
REV-131	PO	PI	○	○	○						○	○	○	○	○	⊕	○	○	○	Ap		○	RIOLITA	
REV-132	PO	PI	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	⊕	○	Ap		○	DACITA	
REV-134	PO	IS	○	○	○						○	○	○	⊕	○	○	○	○	○			○	ANDESITA BASALTICA	
REV-136	PO	IS	○	○	○						⊕	○	○	○	○	○	○	○	○			○	ANDESITA BASICA	
REV-137	PO	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	⊕	○			○	ANDESITA BASALTICA	
REV-141	PO	SC	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	⊕	○			○	ANDESITA BASALTICA	
REV-142	PO	PM	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	RIODACITA	
REV-200	PO	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		⊕	ANDESITA	
REV-201	PO	IS	⊕	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○	Ap		○	ANDESITA	
REV-202	PO	IS	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	ANDESITA BASALTICA	
REV-203	PO	SC	○	○	○						○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	ANDESITA BASALTICA	

## LEYENDA

## Estructura y textura

- PO = porfírica  
 PS = porfírico-seriada  
 IS = intersertal  
 IG = intergranular  
 PI = pilotaxítica  
 SC = escoriácea  
 PM = pumicea

## Minerales accesorios

Ap = apatita

## Presencia de minerales

- = ausente  
 ⊕ = raro  
 ◐ = presente en pequeñas cantidades  
 ◑ = presente en medianas cantidades  
 ◒ = abundante  
 ◓ = muy abundante



CUADRO 6/2

PETROGRAFIA DEL VOLCAN PALEOREVENTADOR (VPR)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
Muestra N°	Estructura	Textura	Alteración	Fenocristales												Pasta				Otros Minerales	Minerales Secundarios	Inclusiones	Clasificación Química o Petrográfica																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
				Minerales Siálicos						Minerales Máficos						Plagioclase	Olivino	Orto - Pz	Clino - Pz																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
				Cuarzo	Plagioclase				Olivino	Orto - Pz	Clino - Pz	Anfibol	Biotita	Fe - Ti-Ox	Vidrio																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
					%	Anortita (%)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
						20	40	60																80																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
A-01	PO	IS																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							

## LEYENDA

## Estructura y textura

- PO = porfirica  
 PS = porfirico-serrada  
 IS = intersertal  
 IG = intergranular  
 PI = pilotaxitica  
 SC = escoriacea  
 PM = pumicea

## Minerales accesorios

Ap = apatita

## Presencia de minerales

- = ausente  
 ⊕ = raro  
 ⊙ = presente en pequeñas cantidades  
 ⊖ = presente en medianas cantidades  
 ⊕ = abundante  
 ● = muy abundante



CUADRO 6/3

PETROGRAFIA DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)																								
Muestra N°	Estructura	Textura	Alteración	Fenocristales										Pasta				Otros Minerales	Minerales Secundarios	Inclusiones	Clasificación  Química o Petrográfica			
				Minerales Siálicos					Minerales Máficos					Vidrio	Plagioclase	Olivino	Orto - Px					Clino - Px		
				Cuarzo	Plagioclase				Olivino	Orto - Px	Clino - Px	Anfibol	Biotita										Fe - Ti-Ox	
					%	Anortita (%)																		
						20	40	60																80
REV-12	PO	SC																				ANDESITA BASALTICA		
REV-14	PO	SC																				ANDESITA		
REV-15	PO	IS																				ANDESITA BASALTICA		
REV-18	PO	IS																		Ap		ANDESITA		
REV-19	PO	IS																		Ap		ANDESITA		
REV-21	PO	IS																				ANDESITA		
REV-73	PS	IS																		Ap		ANDESITA ADIDA		
REV-75	PO	IS																				ANDESITA BASALTICA		
REV-95	PS	IS																				BASALTO		
REV-99																						BASALTO		

## LEYENDA

## Estructura y textura

- PO = porfirica  
 PS = porfirico-seriada  
 IS = intersertal  
 IG = intergranular  
 PI = pilotaxítica  
 SC = escuriácea  
 PM = pumícea

## Minerales accesorios

Ap = apatita

## Presencia de minerales

- = ausente  
 ⊕ = raro  
 ⊙ = presente en pequeñas cantidades  
 ⊗ = presente en medianas cantidades  
 ⊕ = abundante  
 ⊗ = muy abundante



## 6.2 Geoquímica

Los análisis químicos de rocas se efectuaron sobre 62 muestras representativas del complejo volcánico El Reventador, cuya ubicación se presenta en los Planos 0209-G-2507 y 2508. En el Cuadro 6/4 se presentan los resultados de los análisis químicos de rocas (elementos mayores), así como la norma CIPW y el índice de diferenciación (DI). Los elementos mayores se determinaron a través del método de fluorescencia de rayos X (XRF), exceptuando el FeO que se le determinó por titulación, el Na<sub>2</sub>O y MgO por el método de espectrometría de absorción atómica (AAS) y el H<sub>2</sub>O por pérdidas por calcinación.

Estos análisis fueron desarrollados en Italia, en los Laboratorios de Ciencias de la Tierra de las Universidades de Pisa y de Siena.

En la Universidad de Siena también se realizaron los análisis de las fases mineralógicas, mediante la utilización de microsonda electrónica; los resultados pertinentes se presentan en el Cuadro 6/5.

### 6.2.1 Composición química de los productos volcánicos

De manera general, los resultados de los análisis evidencian una distribución regular de todas las lavas del complejo volcánico El Reventador en el campo calco-alcalino del diagrama K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> (Figura 6/13).

Con base en los criterios clasificativos de Irvine y Baragar (1972), los términos con SiO<sub>2</sub> mayor al 52% caen en el campo subalcalino, mientras que los términos basálticos y el gabro, incluido en las lavas del Volcán Paleoreventador, presentan características químicas propias de una afinidad alcalina por lo que caen tanto en el campo alcalino como sobre el límite con el subalcalino.

La afinidad petrogenética de los términos basálticos se halla también confirmada por su composición normativa, en cuanto se observa que en todas las muestras está presente el olivino y, a veces, la nefelina.

La comparación entre los diagramas Alkali/SiO<sub>2</sub> y K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> que aparece en las Figuras 6/2 y 6/13, indica claramente que la alcalinidad de los basaltos depende de los contenidos relativamente altos de Na<sub>2</sub>O, mientras que el K<sub>2</sub>O se mantiene por debajo del 1,2%.

La alcalinidad de estas rocas no refleja, entonces, ninguna tendencia hacia una afinidad shoshonítica.

En conjunto, todas las muestras analizadas se disponen dentro los diagramas de variación de los elementos mayores versus SiO<sub>2</sub>, según una tendencia regular con una muy limitada dispersión (Figuras 6/14 a 6/17).



CUADRO 6/4

ANALISIS QUIMICO DE ROCAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR

PARTE 1: COMPLEJO VOLCANICO BASAL (CVB)

MUESTRA	P-18	Rev-9	Rev-85	Rev-86	Rev-88	Rev-91	Rev-93	Rev-102	Rev-103	Rev-112	Rev-114	Rev-122	Rev-123
S102	48.43	56.30	62.99	60.62	59.37	57.28	56.15	68.96	66.49	56.43	54.35	57.90	58.14
T102	1.12	0.90	0.58	0.68	0.75	0.89	0.84	0.34	0.39	0.80	0.91	0.80	0.79
Al2O3	19.52	18.66	17.45	17.70	18.24	18.55	18.94	16.12	16.67	18.95	19.16	18.48	18.03
Fe2O3	2.29	2.26	1.56	2.49	2.08	2.46	2.08	1.90	2.24	2.30	2.36	2.08	2.27
FeO	7.36	4.86	3.08	3.15	3.62	4.42	4.82	0.85	1.41	4.69	5.43	4.78	4.43
MnO	0.18	0.12	0.10	0.12	0.10	0.12	0.13	0.11	0.12	0.16	0.17	0.14	0.15
MgO	6.63	3.65	2.34	2.68	3.24	3.42	4.16	0.79	1.29	3.33	3.55	2.76	3.07
CaO	9.40	6.58	4.83	5.49	5.77	6.42	6.63	2.67	3.50	6.64	7.41	6.12	6.05
Na2O	3.26	4.27	4.37	4.57	4.41	4.23	4.04	5.28	4.83	4.24	3.96	4.19	4.46
K2O	0.96	1.68	2.17	1.91	1.85	1.67	1.63	2.62	2.32	1.68	1.40	1.73	1.80
P2O5	0.45	0.51	0.31	0.34	0.33	0.33	0.34	0.17	0.26	0.53	0.44	0.46	0.44
H2O	0.40	0.22	0.22	0.26	0.25	0.23	0.25	0.20	0.41	0.26	0.89	0.57	0.38
Tot	100.00	100.01	100.00	100.01	100.01	100.02	100.01	100.01	100.03	100.01	100.03	100.01	100.01
Q	0.00	4.84	14.74	11.26	9.03	6.81	4.66	21.80	20.53	5.43	3.68	8.43	7.34
Or	5.67	9.93	12.82	11.29	10.93	9.87	9.63	15.48	13.71	9.93	8.27	10.22	10.64
Ab	27.58	36.13	36.98	38.67	37.31	35.79	34.18	44.67	40.87	35.88	33.51	35.45	37.74
An	35.79	26.79	21.59	22.14	24.51	26.70	28.73	12.14	15.66	27.71	30.37	26.51	23.86
C	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00
Di	6.43	2.06	0.28	2.32	1.58	2.44	1.58	0.00	0.00	1.44	2.89	0.70	2.68
Hy	1.95	13.88	9.28	8.39	11.18	12.17	15.58	1.97	3.78	13.28	14.26	12.53	11.57
Ol	15.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mt	3.32	3.28	2.26	3.61	3.02	3.57	3.02	2.11	3.25	3.33	3.42	3.02	3.29
Il	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Il	2.13	1.71	1.10	1.29	1.42	1.69	1.60	0.65	0.74	1.52	1.73	1.52	1.50
Ap	1.04	1.18	0.72	0.79	0.76	0.76	0.79	0.39	0.60	1.23	1.02	1.07	1.02
Aq	0.40	0.22	0.22	0.26	0.25	0.23	0.25	0.20	0.41	0.26	0.89	0.57	0.38
Tot	100.00	100.01	100.00	100.01	100.01	100.02	100.01	100.01	100.03	100.01	100.03	100.01	100.01
DI	33.26	50.90	64.54	61.22	57.28	52.46	48.47	81.96	75.11	51.24	45.46	54.10	55.71

MUESTRA	Rev-124	Rev-126	Rev-127	Rev-128	Rev-129	Rev-136	Rev-131	Rev-134	Rev-200	Rev-201	Rev-202	Rev-203
S102	58.63	69.30	50.45	58.19	67.77	56.40	70.84	55.65	57.38	58.75	53.51	54.12
T102	0.77	0.34	0.99	0.73	0.36	0.66	0.24	0.87	0.75	0.76	0.81	0.99
Al2O3	18.25	15.85	20.70	18.49	16.62	19.63	15.65	20.54	18.70	18.39	20.78	19.50
Fe2O3	2.19	0.91	2.43	2.51	1.02	1.69	0.58	1.78	2.52	2.10	2.38	3.42
FeO	4.31	1.37	5.92	3.82	1.71	4.66	1.16	4.42	3.98	4.08	4.63	4.59
MnO	0.15	0.12	0.16	0.15	0.11	0.19	0.05	0.15	0.14	0.13	0.17	0.17
MgO	2.71	0.59	4.33	3.33	0.81	2.59	0.36	2.50	3.45	3.12	3.08	3.03
CaO	6.03	1.95	8.42	6.17	2.71	6.64	1.84	7.43	6.59	6.11	8.47	7.78
Na2O	4.29	5.39	4.37	4.18	5.14	4.82	5.70	4.13	4.17	4.20	3.88	4.12
K2O	1.84	2.87	1.20	1.72	2.63	1.36	2.97	1.53	1.69	1.79	1.27	1.37
P2O5	0.44	0.12	0.51	0.44	0.17	0.67	0.10	0.41	0.45	0.39	0.49	0.38
H2O	0.41	1.18	0.53	0.27	0.95	0.71	0.51	0.61	0.18	0.17	0.53	0.55
Tot	100.02	99.99	100.01	100.00	100.00	100.02	100.00	100.02	100.00	99.99	100.00	100.02
Q	9.01	21.60	0.00	8.77	20.40	4.18	21.54	5.04	7.26	9.04	2.92	4.02
Or	10.87	16.96	7.09	10.16	15.54	8.04	17.55	9.04	9.99	10.58	7.50	8.10
Ab	36.30	45.61	35.77	35.37	43.49	40.78	48.23	34.94	35.28	35.54	32.83	34.86
An	25.11	8.89	33.32	26.61	12.33	27.91	8.35	32.99	27.32	26.04	35.53	30.67
Ne	0.00	0.00	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C	0.00	0.62	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Di	1.59	0.00	4.18	0.91	0.00	0.54	0.11	0.98	1.97	1.40	2.69	4.43
Hy	11.08	2.89	0.00	11.87	3.92	12.61	2.19	11.23	11.88	11.83	11.87	9.68
Ol	0.00	0.00	11.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mt	3.18	1.32	3.52	3.64	1.48	2.45	0.84	2.58	3.65	3.04	3.45	4.96
Il	1.46	0.65	1.88	1.39	0.68	1.25	0.46	1.65	1.42	1.44	1.54	1.88
Ap	1.02	0.78	1.18	1.02	0.39	1.55	0.23	0.95	1.04	0.90	1.13	0.88
Aq	0.41	1.18	0.53	0.27	0.95	0.71	0.51	0.61	0.18	0.17	0.53	0.55
Tot	100.02	99.99	100.01	100.00	100.00	100.02	100.00	100.02	100.00	99.99	100.00	100.02
DI	56.18	84.16	43.51	56.30	79.44	53.00	87.31	49.03	52.52	55.15	43.26	46.98



## CUADRO 6/4

ANALISIS QUIMICO DE ROCAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
PARTE 2: VOLCAN PALEOREVENTADOR (VPR)

MUESTRA	A-01	A-02	A-03	A-04	R-08	R-09	R-10	R-25	Rev-1	Rev-2	Rev-11	Rev-28	Rev-45
SiO <sub>2</sub>	61.34	49.29	50.02	56.67	61.37	56.39	56.93	60.92	57.06	52.42	58.64	58.04	60.86
TiO <sub>2</sub>	0.59	1.11	1.08	0.81	0.55	0.89	0.82	0.89	0.79	0.90	0.78	0.77	0.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.02	20.32	19.95	19.22	18.13	19.10	18.70	17.97	18.90	19.09	18.03	18.53	17.83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.38	3.07	3.04	1.72	4.20	2.17	2.14	1.80	2.07	2.00	1.79	2.36	2.06
FeO	2.76	6.58	6.48	4.57	1.08	4.62	4.67	3.51	4.12	6.01	4.50	3.77	3.47
MnO	0.13	0.16	0.17	0.13	0.14	0.13	0.14	0.07	0.12	0.15	0.13	0.13	0.12
MgO	2.34	5.44	4.97	3.32	2.55	3.38	3.58	2.26	3.92	5.15	3.44	3.30	2.77
CaO	5.31	9.00	9.04	6.54	4.23	6.54	6.38	4.84	6.31	8.19	5.98	5.86	5.52
Na <sub>2</sub> O	4.63	3.41	3.66	4.26	4.31	4.50	4.45	5.07	4.35	4.63	4.37	4.19	4.16
K <sub>2</sub> O	1.90	0.88	0.91	1.58	2.11	1.51	1.57	1.87	1.55	1.38	1.67	1.73	1.91
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.34	0.34	0.33	0.35	0.39	0.32	0.35	0.45	0.33	0.37	0.35	0.32	0.38
H <sub>2</sub> O	0.07	0.38	0.35	0.62	0.97	0.45	0.29	0.35	0.48	0.33	0.32	1.03	0.30
Tot	100.01	99.98	100.00	99.99	100.03	100.00	100.02	100.00	100.00	100.02	100.00	100.03	100.02
Q	11.47	0.00	0.00	5.72	16.46	4.43	5.05	10.22	5.58	0.00	7.85	8.75	12.84
Or	11.23	5.20	5.38	9.34	12.47	8.92	9.28	11.05	9.16	8.15	9.87	10.22	11.29
Ab	40.87	28.85	30.97	36.04	36.47	38.08	37.65	42.90	36.81	34.10	36.98	35.45	35.20
An	21.88	37.54	35.32	28.66	18.44	27.46	26.41	20.75	27.47	29.92	24.65	26.64	24.34
C	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Di	1.81	3.98	6.01	1.23	0.00	2.36	2.41	0.26	1.36	6.76	2.23	0.27	0.46
Hy	7.33	8.84	7.73	13.54	6.35	12.73	13.45	9.12	13.68	8.80	13.21	12.03	10.51
Ol	0.00	7.84	7.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.49	0.00	0.00	0.00
Mt	3.45	4.45	4.41	2.49	2.34	3.15	3.10	2.61	3.00	2.90	2.60	3.42	2.99
Il	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pl	1.12	2.11	2.05	1.54	1.04	1.69	1.56	1.69	1.50	1.71	1.48	1.46	1.22
Ap	0.79	0.79	0.76	0.81	0.90	0.74	0.81	1.04	0.76	0.86	0.81	0.74	0.88
Aq	0.07	0.38	0.35	0.62	0.97	0.45	0.29	0.35	0.48	0.33	0.32	1.03	0.30
Tot	100.01	99.98	100.00	99.99	100.03	100.00	100.02	100.00	100.00	100.02	100.00	100.03	100.02
DI	63.57	34.05	36.34	51.10	65.40	51.42	51.98	64.17	51.55	42.25	54.70	54.43	59.33

MUESTRA	Rev-48	Rev-49	Rev-50	Rev-51	Rev-57	Rev-58	Rev-63	Rev-70	Rev-90	Rev-92	Rev-94	Rev-100
SiO <sub>2</sub>	58.11	60.06	60.55	58.65	57.52	54.75	53.29	55.15	55.04	57.35	57.64	50.10
TiO <sub>2</sub>	0.69	0.67	0.61	0.66	0.79	0.85	1.01	0.85	0.80	0.89	0.81	1.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.01	18.26	17.86	18.65	18.89	19.40	18.72	19.25	19.15	18.79	18.66	20.17
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.41	1.18	1.05	1.75	2.18	2.19	1.91	2.00	2.48	2.22	2.22	3.45
FeO	4.26	4.32	4.08	3.99	4.34	5.30	6.14	5.25	4.67	4.20	4.50	5.49
MnO	0.12	0.11	0.12	0.13	0.13	0.15	0.13	0.15	0.15	0.11	0.14	0.16
MgO	3.47	3.38	3.44	3.64	3.24	4.23	5.38	4.18	4.32	3.29	3.24	5.17
CaO	6.00	5.65	5.39	6.08	6.53	7.29	7.55	7.18	7.25	6.29	6.15	8.69
Na <sub>2</sub> O	4.36	3.90	4.28	4.18	4.07	3.82	3.72	3.94	3.92	4.67	4.38	3.93
K <sub>2</sub> O	1.85	1.85	1.88	1.70	1.57	1.42	1.36	1.48	1.67	1.54	1.63	1.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.37	0.29	0.27	0.30	0.41	0.29	0.45	0.28	0.32	0.37	0.36	0.40
H <sub>2</sub> O	0.35	0.31	0.47	0.30	0.32	0.31	0.33	0.29	0.23	0.27	0.29	0.35
Tot	100.00	99.98	100.00	100.03	99.99	100.00	99.99	100.00	100.00	99.99	100.02	100.01
Q	6.18	11.21	10.10	8.17	8.08	3.47	0.65	3.33	3.18	5.51	6.87	0.00
Or	10.93	10.93	11.11	10.05	9.28	8.39	8.04	8.75	9.87	9.10	9.63	5.97
Ab	36.89	33.00	36.21	35.37	34.44	32.32	31.48	33.34	33.17	39.51	37.06	33.25
An	26.84	26.14	23.87	27.10	28.64	31.59	30.36	30.47	29.72	25.76	26.44	34.41
C	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Di	0.42	0.00	0.82	0.89	0.88	2.18	3.38	2.71	3.38	2.46	1.40	4.91
Hy	14.18	14.47	14.00	13.66	12.74	16.27	20.02	15.95	14.61	11.61	12.74	4.99
Ol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.13
Mt	2.04	1.71	1.52	2.54	3.16	3.18	2.77	2.90	3.60	3.22	3.22	5.00
Il	1.31	1.27	1.16	1.25	1.50	1.61	1.92	1.61	1.52	1.69	1.54	2.07
Ap	0.86	0.67	0.63	0.69	0.95	0.67	1.04	0.65	0.74	0.86	0.83	0.93
Aq	0.35	0.31	0.47	0.30	0.32	0.31	0.33	0.29	0.23	0.27	0.29	0.35
Tot	100.00	99.98	100.00	100.03	99.99	100.00	99.99	100.00	100.00	99.99	100.02	100.01
DI	54.00	55.14	57.43	53.58	51.80	44.18	40.16	45.42	46.21	54.12	53.56	39.22



CUADRO 6/4

ANALISIS QUIMICO DE ROCAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 PARTE 3: VOLCAN EL REVENTADOR CONO ACTUAL (VER)

MUESTRA	Rev-12	Rev-13	Rev-14	Rev-15	Rev-16	Rev-18	Rev-19	Rev-21	Rev-73	Rev-75	Rev-77	Rev-95
SiO2	55.14	57.23	57.16	59.91	54.30	58.70	58.85	56.75	59.81	54.31	55.47	51.46
TiO2	0.82	0.74	0.78	0.66	0.91	0.73	0.71	0.82	0.65	0.89	0.76	1.13
Al2O3	19.29	19.18	18.87	18.36	19.04	18.54	18.56	18.43	18.76	18.99	18.95	19.48
Fe2O3	1.92	2.27	2.40	1.60	2.62	1.77	2.01	2.13	1.84	2.82	2.36	2.49
FeO	5.00	3.82	4.11	3.88	4.87	4.21	4.10	4.81	3.90	4.77	3.94	5.62
MnO	0.14	0.12	0.13	0.12	0.15	0.12	0.14	0.13	0.13	0.14	0.13	0.15
MgO	3.92	3.66	3.45	3.15	4.74	3.39	3.00	3.95	3.01	4.57	5.21	5.24
CaO	7.06	6.37	6.28	5.70	7.33	6.09	5.83	6.65	5.77	7.34	6.49	8.37
Na2O	4.42	4.16	4.34	3.96	3.93	4.05	4.11	3.97	4.16	4.05	4.15	4.14
K2O	1.56	1.79	1.83	1.96	1.45	1.83	1.98	1.73	1.95	1.46	1.63	1.19
P2O5	0.38	0.29	0.30	0.20	0.31	0.21	0.28	0.28	0.24	0.30	0.33	0.34
H2O	0.36	0.36	0.36	0.49	0.34	0.36	0.42	0.34	0.28	0.34	0.58	0.42
Tot	100.01	99.99	100.01	99.99	99.99	100.00	99.99	99.99	100.00	99.98	100.00	100.03
Q	1.54	6.30	5.68	10.88	2.40	8.62	9.10	5.80	10.15	2.20	2.79	0.00
Or	9.22	10.58	10.81	11.58	8.57	10.81	11.70	10.22	11.52	8.63	9.63	7.03
Ab	37.40	35.20	36.72	33.51	33.25	34.27	34.78	33.59	35.20	34.27	35.11	35.03
An	28.19	28.37	26.60	26.53	30.03	27.00	26.35	27.36	25.39	29.32	28.26	31.06
Di	3.56	1.08	2.10	0.36	3.48	1.50	0.61	3.10	1.36	4.14	1.42	6.68
Hy	14.53	12.74	12.09	12.61	15.67	13.00	12.13	14.29	11.64	14.60	16.57	4.78
Ol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.49
Mt	2.78	3.29	3.48	2.32	3.80	2.57	2.91	3.09	2.67	4.09	3.42	3.61
Il	1.56	1.41	1.48	1.25	1.73	1.39	1.35	1.56	1.23	1.69	1.44	2.15
Ap	0.88	0.67	0.69	0.46	0.72	0.49	0.65	0.65	0.56	0.69	0.76	0.79
Aq	0.36	0.36	0.36	0.49	0.34	0.36	0.42	0.34	0.28	0.34	0.58	0.42
Tot	100.01	99.99	100.01	99.99	99.99	100.00	99.99	99.99	100.00	99.98	100.00	100.03
DI	48.16	52.07	53.20	55.96	44.22	53.70	55.57	49.61	56.87	45.10	47.54	42.06

NOTA: Cálculos normativos: Norma CIPW

DI: índice de diferenciación



## CUADRO 6/5

ANALISIS DE MINERALES PERTENECIENTES A ROCAS DEL COMPLEJO VOLCANICO  
EL REVENTADOR

## OLIVINOS

	A-02-B	A-02-N	Rev14-B	Rev95-B	Rev95-N	Rev9-N
SiO <sub>2</sub>	38.82	39.53	37.29	38.35	38.58	37.43
FeO	23.48	18.63	26.35	30.33	24.46	25.91
MnO	0.48	0.16	0.35	0.56	0.45	0.39
MgO	38.58	41.72	35.98	31.31	38.06	36.45
Tot	101.34	100.04	99.97	100.55	101.55	100.18
Si	1.000	1.006	0.990	1.028	0.997	0.998
Fe	0.506	0.396	0.585	0.680	0.528	0.572
Mn	0.010	0.003	0.007	0.012	0.009	0.008
Mg	1.481	1.584	1.424	1.251	1.467	1.436
Tot	2.997	2.898	3.006	2.971	3.001	3.005
Fe	74.53	80.00	70.88	64.79	73.53	71.51
Fe	25.47	20.00	29.12	35.21	26.47	28.49

## MAGNETITAS

	A-02	Rev14	Rev95-B	Rev95-N
TiO <sub>2</sub>	9.89	8.50	10.87	11.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.46	3.92	4.80	4.36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	42.67	48.04	45.14	42.90
FeO	35.70	33.43	34.68	37.10
MgO	4.07	3.42	4.52	3.73
Tot	100.79	97.31	100.01	99.96
Ti	0.261	0.238	0.293	0.323
Al	0.350	0.172	0.203	0.186
Fe <sub>3+</sub>	1.128	1.347	1.218	1.168
Fe <sub>2+</sub>	1.048	1.042	1.040	1.122
Mg	0.213	0.190	0.242	0.201
Tot	3.000	2.989	2.996	3.000
Usp	33.53	25.20	30.83	35.20

## CLINOPIROXENOS

	A-02-B	A-02-N	Rev14-B	Rev14-N	Rev95-B	Rev95-N	Rev9-N	Rev28-N	Rev9-B	Rev28-B	Rev28-N
SiO <sub>2</sub>	48.33	49.84	52.37	49.88	52.23	48.62	52.28	52.75	54.27	53.82	54.00
TiO <sub>2</sub>	1.08	0.97	0.57	1.07	0.93	1.03	0.35	0.51	0.26	0.34	0.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.54	6.97	1.99	4.22	1.44	6.88	2.25	1.70	0.63	0.93	0.52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.49	0.05	0.81	1.43	0.06	1.46	0.16	0.12	0.16	0.25	0.30
FeO	8.21	7.67	6.92	7.54	10.18	6.28	7.44	8.19	16.30	17.49	17.44
MnO			0.38		0.31		0.22	0.21	0.73	0.53	0.61
MgO	12.68	13.95	15.41	14.03	15.00	13.08	15.68	15.04	26.01	25.28	25.44
CaO	21.47	20.12	21.08	20.99	19.64	22.86	20.54	21.28	1.04	1.31	1.15
Na <sub>2</sub> O	0.24	0.47	0.37	0.39	0.20	0.18	0.21	0.24			
Tot	100.04	100.04	99.90	99.55	99.99	100.39	99.13	100.04	99.76	99.95	99.65
Si	1.803	1.836	1.937	1.861	1.948	1.793	1.945	1.955	1.976	1.965	1.977
Ti	0.030	0.027	0.016	0.030	0.026	0.029	0.010	0.014	0.007	0.009	0.005
Al(IV)	0.197	0.163	0.063	0.139	0.052	0.207	0.055	0.045	0.024	0.035	0.023
Al(VI)	0.091	0.140	0.024	0.047	0.012	0.092	0.044	0.029	0.003	0.006	
Fe <sub>3+</sub>	0.042	0.001	0.023	0.040	0.002	0.041	0.004	0.003	0.004	0.007	0.008
Fe <sub>2+</sub>	0.256	0.236	0.214	0.235	0.317	0.194	0.231	0.254	0.496	0.534	0.534
Mn			0.012		0.010		0.007	0.007	0.023	0.016	0.019
Mg	0.705	0.767	0.850	0.780	0.834	0.719	0.870	0.831	1.412	1.376	1.389
Ca	0.858	0.795	0.835	0.839	0.785	0.903	0.819	0.845	0.055	0.051	0.045
Na	0.017	0.034	0.027	0.028	0.014	0.013	0.015	0.017			
Wo	46.11	44.17	43.47	44.28	40.50	48.65	42.55	43.71	2.78	2.60	2.28
En	37.89	42.61	44.22	41.18	43.04	38.73	45.19	42.98	71.76	69.91	70.27
Fe	16.01	13.21	12.31	14.54	16.46	12.62	12.26	13.31	25.46	27.49	27.44



CUADRO 6/5

ANALISIS DE MINERALES PERTENECIENTES A ROCAS DEL COMPLEJO VOLCANICO  
EL REVENTADOR

HORNBLENDAS				PLAGIOCLASAS							
	Rev14	Rev86-N	Rev9		Rev95-B	Rev95-N	A-02-B	A-02-N	A-02-N	Rev14-B	Rev14-N
SiO2	41.88	46.46	43.77	SiO2	52.21	46.11	51.40	48.66	46.87	54.91	50.23
TiO2	2.55	2.12	3.01	Al2O3	28.95	33.81	30.50	32.71	33.11	26.68	30.42
Al2O3	12.99	11.10	11.57	FeO	0.65	0.38	0.62	0.46	0.58	0.53	0.50
FeO	11.37	12.97	13.12	CaO	11.81	17.20	12.87	14.88	16.44	9.20	12.85
MgO	14.87	13.59	13.22	Na2O	4.30	1.44	3.79	2.52	1.91	5.83	3.69
CaO	11.80	10.76	10.93	K2O	0.12		0.11			0.34	
Na2O	3.01	2.08	2.27	Tot	98.04	98.94	99.29	99.23	98.91	97.49	97.69
K2O	0.44	0.60	0.76	Si	2.414	2.143	2.353	2.239	2.177	2.537	2.336
Tot	98.91	99.68	98.65	Al	1.577	1.851	1.645	1.773	1.812	1.452	1.667
Si	6.930	6.649	6.392	Fe	0.024	0.014	0.023	0.017	0.022	0.020	0.019
Ti	0.287	0.228	0.330	Ca	0.585	0.856	0.631	0.733	0.818	0.455	0.640
Al(IV)	1.907	1.351	1.608	Na	0.384	0.129	0.336	0.224	0.171	0.522	0.332
Al(VI)	0.320	0.520	0.382	K	0.006		0.006			0.019	
Fe	1.383	1.552	1.601	Tot	4.990	4.993	4.994	4.986	5.000	5.005	4.994
Mg	3.224	2.899	2.877	An	61.28	87.52	66.16	77.62	83.49	47.11	67.16
Ca	1.838	1.649	1.709	Ab	37.98	12.48	33.17	22.38	16.51	50.82	32.84
Na	0.847	0.576	0.640	Or	0.74		0.67			2.07	
K	0.080	0.108	0.140								
Tot	15.970	15.532	15.679								

NOTA:

B = Borde del mineral

N = Núcleo del mineral

La composición de los minerales fue determinada en el Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Siena, mediante un espectrómetro Edax acoplado a un microscopio electrónico Philips.



Se observa particularmente una buena correlación negativa del  $MgO$ ,  $TiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $FeO$  y  $MnO$  con el  $SiO_2$ . Una buena correlación positiva existe para el  $Na_2O$ , mientras el  $F_2O_3$  presenta la máxima dispersión con una clara tendencia a su incremento a medida que varía el  $SiO_2$ .

La dispersión del  $Na_2O$  podría ser, por lo menos en parte, atribuible a procesos secundarios post-eruptivos, tal como se evidencia en el caso de la pómez del Complejo Volcánico Basal que está afectada por alteración de su abundante vidrio a través de un proceso de lixiviación del  $NaO$ .

Una tendencia muy bien definida caracterizada por la falta de un enriquecimiento en hierro, se observa también en el diagrama álcali/hierro/magnesio inherente a todas las lavas analizadas (Figura 6/18).

No obstante, en este mismo diagrama se nota que los productos menos evolucionados presentan la mayor variabilidad en la relación  $FeO/MgO$ , respecto a los productos intermedios y ácidos. Además, se puede apreciar como las rocas del Volcán El Reventador forman una tendencia prácticamente rectilínea, mientras las muestras de las secuencias más antiguas presentan una ligera tendencia hacia un enriquecimiento inicial en  $Fe$ .

De forma general, las variaciones descritas son compatibles con un proceso de diferenciación por cristalización fraccionada que involucra las fases efectivamente observadas en los fenocristales. En particular, la marcada disminución de  $Al_2O_3$  y de  $CaO$  y la poca variabilidad de  $Na_2O$  sugieren que la plagioclasa ha jugado un papel predominante. Todo esto indicaría, entonces, un fraccionamiento de tipo gábrico ocurrido en el interior de la corteza.

En lo que concierne a la comparación entre los productos pertenecientes a cada una de las unidades estratigráficas del complejo volcánico El Reventador, se observa que los diagramas de variación de los elementos mayores versus  $SiO_2$ , indican una sustancial similitud en sus características químicas y mineralógicas (Figuras 6/19 a 6/24).

Del examen de estos diagramas se puede concluir que las principales diferencias entre las lavas de las diferentes unidades estratigráficas son las siguientes:

- La máxima extensión del campo de variación hacia términos ácidos, se la observa en los productos del Complejo Volcánico Basal que llegan hasta las riolitas. La serie composicionalmente más reducida es la del Volcán El Reventador ( $SiO_2$  variable entre 50,3 y 60,2%); sin embargo, se debe subrayar que el último episodio explosivo del Volcán Paleoreventador, que no ha podido ser analizado debido a la falta de muestras convenientemente frescas, corresponde probablemente a una composición ácida muy evolucionada.



da que estuvo seguida por productos más básicos correspondientes a la parte más profunda de la cámara.

- Los productos andesíticos del Volcán El Reventador presentan un carácter ligeramente más potásico respecto a las andesitas más antiguas. Estas diferencias se desarrollan en un momento crítico del proceso de cristalización, caracterizado por la aparición casi simultánea de ortopiroxeno y anfíbol ( $\text{SiO}_2 = 55\%$ ). El anfíbol se encuentra más difundido en las series del Complejo Volcánico Basal y del Volcán Paleoreventador que en la serie del Volcán El Reventador, sugiriendo probablemente una mayor participación de este mineral en el fraccionamiento de las series antiguas, lo que explicaría la variación de la pendiente de la curva de correlación  $\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  (Figura 6/13).

#### 6.2.2 Condiciones de cristalización de los magmas

##### a. Temperatura

Tal como se ha mencionado anteriormente, la secuencia de cristalización de las fases mineralógicas es diferente para cada tipo de roca.

En el caso de los basaltos, el olivino es el primero en aparecer sobre el líquido magmático; por lo tanto, en estas rocas se ha evaluado la temperatura inicial de cristalización con base en el equilibrio olivino-líquido.

En el Cuadro 6/6 se presentan los valores obtenidos a partir de las ecuaciones de Roeder (1974) y de Leeman y Scheidegger (1977). Esta última versión del geotermómetro asigna valores de temperatura generalmente más altos y, probablemente, más confiables. Algunos valores indicados entre paréntesis en el cuadro mencionado, parecen muy elevados; esto depende de la dificultad de determinar con precisión el contenido de Mn.



Cuadro 6/6

## TEMPERATURAS DE CRISTALIZACION ESTIMADAS POR MEDIO DEL GEOTERMOMETRO OLIVINO-LIQUIDO MAGMATICO

Muestra		t (Mg) (°C)	t (Fe) (°C)	t (Mn) (°C)	t (promedio) (°C)
Basalto (VER)	1)	1.038	1.014	1.029	1.027
	2)	1.110	1.093	1.122	1.108
Basalto (VFR)	1)	1.035	1.047	(1.138)	1.041
	2)	1.108	1.128	(1.212)	1.118

1) Roeder, 1974

2) Leeman y Scheidegger, 1977

En las rocas andesíticas más evolucionadas, la primera fase que aparece sobre el líquido magmático es, probablemente, la plagioclasa; sin embargo, la aparición de todas las fases ocurre en intervalos de temperatura generalmente muy pequeños (unas pocas decenas de grados), Green (1982).

En estas mismas rocas, la presencia del ortopiroxeno y del clinopiroxeno permite obtener una estimación sobre la temperatura de equilibrio de dichas fases mineralógicas. Este valor de la temperatura fue utilizado como una variable independiente para la descripción del equilibrio plagioclasa-líquido magmático que, por lo tanto, depende solo de la presión parcial del agua.

El cálculo de las temperaturas de equilibrio entre los piroxenos (Cuadro 6/7), se lo ha efectuado sobre parejas de núcleos asumiendo la hipótesis que cristalizaron contemporáneamente y utilizando los procedimientos de Wells (1977) y Lindsley (1983). Las temperaturas calculadas mediante los dos métodos presentan una buena concordancia.



Cuadro 6/7

## TEMPERATURAS DE CRISTALIZACION ESTIMADAS POR MEDIO DEL GEOTERMOMETRO DE DOS PIROXENOS

Muestra No.	Descripción	t (LS) (°C)	t (W) (°C)	t (L) (°C)	PH <sub>2</sub> O (bar)	Ptot (bar)
REV-9	Andesita básica (CVR)		997	1.010	1.180	
REV-86	Andesita ácida (CVR)		980	990	1.150	
REV-14	Andesita (VER)		1.032	1.050	920	7.000
REV-95	Basalto (VER)	1.108				
REV-28	Andesita ácida (VPR)		925	910	1.000	
A-02	Basalto (VPR)	1.118				7.260

- T (LS) (según Leeman y Schidegger, 1977)
- T (W) (según Wells, 1977)
- T (L) (según Lindsley, 1983; t computada a 5.000 bar)
- PH<sub>2</sub>O (según Kudo y Weill, 1970)

b. Presión de agua y presión total

El cálculo de la presión del agua (PH<sub>2</sub>O) se lo efectuó a partir de la relación de equilibrio plagioclasa-líquido magmático. En efecto, los datos experimentales permiten evaluar la composición de la plagioclasa en función de la composición del líquido en equilibrio, de la temperatura y de la presión de agua (Kudo y Weill, 1970).

En las rocas andesíticas se ha asumido que la composición de los núcleos básicos de plagioclasa corresponde a la composición de la primera fase sobre el líquido y que, por lo tanto, éstos estarían en equilibrio con el líquido cuya composición es, aproximadamente, la misma de la roca total.

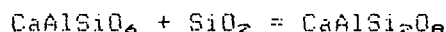
También se tomó la temperatura de equilibrio de los piroxenos, obtenida con el procedimiento de Wells, como la del inicio de la cristalización de la plagioclasa.

Estos datos procesados mediante la ecuación de Kudo y Weill permitieron calcular gráficamente los valores de la presión del agua correspondiente al equilibrio.

Los datos obtenidos se presentan en el Cuadro 6/7. Tal como puede observarse, los valores de presión del agua resultan muy similares en todas las rocas analizadas, ubicándose alrededor de 1.000 bar.

El cálculo de la presión total (Ptot) se lo efectuó con base en la siguiente reacción:





cuya constante de equilibrio,  $K$ , depende tanto de la presión como de la temperatura y se la obtiene de la ecuación de Arculus y Wills (1980).

La actividad de las diferentes fases en equilibrio fueron determinadas con base en los procedimientos de Herzberg (1978) y en un modelo general de solución regular para los líquidos silicáticos propuesto por Ghiorso et al. (1983). Seguidamente, mediante un apropiado programa de cálculo, se determinaron los valores de actividad a diferentes temperaturas para los líquidos seleccionados. Los valores obtenidos y las correspondientes temperaturas fueron posteriormente introducidos en la ecuación de Arculus y Wills que fue resuelta para varios niveles de temperatura y presión.

Los valores de presión y temperatura obtenidos representan la condición de equilibrio de la reacción indicada para las composiciones consideradas (núcleos de los fenocristales).

A partir de estos valores, si se dispone de estimaciones independientes de la temperatura de cristalización derivadas de los geotermómetros anteriormente descritos, es posible determinar los valores de la presión de cristalización de los núcleos de piroxeno y plagioclasa.

El método expuesto se le ha aplicado solo al basalto del Volcán Paleoreventador y a la andesita del Volcán El Reventador. Esta selección es indispensable para evitar que los fenómenos de mezcla, que deben ser invocados para explicar la génesis de algunas secuencias de magmas de El Reventador, introduzcan en la cristalización otros elementos de desequilibrio que no pueden tomarse en cuenta en la reacción antes considerada.

Los resultados obtenidos (Cuadro 6/7), indican valores concordantes y una presión de alrededor de 7.000 bar al inicio de la cristalización, tanto para el basalto como para la andesita. Los mismos resultados se presentan gráficamente en la Figura 6/25.

Una confirmación cualitativa de las estimaciones barométricas efectuadas se la obtiene proyectando todas las muestras analizadas en los diagramas de fase pseudoternarios propuestos por Baker y Eggler (1983), Figuras 6/26 y 6/27.

En el diagrama  $\text{Ql/Di}/(\text{Qz}+\text{Or})$ , los líquidos ubicados sobre la curva cotéctica se encuentran saturados en plagioclasa y magnetita, mientras que en el diagrama  $\text{Pl/Di}/(\text{Qz}+\text{Or})$  lo están en olivino y magnetita.

En conclusión, las rocas de El Reventador delinean una tendencia característica de cristalización fraccionada y sugieren unas condiciones de presión total relativamente alta, próxima a los 8.000 bar.



### c. Contenido de agua

La estimación del valor de la presión del agua efectuada mediante la relación de Kudo y Weill (1970), permite también calcular el contenido de agua en el magma, a través de la metodología propuesta por Nicholls (1980).

A partir de un modelo termodinámico de una solución regular de agua en los fundidos silicáticos, se calcula el valor de la fugacidad del agua, considerando su coeficiente de actividad como una función exclusiva de la composición del fundido anhidro.

El cálculo del porcentaje de agua se lo efectuó introduciendo en un algoritmo apropiado, los valores de la fugacidad del agua, la presión total y la temperatura. Para el cálculo se utilizó una presión total de referencia igual a 7.000 bar.

Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 6/8.

En las andesitas del Complejo Volcánico Basal y del Volcán Paleoreventador se encontraron contenidos de agua (2,2-2,5%) similares entre sí y relativamente elevados, mientras que en las andesitas del Volcán El Reventador, correspondientes a la última erupción del año 1976, el contenido de agua resulta sensiblemente inferior (1,4%).

Cuadro 6/8

#### CONTENIDO DE AGUA EN EL MAGMA

Muestra		t (°C)	P <sub>tot</sub> (bar)	Ph <sub>2</sub> O (bar)	H <sub>2</sub> O (%)
Andesita básica	(CVB)	1.000	7.000	1.150	2,2
Andesita ácida	(CVB)	1.000	7.000	1.150	2,2
Andesita ácida	(VPR)	950	7.000	1.000	2,5
Andesita	(VER)	1.032	7.000	900	1,4

### d. Viscosidad y densidad

A partir de la composición química y del porcentaje de cristales de los productos volcánicos se puede estimar el valor de la viscosidad del magma que los ha generado, en función de la temperatura.

Este cálculo se lo efectúa mediante el algoritmo propuesto por McRirney y Murase (1984) que toma en cuenta la temperatura, la composición de la roca y de la masa fundamental, el porcentaje de fenocristales y su diámetro promedio.

Se ha calculado la viscosidad y densidad para dos lavas andesíticas del Volcán El Reventador y dos lavas basálticas del Volcán El



Reventador y del Volcán Paleoreventador. Los resultados se indican en el Cuadro 6/9.

Los valores de viscosidad calculados para las rocas consideradas como líquidos son muy parecidos entre sí ( $\log \eta = 4,3$  a  $4,8$ ). Al introducir las correcciones por la presencia de las fases cristalinas se produce una mayor variación de los resultados debido, sobre todo, al diferente contenido en fenocristales, lo que también influye sobre la composición del líquido residual.

En la Figura 6/28 se presenta una curva de variación de la viscosidad con respecto a la temperatura para la lava andesítica emitida durante la erupción de 1976. La curva se refiere tanto al magma considerado totalmente líquido, como al que presenta cristales en suspensión.

Los valores de la densidad se calcularon mediante las ecuaciones propuestas por Bottinga et. al. (1982), que permite determinar la densidad de los líquidos aluminosilicáticos en función de su temperatura y composición.

La influencia del agua se la ha evaluado mediante un simple modelo de solución regular para líquidos aluminosilicáticos hidratados que aproxima el comportamiento de estos sistemas hasta contenidos de agua menores al 10% (Burnham y Davis, 1969).

En las lavas andesíticas y andesíticas ácidas del Volcán El Reventador se observa una inversión de los valores entre líquidos anhidros e hidratados. Esto debe ser considerado como una consecuencia del mayor contenido de agua calculado para las lavas andesíticas (1,4%) con relación a las lavas andesíticas ácidas para las que se utilizó el valor obtenido del análisis químico (0,3%).

Cuadro 6/9

VISCOSIDAD Y DENSIDAD DEL MAGMA

Muestra No.	Nombre		SiO <sub>2</sub>	t	Viscosidad		Densidad†	
					líquido	líquido + minerales	líquido anhidro	líquido hidratado
			(%)	(°C)	(log)		(kg/m <sup>3</sup> )	
REV-14	Andesita	(VER)	57,43	1.032	4,8	8,3	2,51	2,46
REV-73	Andesita							
	ácida	(VER)	60,19	1.050	4,8	9,2	2,49	2,48
REV-95	Basalto	(VER)	51,90	1.108	4,4	8,8	2,58	2,56
A-02	Basalto	(VPR)	49,57	1.118	4,3	6,5	2,62	2,60

†: Densidad del líquido anhidro e hidratado a 7.000 bar.



## 7. MODELIZACION DEL SISTEMA ERUPTIVO DEL CONO ACTUAL

Tal como se ha indicado anteriormente, los productos del Volcán El Reventador (VER) presentan un espectro composicional relativamente estrecho, comprendido entre basaltos ( $\text{SiO}_2 = 51,9\%$ ) y andesitas ( $\text{SiO}_2 = 60,2\%$ ).

Con base en los datos obtenidos durante los levantamientos geovulcanológicos de campo, se pudo reconstruir la sucesión temporal de los eventos eruptivos. En el Cuadro 7/1 se presenta la secuencia de emisión de las coladas lávicas (Planos 0209-G-2502 y 0209-G-2505) y una estimación de sus respectivos volúmenes.

Cuadro 7/1

## SECUENCIA DE EMISION Y VOLUMEN DE LAS COLADAS LAVICAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

Denominación de la colada	Muestra No.	Edad	Descripción	Volumen ( $\times 10^6 \text{m}^3$ )
$\alpha 1$	REV-73	reciente	Andesita Ácida	8
$\alpha 2$		reciente	(sin muestra)	30
$\alpha 3$	REV-18	reciente	Andesita	22
$\alpha 4$	REV-19	reciente	Andesita	18
$\alpha 5$	REV-21	reciente	Andesita	14
$\alpha 6$	REV-16	reciente	Andesita basáltica	37
$\alpha 7$	REV-95	reciente	Basalto	20
$\alpha 8$	REV-75	reciente	Andesita basáltica	56
$\alpha 9$	REV-12	años 1972-74	Andesita basáltica	13
$\alpha 10$	REV-14	año 1976	Andesita	18

La variación química en función de la edad relativa de las lavas emitidas muestra una tendencia definida. El grado de evolución disminuye sistemática y paulatinamente desde los productos más antiguos (lava  $\alpha 1$ , andesita ácida), hasta la lava  $\alpha 7$  (basalto), para volver a incrementarse con regularidad hasta los productos más recientes que alcanzan grados de evolución comparables a los que presentan las lavas iniciales (Figura 7/1).

El grado de evolución a partir de la colada  $\alpha 7$  (basalto) hasta la colada  $\alpha 10$  (andesita) corresponde a una tendencia controlada por un proceso de cristalización fraccionada de la plagioclasa y de los



minerales máficos, tal como lo sugieren los diagramas de variación de los elementos mayores (Figuras 7/2 y 7/3).

El tramo que presenta una evolución inversa, entre la colada  $\alpha 1$  y la colada  $\alpha 7$ , no puede ser explicado a través de un simple modelo de diferenciación por cristalización fraccionada. El progresivo incremento de la basicidad de los productos emitidos sugiere que el aporte de magma básico en la cámara de alimentación superficial se ha vuelto cada vez más importante y, por lo tanto, debe considerarse que el sistema tiene una realimentación periódica.

En consecuencia, los dos tipos de evolución, directa e inversa, pueden ser descritos y modelizados como dos sistemas; uno cerrado hacia abajo, desde la colada  $\alpha 7$  hasta la  $\alpha 10$  y otro abierto, desde la colada  $\alpha 1$  hasta la  $\alpha 7$ .

a. Sistema cerrado. Evolución por cristalización fraccionada

Los cálculos del balance de masa, efectuados con base en el programa de Stormer y Nichols (1978) utilizando las composiciones de las fases realmente presentes como fenocristales, indican que el fraccionamiento gábrico satisface las variaciones encontradas (Figura 7/4 y 7/2).

A-02 = Basalto VFR  
 REV-95 = Basalto VER, colada  $\alpha 7$   
 REV-75 = Andesita basáltica VER, colada  $\alpha 8$   
 REV-12 = Andesita basáltica VER, colada  $\alpha 9$   
 REV-14 = Andesita VER, colada  $\alpha 10$   
 REV-73 = Andesita ácida, colada  $\alpha 1$

Cuadro 7/2

MODELO DE CRISTALIZACION FRACCIONADA PARA LOS PRODUCTOS MAS RECIENTES DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

Colada		Ol	Pl	Cpx	Opx	Mt	Hb	% Sol	r2
desde	hasta								
Basalto VFR	$\alpha 7$	13,7	70,8	2,9		12,6		23,5	0,01
$\alpha 7$	$\alpha 8$	11,5	68,2	11,4		9,0		22,5	0,96
$\alpha 8$	$\alpha 9$	22,2	44,2	24,5		9,1		6,8	0,01
		8,9	23,8			4,8	62,5	7,0	0,02
$\alpha 9$	$\alpha 10$		71,0	8,7	11,8	8,5		18,1	0,14
			59,1			5,7	35,2	16,5	0,07
$\alpha 10$	$\alpha 1$		72,4		17,9	9,7		18,6	0,56
			57,9			7,9	34,2	16,7	0,52

Ol = olivino  
 Pl = plagioclasa

Cpx = clinopiroxeno  
 Opx = ortopiroxeno

Mt = magnetita  
 Hb = hornblenda



La confiabilidad del ajuste es óptima, tal como lo evidencian los valores muy bajos de la suma de los cuadrados de las diferencias entre las composiciones observadas y calculadas ( $r_2$ ).

El modelo de fraccionamiento impone la presencia, entre los minerales máficos, del olivino, en los primeros estadios; del clinopiroxeno y del ortopiroxeno en los estadios intermedios y, finalmente, del ortopiroxeno en los últimos. Esta secuencia de fases concuerda perfectamente con la presencia observada de los fenocristales.

Los resultados del cálculo ponen en evidencia que el modelo no puede excluir la presencia del anfíbol únicamente en la transición de los términos más evolucionados. De cualquier forma, la presencia de la hornblenda parece poco probable porque excluiría del fraccionamiento a los piroxenos, que siempre constituyen las fases máficas mucho más abundantes.

#### b. Sistema abierto. Evolución por realimentación y mezcla

La secuencia composicional inversa que varía entre los términos más y menos evolucionados y que se observa en el primer periodo de actividad del volcán, podría describirse a través de un modelo de cámara magmática afectada por un proceso de cristalización fraccionada a la que, periódicamente, se adiciona un líquido más básico.

Las variaciones composicionales del magma en la cámara pueden determinarse mediante un programa de simulación desarrollado por Conrad (1987), que se basa en las ecuaciones propuestas por De Paolo (1981). Este programa permite describir la evolución composicional del magma y de las fases en equilibrio durante una serie de ciclos de fraccionamiento, mezcla con magma primitivo y erupción (Figura 7/5).

Los datos de salida (output) son: la composición del magma y de las fases en equilibrio al final de cada ciclo de fraccionamiento y mezcla, para un determinado número de ciclos establecidos al inicio.

En el modelo estudiado se adoptó como composición inicial del magma contenido en la cámara, la de la colada 41 y como composición del magma agregado al sistema, la de uno de los basaltos del Volcán Paleoreventador más primitivos encontrados durante el muestreo. La naturaleza y composición de las fases fueron seleccionadas con base en la mineralogía observada (Cuadro 7/3).

Con el objeto de reproducir las variaciones químicas observadas, se establecieron dos ulteriores hipótesis:

- A cada llegada de magma primario al interior de la cámara (Z) corresponde una erupción (Y) de igual volumen ( $Y = Z$ ).
- El número de los ciclos de fraccionamiento-inyección-mezcla-erupción es igual al de las erupciones de lavas observadas en el tramo modelizado.



CUADRO 7/3

MODELO DEL SISTEMA DE ALIMENTACION DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)  
(Realimentación-mezcla-fraccionamiento-emisión)

CICLOS ERUPTIVOS MODELIZADOS										
Elementos mayores	Magma inicial Colada α1	Magma de realimen- tación Basalto VPR	I		II		III		IV	
			Calculado	Observado	Calculado	Observado	Calculado	Observado	Calculado	Observado
			Colada α4		Colada α5		Colada α6		Colada α7	
SiO <sub>2</sub>	60.75	49.92	58.21	59.39	56.17	57.28	54.49	54.97	51.72	52.29
TiO <sub>2</sub>	0.66	1.13	0.78	0.71	0.86	0.82	0.94	0.93	1.06	1.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.55	20.58	18.93	18.73	19.33	18.60	19.66	19.28	20.22	19.78
FeO*	5.16	9.43	6.42	5.96	7.18	6.78	7.80	7.29	8.78	7.92
MnO	0.13	0.18	0.14	0.14	0.15	0.13	0.15	0.15	0.16	0.15
MgO	2.25	4.57	2.72	2.35	3.16	3.28	3.52	3.77	4.14	4.20
CaO	5.86	9.11	6.52	5.89	7.12	6.71	7.62	7.42	8.50	8.50
Na <sub>2</sub> O	4.41	3.86	4.28	4.54	4.19	4.36	4.12	4.41	3.98	4.49
K <sub>2</sub> O	1.98	0.90	1.75	2.00	1.56	1.75	1.39	1.47	1.10	1.21
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.34	0.27	0.28	0.29	0.28	0.31	0.31	0.34	0.34
MgV*	0.47	0.58	0.46	0.44	0.47	0.49	0.48	0.51	0.49	0.52
OI*	58.73	37.82	52.67	57.01	47.82	50.98	43.82	45.92	40.18	44.92

\*: En la base de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO = 0.15

## NOTAS:

- Para calcular los ciclos eruptivos modelizados I, II, III, se asumió:

Op<sub>x</sub> = Cpx = 0.02  
 Pl = 0.01  
 Mt = 0.01  
 X = 0.15  
 Y = Z = 0.2

- Para calcular el ciclo eruptivo modelizado IV, se asumió

OI = Cpx = 0.025  
 Pl = 0.15  
 Mt = 0.02  
 X = 0.22  
 Y = Z = 0.5



Debido a que el proceso evolutivo entre la colada  $\alpha 3$  y la colada  $\alpha 4$  resulta anómalo, en el tramo entre la colada  $\alpha 1$  y la colada  $\alpha 4$ , se ha asumido para simplificar un solo ciclo de inyección-erupción.

A partir del examen del modelo elaborado se evidencia que la mejor coincidencia entre valores calculados y observados se la obtiene con la adición de un 20% de magma profundo respecto al contenido existente en la cámara en el tramo comprendido entre las coladas  $\alpha 1$  y  $\alpha 6$ . En cambio, para la transición hacia términos menos evolucionados (colada  $\alpha 7$ ) es necesario la adición de magma profundo hasta en un 50%.

### c. Modelo de alimentación

Los datos disponibles permiten formular un modelo de alimentación del volcán actual que se caracteriza por los siguientes elementos básicos:

- La serie principal de los productos del Volcán El Reventador (VER) se ha generado por un fraccionamiento del tipo gábrico, a una profundidad cortical ( $P_{tot} = 7.000 \text{ bar}$ ).
- El cono actual se encuentra alimentado por una cámara magmática superficial dentro de la cual se verifican los procesos de cristalización fraccionada y de mezcla por inyección de magma profundo.
- La emisión del basalto de la colada  $\alpha 7$  corresponde a una inversión de la tendencia de evolución del volcán que, a partir de este punto empieza a producir magmas siempre más evolucionados con el transcurso del tiempo. El período evolutivo más reciente puede describirse como un sistema cerrado por debajo y, por lo tanto, sin realimentación, que evoluciona progresivamente por efecto de la cristalización fraccionada.
- La determinación de los volúmenes de los magmas emitidos por el volcán y la estimación de sus porcentajes en peso, permiten evaluar el orden de magnitud de los volúmenes de la cámara magmática de El Reventador durante el período en el que estuvieron activos los procesos de mezcla.

Asumiendo un volumen promedio de  $25 \times 10^6 \text{ m}^3$  para las andesitas emitidas en esta fase (Cuadro 7/1) y una densidad de  $2,6 \text{ kg/m}^3$ , se obtiene un volumen inicial de la cámara de  $125 \times 10^6 \text{ m}^3$ , aproximadamente, (Y promedio = 20%). Además, el modelo prevé que el volumen de la cámara que contiene el líquido vaya reduciéndose en cada ciclo hasta llegar a la mitad, al final del cuarto ciclo.

En lo que se refiere al período evolutivo más reciente, con una tendencia de evolución directa y asumiendo que el sistema no haya sido realimentado, los procesos modelizados imponen una ulterior



reducción del volumen de la cámara magmática en un 50%. En conclusión, el volumen de magma actualmente presente debería ser de alrededor de  $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Suponiendo, para simplificar, una geometría esférica de la cámara, su radio debería ser igual a unos 200 m.



## 8. EVALUACION DEL RIESGO VOLCANICO

Conforme a lo preconizado por la UNESCO (1971), el riesgo se define como la posibilidad de una pérdida que pueda afectar a la vida humana, la propiedad, o la capacidad productiva y se lo expresa como el producto de tres factores: valor, vulnerabilidad y peligrosidad.

El valor puede expresarse a través del número de vidas humanas o el costo material de una propiedad o de la capacidad productiva que estarían expuestas a un determinado peligro.

La vulnerabilidad es una medida de la proporción del valor, antes definido, que podría perderse por efecto de un determinado evento.

La peligrosidad, podría definirse como la probabilidad que una zona determinada pueda ser afectada, dentro de un determinado período, por un fenómeno destructivo. Por lo tanto, en Vulcanología la peligrosidad representa una función compleja de la probabilidad de que un volcán produzca un determinado tipo de erupción y que esta erupción llegue a afectar a una zona determinada.

La evaluación cuantitativa de la peligrosidad resulta normalmente muy difícil debido a la imposibilidad de conseguir suficientes datos para efectuar un análisis estadístico confiable respecto al comportamiento eruptivo del volcán. De todos modos, esta evaluación requiere de una reconstrucción precisa de la historia eruptiva del volcán a partir de la cual podrían obtenerse indicaciones respecto a los diferentes tipos esperados de los eventos eruptivos, para que estos puedan evaluarse en función de la vulnerabilidad potencial ligada a cada uno de ellos.

### 8.1 Actividad histórica del Volcán El Reventador (VER)

Los datos históricos sobre la actividad del Volcán El Reventador son, desafortunadamente, muy escasos.

Debido a su difícil acceso y su posición aislada y lejana respecto a los centros poblados, el volcán fue oficialmente descubierto solo en el año 1931 (Paz y Miño L. et.al, 1931).

Basándose en las crónicas sobre caídas de cenizas y bramidos que aparentemente, se originaban en la zona de El Reventador, Hantke y Parodi (1966) efectuaron una reconstrucción bibliográfica sobre la actividad del volcán a partir del año 1541. Hall (1977 y 1980) revisó la historia y estimó que entre 1541 y 1926 ocurrieron, con certeza, por lo menos 14 erupciones.



Almeida y Cruz (1986) consideran confiables solo los datos posteriores a la erupción de 1744; a partir de esto se destacan dos periodos de intensa actividad volcánica (1955-1960 y 1972-1976).

Como resultado de una corta investigación de campo, orientada a la recopilación de datos sobre la sismicidad histórica del Área del Proyecto, se pudo determinar que el 8 de junio de 1960 el volcán produjo una erupción cuya caída de cenizas en la población de el Chaco, ubicada a 30 km al SSE del volcán, hizo que se ocultara el sol durante un lapso de tres horas (07 a 10 a.m.).

Solamente las dos últimas erupciones de este volcán han podido ser observadas y descritas por geólogos (Hall, 1977 y 1980). Con base en las informaciones inherentes a la actividad histórica y a los resultados de los levantamientos geovulcanológicos de campo, resulta que los eventos que deben considerarse para evaluar la peligrosidad relacionada con la actividad de El Reventador, son los siguientes:

a. Actividad efusiva.

b. Actividad explosiva:

- caída de productos piroclásticos
- flujos piroclásticos
- explosiones freáticas
- deslizamientos en masa

Además, se deberán considerar cuidadosamente los peligros relacionados con la inestabilidad de las laderas del volcán, aún cuando estos fenómenos no necesariamente tienen una relación directa con la actividad volcánica.

Los resultados del estudio geológico han permitido establecer que el complejo volcánico de El Reventador está conformado por tres distintos aparatos que se desarrollaron en periodos sucesivos.

La actividad de los primeros dos aparatos, el Complejo Volcánico Basal (CVR) y Volcán Paleoreventador (VPR), concluyó con dos enormes fenómenos de deslizamiento en masa (avalanchas) asociados con violentas erupciones piroclásticas y un probable colapso caldérico. El último deslizamiento ocurrió hace 19.000 años y originó el anfiteatro actual, dentro del cual se ha desarrollado el cono del Volcán El Reventador (VER). En consecuencia, parece lógico evaluar la peligrosidad eruptiva tomando como referencia solamente al volcán actual; es decir dentro de un periodo de alrededor de 19.000 años y sin considerar a los fenómenos eruptivos precedentes.

En efecto, no existe ninguna probabilidad de que en el lapso de vida útil de las obras del Proyecto, se produzcan fenómenos diferentes a los que ocurrieron en los últimos 19.000 años.

A continuación se examinan los aspectos de la peligrosidad, asociados con los eventos volcánicos de El Reventador.



## 8.2 Peligros relacionados con la actividad efusiva

La emisión de flujos de lava representa, sin duda, el tipo de actividad eruptiva predominante. En efecto, las coladas lávicas constituyen la mayor parte del cono actual y de las paredes del anfiteatro; además, amplios "campos de lava" se superponen en el interior de la depresión formada por el anfiteatro.

La distancia recorrida por las coladas lávicas más recientes varía entre 3 y 6 km; es decir que todas las coladas identificadas se mantienen en el interior del anfiteatro sin llegar a sobrepasar el alto morfológico formado por los materiales de la última avalancha.

Solamente tres coladas han superado esta barrera y descendido a lo largo de los ríos Marker, Reventador y Engaño. A lo largo de este último alcanzaron el punto más bajo que corresponde aproximadamente a la cota 1.700 (a 6 km del cráter), mientras que en el río Reventador se detuvieron en la cota 1.900 (a 4,5 km del cráter).

Los frentes más distantes de las coladas lávicas se encuentran alejados del río Coca entre 2 y 2,5 km, mientras que el alto morfológico está a 3,5-4 km de este mismo río.

Los flujos que han logrado superar el alto morfológico de la avalancha, ubicado a unos 4-5 km del cráter central, aprovecharon la mayor pendiente que adquieren las quebradas después de haber rebasado la barrera del borde del anfiteatro.

Los volúmenes de los flujos de lava que superaron el borde oriental sobre-elevado del anfiteatro son siempre modestos. En consecuencia, se podría suponer que los caudales efusivos de todas las erupciones lávicas del VER han sido siempre relativamente pequeños y de iguales características; esto explicaría el por qué los flujos alcanzaron solamente distancias del orden de 3-4 km.

Los datos actualmente disponibles no permiten evaluar con seguridad el caudal de emisión característico de las erupciones efusivas de El Reventador; en consecuencia, solo se puede intentar una evaluación de máxima.

A partir de los mapas y perfiles geológicos que se adjuntan a este informe, se puede estimar el volumen del cono actual, edificado en los últimos 19.000 años, en  $5.000 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Asumiendo una densidad de  $2,2 \text{ kg/m}^3$  para el material sólido que constituye el volcán y de  $2,5 \text{ kg/m}^3$  para el líquido magmático medio eruptado, se calcula un volumen total de  $4.400 \times 10^6 \text{ m}^3$  de magma, que proporcionaría un valor muy bajo del caudal efusivo medio anual ( $0,23 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ ) durante los últimos 19.000 años.

Esto representa obviamente un valor mínimo que está muy alejado de los que se verifican durante las erupciones, aunque también podría indicar una frecuencia de erupciones relativamente baja.



El caudal emitido durante una erupción del volcán podría estimarse, aunque en forma bastante incierta, tomando como referencia la última erupción de 1976. Dicha incertidumbre se deriva de la falta de datos fidedignos sobre la duración exacta de la erupción y, especialmente, sobre su terminación y las eventuales interrupciones que pudieron presentarse en la alimentación lávica. Hall (1980) reporta que la emisión terminó en tres semanas. Asumiendo un volumen de lava estimado por métodos geológicos en  $11,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  y una duración de la actividad de 21 días, se ha calculado un caudal promedio diario de  $0,6 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$  (PETROTRANSPORTE, Universidad Central, 1991).

Como dato referencial se indica que este valor resulta inferior a los caudales medios de los flujos lávicos del volcán Etna, Italia, para los cuales se ha estimado un valor de  $0,86$  a  $1,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$  en la erupción del año 1983 (Barberi F., comunicación personal).

Estos bajos valores del caudal de emisión de magma justifican la distancia relativamente corta recorrida por los flujos lávicos. Se debe considerar además, la dificultad que representa la elevada viscosidad de las lavas de El Reventador (Cuadro 6/9) la que también depende de su avanzado grado de cristalización. Como es notorio, el incremento de la viscosidad está relacionado con:

- a. La presencia de fases sólidas que obstaculizan el flujo.
- b. La variación hacia términos ácidos de la composición del líquido residual.
- c. La temperatura relativamente baja.

En conclusión y tomando en cuenta que:

- a lo largo de toda la historia eruptiva de El Reventador actual (19.000 años) ninguna colada lávica ha llegado hasta el cauce del río Coca,
- los datos químicos y petrológicos indican claramente una tendencia evolutiva reciente hacia términos progresivamente más ácidos y, por lo tanto, más viscosos.

Se considera poco probable que los flujos de lava que llegue a emitir el cono actual puedan alcanzar los sitios de las obras del Proyecto, independientemente del tiempo que se tome para evaluar su factibilidad.

La prosecución de la misma tendencia evolutiva hacia composiciones progresivamente más ácidas, que se ha observado en el último período eruptivo, haría disminuir ulteriormente la posibilidad de que los flujos lávicos recorran grandes distancias, debido al incremento de la viscosidad. Para que éstos puedan alcanzar el río Coca se requeriría un cambio muy importante en las condiciones del volcán, lo que solo sería posible por una fuerte alimentación de magma básico profundo y el subsiguiente incremento del caudal de emisión. En el



pasado, el Volcán El Reventador (VER) ha emitido lavas muy básicas de origen seguramente profundo (la colada 07), pero, no obstante, el caudal de emisión permaneció siempre bajo.

En conclusión, considerando que en los últimos 19.000 años ningún flujo lávico ha alcanzado el río Coca, resulta sumamente improbable que esto pueda ocurrir en el futuro. De todos modos, cualquier importante ascenso de magma profundo podría ser detectado rápidamente a través de una eficiente red instrumental de monitoreo del volcán.

### 8.3 Peligros relacionados con la actividad explosiva

#### a. Caída de materiales piroclásticos

La componente explosiva de las últimas erupciones históricas de El Reventador consiste, fundamentalmente, en proyecciones balísticas de bombas y fragmentos lávicos y en la emisión de ceniza a la atmósfera; trátase por consiguiente de una actividad de tipo estromboliano.

Aparte del problema relacionado con la formación de flujos piroclásticos, que será tratado en el próximo párrafo, el fenómeno más frecuentemente asociado con las erupciones de El Reventador es la caída de materiales piroclásticos de granulometría muy variable. Los fragmentos más gruesos; bombas, bloques y lapilli, caen en proximidad del cráter, dentro de una zona completamente deshabitada y, por lo tanto, podrían constituir un peligro solo para las personas que estén casualmente presentes en las cercanías o bien para los instrumentos científicos que eventualmente se hubieren instalado.

Más complicado resulta el caso de los materiales piroclásticos finos, arenas y cenizas, que pueden ser transportados a grandes distancias desde el centro de emisión.

La energía de la erupción, que determina la altura de la columna eruptiva, la tasa de emisión, la granulometría, la concentración y densidad de las partículas piroclásticas, junto con la dirección y velocidad del viento en varias cotas, son los principales parámetros que influyen sobre la distribución de los depósitos piroclásticos de caída. La mayoría de estos datos no son bien conocidos para las erupciones de El Reventador.

La evidencia geológica y fotogeológica indica que los materiales piroclásticos de caída provenientes del volcán, se distribuyen predominantemente al oeste del cráter, tal como lo confirman las frecuentes informaciones sobre la caída de cenizas de El Reventador en la ciudad de Quito.

Con el objeto de elaborar mapas de distribución de los productos piroclásticos se ha procedido a realizar una modelización del fenómeno de caída en condiciones asumidas como las más próximas a las que, probablemente, existen en área del volcán, a través del método de Armienti et.al, (1987).



Los parámetros utilizados para esta simulación son los siguientes:

- vientos
- altura de la columna eruptiva
- masa emitida
- velocidad de caída en la columna
- coeficiente de difusión
  
- Vientos

Se ha utilizado un campo de vientos de procedencia oriental, con una componente meridional de velocidad nula, asumiendo una velocidad igual en todas las cotas.

Los valores promedio de la velocidad del viento se obtuvieron de los promedios relativos a la circulación atmosférica en regiones tropicales (Newell et.al, 1972).

Los datos que dispone INECEL se refieren a los valores promedio de la velocidad del viento, medidos sobre el suelo, que están en el orden de 0,5 m/s. (INECEL 1984) y no influyen en la distribución de las cenizas.

Considerada la dispersión de las cenizas provenientes de El Reventador actual, que han llegado hasta Quito, a 95 km al oeste del volcán, se ha procedido a efectuar simulaciones de la caída de productos piroclásticos (Figura 8/1) asumiendo valores de velocidad del viento de 5, 10 y 20 m/s. En efecto, velocidades de 5-7 m/s son comunes cerca del ecuador terrestre, en cotas superiores a los 1.500 m, según como se indica en el Cuadro 8/1 (Newell et.al, 1972). El valor de 20 m/s puede considerarse como el límite superior para esta zona.

Cuadro 8/1

VELOCIDAD DEL VIENTO

(Componente horizontal; procedencia este; latitud 0°00')

P (mbar)	H (km)	Velocidad (m/s)	
		Diciembre-Febrero	Junio-Agosto
1.000	0,0	1,8 - 1,9	1,6 - 1,9
850	1,5	2,5 - 4,1	2,4 - 3,2
700	3,0	3,1 - 4,6	3,2 - 4,2
500	6,0	3,0 - 5,3	5,0 - 4,8
300	10,0	1,4 - 6,5	6,7 - 6,2



- Altura de la columna eruptiva

Para las simulaciones del fenómeno se ha asumido una columna eruptiva de 5 km de altura y una masa total de piroclastos de  $4 \times 10^{10}$  kg, con un viento oriental de velocidad variable. Las isomasas están expresadas en kg/m<sup>2</sup>.

La distribución de la masa piroclástica en el interior de la columna se la ha calculado en base a la fórmula de Armienti et.al, 1987.

- Masa emitida y velocidad de caída en la columna

Con base en las consideraciones sobre el modelo de alimentación del volcán, se obtuvo que la masa total de magma presente en la cámara somera puede ser estimada en  $4 \times 10^{10}$  kg.

Este valor representa el límite máximo apreciable para una erupción del Volcán El Reventador que sería muy difícilmente alcanzable porque implicaría un completo vaciamiento de la cámara y su emisión total como material piroclástico fragmentado.

Una reducción de este límite en un orden de magnitud haría que se aproxime más a los máximos valores probables para las erupciones características del volcán.

Para la modelización del fenómeno se ha repartido la masa piroclástica en cuatro diferentes clases granulométricas, correspondientes a cuatro distintas velocidades de caída (Cuadro 8/2).

Cuadro 8/2

DISTRIBUCION PORCENTUAL DE LA MASA PIROCLASTICA

Clases Granulométricas	Velocidad de caída (m/s)	Distribución en peso (%)
-1	3,4	5
0	2,4	15
1	1,7	60
2	1,2	20

Las velocidades de caída fueron calculadas analíticamente considerando altos valores del número de Reynolds y asumiendo una densidad de 2,0 kg/m<sup>3</sup>, igual para todas las clases granulométricas y un factor de forma de 3,6 al tratarse de escorias, piedra pómez y lapilli (Armienti et.al, 1987).



- Coefficiente de difusión

Considerando que la distancia recorrida por las cenizas en las erupciones anteriores es del orden de algunas decenas de kilómetros, se ha asumido un coeficiente de difusión de 2.000 m<sup>2</sup>/s (Macedonio et.al, 1987).

b. Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación de la caída de los productos piroclásticos se presentan gráficamente en la Figura 8/1, como un valor total del depósito correspondiente a la sumatoria de las cuatro clases granulométricas consideradas. Las curvas indican isomasas expresadas en kg/m<sup>2</sup>.

Así también, en el Cuadro 8/3 se indican los valores de concentración de los productos piroclásticos sobre el suelo, a varias distancias a sotavento del cráter, al variar la velocidad del viento y la masa en la columna.

Cuadro 8/3

CONCENTRACION SOBRE EL SUELO DE LOS DEPOSITOS PIROCLASTICOS DE CAIDA

Velocidad del viento (m/s)	Concentración a 10 km a sotavento del cráter			
	Masa en la columna (kg)			
	a) 4 x 10 <sup>10</sup>		b) 4 x 10 <sup>9</sup>	
5	200	kg/m <sup>2</sup>	20	kg/m <sup>2</sup>
10	100	kg/m <sup>2</sup>	10	kg/m <sup>2</sup>
20	68	kg/m <sup>2</sup>	6,8	kg/m <sup>2</sup>

Velocidad del viento (m/s)	Concentración a sotavento del cráter			
	a 20 km		a 45 km	
	Masa a)	Masa b)	Masa a)	Masa b)
5	50	kg/m <sup>2</sup>	5	kg/m <sup>2</sup>
	10	kg/m <sup>2</sup>	1	kg/m <sup>2</sup>

Los resultados indican que, aún en el caso más desfavorable, con vientos de 5 m/s procedentes del oriente y abundante masa de material emitido, que representan condiciones muy poco probables para el volcán El Reventador, la concentración, sobre el suelo, del material piroclástico en el área estudiada a unos 10 km del cráter, no debería causar ningún daño a las obras existentes y proyectadas.

Se considera por lo tanto despreciable el peligro relacionado con la caída de material piroclástico.



c. Flujos piroclásticos

Hall (1977) reporta la siguiente descripción de la nube eruptiva del Volcán El Reventador durante la erupción de 1976:

"5 de enero: una columna de ceniza, de color café y de diámetro muy estrecho, ascendió violentamente del cráter, la cual mantuvo su forma hasta posiblemente 500 m antes de expandirse en una nube en forma de cúmulos, para luego ser llevado hacia el oeste".

"9 de enero: la columna de ceniza, de color café rojizo, ascendió unos 1.000 a 1.500 m sobre el cráter ...".

"27 de enero: ... eyección explosiva de una nube gris oscura. Después de que la nube había subido unos 600 m, se observó que dos nubes ardientes, de color café rojizo, se desprendieron desde la base de la columna oscura y descendieron violentamente por el flanco nororiental".

Esta descripción corresponde a la de un "jet" volcánico típico de la actividad explosiva, constituido por una nube de gases cargada de partículas piroclásticas ("color café-rojizo o gris oscuro") que forma una columna eruptiva donde, episódicamente, se alcanzan las condiciones para un colapso gravitatorio y, consecuentemente, para la formación de peligrosos flujos piroclásticos (Sparks et.al, 1978).

La altura máxima que alcanza la columna eruptiva es proporcional a la tasa de emisión.

El colapso de la columna se facilita por la disminución del contenido de gases y por el ensanchamiento del conducto (Wilson et al, 1980). Estos fenómenos ocurren normalmente durante las erupciones de mayor energía (subplinianas o plinianas).

Sin embargo, las descripciones de Hall indican que las condiciones favorables para el colapso de la columna eruptiva se alcanzaron por lo menos una vez durante la erupción del año 1976.

Un depósito con las características de una colada piroclástica, parcialmente recubierto por las lavas más recientes, fue identificado durante el mapeamiento geovolcanológico de detalle (coordenadas 9°58'50" N - 78°24'50" E).

Extensos flujos piroclásticos se produjeron al finalizar la actividad del Volcán Paleoreventador. Sin embargo, el aparato actual no presenta las condiciones necesarias para que se produzcan erupciones piroclásticas de esta magnitud.

De todas maneras, aún admitiendo que los fenómenos de este tipo sean modestos y escasos en la actividad del Volcán El Reventador, se consideró oportuno evaluar su peligrosidad.



Para tal efecto se adoptó el modelo del cono de energía (Sheridan 1980) y la modelización elaborada por Armienti y Pareschi (1987).

Con base en estos modelos, la distancia recorrida por los flujos piroclásticos originados por el colapso gravitacional de una columna eruptiva y su capacidad de rebasar obstáculos morfológicos, depende de la inclinación y de la altura del cono de energía; es decir de la distancia vertical entre el cráter y la altura alcanzada por el "gas thrust".

A partir de las descripciones de Hall referentes a la erupción del año 1976, se han asumido los valores de 600 y 1.500 m como la mínima y máxima altura de la columna eruptiva.

La distancia máxima recorrida por los flujos piroclásticos se la estimó en 4,5 km a partir del cráter, hasta alcanzar la cota de 1.500 m por debajo del cráter actual.

Con estos datos la inclinación del cono de energía resulta ser de 25° y 34°, respectivamente, (Cuadro 8/4).

Con el mismo método se ha calculado la inclinación del cono de energía que se requeriría para que un flujo piroclástico alcance el área del campamento San Rafael, ubicado a 8 km del cráter, que representa una zona de relevante interés para las infraestructuras existentes y proyectadas. Los valores de altura de la columna se mantuvieron iguales a los que se utilizaron en los casos precedentes. En este caso el ángulo de inclinación del cono debería ser de 19° y 24°, respectivamente (Cuadro 8/5).

Cuadro 8/4

#### INCLINACION DEL CONO DE ENERGIA

Altura de la columna (m)	Distancia entre el cráter y el frente del flujo piroclástico (km)	Inclinación del cono (grados)
600	4,5	25
1.500	4,5	34

Manteniendo iguales los valores de altura de la columna y con el mismo método, se ha calculado la inclinación del cono de energía requerida para que un flujo piroclástico llegue a alcanzar el área del campamento San Rafael, ubicado a 8 km del cráter, que constituye una zona de relevante interés para el Proyecto. Se llegó a determinar que, en este caso, el ángulo de inclinación del cono debería ser igual a 19 y 24°, respectivamente.



No obstante, estos resultados requieren de un comentario adicional.

En la literatura se reportan valores del ángulo de inclinación del cono de energía comprendidos entre  $35^\circ$  y  $37^\circ$ . Los ángulos pequeños, inferiores a  $10^\circ$ , se les ha observado solamente en erupciones de gran energía, con depósitos muy extensos que alcanzaron distancias superiores a los 20 km.

Para el caso de los flujos piroclásticos que alcanzaron distancias comprendidas entre 2 y 15 km, se determinaron conos de energía con ángulos comprendidos entre  $17^\circ$  y  $36^\circ$ .

En consecuencia, se podría deducir que, para que un flujo piroclástico originado por el colapso de una columna eruptiva alcance el campamento San Rafael, se requiere que ésta sea relativamente alta, con una energía y caudal de alimentación mayores a los que han caracterizado a la actividad histórica de El Reventador.

Erupciones más modestas, con columnas de unos 600 m de altura, pueden generar flujos piroclásticos cuyos conos de energía presentan ángulos relativamente grandes y, por lo tanto, pequeñas distancias recorridas. En efecto, no se ha observado ningún depósito de flujo piroclástico fuera del anfiteatro; también las nubes ardientes, descritas por Hall (1977), terminaron a corta distancia del cráter.

Para columnas eruptivas de unos 600 m de altura, solo valores inusualmente bajos (inferiores a  $20^\circ$ ) del ángulo de inclinación del cono de energía, podrían representar un peligro para la zona en estudio o, de modo general, para el valle del río Coca. En la literatura no existen ejemplos de ángulos tan bajos en erupciones de pequeña energía, como las de El Reventador actual.

La probabilidad de que ocurra un evento similar a éste es, por lo tanto, muy baja aún si es que se confirma la tendencia del volcán a producir magmas siempre más evolucionados y, consecuentemente, con una mayor potencialidad explosiva.

Para complementar la evaluación de la peligrosidad debida a los flujos piroclásticos se ha procedido a simular el área que estaría afectada por estos en cada uno de los cuatro casos considerados (Cuadro 8/5).



Cuadro 8/5

## INCLINACION DEL CONO DE ENERGIA ADOPTADO EN LA SIMULACION

Altura del cono (m)	Inclinación del cono (grados)
600	25
600	19
1.500	34
1.500	24

Con el fin de considerar los efectos de la morfología, se digitalizó la topografía del volcán. Los resultados de la simulación elaborada según el modelo de Armienti y Pareschi (1987) se presentan en las Figuras 8/2 y 8/3, junto con los datos sobre el espesor de los depósitos a lo largo de los perfiles preseleccionados.

En dichas figuras se presentan también las cotas digitalizadas del edificio volcánico; la línea sinuosa blanca es el límite máximo que alcanzarán los depósitos piroclásticos. En los perfiles topográficos que aparecen en la parte superior de cada figura, el color oscuro representa el espesor del depósito de caída a lo largo de la línea indicada del perfil.

#### d. Explosiones freáticas

En el fondo del cráter del volcán actual se han reconocido una decena de cavidades de pequeño diámetro (5 a 20 m) en cuyo alrededor se observa una ligera acumulación de fragmentos y bloques (Plano 0209-G-2506). Se trata de pequeños cráteres originados por explosiones freáticas de energía muy baja.

Estas explosiones ocurren cuando la presión de los fluidos (vapor y gases) que se encuentran confinados en el subsuelo bajo una cobertura impermeable, supera a la carga litostática.

En el caso de El Reventador se trata de explosiones de pequeña energía que ocurren debido a la acumulación de los fluidos que forman las fumarolas por debajo de una delgada capa impermeabilizada por fenómenos de autosellamiento.

Debido a su baja energía, estos fenómenos no representan ningún peligro para los sitios ubicados fuera del área del cráter. Se les menciona únicamente debido a que podrían constituir un peligro para los técnicos que tengan que trabajar dentro del cráter, o bien porque podrían afectar a los equipos de monitoreo que se instalen en la zona cratérica.

#### e. Deslizamientos en masa



Todas las unidades del complejo volcánico El Reventador contienen abundantes depósitos de material deslizado, retrabajado y retransportado, de muy distinta naturaleza y origen.

Considerando la importancia que reviste un reconocimiento exacto sobre la naturaleza de estos depósitos dentro del proceso de evaluación de los riesgos asociados, en el curso de los trabajos de campo se adoptó la siguiente nomenclatura aplicable para los tres más importantes fenómenos de este tipo.

- Avalanchas de escombros

Constituyen gigantescos deslizamientos en masa que ocurren debido a la inestabilidad de los edificios volcánicos con fuertes pendientes y un considerable porcentaje de materiales piroclásticos. Estos deslizamientos pueden o no estar relacionados con movimientos sísmicos. Sus depósitos presentan, en diversos puntos, paquetes donde puede reconocerse la estructura volcánica original; es decir, intercalaciones de lavas con materiales piroclásticos (en general retrabajados) que forman un conjunto muy fracturado.

En la descripción geológica del volcán se ha visto como dos grandes fenómenos de deslizamiento en masa que produjeron gigantescos depósitos de avalanchas de escombros, han afectado, a su turno, a los edificios del Complejo Volcánico Basal y del Paleoreventador. El segundo de estos determinó la formación del gran anfiteatro actualmente visible y el inicio de un nuevo ciclo volcánico. Estos fenómenos fueron causados, muy probablemente, por terremotos asociados con una violenta actividad explosiva que afectaron a los edificios volcánicos y sus laderas inestables.

El edificio de El Reventador actual no ha alcanzado el nivel de crecimiento, inestabilidad y evolución magmática de sus antecesores y, por lo tanto, en la actualidad no podría originar fenómenos similares. Sin embargo, podrían ocurrir, más fácilmente, derrumbes y deslizamientos de proporciones mucho más reducidas, que afecten a los taludes externos del anfiteatro actual, según como se ha observado después del terremoto del 5 de marzo de 1987. Estos fenómenos podrían representar un serio peligro para las obras del Proyecto; pero, considerando que su origen es sísmico-hidrogeológico y no volcánico, serán analizados en el informe referente al riesgo sísmico.

- Flujos de lodo

Consisten en flujos, tal vez turbulentos, que engloban a materiales volcánicos finos saturados de agua, que pueden o no contener bloques y gravas. No presentan ningún tipo de selección o estratificación. Sus depósitos toman el mismo nom-



bre del fenómeno, es decir "lahares" o depósitos de flujo de lodo.

Los "hyper-concentrated floods", son fenómenos de transporte por agua en los cuales la relación material transportado/agua es muy elevada. Sus depósitos están formados por bloques de dimensiones variables, gravas, arenas y algunos elementos finos.

Resulta difícil evaluar la peligrosidad relacionada con el fenómeno de los lahares. En algunos estudios anteriores (Hall, 1980) los depósitos de avalancha de escombros fueron interpretados como lahares y, por lo tanto, se consideró a este fenómeno como el más común y frecuente en El Reventador. Almeida y Cruz (1986) corrigieron oportunamente esta apreciación y redujeron notablemente la estimación inicial sobre la cantidad y distribución de los lahares en el volcán. No obstante, su mapa geológico indica un depósito laharítico a lo largo del río Reventador que habría alcanzado el río Coca. Se debe mencionar que durante los trabajos de campo se han observado, dentro del anfiteatro, varios depósitos laharíticos originados por la movilización de materiales desde el cono actual de El Reventador. Estos depósitos se hallan restringidos a la parte alta del anfiteatro y no se ha encontrado ningún lahar que sobrepase el alto morfológico del borde oriental. Un cuidadoso examen efectuado a lo largo de la parte baja del río Reventador tampoco ha confirmado la presencia de depósitos laharíticos recientes (Planos 0209-G-2502 y 2505).

Se debe destacar que los flujos de lodo pueden originarse, sin ninguna causa volcánica debido a la movilización de materiales sueltos saturados en agua, por la acción de las lluvias, tanto en las laderas del cono actual como en los flancos exteriores del anfiteatro. Los primeros se canalizarían principalmente por los ríos Marker, Engaño y Reventador; mientras en los flancos exteriores del anfiteatro solo los flujos que se originen en el meridional podrían desplazarse a lo largo del río Malo y afectar el Área del Proyecto.

Una vez más debe subrayarse que los flujos de lodo son fenómenos frecuentes bajo las condiciones de inestabilidad de las laderas e hidrológicas particulares que caracterizan al área.

En definitiva, esta clase de fenómenos no presenta ninguna relación directa con el volcán y pueden ocurrir como consecuencia de violentas lluvias o, aún más fácilmente, debido a terremotos. En efecto, muchos de los fenómenos de movilización de materiales que ocurrieron después del terremoto del 5 de marzo de 1987, podrían clasificarse como flujos de lodo. Por lo tanto, estos fenómenos representan un serio peligro para las obras, las personas y los bienes ubicados a lo largo de los antes mencionados ríos.



- Flujos de lodo de origen volcánico o lahares s.s.

Se originan durante una erupción por fenómenos freatomagmáticos o por movilización de los productos piroclásticos sueltos emitidos durante la misma. Tomando en cuenta que no existe ninguna evidencia de que flujos de este tipo hayan alcanzado el río Coca durante la historia eruptiva de El Reventador actual, se considera sumamente improbable que esto pueda ocurrir en el futuro.



## 9. GASES FUMAROLICOS Y MANIFESTACIONES TERMALES

### 9.1 Muestreos

9.1.1 Campañas de 1987 En la zona cratérica del volcán emergen algunas fumarolas que se encuentran tanto en su interior, como en las laderas exteriores. En el área del volcán también existen algunas fuentes con termalidad medio-baja (16-25°C).

Estas manifestaciones fueron objeto de un estudio específico dentro del marco de los estudios de Vulcanología, con el fin de establecer las condiciones de su origen y seleccionar algunos puntos aptos para realizar un control geoquímico regular (monitoreo) del volcán.

En una primera campaña efectuada en el mes de febrero de 1987, se muestrearon cuatro fumarolas ubicadas en la zona cratérica del cono actual, tres fuentes termales y dos aguas superficiales de la zona del anfiteatro.

Una segunda campaña de muestreo se la realizó en el mes de mayo de 1987; es decir dos meses después del sismo del 5 de marzo. En esta ocasión se muestrearon tres fumarolas y solamente dos puntos de agua de la zona del anfiteatro, pues los demás habían desaparecido por efecto de los deslizamientos.

La tercera campaña se la llevó a cabo en el mes de septiembre de 1987. Se tomaron cuatro muestras de gases fumarólicos y dos de aguas en los mismos sitios muestreados en la última. Los análisis de aguas y gases fueron realizados en los laboratorios del "Instituto de Geocronología y Geoquímica Isotópica" de la Universidad de Pisa, Italia.

En los Cuadros 9/1 y 9/2 que se adjuntan se indica la procedencia y las determinaciones físico-químicas de campo y de laboratorio de las muestras tomadas de gases y aguas, respectivamente.

9.1.2 Campaña de 1991 El 26 de junio de 1991 se efectuó una nueva campaña de muestreo de las fumarolas ubicadas en la zona cratérica del cono actual del volcán El Reventador (en realidad, más que de fumarolas se trata de Áreas con exhalaciones difusas).

La muestra R-03-1 se la tomó dentro del cráter a una cota aproximada de 3.500 m, en la base de un gran bloque de lava marcado con el No. 1.



Cuadro 9/1

VOLCAN EL REVENTADOR  
ANALISIS QUIMICOS DE AGUAS Y GASES  
CUADRO RESUMEN DE LOS RESULTADOS  
ANALISIS DE GASES

Denominación de la muestra	Ubicación	Determinaciones de campo		CO2 (%)	H2 (%)	Determinaciones químicas de laboratorio (en volumen)					Total (%)
		cota (msnm)	temperatura t(°C)			O2+Ar (%)	N2 (%)	CH4 (%)	CO (%)	H2S (%)	
PRIMER MUESTREO (3-6 feb 1987)											
R-01-1	Borde oriental del cráter	3.540	87,2	1,57	0,208	20,7	77,3	>0,02	0,0003	0,0	99,78
R-01-2	Borde oriental del cráter	3.540	87,2	1,67	0,256	20,7	77,2	>0,02	0,0004	0,0	99,83
R-02-1	Interior del cráter, costado suroccidental	3.510	86,5	0,30	0,097	21,4	78,1	>0,02	0,0001	0,0	99,90
R-02-2	Interior del cráter, costado suroccidental	3.510	86,5	0,10	0,077	21,8	78,1	>0,02	0,0001	0,0	99,98
SEGUNDO MUESTREO (7-8 may 1987)											
R-11-1	Borde nororiental del cráter	3.550	-	0,08	0,045	21,7	77,6	>0,02	0,0001	0,0	99,32
R-11-2	Borde nororiental del cráter	3.550	-	13,50	8,100	7,5	70,4	-	-	0,0	99,50
R-12-1	interior del cráter, costado meridional	3.505	-	0,41	0,107	21,6	77,1	>0,02	0,0002	0,0	99,12
TERCER MUESTREO (22-25 sep 1987)											
R-21-1	Borde nororiental del cráter	3.550	-	0,70	0,216	21,2	77,8	>0,02	0,0002	0,0	99,92
R-21-2	Borde nororiental del cráter	3.550	-	0,36	0,133	21,5	78,0	>0,02	0,0003	0,0	99,99
R-22-1	Interior del cráter, costado meridional	3.505	-	0,07	0,006	21,6	77,9	>0,02	0,0001	0,0	99,57
R-22-2	Interior del cráter, costado meridional	3.505	-	0,04	0,008	21,6	77,8	>0,02	0,0001	0,0	99,44
CUARTO MUESTREO (26 jun 1991)											
R-03-1	Interior del cráter, parte central	3.500	89,5	0,04	0,353	20,7*	78,0	n.a	0,0001	n.d	99,09
R-01-3	Borde oriental del cráter	3.540	87,3	1,29	0,101	19,1*	78,5	n.a	0,0002	n.d	99,05

\*: Solo O2

n.a. no analizado

n.d. no determinado



CUADRO 9/2

VOLCAN EL REVENTADOR  
ANALISIS QUIMICOS DE AGUAS Y GASES  
CUADRO RESUMEN DE LOS RESULTADOS  
ANALISIS DE AGUAS

Denominación de la muestra	Ubicación	Determinaciones físico-químicas de campo							Determinaciones químicas de laboratorio											
		Cota (msnm)	Tempera- tura t(°C)	pH	Conduc- tividad (µS/cm)	Caudal (l/seg)	SiO2 (mg/l)	HCO3 (mg/l)	Ca (mg/l) (meq/l)	Mg (mg/l) (meq/l)	Na (mg/l) (meq/l)	K (mg/l) (meq/l)	Li (mg/l) (meq/l)	HCO3 (mg/l) (meq/l)	SO4 (mg/l) (meq/l)	CL (mg/l) (meq/l)	F (mg/l) (meq/l)	NO3 (mg/l) (meq/l)	B (mg/l) (meq/l)	SiO2* (mg/l) (meq/l)
PRIMER MUESTREO (3-6 feb 1987)																				
R-01	Quebrada río Reventador	1 840	21.1	6.5-7.0	1 298	40	87.5	3.7	28.8 1.33	90.5 7.44	76.5 3.28	11.55 0.30	0.097 0.014	220 3.8	298 8.17	99.4 2.80	1.33 0.07	< 0.7 .	0.138 .	68.9 .
R-02	Quebrada al N del río Reventador	1 480	20.9	7.5-8.0	1 048	1	95.0	3.2	23.1 1.15	71.5 6.88	60.3 2.82	9.77 0.25	0.081 0.012	183 3.0	230 4.79	78.1 2.20	1.08 0.057	< 0.7 .	0.125 .	81.4 .
R-03	Quebrada aguas abajo de la cascada San Rafael	1 120	25.5	7.5-8.0	2 100	3	102.5	9.8	96.0 4.79	97.0 7.98	172.40 7.60	12.77 0.33	0.260 0.037	567 9.3	383 7.98	117.20 3.31	0.78 0.041	< 0.7 .	0.500 .	74.0 .
R-04	Afluente derecho del río Morán	2 060	18.2	7.0-7.5	690	50	100.0	3.4	10.8 0.54	35.7 2.94	27.7 1.20	3.30 0.08	0.030 0.004	195 3.2	40 0.83	29.5 0.83	1.08 0.057	< 0.7 .	0.085 .	60.2 .
R-05	Quebrada Agua Azul	2 060	18.2	8.5-9.0	2 100	100	130.0	13.0	80.3 2.81	163.5 12.45	58.8 2.48	8.08 0.18	0.084 0.012	799 13.1	172 3.58	74.8 2.10	1.17 0.062	< 0.7 .	0.163 .	75.9 .
SEGUNDO MUESTREO (7-8 may 1987)																				
R-11	Quebrada río Reventador	1 840	.	.	.	.	.	.	34.0 1.70	108.3 9.74	81.5 3.64	11.86 0.30	0.102 0.016	268 4.39	340 7.08	108.1 2.99	1.49 0.078	< 0.7 .	0.168 .	68.3 .
R-15	Quebrada Agua Azul	2 060	.	.	.	.	.	.	42.2 2.11	129.0 10.61	51.0 2.22	8.02 0.15	0.072 0.010	818 10.08	147 3.06	61.2 1.73	1.08 0.057	< 0.7 .	0.148 .	72.3 .
TERCER MUESTREO (23-25 sep 1987)																				
R-21	Quebrada río Reventador	1 840	.	.	.	.	.	.	36.8 1.83	116.0 9.54	92.3 4.01	13.85 0.35	0.110 0.016	274 4.5	380 7.92	116 3.27	1.53 0.08	< 0.2 .	0.17 .	71.3 .
R-25	Quebrada Agua Azul	2 060	.	.	.	.	.	.	48.4 2.42	169.0 13.90	58.0 2.52	6.87 0.15	0.08 0.011	817 13.4	170 3.54	69 1.95	1.22 0.06	< 0.2 .	0.15 .	77.2 .

\* Los valores de SiO2 medidos en el campo resultan más altos que los determinados en laboratorio sobre las muestras no modificadas. Los valores de SiO2 obtenidos en el laboratorio sobre las muestras de agua diluidas 1:10, resultan aproximadamente 10 veces más altos que los valores obtenidos en el laboratorio sobre las mismas muestras no diluidas. Esto significa que el diluyente tenía un contenido en SiO2 similar al de las muestras naturales.



En el punto de muestreo, así como en todo el contorno de la base del bloque de lava, aparecen incrustaciones de un material de color blanco que no presenta trazas de azufre nativo; tampoco se advirtieron en las exhalaciones difusas olores de gases sulfurosos.

La temperatura medida en el suelo, a 60 cm de profundidad era de 89,5°C que resulta muy próxima a la de ebullición del agua en dicha cota.

La segunda muestra R-01-3 se la tomó sobre el borde oriental del cráter a una cota de 3.540 m, en un área cortada por pequeñas fracturas, de algunos metros de largo y de dirección N-05W. La muestra de gas proviene de una de estas fracturas localizada en la base del primer bloque de lava que marca el inicio de la colada de 1976. Aunque aquí tampoco se advirtió la presencia de gases sulfurosos en la fracción incondensable del fluido, la rotura de las paredes de la fractura ha puesto en evidencia pequeñísimos depósitos de azufre nativo que aparentan ser muy recientes.

En ambos sitios se tomaron los gases a través de un tubo de hierro insertado en el suelo hasta una profundidad de 60 cm, impulsando a los fluidos mediante un tubo dewar y tubos de tygon en ampollas de vidrio de 50 ml de capacidad, provistas de 2 llaves. Utilizando como refrigerante un recipiente lleno de agua se llenaron completamente las ampollas con el condensado y, posteriormente, invirtiendo las mismas, se logró acumular los gases incondensables.

## 9.2 Análisis de laboratorio

### 9.2.1 Metodología

#### a. Gases

Las muestras de gases se analizaron por vía gas-cromatográfica, en las siguientes condiciones:

	Columna cromatográfica	Gas portante	Revelador
CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	Porapak Q (95°C)	He	H.W.D.
O <sub>2</sub> + Ar, N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	Set. Molecul. 5A (85°C)	He	H.W.D.
H <sub>2</sub>	Set. Molecul. 5A (85°C)	Ar	H.W.D.
CO	Set. Molecul. 5A (85°C)	He	H.I.D.

#### b. Aguas

Las muestras de aguas fueron analizadas en base a los siguientes métodos de ensayo:

Ca, Mg, Na, K	Espetrofotometría de absorción atómica
Li	Espetrofotometría de emisión atómica



HCO <sub>3</sub>	Potenciometría
SO <sub>4</sub> , CL, NO <sub>3</sub>	Cromatografía iónica
F	I.S.E. (de electrodo específico)
B	Espetrofotometría VIS (con curcumina)
SiO <sub>2</sub>	Espetrofotometría VIS (con molibdato)

### 9.2.2 Resultados obtenidos

#### a. Gases-Campañas de 1987

Todas las muestras tomadas durante la primera y segunda campañas de 1987, excepto la muestra R-11-2, resultaron fuertemente contaminadas por aire (Cuadro 9/1).

La relación  $N_2/(O_2+Ar)$  se encuentra muy próxima al valor atmosférico, con una tendencia hacia un ligero empobrecimiento en  $O_2+Ar$  que podría atribuirse, para el caso de las seis muestras más contaminadas, a la mayor solubilidad del  $O_2$  respecto al  $N_2$  (Figura 9/1).

Para la muestra R-11-2 el exceso de  $N_2$  sobre  $(O_2+Ar)$  resulta tan grande que no podría explicársele a través de un simple mecanismo de diferencias de solubilidad entre  $O_2$  y  $N_2$ . En este caso, el fluido que alcanza la superficie debe, necesariamente, estar previamente enriquecido en  $N_2$ .

Los altos valores que presentan las relaciones  $H_2/CO_2$  y  $CO/CO_2$  se deben, muy probablemente, a la solubilidad en agua (condensado) mucho más grande del  $CO_2$  con respecto a los otros dos componentes (50 veces más alta a la temperatura ambiente).

Los análisis deberían ser corregidos por esta causa; sin embargo, esto no resulta fácil considerando que dichas relaciones se encuentran también influenciadas por la cinética de la separación de la fase gaseosa y el condensado y consecuentemente por la metodología empleada para el muestreo.

Tomando en cuenta que el  $H_2$  y el  $CH_4$  presentan una solubilidad en agua muy similar, deberían destacarse los valores siempre muy elevados de las relaciones  $H_2/CH_4$  que se han determinado en todos los análisis. Esto representa una evidencia de temperaturas elevadas en la zona de origen de los fluidos.

Sin embargo, considerando que son múltiples los procesos que han afectado la composición química de los fluidos en su viaje desde la zona de origen profundo hasta el laboratorio y que estos no pueden establecerse cuantitativamente, no se ha considerado conveniente efectuar evaluaciones geotermométricas.

El nivel de contaminación por aire siguió siendo muy elevado en las muestras tomadas en el curso de la tercera campaña ( $O_2 + Ar + N_2 = 99,0 - 99,5\%$ ).



En ninguna de las muestras se detectó la presencia de  $H_2S$ , mientras que el porcentaje en volumen de  $CH_4$  resulta siempre inferior al límite determinable con el detector de conductibilidad térmica.

Los valores de  $H_2/CO_2$  concuerdan bastante en las muestras tomadas de las fumarolas en el borde del cráter mientras difieren mucho en las muestras tomadas de las fumarolas en el interior del cráter. Sin embargo, esta variación no es sorprendente si se considera el nivel extremadamente bajo de  $CO_2$  y su afinidad por la fase líquida.

En las fumarolas ubicadas en el borde del cráter el valor  $H_2/CO_2$  registró un importante incremento después del sismo del 5 de marzo de 1987. Cabe notar que los resultados obtenidos se repiten también en las muestras dobles, aparte de su grado de contaminación. Esto indicaría que el sistema fumarólico reaccionó como consecuencia del sismo.

#### b. Gases-Campaña de 1991

Las muestras de gases se analizaron a través del método de la cromatografía de gases; sus resultados se presentan en el Cuadro 10/1.

El principal constituyente de los fluidos muestreados es el vapor de agua que representa el 98%, en volumen, de la muestra R-03-1 y el 87% de la R-01-3. La fracción incondensable está constituida esencialmente por gases atmosféricos y bajas concentraciones de gases reactivos. Entre estos últimos, el  $H_2$  es el más abundante en el fluido R-03-1, mientras el  $CO_2$  lo es en el fluido R-01-3.

La relación  $H_2/CO_2$  es igual a 8,8 y 0,13 para R-1 y R-2, respectivamente. Existe también diferencia en cuanto a la relación  $O_2/N_2$  que en la muestra R-03-1 es igual a 0,265, muy cercana a la atmosférica y significativamente más alta que la determinada para la muestra R-01-3 (0,243).

Las características químicas de los fluidos emitidos en el área cratérica de El Reventador (elevado contenido de aire, ausencia de gases sulfurosos y altos valores de la relación  $H_2/CO_2$ ) evaluados conjuntamente con la historia eruptiva reciente del volcán, permiten sustentar la siguiente hipótesis sobre la génesis de dichos fluidos.

El agua meteórica que cae dentro del cráter se infiltra en el subsuelo hasta alcanzar zonas que permanecen todavía "calientes" ubicadas a lo largo de los canales de ascenso del magma que dio origen a las coladas de la última fase eruptiva (1972-1976). La ebullición de esta agua estaría produciendo la casi totalidad del vapor que se emite en el área cratérica. A ella deben añadirse los gases atmosféricos, en parte contenidos en el agua que se infiltra y, en otra por el efecto chimenea de las paredes del cono y una componente gaseosa probablemente derivada de la desgasificación de las rocas que permanecen todavía calientes en la parte más profunda del sistema.



A través de análisis de los isótopos estables del hidrógeno y del oxígeno en los condensados se podrán obtener elementos más precisos para determinar el origen del vapor exhalante.

Los elevados valores de  $H_2$  que se han encontrado en los fluidos cratéricos podrían derivarse de la disociación del vapor de agua, a temperaturas modestas, en zonas donde la  $fO_2$  se halla controlada por los minerales comunes que se encuentran en las lavas. En efecto, los valores de la relación  $H_2/H_2O$  obtenidos de los análisis, son compatibles con la disociación del vapor de agua a temperaturas cercanas a la de emisión, en zonas donde la  $fO_2$  está controlada por un "buffer" sólido comprendido entre los HM y QMF.

Comparando los datos de la campaña de 1991 con los que se obtuvieron en las tres campañas de 1987 (INECEL, 1988), se puede deducir lo siguiente:

- . Resulta evidente que, en conjunto, las características físicas y químicas de los fluidos han permanecido invariables exceptuando solamente la relación  $H_2/CO_2$  de la muestra R-03-1 que es claramente el más alto que se ha determinado en todas las muestras dentro del cráter. Sobre este punto conviene subrayar que esta muestra proviene de una zona distinta a la de los muestreos anteriores y que la relación  $H_2/CO_2$  puede también resultar influenciada especialmente por fluidos ricos en  $H_2O$  y por el método de muestreo, ya que la solubilidad de los dos gases en el condensado es claramente distinta.
- . La muestra R-01-3 corresponde a las muestras R-01-1 y R-01-2, tomadas en febrero de 1987. Pese a que se observan pequeñas variaciones en el contenido de los constituyentes reactivos menores, sus relaciones han permanecido prácticamente invariables. Esto indica que entre 1987 y junio de 1991, el mecanismo que genera los fluidos y, consecuentemente, las condiciones termodinámicas en la zona de origen de dichos fluidos ha permanecido prácticamente invariable. Se pueden esperar variaciones importantes solo al aproximarse una nueva fase eruptiva.

#### c. Aguas

Con base en los diagramas de Langelier-Ludwig, las muestras de agua tomadas en el curso de la primera y segunda campaña de 1987 pueden clasificarse como aguas sulfatadas-cloruradas alcalino térreas (muestras R-01, R-02, R-03 y R-11) y como aguas bicarbonadas-alcalino térreas (muestras R-04, R-05 y R-15), (Cuadro 9/2 y Figura 9/2).

La salinidad varía desde un factor 2, en el interior del primer grupo a un factor 5 en el segundo.

Todas las aguas se encuentran en desequilibrio con los feldespatos (Figura 9/3) y su circulación dentro de rocas hidrotermalizadas parece haber contribuido parcialmente al proceso de mineralización.



Con base en las pocas muestras disponibles, resulta difícil identificar y reconstruir cuantitativamente los eventuales procesos de mezcla. Sin embargo, en vista que las muestras R-11 y R-15 representan una duplicación de las muestras R-01 y R-05, respectivamente, las variaciones de composición observadas entre el primero y el segundo muestreo, sugieren la existencia de procesos de mezcla en el interior de las dos familias antes definidas. Esto resulta, más evidente para las muestras R-05 y R-15 que para las R-01 y R-11.

En el diagrama boro/cloro (Figura 9/4) solo la muestra R-03 presenta una relación claramente más alta que en las otras aguas y fuera de cualquier proceso de mineralización "normal". Esto resulta todavía más evidente en el diagrama boro/salinidad total (Figura 9/5).

Entre los procesos que podrían determinar un enriquecimiento particularmente importante en boro, se encuentra la ebullición de acuíferos muy calientes. En este caso tendrían que estar necesariamente relacionados con el sistema hidrotermal del volcán.

En el curso de la vaporización, los elementos o compuestos altamente volátiles migran hacia la superficie mezclándose en los acuíferos más superficiales y más fríos. Reconocer estos fenómenos es muy importante para la selección de los puntos de muestreo que deberían mantenerse bajo control para el monitoreo del volcán.

La hipotética existencia de procesos de mezcla entre las dos familias de aguas, reconocidas en las muestras tomadas en el curso de la primera y segunda campaña, ha sido confirmada en base a los resultados de los análisis realizados sobre las dos muestras tomadas en el curso de la tercera campaña. En efecto, fueron registradas significativas variaciones en la composición debido a evidentes procesos de mezcla.

Por lo tanto, tomando en cuenta solamente los datos de las aguas termalés muestreadas en la quebrada del río Reventador (muestras R-01, R-11 y R-2) y los datos de las aguas de la quebrada Agua Azul (muestras R-05, R-15 y R-25), siendo que los demás puntos de aguas han desaparecido a consecuencia del sismo, se observa que:

- La proyección de cada punto de ensayo sobre la base de la pirámide de Langelier-Ludwig evidencia pequeñas variaciones entre ellos, aunque la salinidad total para cada grupo de tres muestras varía en casi un 30%.
- En los diagramas entre los componentes principales R/Cl y R/TDS las variaciones se evidencian a lo largo de líneas rectas que pasan por el origen del sistema de coordenadas (Figuras 9/4 y 9/5).

Esto llevaría a suponer que el agua lluvia influye de manera significativa sobre la composición química de las aguas muestreadas. Este dato resulta más evidente en las aguas de la quebrada Agua Azul



que presenta una fluctuación de signo opuesto al pasar del primero al segundo muestreo y del segundo al tercero.

En cuanto a las aguas termales del río Reventador, se destaca un aumento constante de la salinidad total, que indicaría un crecimiento de la componente termal o una nueva influencia del agua lluvia en el proceso de mezcla.

Los datos analíticos evidencian significativos cambios composicionales coincidentes con el evento sísmico de marzo de 1987.

No obstante, debido al tipo de variaciones y a la falta de datos sobre los cambios de composición de las aguas de un mismo manantial durante un período más largo, de por lo menos un año, no es posible afirmar que existe una relación de causa y efecto entre el evento sísmico y las variaciones químicas registradas.

### 9.3 Comentarios de los resultados

La existencia de algunos problemas relacionados con la fuerte contaminación de aire en los gases y las evidencias químicas de desequilibrio en las aguas, impiden la aplicación de las técnicas geotermométricas que se utilizan normalmente para estimar la temperatura de origen de los fluidos.

A pesar de esta dificultad, se ha podido establecer que:

- Las fumarolas del cráter tienen una elevada relación  $H_2/CH_4$ , que resulta indicativa de altas temperaturas en la zona de origen de los gases.
- La fuente termal del sector de la cascada San Rafael (muestra R-03), presenta la temperatura más alta ( $25,5^\circ C$ ) y un contenido anómalo en boro que indicaría una posible conexión con el sistema hidrotermal profundo del volcán.

Estos resultados sugieren que, tanto las fumarolas del cráter como la indicada fuente termal, debido a su eventual conexión con el sistema profundo y caliente del volcán, representan puntos apropiados para efectuar un monitoreo geoquímico. En efecto, cualquier reanudación de la actividad eruptiva debería estar precedida por variaciones significativas en la composición de los gases y del agua termal que estarían representadas particularmente por el incremento de los componentes de origen magmático o relacionados con equilibrios de alta temperatura.

Las actuales características composicionales de los fluidos cratéricos son típicas de las fases post-eruptivas de un volcán y están ligadas a la presencia de rocas que permanecen todavía calientes a lo largo de los conductos por los que ascendieron las lavas.

Al ponerse en contacto las aguas meteóricas que se infiltran en el subsuelo con dichas rocas calientes se produce el vapor y parte de



los gases incondensables que alimentan a las fumarolas del cráter; los demás gases se derivan de una desgasificación directa de las rocas en proceso de enfriamiento, en la parte más profunda del sistema. Al comparar los datos de 1987 y 1991 de la fumarola ubicada en el borde oriental del cráter, se evidencia una sustancial permanencia composicional. Esto indica que el mecanismo de origen de los fluidos ha permanecido invariable durante los últimos cuatro años.

La reanudación de la actividad eruptiva deberá estar necesariamente precedida de importantes aportes de una componente rica en  $\text{CO}_2$  y muy pobre en gases atmosféricos, relacionada con la desgasificación del magma, que producirá modificaciones sustanciales de los fluidos fumarólicos. Por lo tanto, es de fundamental importancia efectuar un muestreo periódico de los fluidos cratéricos, para poder reconocer los estados de peligrosidad creciente del volcán.



## 10. MONITOREO DEL VOLCAN EL REVENTADOR

El monitoreo de un volcán activo en estado de reposo temporal, como El Reventador, consiste en la utilización de métodos geofísicos para el control de la sismicidad y de las deformaciones del suelo y geoquímicos para el control de las fumarolas y fuentes termales.

El objetivo de estos métodos es el de detectar la presencia de condiciones eruptivas con suficiente anticipación para permitir la puesta en marcha de los planes de emergencia que deben delinearse con anterioridad.

El programa de monitoreo que se propone a continuación, se lo ha diseñado con miras a asegurar el seguimiento permanente de la actividad del volcán, mediante un sistema de dimensiones mínimas.

Una red microsísmica permanente del Proyecto Hidroeléctrico Coca-Codo Sinclair debería incorporar por lo menos una estación sísmica telemétrica instalada en el anfiteatro del volcán, con el objeto de controlar su actividad.

### 10.1 Control de la sismicidad

Para el monitoreo de la actividad de un volcán es indispensable disponer de una red de control de la sismicidad local.

Dicha red tiene que diseñarse en forma que permita la adquisición en tiempo real, de datos precisos sobre la distribución espacio-temporal de los eventos sísmicos, la magnitud, "momentum" y mecanismos focales.

Para un correcto diagnóstico, es particularmente importante disponer de datos epi-hipocentrales exactos que permitan identificar la zona de abertura de la boca eruptiva y conocer la posición del magma con respecto a la superficie. Los resultados de las investigaciones más recientes en este campo indican que para esto es necesario disponer de algunos sismómetros de tres componentes que permitan apreciar las diferencias entre ondas P y S.

En el caso del volcán El Reventador se considera adecuado disponer de tres estaciones sismométricas equipadas con telemetría.

La red microsísmica que se instaló al promediar la Fase B de los Estudios de Factibilidad del Proyecto, cuenta con dos estaciones de componente vertical ubicados en la periferia inmediata del volcán (El Copete y Cerro Mirador). No obstante, a lo largo de un período de



siete meses de registro, no se han detectado eventos atribuibles a un origen volcánico (Plano 0209-G-2509).

#### 10.2 Control inclinométrico

El control de las deformaciones del suelo en un volcán activo junto con el de la actividad sísmica constituyen las más apropiadas técnicas geofísicas de monitoreo.

Las erupciones volcánicas están generalmente precedidas por fenómenos de hinchamiento del suelo en el edificio volcánico, cuya geometría y variación temporal permiten identificar la profundidad y la energía de la fuente de la deformación; es decir la profundidad y empuje del magma ascendente.

Aparte de las técnicas tradicionales de levantamiento topográfico de precisión, altimétrico y distanciométrico, en los últimos años se ha desarrollado una técnica inclinométrica ("bore hole tiltmetry") específica para el monitoreo volcánico. Este método tiene la ventaja de poder acoplarse a redes telemétricas para la adquisición continua de los datos y, consecuentemente, favorecer así la posibilidad de efectuar comparaciones permanentes entre actividad sísmica y deformaciones del suelo.

Para el caso del volcán El Reventador sería suficiente instalar dos estaciones inclinométricas de alta sensibilidad, equipadas con teletransmisión.

También será muy conveniente asegurar una comunicación eficiente y permanente entre el centro de control y la dirección operacional del sistema que sería la responsable de ejecutar los planes de emergencia.

Estos planes podrán ser activados después de que se reciba un aviso de alerta desde el centro de control, según un esquema técnico-operacional que deberá establecerse con anterioridad, determinando también diferentes grados de señales de alerta en función de la intensidad de los fenómenos registrados por el sistema de monitoreo del volcán.

#### 10.3 Monitoreo geoquímico

Los gases contenidos en el magma se desplazan con mucha más facilidad que éste y, por lo tanto, ascienden más rápidamente hacia la superficie durante el proceso pre-eruptivo. Ellos pueden alcanzar directamente la superficie dando lugar a las fumarolas o mezclarse con acuíferos de diferente profundidad los que, a su vez, pueden alimentar fuentes termales.

Es por esto que las fumarolas y las fuentes termales existentes en zonas volcánicas activas presentan significativas variaciones químicas o químico-físicas en el período anterior a la reanudación de la actividad eruptiva. Estas variaciones se deben al ascenso pre-



ferencial de los gases juveniles a lo largo de las fracturas creadas por el magma que trata de abrirse paso hacia la superficie y son indicios premonitores de la actividad volcánica.

Los resultados analíticos reportados anteriormente permiten elegir dos sitios aptos para un monitoreo geoquímico del volcán: las fumarolas cratéricas y la fuente termal de la cascada San Rafael.

Ambos puntos deberían ser objeto de un muestreo periódico y sistemático con una frecuencia tri o cuatrimestral, que podría incrementarse en caso de una actividad sísmica o levantamiento anómalo del terreno.



## 11. SINTESIS DE LOS RESULTADOS

Los estudios realizados han permitido obtener un notable progreso en el grado de conocimiento del complejo volcánico El Reventador y elaborar un modelo geológico y petrológico confiable que constituye la base indispensable para evaluar su peligrosidad.

A continuación se resumen los principales resultados alcanzados y las correspondientes conclusiones y recomendaciones.

El complejo volcánico El Reventador está constituido por un estrato-cono activo que alcanza una elevación de 3.500 m, ubicado en el interior de un sistema de depresiones múltiples producidas por colapsos volcano-tectónicos y deslizamientos en masa que afectaron a antiguos y más voluminosos aparatos volcánicos.

Los levantamientos de campo han permitido distinguir tres grandes unidades vulcanológicas denominadas:

- Complejo Volcánico Basal (CVB)
- Volcán Paleoreventador (VPR)
- Volcán El Reventador, cono actual (VER).

### 11.1 Tectónica

La evolución estructural del Área del volcán El Reventador es muy compleja y está caracterizada por la tectónica compresiva cretácica y terciaria que determinó el desarrollo de cuatro franjas elongadas NNE-SSW, según el eje principal de la Cordillera Real.

El Área estudiada, ubicada al este de la zona de los grandes cabalgamientos andinos, está subdividida por el valle del río Coca en dos zonas de deformaciones rígidas y diferente intensidad de fracturamiento.

El complejo volcánico El Reventador está afectado por múltiples sistemas de tectónica frágil.

El edificio del Complejo Volcánico Basal, fuertemente erosionado, presenta una densa red de fallas conjugadas con dirección NE y NW y en el sector central, un fallamiento dominante NNE. Además, está cortado en dirección N-S por un alineamiento de fallas lítricas arqueadas, cuyo segmento central corresponde a la superficie de separación de un gigantesco derrumbe que movilizó hacia el este una gran parte del antiguo centro eruptivo.



Con este formidable deslizamiento en masa concluyó el ciclo de actividad del Complejo Volcánico Basal y se produjeron importantes modificaciones paleogeográficas, incluyendo el desplazamiento del cauce del río Coca.

El edificio del Volcán Paleoreventador que se desarrolló en el interior de un antiguo anfiteatro, presenta una morfología asimétrica, elongada según las directrices tectónicas dominantes (N-S y NE-SW). También este aparato estuvo afectado por una tectónica frágil con algunos indicios de compresión.

La actividad de este aparato terminó hace unos 19.000 años con una gigantesca erupción piroclástica que, probablemente, produjo un colapso calderico acompañado por un gran deslizamiento del edificio, cuya superficie de desprendimiento estuvo ubicada un poco más al este de la precedente.

El material de la avalancha de escombros relleno completamente una sección del valle del río Coca, originando un embalse natural.

Dentro del nuevo anfiteatro se desarrolló el cono volcánico actual del volcán El Reventador, cuya última erupción se presentó en el año 1976.

El terremoto del 5 de marzo de 1987 reactivó todos los principales sistemas de falla que habían sido previamente identificados en el área del volcán El Reventador, desde las fallas de los cabalgamientos andinos hasta los diferentes sistemas N-S, NNE-SSW, NW-SE que afectan a la misma.

#### 11.2 Caracterización petrológica y modelización del sistema eruptivo actual

Aparte de algunos basaltos que presentan una ligera tendencia alcalina sódica por incipiente subsaturación en sílice, en su conjunto los productos del volcán El Reventador indican una clara afinidad calco-alcalina. En general, las variaciones químicas observadas son compatibles con un proceso de diferenciación por cristalización fraccionada, del tipo gábrico, ocurrido en el interior de la corteza a una presión total de unos 7.000 bar.

Las tres secuencias estratigráficas distintas presentan una sustancial similitud de características químicas y mineralógicas.

Los dos grandes fenómenos de deslizamiento en masa que marcan el final de los dos antiguos ciclos eruptivos, corresponden a un estado de madurez de los aparatos caracterizado por erupciones de productos muy evolucionados, de composición riolítica. Una fase similar no ha sido aún alcanzada, ni en forma aproximada, por el volcán actual cuyos productos constituyen una serie composicionalmente reducida, de basaltos a andesitas.



Estos productos, en función de su edad de emisión, presentan una variación química muy característica. El grado de evolución del complejo volcánico disminuyó progresivamente en la fase inicial de edificación del cono actual hasta producir lavas basálticas; posteriormente volvió a aumentar con regularidad hasta los productos más recientes que alcanzan grados de evolución comparables con los de las lavas iniciales.

La reconstrucción de la secuencia eruptiva y el estudio químico y mineralógico detallado de los productos, ha permitido formular un modelo de alimentación del volcán actual que revela la existencia de una cámara magmática superficial ( $p_{H_2O} = 1.000$  bar; profundidad = unos 3-5 km) y de volumen reducido (entre pocas decenas y un centenar de millones de metros cúbicos).

Dentro de esta cámara se verifican procesos de cristalización fraccionada y de mezcla por inyección de magma profundo. En el período más reciente este sistema se ha comportado como cerrado por debajo, sin realimentación, y con una evolución progresiva hacia términos más ácidos solo por efectos de cristalización fraccionada. Sin embargo, el nivel de evolución que ha alcanzado el sistema permanece todavía bajo (andesitas con  $SiO_2$  alrededor del 58%) de modo que no permite un nivel elevado de explosividad, el mismo que requeriría un magma con viscosidad y contenido en volátiles mucho más altos.

### 11.3 Evaluación de la peligrosidad volcánica

El modelo elaborado para el estudio del funcionamiento del volcán permite extraer las siguientes conclusiones que revisten una gran importancia para la evaluación de la peligrosidad.

#### a. Erupción a esperarse

Una erupción que ocurra en la actualidad o en el futuro próximo debería tener características muy similares a la última observada en 1976; es decir con un predominio de flujos lávicos y una actividad explosiva muy moderada.

En caso de que se restablezca la alimentación profunda podrían aparecer algunas variaciones tendientes hacia una composición más básica con la consiguiente emisión de lavas más fluidas y con una explosividad inicial más marcada debido a las mezclas dentro de la cámara magmática. De ser así, eso tendría que estar anunciado por sismos premonitores profundos e intermedios.

Se considera, en cambio, que no existe ninguna posibilidad de que ocurra una gran erupción explosiva similar a la que se ha reconocido como la culminación de los dos ciclos de actividad de los aparatos antiguos. En efecto, erupciones de este tipo requieren un grado de evolución del magma (acidez = viscosidad y contenido en gases) mucho más desarrollado del que actualmente ha alcanzado el volcán.



El tiempo requerido para que esto ocurra es difícil de estimarlo, pero es seguramente mucho más largo que la vida útil de las obras de infraestructura existentes o proyectadas.

b. Peligrosidad volcánica

Tomando en cuenta lo que se ha mencionado anteriormente y los resultados de los estudios geológicos y estratigráficos, se evaluaron los peligros relacionados con las futuras erupciones del cono actual, tomando como referencia la actividad ocurrida en los últimos 19.000 años.

Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Coladas de lava

La emisión de flujos de lava representa el tipo de actividad eruptiva predominante.

Las coladas se han mantenido generalmente en el interior del anfiteatro y sus longitudes varían entre 3 y 6 km. A lo largo de la historia eruptiva del cono actual solamente tres coladas han superado el alto morfológico que forma el borde oriental del anfiteatro. El frente lávico más alejado alcanzó una distancia de 7 km del cráter y se detuvo a 2-2,5 km del río Coca.

A la luz de estos datos y de las tendencias evolutivas más recientes derivadas de la composición de los magmas del volcán El Reventador, se considera improbable que los flujos de lava que emita el cono actual, puedan alcanzar el valle del río Coca.

- Caída de ceniza

La componente explosiva de las últimas erupciones del volcán el Reventador consiste esencialmente en proyecciones balísticas de bombas y fragmentos lávicos y en la emisión de arena y ceniza a la atmósfera. Los fragmentos más gruesos caen en proximidad del cráter y pueden constituir un riesgo solo para las personas que estuvieren casualmente presentes en las cercanías del cráter o bien para los instrumentos científicos eventualmente allí instalados.

En cambio, el material fino puede ser transportado por el viento a grandes distancias desde el centro de emisión. Las evidencias geológicas e históricas indican que los materiales piroclásticos de caída, provenientes del cono actual se distribuyen predominantemente al oeste del cráter.

Para modelizar el fenómeno de caída de ceniza, se han asumido las condiciones de altura de la columna eruptiva, tasa de emisión, granulometría, concentración y densidad de las par-



tículas piroclásticas, dirección y velocidad del viento, más cercanas a las que, probablemente, existen en El Reventador actual.

Los resultados indican que, aún en el caso más desfavorable, el espesor que puede alcanzar sobre el suelo el material piroclástico, a unos 10 km del cráter, no debería causar ningún daño a las obras, aparte de limitados fenómenos de azolvamiento.

Se considera por lo tanto despreciable el riesgo relacionado con caída de material piroclástico.

#### - Flujos piroclásticos

Algunos fenómenos que podrían interpretarse como debidos al colapso gravitacional de la columna eruptiva, fueron descritos durante la última erupción de 1976. Además, un depósito con las características de un flujo piroclástico fue reconocido dentro del anfiteatro del volcán.

Aunque dentro del marco de la actividad ordinaria del volcán son poco probables y de moderada energía, se ha considerado necesario evaluar el riesgo potencial asociado a estos peligrosísimos fenómenos eruptivos.

En consecuencia, se ha procedido a efectuar una simulación numérica de los flujos piroclásticos producidos por el volcán, asumiendo las condiciones de altura de la columna observadas en la erupción de 1976.

Los resultados demuestran que un flujo piroclástico originado por el colapso de una columna eruptiva, alcanzaría los sitios de las infraestructuras existentes y proyectadas, solamente si se verificara una erupción explosiva con una energía mucho mayor de las que han caracterizado a toda la actividad de El Reventador actual. En efecto, no se ha observado fuera del anfiteatro ningún depósito de flujo piroclástico producido por el cono actual; se considera, por lo tanto, despreciable el riesgo debido a estos fenómenos.

Pese a no tener implicaciones para la evaluación del riesgo volcánico del cono actual, se debe recordar que un evento eruptivo gigantesco, con sus relativos depósitos de flujo piroclástico cerró la actividad del Volcán Paleoreventador.

#### - Explosiones freáticas

Este fenómeno es relativamente frecuente en las cercanías del cráter actual en donde pueden ocurrir explosiones de energía muy baja, debido a la acumulación de los fluidos fumarólicos por debajo de una delgada capa impermeabilizada por fenómenos de autosellamiento. Estos fenómenos podrían representar un



peligro solamente para los técnicos y científicos que tengan que trabajar cerca del cráter.

- Flujos de lodo o lahares

Durante el desarrollo de los trabajos de campo no se ha encontrado ninguna evidencia de que lahares de origen volcánico, es decir los producidos durante una erupción por los fenómenos freatomagmáticos o por movilización de las nubes piroclásticas, hayan alcanzado el río Coca durante toda la historia eruptiva de El Reventador actual.

No obstante, los flujos de lodo pueden originarse sin ninguna causa volcánica, debido a la movilización de materiales inestables saturados en agua. En efecto, estos fenómenos son relativamente frecuentes bajo las condiciones tectónicas e hidrológicas que provocan inestabilidad de los taludes naturales y del edificio del volcán.

Flujos de este tipo pueden ocurrir como una consecuencia de violentas lluvias y luego de un evento sísmico muy fuerte.

El terremoto del 5 de marzo de 1987 provocó fenómenos de movilización de materiales a lo largo de los ríos principales, cuya repetición en el futuro representaría un peligro para las obras de infraestructura y para las personas y bienes que se encuentren a lo largo de los ríos y quebradas.

#### 11.4 Conclusiones y recomendaciones

Las investigaciones de campo y de laboratorio han permitido efectuar una reconstrucción detallada de la historia eruptiva, la estructura y la evolución magmática del volcán El Reventador.

Estos datos fueron utilizados para formular un modelo de funcionamiento del volcán que, a su vez, ha sido el sustento indispensable para la evaluación del peligro relacionado con su actividad eruptiva.

Con base en la reconstrucción de todos los fenómenos eruptivos que ocurrieron en los últimos 19.000 años, correspondientes a la vida del cono actual y a la simulación computarizada de algunos fenómenos eruptivos, se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

- Es improbable que fenómenos eruptivos relacionados con el volcán El Reventador, flujos de lava y de piroclastos, caída de ceniza, lahares de origen volcánico, puedan afectar en forma drástica a las obras existentes o previstas en el marco de los proyectos hidroeléctricos en estudio. En consecuencia, el riesgo volcánico puede ser considerado en conjunto despreciable.
- Los fenómenos de flujos de lodo o, más ampliamente la movilización de materiales inestables saturados de agua desde las laderas del edificio volcánico, debido a fuertes eventos sísmicos y/o



violentas lluvias como los que ocurrieron el 5 de marzo de 1987, representan un potencial peligro para las estructuras al exterior. El terremoto del 5 de marzo de 1987 puede representar el evento máximo de referencia para la evaluación del impacto que podrían tener estos fenómenos sobre las obras existentes o proyectadas.

- Los resultados del estudio geoquímico preliminar de las fumarolas cratéricas y de algunas fuentes termales de la zona del volcán El Reventador, han permitido seleccionar algunos puntos que pueden ser convenientemente utilizados para el futuro monitoreo del volcán.

Las actividades posteriores que se recomienda llevar adelante en una etapa sucesiva de estudios serían las siguientes:

- Continuar con el muestreo periódico y análisis químicos de las fumarolas y fuentes termales.
- Realizar el diseño final del sistema de monitoreo del volcán, para su posterior instalación y puesta en marcha.
- Planificar el funcionamiento del sistema de monitoreo y definir los planes de emergencia para el caso de una erupción, siempre basados sobre escenarios realísticos.

A pesar del impacto relativamente menor que causaría la reanudación de la actividad del volcán sobre las obras de infraestructura, una erupción constituye siempre un evento imponente y de gran espectacularidad, que atrae la atención de todos los medios.

En el caso del volcán El Reventador, ésta se incrementaría por tratarse de una zona de gran importancia para la economía de todo el país.

En consecuencia, se refuerza aún más la necesidad y conveniencia de mantener un sistema de monitoreo, aunque sea el mínimo, en forma que permita evaluar objetivamente la posibilidad de reanudación de los fenómenos eruptivos, su duración e importancia.



## 12. BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA E., CRUZ M. (1986). Estudio geológico del Volcán El Reventador. INECEL, pp. 43.

ARCULUS R.J., WILLS K. (1980). The petrology of plutonic blocks and inclusions from the Lesser Antilles Island Arcs. *J. Petrol.*, 21, 743-799.

ARMIENTI P., PARESCHI M.T. (1987). Automatic reconstruction of surge deposit thicknesses. Applications to some Italian volcanoes. *Jour. Volc. and Geoth. Res.*, 31, 313-320.

ARMIENTI P., MACEDONIO G., PARESCHI M.T. (1987). A numerical model for the simulation of tephra transport and deposition: applications to the May 18, 1980 Mt. St. Helens eruption in press on the *Jor. of Geoph. Res.*

ASPDEN et al (1991). Nueva información de la edad del Batolito de Abitagua en el Oriente Ecuatoriano, por el método Rb/sr. *Bol. Geol. Ecuat.*, Vol 2, No. 1, 1991 pp 143-147.

BAKER D.R., EGGLEER D.H. (1983). Fractionation path of Atka (Aleutians) high-alumina basalts: constraints from phase relations. *J. Volcanol. and Geoth. Res.*, 387-404.

BALDOCK J. W. (1982). Geology of Ecuador. Explanatory Bulletin of the National Geological Map of the Republic of Ecuador.

BARBERI F., COLTELLI M., FERRARA G., INNOCENTI F., NAVARRO J.M., SANTACROCE R. (1987). Plio-Quaternary volcanism in Ecuador. *Geol. Mag.*

ROTTINGA Y., WEILL D., RICHET P. (1982). Density calculations for silicate liquids. I. Revised method for aluminosilicate compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 909-919.

BURNAM C.W., DAVIS N.F. (1974). The role of H<sub>2</sub>O in silicate melts, II. Thermodynamics and phase relations in the system Ab-H<sub>2</sub>O to 10 kb, 700 to 1.100 C. *Am. Jour. of Sci.*, 274, 902-940.

CONRAD W.K. (1987). A FORTRAN program for simulating major and trace element variations during Rayleigh fractionation with melt replenishment or assimilation. *Comp. & Geosci.*, 13, 1-12.



- DE PAOLO D.J. (1981). Trace-element and isotope effects of combined wallrocks assimilation and fractional crystallization. *E.P.S.L.*, 53, 189-202.
- DICKINSON W. R. (1976). Sedimentary basins developed during evolution of Mesozoic-Cenozoic arc-trench system in western North America, *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 13, p. 1268-1287.
- FAUCHER R., SAVOYAT E. (1973). Esquisse géologique des Andes de l'Équateur. *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique* 15, 115-42.
- GHIORSO M.S., CARMICHAEL I.S.E., RIVERS M.L., SCAK R.O. (1983). The Gibbs free energy of mixing of natural silicate liquids; an expanded regular solution approximation for the calculation of magmatic intensive variables. *Contrib. Mineral. Petrol.* 84, 107-145. Green in Andesites.
- GREEN T.H. (1982). Anatexis of mafic rocks and high pressure crystallization of andesites. In "Andesites" R.S. Thorpe Edt., 465-488, J. Wiley & Sons Ltd.
- HALL M.L. (1977). El Volcanismo en el Ecuador. *Biblioteca Ecuador Inst. Pan. Geog. Hist.*, pp 120.
- HALL M.L. (1980). El Reventador, Ecuador, un volcán activo de los Andes Septentrionales. *Polit. Monog. Geol.* 5-2, 123-136.
- HANTKE G. PARODI A. (1966). Catalogue of the active volcanoes of the world. Part XIX (Colombia, Ecuador y Perú); *Ing. Ass. Volc. Chem. Earth's Interior*, Rome, Italia.
- HERZBERG C.T. (1978). Pyroxene geothermometry and geobarometry: experimental and thermodynamic evaluation of some subsolidus phase relations involving pyroxenes in the system  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ . *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, 945-957.
- INECEL (1984). Estudio de actualización del Informe Hidrológico del Proyecto Coca. Quito.
- INECEL (1983). Informe Geológico. Proyecto Coca-Codo Sinclair. Quito.
- INECEL (1977). Informe de Prefactibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Coca. Quito.
- IRVINE T.W., BARAGAR W.R.A. (1972). A guide to chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. of Earth Sci.*, 8, 523-548.
- KEEFER D.K. (1984). Rock avalanches caused by earthquakes: source characteristics. *Science*, 223, 1288-1290.



- KUDO A.M., WEILL D.F. (1970). An igneous plagioclase thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.* 25, 52-65.
- LARA O., CHAVEZ M.A. (1987). Los sismos de marzo de 1987, causas, efectos y proyecciones de la catástrofe. ESPOL Guayaquil, Ecuador, pp. 21.
- LEEMAN W.P., SCHEIDGGER K.F. (1977). Olivine liquid distribution coefficients and a test for crystal-liquid equilibrium. *EPSL*, 35, 247-257.
- LINDSLEY D.K. (1983). Pyroxene Thermometry. *Amer. Mineral.*, 68, 477-493.
- LONSDALE P. (1978). Ecuadorian subduction system. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 62, 2454-77.
- LONSDALE P., KLITGORD K.D. (1978). Structure and tectonic history of the Eastern Panama Basin. *Bull. Geol. Soc. of Am.*, Vol. 89, pp 981-999.
- MACEDONIO G., PARESCHI M.T., SANTACROCE R. (1987). Valutazione e controllo di alcuni parametri fisici agenti durante la fase pliniana dell'eruzione del Vesuvio del 79 D.C. *Rivista del GNV*, 1987
- MCBIRNEY R. & MURASE T. (1984). Rheological properties of magmas. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 12, 337-357.
- NEWELL R.E., KIDSON J.W., VINCENT D.G., BOER G.J. (1972). The general circulation of the tropical atmosphere and interactions with extra-tropical latitudes, I pp. 258. MIT press, Cambridge.
- NICHOLLS J. (1980). A simply thermodynamic model for estimating the solubility of H<sub>2</sub>O in magmas. *Contr. Mineral. Petrol.* 74, 211-220.
- PAZ Y MIÑO L., GUERRERO J., BONIFAZ C. (1931). La exploración A. J. Reventador, Ministerio de Educación Pública. Quito.
- PENNINGTON W.D. (1981). Subduction of the Eastern Panama Basin and sismotectonics of Northwestern South America. *Journal of Geophysical Research* 86, 10753-70.
- PETROTRANSPORTE-Universidad Central del Ecuador (1991). Estudio de los riesgos geodinámicos del Oleoducto Transecuatoriano. Volumen 3: Sismología y Vulcanología. (Informe inédito).
- PICHLER M., HORMANN P.K., BRAUN A.F. (1976). First petrologic data on lavas of the Volcano El Reventador (Eastern Ecuador). *Münster. Forsch. Geol. Paläont. M.* 38/39; S. 129-141; Münster (Westfalia), sep. 1976.
- PILGER R.H. Jr. (1984). Cenozoic plate kinematics, subduction and magmatism: South America Andes. *J. of the Geol. Soc. London*, 141, 793-802.

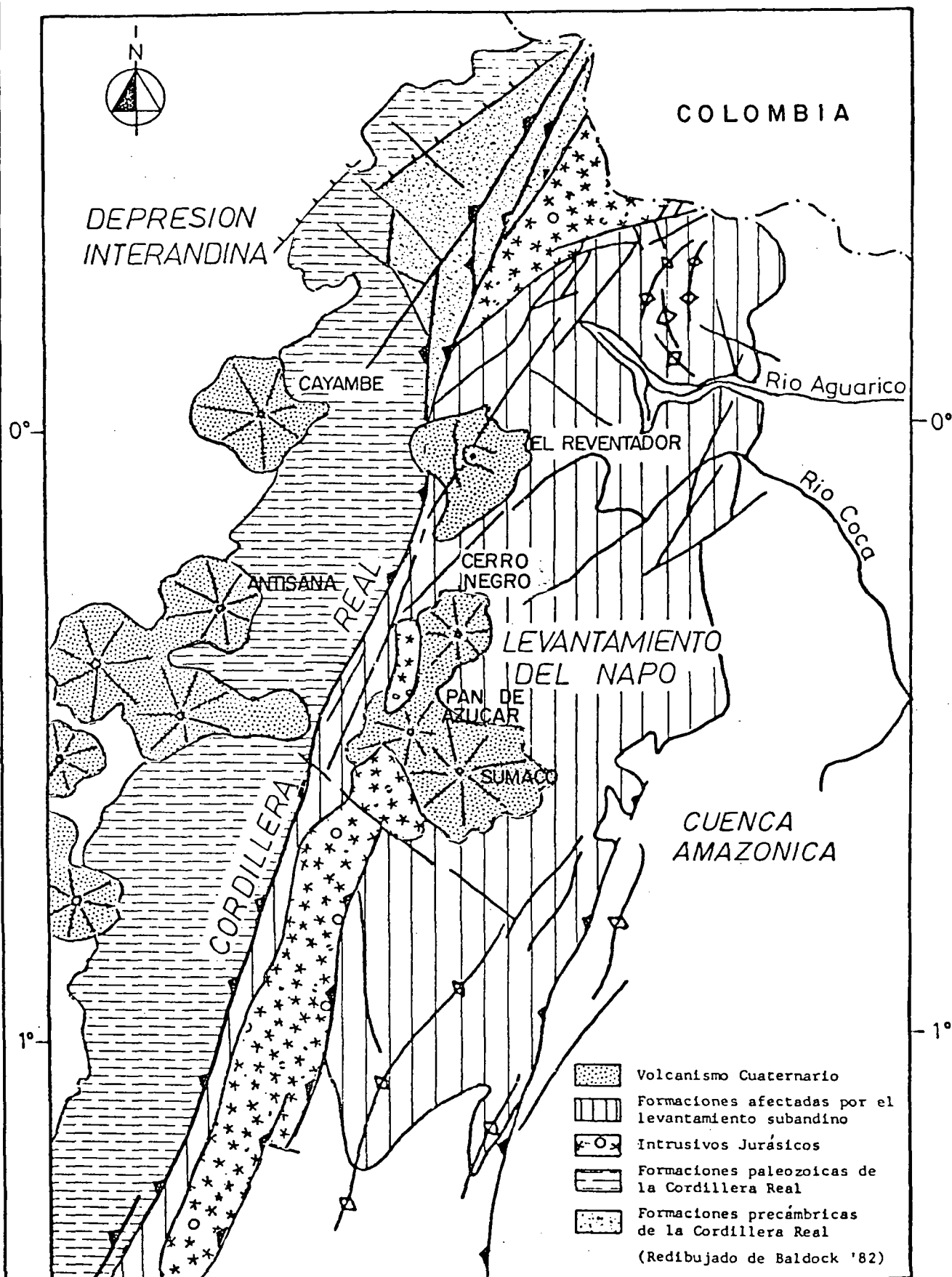


- RAMSAY J., HUBER M. (1987). The techniques of modern structural geology. Vol II. Folds and Fractures. London, Pergamon Press.
- ROEDER P.L. (1974). Activity of iron and olivine solubility in basaltic melts. *E.P.S.L.*, 23, 397-410.
- ROPERCH P., MEGARD F., LAJ C., MOURIER T., CLURE T.M., NOBLET C. (1987). Rotated oceanic blocks in Western Ecuador. *Geph. Res. Let.* Vol. 14 N°- 5, pp. 558-561, May 1987.
- SHERIDAN M.F. (1980). Pyroclastic block flow from the september 1976 eruption of La soufriere volcano. Guadeloupe. *Bull. Volcanol.*, 43, 397-402.
- SPARKS R.S.J., WILSON J., HULME G. (1978). Theoretical modeling of the generation, movement and emplacement of pyroclastic flows by colum collapse. *J. Geoph. Res.*, 83, 1727-1739.
- STORMER J. C. Jr (1983). The effects of recalculations on estimates of T and  $FO_2$  from analyses of multicomponent iron-titanium oxides. *Amer. Min.* 68. pp. 586-594.
- STORMER AND NICHOLLS J. (1978). XLFRAC: a program for the interactive test of magmatic differentiation models. *Computer & Geosci.* 4, 153-159.
- SUARES G., MOLNAR P., BURCHFIEL R.C. (1983). Seismicity and active tectonics of the Andes of Perú, Ecuador, and Southern Colombia. *Journal Geophys. Res.*, Vol. 88, No. B12, pp. 10403-10428.
- UNESCO (1971). The surveillance and prediction of volcanic activity, Earth Sciences, 8, UNESCO, Paris, 166 p.
- WELLS P.R.A. (1977). Pyroxene thermometry in simple and complex system. *Contib. Mineral. Petrol.* 62, 129-139.
- WILSON L., SPARKS R.S.J., WALDER G.P.L. (1980). Explosive volcanic eruptions-IV. The control of magma chamber and conduit geometry on eruption column behaviour. *Geophys J.R. Astr. Soc.* 63, 117-148.



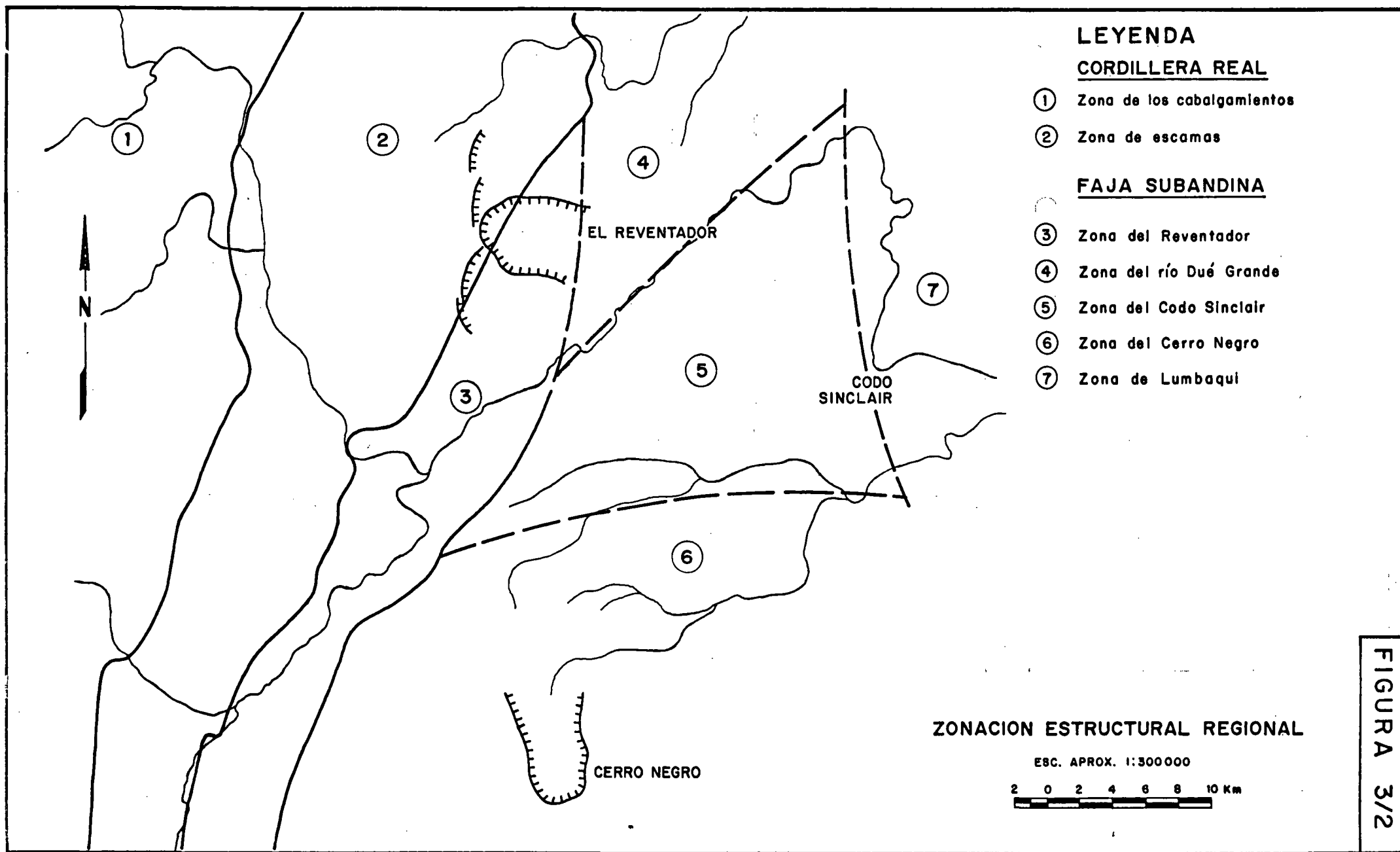
## FIGURAS





ESQUEMA GEOLOGICO DEL NORESTE DE ECUADOR





## LEYENDA

### CORDILLERA REAL

① Zona de los cabalgamientos

② Zona de escamas

### FAJA SUBANDINA

③ Zona del Reventador

④ Zona del río Dué Grande

⑤ Zona del Codo Sinclair

⑥ Zona del Cerro Negro

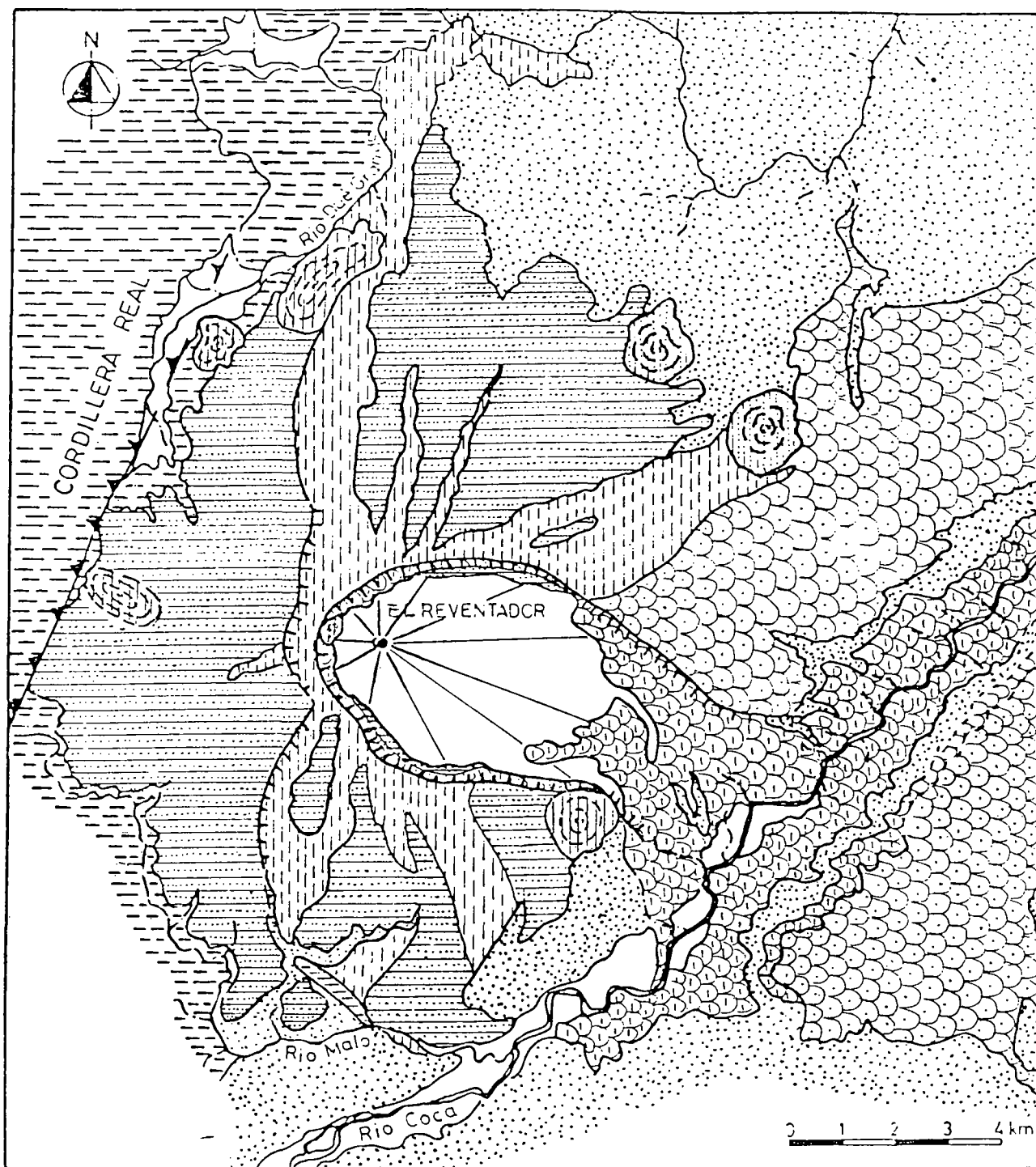
⑦ Zona de Lumbaqui











## ZONACION ESTRUCTURAL REGIONAL

ESC. APROX. 1:300 000



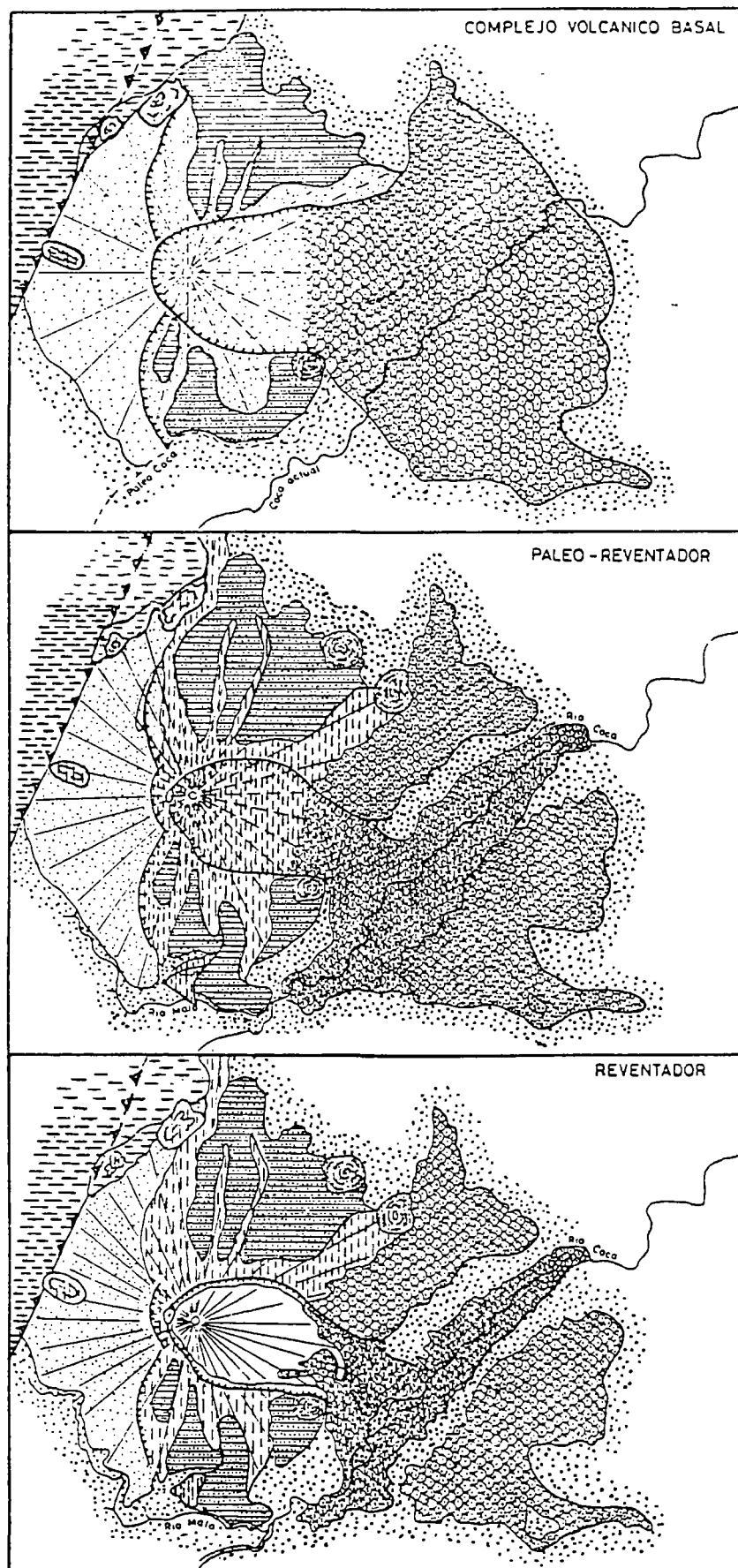




- |   |   |
|---|---|
|  Basamento volcánico y sedimentario mesozoico metamorfizado  |  Depósito de avalancha de escombros del Paleo-Reventador |
|  Basamento volcánico y sedimentario mesozoico                |  Reventador actual                                       |
|  a) complejo volcánico basal<br>b) aparatos dómicos          |  Depósitos fluviales y aluviales                         |
|  Depósito de avalancha de escombros complejo volcánico basal |  Bordes de los deslizamientos                            |
|  Paleo-Reventador  |  Cabalgamiento oriental                                  |

ESQUEMA GEOLOGICO DEL AREA DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR



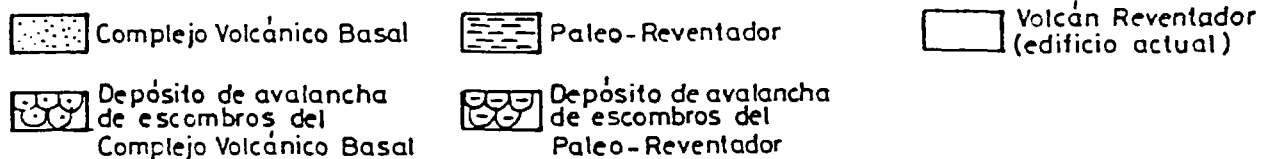
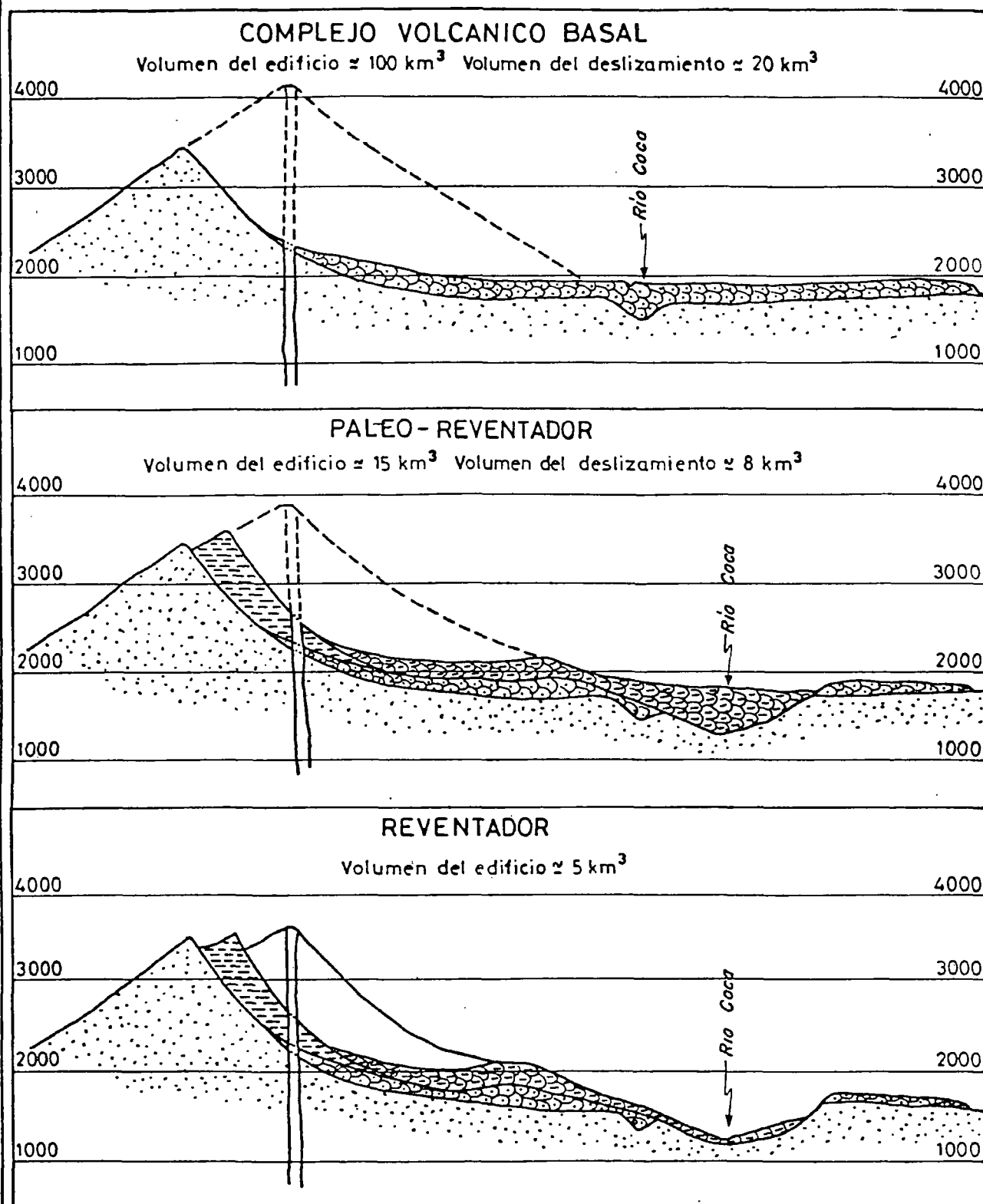


LEYENDA

- |                          |  |  |
|--------------------------|--|--|
| Complejo Volcánico Basal |  | Unidades metamórficas de la Cordillera Real                            |
|                          |  | Unidades vulcano-sedimentarias mesozoicas del "levantamiento del Napo" |
|                          |  | Porciones del edificio no afectadas por la tectónica                   |
|                          |  | Porciones del edificio afectadas por fallamiento en bloques            |
| Paleo-Reventador         |  | Depósito de avalancha de escombros                                     |
|                          |  | Porciones relictas del edificio  |
|                          |  | Depósito de avalancha de escombros                                     |
|                          |  | Edificio actual del Reventador   |

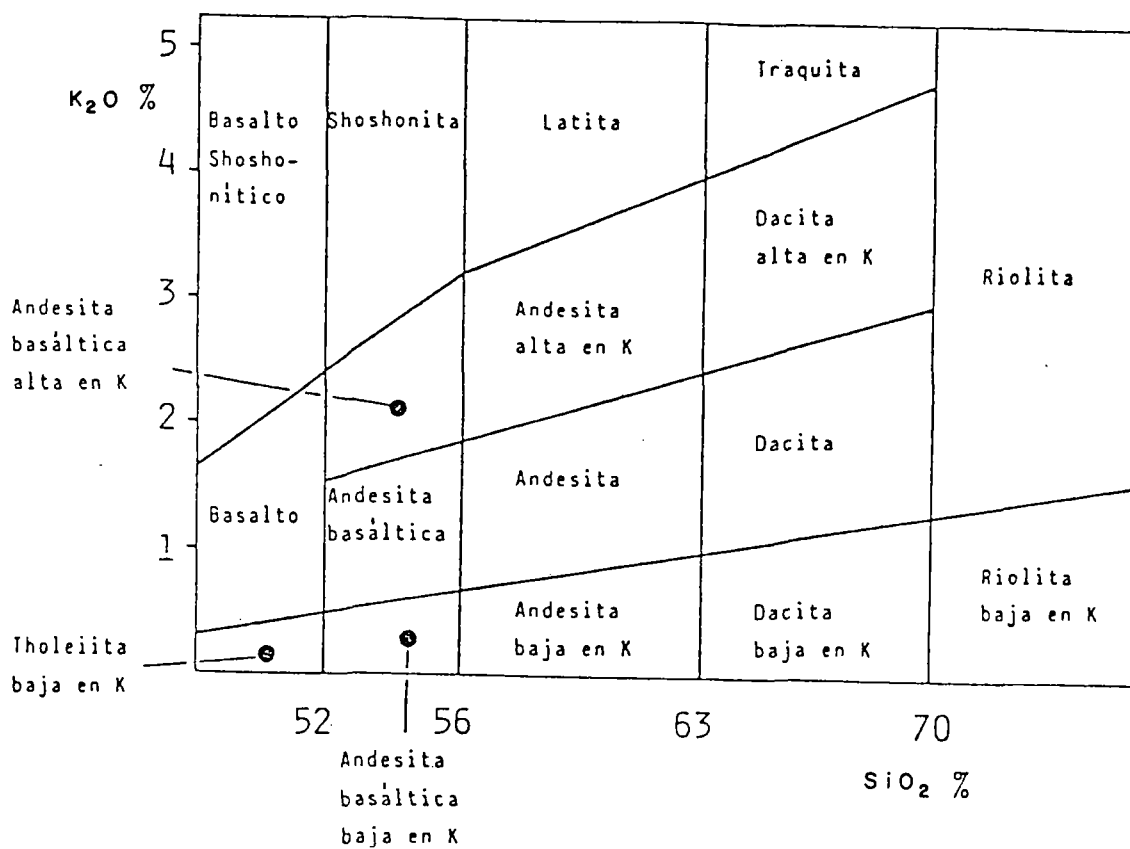
ESQUEMAS DE LAS PRINCIPALES ETAPAS DE EVOLUCION DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
PLANOS DE LOS CONTACTOS TECTONICOS





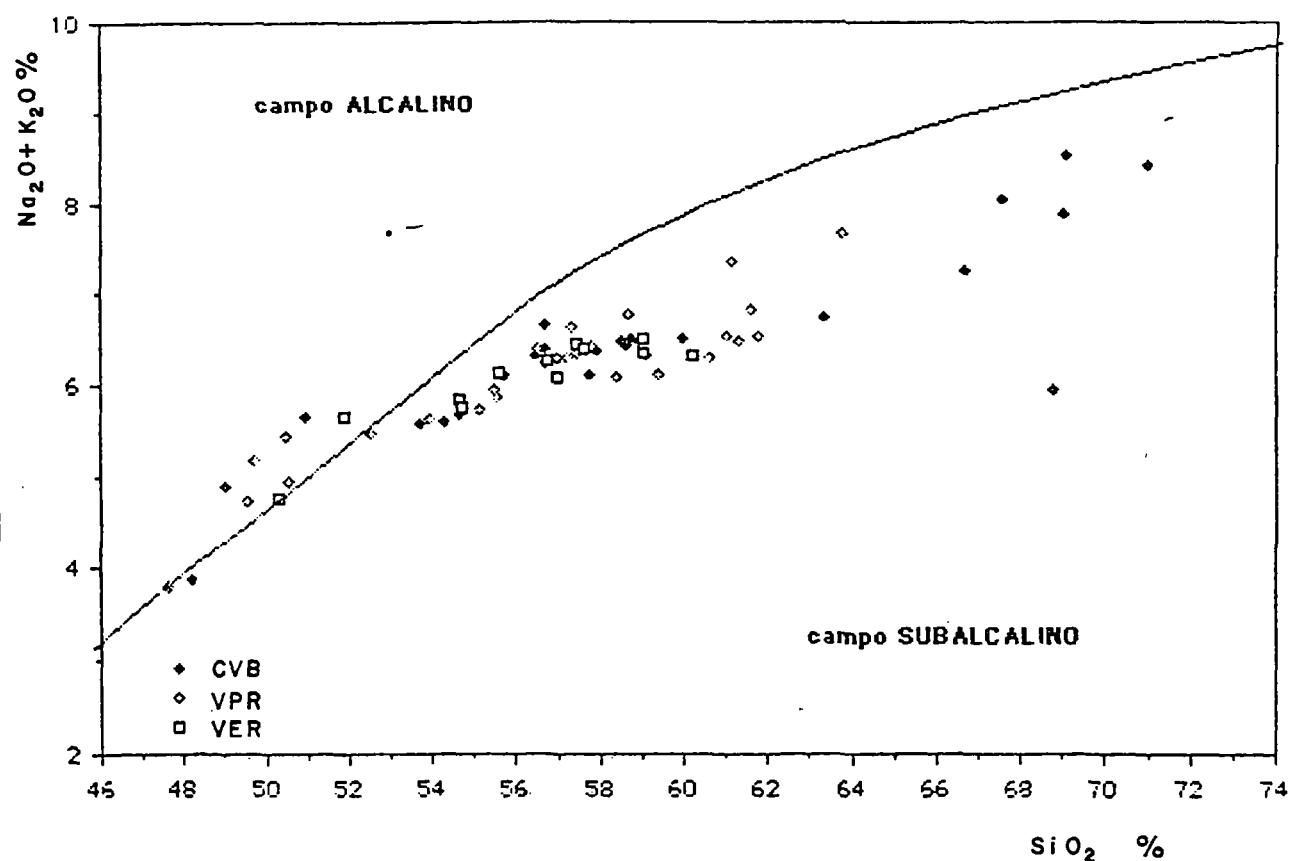
EVOLUCION DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 PERFILES ESQUEMATICOS





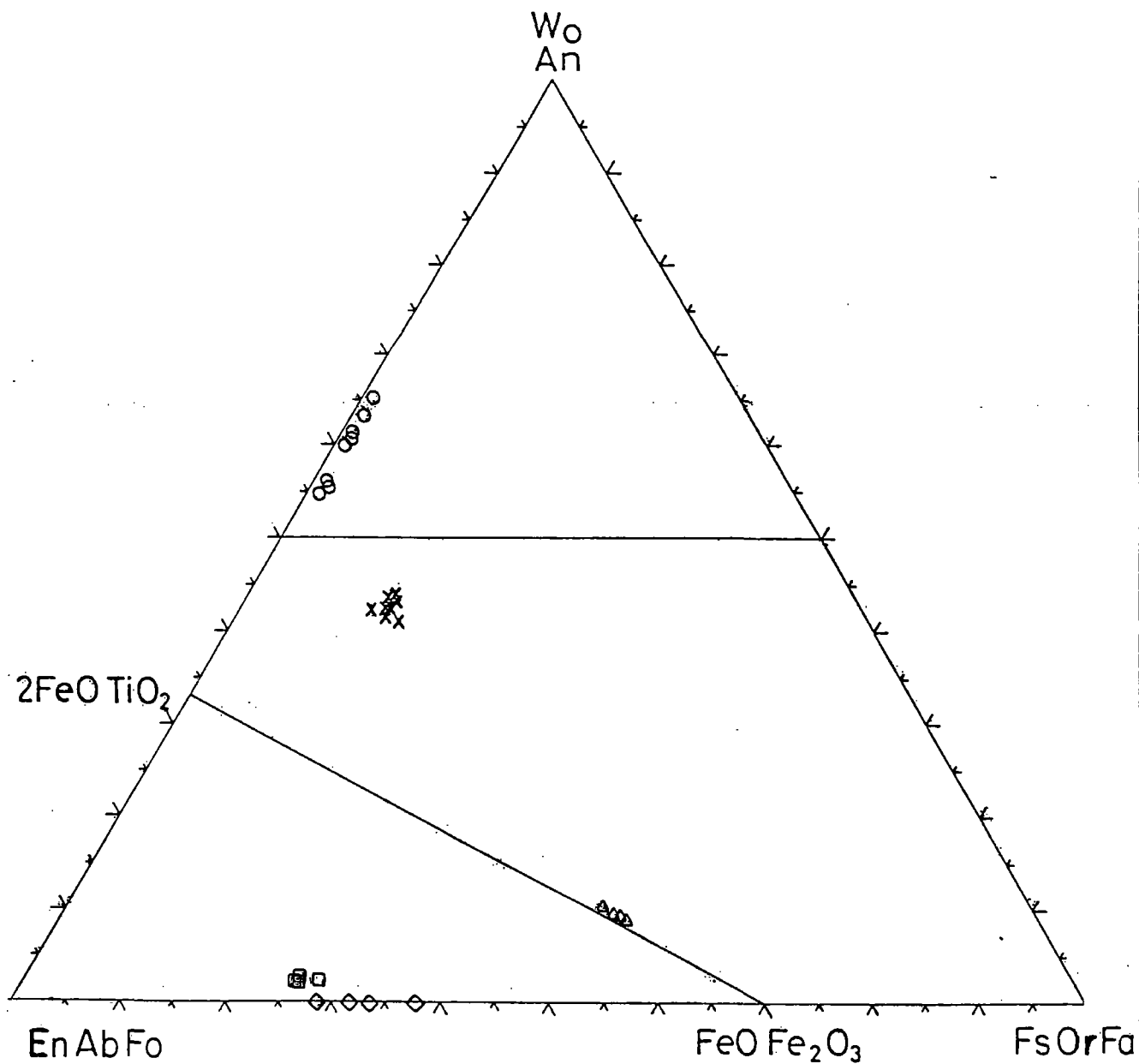
LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 DIAGRAMA CLASIFICATIVO  $K_2O / SiO_2$





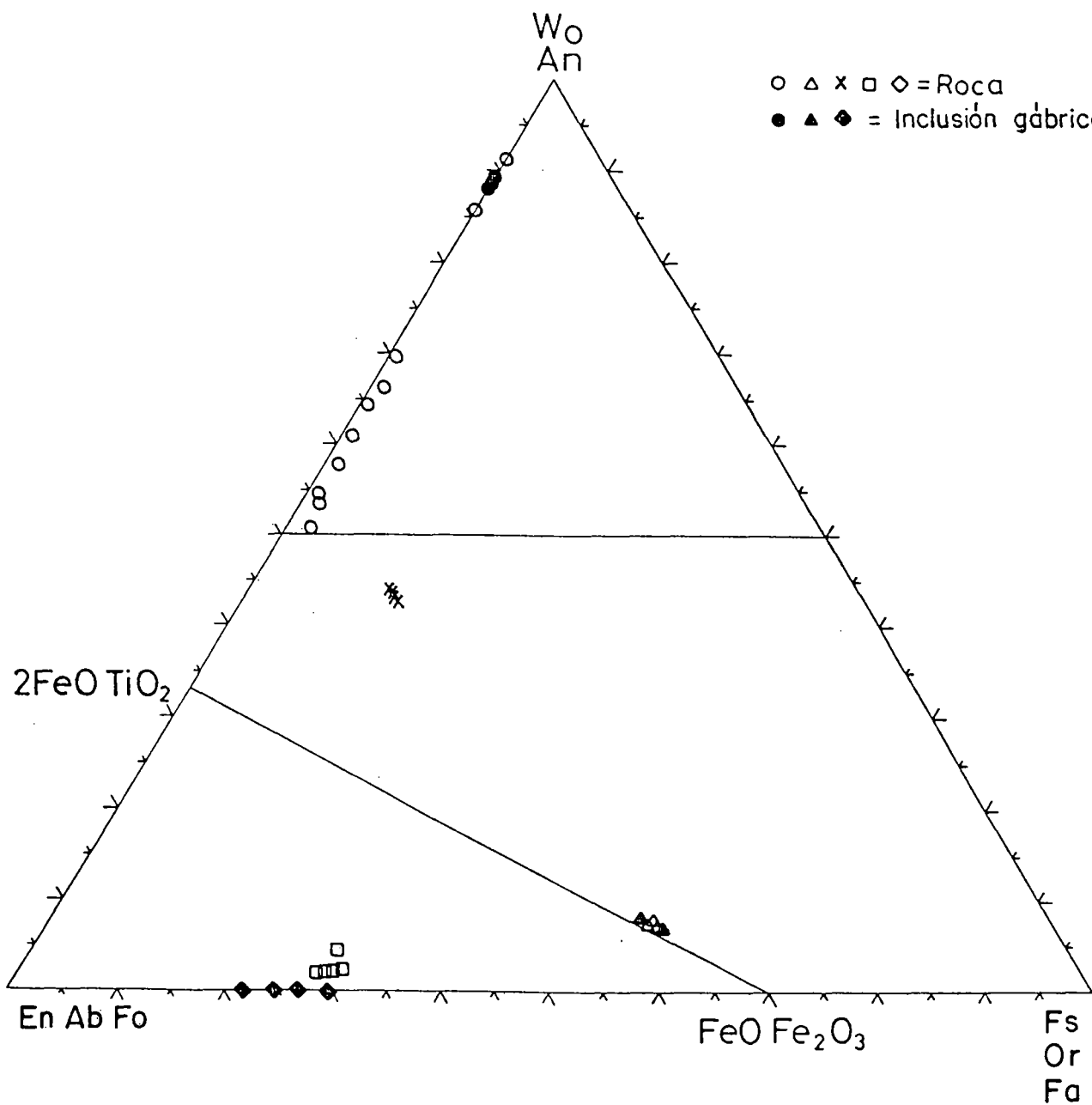
LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 DIAGRAMA ALCALI /  $\text{SiO}_2$   
 (Línea divisoria entre los campos alcalino y subalcalino según  
 Irvine y Baragar, 1972)





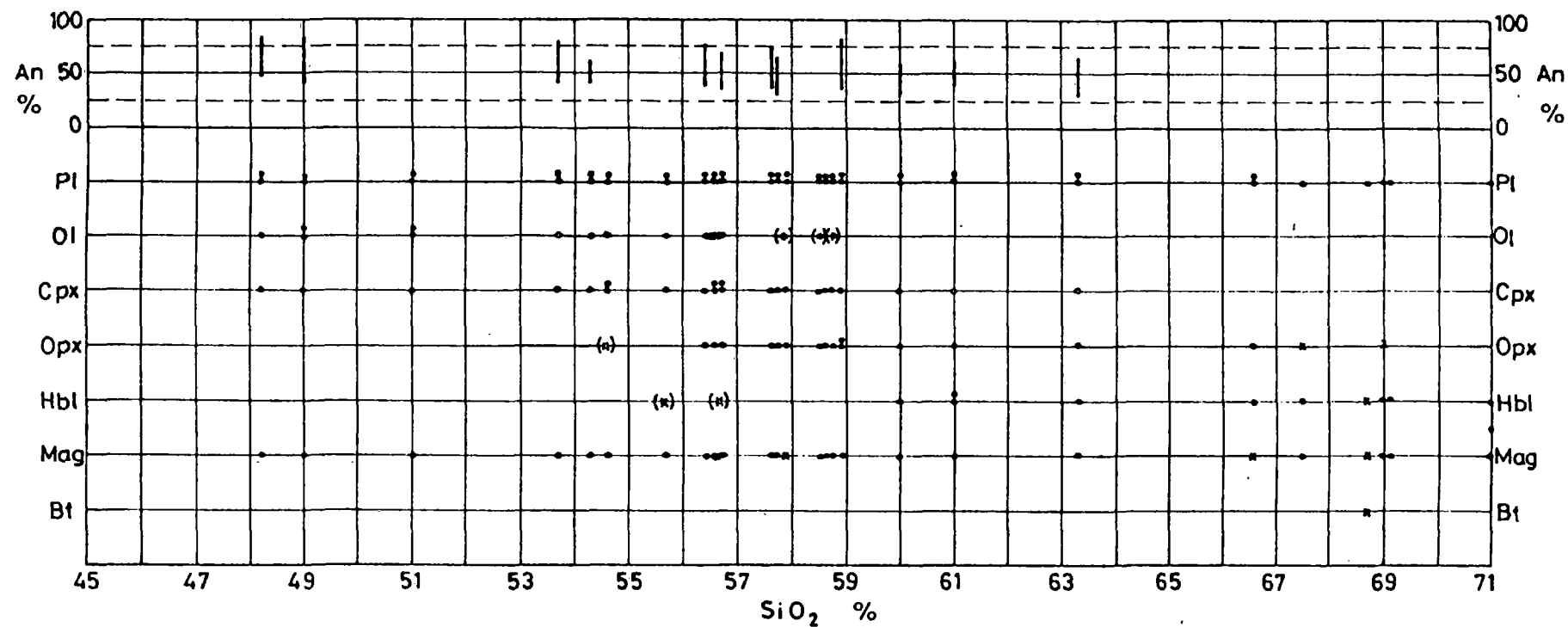
ANDESITAS DEL COMPLEJO VOLCANICO BASAL (CVB)  
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS FENOCRIALES (MUESTRA REV-9)





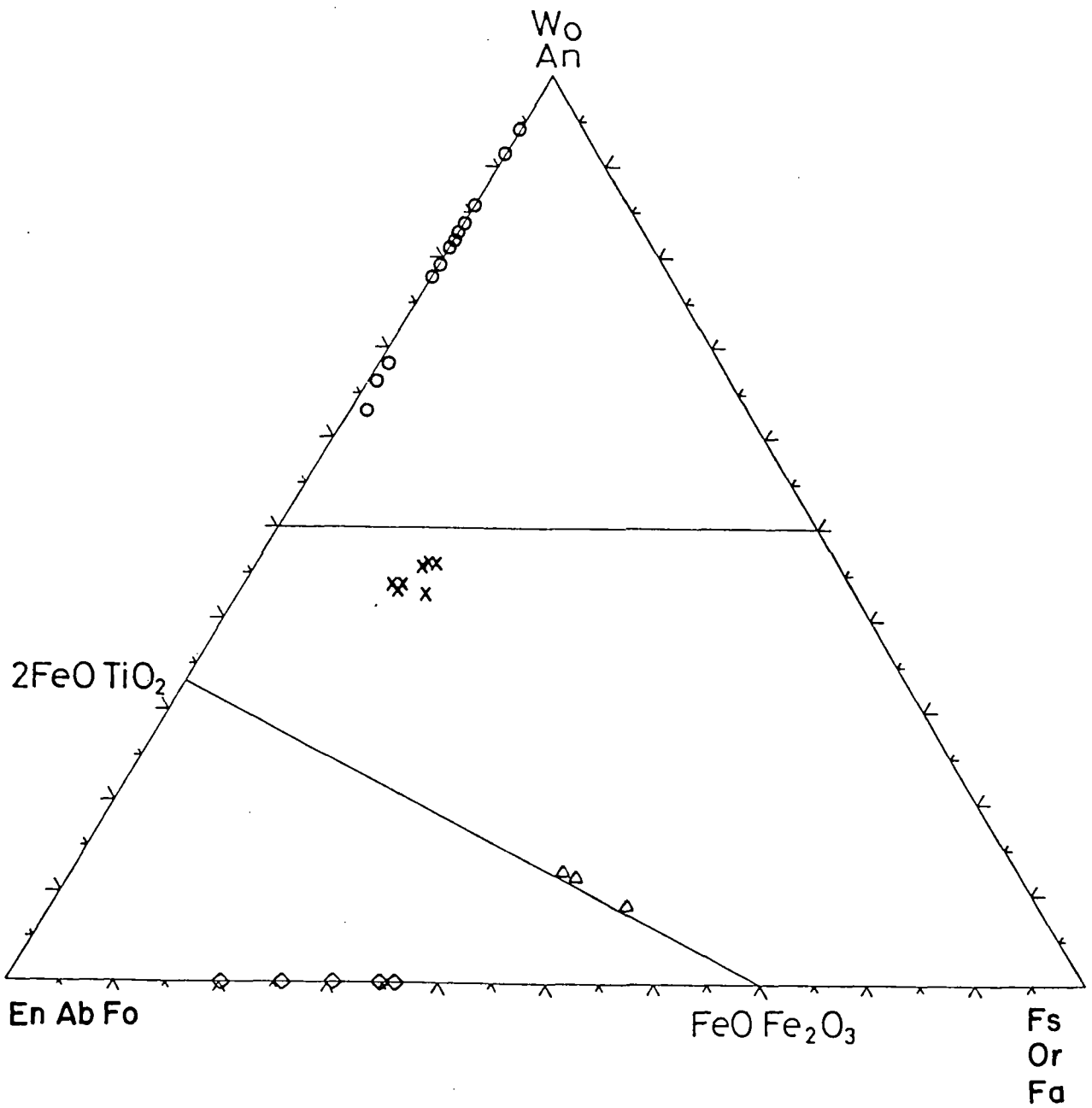
ANDESITAS DEL COMPLEJO VOLCANICO BASAL ( CVB )  
COMPOSICION QUIMICA DE LOS FENOCRISTALES (MUESTRA REV - 86 )





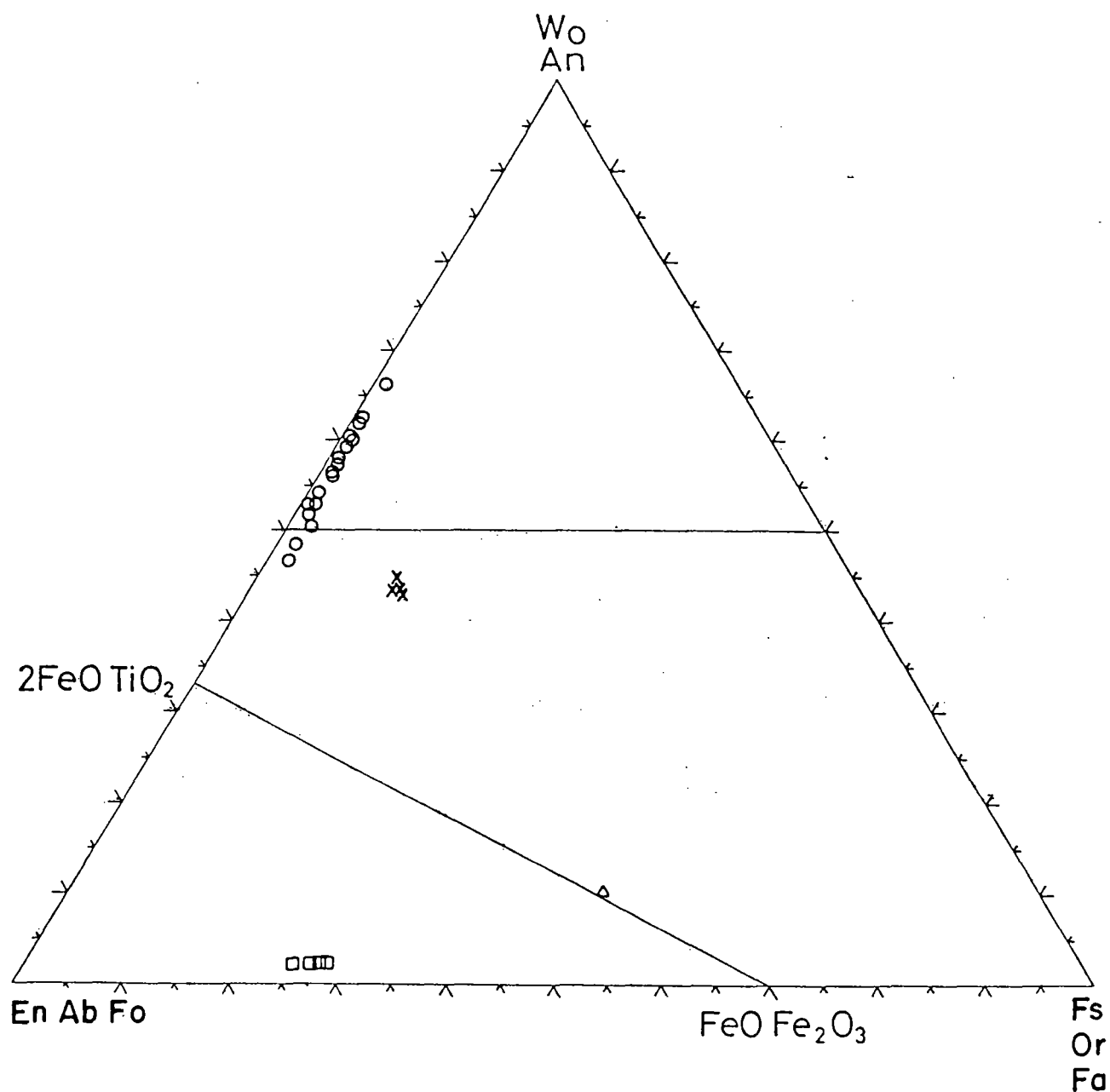
LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO BASAL (CVB)  
 DIAGRAMA DE PERSISTENCIA DE LAS FASES EN FENOCRISTALES





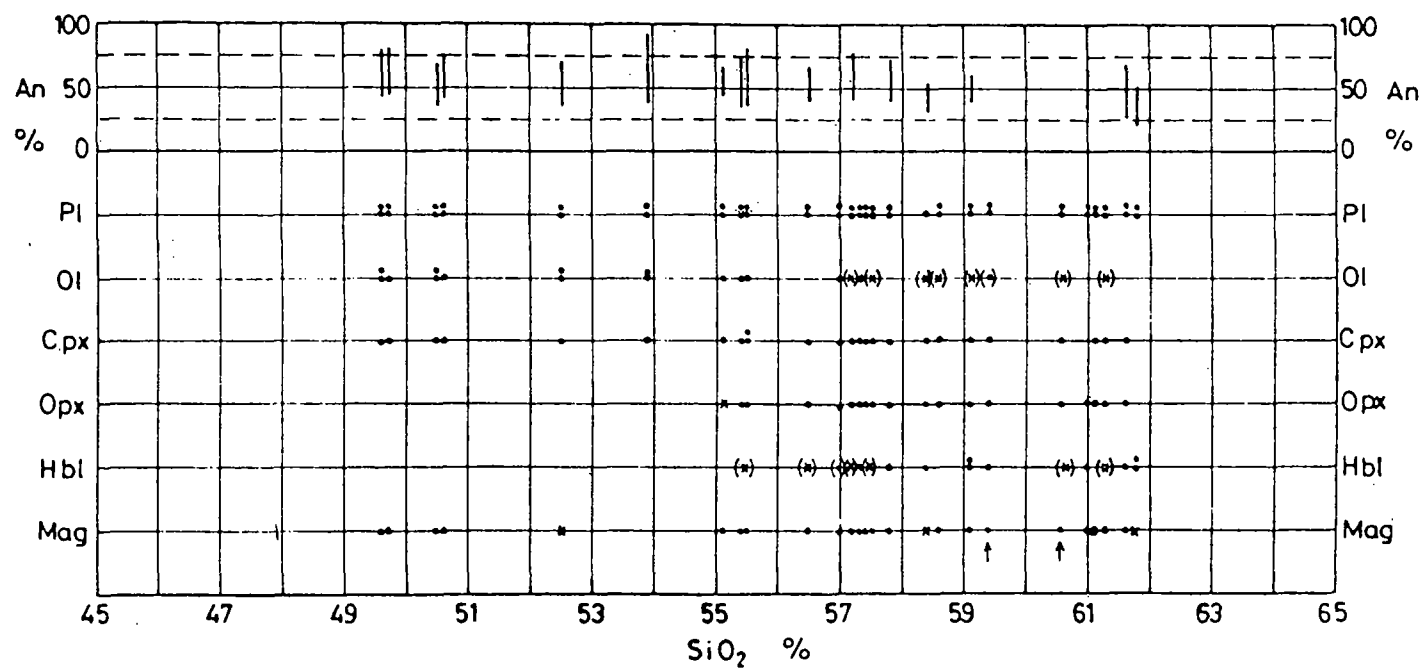
BASALTOS DEL VOLCAN. PALEOREVENTADOR (VPR)  
COMPOSICION QUIMICA DE LOS FENOCRISTALES (MUESTRA A-02)





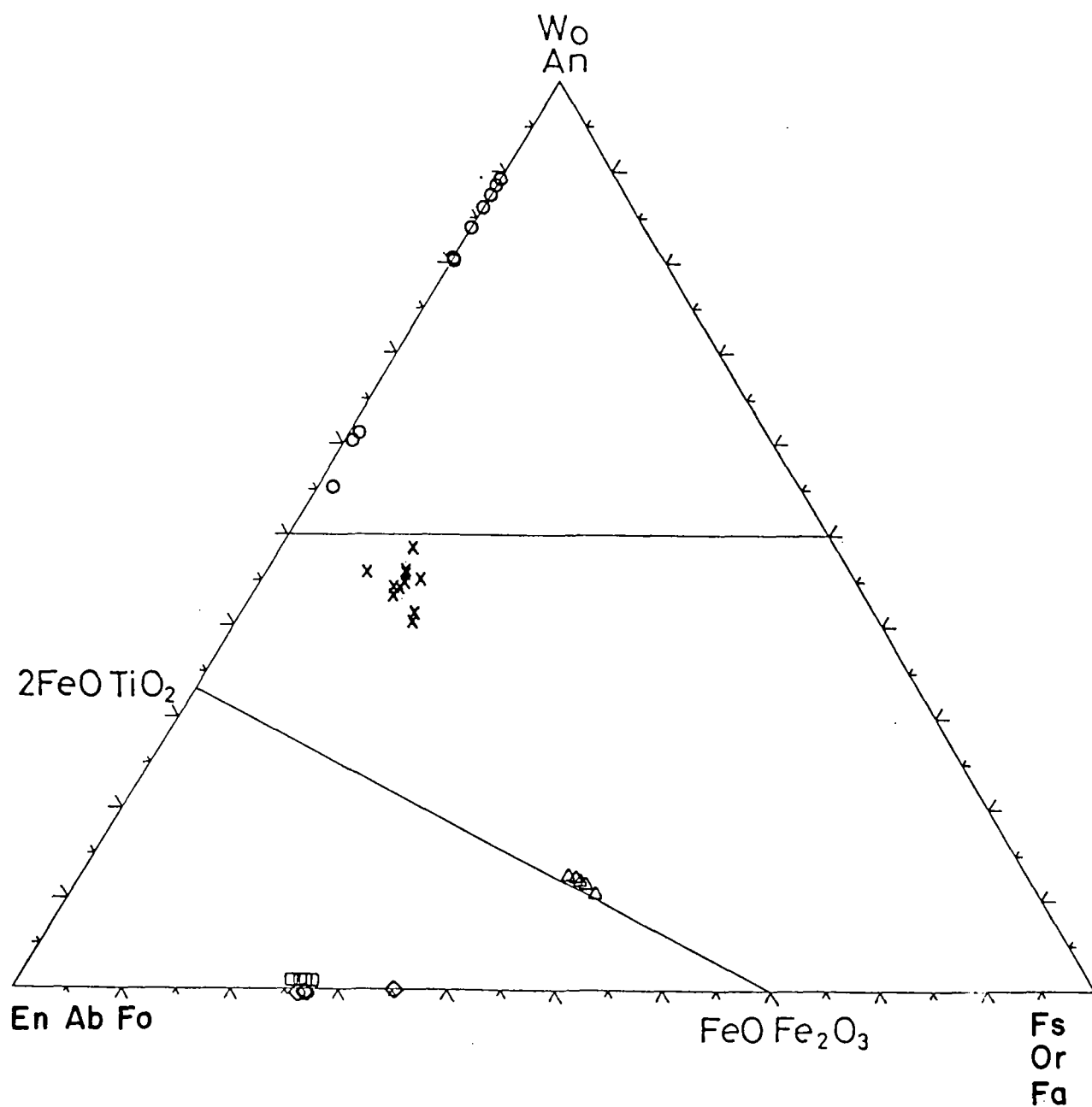
ANDESITAS DEL VOLCAN PALEOREVENTADOR (VPR)  
COMPOSICION QUIMICA DE LOS FENOCRIETALES (MUESTRA REV-28)





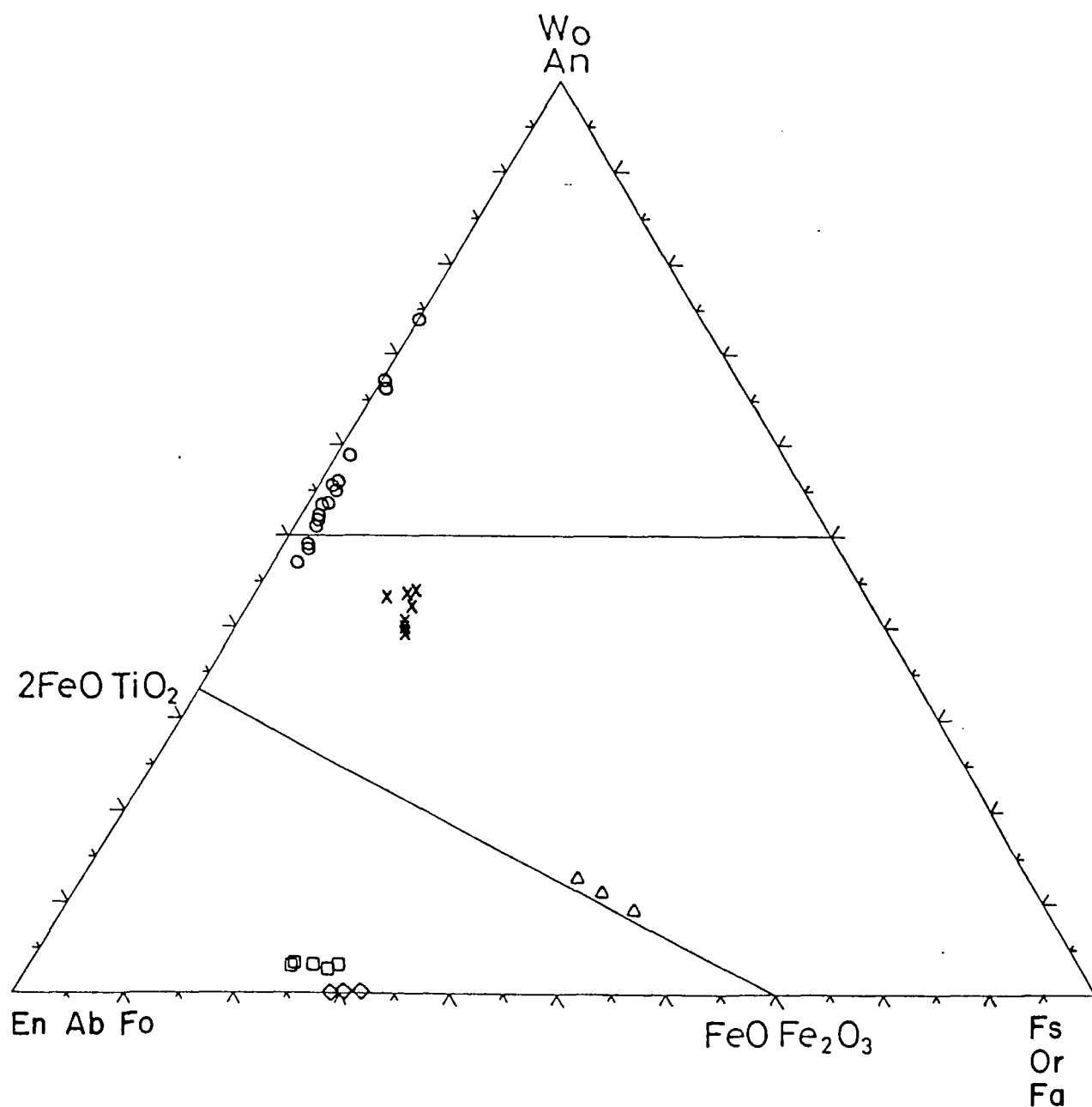
LAVAS DEL VOLCAN PALEOREVENTADOR (VPR)  
 DIAGRAMA DE PERSISTENCIA DE LAS FASES EN FENOCRISTALES





BASALTOS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)  
COMPOSICION QUIMICA DE LOS FENOCRISTALES (MUESTRA REV-95)

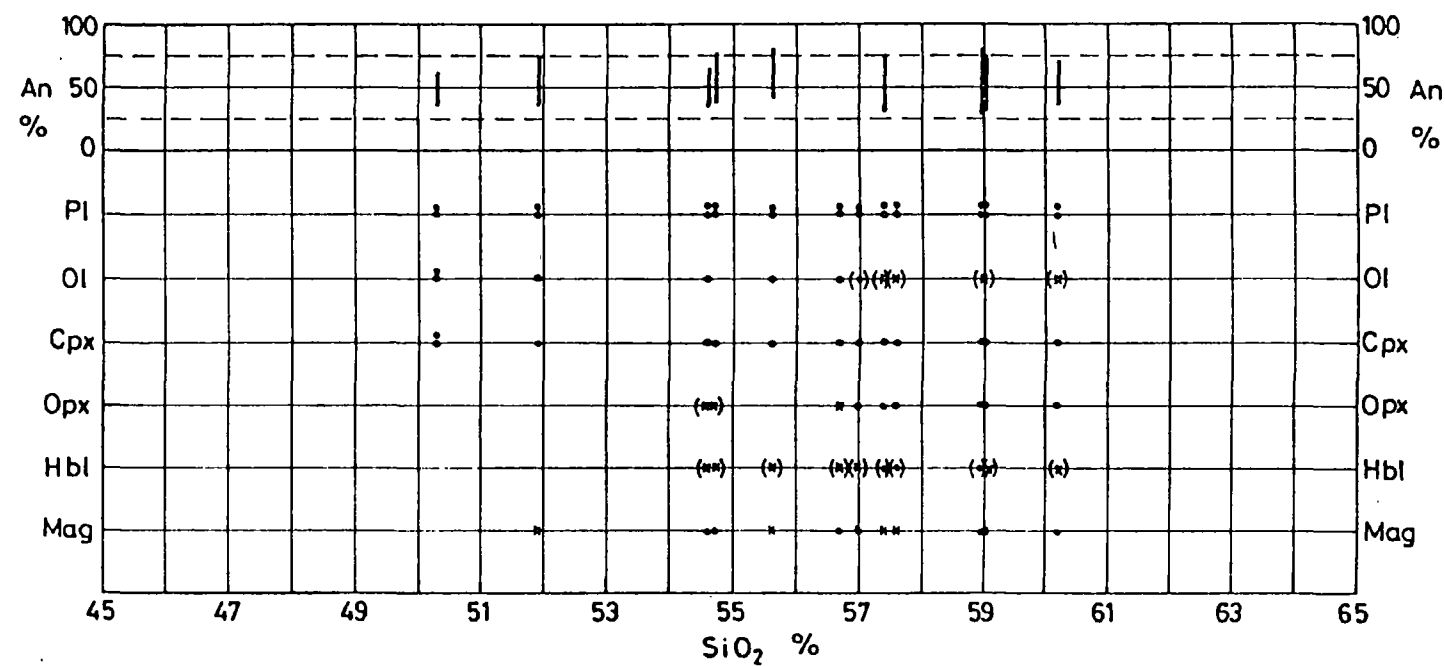




ANDESITAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

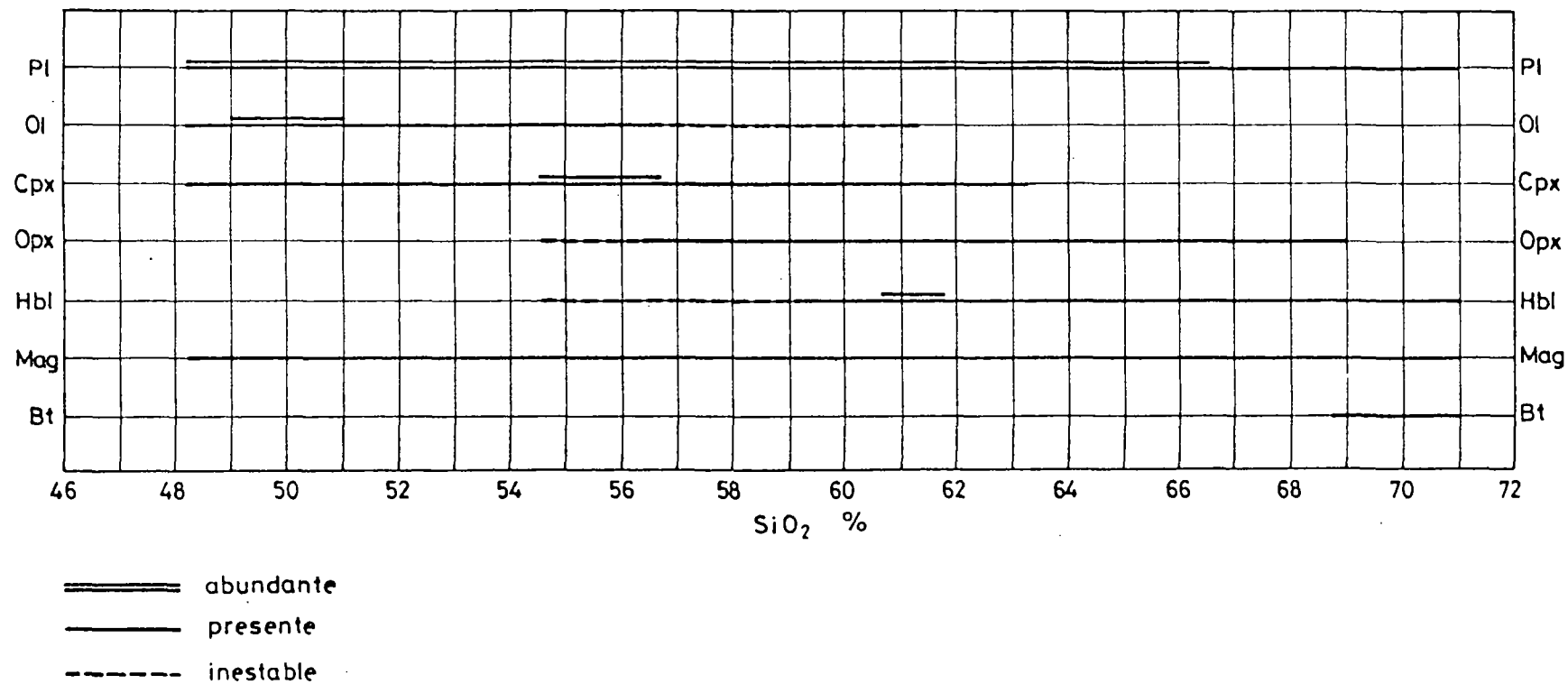
COMPOSICION QUIMICA DE LOS FENOCRIETALES (MUESTRA REV-14)





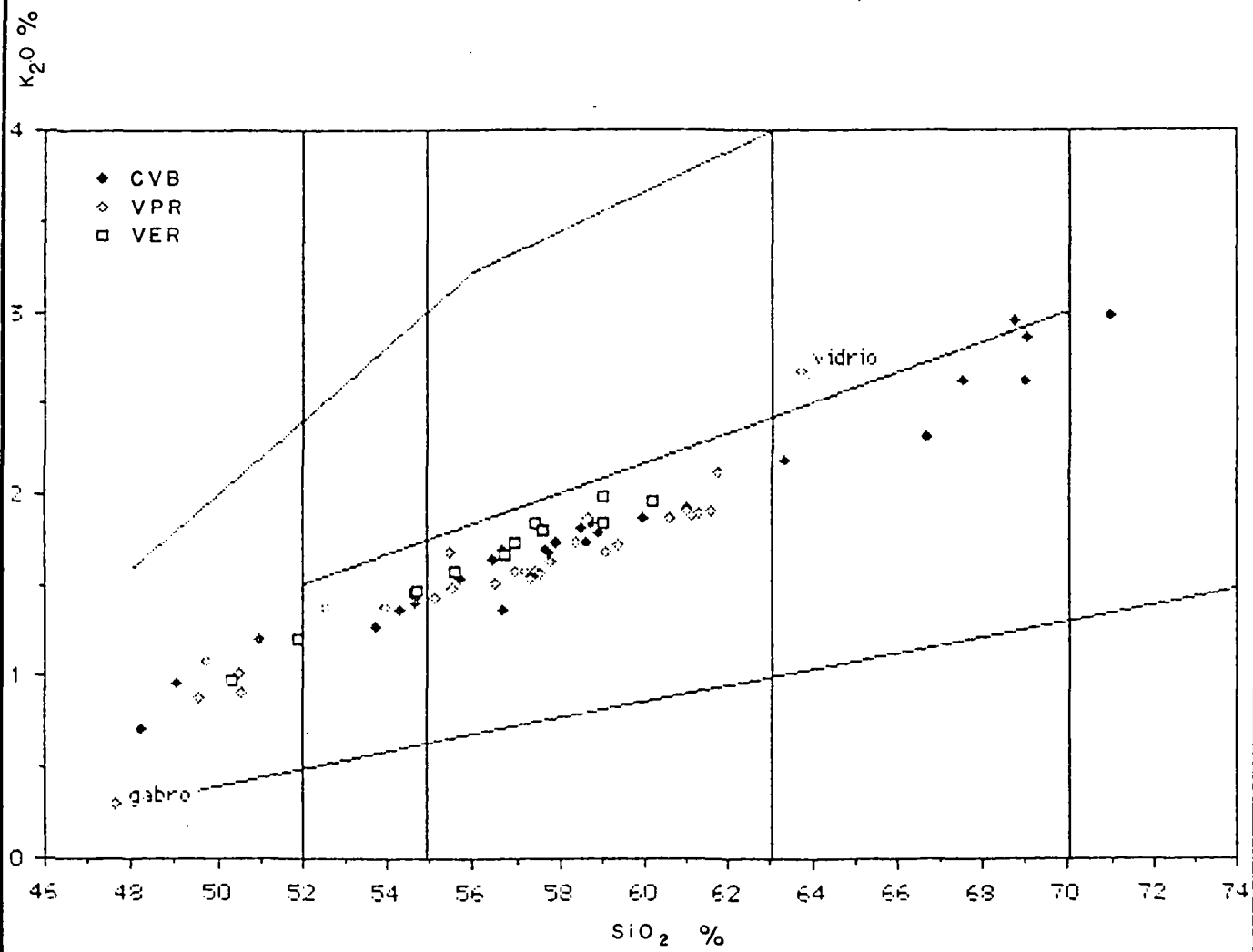
LAVAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)  
 DIAGRAMA DE PERSISTENCIA DE LAS FASES EN FENOCRISTALES





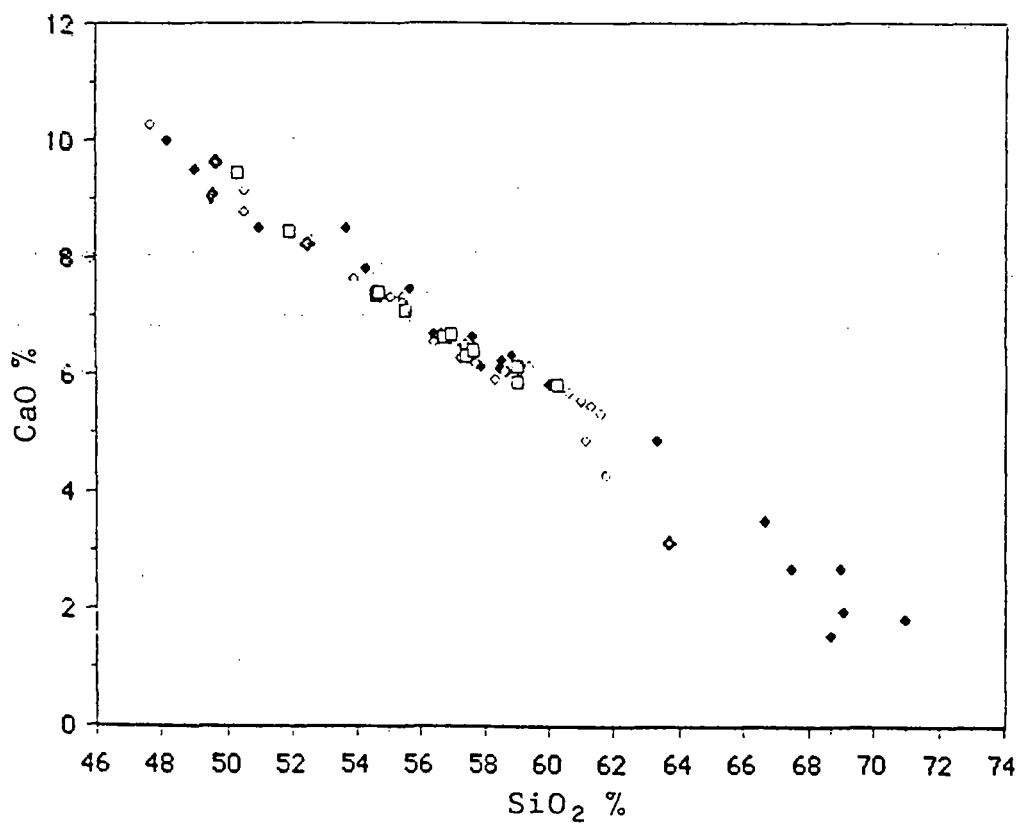
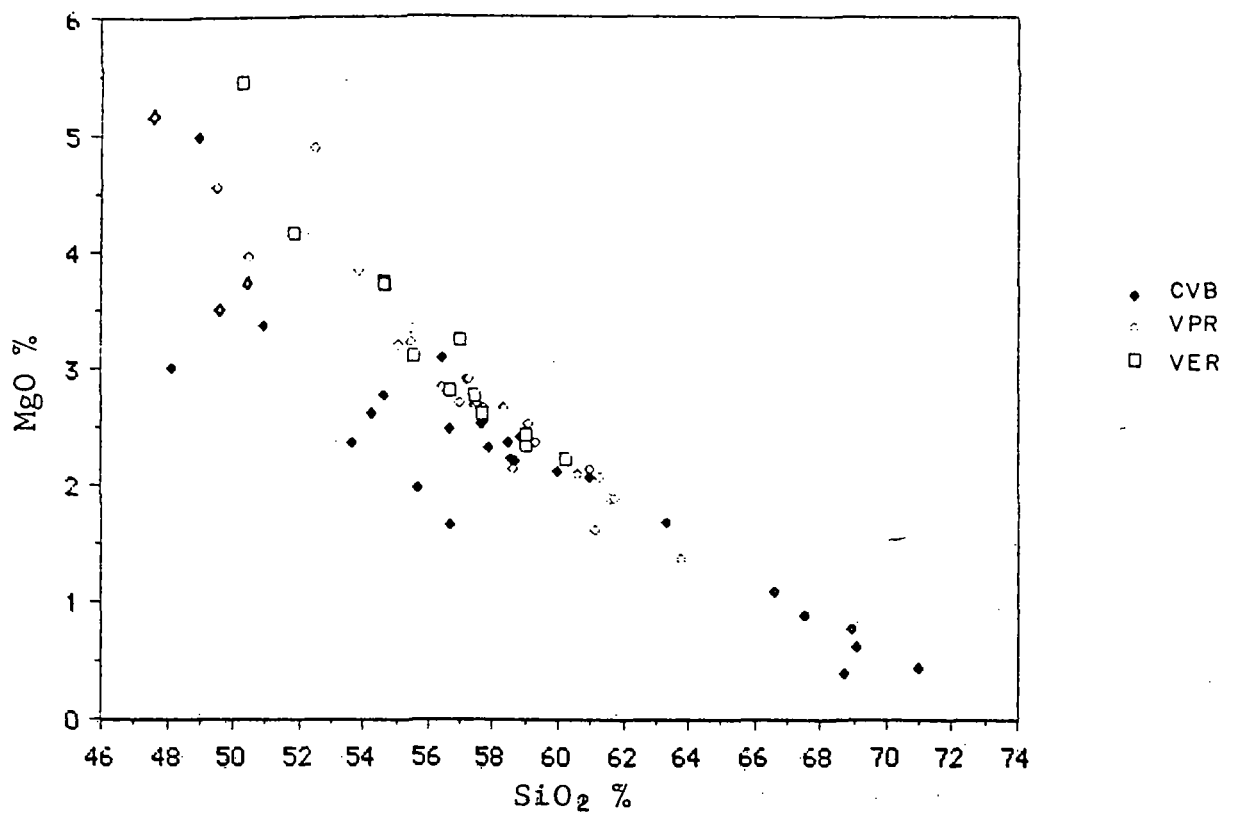
LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 DIAGRAMA RESUMEN DE PERSISTENCIA DE LAS FASES EN FENOCRISTALES





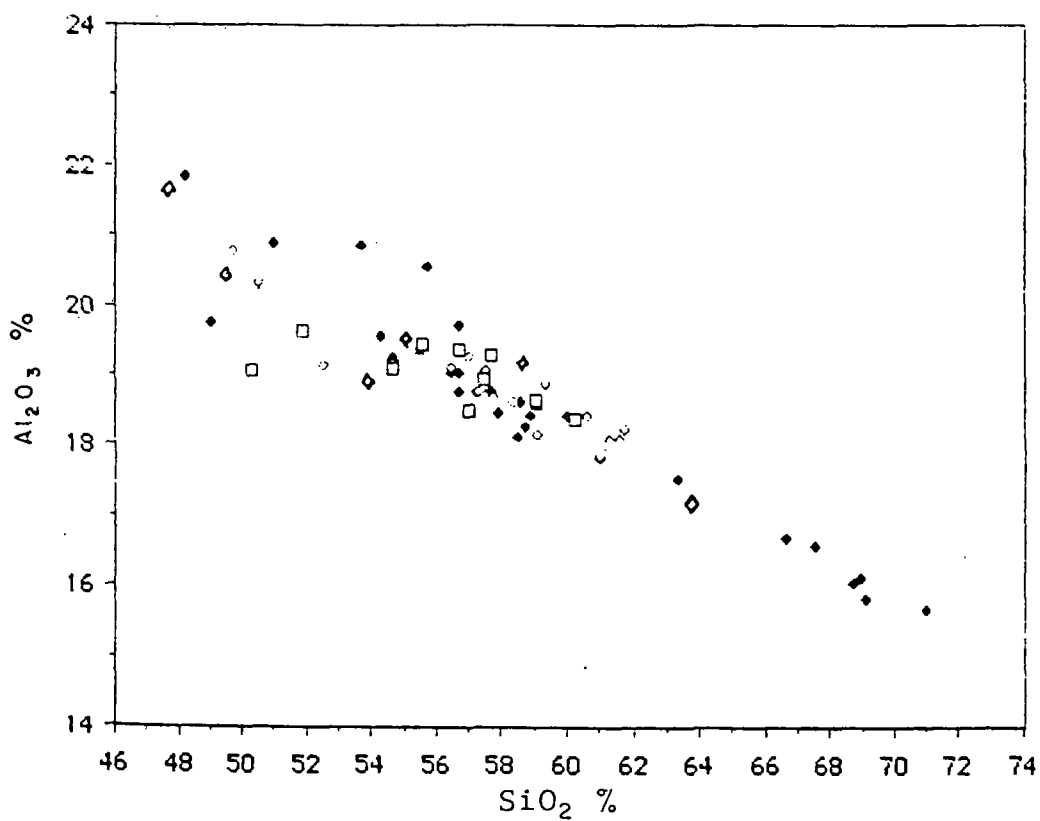
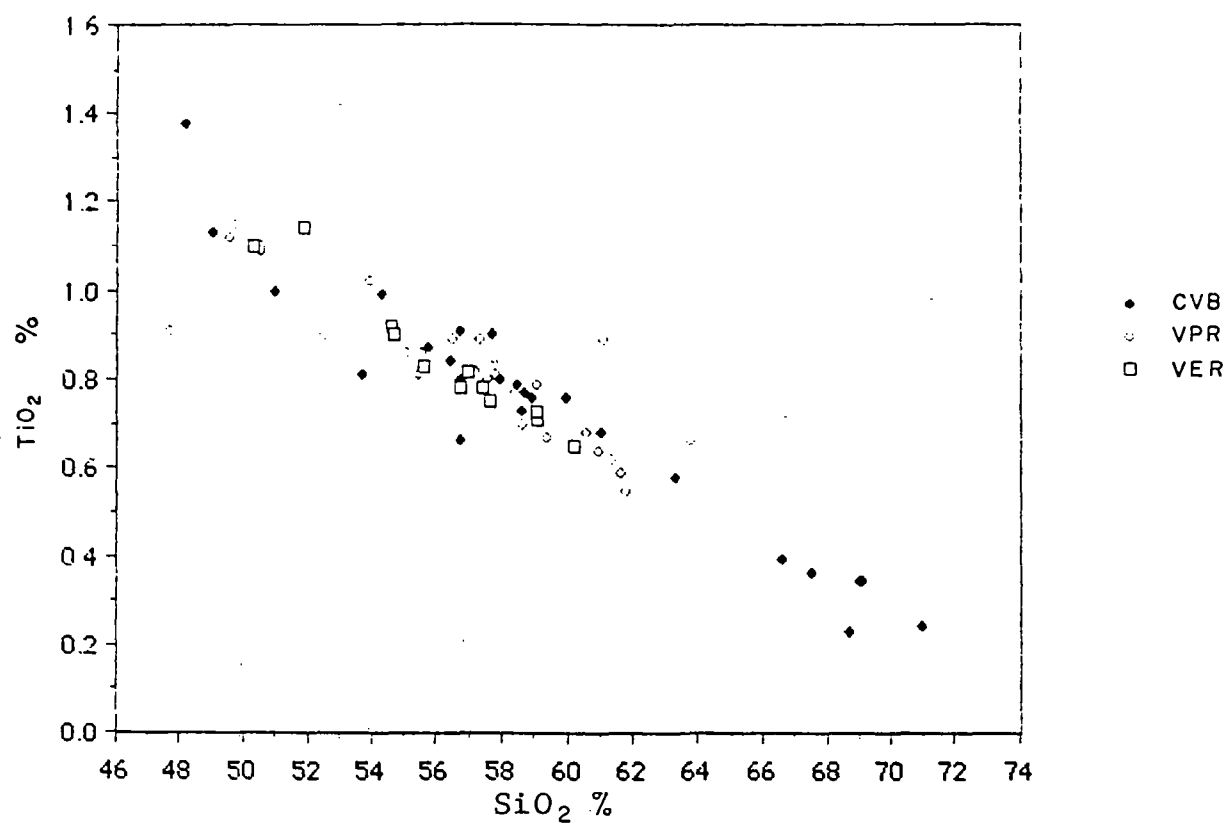
LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 DIAGRAMA K<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub>





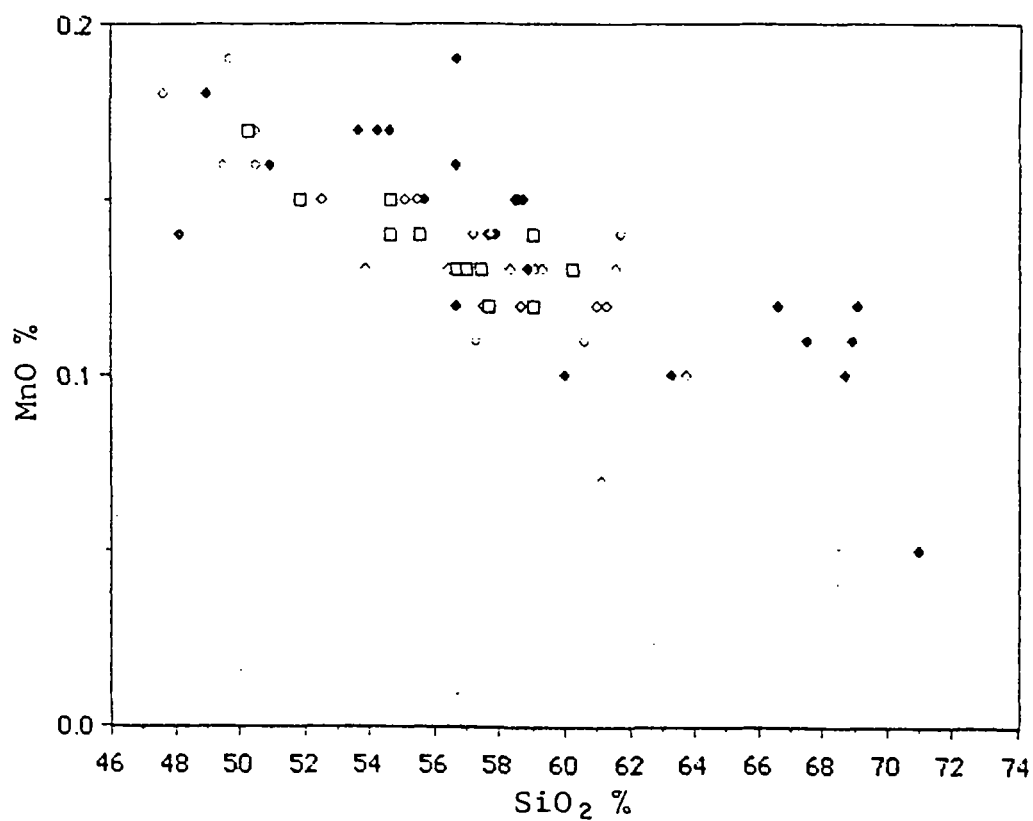
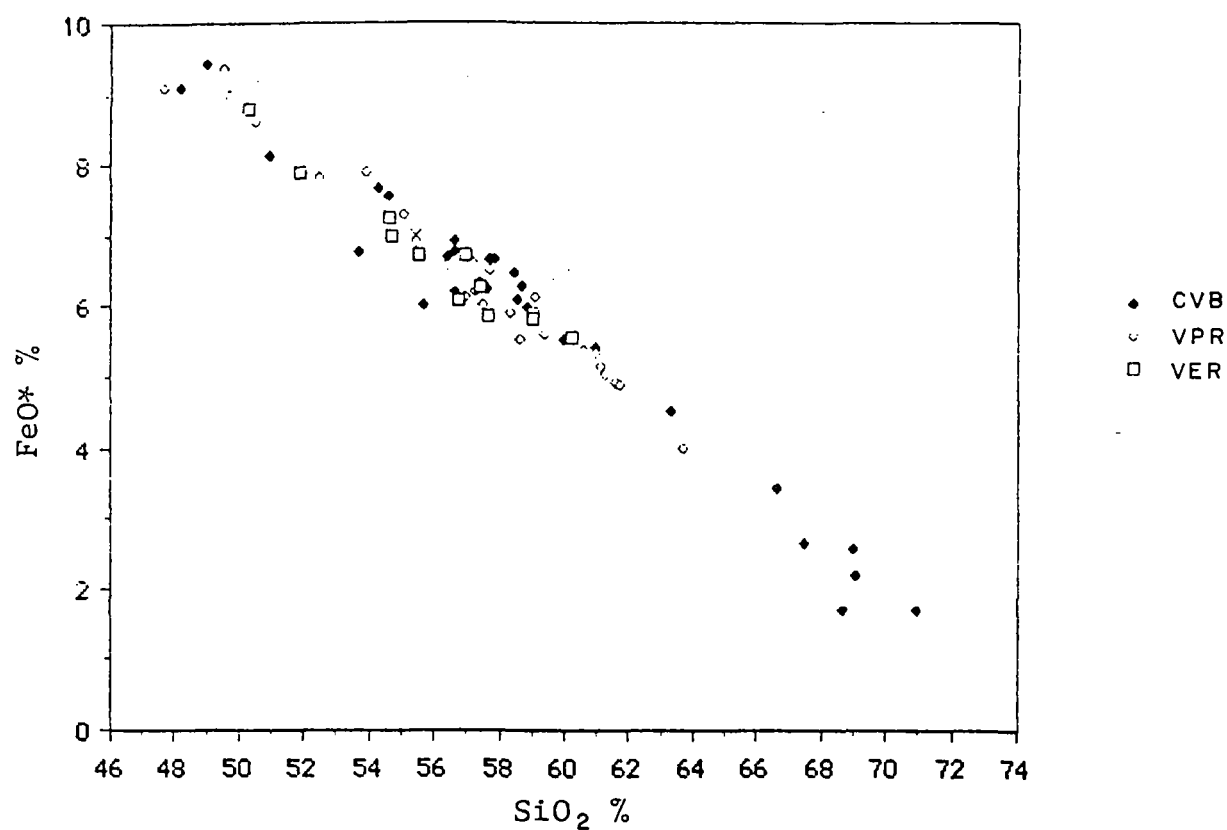
LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 DIAGRAMA DE VARIACION DE Mg Y Ca versus SiO<sub>2</sub>





LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 DIAGRAMA DE VARIACION DE Ti Y Al versus  $\text{SiO}_2$

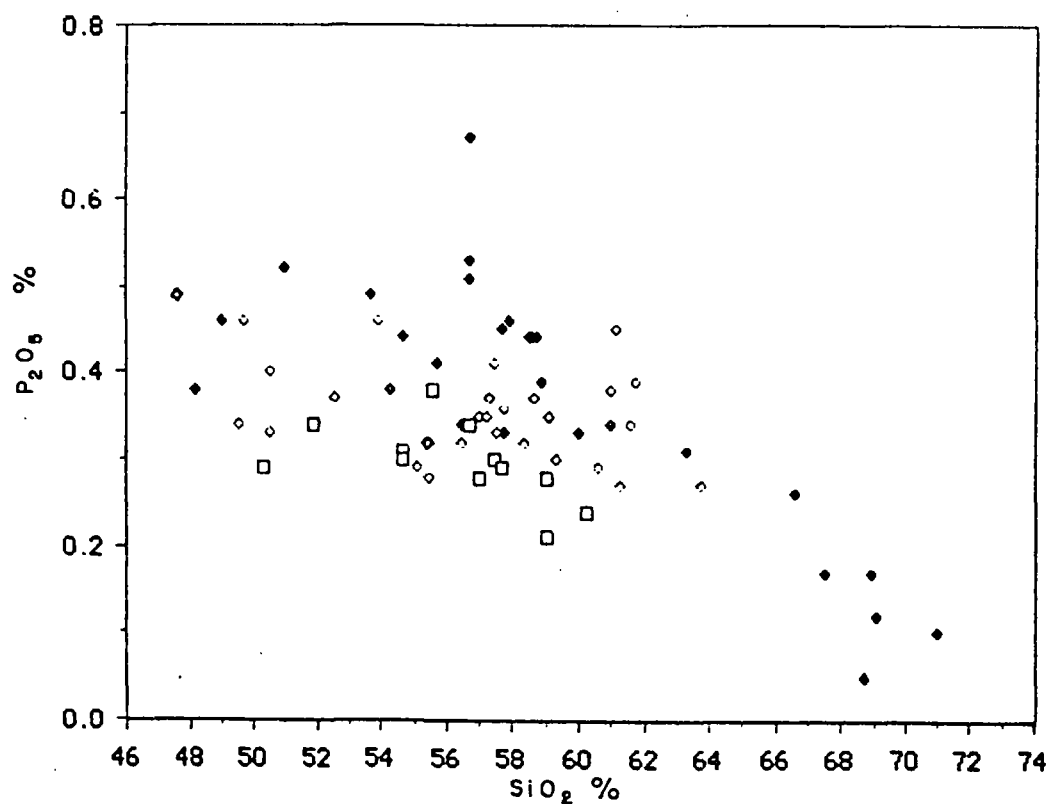
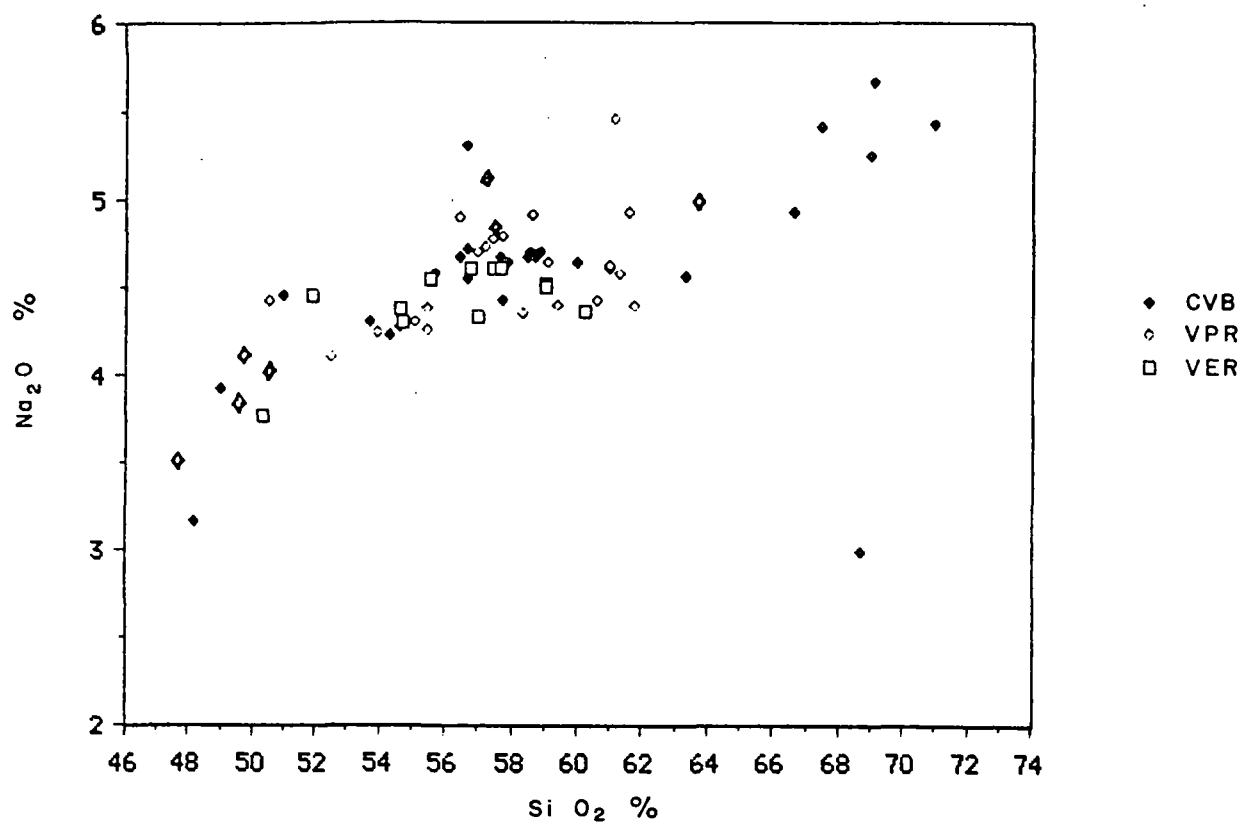




LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 DIAGRAMA DE VARIACION DE Fe Y Mn versus  $\text{SiO}_2$

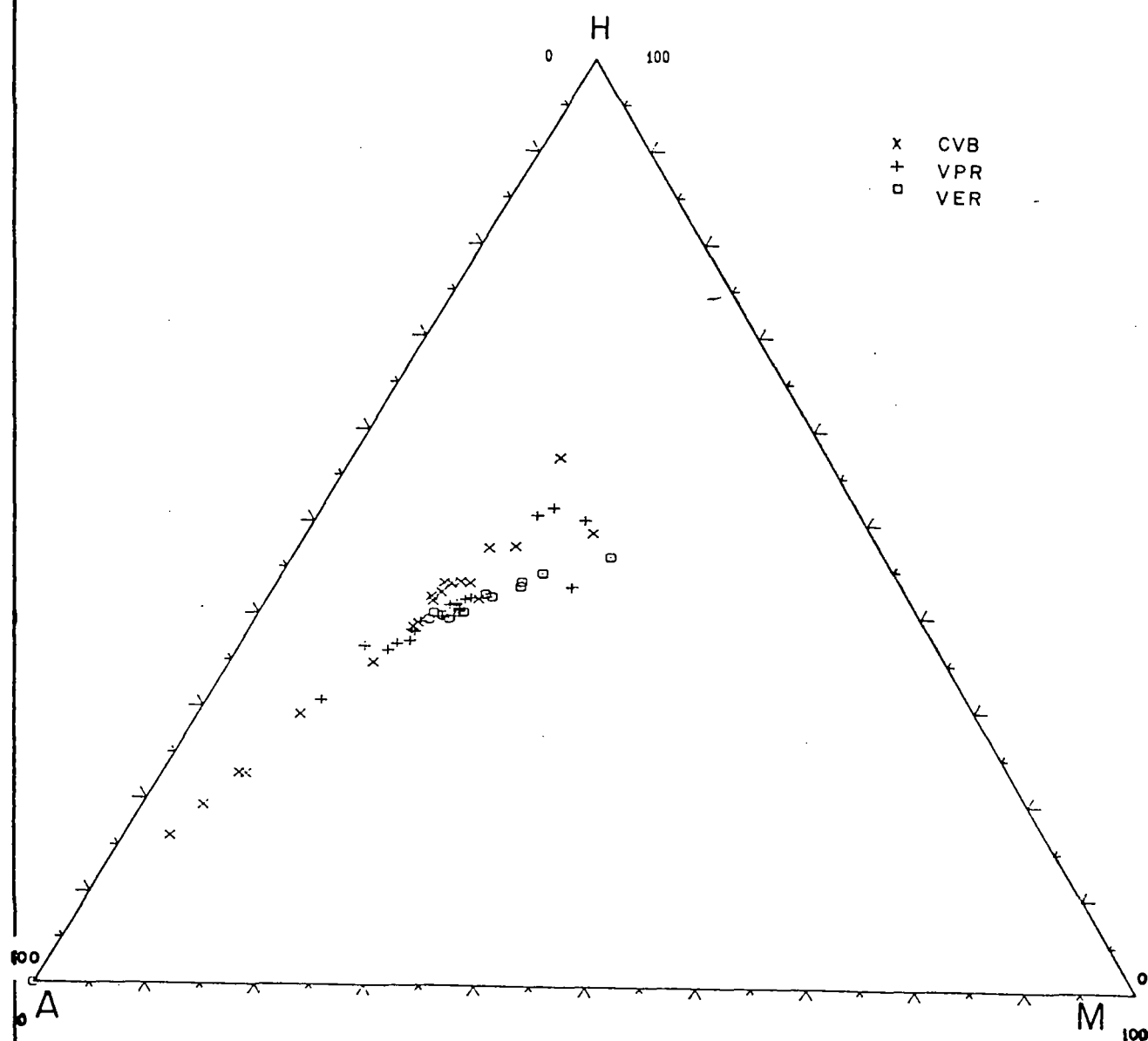


FIGURA 6/17



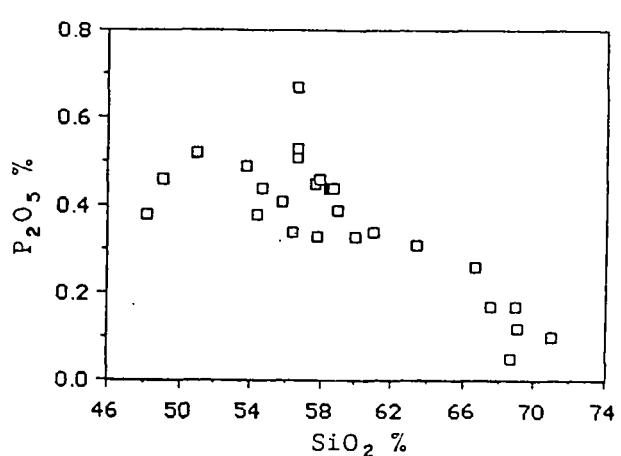
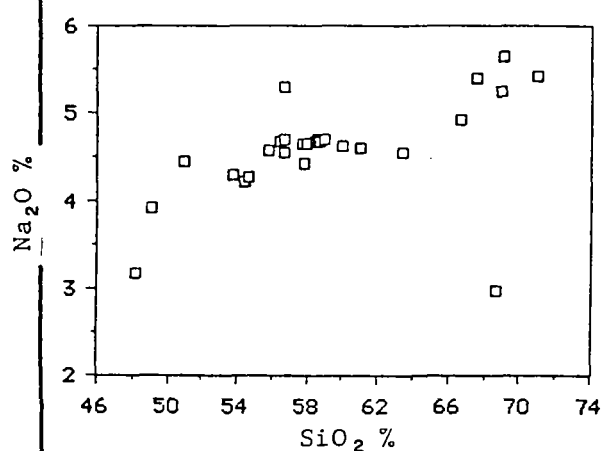
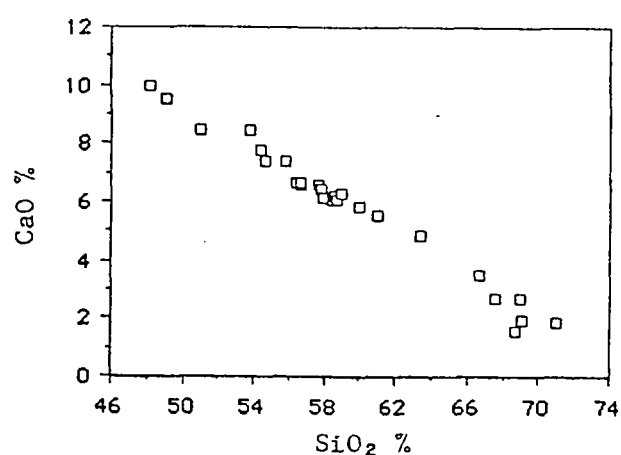
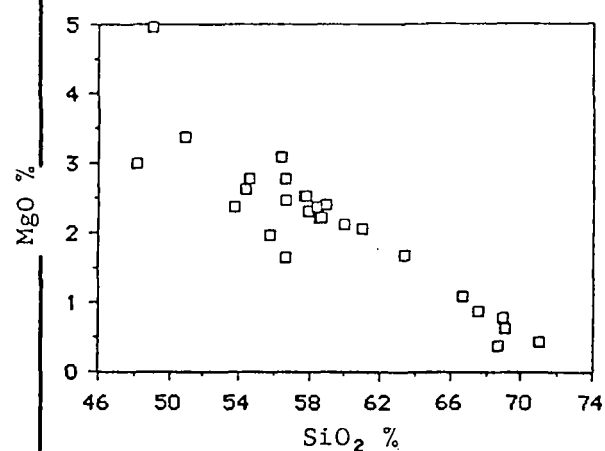
LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 DIAGRAMA DE VARIACION DE Na Y P versus  $\text{SiO}_2$





LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR  
 DIAGRAMA ALCALI/HIERRO/MAGNESIO (A/H/M)

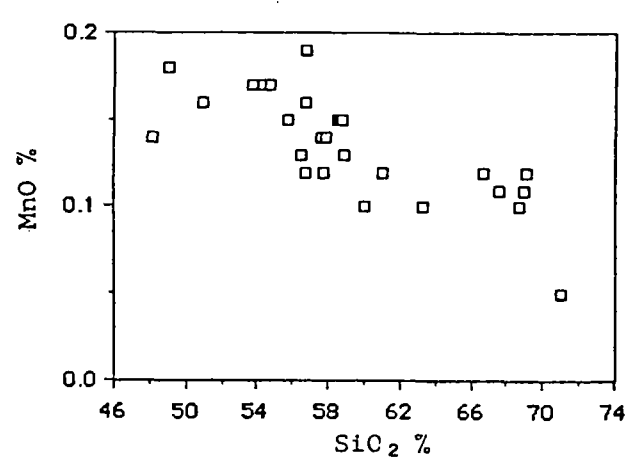
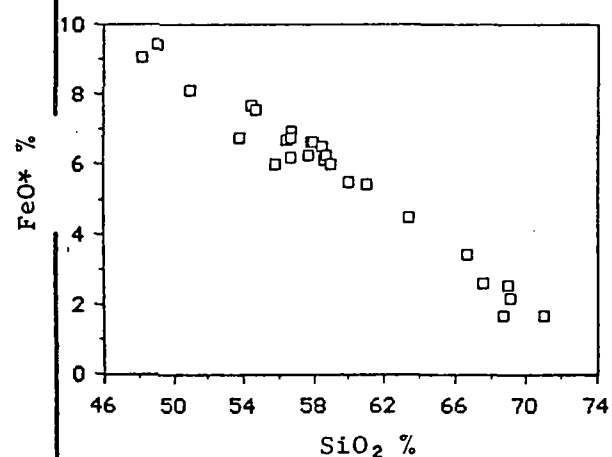
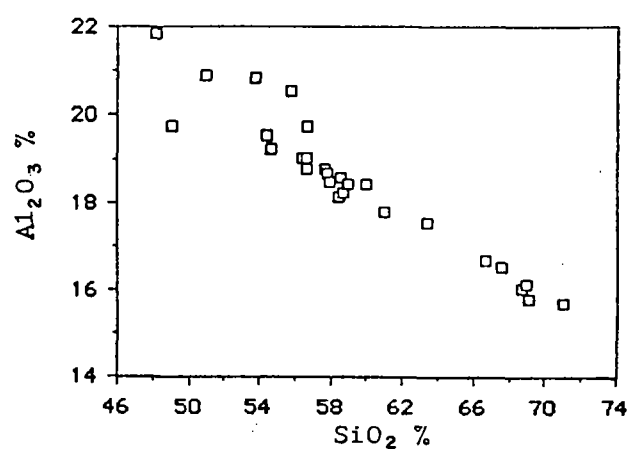
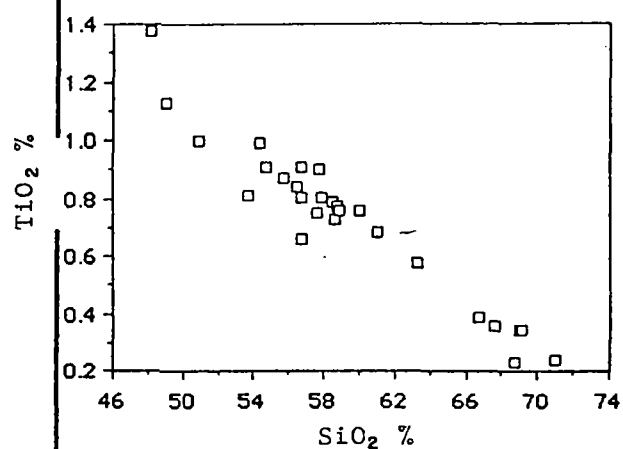




LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO BASAL (CVB)

DIAGRAMA DE VARIACION DE LOS ELEMENTOS MAYORES (Mg,Ca,Na,P)  
versus SiO<sub>2</sub>

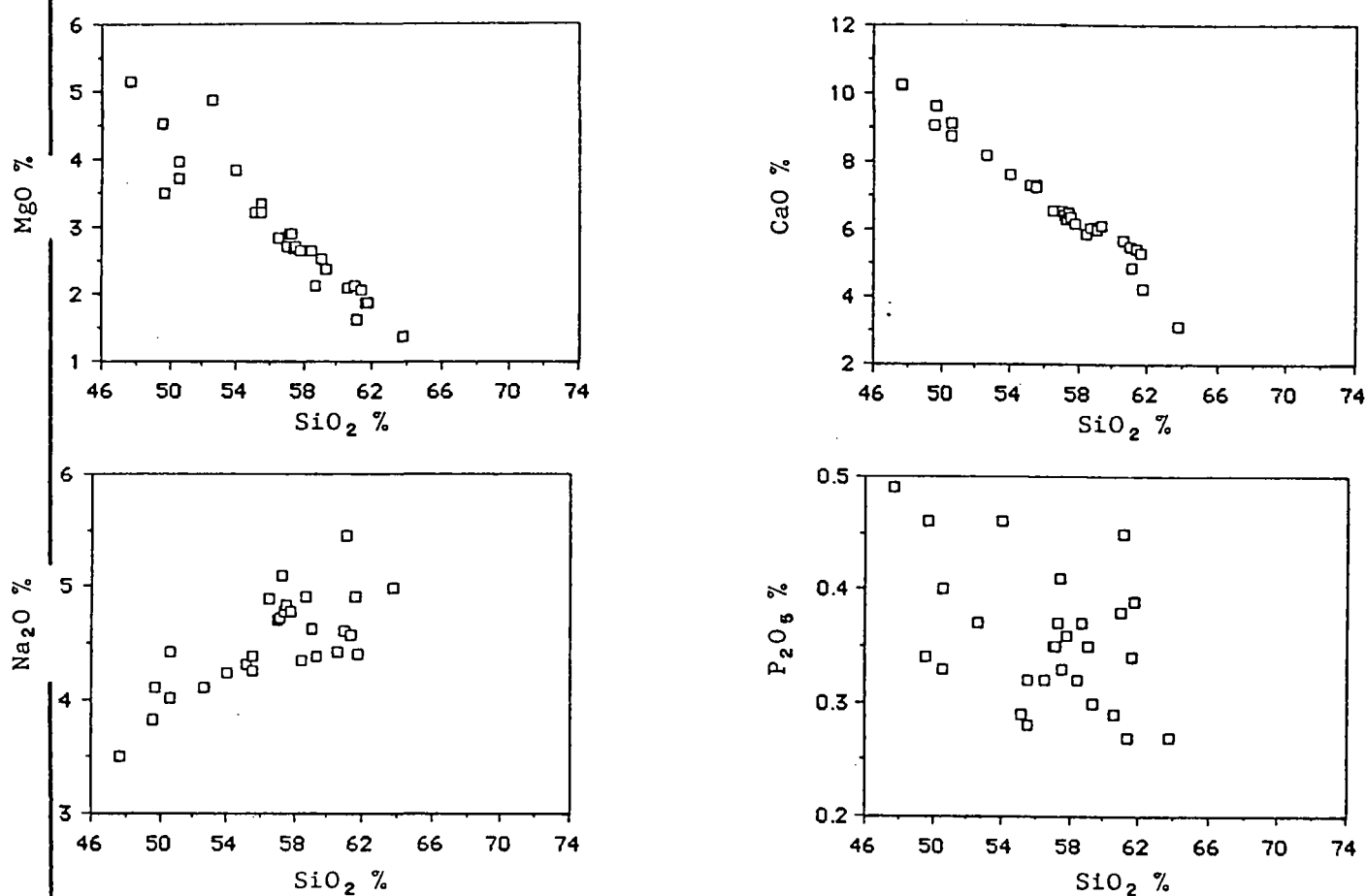




LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO BASAL (CVB)

DIAGRAMA DE VARIACION DE LOS ELEMENTOS MAYORES (Ti, Al, Fe, Mn)  
versus  $\text{SiO}_2$

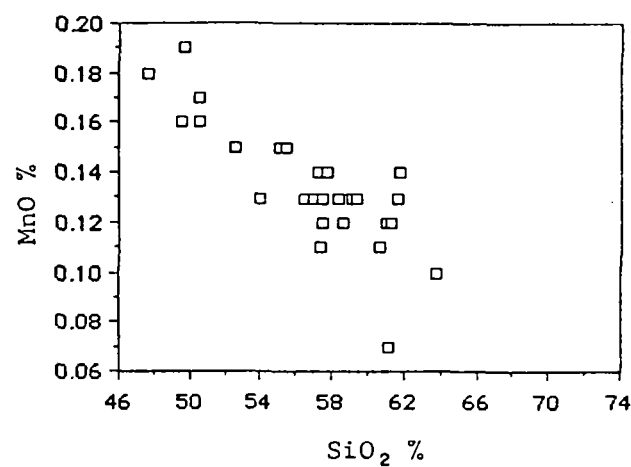
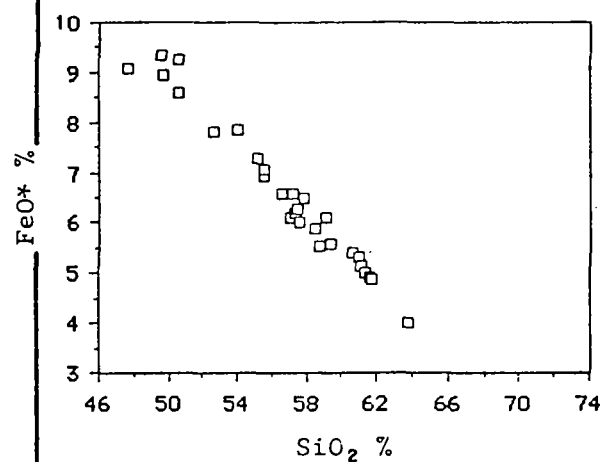
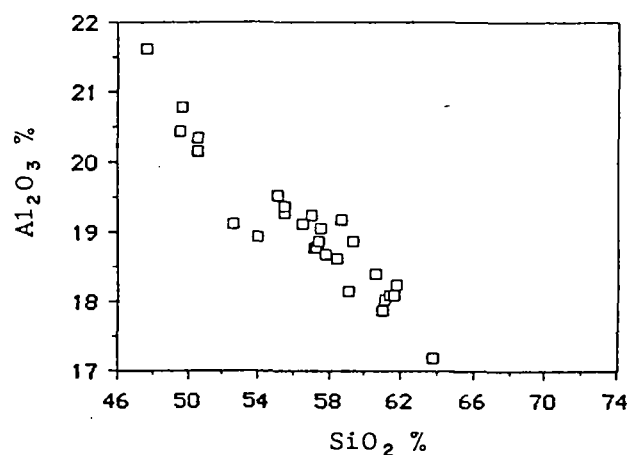
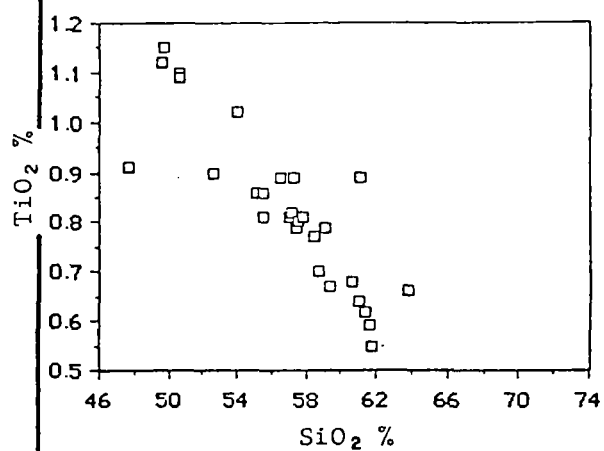




## LAVAS DEL VOLCAN PALEOREVENTADOR (VPR)

DIAGRAMA DE VARIACION DE LOS ELEMENTOS MAYORES (Mg, Ca, Na, P)  
versus  $\text{SiO}_2$

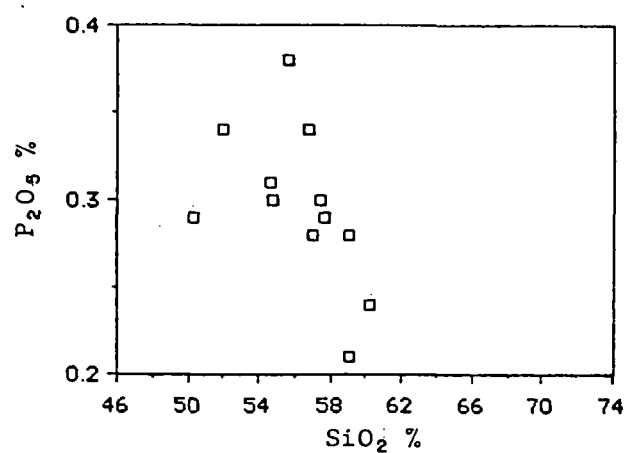
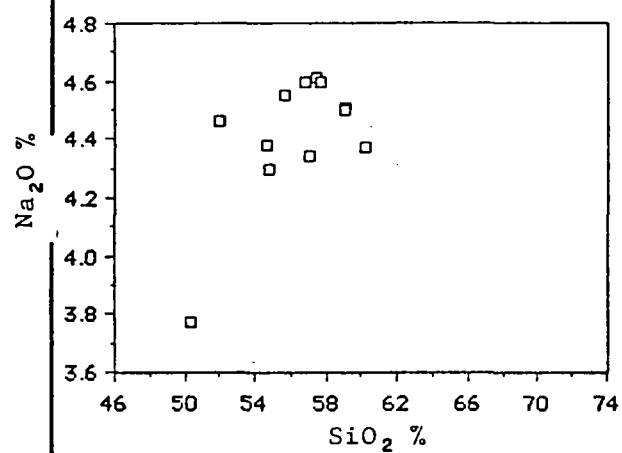
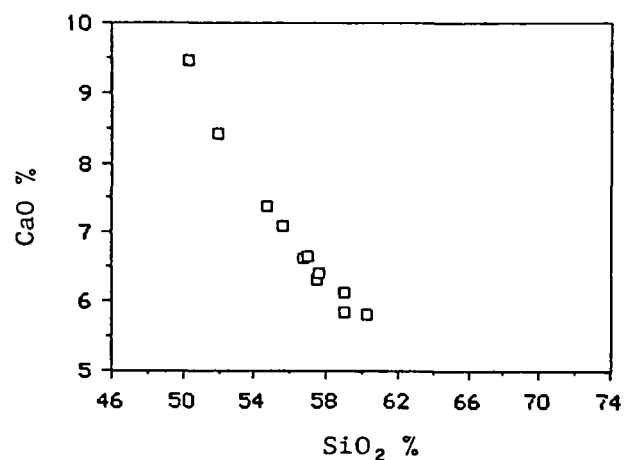
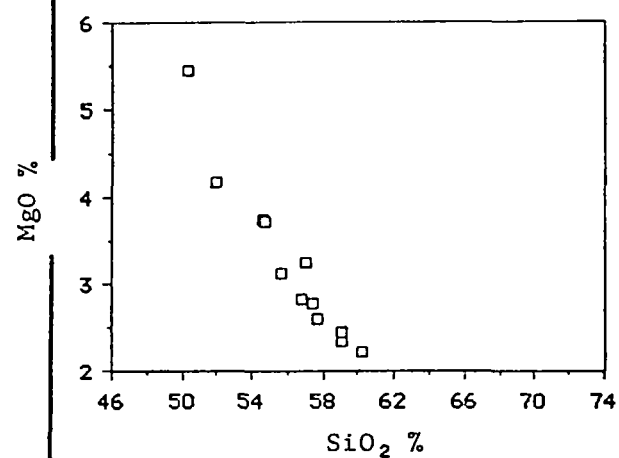




LAVAS DEL VOLCAN PALEOREVENTADOR (VPR)

DIAGRAMA DE VARIACION DE LOS ELEMENTOS MAYORES (Ti, Al, Fe, Mn)  
versus  $\text{SiO}_2$

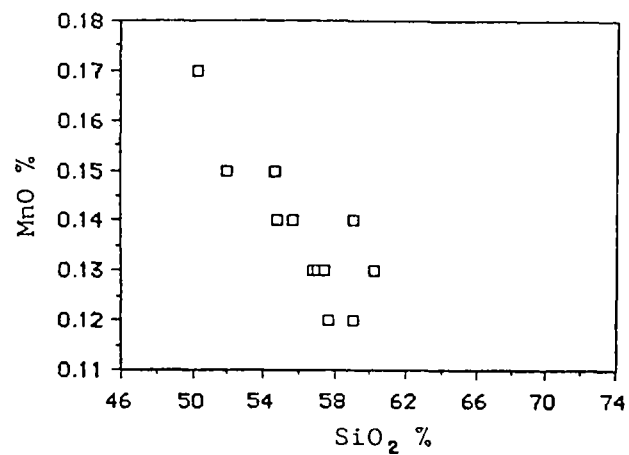
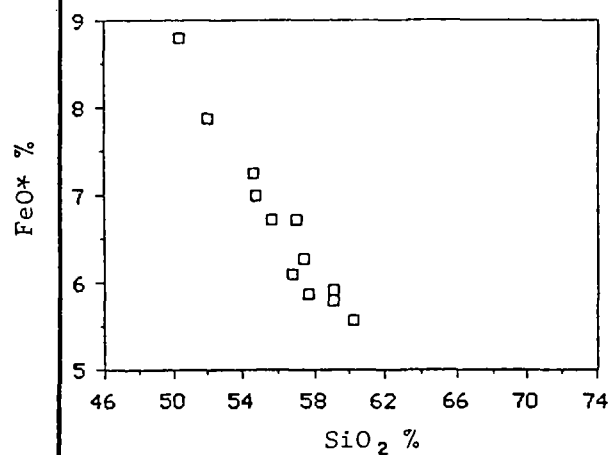
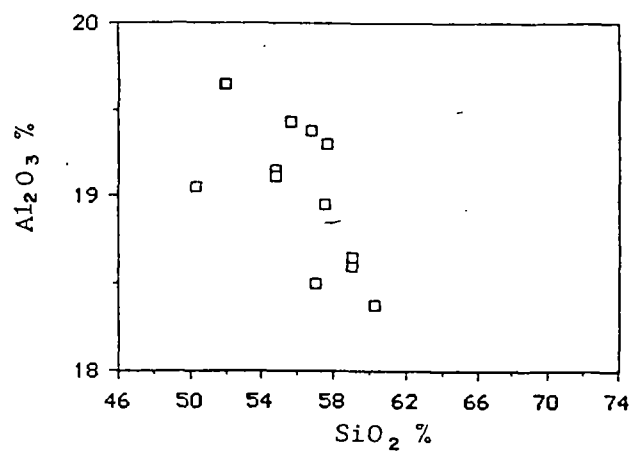
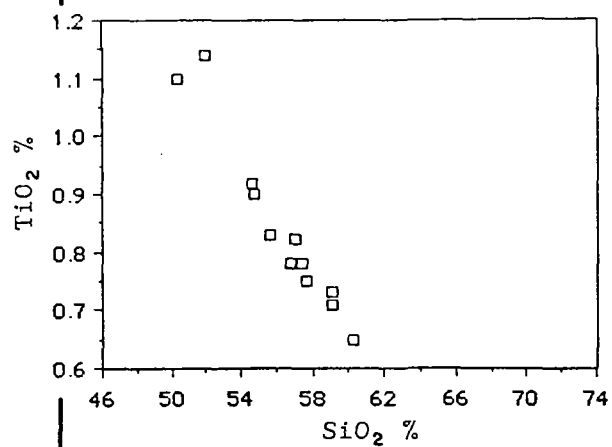




### LAVAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

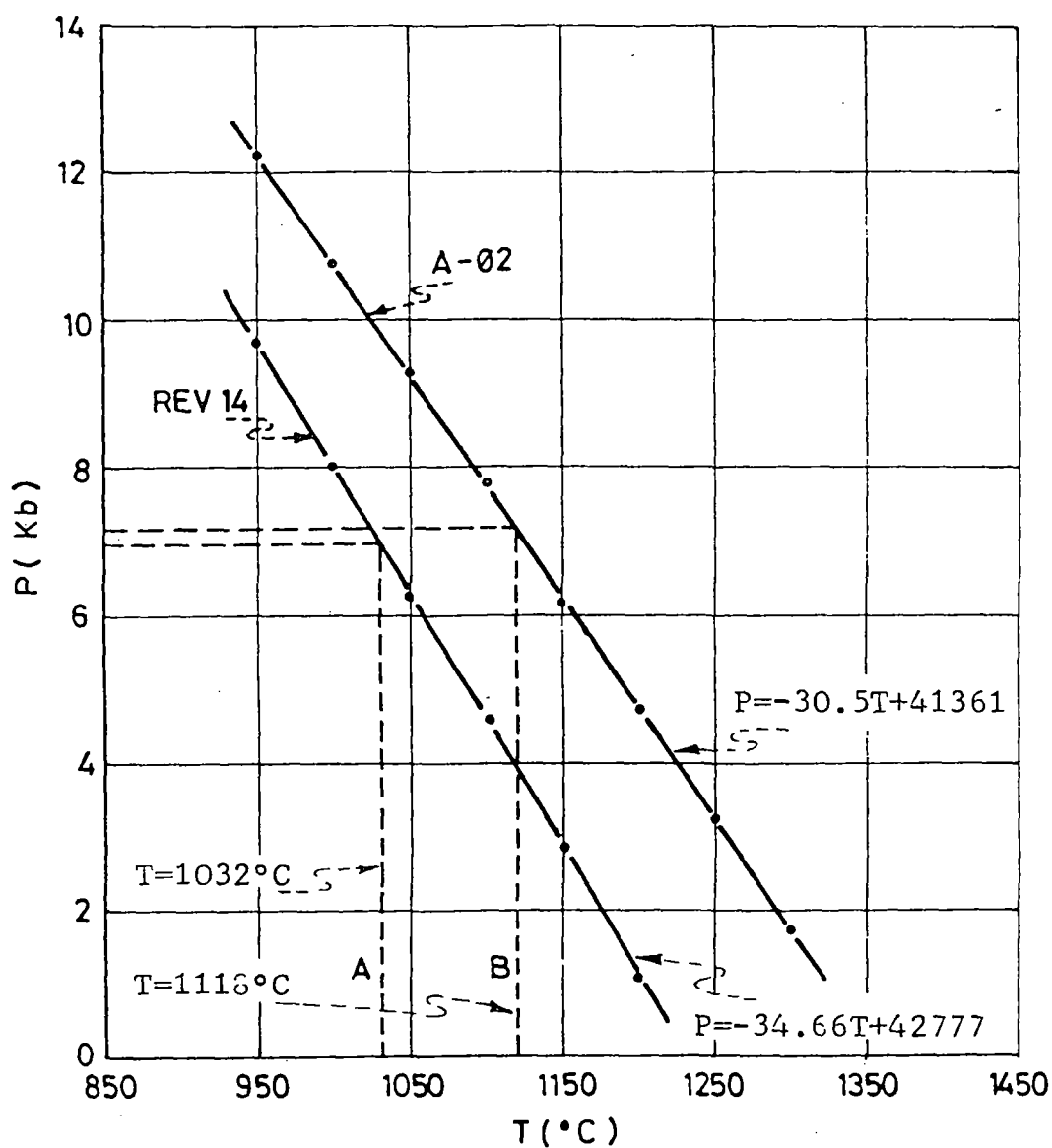
DIAGRAMA DE VARIACION DE LOS ELEMENTOS MAYORES (Mg, Ca, Na, P)  
versus SiO<sub>2</sub>





LAVAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)  
 DIAGRAMA DE VARIACION DE LOS ELEMENTOS MAYORES (Ti, Al, Fe, Mn)  
 versus SiO<sub>2</sub>

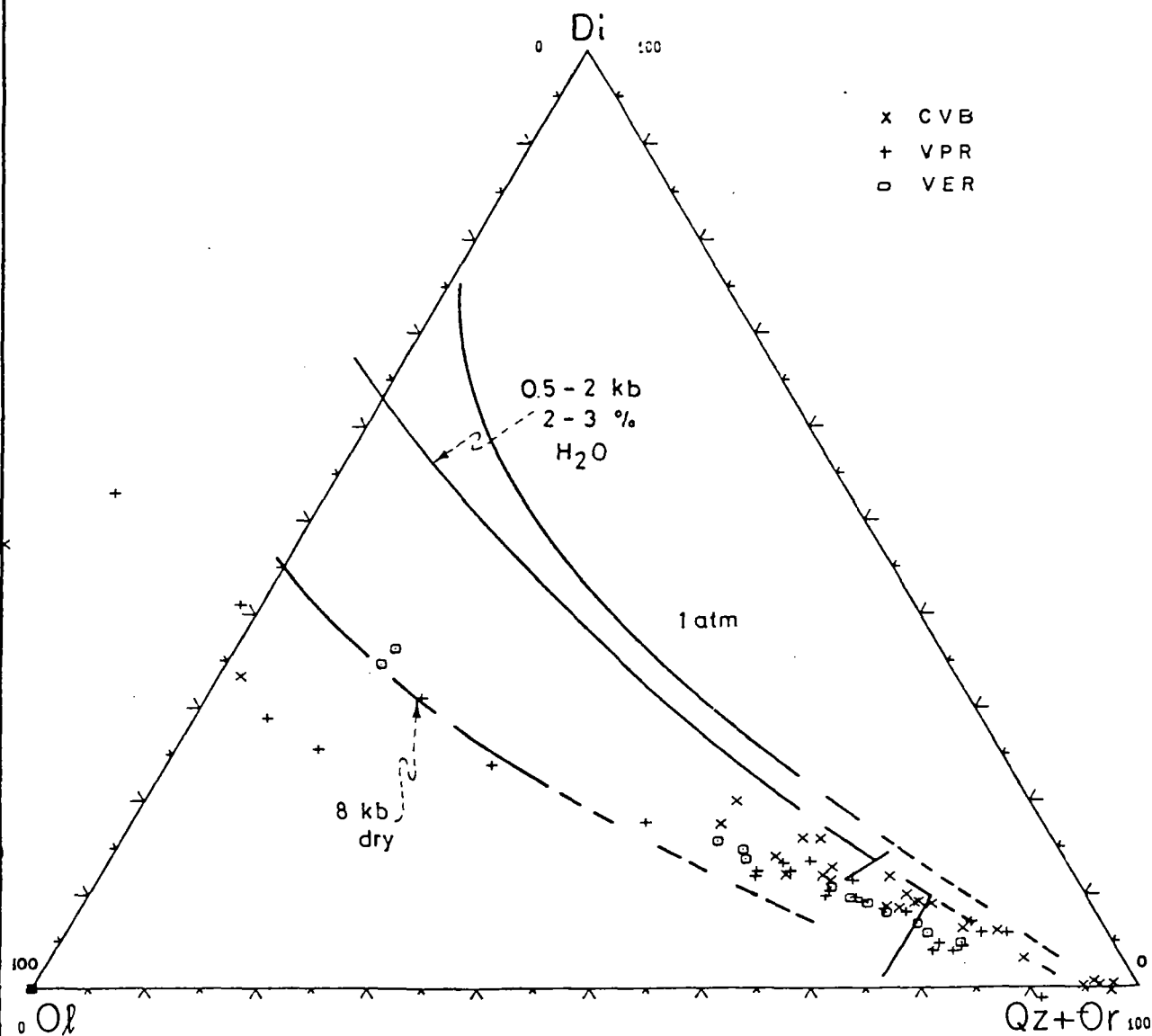




BASALTO DEL VOLCAN PALEOREVENTADOR (muestra A-02) Y ANDESITA DEL VOLCAN EL REVENTADOR (muestra REV-14)

A(=1032°C), B(=1118°C) T DEL GEOTERMOMETRO A DOS PIROXENO  
 DIAGRAMA P-T PARA LA REACCION  $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6 + \text{SiO}_2 = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$



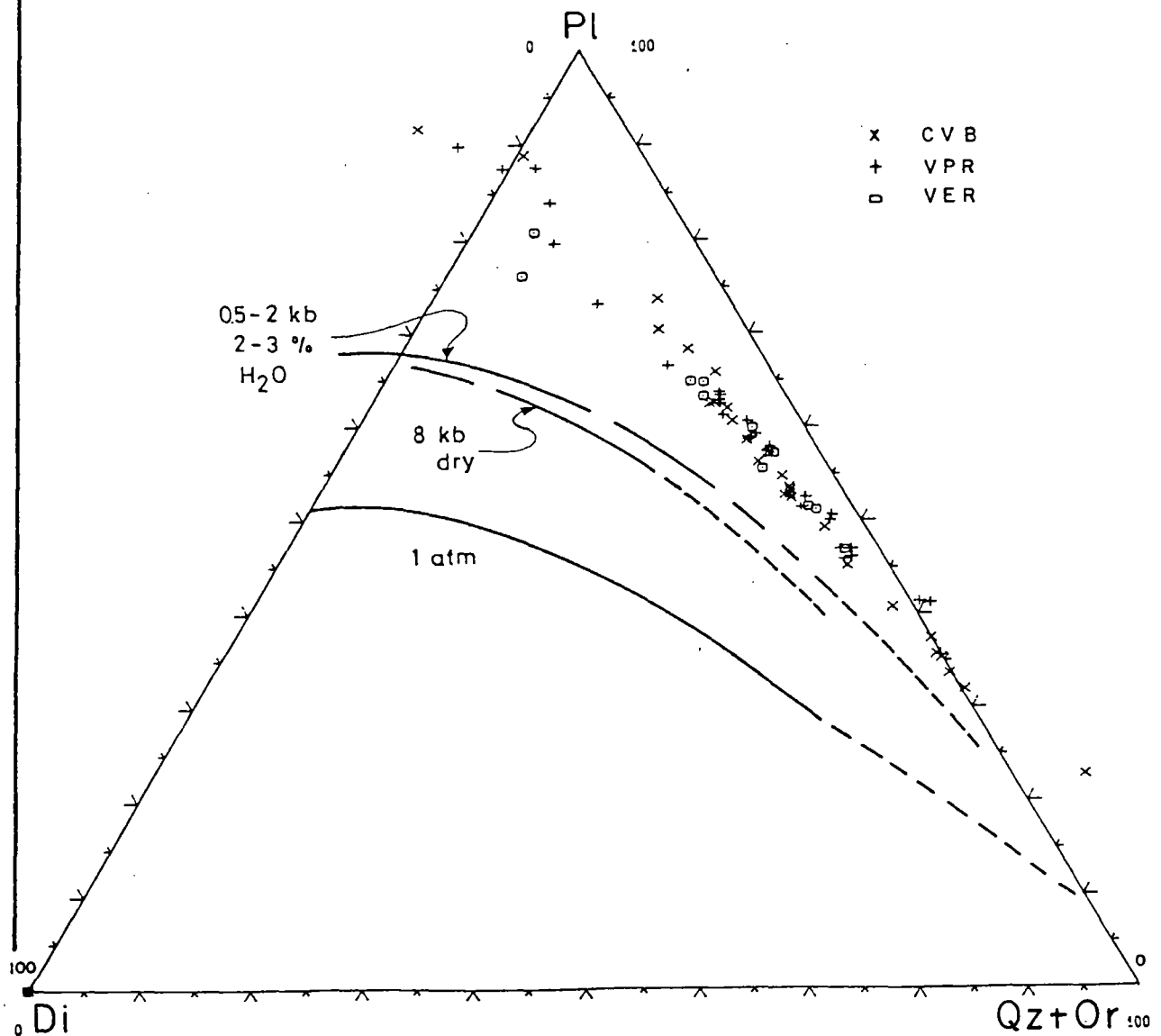


LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR

DIAGRAMA SEUDOTERNARIO DIOPSIDO/OLIVINO/CUARZO + ORTOCLASA

Curvas cotéticas saturadas en magnetita y plagioclasa  
(Proyecciones según Barker y Eggler, 1983)



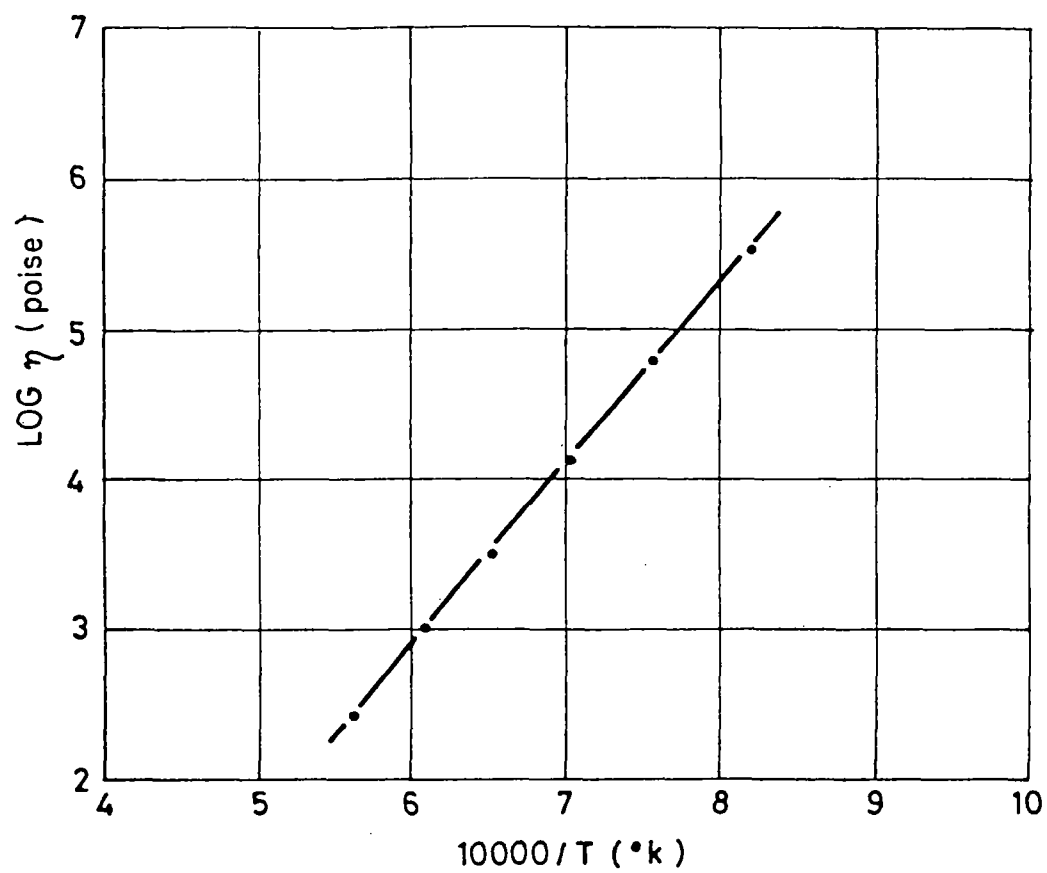


LAVAS DEL COMPLEJO VOLCANICO EL REVENTADOR

DIAGRAMA SEUDOTERNARIO DIOPSIDO / PLAGIOCLASA / CUARZO + ORTOCLASA

Curvas cotecticas saturadas en magnetita y olivino  
(Proyecciones según Barker y Eggler, 1983)

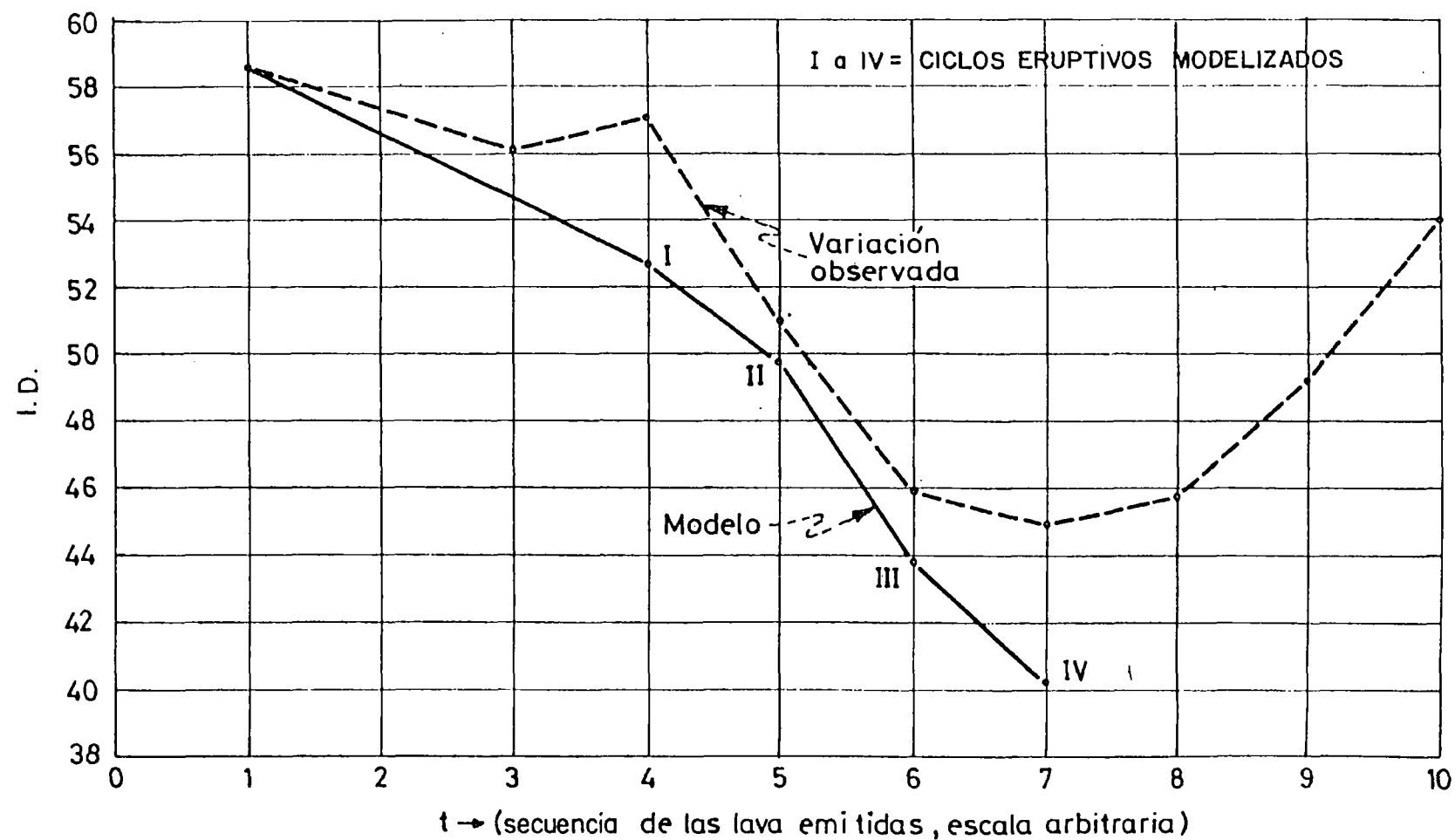




LAVA DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

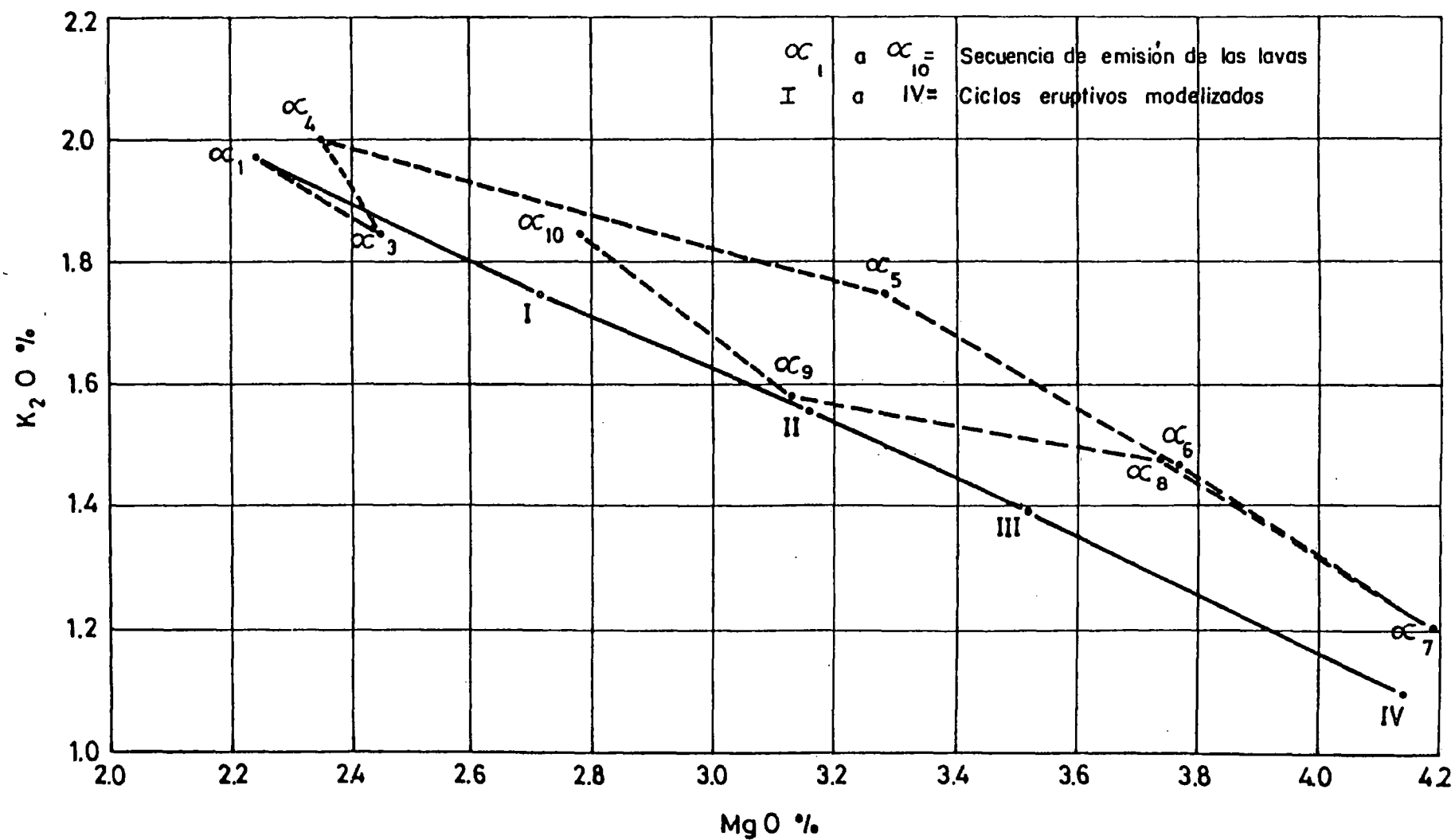
VARIACION DE LA VISCOSIDAD EN FUNCION DE LA TEMPERATURA (muestra REV-14)





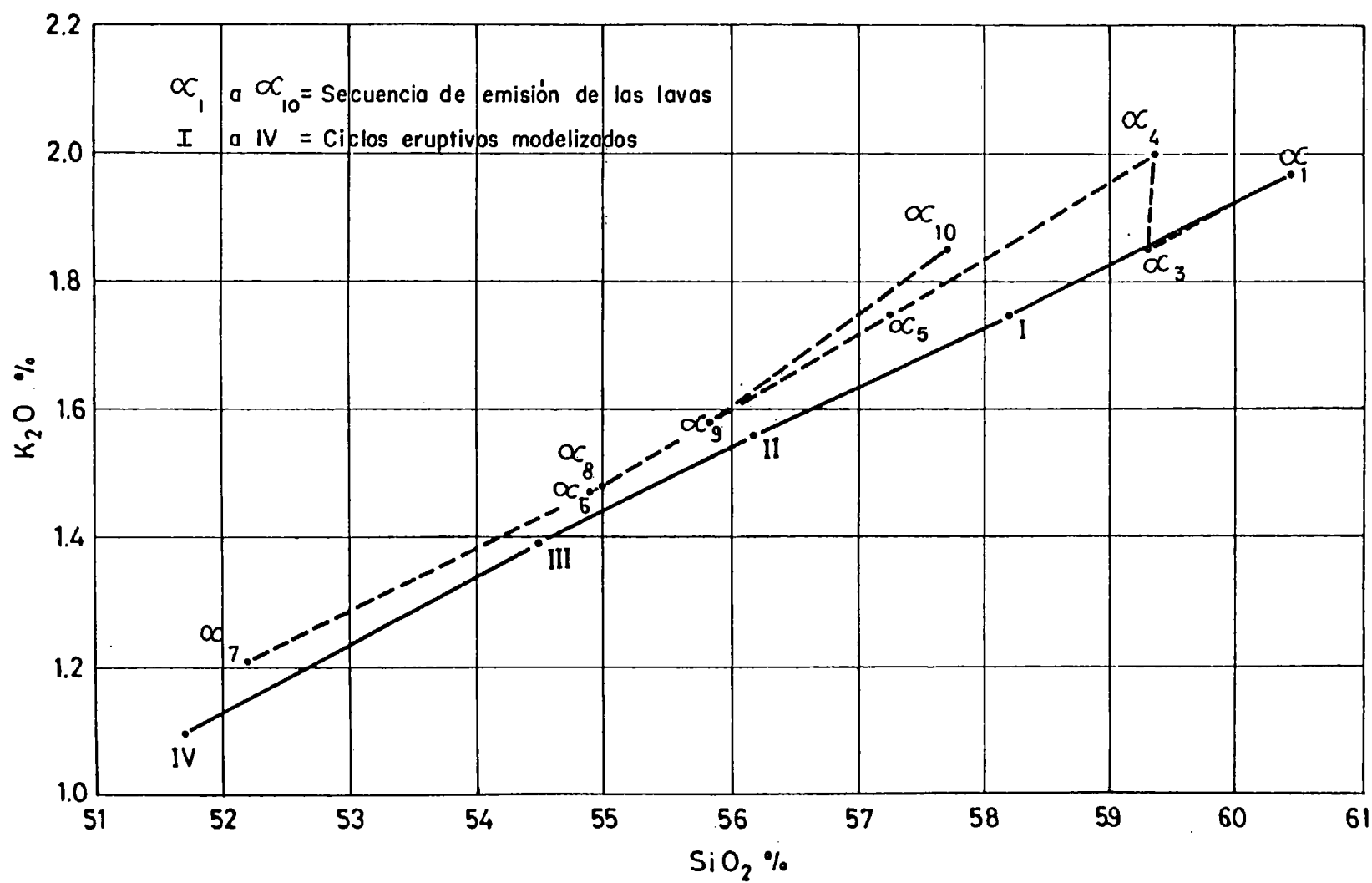
LAVAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)  
VARIACION DEL INDICE DE DIFERENCIACION (I.D.)





LAVAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)  
DIAGRAMA K<sub>2</sub>O/MgO

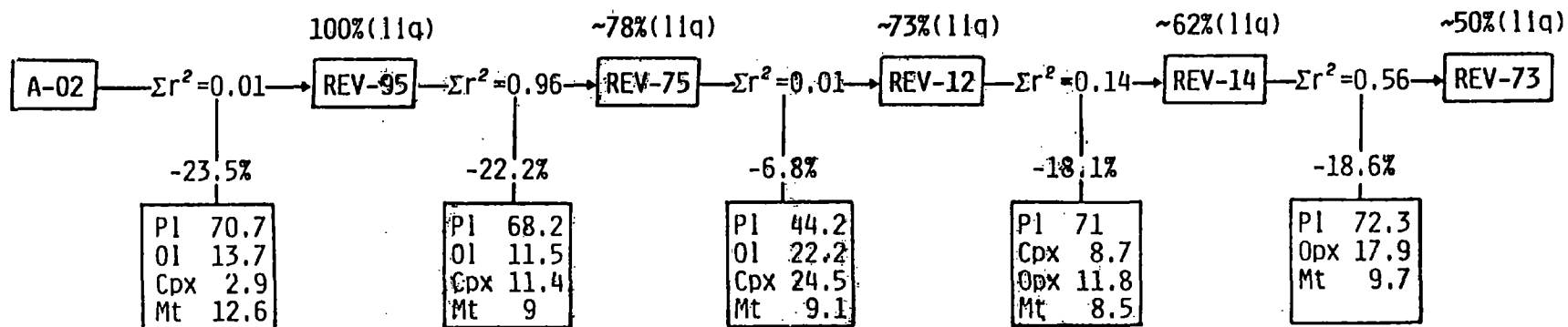




LAVAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

DIAGRAMA  $\text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$

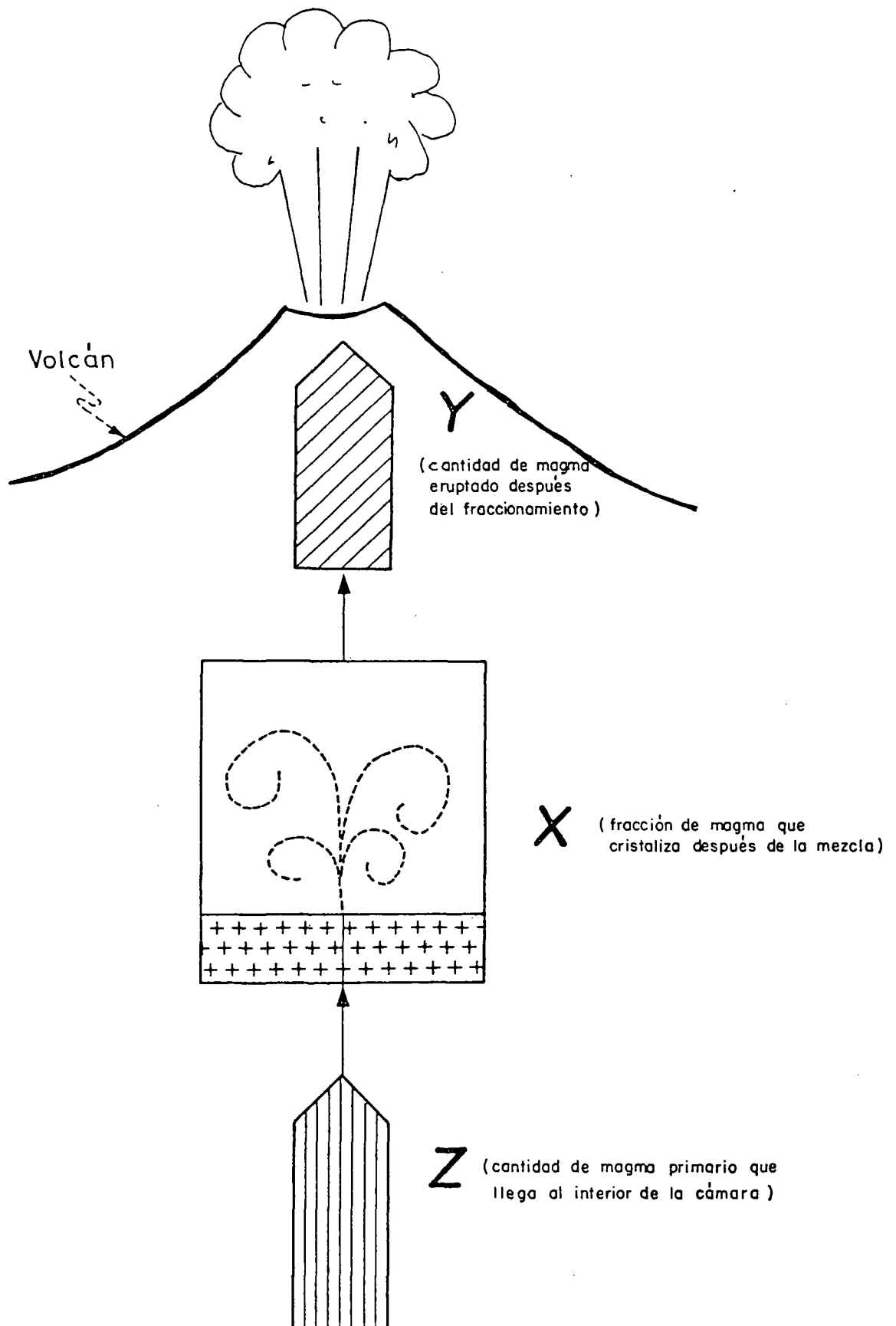




# VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

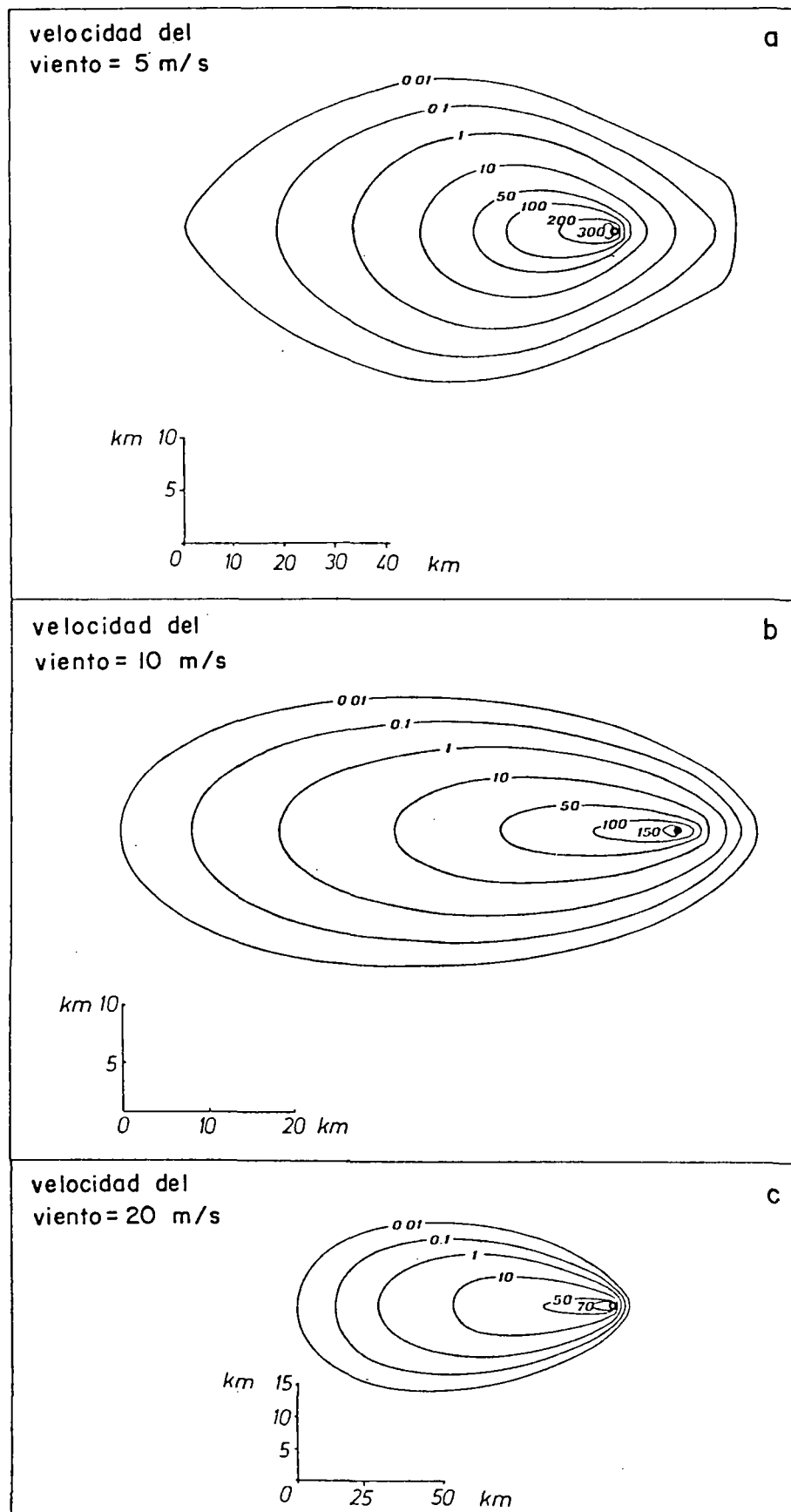
MODELO DE DIFERENCIACION POR CRISTALIZACION FRACCIONADA





VOLCAN EL REVENTADOR (VER)  
ESQUEMA DEL MODELO DE ALIMENTACION



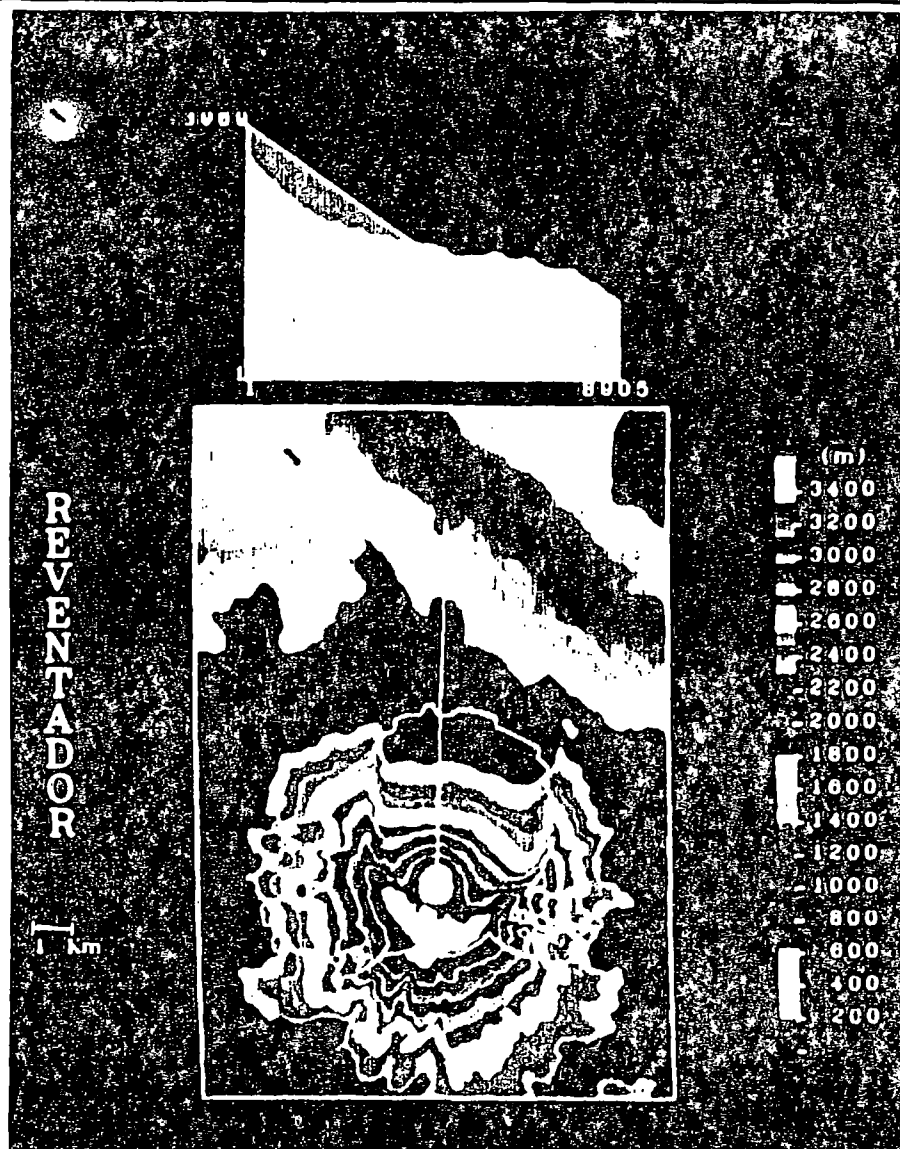


# VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

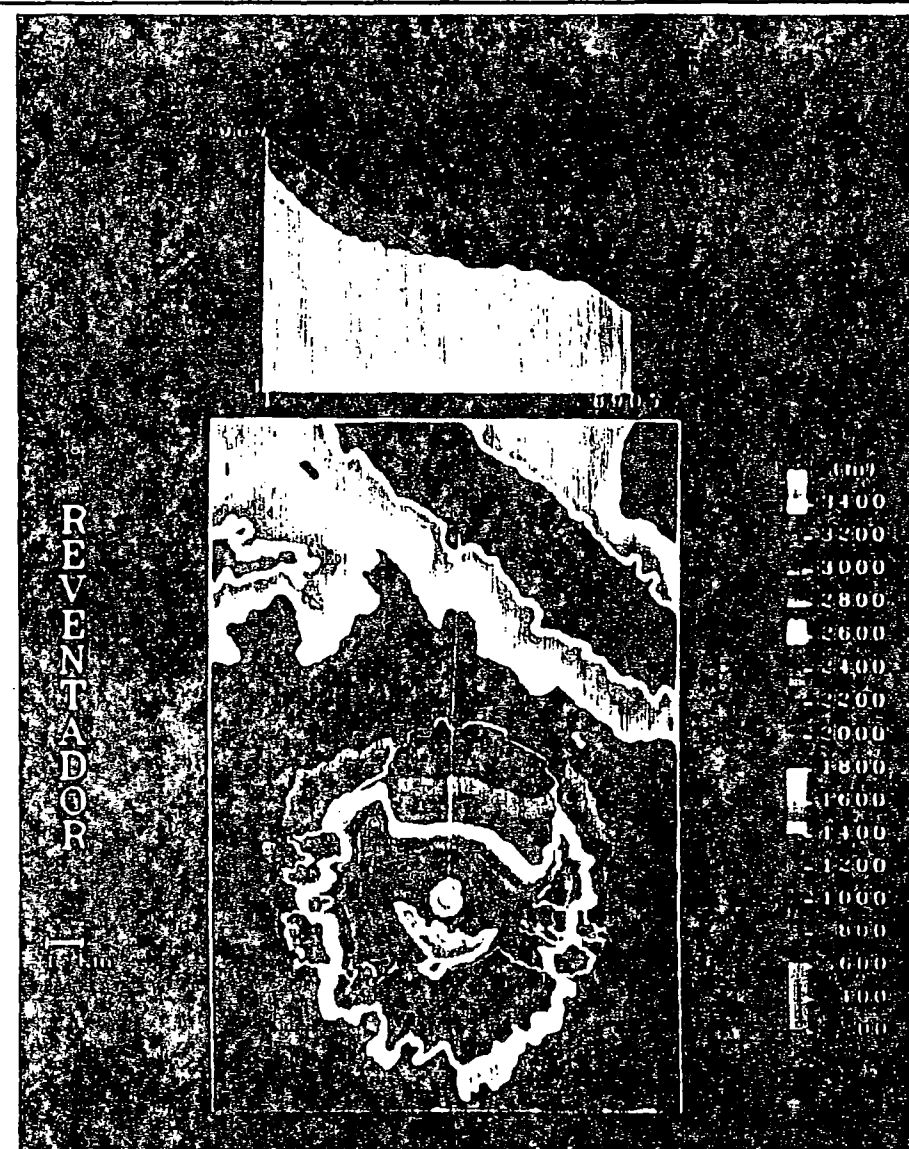
## SIMULACION DE LA CAIDA DE LOS PRODUCTOS PIROCLASTICOS

Este modelo ha sido calculado a partir de una columna de 5 km de altura y una masa total de piroclastos de  $4 \times 10^{10}$  kg, con un viento oriental de velocidad variable (Las isomasas están expresadas en  $\text{kg}/\text{m}^2$ )



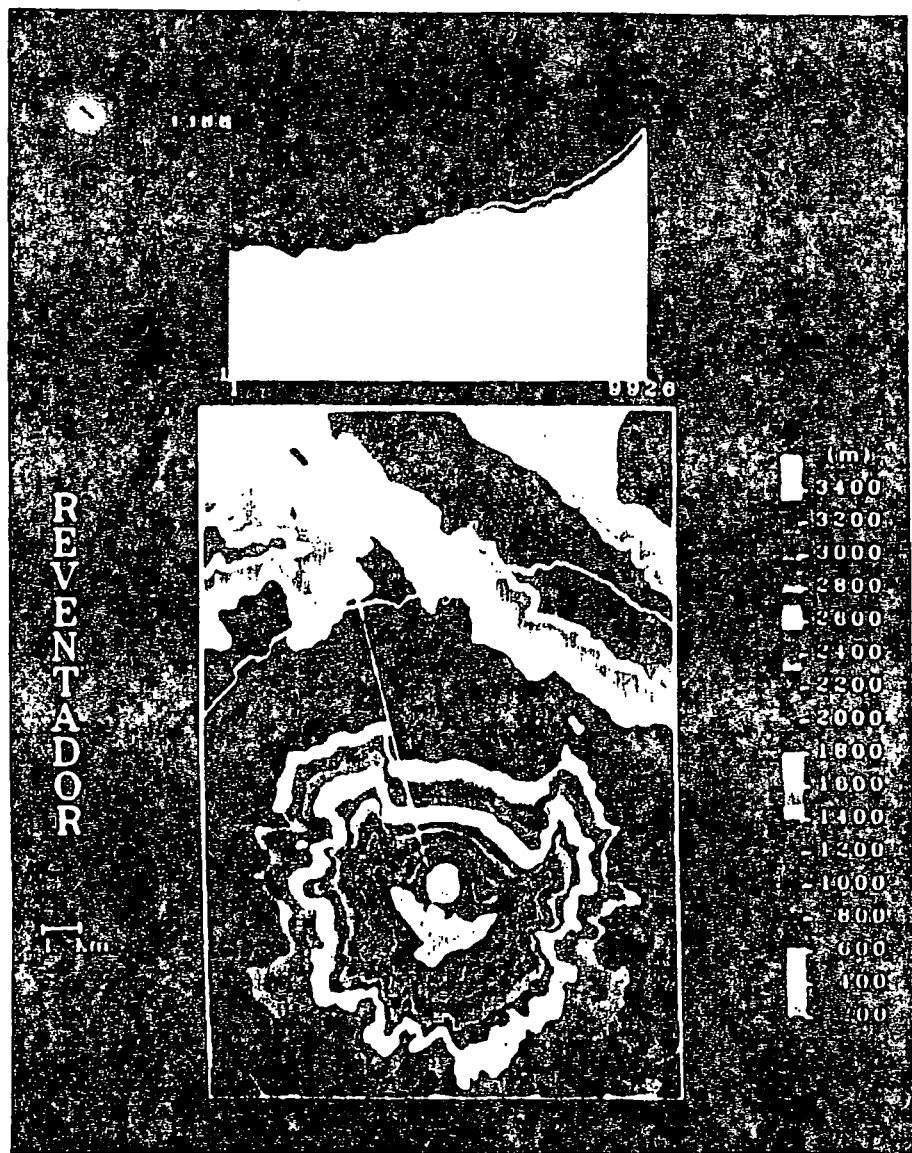


Caso A : altura columna eruptiva : 600 m; limite del deposito: rodilla morfologica de el anfiteatro; angulo calculado para el cono de energia =  $25^{\circ}$

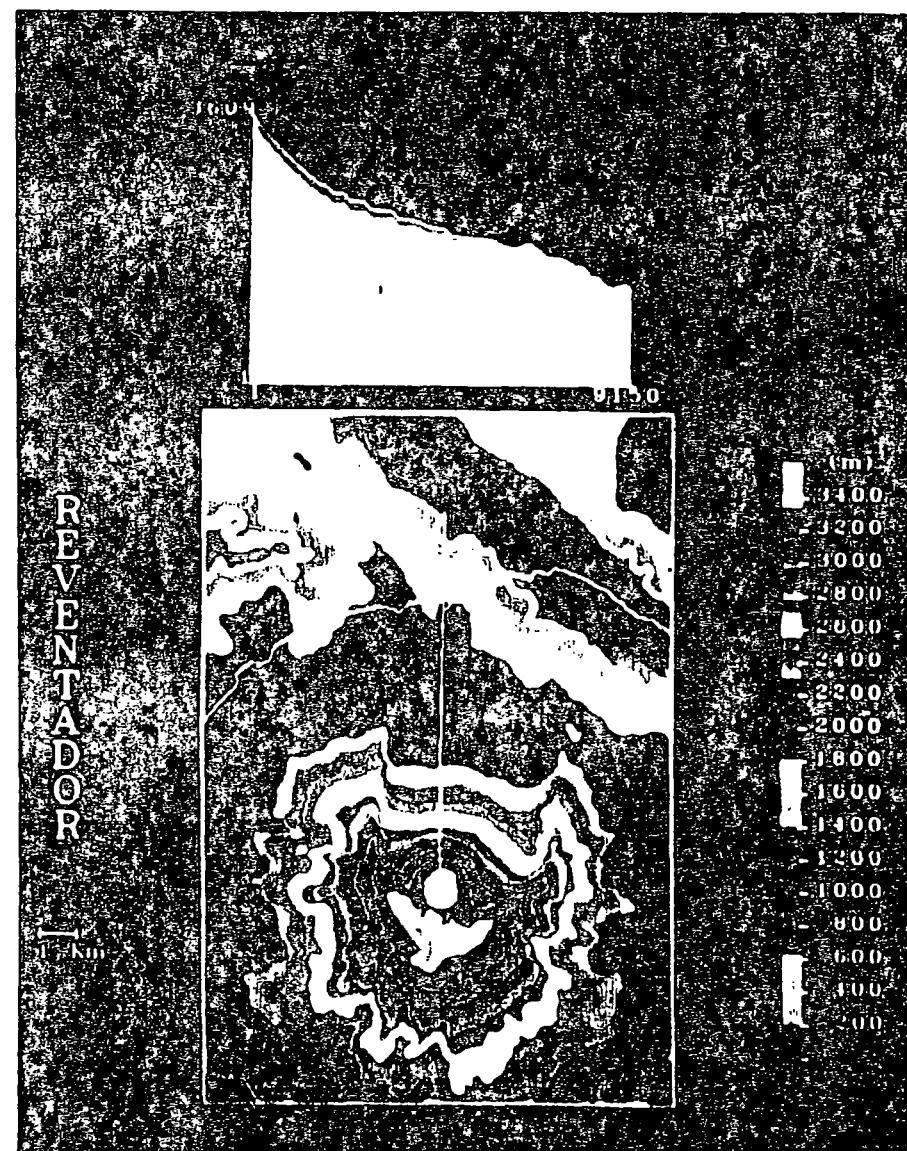


Caso B : altura columna eruptiva : 1500 m ; limite del deposito: rodilla morfologica de el anfiteatro; angulo calculado para el cono de energia =  $34^{\circ}$



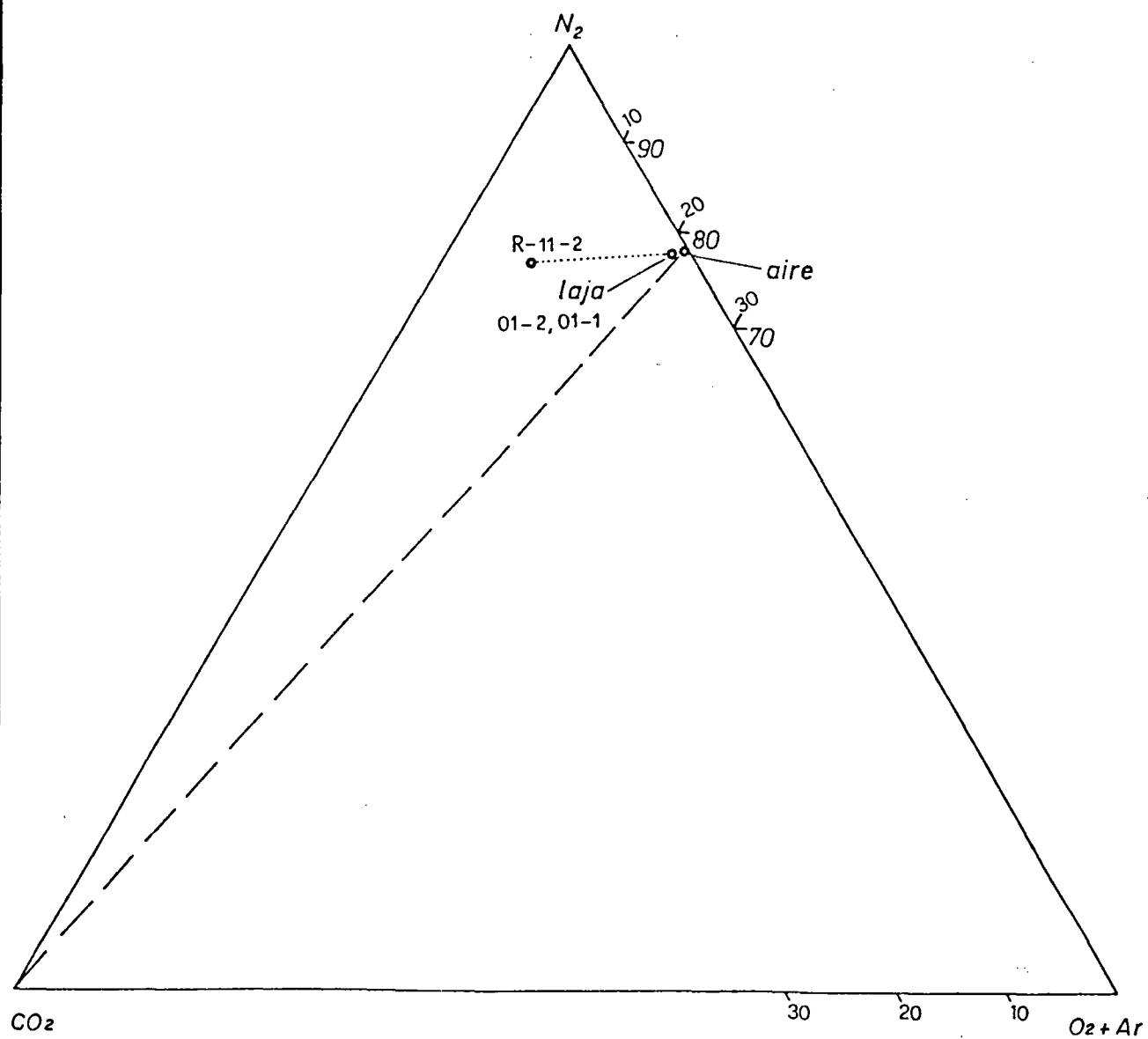


Caso C : altura columna eruptiva : 600 m; limite del deposito: Rio Coca; angulo calculado para el cono de energia =  $19^\circ$



Caso D : altura columna eruptiva : 1500 m; limite del deposito: Rio Coca; angulo calculado para el cono de energia =  $24^\circ$

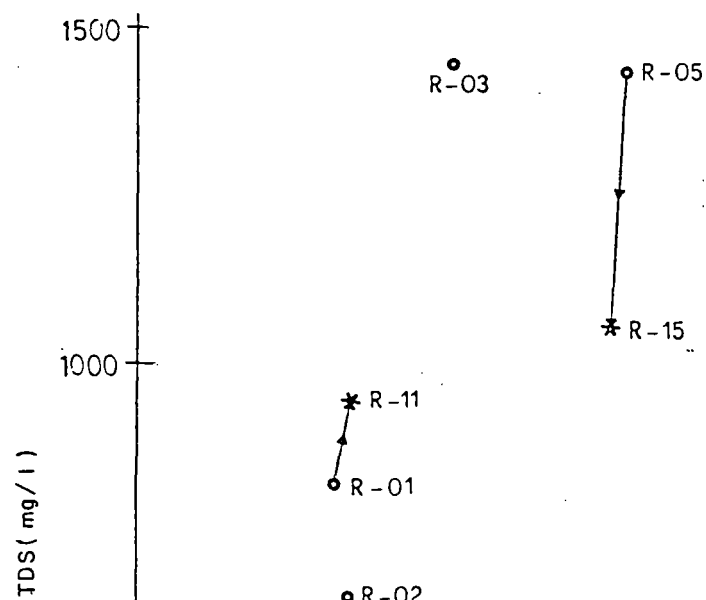




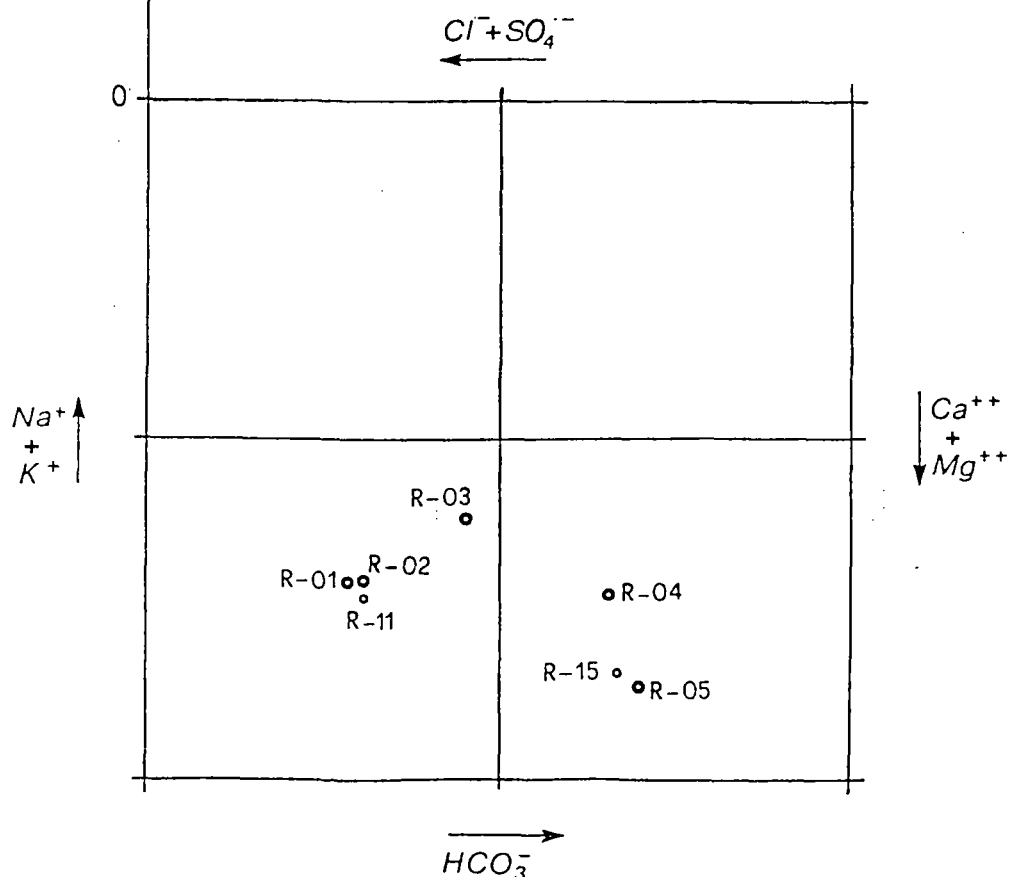
GASES FUMAROLICOS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

DIAGRAMA TRIANGULAR  $CO_2 / N_2 / (O_2 + Ar)$





A)



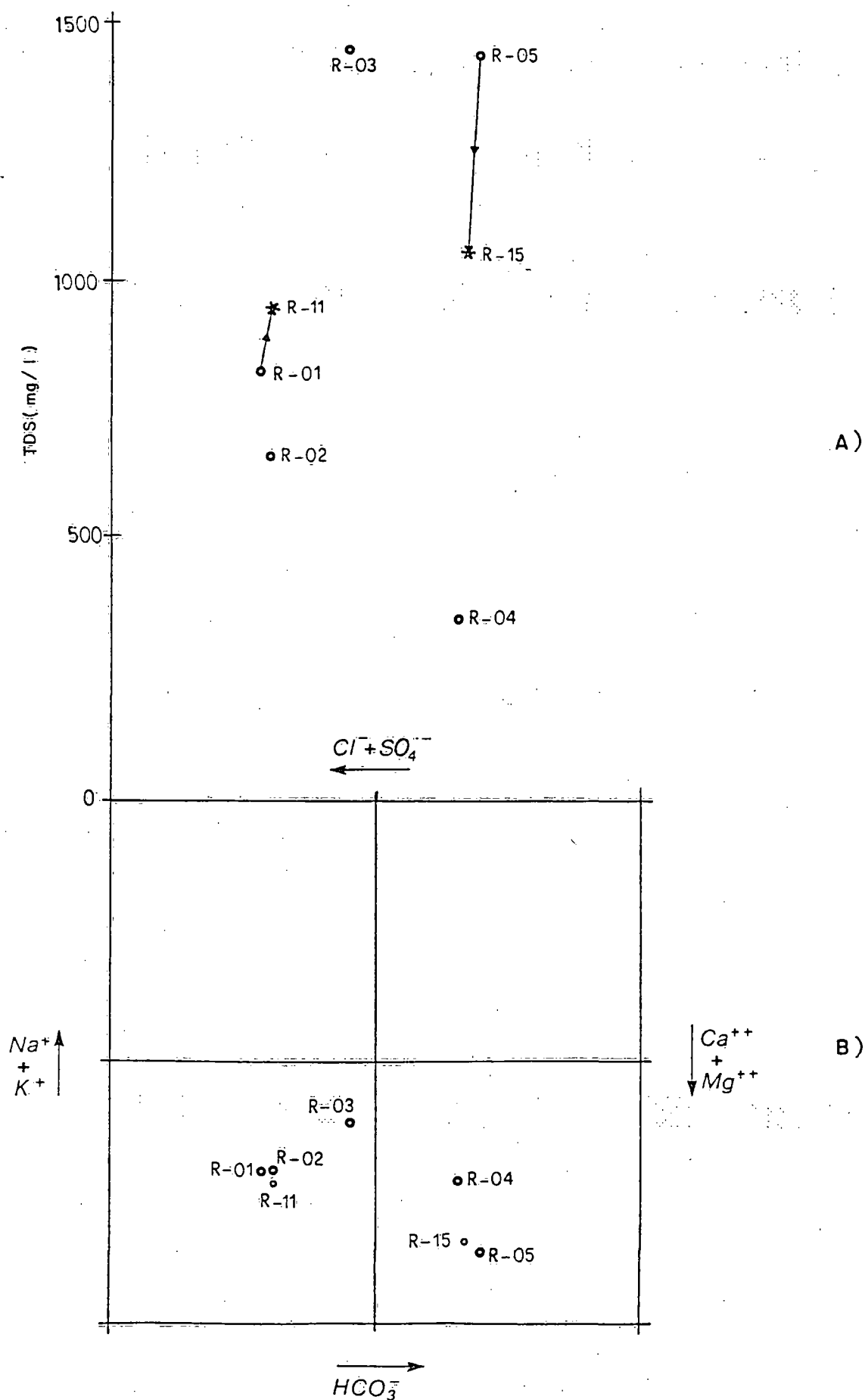
B)

AGUAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

A) COMPARACION ENTRE SALINIDAD TOTAL (TDS) Y CLORUROS + SULFATOS

B) DIAGRAMA CLASIFICATIVO DE LANGELIER - LUDWIG



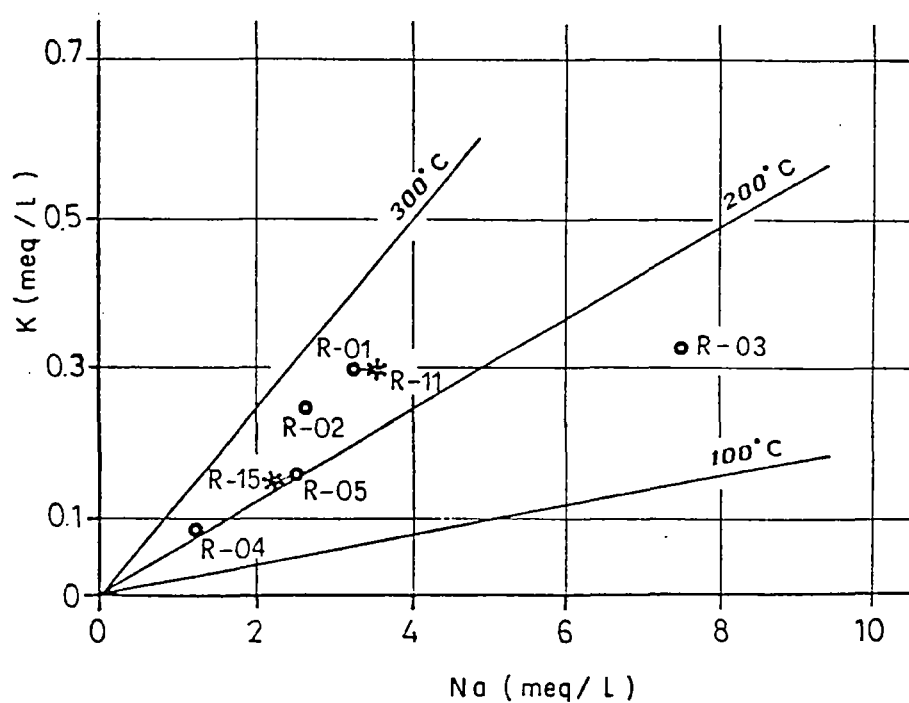
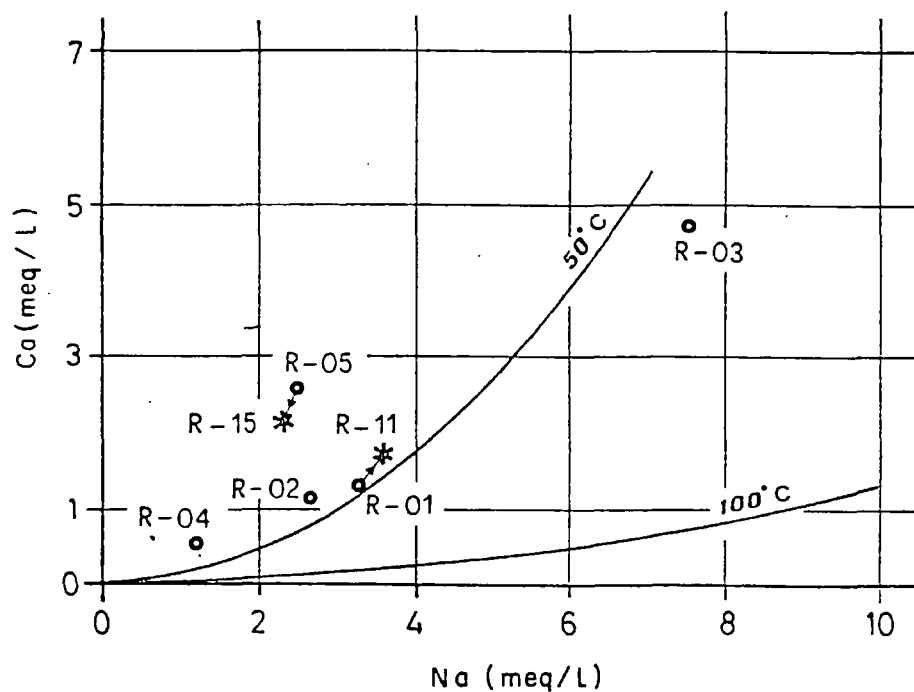


AGUAS DEL VOLCÁN EL REVENTADOR (VER)

A) COMPARACION ENTRE SALINIDAD TOTAL (TDS) Y CLORUROS + SULFATOS

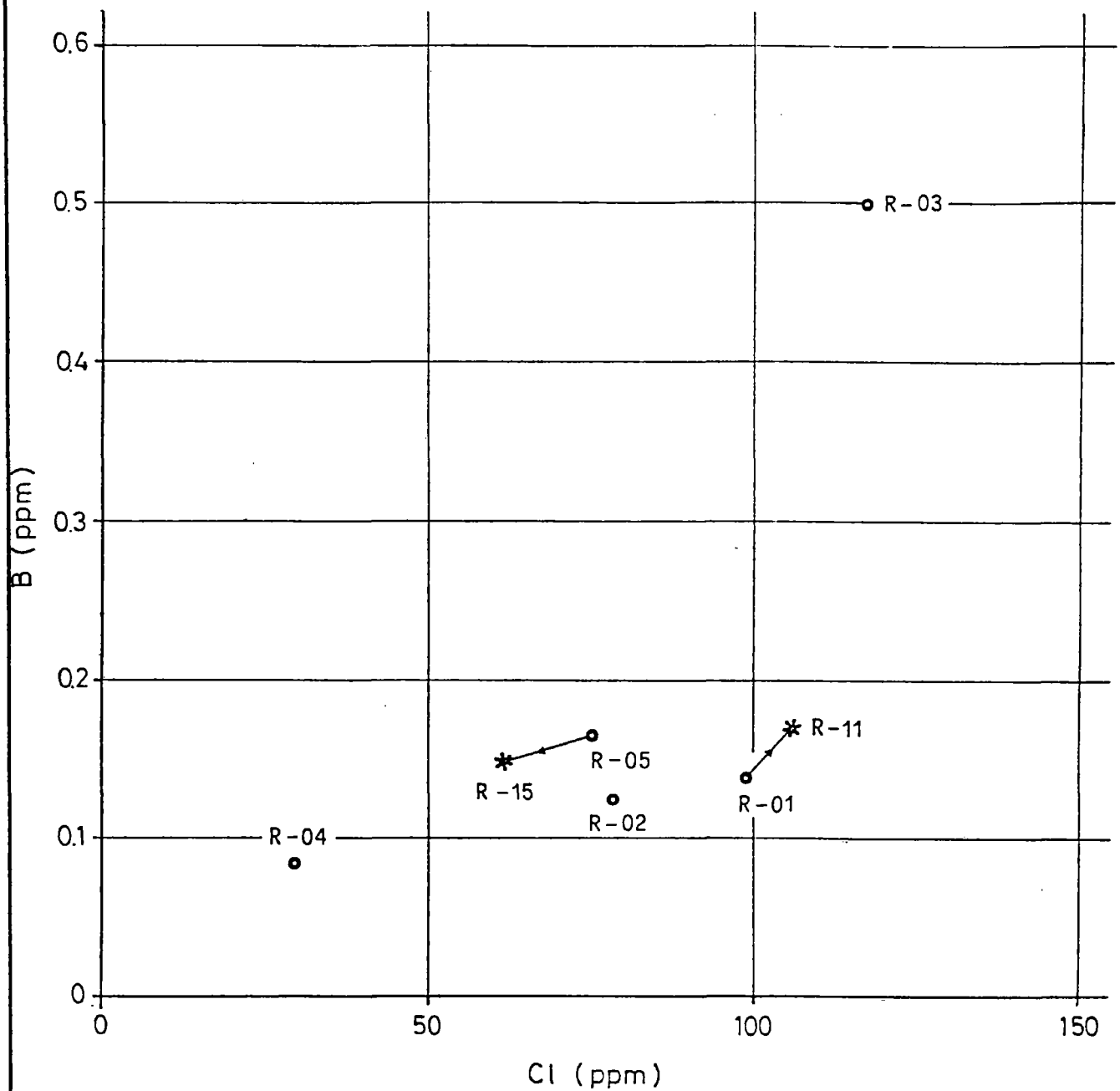
B) DIAGRAMA CLASIFICATIVO DE LANGEIER - LUDWIG





AGUAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)  
 DIAGRAMA CALCIO/SODIO Y POTASIO/SODIO

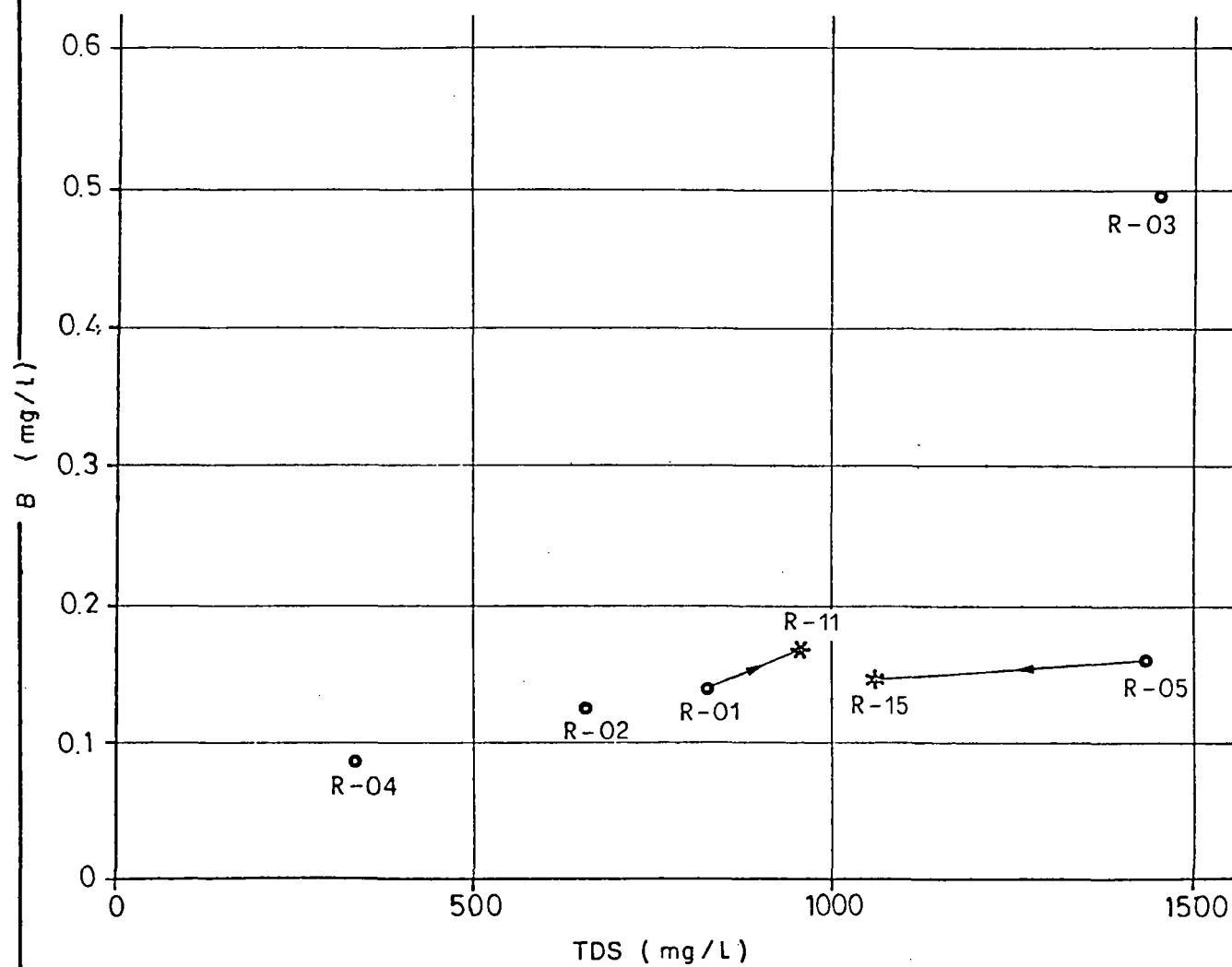




AGUAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)

DIAGRAMA BORO/CLORO





AGUAS DEL VOLCAN EL REVENTADOR (VER)  
DIAGRAMA BORO/SALINIDAD TOTAL (TDS)



PLANOS

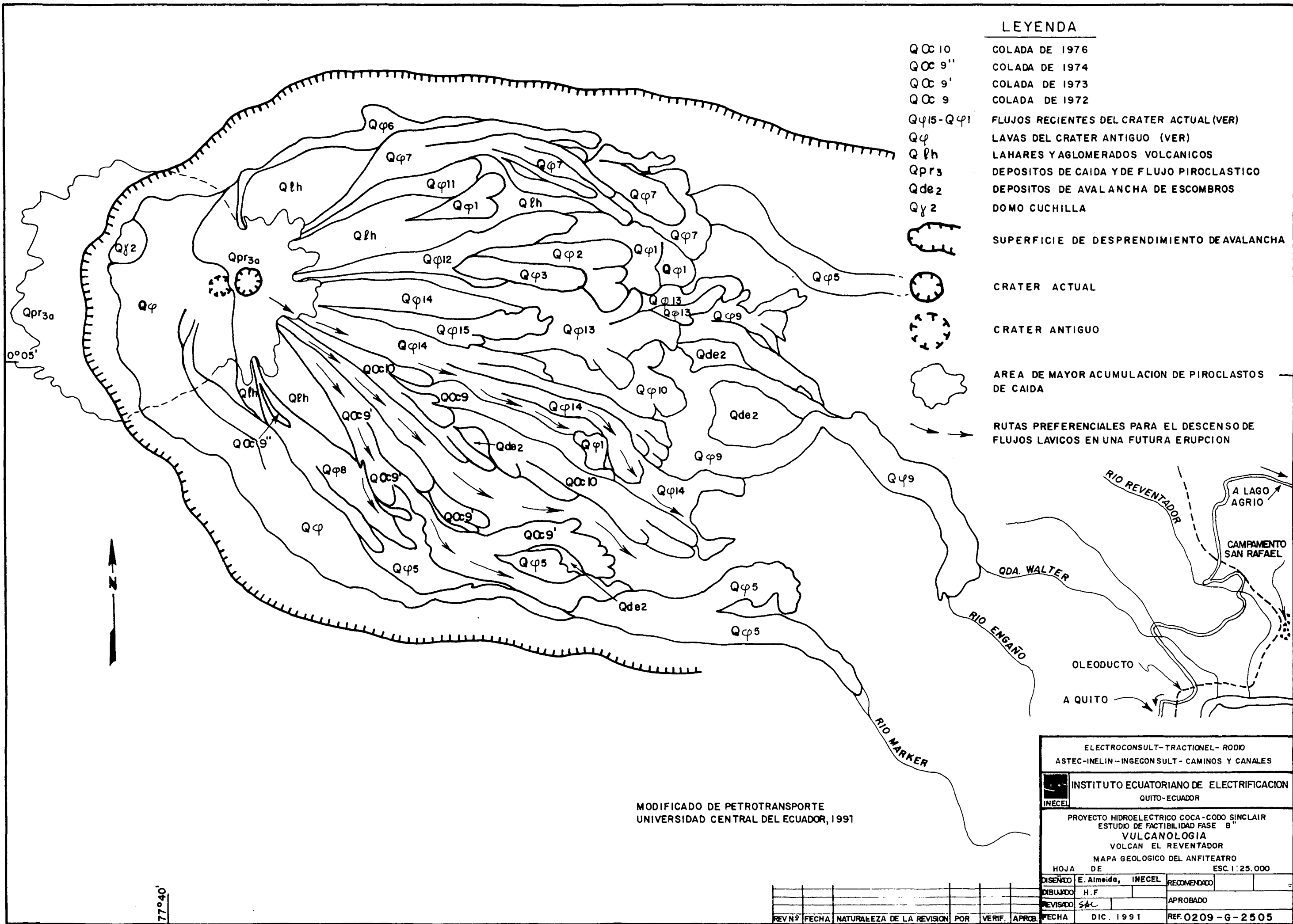


**MATERIALES SUELTOS**  
**ROCAS SEDIMENTARIAS, IGNEAS Y METAMÓRFICAS**

	Qb	CORRIENTES BARROSAS
	Qps	PANTANOS Y SUELO VEGETAL (COBERTURA DE MATERIALES DIVERSOS)
	Qc	DEPÓSITOS COLUVIALES
	Qal	DEPÓSITOS ALUVIALES Y ACTUALES RECIENTES (GRAVAS, ARENAS, LIMOS)
	Ql	DEPÓSITOS FLUVIOACÚSTRES (LIMOS, LIMOS ARCILLOSOS ALTERNANDO CON MATERIALES GRANULARES)
	Qt	TERRAZAS ALUVIALES ANTIGUAS (GRAVAS, ARENAS, LIMOS)
	Qal/lh	DEPÓSITOS SIN DIFERENCIAR (MATERIAL LAHARÍTICO Y ALUVIAL REDEPOSITADO Y SEMICONSOLIDADO)

	M	A	P	A	S
VOLCÁN EL REVENTADOR (VER)				Qlh <sub>3</sub>	
				Qpr3a	Qpr3b
				Qag-Qa10	
				Qa1-Qa8	
				Qpr2-3	
VOLCÁN PALEOREVENTADOR (VPR)				Qde <sub>2</sub>	
				Qpr <sub>2</sub>	
				Q8a	
				Q8/lt <sub>2</sub>	
				Qγ <sub>2</sub>	
COMPLEJO VOLCÁNICO BASAL (CVB)				Qde <sub>r</sub>	
				Qde <sub>1</sub>	
				Qγ <sub>1</sub>	
				Q8/lt <sub>1</sub>	
				V <sub>CN</sub>	





LEYENDA

- Qc10 COLADA DE 1976
- Qc9'' COLADA DE 1974
- Qc9' COLADA DE 1973
- Qc9 COLADA DE 1972
- Qp15-Qp1 FLUJOS RECIENTES DEL CRATER ACTUAL (VER)
- Qp LAVAS DEL CRATER ANTIGUO (VER)
- Qlh LAHARES Y AGLOMERADOS VOLCANICOS
- Qpr3 DEPOSITOS DE CAIDA Y DE FLUJO PIROCLASTICO
- Qde2 DEPOSITOS DE AVALANCHA DE ESCOMBROS
- Qy2 DOMO CUCHILLA
- [Symbol] SUPERFICIE DE DESPRENDIMIENTO DE AVALANCHA
- [Symbol] CRATER ACTUAL
- [Symbol] CRATER ANTIGUO
- [Symbol] AREA DE MAYOR ACUMULACION DE PIROCLASTOS DE CAIDA
- [Symbol] RUTAS PREFERENCIALES PARA EL DESCENSO DE FLUJOS LAVICOS EN UNA FUTURA ERUPCION

MODIFICADO DE PETROTRANSPORTE  
UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR, 1991

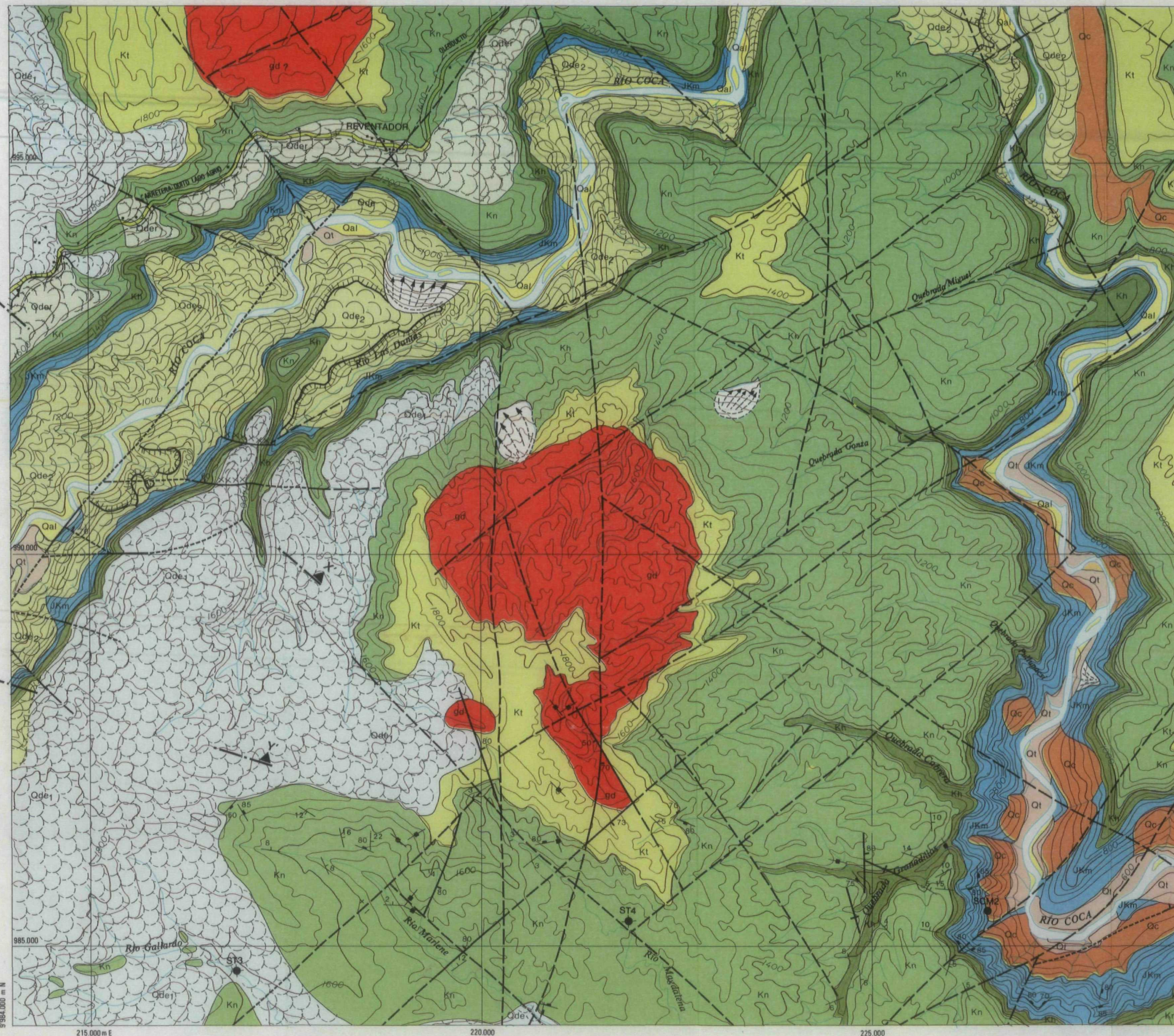
ELECTROCONSULT-TRACCIONEL- RODIO			
ASTEC-INELIN-INGECONSULT- CAMINOS Y CANALES			
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION			
QUITO-ECUADOR			
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO SINCLAIR			
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"			
VULCANOLOGIA			
VOLCAN EL REVENTADOR			
MAPA GEOLOGICO DEL ANFITEATRO			
HOJA	DE	ESC. 1:25.000	
DISEÑADO	E. Almeida,	INCEC	RECOMENDADO
DIBUJADO	H.F.		APROBADO
REVISADO	SAC		
FECHA	DIC. 1991	REF. 0209-G-2505	

REV N°	FECHA	NATURALEZA DE LA REVISION	POR	VERIF.	APROB.







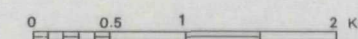


# ÍNDICE DE HOJAS

ALTO RÍO SALADO	RÍO DUÉ GRANDE	RÍO DUÉ CHICO
RÍO SALADO	VOLCÁN EL REVENTADOR	CODO SINCLAIR
LAS PALMAS	RÍO QUIJOS-COCA	RÍO MACHACUYACU

## NOTAS:

- TOPOGRAFÍA COMPILADA EN BASE A RESTITUCIONES EN DIFERENTES ESCALAS, REALIZADAS POR el Instituto Geográfico Militar.
- FUENTES DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA UTILIZADAS PARCIALMENTE:
  - MAPA GEOLÓGICO GENERAL. ESC. 1:50.000. PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA - FASE DE INVENTARIO, 1976. Instituto Ecuatoriano de Electrificación.
  - INFORME GEOLÓGICO. PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA-CODO SINCLAIR, 1983. Instituto Ecuatoriano de Electrificación.
  - MAPA GEOLÓGICO. ESC. 1:50.000. PROYECTO FOSFATOS, 1984. Dirección General de Geología y Minas.
- LA LEYENDA Y LOS SÍMBOLOS GEOLÓGICOS SE PRESENTAN EN EL PLANO.
- LOS CORTES GEOLÓGICOS SE PRESENTAN EN EL PLANO.



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"  
**VULCANOLOGIA**  
SECTOR CODO SINCLAIR  
MAPA GEOLÓGICO

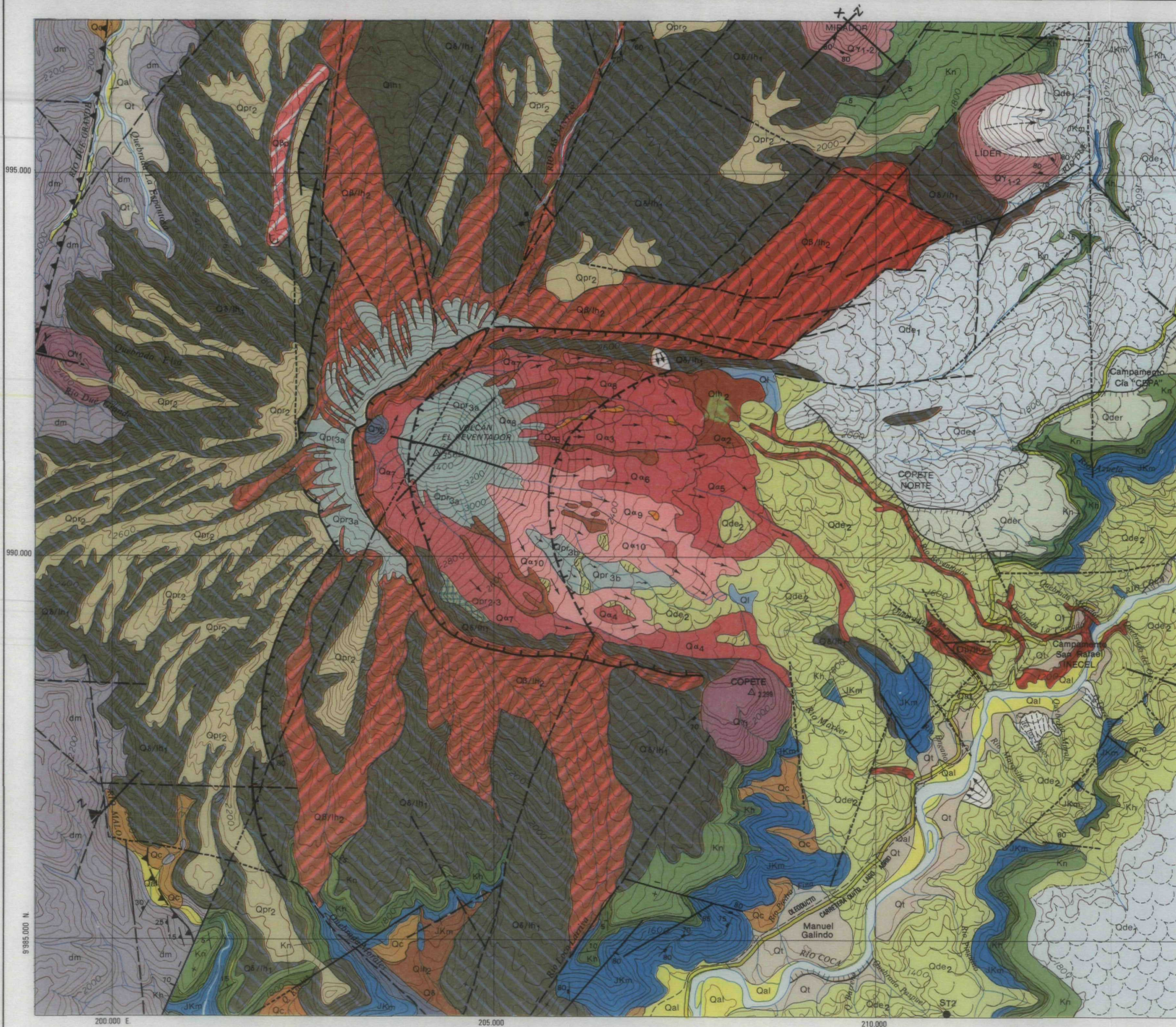
ESCALA INDICADA

DISEÑADO	W.B.-M.F.-P.L.-J.Ch.-H.S.	RECOMENDADO	<i>[Signature]</i>
DIBUJADO	RAA - V.H.A.	APROBADO	<i>[Signature]</i>
REVISADO	SAC	FECHA	DICIEMBRE/87
REV. N°	FECHA	NATURALEZA DE LA REVISIÓN	POR VERIF. APROB.

REF. 0209-G-2503

SEPARACIÓN DE COLORES E IMPRESIÓN EN EL INSTITUTO GEOGRAFICO MILITAR - MAYO DE 1988

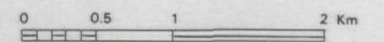




ALTO RÍO SALADO	RÍO DUÉ GRANDE	RÍO DUÉ CHICO
RÍO SALADO	VOLCÁN EL REVENTADOR	CODO SINCLAIR
LAS PALMAS	RÍO QUIJOS - COCA	RÍO MACHACUYACU

#### NOTAS:

- TOPOGRAFÍA COMPILADA EN BASE A RESTITUCIONES EN DIFERENTES ESCALAS, REALIZADAS POR el Instituto Geográfico Militar.
- FUENTES DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA UTILIZADAS PARCIALMENTE:
  - MAPA GEOLÓGICO GENERAL-ESC. 1:50.000 PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA-FASE DE INVENTARIO, 1976 Instituto Ecuatoriano de Electrificación
  - INFORME GEOLÓGICO PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA - CODO SINCLAIR, 1983 Instituto Ecuatoriano de Electrificación
  - MAPA GEOLÓGICO ESC. 1:50.000 PROYECTO FOSFATOS, 1984 Dirección General de Geología y Minas
- LA LEYENDA Y LOS SÍMBOLOS GEOLÓGICOS SE PRESENTAN EN EL PLANO
- LOS CORTES GEOLÓGICOS SE PRESENTAN EN EL PLANO



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



**INSTITUTO ECUATORIANO DE  
ELECTRIFICACIÓN**  
QUITO - ECUADOR

PROYECTO HIDROELÉCTRICO COCA-CODO SINCLAIR  
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"  
**VULCANOLÓGIA**  
SECTOR VOLCAN EL REVENTADOR  
MAPA GEOLÓGICO

ESCALA INDICADA

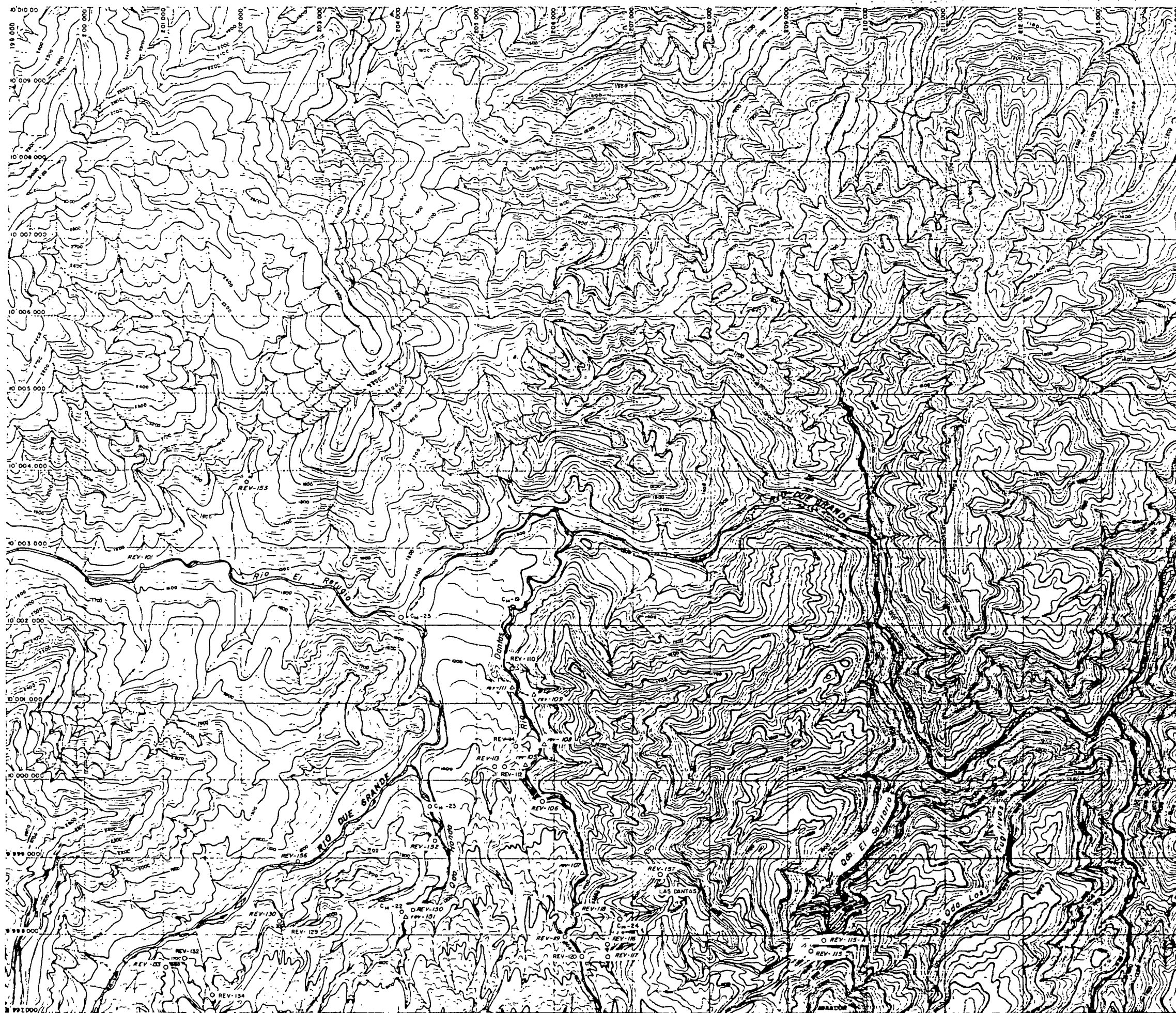
DISEÑADO	M.F.-W.B.-P.L.-E.A.	RECOMENDADO	
DIBUJADO	R.A.A.-V.H.A.	APROBADO	
REVISADO	S.A.C.		
FECHA	DICIEMBRE/87	REF.	0209-G-2502

2	MAR/88	REVISIONES DE INECEL	W.B.-M.T.
1	DIC/87	ACTUALIZACIÓN	W.B.-M.F.
REV. N°	FECHA	NATURALEZA DE LA REVISIÓN	POR VERIF. APROB.









NOTA  
PARA LEYENDA, VER PLANO 0209-G-1135-1

0 0.5 1 2 Km

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

INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION  
EDITO - QUITO

PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO BARCLAY  
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PLAS 'B'

VULCANOLOGIA

MAPA DE UBICACION DE LAS MUESTRAS DE ROCAS

HOJA 2 DE 2

ELABORADO	W.B. / M.F.	RECOMENDADO	
REVISADO	S.A.S.	APROBADO	
FECHA	JUL/87	REV	0209-G-2508

REV	FECHA	NATURALEZA DE LA REVISION	POB	PERM	OTROS

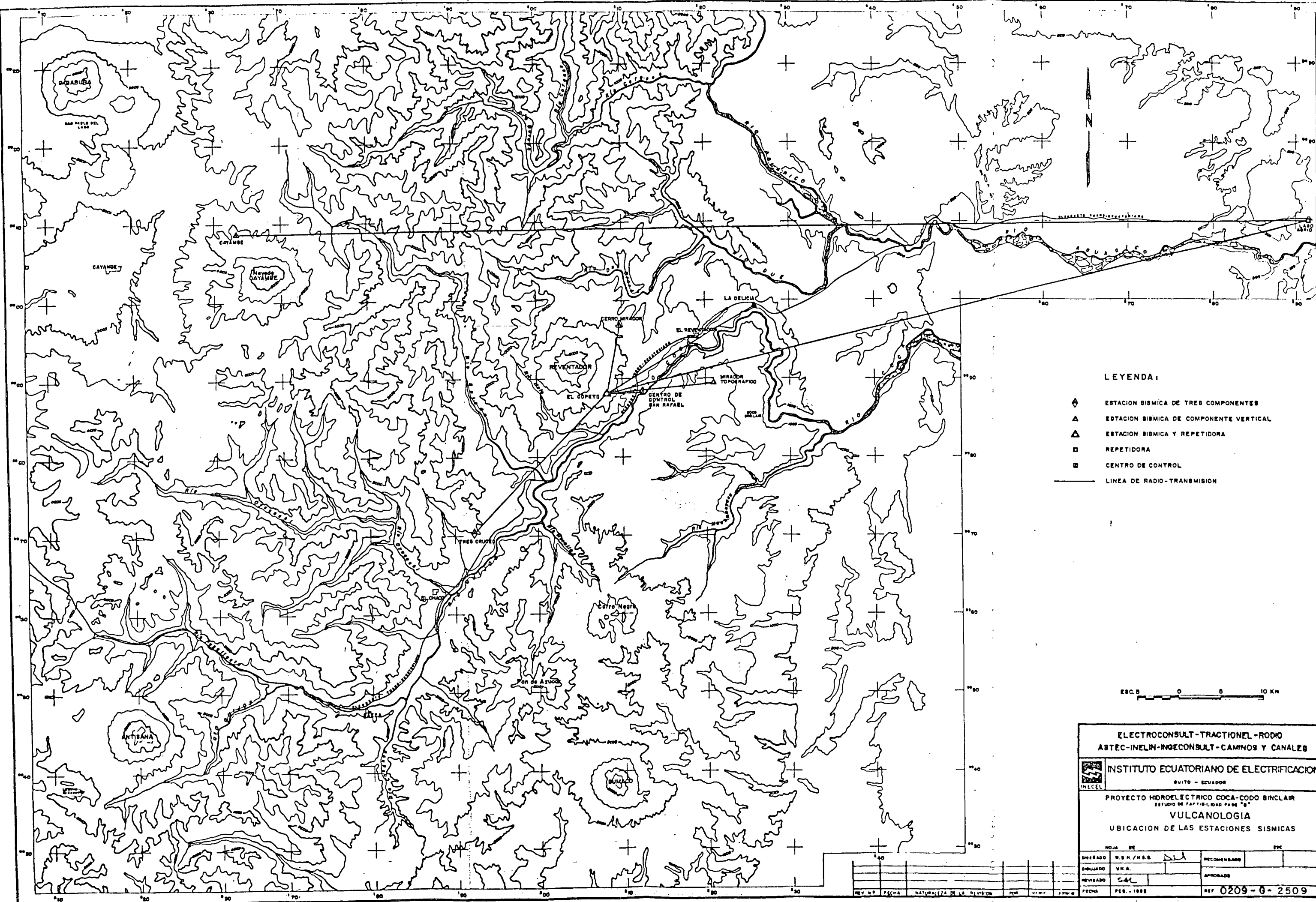












ELECTROCONSULT-TRACTIONEL-RODIO			
ABTEC-INELIN-INGECONSULT-CAMINOS Y CANALES			
INSTITUTO ECUATORIANO DE ELECTRIFICACION			
QUITO - ECUADOR			
PROYECTO HIDROELECTRICO COCA-CODO BINCLAIR			
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD FASE "B"			
VULCANOLOGIA			
UBICACION DE LAS ESTACIONES SISMICAS			
NO. DE	FECHA	REVISADO	APROBADO
1	1988	2	3
REV. 01	FECHA	NATURALEZA DE LA REVISION	FECHA



**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD**

**ANEXO G**  
**VULCANOLOGIA**

**Borrador**

**Marzo de 1992**