

42

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**DIAGRAMAS DE DESCRIMINACIÓN PARA**  
**MORB TIPO NORMAL**

**TESIS**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE**  
**INGENIERO GEÓLOGO - MINERALOGISTA**

**Presenta:**

**ROSA CARMEN VARGAS BALLESTEROS**

**inanes, N. L.**

**Septiembre del 2000**

FE 333

CE 462

WARREN BARNETT  
MINNESOTA ZOOLOGICAL  
MUSEUM



1080094992



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



DIAGRAMAS DE DESCRIMINACIÓN PARA  
MORB TIPO NORMAL

Como requisito parcial para optar al título de  
INGENIERO TESIS CO-MINERALOGISTA

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO GEÓLOGO - MINERALOGISTA

Presenta:

ROSA CARMEN VARGAS BALLESTEROS

ASESOR INTERNO

ASESOR EXTERNO

Linares, N. L.

Septiembre del 2000





TL  
QK462  
B3  
V3





**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



**Tesis**

**DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN PARA MORB TIPO NORMAL**

elaborada por:

**ROSA CARMEN VARGAS BALLESTEROS**

**Como requisito parcial para optar al título de  
INGENIERO GEÓLOGO-MINERALOGISTA**

Vo. Bo.

  
Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández  
ASESOR INTERNO

Vo.Bo

  
Dr. Surendra Pal Verma Jaiswal  
ASESOR EXTERNO





**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



La tesis

**DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN PARA MORB TIPO NORMAL**

que presenta:

**ROSA CARMEN VARGAS BALLESTEROS**

**Ha sido revisada y aceptada como requisito parcial para optar al título de  
INGENIERO GEÓLOGO-MINERALOGISTA**

LA COMISIÓN DE REVISIÓN DE TESIS

Dr. Guillermo Javier Castro Larragoitia

M.C. Gabriel Chávez Cabello

Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández

## **DEDICATORIA**

*A mis padres Francisco y Rosa Carmen, las personas que más amo, gracias por todo su amor, comprensión y apoyo que durante toda mi vida siempre he recibido.*

*A mis hermanos Azael y Bety, por todos los momentos compartidos juntos, gracias por todo su cariño...los amo!*

*A toda mi familia gracias siempre.*

*A mis amigos y compañeros de la 10ª generación, Rolando, Tania, Karla y Gaby...por la amistad y todo lo compartido durante la carrera, el apoyo y el ánimo que siempre nos brindamos, sin ustedes no hubiera sido igual.*

*Al primero en mi vida...Jesucristo, mi Señor y Salvador, por ser mi amigo y compañero, mi refugio y fortaleza, mi consolador y sustentador, mi pastor, mi luz y mi rey...mi todo!*



## AGRADECIMIENTOS

Primeramente a la Facultad de Ciencias de la Tierra, de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FCT-UANL), por brindarme mi formación académica. Al personal académico, administrativo y técnico.

Al Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México (CIE-UNAM), por permitirme desarrollar el presente trabajo en sus instalaciones. Al **Dr. Surendra Pal Verma Jaiswal** por su dirección y apoyo como asesor externo. A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA-UNAM, proyecto IN100956), al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT, proyecto 0196P-T) y al Sistema Nacional de Investigadores (SNI) por el apoyo económico y logístico prestado para el desarrollo de este trabajo.

Al **Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández** (FCT-UANL) por su apoyo como asesor interno gracias por todas las facilidades brindadas para culminar este trabajo. De igual manera al **Dr. Javier Castro Larragoitia** y **M.C. Gabriel Chávez Cabello** que integraron la comisión de revisión de tesis, gracias por los comentarios y sugerencias que sin duda mejoraron la calidad de este trabajo.

De manera especial al **M.C. Fernando Velasco Tapia**, gracias por tener siempre esa disposición de ayudar a los estudiantes. También agradezco a la **Mtra. Manuelita González** por la revisión del resumen en inglés.

A mis queridos amigos **Enrique Prado** y **Rafael Pérez**, gracias por estar conmigo siempre!! Y a mis compañeros de la FCT, **Gabriel Valdéz**, **Rafa M.**, **Juany**, **Any**, **Jasso**, **Andrés G.**, **Mike**, **David T.**, **Sergio I.**, **Memo T.**, **Andrés C.**, **Chuy**, **Iris** y **Viky**. Especialmente a mis amigas de la FCT, **Karla P.**, **Andrea**, **Katy** y **Mayra** (y bebé), con quienes compartí momentos agradables y divertidos durante la carrera., gracias por brindarme su amistad.

A las familias **Rodríguez-Navejar** y **Reyes-Zaragoza** (Sra. **Mary**, **Ale** y **Gely**), gracias por todas sus atenciones durante mi estancia en Linares.

A mis compañeros becarios del CIE, **Yuri**, **Chaly**, **Javier**, **Zulma**, **Edgar**, **Roberto**, **Verito**, e **Hypitia**, por formar un agradable ambiente de trabajo, especialmente a **Manuel Vasconcelos** y **Pedro M.** por todo el apoyo durante el tiempo que pasamos en Cuernavaca, también agradezco al **Dr. Ignacio Torres** y la **M. C. Myrna Guevara**.

A la **Fam. Vázquez Capistrán**, gracias de todo corazón por el apoyo que me brindaron desde que llegue a Cuernavaca, gracias por abrirme las puertas de su hogar...que Dios los bendiga siempre!

Al **Dr. Antonio Moreno** y **Silvia Moreno**, igualmente gracias por toda la ayuda que siempre me brindan, porque siempre que necesite un consejo se que puedo contar con ustedes...Dios los bendiga!

Al Centro Cristiano **El Conquistador**, (mi hogar en Cuernavaca) especialmente a **Enrique**, **Liz**, **Ceci**, **Rafa**, **Leonel**, **Alejandra J.**, y **Nina**, con quienes aprendí y compartí todo lo bello que significa servir a Cristo. Los llevaré en mi ♥ siempre.

**Entonces respondió Jehová a Job desde un torbellino  
Y dijo:**

*¿Dónde estabas tu cuando yo fundaba la tierra?  
¡Házmelo saber si tienes inteligencia!  
¿Quién dispuso sus medidas, si es que lo sabes?  
¿O quién tendió sobre ella la cuerda de medir?  
¿Sobre que están fundadas sus bases?  
¿O quién puso su piedra angular?*

**Además respondió Jehová a Job y dijo:  
¿Es sabiduría contender con el Omnipotente?  
¡Responda a esto el que disputa con Dios!**

**Entonces respondió Job a Jehová y dijo:  
Yo soy vil, ¿qué te responderé?  
¡Me tapo la boca con la mano!**

*Job 38. 1-6; 40.1-4*



# ÍNDICE

---

	Págs.
<b>Lista de figuras</b> .....	<i>i</i>
<b>Lista de tablas</b> .....	<i>iv</i>
<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	2
<b>CAPÍTULO 1 GENERALIDADES</b> .....	3
<b>1.1 Introducción</b> .....	3
<b>1.2 Antecedentes</b> .....	3
<b>1.3 Objetivos</b> .....	5
<b>1.4 Metodología</b> .....	6
<b>1.5 Norma CIPW</b> .....	7
1.5.1 Normatividad.....	8
<b>1.6 Localización de las muestras</b> .....	10
<b>CAPÍTULO 2 ASPECTOS TEÓRICOS DE BASALTOS DE DORSALES OCEÁNICAS</b> .....	15
<b>2.1 Basaltos de dorsales oceánicas (MORB)</b> .....	15
2.2.1 Geoquímica de los MORB.....	16
<b>2.2 Efectos de alteración</b> .....	19
<b>2.3 Movilidad de los elementos</b> .....	21
<b>2.4 Diagramas multielementos normalizados</b> .....	23
2.4.1 Elementos mayores normalizados.....	24
2.4.2 Elementos traza normalizados.....	27
<b>2.5 Comportamientos químico de los elementos</b> .....	30

<b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS</b> .....	32
<b>3.1 Clasificación</b> .....	32
<b>3.2 Diagramas de discriminación</b> .....	33
3.2.1 Diagrama Nb/Ba-Ti/V .....	34
3.2.2 Diagrama Sr/Y-Zr/Ga.....	35
3.2.3 Diagrama Ti/V-Zr/Y.....	36
3.2.4 Diagrama Sr/Y-Ti/V .....	37
3.2.5 Diagrama Ti/1000-Sr .....	38
<b>3.3 Validación</b> .....	39
<b>3.4 Aplicación</b> .....	42

## **CAPÍTULO 4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS**..... 45

<b>4.1 Movilidad de elementos</b> .....	45
<b>4.2 Clasificación y diagramas de discriminación</b> .....	46

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**..... 51

## **BIBLIOGRAFÍA**..... 52

### **ANEXO 1**

Parámetros estadísticos de los datos de N-MORB y MORB-A

## Lista de Figuras

---

	Página
Figura 1. Mapa de localización de las muestras de N-MORB y MORB-A que se utilizaron en los diagramas de discriminación.	11
Figura 2. Esquema de un sistema de dorsal oceánica (tomado de WILSON, 1989).	16
Figura 3. Esquema de los diferentes tipos de MORB que pueden ocurrir. a) N-MORB (Normal) que proviene de la fusión parcial del manto empobrecido, b) E-MORB (Enriquecido) que proviene del aporte de material de un manto más enriquecido (ejemplo de lo que sucede en Islandia) y c) OIB proveniente de un manto más enriquecido como sucede en Hawaii. Abreviaciones: MORB=basaltos de dorsal oceánica y OIB=basaltos de islas oceánicas. (modificado de WILSON, 1989).	18
Figura 4. Diagrama de multielementos normalizado con la composición de condrita, donde se comparan los patrones de abundancia del N-MORB y E-MORB. (tomado de SUN <i>et al.</i> , 1979).	19
Figura 5. Diagrama normalizado de elementos mayores para N-MORB de la dorsal del Pacífico Este (LONSDALE <i>et al.</i> , 1992; HEKINIAN <i>et al.</i> , 1996; BACH <i>et al.</i> , 1994) y MORB-A de la Placa de Nazca (PEARCE <i>et al.</i> , 1985; RHODES <i>et al.</i> , 1976).	22
Figura 6. Diagrama normalizado de elementos mayores para N-MORB de la dorsal del Pacífico Este (LONSDALE <i>et al.</i> , 1992; HEKINIAN <i>et al.</i> , 1996; BACH <i>et al.</i> , 1994) y MORB-A de la Placa de Nazca (PEARCE <i>et al.</i> , 1985; RHODES <i>et al.</i> , 1976). En esta gráfica se observan las barras de variabilidad representadas por el promedio de las concentraciones $\pm$ una desviación estándar ( $0 \pm 1\sigma$ ) para cada elemento.	25
Figura 7. Diagrama normalizado de elementos mayores. Aquí se comparan las medias aritméticas de las concentraciones de los elementos mayores. Los datos de N-MORB fueron obtenidos del trabajo de SCHILLING (1975) y los de MORB-A de WEAVER <i>et al.</i> (1983).	26

	Página	
Figura 8.	Diagrama normalizado de elementos mayores. Aquí se comparan las medias aritméticas de las concentraciones de los elementos mayores. Los datos de N-MORB fueron obtenidos del trabajo de SCHILLING (1975) y los de MORB-A de WEAVER <i>et al.</i> (1983). Las barras de variabilidad representadas por el promedio de las concentraciones $\pm$ una desviación estándar ( $0 \pm 1\sigma$ ) para cada elemento.	26
Figura 9.	Diagrama normalizado de elementos traza para muestras de N-MORB de la dorsal del Pacífico Este (LONSDALE <i>et al.</i> , 1992; HEKINIAN <i>et al.</i> , 1996; BACH <i>et al.</i> , 1994) y MORB-A de la Placa de Nazca (PEARCE <i>et al.</i> 1985; RHODES <i>et al.</i> 1976).	27
Figura 10.	Diagrama normalizado de elementos traza para muestras de N-MORB de la dorsal del Pacífico Este (LONSDALE <i>et al.</i> , 1992; HEKINIAN <i>et al.</i> , 1996; BACH <i>et al.</i> , 1994) y MORB-A de la Placa de Nazca (PEARCE <i>et al.</i> , 1985; RHODES <i>et al.</i> , 1976). En esta gráfica se observan las barras de variabilidad representadas por el promedio de las concentraciones $\pm$ una desviación estándar ( $0 \pm 1\sigma$ ) para cada elemento.	28
Figura 11.	Diagrama normalizado de elementos traza. Aquí se comparan las medias de las concentraciones de los elementos traza. Los datos de N-MORB fueron obtenidos del trabajo de SCHILLING (1975) y los datos de MORB-A de WEAVER <i>et al.</i> (1983).	29
Figura 12.	Diagrama normalizado de elementos traza. Aquí se comparan las medias de las concentraciones de los elementos traza. Los datos de N-MORB fueron obtenidos del trabajo de SCHILLING (1975) y los de MORB-A de WEAVER <i>et al.</i> (1983). Las barras de variabilidad representada por el promedio de las concentraciones $\pm$ una desviación estándar ( $0 \pm 1\sigma$ ) para cada elemento.	29
Figura 13.	Gráfica de carga iónica vs radio iónico de los elementos traza. Los elementos se subdividen en elementos de baja carga (LFS, LIL), de alta carga (HFS). (modificado de ROLLINSON, 1993).	31
Figura 14.	Sección del diagrama de clasificación TAS (álcalis totales contra sílice, LE BAS <i>et al.</i> , 1986) para las muestras de N-MORB y MORB-A en basaltos normativos en hiperstena.	32

	Página
Figura 15. Diagrama de discriminación Nb/Ba-Ti/V para basaltos normativos en hiperstena. (modificado de RODRÍGUEZ GARCÍA, 1998). Los números entre paréntesis indican las coordenadas $xy$ de los vértices de las líneas.	34
Figura 16. Diagrama de discriminación Sr/Y-Zr/Ga para basaltos normativos en hiperstena. (modificado de RODRÍGUEZ GARCÍA, 1998). Los números entre paréntesis indican las coordenadas $xy$ de los vértices de las líneas.	35
Figura 17. Diagrama de discriminación Ti/V-Zr/Y para basaltos normativos en hiperstena. Los números entre paréntesis indican las coordenadas $xy$ de los vértices de las líneas.	36
Figura 18. Diagrama de discriminación Sr/Y-Ti/V para basaltos normativos en hiperstena. Los números entre paréntesis indican las coordenadas $xy$ de los vértices de las líneas.	37
Figura 19. Diagrama de discriminación Ti/1000-Sr para basaltos normativos en hiperstena. Los números entre paréntesis indican las coordenadas $xy$ de los vértices de las líneas.	38
Figura 20. Diagrama de validación Ti/V-Zr/Y para basaltos normativos en hiperstena de secuencias ofiolíticas. (modificado de RODRÍGUEZ GARCÍA, 1998).	40
Figura 21. Diagrama de validación Sr/Y-Ti/V para basaltos normativos en hiperstena de secuencias ofiolíticas. (modificado de RODRÍGUEZ GARCÍA, 1998).	40
Figura 22. Diagrama de validación Ti/1000-Sr para basaltos normativos en hiperstena de secuencias ofiolíticas. (modificado de RODRÍGUEZ GARCÍA, 1998 a=KAY y SENECHAL, 1976., b=PEARCE, 1975).	41
Figura 23. Diagrama de aplicación Ti/V-Zr/Y con muestras de ambientes tectónicos definidos y uno sin definir.	43
Figura 24. Diagrama de aplicación Sr/Y-Ti/V con muestras de ambientes tectónicos definidos y uno sin definir.	44



## Lista de Tablas

---

	Página
Tabla 1. Algunos diagramas de discriminación para los MORB. Estos diagramas están basados en elementos mayores y traza (modificada de VERMA, 1997).	4
Tabla 2. Lista de datos de salida del programa CIPW de VERMA y NAVARRO-L. (1993). Se puede observar el ajuste aplicado en la variable Fe. Este sistema recalcula el Fe basado en las recomendaciones de MIDDLEMOST (1989).	9
Tabla 3. Localización de las muestras de N-MORB y MORB alterado que se utilizaron en los diagramas de discriminación.	12
Tabla 4. Movilidad de elementos mayores en rocas basálticas a través de diferentes formas de alteración. (modificado de ROLLINSON, 1993).	21
Tabla 5. Coordenadas de las líneas en escala logarítmica de los diferentes campos tectonomagmáticos de los diagramas de discriminación modificados y propuestos.	48
Tabla 6. Resumen de traslapes de N-MORB y MORB-A en los diferentes campos de los diagramas presentados en este trabajo.	49

## **RESUMEN**

---

En trabajos previos, se propusieron diagramas para basaltos normativos en hiperstena, provenientes de los ambientes de Arcos Continental (AC), Arco de Isla (AI), Rifts (Rt), e Islas Oceánicas (IO). Los datos de este trabajo se compilaron en la base de datos ya existente, los cuales incluyen datos de elementos mayores y traza de rocas basálticas del ambiente de dorsales oceánicas tipo normal N-MORB (Mid-Ocean Ridge Basalt) así como datos geoquímicos de MORB-A (basaltos de dorsales oceánicas alterados) recuperados por el Deep Sea Drilling Project (DSDP) de diversas partes del mundo.

Se hizo una comparación de movilidad de concentración de elementos entre N-MORB y MORB-A indicando que los elementos mayores MnO, CaO, K<sub>2</sub>O, y los elementos traza, Sr, Zr, Sm y Eu, son los elementos que presentaron mayor movilidad.

Se clasificaron los datos en el diagrama TAS y en dos de los diagramas de discriminación para basaltos normativos en hiperstena propuestos en el trabajo de RODRÍGUEZ GARCÍA (1998) Nb/Ba-Ti/V y Sr/Y-Zr/Ga. Adicionalmente, se presentan tres diagramas nuevos, Ti/V-Zr/Y, Sr/Y-Ti/V y Ti/1000-Sr, que discriminan el N-MORB de los ambientes de AC, AI, Rt e IO, se puede decir que los resultados que se obtuvieron con estos diagramas son satisfactorios ya que no presentan mucho traslape en campos de otros ambientes tectónicos (0.6%-10%). Para validar estos diagramas se utilizaron datos de muestras de complejos ofiolíticos y para la aplicación de estos diagramas se utilizaron datos de Colima, Baja California, y la Sierra de Chichinautzin.

## ABSTRACT

---

In previous works, diagrams for hypersthene normative basalts have been proposed for Continental Arc (AC), Island Arc (AI), Rifts (Rt) and Ocean Island (IO) environments. The data that were used in this work, were compiled in a previous data base, which included data of major and trace elements of N-MORB (Mid Ocean Ridge Basalt type Normal) and also geochemical data of altered MORB (MORB-A) recovered by for the Deep Sea Drilling Project (DSDP) from some settings around the world.

A comparison was made with the elements concentration mobility between N-MORB and MORB-A. The results indicated that the major elements MnO, CaO, K<sub>2</sub>O and trace elements Sr, Zr, Sm and Eu are the elements that show more mobility on this type of setting.

The data has been classified in the TAS diagram and in two of the discrimination diagrams for hypersthene normative basalts proposed in the work of RODRÍGUEZ GARCÍA (1998) Nb/Ba-Ti/V y Sr/Y-Zr/Ga. In addition, three new diagrams are presented Ti/V-Zr/Y, Sr/Y-Ti/V y Ti/1000-Sr, that discriminate the N-MORB from the AC, AI, Rt, and IO tectonic settings. The results that were obtained from these diagrams are satisfactory because they do not show significant overlap (0.6%-10%) with samples from other tectonics settings that plot in different fields within the diagram. To validate these diagrams use data from samples of a ophiolitic complex were used, and for the application of this diagrams data from Colima, Baja California, and Sierra Chichinautzin were used.

# CAPÍTULO 1

---

## GENERALIDADES

### 1.1 Introducción

El territorio mexicano en más de su tercera parte se encuentra cubierto por rocas ígneas. Las provincias volcánicas son el Cinturón Volcánico Mexicano, Sierra Madre Occidental, Provincia Alcalina Oriental, Sierra La Giganta y Cinturón Volcánico Centroamericano. Esto hace evidente la importancia de buscar nuevas herramientas geológicas y geoquímicas para comprender mejor la evolución geológica de México.

Para clasificar y explicar el origen de las rocas ígneas se han desarrollado modelos y herramientas, basados en los principios de la teoría de la Tectónica de Placas, y apoyados en una gran cantidad de datos geoquímicos. Una de estas herramientas son los diagramas de discriminación tectonomagmática, que se basan en el comportamiento de los elementos mayores y traza. Estos diagramas han sido utilizados para identificar el ambiente tectónico en donde se originaron diversas rocas magmáticas (BUTLER y WORONOW, 1986) En este trabajo se presenta una propuesta de diagramas de discriminación tectonomagmática aplicables a N-MORB (Basaltos de crestas oceánicas tipo normal).

### 1.2 Antecedentes

Los diagramas de discriminación pueden ser gráficos de tipo bivariado o triangular de elementos mayores y/o traza, los cuales presentan un comportamiento característico (ya sea un enriquecimiento o empobrecimiento del elemento) para cada tipo de ambiente tectonomagmático. De esta forma, al compilar y graficar un gran número de datos, cada ambiente tectónico definirá un campo dentro del diagrama.

Los diagramas de discriminación han sido propuestos por muchos autores, siendo los primeros PEARCE y CANN (1973), y posteriormente, PEARCE *et al.* (1975), PEARCE (1976), LETERRIER *et al.* (1982), SHERVAIS (1982), MULLEN (1983), MESCHEDE (1986), VERMA (1994). Para mayores detalles, se pueden consultar los trabajos de VERMA (1997), RODRÍGUEZ GARCÍA (1998) y VASCONCELOS FERNÁNDEZ (1998), que contienen reseñas sobre estos diagramas.

Como en este trabajo se proponen diagramas de discriminación para basaltos de dorsales oceánicas tipo normal (N-MORB), en la Tabla 1 se presentan algunos de los diagramas de discriminación, aplicando elementos mayores y traza, que se han propuesto previamente para identificar los basaltos generados en las dorsales oceánicas (MORB).

**Tabla 1.** Algunos diagramas de discriminación para los MORB. Estos diagramas están basados en elementos mayores y traza (tomada de VERMA, 1997).

Elementos	Tipo de Magma/Ambiente tect.	Referencia
<b>Diagramas basados en elementos mayores</b>		
TiO <sub>2</sub> -MnOx10-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> x10	CAB, IAT, MORB, OIA, OIT	MULLEN (1983)
TiO <sub>2</sub> -FeO <sup>*</sup> -MgO	MORB, CFB	FODOR y VETTER (1984)
K <sub>2</sub> O-H <sub>2</sub> O	MORB, OIB, BAB, VAB	MUENOW <i>et al.</i> (1990)
<b>Diagramas basados en elementos mayores y traza</b>		
Ta/Yb-K <sub>2</sub> O/Yb	MORB, IAT, CAB, SHO	PEARCE (1982)
Nb/Y-Ti/Y	MORB, IAT, CAB, SHO	PEARCE (1982)
Ti/1000-V	IAB, MORB/WPB, Alk	SHERVAIS (1982)
S1-S2(Ti,Zr,Y,Sr)	MORB, IAT, CAB, WPB	BUTLER y WORONOW (1986)

Las abreviaciones son: CAB=basalto calci-alcalino; IAT=toleíta de arco; MORB=basalto de dorsal oceánica; OIA=andesita de isla oceánica; OIT=toleíta de isla oceánica; CFB=basalto continental de grandes volúmenes; OIB=basalto de isla oceánica; BAB=basalto de cuenca tras-arco; VAB=basalto de arco volcánico; IAT=toleíta de arco; SHO=shoshonita; IAB=basaltos de arco de isla; WPB=basalto de interior de la placa; Alk=basalto alcalino.

Es importante señalar que para inferir el ambiente tectónico, por medio de la aplicación de un diagrama de discriminación, es necesario cumplir con las condiciones que se establecen para dicho gráfico y seguir la metodología que se recomienda. Un aspecto importante para proponer estos diagramas es que sean construidos con una base amplia de



datos sobre magmas representativos de lugares y ambientes tectónicos específicos. Algunos factores que complican el desarrollo y el empleo de estos diagramas son los errores analíticos de laboratorio, la alteración (marina, hidrotermal o intemperismo), las diferencias iniciales en las fuentes magmáticas y los procesos posteriores de diferenciación magmática (VERMA, 1997).

Recientemente, el grupo de trabajo del área de Geoenergía del Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México (CIE-UNAM), se ha dedicado a crear y proponer nuevos diagramas de discriminación (RODRIGUEZ *et al.*, 1996; VASCONCELOS-F. *et al.*, 1996), para los ambientes tectónicos de Arcos Continentales (AC), Arcos de Isla (AI), Rifts (Rt) e Islas Oceánicas (IO), resultando con éxito dos trabajos de tesis de licenciatura: RODRÍGUEZ GARCÍA (1998) y VASCONCELOS FERNÁNDEZ (1998). En la presente tesis, se utilizaron los diagramas Nb/Ba-Ti/V y Sr/Y-Zr/Ga para basaltos normativos en hiperstena propuestos por RODRÍGUEZ GARCÍA (1998), con el objeto de analizar su utilidad en la discriminación de N-MORB. Así mismo, se propusieron dos nuevos diagramas Ti/V-Zr/Y, Sr/Y-Ti/V y Ti/1000-Sr, para discriminar entre N-MORB y AC, AI, Rt e IO.

### 1.3 Objetivos

- 1) Ampliar la base de datos geoquímicos de elementos mayores y traza ya existente para los ambientes AC, AI, Rt e IO, añadiendo datos de N-MORB. Estos nuevos datos incluyeron información de MORB-A (MORB alterado), que fueron recuperados y analizados dentro del programa Deep Sea Drilling Project (DSDP).
- 2) Comprobar la aplicabilidad de los diagramas para basaltos normativos en hiperstena propuestos por RODRÍGUEZ GARCÍA (1998) para datos de N-MORB y MORB-A y, de esta forma, discriminarlos de los otros ambientes tectónicos.
- 3) Proponer nuevos diagramas para N-MORB.

- 4) Conocer la variabilidad de las concentraciones de algunos elementos químicos, especialmente aquellos de características móviles, en los MORB-A, y realizar una comparación con el N-MORB.

## 1.4 Metodología

En el presente estudio, se empleó una metodología similar a la utilizada por RODRÍGUEZ GARCÍA (1998) y VASCONCELOS FERNÁNDEZ (1998), concretándose las siguientes etapas:

1. Revisión de la literatura publicada entre 1970 y 1996, seleccionando los artículos que cumplieran con las siguientes características:
  - a) Que las muestras provinieran del ambiente tectónico de interés, es decir que fueran basaltos de dorsales oceánicas tipo Normal (N-MORB).
  - b) Que se reportara información completa de datos de elementos mayores y elementos traza.
  - c) Que el contenido de SiO<sub>2</sub> fuera <53%, debido a que un porcentaje mayor indica que han ocurrido procesos magmáticos de diferenciación.
2. De los artículos elegidos se capturaron los datos de elementos mayores de cada muestra en el paquete *Newpet*. Versión 7.1. Estos porcentajes se recalcularon en base seca y con ajuste al 100%; las relaciones Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO fueron ajustadas según MIDDLEMOST (1989). Esta composición ajustada se utilizó para calcular la norma CIPW, aplicando el paquete desarrollado por VERMA y NAVARRO-L. (1993), sistema que proporciona el tipo de roca según LE BAS *et al.* (1986) y la normatividad de la roca.
3. Se capturaron los óxidos mayores ajustados y los elementos traza de cada muestra en el paquete *Newpet*. Se capturaron datos de N-MORB y MORB alterado, dando un total de 948 muestras.

4. La información se importó de *Newpet* a la base de datos ya existente de muestras de AC, AI, Rt e IO, la cual está almacenada en el formato del paquete *Statistica 5.0 for MS WINDOWS* (Statsoft. Inc., Tulsa, OK, 1986-1995), creando así una base de datos de 1723 muestras.
5. Se graficaron los datos en los diagramas bivariados: Nb/Ba-Ti/V, y Sr/Y-Zr/Ga, propuestos por RODRÍGUEZ GARCÍA (1998) para basaltos normativos en hiperstena de AC, AI, Rt e IO. La incorporación de los datos de N-MORB y MORB-A hace a estos diagramas más completos en el proceso de discriminación de ambientes tectonomagmáticos.
6. Se construyeron dos diagramas nuevos, Sr/Y-Ti/V y Ti/1000-Sr, los cuales discriminan AC, AI, Rt, IO y N-MORB-MORB-A.
7. Finalmente, se construyeron diagramas normalizados de elementos mayores y elementos traza para comparar las concentraciones de los elementos en los N-MORB y MORB-A.

## 1.5 Norma CIPW

La norma CIPW es el método de cálculo de composición normativa más utilizado y fue desarrollada a principios de siglo por tres petrólogos y un geoquímico, Cross, Iddings, Pirson y Washington. Esta norma consiste en calcular la mineralogía que se presentaría al cristalizar el magma anhidro, siguiendo una serie de reglas fijas (ROLLINSON, 1993).

En el cálculo de la Norma CIPW el porcentaje de los datos de elementos mayores en base seca y ajustados al 100%, se convierte a proporciones moleculares (dividiendo los porcentajes en peso de los elementos mayores entre su peso molecular). Estas proporciones son utilizadas, aplicando ciertas reglas, para establecer las proporciones de minerales normativos. Finalmente estas proporciones se recalculan como porcentaje en peso, multiplicándolos por el peso molecular (VELASCO, 1996).

El programa desarrollado por VERMA y NAVARRO-L. (1993) toma en cuenta las recomendaciones de MIDDLEMOST (1989) en la secuencia:

- a) Cálculo del Fe total.
- b) Asignación en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y FeO a un valor inicial del  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ .
- c) Ajuste al 100% en base seca.
- d) Recálculo de Fe total.
- e) Reasignación en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y FeO de acuerdo a la relación de  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  cuyo valor depende del tipo de roca basada en la clasificación según el diagrama de TAS (LE BAS *et al*, 1986).
- f) Clasificación de la roca en el diagrama de TAS, esto se lleva a cabo en ciclos, hasta que el tipo de roca resultante sea “estable”.

En la Tabla 2 se da un ejemplo de los datos de salida que arroja el programa que calcula la norma CIPW.

### 1.5.1 Normatividad

Los minerales normativos indican el grado de saturación de sílice en el magma. Esta saturación es importante en los magmas basálticos, porque en magmas “secos” este parámetro determina la secuencia de cristalización de minerales y la dirección de evolución durante la cristalización fraccionada. Los magmas basálticos se pueden dividir en tres formas respecto a la saturación de sílice (ROLLINSON, 1993):

1. Basaltos subsaturados en sílice: normativos en olivino y nefelina (basaltos alcalinos)
2. Basaltos saturados en sílice: normativos en olivino e hiperstena (tholeiitas olivínicas)
3. Basaltos sobresaturados en sílice: normativos en cuarzo e hiperstena (cuarzo tholeiitas).

**Tabla 2.** Lista de datos de salida del programa CIPW de VERMA y NAVARRO-L. (1993). Se puede observar el ajuste aplicado en la variable Fe. Este sistema recalcula el Fe basado en las recomendaciones de MIDDLEMOST (1989).

Elemento/Muestra	B191G <sup>1</sup>	B191G <sub>adj</sub> <sup>2</sup>	DR10-14 <sup>1</sup>	DR10-14 <sub>adj</sub> <sup>2</sup>
SiO <sub>2</sub>	50.70	50.63	49.70	50.22
TiO <sub>2</sub>	1.66	1.66	0.82	0.83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.50	14.48	18.65	18.85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.36	1.81	7.34	1.13
FeO	8.58	9.06	---	5.66
MnO	0.20	0.20	0.13	0.13
MgO	7.13	7.12	7.60	7.68
CaO	11.70	11.68	12.68	12.81
Na <sub>2</sub> O	3.09	3.09	2.50	2.53
K <sub>2</sub> O	0.13	0.13	0.07	0.07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.14	0.09	0.09
TOTAL	100.19	100.00	92.97	100.00
Or	---	0.77	---	0.42
Ab	---	26.11	---	21.38
An	---	25.28	---	39.88
Di-Mg	---	15.28	---	13.51
Di-Fe	---	10.03	---	5.13
Hy-Mg	---	5.96	---	7.36
Hy-Fe	---	4.29	---	3.20
Ol-Mg	---	3.06	---	3.86
Ol-Fe	---	2.43	---	1.85
Mt	---	2.63	---	1.64
Il	---	3.15	---	1.57
Ap	---	0.33	---	0.22

<sup>1</sup>Composición original de B191G tomada de BACH *et al.* (1994). Composición original de DR10-14 tomada de DOSSO *et al.* (1988). <sup>2</sup>Composición en base seca y ajuste de Fe. Aplicación de la Norma CIPW. Las abreviaciones de los minerales son: Or=ortoclasa; Ab=albita; An=anortita; Di-Mg=diopsido tipo magnesio; Di-Fe=diopsido tipo fierro; Hy-Mg=hiperstena tipo magnesio; Hy-Fe=hiperstena tipo fierro; Ol-Mg=olivino tipo magnesio; Ol-Fe=olivino tipo fierro; Mt=magnetita; Il=ilmenita y Ap=apatita.



## **1.6 Localización de las muestras**

Las muestras que forman la base de datos para estos diagramas provienen de lugares bien definidos, como las dorsales oceánicas. En la Figura 1, se presenta el mapa de localización de estos lugares y en la Tabla 3 se describe el lugar, el número de muestras capturadas de cada lugar y la referencia de donde se obtuvieron los datos. La localización de las muestras de los ambientes de AC, AI, Rt e IO, se encuentran en el trabajo de RODRÍGUEZ GARCÍA (1998).

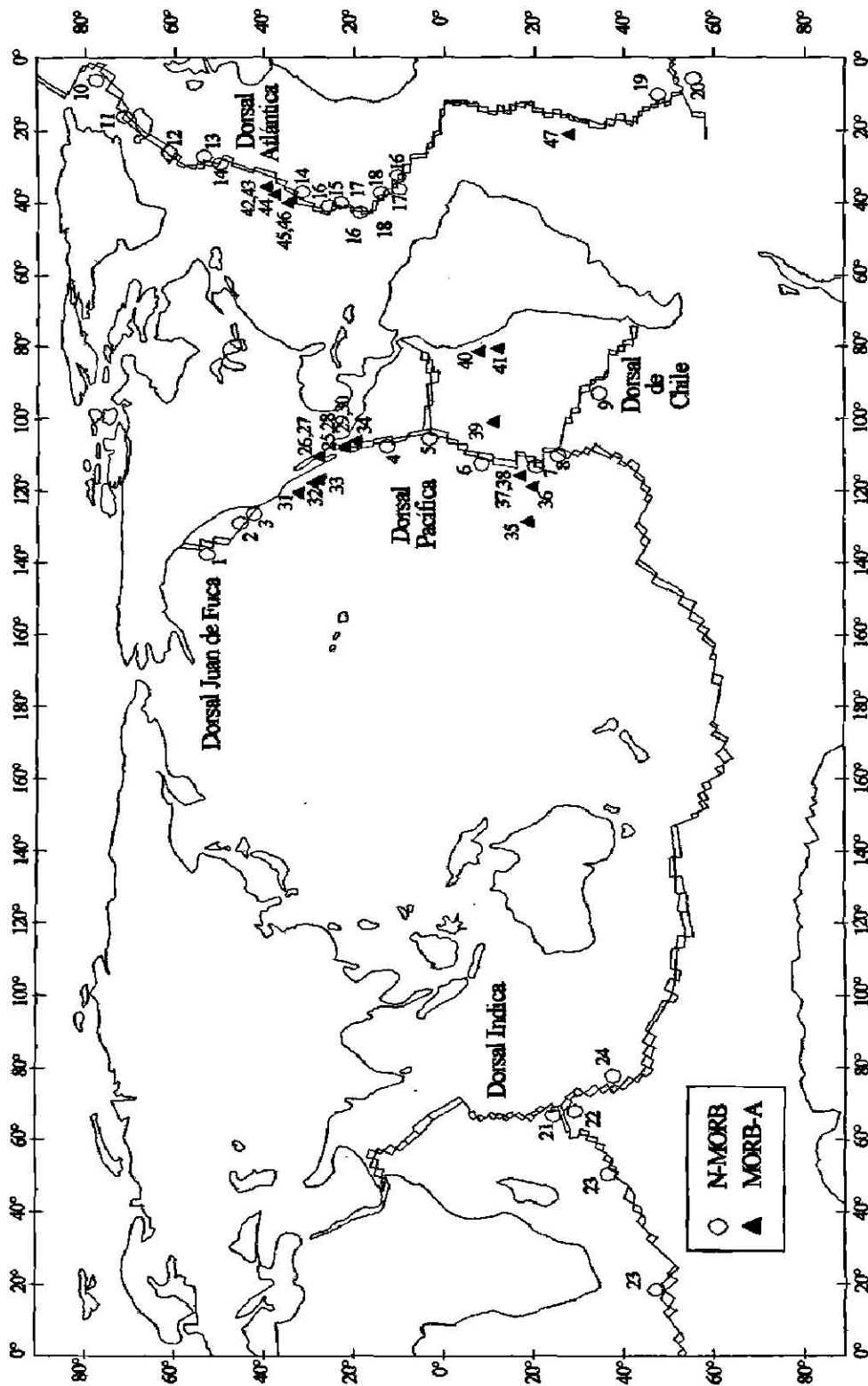


Figura 1. Mapa de localización de la muestras de N-MORB y MORB-A que se utilizaron en los diagramas de discriminación.

Tabla 3. Localización de las muestras de N-MORB y MORB-A que se utilizaron en los diagramas de discriminación.

# LOC	LOCALIDAD	COORDENADAS	MUESTRAS	REFERENCIA
<b>N-MORB</b>				
1	Dorsal Juan de Fuca	53°N 132°W	51	MICHAEL <i>et al.</i> (1989)
2	Dorsal Juan de Fuca	44°20'N 129°55'W, 44°35.8'N 130°18.8'W, 46°44.2'N 129°21.0'W	5	KAY <i>et al.</i> (1970)
3	Dorsal Gorda	41°24'N 127°32.1'W, 41°23.6'N 127°15.7'W, 41°15.7'N 127°28.2'W	3	KAY <i>et al.</i> (1970)
4	Dorsal del Pacífico Este (EPR)	7°08'N 103°15'W, 7°50'N 108°08'W, 18°52'N 113°19'W	3	KAY <i>et al.</i> (1970)
5	Triple Unión dorsal del Pacífico Este*	7°N 104°W	4	LONSDALE <i>et al.</i> (1992)
6	Dorsal del Pacífico Este	6-30°S	12	BACH <i>et al.</i> (1994)
7	Dorsal del Pacífico Este	23°5'S	12	HEKINIAN <i>et al.</i> (1996)
8	Triple Unión dorsal del Pacífico Este**	28°S 110°W	6	LONSDALE <i>et al.</i> (1992)
9	Dorsal de Chile	36°50'S-38°56'S	23	BACH <i>et al.</i> (1996)
10	Dorsal de Mohns	83°N-7°W	8	HAASE <i>et al.</i> (1996)
11	Dorsal del Atlántico (MAR)	66.51°N-71.33°N	25	SCHILLING <i>et al.</i> (1983)
12	Dorsal del Atlántico	54.25-63.57°N	40	SCHILLING <i>et al.</i> (1983)
13	Dorsal del Atlántico	52.33-52.66°N	4	SCHILLING <i>et al.</i> (1983)
14	Dorsal del Atlántico	28.88-52.01°N	81	SCHILLING <i>et al.</i> (1983)

Tabla 3, continuación

# LOC	LOCALIDAD	COORDENADAS	MUESTRAS	REFERENCIA
15	Dorsal del Atlántico	22-25°N	29	BRYAN <i>et al.</i> (1981)
16	Dorsal del Atlántico	10-24°N	95	DOSSO <i>et al.</i> (1993)
17	Dorsal del Atlántico	10-17°N	8	DOSSO <i>et al.</i> (1991)
18	Dorsal del Atlántico	10.62-14°N	13	BOUGAULT <i>et al.</i> (1988)
19	Dorsal del Atlántico	54.5°S, 51°S	38	LE ROEX <i>et al.</i> (1987)
20	Zona de Fractura Conrad	56°S 4°W	12	LE ROEX y DICK (1981)
21	Dorsal Central Indica	25°23'S 70°04'E	4	HUMLER y WHITECHURCH (1988)
22	Triple Unión Dorsal Indica	25°S 70°E	11	PRICE <i>et al.</i> (1986)
23	Dorsal Sudoeste Indica	17-50°E	10	MAHONEY <i>et al.</i> (1992)
24	Dorsal Sudeste Indica	40°S 75°E	12	DOSSO <i>et al.</i> (1988)
<b>MORB-A</b>				
25	Golfo de California (p. 63, s. 469)	32°59.72'N 120°54.83'W	2	SHIBATA <i>et al.</i> (1981)
26	Golfo de California (p. 63, s. 470)	28°50.77'N 117°51.85'W	3	SHIBATA <i>et al.</i> (1981)
27	Golfo de California (p. 63, s. 472)	23°00.35'N 113°59.71'W	1	SHIBATA <i>et al.</i> (1981)
28	Golfo de California (p. 63, s. 473)	20°56.53'N 107°06.35'W	6	SHIBATA <i>et al.</i> (1981)
29	Golfo de California (p. 64, s. 474)	22°36.02'N 108°38.07'W	42	SAUNDERS <i>et al.</i> (1982)
30	Golfo de California (p. 64, s. 478)	27°09.68'N 111°50.75'W	37	SAUNDERS <i>et al.</i> (1982)
31	Golfo de California (p. 64, s. 481)	27°25.05'N 111°50.77'W	14	SAUNDERS <i>et al.</i> (1982)
32	Golfo de California (p. 65, s. 482)	22°18.95'N 107°39.38'W	63	FLOWER <i>et al.</i> (1983)
33	Golfo de California (p. 65, s. 483)	22°28.33'N 108°14.77'W	74	FLOWER <i>et al.</i> (1983)
34	Golfo de California (p. 65, s. 485)	22°14.92'N 107°30.35'W	49	FLOWER <i>et al.</i> (1983)

Tabla 3, continuación

# LOC	LOCALIDAD	COORDENADAS	MUESTRAS	REFERENCIA
35	Placa del Pacífico (p. 92, s. 597)	18°48.43'S 129°46.22'W	35	PEARCE <i>et al.</i> (1985)
36	Placa del Pacífico (p. 92, s. 599)	19°27.09'S 119°52.88'W	1	PEARCE <i>et al.</i> (1985)
37	Placa de Nazca (p. 34, s. 601)	18°55.22'S 166°52.11'W	4	PEARCE <i>et al.</i> (1985)
38	Placa de Nazca (p. 34, s. 602)	18°54.41'S 166°54.68'W	1	PEARCE <i>et al.</i> (1985)
39	Placa de Nazca (p. 35, s. 319)	13°01.73'S 101°52.43'W	14	RHODES <i>et al.</i> (1976)
40	Placa de Nazca (p. 35, s. 320)	9°00.67'S 83°53'W	3	RHODES <i>et al.</i> (1976)
41	Placa de Nazca (p. 35, s. 321)	12°02.15'S 81°54.04'W	5	RHODES <i>et al.</i> (1976)
42	Atlántico Norte Central (p. 82, s. 556)	38°56.38'N 34°41.12'W	14	WEAVER <i>et al.</i> (1983)
43	Atlántico Norte Central (p. 82, s. 557)	38°49.95'N 32°33.58'W	2	WEAVER <i>et al.</i> (1983)
44	Atlántico Norte Central (p. 82, s. 558)	37°46.2'N 37°20.61'W	24	WEAVER <i>et al.</i> (1983)
45	Atlántico Norte Central (p. 82, s. 559)	35°07.45'N 40°55.08'W	7	WEAVER <i>et al.</i> (1983)
46	Atlántico Norte Central (p. 82, s. 561)	34°47.10'N 39°01.70'W	6	WEAVER <i>et al.</i> (1983)
47	Sud Atlántico (p. 73, s. 519)	26°8.20'S 11°39.97'W	32	DIETRICH <i>et al.</i> (1984)

Abreviaciones: #LOC.: Número de localidad en la Figura 1; EPR=Dorsal del Pacífico Este; MAR=Dorsal Atlántica; \*=Triple Unión Pacífico-Cocos-Galápagos; \*\*=Triple Unión Pacífico-Nazca-Galápagos, p=pozo, s=sitio.



## CAPÍTULO 2

---

### ASPECTOS TEÓRICOS DE BASALTOS DE DORSALES OCEÁNICAS

#### 2.1 Basaltos de dorsales oceánicas (MORB)

Las dorsales oceánicas son valles y montañas elevadas de rocas volcánicas que se encuentran en los océanos. El conjunto de ellas distribuidas en el fondo oceánico, alcanzan una longitud total de 60,000 km, en general tienen una anchura de entre 1,000 y 4,000 km, y un relieve topográfico de 2–3 km sobre el fondo oceánico. Además, ocupan alrededor del 33% del total del piso oceánico y ocurren en la mayoría de las cuencas oceánicas (KEAREY y VINE, 1996). En la actualidad, las dorsales oceánicas se consideran los sitios más importantes de generación de magma en el planeta. WILSON (1989) reportó para estas zonas un volumen global de magmatismo, durante el Cenozoico, de 3 km<sup>3</sup> de rocas volcánicas por año y de 18 km<sup>3</sup> de rocas plutónicas por año. La generación de magma en las dorsales oceánicas ocurre por la fusión parcial del manto superior por decompresión adiabática, generando un magma que es eruptado para formar nueva corteza oceánica. Las rocas basálticas generadas son transportadas lejos del eje de la dorsal por el continuo proceso de expansión del piso oceánico, con una velocidad media de 1-10 cm/año (WILSON, 1989. Figura 2).

Topográficamente, las dorsales oceánicas son muy variables. La topografía tiene una relación con la velocidad de expansión de la corteza oceánica. Las dorsales con velocidad rápida de expansión presentan una topografía suave, mientras que las dorsales de una velocidad baja se caracterizan por una topografía más irregular. La dorsal del Pacífico es un ejemplo de una dorsal de alta velocidad (6-7 cm/año) y la dorsal del Atlántico es un ejemplo de una dorsal de baja velocidad (1-2 cm/año; WILSON, 1989).

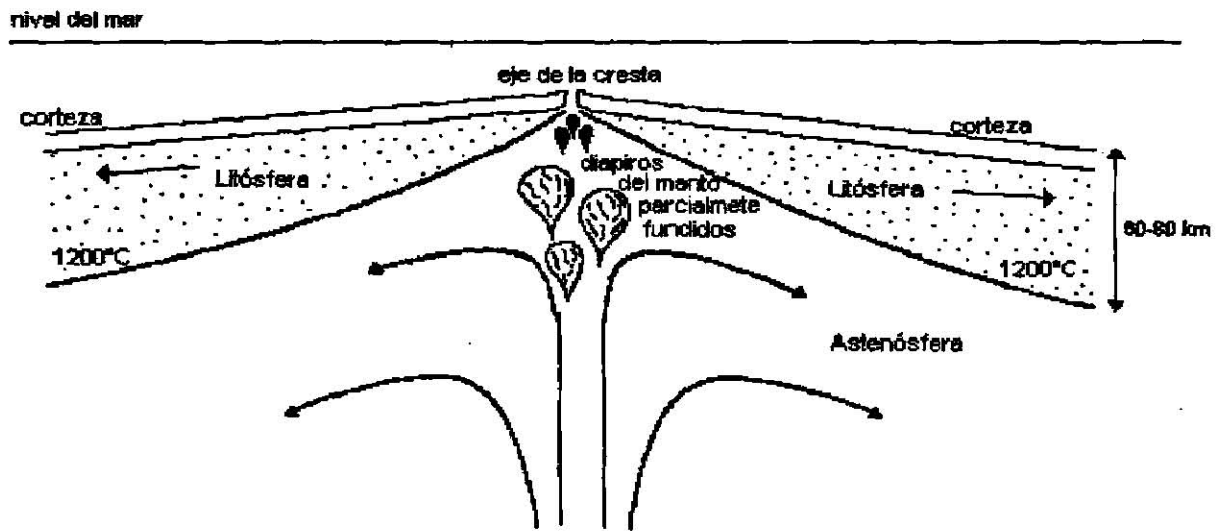


Figura 2. Esquema de un sistema de dorsal oceánica (tomado de WILSON, 1989).

Existe un caso único en Islandia, donde la dorsal oceánica se encuentra sobre el continente, esto se puede tomar como un segmento anómalo de la dorsal, ya que existe una interacción entre la dorsal y un sistema de punto caliente (hot spot), lo que genera que la corteza de Islandia sea más gruesa, y su composición y estructura sea diferente a la típica de la corteza oceánica, ya que existe una cámara magmática más profunda y los productos volcánicos son más variados que los existentes a lo largo de la dorsal oceánica Atlántica. Esta isla es la región volcánica más activa del mundo. (WILSON, 1989; SCHILLING *et al.*, 1982).

### 2.1.1 Geoquímica de los MORB

Geoquímicamente la mayoría de los MORB son sub-alcalinos, según la clasificación de MIDDLEMOST (1975), y toleíticos, según el diagrama AFM (IRVINE y BARAGAR, 1971). Las concentraciones de elementos mayores de estos basaltos toleíticos son similares a las toleitas generadas en las islas oceánicas y arcos de isla. Por otro lado, los MORB tienen

bajas concentraciones en elementos incompatibles (Cs, K, Rb, Sr, Ba, P, Ti) comparados a los basaltos de islas oceánicas, toleítas continentales y de arcos de isla (BASALTIC VOLCANISM STUDY PROJECT, 1981).

SCHILLING (1975) y SUN *et al.* (1979) subdividen los MORB en tres tipos según su origen:

- 1) Basaltos tipo normal (N-MORB), que se caracterizan por bajos contenidos de elementos incompatibles (Cs, Rb, Ba, Nb, Th, U, K).
- 2) Basaltos tipo enriquecidos o de pluma (E-MORB o P-MORB), los cuales presentan altas concentraciones de elementos incompatibles, comparados con el N-MORB. Este tipo incluye a los basaltos generados en islas sobre dorsales oceánicas (como Islandia) que presentan una gran similitud geoquímica con los generados por un vulcanismo de intraplaca oceánica (OIB), como Hawaii.
- 3) Basaltos transicionales (T-MORB), que representan transiciones entre el N-MORB y E-MORB y se caracterizan por parámetros geoquímicos intermedios

En la Figura 3 se presentan modelos de génesis para MORB. El N-MORB se deriva de la fusión parcial del manto superior homogéneo, mientras que el E-MORB (Islandia) contiene cantidades variables de componentes que se derivan de un reservorio heterogéneo (similar a la fuente de los basaltos de islas oceánicas OIB, como en Hawaii) y un modelo de pluma proveniente del manto profundo (WILSON, 1989).

En la Figura 4 se presenta una gráfica en donde se comparan los patrones de abundancia de elementos incompatibles del N-MORB y E-MORB normalizados a condrita (SUN *et al.*, 1979). En esta gráfica los elementos están ordenados en secuencia de incompatibilidad decreciente (de izquierda a derecha). En el patrón para el N-MORB, se puede observar un empobrecimiento en elementos más incompatibles, tal como Cs, Rb, Ba, Th, U, Nb y K. Esto refleja que la fuente del manto superior ha sufrido un empobrecimiento

en estos elementos debido a la continua extracción de magma. Por el contrario, el E-MORB muestra un enriquecimiento en estos elementos con respecto a N-MORB. El origen del manto enriquecido se ha asociado a la inyección de material cortical en el manto durante los procesos de subducción o procesos de mezcla de la litósfera subcontinental con el manto (ROLLINSON, 1993).

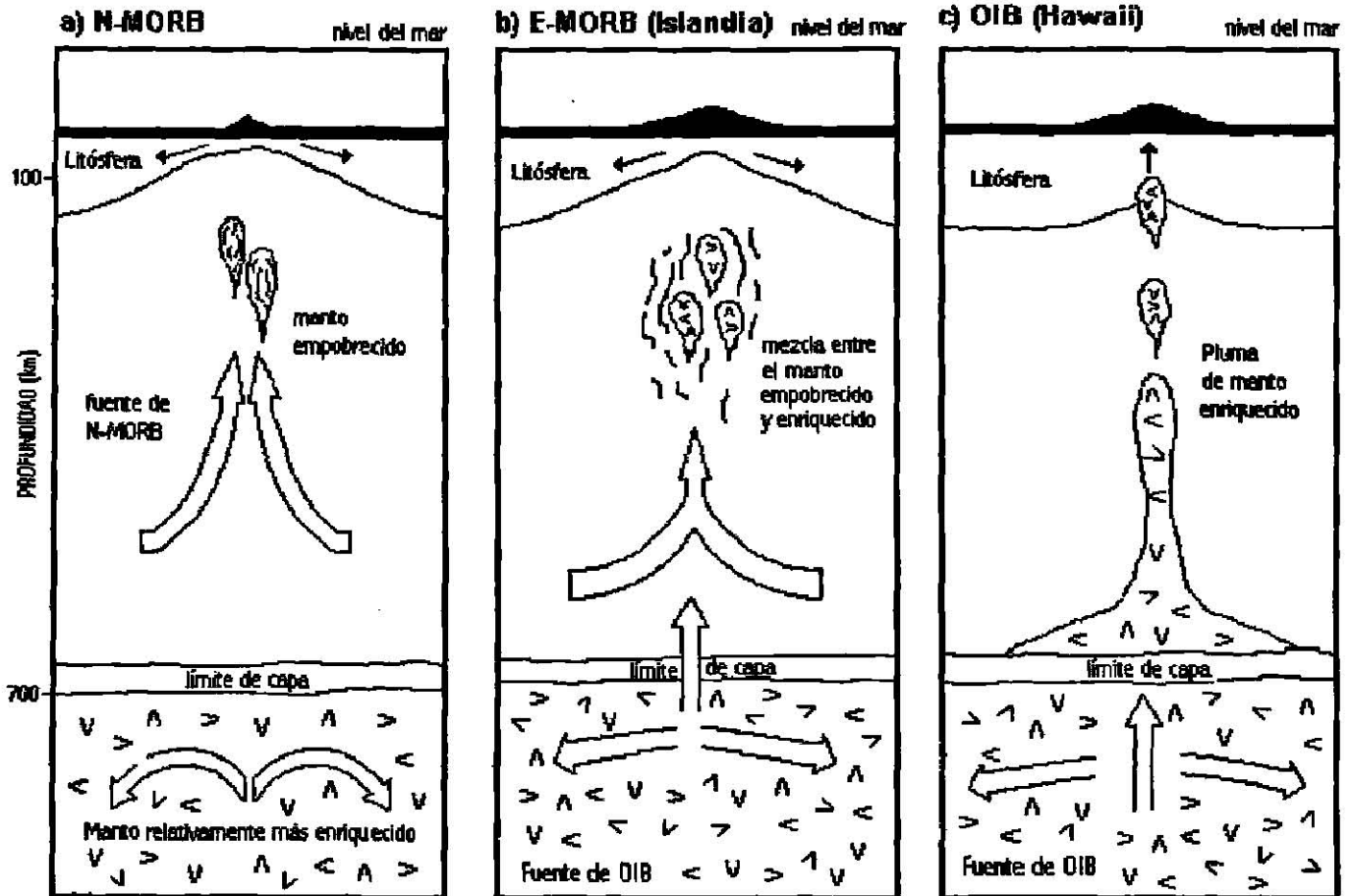


Figura 3. Esquema de los diferentes tipos de MORB que pueden ocurrir. a) N-MORB (Normal) que proviene de la fusión parcial del manto empobrecido, b) E-MORB (Enriquecido) que proviene del aporte de material de un manto más enriquecido (ejemplo de lo que sucede en Islandia) y c) OIB proveniente de un manto más enriquecido como sucede en Hawái. Abreviaciones: MORB=basaltos de dorsal oceánica y OIB=basaltos de islas oceánicas. (modificado de WILSON, 1989).

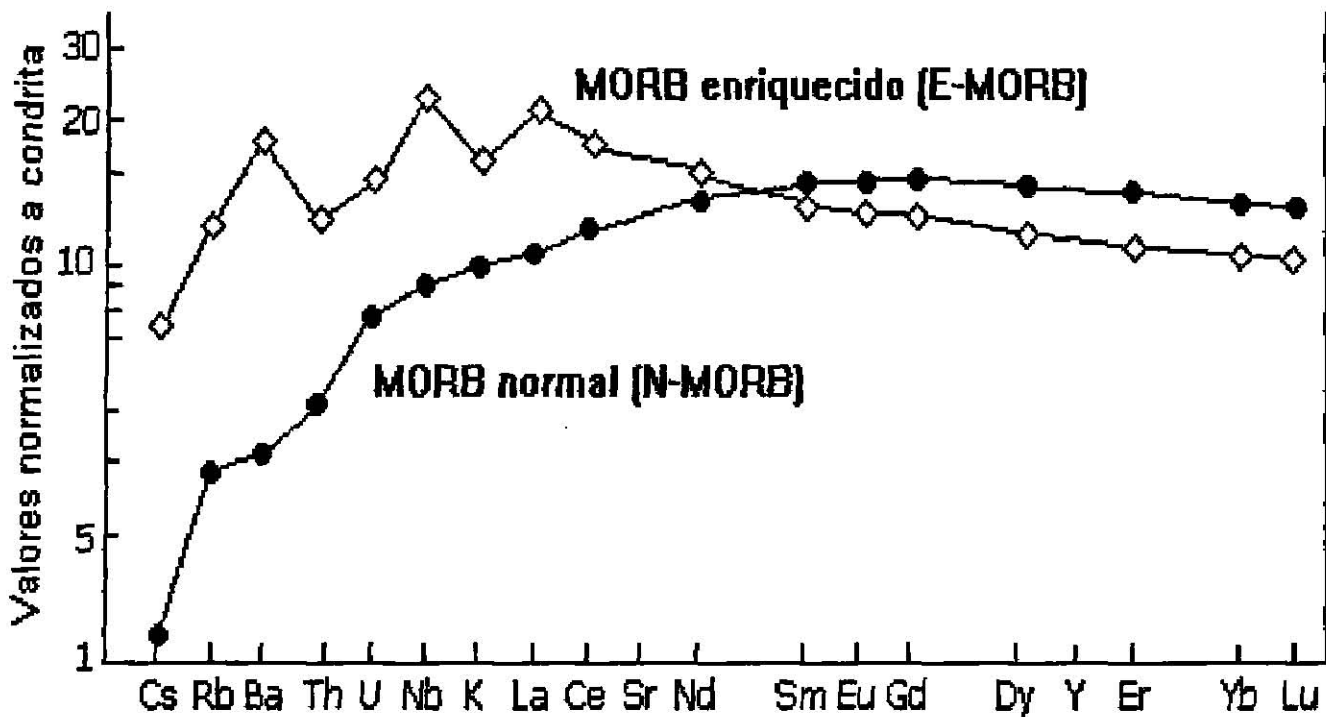


Figura 4. Diagrama de multielementos normalizado con la composición de condrita, dónde se comparan los patrones de abundancia del N-MORB y E-MORB. (tomado de SUN *et al.*, 1979).

## 2.2 Efectos de alteración

La circulación del agua marina por la corteza oceánica empieza inmediatamente después de la formación del nuevo basamento basáltico a través de las dorsales oceánicas (STAUDIGEL *et al.*, 1981). Este fenómeno modifica la composición química y mineralógica del MORB. De esta forma, el estudio de los efectos de la alteración por el agua marina en los basaltos oceánicos se realiza observando los cambios en las abundancias de los elementos mayores y traza en roca fresca y alterada. La alteración del MORB es de gran importancia en los procesos de evolución de la corteza oceánica y de la génesis del vulcanismo en zonas de arco continental y de isla (VERMA, 1992; JOCHUM y VERMA, 1996).

Según STAUDIGEL *et al.* (1981) al estudiar los procesos de alteración a través de las concentraciones de los elementos mayores y traza, se deben tomar en cuenta los siguientes puntos:

- 1) Las abundancias de los elementos mayores o traza en los minerales secundarios o en una muestra de roca, es determinada por factores estequiométricos y la química del agua de mar.
- 2) Las abundancias de los elementos traza no pueden ser usadas como un indicio cuantitativo para el agua de mar, sin que se conozcan sus coeficientes de partición y la composición de la solución alterante.
- 3) La concentración de un elemento en una muestra de roca alterada es el resultado de un intercambio entre un flujo y una muestra fresca, y esto depende de la pérdida o enriquecimiento del elemento durante las reacciones.

A partir de información petrográfica, STAUDIGEL *et al.* (1981) proponen cuatro etapas de interacción agua marina-basalto para alteración hidrotermal.

Las etapa I y II se caracterizan por la aparición de palagonita y esmectita respectivamente, que representan un estado en el que existe una descomposición y modificación química de las rocas del piso oceánico debido a la salinidad, temperatura del agua marina, presión y contenido de gases. En estas etapas la interacción entre el agua marina y el basalto ocurre a temperaturas entre 15-80°C.

En la etapa III se depositan carbonatos a temperaturas entre 15-50°C. Estas soluciones no contienen una cantidad significativa de Sr basáltico.

La alteración incluye en la etapa IV una deshidratación de la corteza oceánica y no causa un cambio químico significativo.



## 2.3 Movilidad de los elementos

La movilidad de los elementos se relaciona con los cambios químicos que ocurren en la roca después de su formación, usualmente debido a la acción de un fluido ya que algunos elementos se movilizan a otras estructuras cristalinas, de tal manera que la concentración de los elementos en una roca puede aumentar o disminuir. Existen algunos elementos que son móviles durante el intemperismo, diagénesis, cualquier tipo de metamorfismo o por la interacción de la roca con un fluido hidrotermal. La movilidad de los elementos mayores está controlada por diferentes factores como: la estabilidad y composición de la roca fresca, la estabilidad y composición de los minerales en la roca alterada, la temperatura y el volumen de la fase del fluido (ROLLINSON, 1993).

Dicha movilidad puede ser detectada por los cambios en las fases mineralógicas ó cuando existe una gran dispersión en los diagramas de variación. Sin embargo, la alteración a veces puede producir cambios que imitan otros procesos como la cristalización fraccionada. En la Tabla 4, se presenta la movilidad de elementos mayores en las rocas basálticas, dónde generalmente los elementos Ti, Al y P son inmóviles mientras que el Ca y Na son móviles.

**Tabla 4.** Movilidad de elementos mayores en rocas basálticas a través de diferentes formas de alteración. (Tomado de ROLLINSON, 1993).

Tipo de roca	Tipo de alteración	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	P	Referencia
Basalto	Hidrotermal	-			-	-	+	-	-	-		MOTTI (1983)
Basalto	Hidrotermal	+	-		-	-	-	-	+			McGEEHAN y McLEAN (1980)
Basalto	Submarina	-			+		-	-	-	+		PEARCE (1976)
Basalto	Intemperismo	-					-	-	-	-		PEARCE (1976)
Basalto	Metamorfismo facie esquistos verdes				x		x		x	x		PEARCE (1976), GELINAS <i>et al.</i> (1982)
Basalto	Metamorfismo facie anfibolita	x						x	x			ROLLINSON (1993)

x: elemento móvil, -: elemento empobrecido, +: elemento enriquecido.

La movilidad de los elementos traza durante la alteración es controlada por los cambios mineralógicos y la naturaleza del fluido. En general, los elementos incompatibles. (Cs, Sr, K, Rb, Ba) son móviles, mientras que los elementos compatibles (tierras raras REE, Sc, Y, Th, Zr, Hf, Ti, Nb, Ta y Pb) se consideran inmóviles (PEARCE, 1983). Otros elementos como los metales de transición: Mn, Zn y Cu tienden a ser móviles a altas temperaturas, y el Co, Ni, V y Cr son inmóviles.

DOE (1997) presenta descripciones sobre los efectos de alteración en algunos elementos:

- Sílice (Si), tiende a decrecer ligeramente, en algunos casos incrementa ya que es precipitado en vetillas.
- Titanio (Ti), uno de los elementos más estable, puede decirse que es inmóvil, aunque a veces puede ser removido por fluidos ricos en carbonatos.
- Aluminio (Al), se incrementa ligeramente bajo alteración hidrotermal, aunque no tiene una tendencia consistente, estas variaciones pueden deberse a los cambios de las concentraciones de otros elementos. Sin embargo, PEARCE (1976) dice que este elemento es móvil en la facie de esquistos verdes.
- Hierro (Fe), es un elemento muy sensitivo a la alteración submarina durante la fase de oxidación.
- Manganeso (Mn), es rápidamente perdido y movilizado en la alteración hidrotermal pero es vuelto a distribuir en las rocas.
- Magnesio (Mg), este elemento decrece ligeramente.
- Calcio (Ca), puede ser perdido rápidamente igual que el Mn. El CaO es perdido mucho más rápido en los vidrios basálticos que en rocas cristalinas, además que decrece al incrementar los fluidos hidrotermales.
- Sodio (Na), HUMPRIES (1984) encontró que este elemento no tiende a ser muy consistente en su movilidad por alteración hidrotermal.
- Potasio (K), sufre un incremento mas marcado en los vidrios basálticos que en la roca igualmente que el Na HUMPRIES (1984) indicó que no tiene una dirección de movilidad muy consistente.

- Fósforo (P), este elemento es rápidamente perdido, igual que el Ca.
- Níquel (Ni), es ligeramente removido pero posiblemente enriquecido en vetillas donde se han depositado sulfuros.
- Zircón (Zr), es otro de los elementos estables, casi no es afectado por la alteración, pero al igual que el Tí, puede ser removido por fluidos carbonatados.
- Cerio (Ce) e Yterbio (Yb), son removidos durante la alteración.
- Cobre (Cu), es removido por fluidos hidrotermales e igual que el Mn es vuelto a precipitar como Cu nativo
- Cromo (Cr), es ligeramente agotado.
- Plomo, Rubidio y Estroncio (Pb, Rb, Sr), son los elementos que se consideran mejores indicadores de alteración por agua marina.
- Bario (Ba), es el elemento más susceptible al intemperismo por agua marina, el enriquecimiento de Ba es mejor en los vidrios basálticos que en la roca cristalina. También puede ser enriquecido en algunas muestras de basaltos alterados por flujos hidrotermales, la conducta variable del Ba refleja la naturaleza del fluido hidrotermal.

## 2.4 Diagramas multielementos normalizados

Con el objeto de comparar las diferencias entre un MORB que ha sufrido alteración y aquel poco afectado, se construyeron diagramas normalizados para elementos mayores y traza. En estos diagramas se comparó el promedio de la composición de los N-MORB con los MORB-A (basaltos recuperados por Deep Sea Drilling Project). El promedio de los N-MORB de la dorsal fue utilizado para fines de normalización, por lo que estos valores se graficaron sobre una línea horizontal de 1.0. Las muestras de N-MORB provienen de la dorsal del Pacífico, de la dorsal Atlántica, y las muestras de MORB-A, de la Placa Nazca y del flanco oeste de la dorsal Atlántica (ver localización en el mapa Figura 1, según autores Tabla 3). Para probar si existen diferencias significativas entre la media aritmética de cada población se aplicó la evaluación estadística F y t (ANOVA) a un nivel de confianza del 95%.

### 2.4.1 Elementos mayores normalizados

En la Figura 5 se presenta un diagrama de elementos mayores normalizado para N-MORB de la dorsal del Pacífico Este y MORB-A de la Placa de Nazca. Al graficar las medias de las concentraciones de cada elemento, se puede observar que aparentemente existe una diferencia en  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}^t$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$  en las muestras de MORB-A con respecto al N-MORB. En la Figura 6, se presentan las barras de variabilidad de una desviación estándar ( $\pm 1\sigma$ ) para cada elemento. La prueba estadística indicó que sólo para  $\text{MnO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , y  $\text{P}_2\text{O}_5$ , existe una diferencia significativa. Las dos primeras gráficas se presentan con una escala logarítmica en el eje "y" para visualizar el alto valor del Mn.

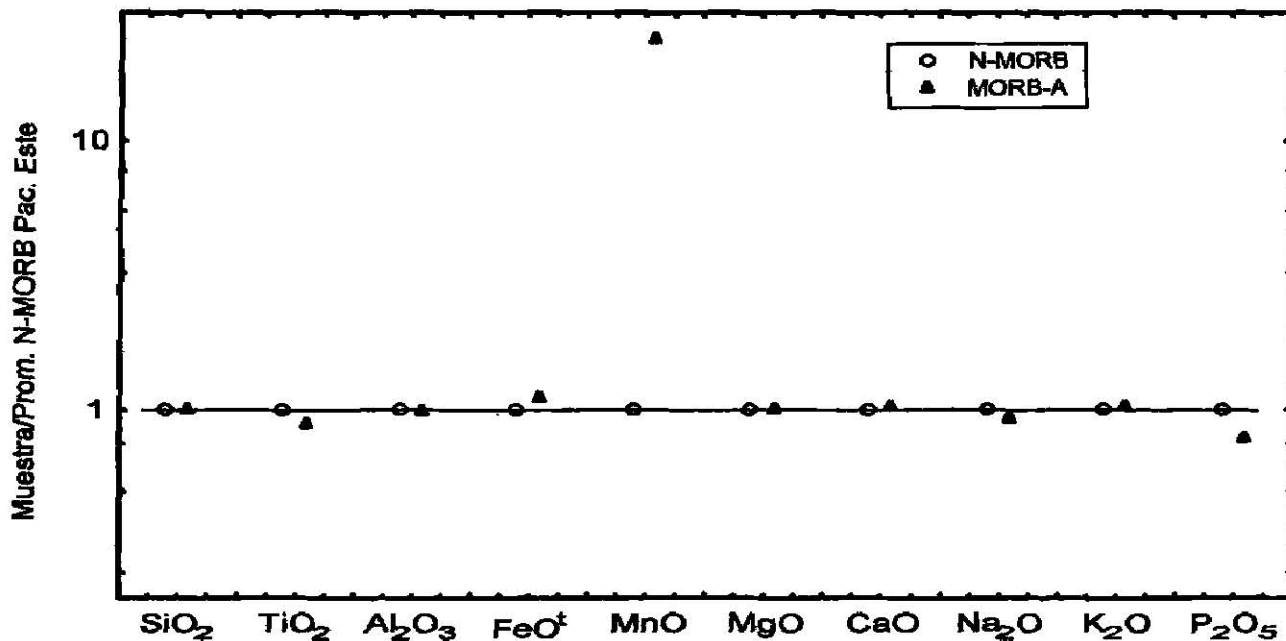


Figura 5. Diagrama normalizado de elementos mayores para N-MORB de la dorsal del Pacífico Este (LONSDALE *et al.*, 1992; HEKINIAN *et al.*, 1996; BACH *et al.*, 1994) y MORB-A de la Placa de Nazca (PEARCE *et al.*, 1985; RHODES *et al.*, 1976).

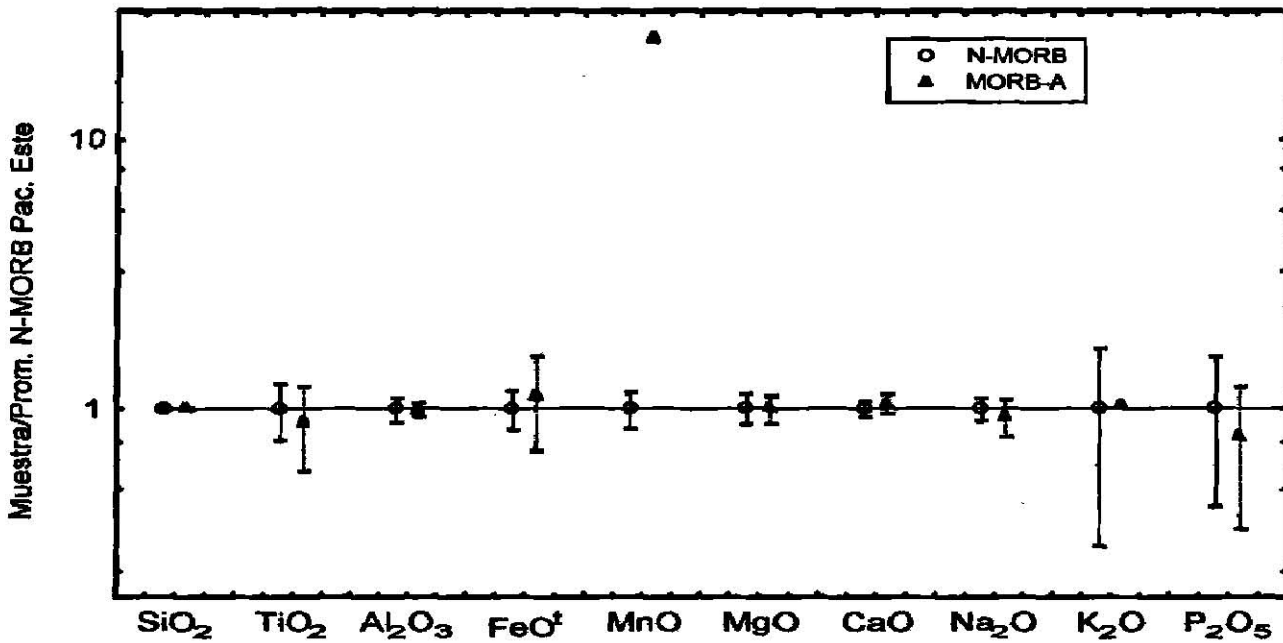


Figura 6. Diagrama normalizado de elementos mayores para N-MORB de la dorsal del Pacífico Este (LONSDALE *et al.*, 1992; HEKINIAN *et al.*, 1996; BACH *et al.*, 1994) y MORB-A de la Placa de Nazca (PEARCE *et al.*, 1985; RHODES *et al.*, 1976). En esta gráfica se observan las barras de variabilidad representadas por el promedio de las concentraciones  $\pm$  una desviación estándar ( $0 \pm 1\sigma$ ) para cada elemento.

De la misma manera, se compararon las concentraciones de los elementos de N-MORB de un fragmento de la dorsal Atlántica y muestras de MORB-A del flanco Oeste de la dorsal Atlántica. En la Figura 7, se puede observar la concentración de los elementos mayores donde aparentemente existe una diferencia entre FeO<sup>t</sup>, MnO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O. Sin embargo estadísticamente la diferencia significativa es entre Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO<sup>t</sup>, MnO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O. En la Figura 8, se presenta el mismo diagrama normalizado, incluyendo las barras de variabilidad para cada elemento.

En las gráficas mostradas en las Figuras 5 y 7, las diferencias entre las medias de las concentraciones sólo son aparentes, y realmente no dicen nada sobre diferencias reales.

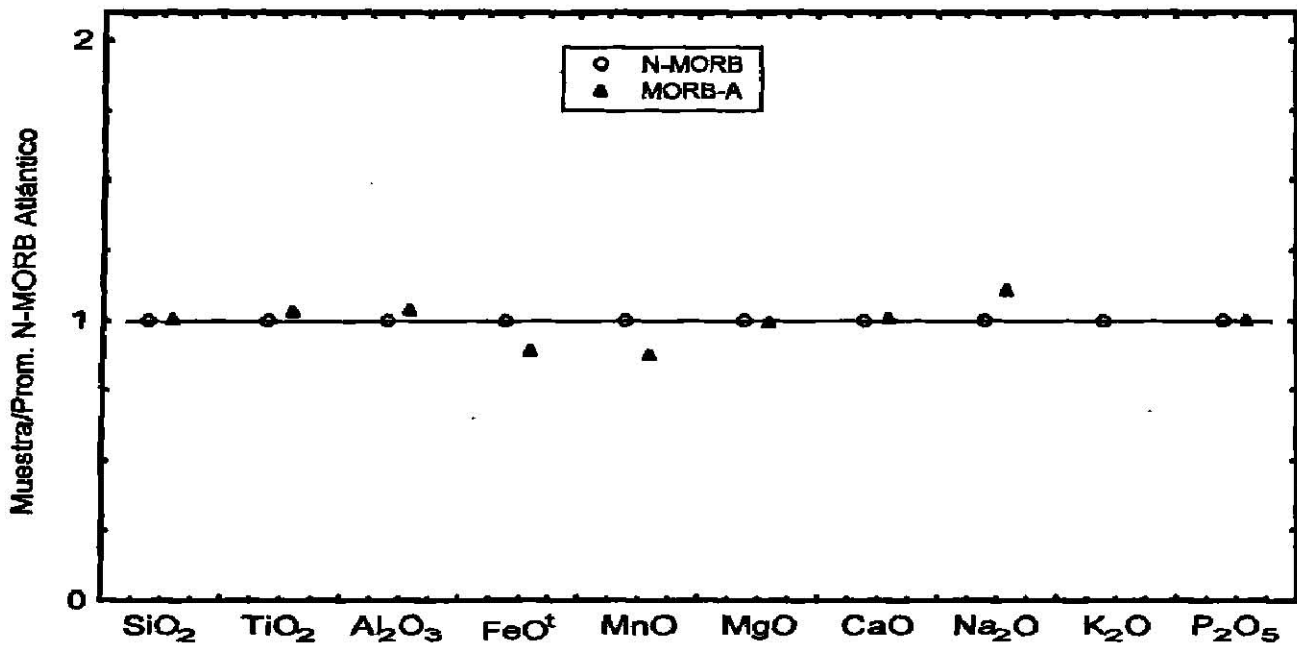


Figura 7. Diagrama normalizado de elementos mayores. Aquí se comparan las medias aritméticas de las concentraciones de los elementos mayores. Los datos de N-MORB fueron obtenidos del trabajo de SCHILLING (1975) y los de MORB-A de WEAVER *et al.* (1983).

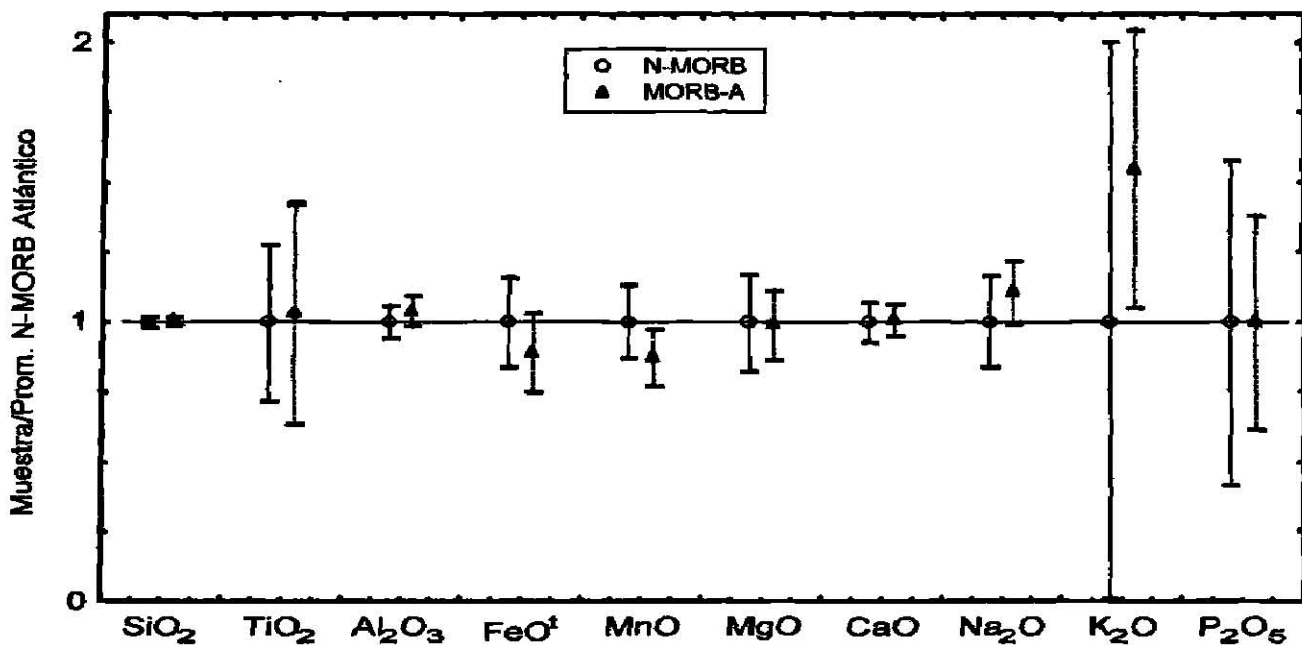


Figura 8. Diagrama normalizado de elementos mayores. Aquí se comparan las medias aritméticas de las concentraciones de los elementos mayores. Los datos de N-MORB fueron obtenidos del trabajo de SCHILLING (1975) y los de MORB-A de WEAVER *et al.* (1983). Las barras de variabilidad representadas por el promedio de las concentraciones  $\pm$  una desviación estándar ( $0 \pm 1\sigma$ ) para cada elemento.



### 2.4.2 Elementos traza normalizados

En la Figura 9 se presenta el diagrama de elementos traza normalizado para los N-MORB del Pacífico Este y MORB-A de la Placa de Nazca, dónde aparentemente existe una diferencia entre V, Sr, Zr, Sm, Eu, Tb, Tm y Lu, pero al aplicarles a estos datos la prueba estadística los resultados fueron que sólo existe una diferencia significativa entre Sr, Zr, Sm y Eu. En la Figura 11 se presenta la misma gráfica de elementos mayores con las varras de variabilidad para cada elemento.

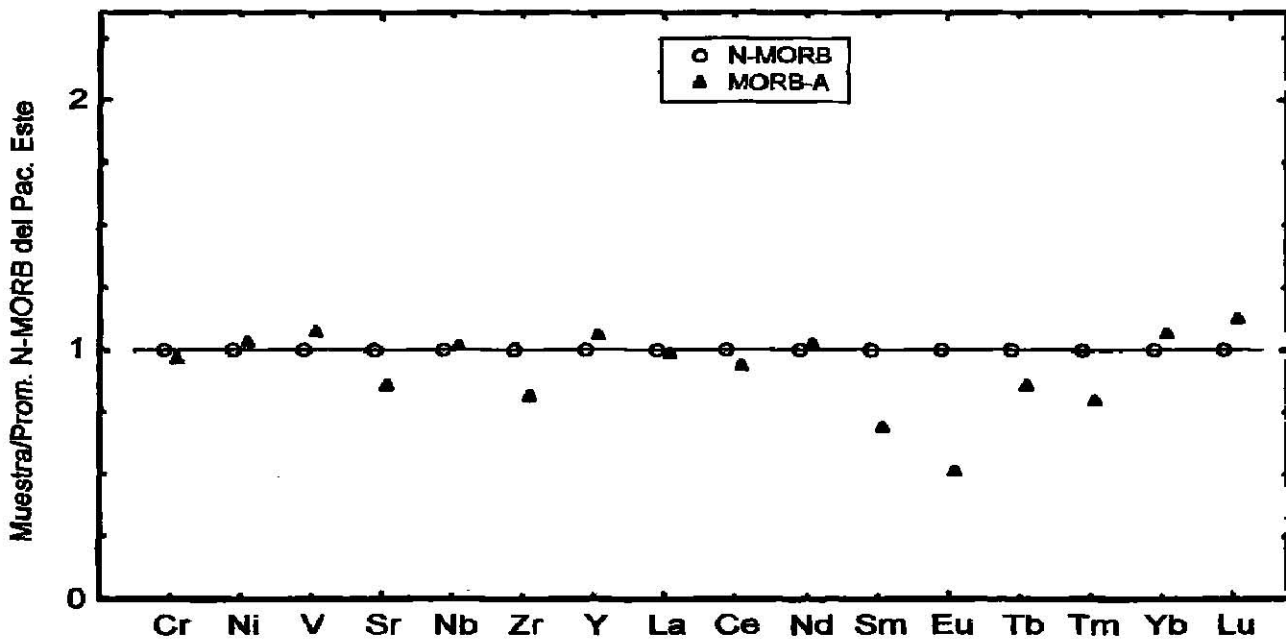
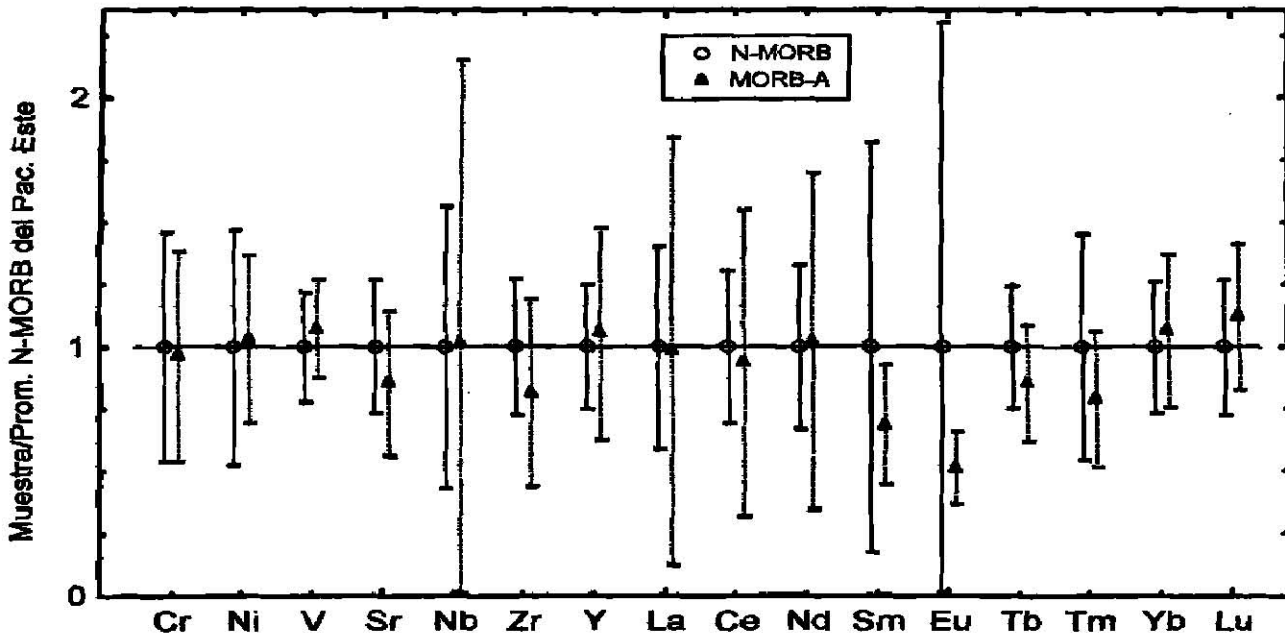


Figura 9. Diagrama normalizado de elementos traza para muestras de N-MORB de la dorsal del Pacífico Este (LONSDALE *et al.*, 1992; HEKINIAN *et al.*, 1996; BACH *et al.*, 1994) y MORB-A de la Placa de Nazca (PEARCE *et al.* 1985; RHODES *et al.* 1976).



**Figura 10.** Diagrama normalizado de elementos traza para muestras de N-MORB de la dorsal del Pacífico Este (LONSDALE *et al.*, 1992; HEKINIAN *et al.*, 1996; BACH *et al.*, 1994) y MORB-A de la Placa de Nazca (PEARCE *et al.*, 1985; RHODES *et al.*, 1976). En esta gráfica se observan las barras de variabilidad representadas por el promedio de las concentraciones  $\pm$  una desviación estándar ( $0 \pm 1\sigma$ ) para cada elemento

En la Figura 11, se observa el diagrama normalizado para elementos traza del N-MORB de la dorsal Atlántica y MORB-A del Atlántico, en donde sólo se comparan las medias de las concentraciones de los elementos traza. Se puede observar que los elementos que aparentemente tienen una diferencia más notable son Ni, Ce y Nd. La prueba ANOVA indicó que para ninguno de estos elementos existe una diferencia significativa. En la Figura 12, se presenta el diagrama de elementos traza con las barras de variabilidad.

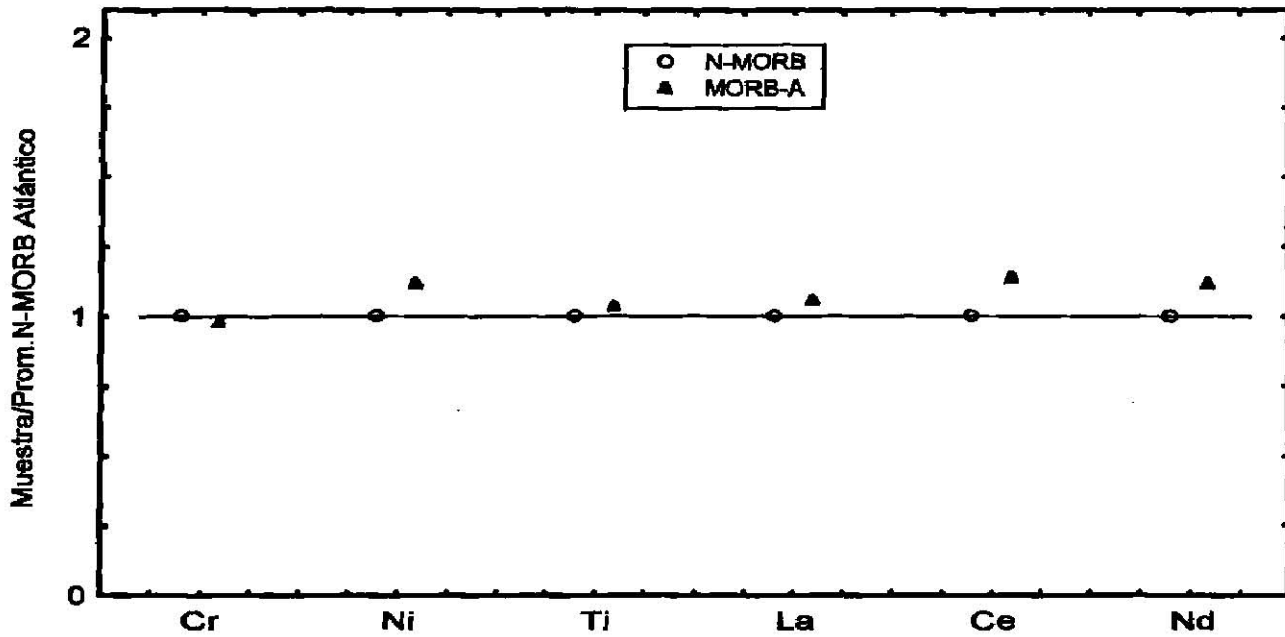


Figura 11. Diagrama normalizado de elementos traza. Aquí se comparan las medias de las concentraciones de los elementos traza. Los datos de N-MORB fueron obtenidos del trabajo de SCHILLING (1975) y los datos de MORB-A de WEAVER *et al.* (1983).

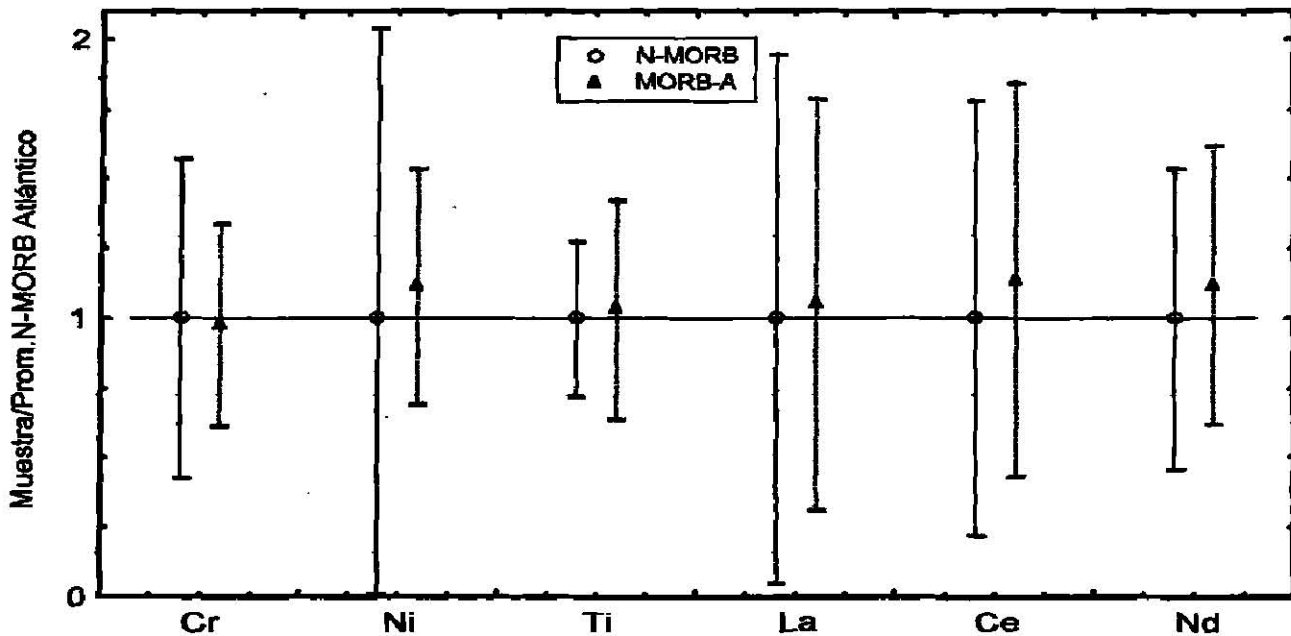


Figura 12. Diagrama normalizado de elementos traza. Aquí se comparan las medias de las concentraciones de los elementos traza. Los datos de N-MORB fueron obtenidos del trabajo de SCHILLING (1975) y los de MORB-A de WEAVER *et al.* (1983). Las barras de variabilidad representada por el promedio de las concentraciones  $\pm$  una desviación estándar ( $0 \pm 1\sigma$ ) para cada elemento.

## 2.5 Comportamiento químico de los elementos

En general, las concentraciones de los elementos mayores de los magmas realmente no son indicadores de un ambiente tectónico definido. Sin embargo, los patrones de elementos traza y el comportamiento de algunos isótopos de Sr, Nd y Pb si están asociados a un ambiente tectónico en especial (WILSON, 1989).

Cuando existe fusión parcial en el manto, los elementos traza presentan una preferencia por integrarse ya sea a la fase líquida a la fase sólida residual. Los elementos que se quedan retenidos preferentemente en la fase sólida son llamados elementos compatibles  $\left(\frac{C_s}{C_l} > 1\right)$ , mientras que aquellos que se concentran en el líquido son llamados elementos incompatibles  $\left(\frac{C_s}{C_l} < 1\right)$  ( $C_s$ =concentración del sólido,  $C_l$ =concentración del líquido). Los coeficientes de partición de estos elementos dependen, en gran medida, de la composición del magma, aunque otros factores que influyen son la temperatura, la presión, la cristaloquímica y la fugacidad de oxígeno (ROLLINSON, 1993). En la Figura 13, se grafican el radio iónico contra la carga iónica de algunos elementos traza. Los cationes pequeños con alta carga son llamados HFS (*high field strength*) y los cationes grandes con carga pequeña se conocen como LFS (*low field strength*) o también como elementos litófilos de ión grande LILE o LIL (*Large Ion Lithophile*). Los elementos con radio iónico pequeño y carga baja tienden a ser compatibles (p. ej. Ni, Co, Cu, etc.).

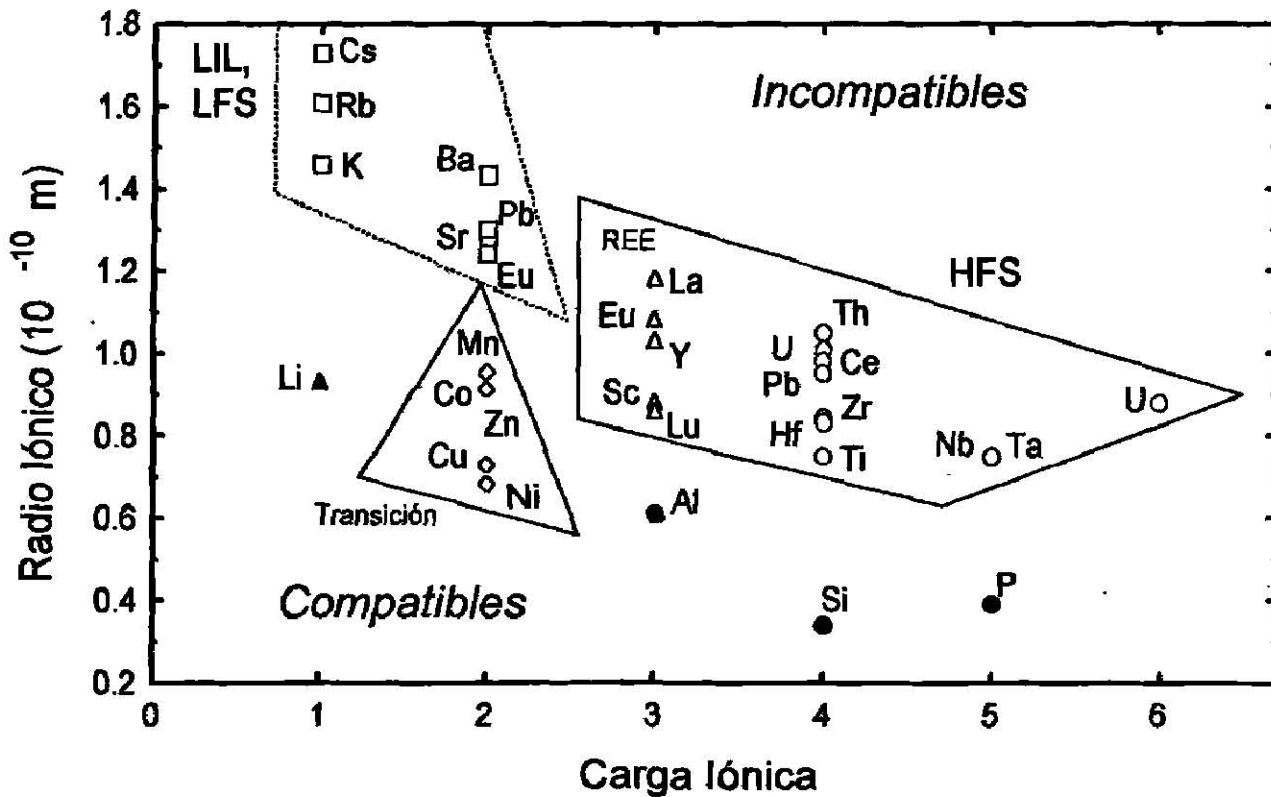


Figura 13. Gráfica de carga iónica vs radio iónico de los elementos traza. Los elementos se subdividen en elementos de baja carga (LFS, LIL), de alta carga (HFS). (modificado de ROLLINSON, 1993).

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS

#### 3.1 CLASIFICACIÓN

Al aplicar la norma CIPW en los datos de N-MORB, la normatividad que resultó en estas muestras fue de hiperstena con olivino e hiperstena con cuarzo, es decir basaltos saturados y sobresaturados, lo cual se comprueba ya que las concentraciones de sílice se grafican en la parte media derecha del diagrama.

Estas muestras compiladas se clasificaron de acuerdo al diagrama de TAS (Total Alcalis vs Sílice; LE BAS *et al.*, 1986), como se puede ver en la Figura 14. Se observa en esta parte del diagrama que la mayoría de las muestras caen en el campo de los basaltos y se concentran en la parte media derecha.

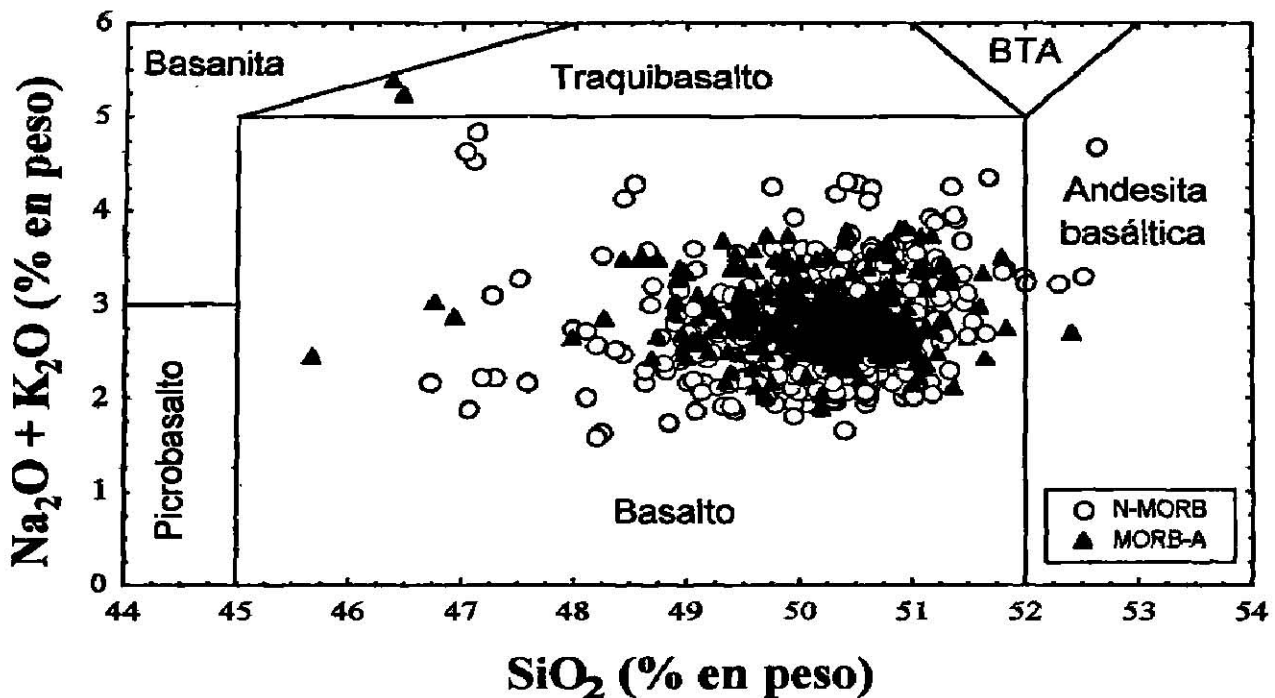


Figura 14. Sección del diagrama de clasificación TAS (álcalis totales contra sílice, LE BAS *et al.*, 1986) para las muestras de N-MORB y MORB-A en basaltos normativos en hiperstena.

## 3.2 DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN

Se presentan los diagramas Nb/Ba-Ti/V y Sr/Y-Zr/Ga propuestos por RODRÍGUEZ GARCÍA (1998) para AC-AI, Rt-IO. Estos diagramas se modificaron, agregándoles los datos de las muestras de N-MORB y MORB-A, obteniéndose de esta manera diagramas de discriminación más completos. Todos estos son para basaltos normativos en hiperstena.

También se proponen los nuevos diagramas Ti/V-Zr/Y, Sr/Y-Ti/V y Ti/1000-Sr. El criterio que se utilizó para definir los campos de los diferentes ambientes en estos diagramas, fue el de trazar las líneas donde se observara menos traslape de las muestras y se trató que las coordenadas fueran números enteros. Para minimizar el efecto de traslape se utilizó una escala log-log.

El criterio para seleccionar los elementos discriminantes fue el que utilizó PEARCE y CANN (1973), los elementos que se utilizaron cumplen con las siguientes características:

1. Una amplia variación en la concentración para muestras de diferentes tipos de magmas, que entre muestras del mismo tipo de magma.
2. Ser insensibles a procesos secundarios como metamorfismo y alteración.
3. Que sean fácilmente medibles, con una buena reproducibilidad de datos, aplicando un método analítico que sea disponible para la mayor parte de la comunidad geoquímica, por ejemplo fluorescencia de rayos X.

PEARCE y CANN (1973) consideraron los elementos Ti, Zr, Y, Nb y Sr como mejores discriminantes, ya que son elementos que presentan mayor resistencia a los efectos de alteración y metamorfismo, aunque el Sr es un elemento móvil, puede ser utilizado para distinguir entre rocas alteradas y poco alteradas.



### 3.2.1 Diagrama Nb/Ba-Ti/V

En la Figura 15, se presenta el diagrama Nb/Ba-Ti/V para basaltos normativos en hiperstena. En este diagrama se nota una clara diferencia en las relaciones de estos elementos en los diferentes ambientes, ya que se observa que existe cierta separación en los campos. Los valores de Nb/Ba en los N-MORB son relativamente altos con respecto a los otros ambientes, mientras que los valores de Ti/V son intermedios. Algunos datos de MORB-A caen en otros campos; el 4% caen en el campo de Rt-IO y el 10% caen en el campo establecido para AC-AI. Sin embargo, las muestras de N-MORB todas se discriminan claramente de los otros ambientes al no caer ninguna muestra en otro campo.

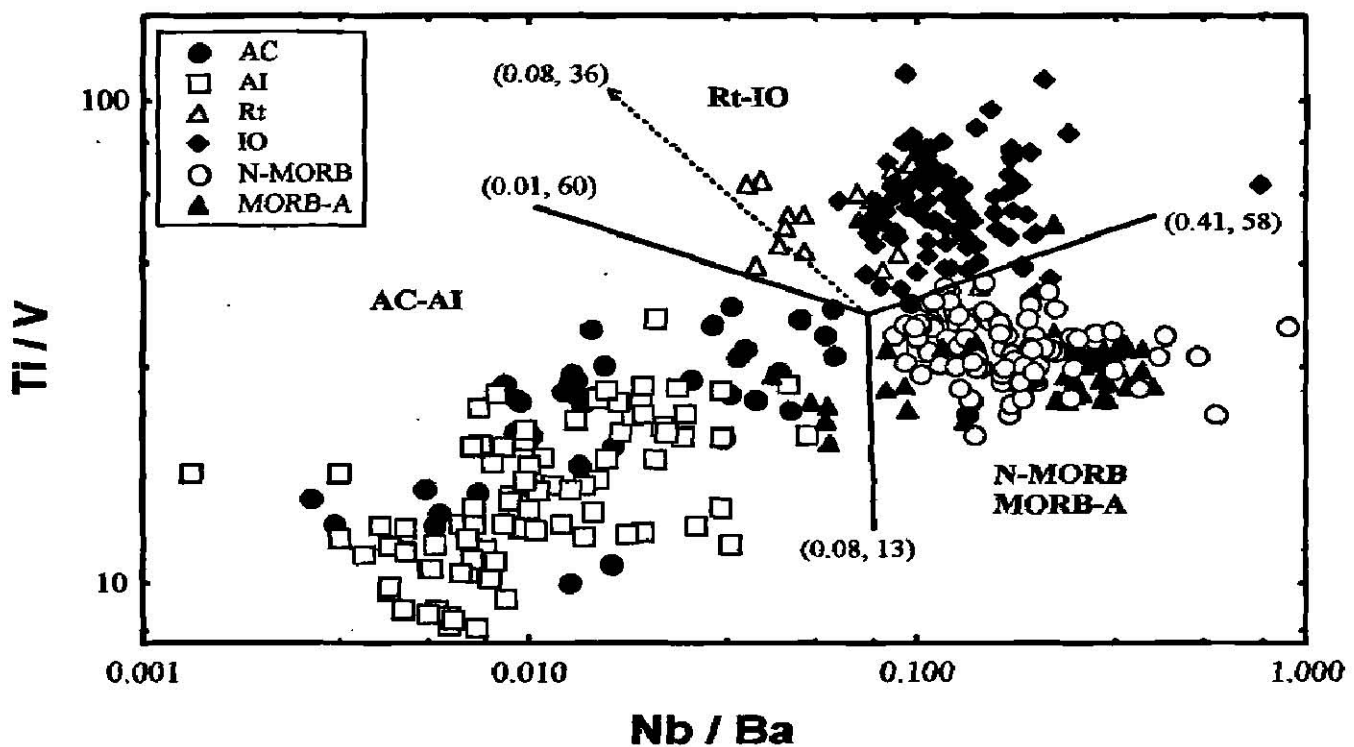


Figura 15. Diagrama de discriminación Nb/Ba-Ti/V para basaltos normativos en hiperstena. (modificado de RODRÍGUEZ GARCÍA, 1998). Los números entre paréntesis indican las coordenadas xy de los vértices de las líneas.

### 3.2.2 Diagrama Sr/Y-Zr/Ga

En este diagrama (Figura 16), se puede observar una clara discriminación entre los campos establecidos para los diferentes ambientes. Los valores de Sr/Y de los N-MORB y MORB-A son bajos, graficándose en la parte izquierda del diagrama. Aproximadamente el 5% de los datos de MORB-A cae en el campo de Rt-IO y el 0.5% en el campo de AC-AI. De los datos de N-MORB ninguna muestra cae en otro campo.

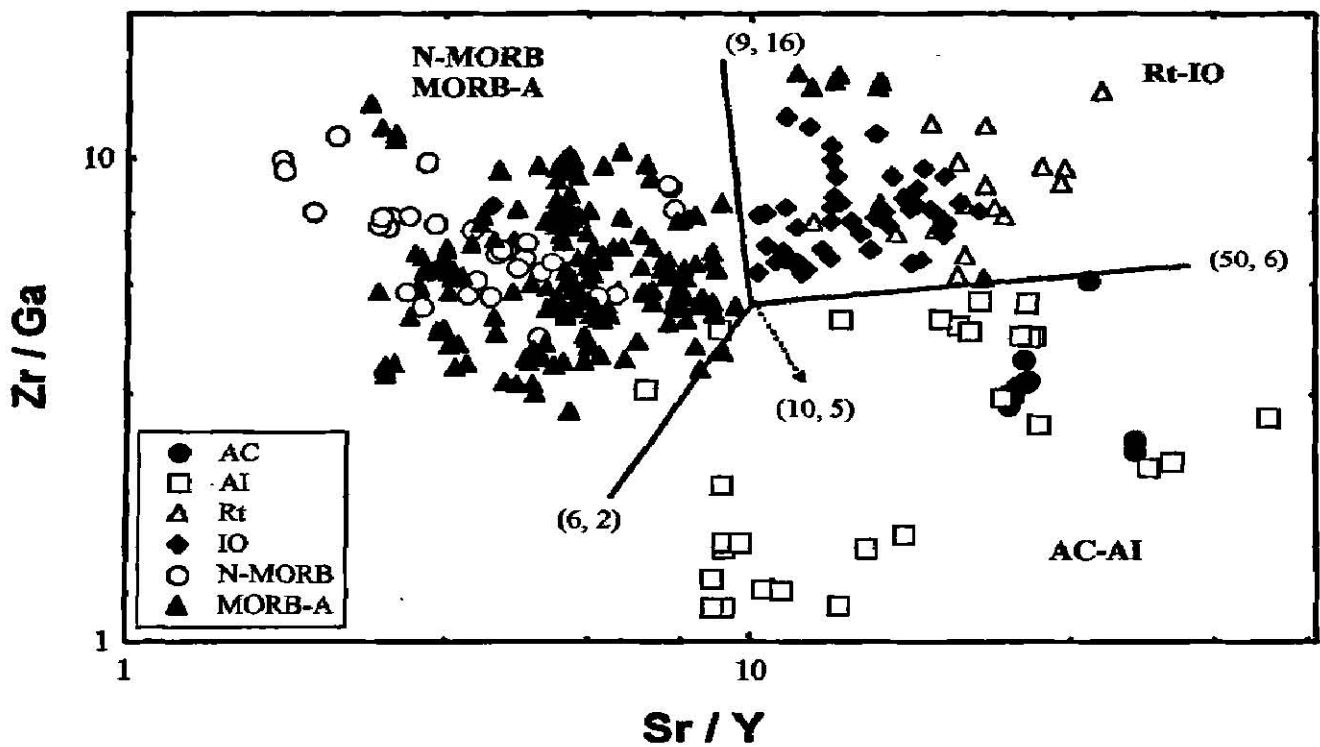


Figura 16. Diagrama de discriminación Sr/Y-Zr/Ga para basaltos normativos en hiperstena (modificado de RODRIGUEZ GARCIA, 1998). Los números entre paréntesis indican las coordenadas xy de los vértices de las líneas.

### 3.2.3 Diagrama Ti/V-Zr/Y

En este diagrama que se muestra en la Figura 17, se puede observar que las relaciones de Ti/V y Zr/Y para los N-MORB se concentran en la parte media de la gráfica. Aproximadamente el 5% de los datos de MORB-A caen en el campo de Rt-IO y el 6% en el campo de AC-AI. Así mismo, el 4% de los datos de N-MORB se traslapan en el campo de Rt-IO y el 2% en el campo de AC-AI. Aunque el porcentaje de traslape de las muestras no es muy alto, no se puede apreciar bien una separación entre los campos de los diferentes ambientes.

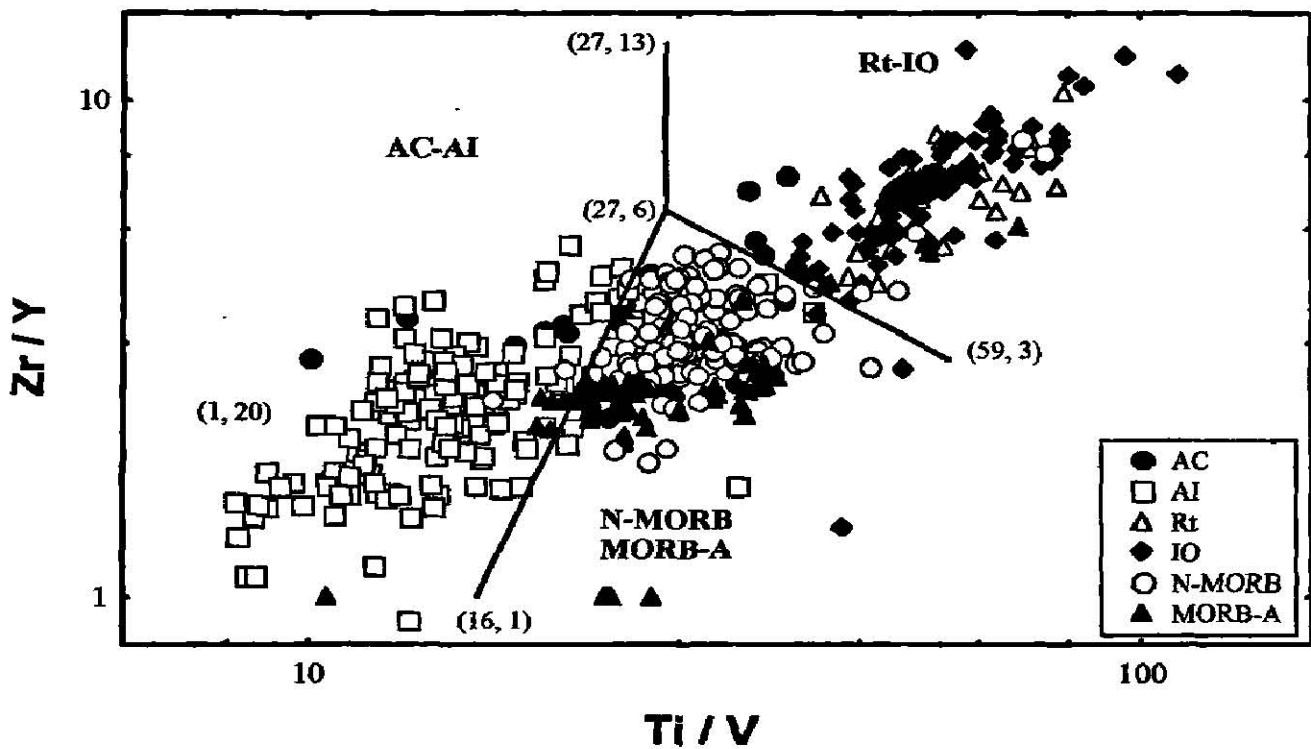


Figura 17. Diagrama de discriminación Ti/V-Zr/Y para basaltos normativos en hiperstena. Los números entre paréntesis indican las coordenadas xy de los vértices de las líneas.

### 3.2.4 Diagrama Sr/Y-Ti/V

El diagrama Sr/Y-Ti/V (Figura 18) es uno de los dos diagramas nuevos que se proponen para discriminar N-MORB, de los ambientes de AC-AI, Rt-IO. En este diagrama los campos están bien separados. Sin embargo aproximadamente el 2% de los datos de MORB-A cae en el campo de AC-AI y ninguna muestra se traslapa en el campo de Rt-IO. Así mismo, aproximadamente el 2% de los datos de N-MORB se traslapan en el campo de Rt-IO y el 0.6% en el campo de AC-AI.

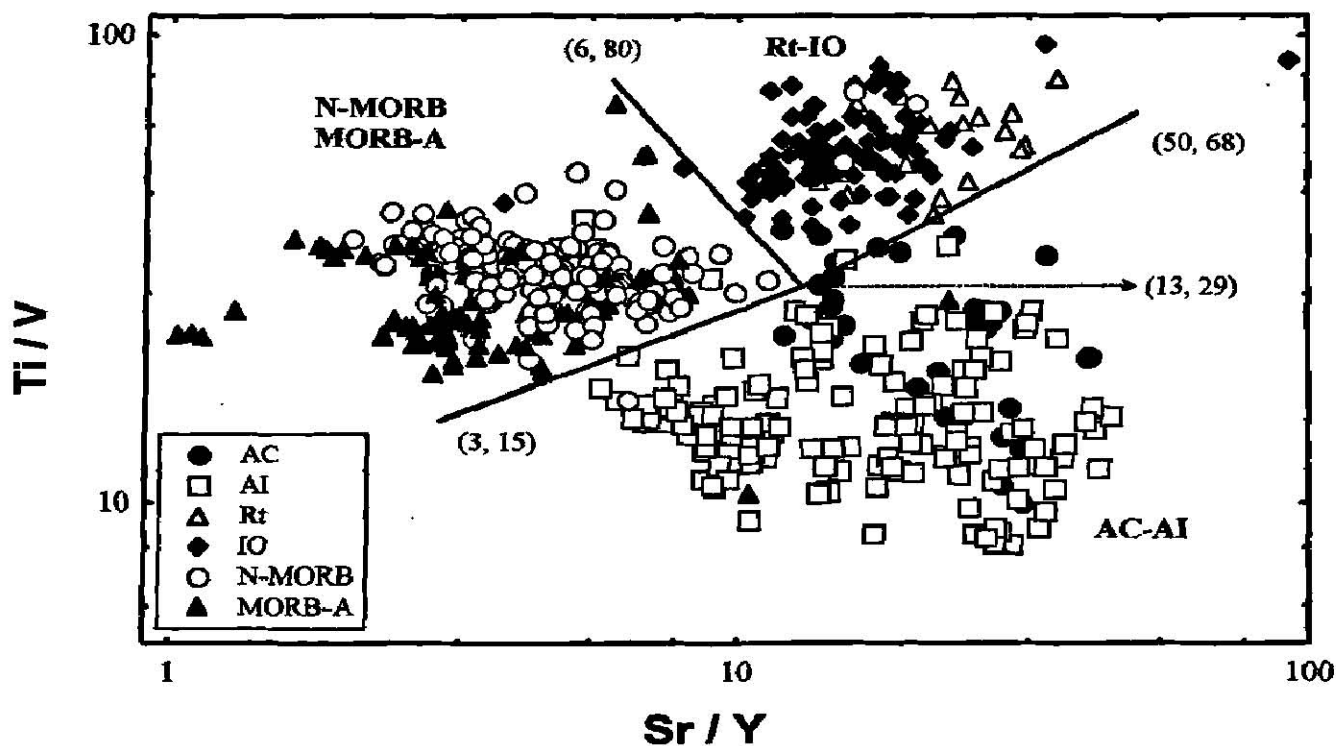


Figura 18. Diagrama de discriminación Sr/Y-Ti/V para basaltos normativos en hiperstena. Los números entre paréntesis indican las coordenadas xy de los vértices de las líneas.

### 3.2.5 Diagrama Ti/1000-Sr

Este es otro diagrama nuevo que se propone en este trabajo. Los datos de N-MORB y MORB-A se ubican en la parte media baja del diagrama. Hay algunas muestras que se traslapan en otros campos, aproximadamente el 2% de los datos de MORB-A cae en el campo de Rt-IO y el 1% en AC-AI. De los datos de N-MORB casi el 3% se grafica en el campo establecido para Rt-IO, y el 2% en el campo de AC-AI. Las concentraciones de Ti y Sr son relativamente bajas en los N-MORB con respecto a los Arcos Continentales, Rifts e Islas Oceánicas

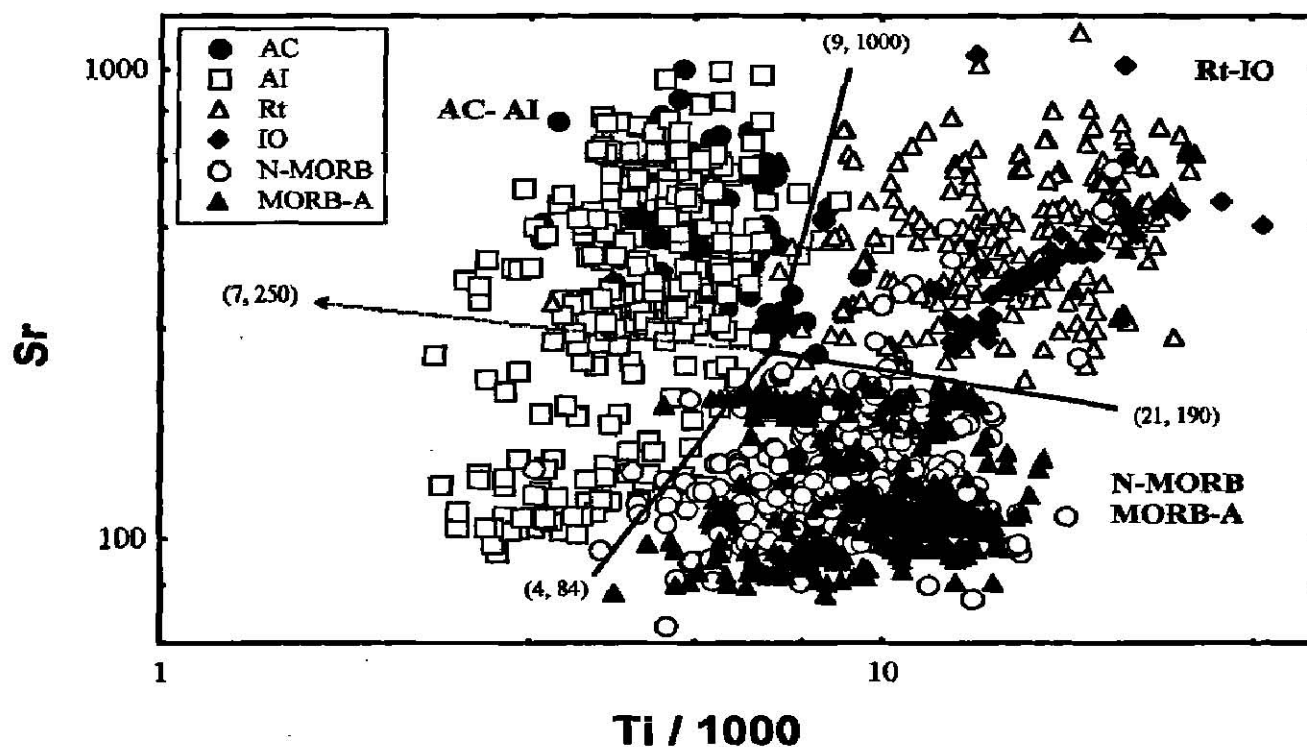


Figura 19. Diagrama de discriminación Ti/1000-Sr para basaltos normativos en hiperstena. Los números entre paréntesis indican las coordenadas xy de los vértices de las líneas.

### 3.3 VALIDACIÓN

Para validar estos diagramas se capturaron muestras problema. Fueron utilizados datos de muestras de ofiolitas, ya que estas son fragmentos de corteza oceánica antigua que ha sido obducida sobre la corteza continental. Se compilaron datos de las siguientes localidades: ofiolita Taitao (KAEDING *et al.*, 1990), ofiolita Troodos (KAY y SENECHAL, 1976; PEARCE, 1975), ofiolita Thethyan (DOSTAL *et al.*, 1991), y de la ofiolita Betts Cove (COISH *et al.*, 1982).

Para aplicar estos diagramas a muestras problemas, se tiene que seguir la metodología mencionada (compilar muestras con  $\text{SiO}_2 < 53\%$ ) y que las muestras graficadas sean basaltos normativos en hiperstena para que los diagramas funcionen correctamente.

Se utilizaron los diagramas Ti/V-Zr/Y, Sr/Y-Ti/V y Ti/1000-Sr, ya que eran las únicas relaciones de elementos que presentaban las muestras capturadas.

En la Figura 20, en el diagrama Ti/V-Zr/Y, de las tres muestras de la ofiolita Thethyan dos caen en el campo de N-MORB y MORB-A, la tercera muestra no aparece ya que el valor de Ti/V es muy bajo y queda fuera de la escala de la gráfica. De las tres muestras de la ofiolita Taitao, sólo una cae en el campo de N-MORB y MORB-A y las otras dos muestras de esta localidad también se salen del diagrama debido a sus altos valores en Zr/Y.

En el diagrama Sr/Y-Ti/V (Figura 21), de las tres muestras de la ofiolita Thethyan dos caen en el campo de N-MORB y MORB-A, e igualmente como en el diagrama anterior la tercera muestra cae fuera del diagrama ya que el valor de Ti/V es muy bajo y esta fuera de la escala del diagrama. De las muestras de la ofiolita Taitao dos caen en el campo de N-MORB y MORB-A y una muestra en el campo establecido para Rt-IO.

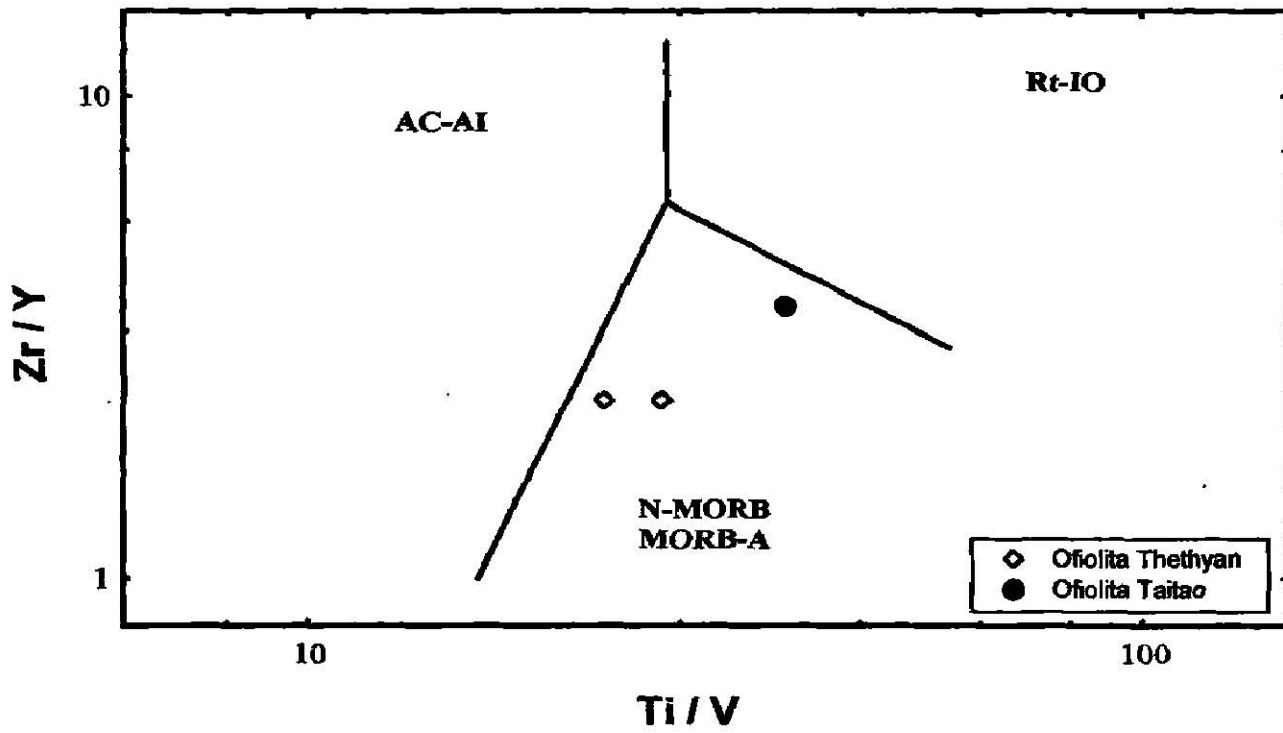


Figura 20. Diagrama de validación  $Ti/V-Zr/Y$  para basaltos normativos en hiperstena de secuencias ofiolíticas

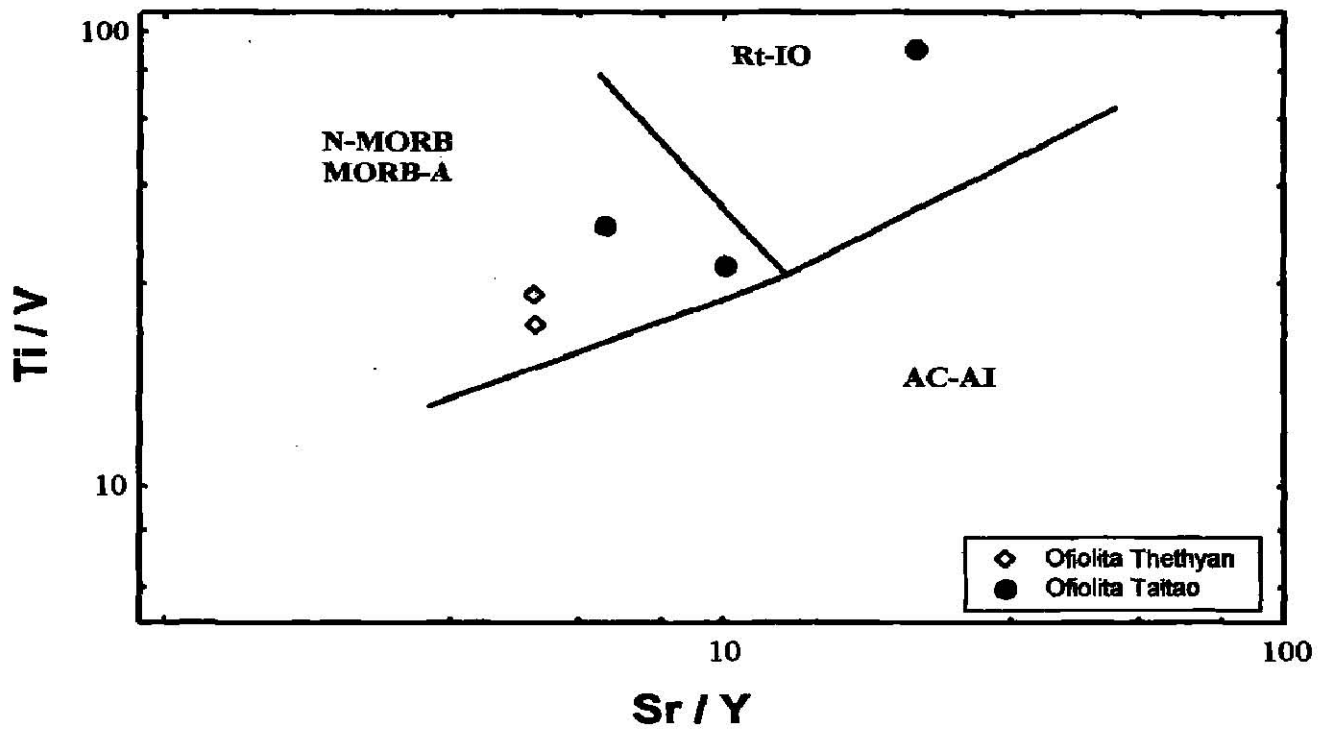


Figura 21. Diagrama de validación  $Sr/Y-Ti/V$  para basaltos normativos en hiperstena de secuencias ofiolíticas.



En la Figura 22 (Ti/1000-Sr), se grafican los datos de las cuatro localidades de complejos ofiolíticos. De las cinco muestras de la ofiolita Troodos (KAY y SENECHAL, 1976) cuatro se ubican en el campo de N-MORB y MORB-A y una en el campo AC-AI PEARCE (1975) presenta seis análisis de esta misma ofiolita, cuatro caen en el campo de N-MORB y MORB-A y dos caen en el campo de AC-AI. Las tres muestras de la ofiolita Thethyan (DOSTAL *et al.*, 1991) todas caen en el campo de N-MORB y MORB-A. De las seis muestras de la ofiolita Betts Cove (COISH *et al.*, 1982) igualmente caen en el campo de N-MORB y MORB-A, excepto una que se ubica sobre la línea de divisoria entre el campo de N-MORB y MORB-A y el campo de Rt-IO, y por último de las tres muestras de la ofiolita Taitao (KAEDING *et al.*, 1990), caen en el campo de N-MORB y MORB-A y sólo una en el campo de AC-AI.

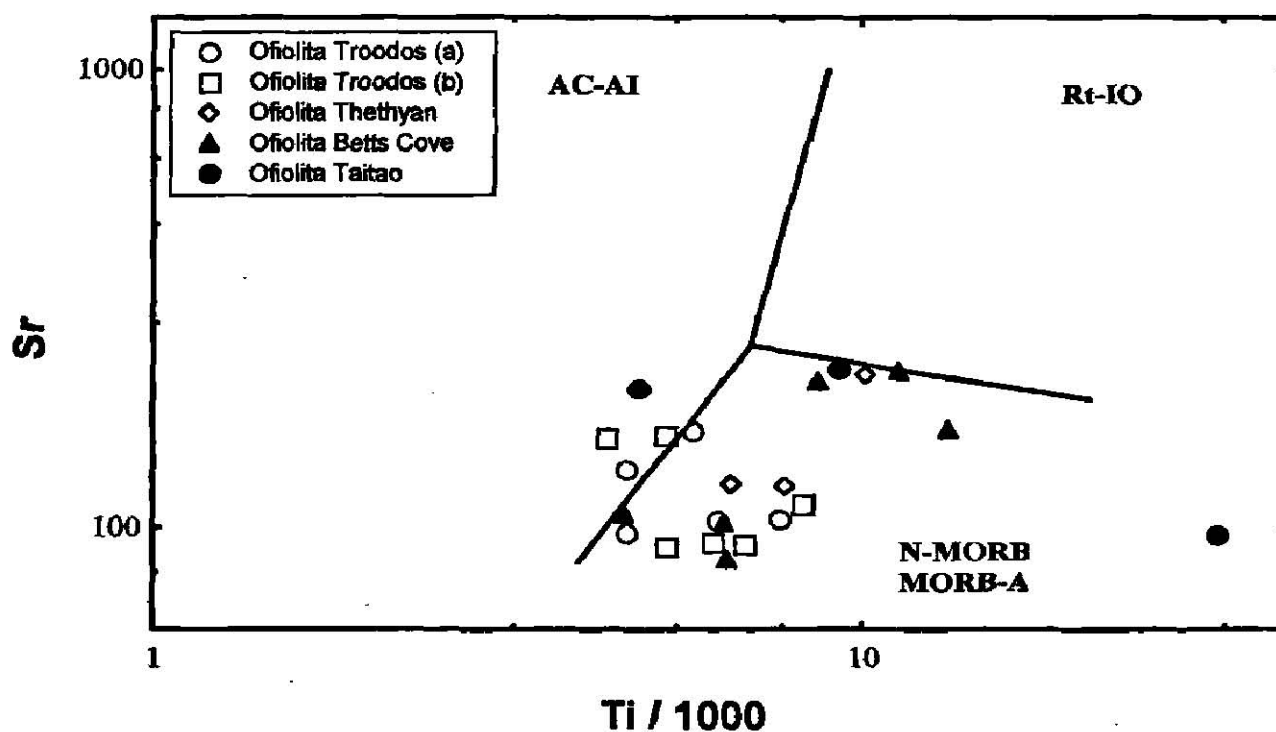


Figura 22. Diagrama de validación Ti/1000-Sr para basaltos normativos en hiperstena de secuencias ofiolíticas. (modificado de RODRÍGUEZ GARCÍA, 1998; a=KAY y SENECHAL, 1976., b=PEARCE, 1975).

Para este tipo de muestras es difícil inferir el ambiente original de formación, ya que se les atribuyen diferentes procesos de origen, tales como: dorsales oceánicas, arcos de isla, cuencas marginales, o algunas combinaciones de estos ambientes. (KAEDING *et al.*, 1999; KAY y SENECHAL, 1976; PEARCE, 1975; DOSTAL *et al.*, 1991; COISH *et al.*, 1982)

### 3.4 APLICACIÓN

Como aplicación para estos diagramas también se capturaron datos de algunas muestras de localidades complejas del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) como: Sierra de Chichinautzin (VERMA, 1999a) y el volcán de Colima (LUHR y CARMICHAEL, 1982) igualmente de Baja California como: complejo volcánico San Borja (SAUNDERS *et al.*, 1987) y de la provincia Volcánica Victoria, Australia (PRICE *et al.*, 1997), la cual no tiene un ambiente tectónico definido.

Para esta aplicación se utilizaron los diagramas Ti/V-Zr/Y y Sr/Y-Ti/V, por ser las únicas relaciones de elementos que presentaban todas las muestras.

En el diagrama Ti/V-Zr/Y (Figura 23), de tres de las muestras utilizadas de Chichinautzin dos caen en el campo de Rt-IO, en correspondencia al ambiente preferentemente tipo OIB reportado por VERMA (1999a) para este campo monogenético, con base en diagramas normalizados y de discriminación de elementos traza, así como a modelos petrogenéticos cuantitativos. La tercera muestra por sus valores altos se sale del diagrama. La muestra de San Borja cae en la línea que divide los campos de AC-AI y N-MORB y MORB-A, SAUNDERS *et al.* (1987) propone para esta localidad un ambiente de paleoarco. Las muestras del volcán de Colima caen en el campo Rt-IO. Para las muestras de la Provincia Volcánica Victoria, Australia, se grafican en el campo de Rt-IO.

En la Figura 24, se presenta el diagrama Sr/Y-Ti/V. Dos muestras de Chichinautzin caen en el campo establecido para los ambientes de Rt-IO, la otra muestra sale de la escala del diagrama. La muestra proveniente de San Borja cae en el campo de AI-AC. Las muestras del volcán de Colima, se localizan en el campo de AC-AI. Finalmente, según este diagrama las muestras de la Provincia Volcánica de Victoria, Australia, se generaron en un ambiente Rt-IO.

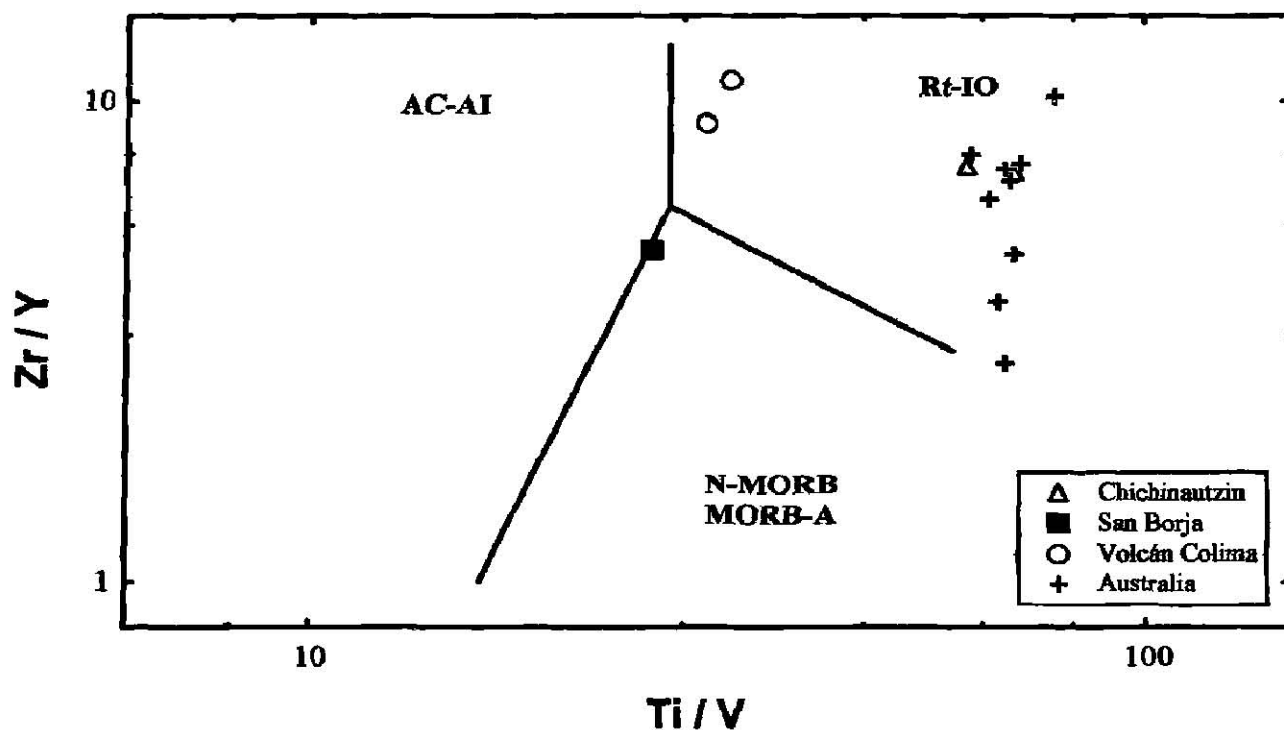


Figura 23. Diagrama de aplicación Ti/V-Zr/Y con muestras de ambientes tectónicos definidos y uno sin definir.

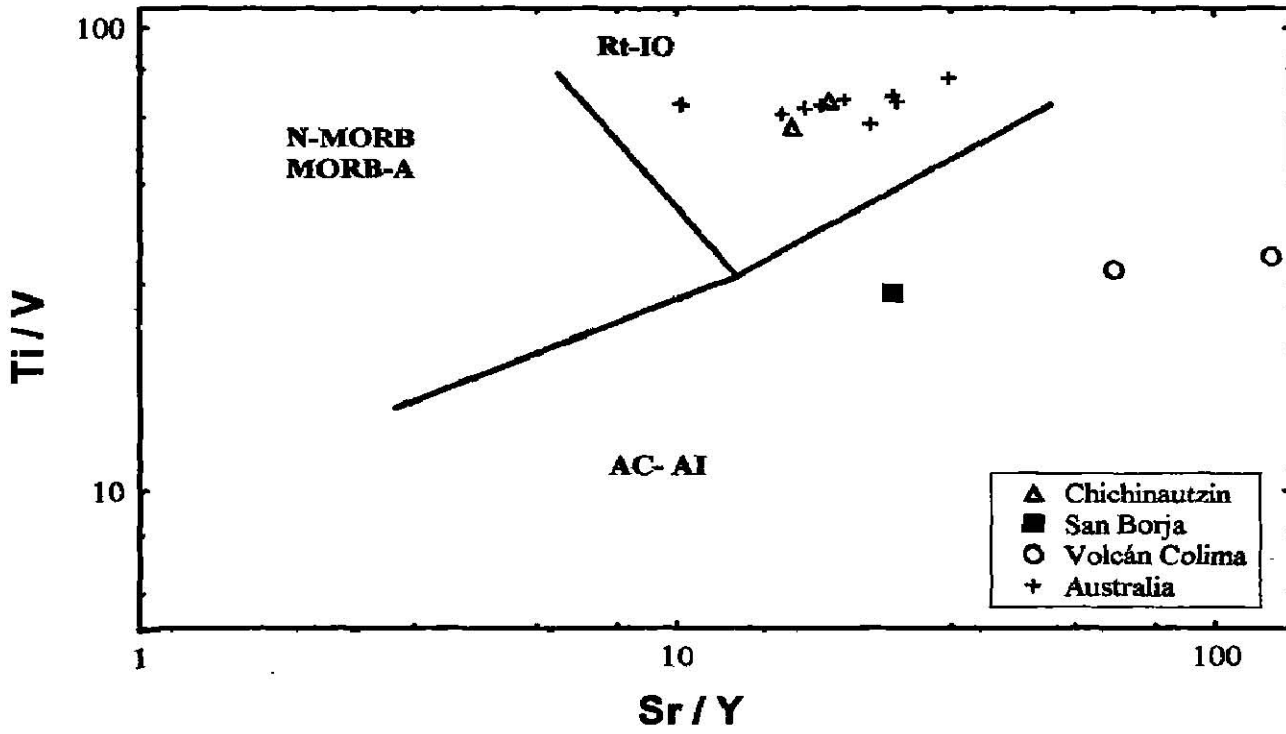


Figura 24. Diagrama de aplicación Sr/Y-Ti/V con muestras de ambientes tectónicos definidos y uno sin definir.

## CAPÍTULO 4

---

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Movilidad de elementos

DOE (1997) menciona que el contenido de  $K_2O$  puede ser utilizado como parámetro para establecer cuando un MORB se encuentra alterado. De forma específica, una concentración de  $K_2O > 0.30\%$ , según este autor indica una alteración apreciable de MORB, lo cual coincide con la concentración promedio de  $K_2O$  determinada para los MORB-A del Atlántico ( $0.35\%$ , ver Anexo 1) en el presente trabajo. Las diferencias de concentración en elementos mayores y traza entre N-MORB y MORB-A coincide con lo reportado en la literatura (ROLLINSON, 1993). En este trabajo se identificaron diferencias significativas de concentración para  $MnO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$  y  $Sr$  para N-MORB y MORB-A del Pacífico. DOE (1997) reportó que estos elementos son fácilmente removidos por alteración marina. Sin embargo, en este trabajo se identificaron diferencias significativas de concentración para  $Zr$ , aunque en la literatura se le ha considerado como un elemento estable a la alteración marina. (DOE, 1997).

Para las muestras del Atlántico, los elementos que presentaron una diferencia en concentración fueron  $Al_2O_3$ ,  $FeO^t$ ,  $MnO$ ,  $Na_2O$  y  $K_2O$ . DOE (1997) señaló que estos elementos son removidos fácilmente, con excepción de  $Al$  que incrementa ligeramente su concentración bajo alteración hidrotermal (PRICE *et al*, 1991). Las diferencias de concentraciones entre N-MORB y MORB-A pueden deberse a que se originaron con concentraciones más altas o más bajas de estos elementos, y/o la concentración cambio significativamente debido a la alteración marina o hidrotermal. Otra razón puede relacionarse a errores analíticos, dado que las concentraciones de muchos de los elementos en este tipo de rocas son relativamente bajas (por ejemplo  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ , y tierras raras), cercanas a los límites de detección de los métodos analíticos empleados.

## 4.2 Clasificación y diagramas de discriminación

En el diagrama de clasificación de TAS (Figura 14), la mayoría de los datos de MORB-A se ubican en la parte intermedia derecha del campo de los basaltos, mostrando un gran traslape con respecto a los N-MORB. Lo anterior podría deberse a que las concentraciones de SiO<sub>2</sub> y álcalis de MORB-A no han sido afectadas de forma significativa por la alteración hidrotermal, como para mostrar una mayor variación composicional con respecto a los N-MORB. En este sentido, en la literatura se ha señalado que Na y K pueden presentar un comportamiento inverso bajo alteración (pérdida de Na, por ganancia de K; STAUDIGEL y HART, 1983), lo cual podría explicar la variación poca significativa observada en el diagrama TAS. Sin embargo, otros autores han señalado que estos elementos no presentan un comportamiento consistente bajo alteración marina (HUMPRHIS y THOMPSON, 1978).

Las características de compatibilidad e incompatibilidad de los elementos traza son la base para entender los diagramas de discriminación. Por ejemplo, la concentración de K, Rb, Ba y Sr será mayor en rocas generadas en ambientes de arco en comparación a las observadas en dorsales oceánicas. En magmas de arcos, la concentración de estos elementos es alta debido al metasomatismo que sufre la cuña del manto por interacción con fluidos (ricos en estos elementos móviles) liberados desde la placa que subduce (PEARCE, 1983; WILSON, 1989).

Aplicando el concepto de incompatibilidad de los elementos químicos en sistemas magmáticos sólido-líquido, un gran número de diagramas de discriminación han sido propuestos desde principios de los años setenta (PEARCE y CANN, 1971, 1973; ROLLINSON, 1993). Sin embargo, muchos de ellos sufren de grandes desventajas que incluyen (VERMA, 1997): una base de datos analíticos muy restringida, la calidad de la información analítica es mala, una clasificación equivocada o incierta del tipo de roca, aplicación de rocas provenientes de un ambiente tectónico no definido y grandes traslapes de los distintos ambientes en los diagramas.

Uno de los requerimientos importantes para los diagramas de discriminación es contar con una base muy amplia de datos sobre magmas representativos de cada ambiente tectónico a discriminar. Ya que en la actualidad existe una mayor información analítica (cantidad) y probablemente más precisa (calidad) (VERMA, 1997), ya que el uso de datos analíticos de los años setentas u ochentas puede dar lugar a una gran dispersión en los datos, debido a que las técnicas analíticas no eran tan precisas como en la actualidad (ROLINSON, 1993).

Por ejemplo, PEARCE y CANN (1973) utilizaron únicamente 19 muestras para construir el diagrama  $Ti/100-Zr-3Y$  para discriminar AI, AC, IO y MORB. Por otro lado, el utilizar diagramas que han sido propuestos antes de 1986 presenta dificultades, ya que la base de la clasificación de las rocas aún no estaba claramente definida (LE BAS et al., 1986; VERMA, 1997). En la Figura 14, por ejemplo, algunas muestras provenientes de un ambiente MORB compiladas en este trabajo y reportadas como basaltos, se ubicaron en los campos de traquibasalto o andesita basáltica. Por último, es importante señalar que en la literatura se han utilizado diagramas triangulares, por ejemplo:  $Ti/100-Zr-3Y$  y  $Ti/100-Zr-Sr/2$  (PEARCE y CANN, 1973). Sin embargo, es conveniente utilizar diagramas bivariados, ya que en los diagramas triangulares el recálculo al 100% causa una agrupación de los datos en la región central del diagrama (VERMA, 1997).

Recientemente, RODRIGUEZ GARCÍA (1998) y VASCONCELOS FERNÁNDEZ (1998), aplicando una metodología que tomó en cuenta los problemas detectados en trabajos anteriores, han creado y propuesto nuevos diagramas de discriminación para los ambientes tectónicos de AC, AI, Rt e IO. El presente estudio representa una continuación de estas propuestas, en donde los principales aportes han sido la inclusión de MORB (roca normal y alterada) en los diagramas  $Nb/Ba-Ti/V$  y  $Sr/Y-Zr/Ga$ , desarrollados por RODRIGUEZ GARCÍA (1998) y la propuesta de tres nuevos diagramas que incluyen todos los ambientes mencionados ( $Sr/Y-Ti/V$ ,  $Ti/V-Zr/Y$ ,  $Ti/1000-Sr$ ). La inclusión de MORB en los diagramas de RODRIGUEZ GARCÍA (1998), convierte a las nuevas propuestas en herramientas geoquímicas más completas, al considerar el ambiente tectónico en donde se genera el



volumen más grande de magmas en el planeta, dándole importancia también al efecto de alteración marina en los basaltos tipo MORB.

En general, para que un diagrama de discriminación pueda ser útil, se tiene que llevar a cabo la metodología previamente establecida para dicho diagrama, tomando en cuenta además que pueden existir diversos factores que pueden hacer difícil el uso de estos diagramas como, los errores analíticos o la alteración de las muestras (alteración marina, hidrotermal, intemperismo, metamorfismo, etc). Además se tienen que especificar las coordenadas de los diferentes campos para posteriormente hacer más fácil la reproducción de estos diagramas. En la Tabla 5 se presentan las coordenadas de las líneas para cada diagrama de discriminación definidos en este trabajo.

Tabla 5. Coordenadas de las líneas en escala logarítmica de los diferentes campos tectonomagmáticos de los diagramas de discriminación modificados y propuestos.

Nb/Ba (x)	Ti/V* (y)	Sr/Y (x)	Zr/Ga* (y)	Ti/V (x)	Zr/Y (y)	Sr/Y (x)	Ti/V (y)	Ti/1000 (x)	Sr (y)
0.01	60	9	16	27	13	3	15	4	84
• 0.08	36	• 10	5	• 27	6	• 13	29	• 7	250
0.41	58	50	6	59	3	6	80	9	1000
0.08	13	6	2	16	1	50	68	21	190

\* Diagramas modificados de RODRÍGUEZ GARCÍA (1998), • punto central de los campos

Los cinco diagramas propuestos dieron resultados de discriminación geoquímica aceptables, ya que no se observaron traslapes muy marcados. En todos los diagramas, excepto en Nb/Ba-Ti/V, el porcentaje de traslape entre las muestras utilizadas para definir la discriminación fue menor al 6%. El mayor porcentaje de traslape se observó en el diagrama Nb/Ba-Ti/V, en donde solamente el 10% de los datos de MORB-A se ubicó en el campo de AC-AI (Tabla 6).

**Tabla 6.** Resumen de traslapes de N-MORB y MORB-A en los diferentes campos de los diagramas presentados en este trabajo.

	N-MORB		MORB-A	
	AC-AI	Rt-IO	AC-AI	Rt-IO
Nb/Ba-Ti/V*	0%	0%	10%	4%
Sr/Y-Zr/Ga*	0%	0%	0.5%	5%
Ti/V-Zr/Y	2%	4%	6%	5%
Sr/Y-Ti/V	0.6%	2%	2%	0%
Ti/1000-Sr	2%	3%	1%	2%

\*Diagramas modificados de RODRÍGUEZ GARCÍA (1998).

Comparando los diagramas de este trabajo con diagramas propuestos con anterioridad y que han sido utilizados con frecuencia en la literatura, por ejemplo, en el diagrama Ti-V de SHERVAIS (1982) existe un traslape muy considerable entre los campos de basaltos continentales y basaltos de cuenca tras arco y un pequeño traslape entre MORB y basaltos calcoalcalinos. En el mismo sentido, el diagrama Nb/Y-Ti/Y (PEARCE, 1982) en donde, aunque existe una discriminación adecuada entre MORB y basaltos de intraplaca, el campo de basaltos de arcos volcánicos tiene un extenso traslape en el campo de MORB.

Es importante señalar que en la mayoría de los diagramas de discriminación utilizados actualmente no se reporta las razones que explican el comportamiento de los elementos en la discriminación. En este sentido, el presente trabajo representa una excelente base para proponer el uso de los nuevos diagramas a nivel internacional. Para lograr este objetivo, en el futuro, se debe explorar acerca de las causas de la discriminación, tomando en cuenta el comportamiento geoquímico de los elementos considerados (ROLLINSON, 1993) y de las condiciones de generación del magma en los ambientes tectónicos (WILSON, 1989).

Por ejemplo, la discriminación en el diagrama Ti/1000-Sr podría explicarse en principio de acuerdo a los siguientes términos. El Sr es un elemento incompatible de alta movilidad. La gran variación en la concentración de este elemento observada en los basaltos

de AC y AI (90 a 1060 ppm) es un reflejo de los diferentes grados de metasomatismo, que puede experimentar la fuente de manto heterogéneo en los arcos debido a los fluidos de la placa. Los contenidos de Sr > 280 ppm para basaltos AC también podrían reflejar mayores posibilidades de contaminación cortical con respecto a la que tendrían los basaltos AI (WILSON, 1989). El contenido de Sr en los N-MORB se encuentra restringido entre 70-240 ppm, lo cuál está relacionado a una fuente de manto empobrecido en las dorsales oceánicas. En el caso de los basaltos de ambientes tipo Rt e IO, el Sr mostró un intervalo composicional de 200-1200 ppm. Esto puede estar relacionado a una fuente de manto enriquecido en el caso de IO, en combinación con una incorporación preferencial en minerales de cristalización temprana (plagioclasas). En el caso de los basaltos Rt, los altos contenidos de Sr podrían ser el resultado de una combinación de fuente de manto enriquecido con una extensa contaminación, que provoca un enriquecimiento en elementos LILE. Por otro lado, el Ti es un elemento de transición considerado como inmóvil. DOE (1997) señaló que los basaltos de AC y AI se caracterizan por contenidos bajos de este elemento, como ha sido observado en este trabajo ( $Ti/1000=2.5-7$ ). Este autor también ha señalado que es común en basaltos tipo IO encontrar contenidos muy altos de Ti ( $Ti/1000=8-30$ ). El MORB también presenta relaciones  $Ti/1000 (=4-18)$  mayores a las observadas en los AC y AI, aunque sin alcanzar los altos valores registrados para IO y Rt.

En cuanto a la aplicación de los nuevos diagramas en muestras del CVM y de Baja California ha demostrado la complejidad en el origen de estas provincias volcánicas. Para la Sierra de Chichinautzin se propone un origen relacionado a rompimiento cortical (rifting), correspondiendo a lo reportado en los trabajos de VERMA (1999 a, b) y MÁRQUEZ *et al* (1999). Así mismo, el área de Colima presenta un reflejo de rifting y subducción. La única muestra compilada de San Borja (SAUNDERS *et al.*, 1987), a pesar de haberse originado en el ambiente post-subducción (rifting), aún parece guardar huellas de manto tipo AC-AI.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

En este trabajo se incorporó el campo para N-MORB y MORB-A en los diagramas Nb/Ba-Ti/V y Sr/Y-Zr/Ga para basaltos normativos en hiperstena propuestos por RODRÍGUEZ GARCÍA (1998), para los ambientes de AC, AI, Rt e IO. Esto condujo a la ocurrencia de un 10% de traslape en el diagrama Nb/Ba-Ti/V y 5% para el diagrama Sr/Y-Zr/Ga por lo que se puede decir que representan medios aceptables para la discriminación. También se crearon nuevos diagramas de discriminación como Ti/V-Zr/Y, Sr/Y-Ti/V y Ti/1000-Sr, los cuáles se piensa que son mejores a los anteriormente propuestos debido a que los traslapes están bastante disminuidos (máximo 6% hasta ausentes, ver Tabla 6).

Adicionalmente, un aporte importante en la metodología de trabajo ha sido el reportar las coordenadas de las líneas de división entre los campos, así como los porcentajes de traslape entre las muestras utilizadas para definir la discriminación, prácticas que no han sido muy comunes en la literatura.

Se recomienda aumentar la base de datos ya existente con otros ambientes como E-MORB, T-MORB y las zonas de tras-arco (back arc). Es necesario contar además con diagramas más representativos de todos los ambientes tectónicos poco estudiados como las zonas de magmatismo orogénico.

Finalmente es muy importante señalar que los diagramas de discriminación sólo son una herramienta más que se pueden utilizar para inferir un ambiente tectónico. Para que un estudio sea 100% confiable se necesitaría de una complementación de las diversas disciplinas de las geociencias, como la geología estructural, geofísica, geoquímica isotópica, con los diagramas de discriminación.

## BIBLIOGRAFÍA

- BACH, W., HEGNER, E., ERZINGER, J. y SATIR, M. (1994):** Chemical and isotopic variations along the superfast spreading East Pacific Rise from 6 to 30°S. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **16**: 365-380.
- BACH, W., ERZINGER, J., DOSSO, L., BOLLINGER, C., BOUGAULT, H., ETOUBLEAU, J. y SAUERWEIN, J. (1996):** Unusually large Nb-Tb depletions in North Chile ridge basalts at 36°50' to 38°56'S : major element, trace element, and isotopic data. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **142**: 223-240.4
- BASALTIC VOLCANISM STUDY PROJECT. (1981):** Basaltic volcanism on the terrestrial planet. Pergamon Press, New York, 1286p.
- BOUGAULT, H., DMITRIEV, L., SHILLING, J.G., SOBOLEV, A., JORON, J.L. y NEEDHAM, H.D. (1988):** Mantle heterogeneity from trace elements: MAR triple junction near 14°N. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **88**: 27-36.
- BRYAN, W.B., THOMPSON, G. y LUDDEN, J.N. (1981):** Compositional variation in normal MORB from 22°-25°N: Mid-Atlantic Ridge and Kane Fracture Zone. *J. Geophys. Res.*, **86**: 815-836.
- BUTLER J.C. y WORONOW A. (1986):** Discrimination among tectonic settings using trace element abundances of basalts. *J. Geophys. Res.*, **91**: B10289-B10300.
- COISH, R.A., HICKEY, R. y FREY, F.A. (1982)** Rare earth element geochemistry of the Betts Cove ophiolite , Newfoundland: complexities in ophiolite formation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **46**: 2117-2134.
- DIETRICH, V.S y CARMAN, J.M.F. y McKEE, E.H. (1984):** Geochemistry of basalts from holes 519A, 520, 522B, and 524, deep sea drilling project leg 73 (South Atlantic). *Init. Rep. DSDP (Deep Sea Drilling Project.)*, **73**: 579-601.
- DOE, B.R. (1997):** Geochemistry of Oceanic Rocks-Ridges, Islands, and Arcs-with emphasis on Manganese, Scandium, and Vanadium. *Int. Geol. Rev.* **39**: 1053-1112.
- DOSSO, L., BOUGAULT, H., BEUZART, P., CALVEZ, J.Y. y JORON, J.L. (1988):** The geochemical structure of the south-east Indian Ridge. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **88**: 47-59.
- DOSSO, L., HANAN, B.B., BOUGAULT, H. SHILLING, J.G. y JORON, J.L. (1991):** Sr-Nd-Pb geochemical morphology between 10° and 17°N on the Mid-Atlantic Ridge: a new MORB isotope signature. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **106**: 29-43.

- DOSSO, L., BOUGAULT, H. y JORON, J-L. (1993):** Geochemical morphology of the North Mid-Atlantic Ridge, 10°-24°N: Trace element-isotope complementary. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **120**: 443-462.
- DOSTAL, J., TOSCANI, L., PHOTIADES, A., y CAPEDELI, S. (1991):** Geochemistry and petrogenesis of Tethyan ophiolites from northern Argolis (Peloponnesus, Greece). *Eur. J. Mineral.*, **3**: 105-121.
- FLOWER, M.F.J., PRITCHARD, R.G., SHMINCKE, H-U. y ROBINSON, P.T. (1983):** Geochemistry of basalts: deep sea drilling project sites 482, 483, and 485 near the Tamayo fracture zone, gulf of California. *Init. Rep. DSDP* (Deep Sea Drilling Project.), **65**: 559-578.
- FODOR, R.V. y VETTER, S.K. (1984):** Rift-zone magmatism: petrology of basaltic rocks transitional from CFB to MORB, south-eastern Brazil margin. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **88**: 307-321.
- GELINAS L., MELLINGER M. y TRUDEL P. (1982):** Archaen mafic metavolcanics from the Rouyn-Noranda district. Abitibi greenstone belt, Quebec. 1. Mobility of the majors elements *Can. J. Earth Sci.* **19**: 2258-2275.
- HAASE, J.M., DEVEY, C.W., MERTZ, D.F., STOFFERS, P. y GARBE-SCHÖNBERG. (1996):** Geochemistry of lavas from Mohns ridge, Norwegian-Greenland sea: implications for melting conditions and magma sources near Jan Mayen. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **123**: 223-237.
- HEKINIAN, R., FRANCHETEAU, J., ARMIJO, R., COGNÉ, J.P., CONSTANTIN, M., GIRARDEAU, J., HEY, R., NAAR, D.F. y SEARLE, R. (1996):** Petrology of the Easter micro plate region in the South Pacific. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **72**: 259-289.
- HUMLER, E. y WHITECHURCH, H. (1988):** Petrology of basalts from the Central Indian Ridge (lat. 25°23'S, long. 70°04'E): estimates of frequencies and fractional volumes of magma injections in a two-layered reservoir. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **88**: 169-181.
- HUMPHRIS, S.E. (1984):** The mobility of the rare earth elements in the crust. En: Henderson, P. (Ed.). Rare earth elements Geochemistry. Elsevier, Amsterdam . p. 316-241.
- HUMPHRIS, S.E. y THOMPSON, G. (1978):** Hydrothermal alteration of oceanic basalts by seawater: *Geochim. Cosmochim. Acta.* **42**: 107-125.
- IRVINE, T.N. y BARAGAR, W.R.A.R. (1971):** A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. J. Earth Sci.* **8**: 523-548.



- JOCHUM, K.P. y VERMA, S.P. (1996):** Extreme enrichment of Sb, Tl and other trace elements in altered MORB. *Chem. Geol.*, **130**: 289-299.
- KAEDING, M., FORSYTHE, R.D. y NELSON, E.P. (1990):** Geochemistry of the Taitao ophiolite and near-trench intrusions from the Chile Margin Triple Junction., **3**: 161-177.
- KAY, R.W. y SENECHAL, R.G. (1976):** The rare earth geochemistry of the Troodos Ophiolite Complex. *J. Geophys. Res.*, **81**: 964-969.
- KAY, R., HUBBARD, N.J. y GAST, P.W. (1970):** Chemical characteristics and origin of oceanic ridge volcanics rocks. *J. Geophys. Res.*, **75**: 1585-1613.
- KEAREY, P. y VINE, F.J. (1996):** Global Tectonics. Ed. Blackwell Science. 333p.
- LE BAS, M.J., LE MAITRE, R.W., STRECKEISEN, A. y ZANETTIN, B. (1986):** A chemical classification of volcanic rocks based on the Total Alkali-Silica diagram. *J. Petrol.*, **27**: 745-750.
- LE ROEX, A.P. y DICK, H.J.B. (1981):** Petrography and geochemistry of basaltic rocks from the Conrad Fracture zone on the America-Antarctica Ridge. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **54**: 117-138.
- LE ROEX, A.P., DICK, H.J.B., GULEN, L., REID, A.M. y ERLANK, A.J. (1987):** Local and regional heterogeneity in MORB from the Mid-Atlantic Ridge between 54.5°S and 51°S: Evidence for geochemical enrichment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**: 541-555.
- LETERRIER, J., MAURY, R.C., THONON, P., GIRARD, D. y MARCHAL, M. (1982):** Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of palaeo-volcanic series. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **59**: 139-154.
- LONSDALE, P., BLUM, N. y PUCHELT, H. (1992):** The RRR triple junction at the southern end of the Pacific-Cocos East Pacific Rise. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **109**: 73-85.
- LUHR, J.F. y CARMICHAEL, S.E. (1982):** The Colima volcanic complex, Mexico: III ash-and-scoria-fall deposits from the upper slopes of volcan Colima. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **80**: 262-275.
- McGEEHAN P.J. y McLEAN W.H. (1980):** An Archaean sub-seafloor geothermal system, "calc-alkali" trends, and massive sulphide genesis. *Nature*, **286**: 767-771.
- MARQUEZ, A., VERMA, S.P., ANGUITA, F., BRANDLE, J.L. y OYARZUN, R. (1999):** Tectonics and volcanism of Sierra Chichinautzin: Extension at the front of the Central Trans-Mexican Volcanic Belt. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* (en prensa).



- MAHONEY, J., LE ROEX, A.P., PENG, Z., FISHER, R.L. y NATLAND, J.H. (1992):** Southwestern limits of Indian Ocean Ridge mantle and the origin of low  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  Mid-Ocean Ridge basalt: Isotope systematics of the central southwest Indian ridge (17°-50°E). *J. Geophys. Res.*, **97**: 771-790.
- MESCHEDE, M. (1986):** A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chem Geol.*, **56**: 207-218.
- MICHAEL, P.J., CHASÉ, R.L. y ALLAN, J.F. (1989):** Petrologic and geologic variations along the southern explorer ridge, northeast Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **94**: 895-918.
- MIDDLEMOST, E.A.K. (1975):** The basalt clan. *Earth. Sci. Rev.*, **11**: 337-364.
- MIDDLEMOST, E.A.K. (1989):** Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chem. Geol.*, **77**: 19-26.
- MOTTL M.J. (1983):** Metabasalts, axial hot springs, and the structure of hydrothermal systems at mid-ocean ridges. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **94**: 161-180.
- MUENOV, D.W., GARACIA, M.O., AGGREY, K.E., BEDNARZ, U. y SCHMINCKE, H.U. (1990):** Volatiles in submarine glasses as a discriminant of tectonic origin: application to the Troodos ophiolite. *Nature*, **343**: 159-161.
- MULLEN, E.D. (1983):** MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environment and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **62**: 52-62.
- PEARCE, J.A. (1975):** Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus. *Tectonophysics*. **25**: 41-67.
- PEARCE, J.A. (1976):** Statistical analysis of major element patterns in basalts. *J. Petrol.*, **17**: 15-43.
- PEARCE, J.A. (1982):** Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. En THORPE, R.S., Editor, *Andesites*, Wiley, New York: 525-548.
- PEARCE, J.A. (1983):** Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. En: HAWKESWORTH C.J. Y NORRY M.J. Editores, *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva, Nantwich, 230-249.
- PEARCE, J.A. y CANN, J.R. (1973):** Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**: 290-300.

- PEARCE, T.H., GORMAN, B.E. y BIRKETT, T.C. (1975):** The  $TiO_2$ - $K_2O$ - $P_2O_5$  diagram: a method of discriminating between oceanic and non-orogenic basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **24**: 419-426.
- PEARCE, J.A., ROGERS, N., TINDLE., A.J. y WATSON, J.S. (1985):** Geochemistry and petrogenesis of basalts from Deep Sea Drilling Project Leg 92, Eastern Pacific. *Init. Rep. DSDP (Deep Sea Drilling. Project)*, **92**: 435-457.
- PRICE, R.C., KENNEDY, A.K., RIGGS-SNEERINGER, M. y FREY, F.A. (1986):** Geochemistry of basalts from the Indian Ocean triple junction: implications for the generation and evolution of Indian Ocean ridge basalts. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **78**: 379-396.
- PRICE, R.C., GRAY, C.M. WILSON, R.E., FREY, F.A. y TAYLOR, S.R. (1991):** The effects of weathering on rare earth element Y and Ba abundances in Tertiary basalts from southeastern Australia: *Chem. Geol.*, **93**: 245-265.
- PRICE, R.C., GRAY, C.M. y FREY, F.A. (1997):** Stronium isotopic and trace element heterogeneity in the plains basalts of the Newer Volcanic Province, Victoria, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **61**: 171-192.
- RHODES, J.M., BLANCHARD, D.P., RODGERS, K.V., JACOBS, J.W. y BRANNON, J.C. (1976):** Petrology and chemistry of basalts from the Nazca Plate, Part 2. Major and trace element chemistry. *Init. Rep. DSDP (Deep Sea Drilling Project)*, **34**: 447-459.
- RODRÍGUEZ-G, J.F., VERMA, S.P. y VASCONCELOS-F., M. (1996):** Basaltos normativos en Hiperstena: Nuevos diagramas de discriminación para los ambientes tectónicos de arcos, rifts e islas oceánicas. *Actas INAGEQ*, **2**: 33-38.
- RODRÍGUEZ GARCÍA, J.F.(1998):** Nuevos diagramas de discriminación para los ambientes tectónicos de arcos, rifts e islas oceánicas en rocas máficas normativas en hiperstena. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra UANL. 65p.
- ROLLINSON, H.R. (1993):** Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation, discriminating between tectonic environments using geochemical data. Longman Scientific and Technical, Essex, 352p.
- SAUNDERS, A.D., ROGERS, G., MARRINER, G.F., TERRELL, D.J. y VERMA, S.P. (1987):** Geochemistry of cenozoic volcanic rocks, Baja California, Mexico: implications for the petrogenesis of post-subduction magmas. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **32**: 223-245.

- SAUNDERS, A.D., FORNARI, D.J., JORON, J.L., TARNEY, J. y TREUIL, M. (1982)** Geochemistry of basic igneous rocks, gulf of California, deep sea drilling project leg 64. *Init. Rep. DSDP (Deep Sea Drilling Project.)*, **64**: 595-642.
- SCHILLING, J.G. (1975)**: Rare-earth variation across "normal" segments of the Reykjanes Ridge, 60°-53°N, Mid-Atlantic Ridge, 29°S and East Pacific Rise, 2°-19°S and evidence on the composition of the underlying low velocity layer. *J. Geophys. Res.*, **80**: 1459-1473.
- SCHILLING, J.G., MEYER, P.S. y KINGSLEY, R.H. (1982)**: Evolution of the Iceland hotspot. *Nature*, **296**: 313-320.
- SCHILLING, J.G., ZAJAC, M., EVANS, R., JOHNSTON, T., WHITE, W., DEVINE, J.D. y KINGSLEY, R. (1983)**: Petrologic and geochemical variations along the mid-atlantic ridge from 29°N to 73°N. *Am. J. Sci.*, **283**: 510-586.
- SHERVAIS, J.W. (1982)**: Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **59**: 101-118.
- SHIBATA, T., DELONG, S.E. y LYMAN, P. (1981)**: Petrographic and chemical characteristics of abyssal tholeiites from deep sea drilling project leg 63 off Baja California. *Init. Rep. DSDP (Deep Sea Drilling Project.)*, **63**: 687-694.
- STAUDIGEL, H. y HART, S.R. (1983)**: Alteration of basaltic glass: Mechanisms and significance for the oceanic crust-seawater budget. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **47**., 337-350.
- STAUDIGEL, H., MUEHLENBACHS, K., RICHARDSON, S.H. y HART, S.R. (1981)**: Agents of low temperature ocean crust alteration. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **77**: 150-157.
- SUN, S.S., NESBITT, W.R. y SHARASKIN, A.Y (1979)**: Geochemical characteristics of mid-ocean ridge basalts. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **44**: 119-138.
- VASCONCELOS-F., M., VERMA, S.P. y RODRÍGUEZ-G, J.F. (1996)**: Basaltos normativos en nefelina: Nuevos diagramas de discriminación para los ambientes de arcos, rifts e islas oceánicas. *Actas INAGEQ*, **2**: 27-32.
- VASCONCELOS FERNÁNDEZ, J.M. (1998)**: Nuevos diagramas de discriminación para los ambientes tectónicos de arcos, rifts e islas oceánicas en rocas máficas con normatividad en nefelina. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL. 52p.
- VELASCO, F. (1996)**: Aspectos básicos del análisis químicos de materiales geológicos. Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias Químicas, UANL. 126p.

- VERMA, S.P. (1992):** Seawater alteration effects on REE, K, Rb, Cs, Sr, U, Th, Pb and Sr-Nd-Pb isotope systematics of Mid-Ocean Ridge Basalt. *Geochem. J.*, **26**: 159-177.
- VERMA, S.P. (1994):** Origen de los basaltos y las andesitas traquí-basálticas de la Sierra de Chichinautzin, Mor.-D.F.-Edo. De México. Memorias 4° Congreso Nacional de geoquímica, Jiutepec, Mor.: 5-9.
- VERMA, S.P. (1997):** Estado actual de los diagramas de clasificación magmática y de discriminación Tectonomagmática. *Actas INAGEQ*, **3**: 49-78.
- VERMA, S.P. (1999a):** Origin of evolved magmas and their relationship to subduction-unrelated mafic volcanism at the volcanic front of the central Mexican Volcanic Belt. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, (en prensa).
- VERMA, S.P. (1999b):** Geochemistry of subducting Cocos plate and the origin of subduction unrelated mafic magmas at the volcanic front of the central Mexican Volcanic Belt. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper on Cenozoic Volcanism and Tectonics of Mexico*. No. 334, Capítulo 13, (en prensa).
- VERMA, S.P. y NAVARRO-L., I. (1993):** Norma CIPW: Nuevo programa de cómputo. *Memorias III Congreso INAGEQ.*, México, D.F., 117-119.
- WEAVER, B.L., TARNEY, J. y SAUNDERS, A.D. (1983):** Geochemistry and mineralogy of basalts recovered from the central North-Atlantic. *Init. Rep. DSDP (Deep Sea Drilling Project.)*, **82**: 395-419.
- WILSON, M. (1989):** Igneous Petrogenesis. A global tectonic approach. Ed. Harper Collins Academic, London, 456p.

## Anexo 1

Parámetros estadísticos de los datos de N-MORB de la dorsal del Pacífico.

ELEMENTO	N	$\bar{x}$	s
SiO <sub>2</sub> %	34	50.40	0.60
TiO <sub>2</sub>	34	1.80	0.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34	15.00	1.50
FeO <sup>t</sup>	34	10.00	1.75
MnO	34	0.18	0.02
MgO	34	7.20	0.90
CaO	34	11.00	0.80
Na <sub>2</sub> O	34	3.00	0.25
K <sub>2</sub> O	34	0.23	0.15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34	0.20	0.10
Cr ppm	24	236.00	109.00
Ni	34	89.00	42.00
V	11	315.00	68.70
Sr	34	121.00	32.40
Nb	22	4.40	2.50
Zr	22	130.00	34.80
Y	22	38.00	9.50
La	22	4.30	1.70
Ce	22	13.60	4.20
Nd	25	10.70	3.50
Sm	25	5.70	4.70
Eu	25	2.70	3.50
Tb	13	1.10	0.30
Tm	25	0.70	0.30
Yb	25	3.80	1.00
Lu	22	0.60	0.16

Claves: N= número de datos,  $\bar{x}$ = media aritmética, s= desviación estándar

## Parámetros estadísticos de los datos de MORB-A de la Placa de Nazca.

ELEMENTO	N	$\bar{x}$	s
SiO <sub>2</sub> %	63	50.60	0.52
TiO <sub>2</sub>	63	1.60	0.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63	14.70	0.90
FeO <sup>t</sup>	63	12.00	5.00
MnO	63	4.50	7.00
MgO	63	7.10	0.90
CaO	63	11.80	1.00
Na <sub>2</sub> O	63	2.60	0.40
K <sub>2</sub> O	63	0.24	0.30
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	63	0.16	0.08
Cr ppm	61	230.00	100.00
Ni	63	91.00	29.80
V	39	336.00	60.50
Sr	63	103.30	35.00
Nb	60	4.50	5.00
Zr	63	105.00	48.30
Y	63	40.00	16.00
La	40	4.30	3.70
Ce	40	12.75	8.35
Nd	18	10.90	7.10
Sm	40	3.95	1.35
Eu	40	1.40	0.40
Tb	40	0.90	0.30
Tm	18	0.50	0.20
Yb	40	4.10	1.20
Lu	40	0.60	0.20

## Parámetros estadísticos de los datos de N-MORB de la dorsal del Atlántico.

ELEMENTO	N	$\bar{x}$	s
SiO <sub>2</sub> %	150	50.20	0.90
TiO <sub>2</sub>	150	1.28	0.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	150	15.00	0.90
FeO <sup>t</sup>	150	10.50	1.70
MnO	150	0.18	0.02
MgO	150	8.13	1.40
CaO	150	11.80	0.90
Na <sub>2</sub> O	150	2.24	0.36
K <sub>2</sub> O	150	0.22	0.22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	150	0.15	0.09
Cr ppm	131	350.00	200.00
Ni	123	120.00	130.00
Ti	150	7700.00	2100.00
La	148	6.00	6.00
Ce	52	14.00	11.00
Nd	56	9.00	5.00

## Parámetros estadísticos de los datos de MORB-A del flanco oeste de la dorsal del Atlántico.

ELEMENTO	N	$\bar{x}$	s
SiO <sub>2</sub> %	53	50.40	0.78
TiO <sub>2</sub>	53	1.30	0.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	53	15.60	0.82
FeO <sup>t</sup>	53	9.40	1.46
MnO	53	0.16	0.01
MgO	53	8.05	1.02
CaO	53	11.90	0.70
Na <sub>2</sub> O	53	2.48	0.25
K <sub>2</sub> O	53	0.35	0.11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	52	0.16	0.06
Cr ppm	53	340.00	127.49
Ni	53	136.00	51.26
Ti	53	8000.00	3041.55
La	49	6.40	4.45
Ce	52	16.05	9.83
Nd	53	10.40	4.66



