



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA  
(CIE-UNAM)**

**SOFTWARE PARA LA APLICACIÓN DE DIAGRAMAS DE  
DISCRIMINACIÓN TECTONOMAGMÁTICA A CAMPOS  
GEOTÉRMICOS**

***T E S I S***

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN INGENIERÍA**

**ENERGÍA – FUENTES RENOVABLES (GEOTERMIA)**

**P R E S E N T A:**

**Ing. María Abdelaly Rivera Gómez**

***DIRECTOR DE TESIS:***

**Dr. Surendra Pal Verma Jaiswal**

***Temixco, Morelos.***

**2010**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## ***JURADO ASIGNADO***

- PRESIDENTE:*** Dr. Ignacio Salvador Torres Alvarado.
- SECRETARIO:*** Dr. Surendra Pal Verma Jaiswal.
- VOCAL:*** Dr. Jorge Alberto Andaverde Arredondo.
- 1<sup>er</sup> SUPLENTE:*** Dr. Pandarinath Kailasa.
- 2<sup>do</sup> SUPLENTE:*** Dr. John S. Armstrong-Altrin.

Lugar en donde se realizó la tesis:

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Director de tesis:

**Dr. Surendra Pal Verma Jaiswal**

---

Firma

## **Dedicatoria**

*A Dios, a mi esposo y a nuestra familia.*

## AGRADECIMIENTOS

Al CIE-UNAM por todo el apoyo brindado. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca académica otorgada, que permitió la realización del presente trabajo de tesis.

A mi asesor el **Dr. Surendra Pal verma**, porque ha sido para mí un gran maestro, una persona con mucha experiencia, gracias por todo su apoyo, su comprensión, regaños, y sus consejos.

Al **Ing. Alfredo Quiroz Ruiz**, por el gran apoyo técnico y la asesoría en programación que me brindó.

Al comité revisor: Dr. Jorge A. Andaverde Arredondo, Dr. Ignacio S. Torres Alvarado, Dr. Pandarinath Kailasa, Dr. John S. Armstrong Altrin, Por todas sus observaciones y sugerencias.

A mi mamá, gracias por darme la vida, por tus consejos, por ser quien eres una excelente persona, mujer, profesionista, un excelente ser humano, pero sobre todo una excelente mamá, te amo.

A mi papá, gracias por todos los momentos inolvidables que he pasado a tu lado, te amo.

A Don Alfredo, gracias por los momentos que compartimos y por haberlo conocido, lo llevaremos siempre en nuestros corazones.

A Doña Consuelo, por cuidarme tanto, por consentirme tanto, por preocuparse por mí, por todo su cariño y comprensión.

A mi esposo, porque sin él nada sería posible, gracias por toda tu comprensión, por todo tu tiempo, tus consejos y por toda la paciencia que siempre me tienes.

A Rafael Quiroz, por apoyarnos siempre y ser tan buena persona con nosotros, te quiero mucho.

A mis amigas, Maira y Rocío, gracias por su gran apoyo y su gran amistad.

A mi amiga Iris, porque gracias a Dios que puso a una persona como tú en mi camino, gracias porque nunca olvidaré que me apoyaste y me brindaste tu amistad en un momento muy triste y difícil en mi vida.

A mi amiga Christian, gracias por confiar, creer en mí y tomar en cuenta mi opinión, gracias Christian.

# ÍNDICE

Capítulo 1 GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 OBJETIVOS PARTICULARES	2
1.4 JUSTIFICACIÓN	2
1.5 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DEL PROGRAMA TecD	3
1.5.1 Requerimientos de Software	3
1.5.2 Requerimientos de Hardware	3
1.5.3 Tiempo requerido para el procesamiento	3
1.5.3.1 Tiempo de validación de archivos de Excel	4
1.5.3.2 Tiempo de validación de archivos de Statistica	6
1.5.3.3 Tiempo de procesamiento de archivos de Excel	7
1.5.3.4 Tiempo de procesamiento de archivos de Statistica	8
1.5.4 Limitaciones de procesamiento	9
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	10
2.1 TECTÓNICA DE PLACAS	10
2.2 AMBIENTES TECTÓNICOS PRINCIPALES	11
2.2.1 Arcos de isla: island arc (IA)	11
2.2.1.1 Principales zonas de subducción en el mundo	12
2.2.1.2 Modelo petrogénico	12
2.2.1.3 Estructura térmica y procesos de fusión parcial.	13
2.2.1.4 Cámaras magmáticas.	13
2.2.2 Rift Continental: continental rift (CR)	13
2.2.2.1 Mecanismo de formación	14
2.2.3 Islas Oceánicas: ocean-island (OI)	16
2.2.3.1 Puntos Calientes (hot spot)	17
2.2.3.2 Principales localidades de Hot Spot	18
2.2.4 Cordilleras Oceanicas: mid-ocean ridge (MOR)	18
2.2.4.1 Principales localidades de MOR	19
2.2.4.2 Mecanismo de formación	19
2.2.4.3 Modelo petrogénico	20
2.3 DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN	21
2.3.1 Discriminant Analysis Applied to Establish Major-Element Field Boundaries for Tectonic Varieties of Basic Rocks ( Agrawal et al., 2004)	23
2.3.1.1 Diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB)m1	23
2.3.1.2 Diagrama (IAB-CRB-OIB)m1	25
2.3.1.3 Diagrama (IAB-CRB-MORB)m1	26
2.3.1.4 Diagrama(IAB-OIB-MORB)m1	27
2.3.1.5 Diagrama(CRB-OIB-MORB)m1	28
2.3.2 Discriminating four tectonic settings: Five new geochemical diagrams for basic and ultrabasic volcanic rocks based on log-ratio transformation Of major-element data (Verma et al., 2006)	29
2.3.2.1 Diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB)m2	29
2.3.2.2 Diagrama (IAB-CRB-OIB)m2	30
2.3.2.3 Diagrama (IAB-CRB-MORB)m2	31
2.3.2.4 Diagrama (IAB-OIB-MORB)m2	32
2.3.2.5 Diagrama (CRB-OIB-MORB)m2	33
2.3.3 Tectonic Discrimination of Basic and Ultrabasic Volcanic Rocks Through Log-Transformed Ratios of Immobile Trace Elements (Agrawal et al., 2008)	34

2.3.3.1 Diagrama (IAB-CRB+OIB-MORB)t1	35
2.3.3.2 Diagrama (IAB-CRB-OIB)t1	36
2.3.3.3 Diagrama (IAB-CRB-MORB)t1	37
2.3.3.4 Diagrama (IAB-OIB-MORB)t1	38
2.3.3.5 Diagrama (ICRB-OIB-MORB)t1	39
2.4 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN VB.NET	40
Capítulo 3 ESTADO DEL ARTE EN PROGRAMAS COMO HERRAMIENTAS DE GRAFICACIÓN GEOQUÍMICA QUE CONTENGAN DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN TECTONOMAGMÁTICA	41
3.1 IgPet	41
3.2 Newpet	41
3.3 Minpet	41
3.4 GCDKit	41
3.5 Petrograph	42
3.6 Geoplot	42
Capítulo 4 TecD SOFTWARE PARA LA APLICACIÓN DE DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN TECTONOMAGMÁTICA	43
4.1 ESTRUCTURA DEL SOFTWARE	43
4.1.1 Diagrama básico	43
4.1.2 Entrada de datos	44
4.1.3 Procesamiento	45
4.1.4 Salida de datos	52
4.2 FUNCIONAMIENTO LÓGICO DEL SOFTWARE	53
4.3 ESTRUCTURA DE LA INTERFACE DE USUARIO	54
4.3.1 Barra de menú	55
4.3.1 Barra de iconos	56
4.4 VALIDACION DEL SOFTWARE TecD	56
4.4.1 Validación de ecuaciones	56
4.4.2 Validación de diagramas	58
4.4.3 Validación del ambiente resultante de TecD	58
4.4.4 Validación del archivo de reporte	59
Capítulo 5 APLICACIÓN DEL SOFTWARE A CAMPOS GEOTERMICOS	60
5.1 CASO DE ESTUDIO I: CAMPO GEOTÉRMICO DE PALINPINON, LA ISLA DE NEGROS, FILIPINAS	60
5.1.1 Campo geotérmico de Palinpinon, La isla de negros Filipinas	60
5.1.2 Entrada de datos	61
5.1.3 Procesamiento de los datos	61
5.1.4 Análisis de los resultados	74
5.1.5 Conclusiones	76
5.2 CASO DE ESTUDIO II: CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN, EL SALVADOR	77
5.2.1 Campo geotérmico de Berlín, El salvador	77
5.2.2 Entrada de datos	79
5.2.3 Procesamiento de datos	79
5.2.4 Análisis de los resultados	83
5.1.5 Conclusiones	83
Capítulo 6 CONCLUSIONES	84
TRABAJOS FUTUROS	85
REFERENCIAS	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 n=Número de muestra del archivo, Tiempo_1, Tiempo_2, Tiempo_3=Tiempo en segundos, x=Media, S=Desviación estándar.	4
Tabla 1.2 n=Número de muestra del archivo, Tiempo_1, Tiempo_2, Tiempo_3=Tiempo en segundos, x=Media, S=Desviación estándar.	6
Tabla 1.3 n=Número de muestra del archivo, Tiempo_1, Tiempo_2, Tiempo_3=Tiempo en segundos, x=Media, S=Desviación estándar.	7
Tabla 1.4 n=Número de muestra del archivo, Tiempo_1, Tiempo_2, Tiempo_3=Tiempo en segundos, x=Media, S=Desviación estándar.	8
Tabla 2.1 Combinación de diagramas recomendados por (Verma, 2010).	23
Tabla 4.1 Descripción de las variables del archivo de entrada y salida de TecD.	44
Tabla 4.2 Descripción de los nombres de los campos en donde TecD almacena el resultado del procesamiento.	46
Tabla 4.3 Descripción de los nombres de los campos en donde TecD almacena el nombre del ambiente resultante del procesamiento.	47
Tabla 4.4 Validación de ecuaciones TecD.	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Gráfica de dispersión y tendencia de los tiempos de validación de archivos de Excel.	5
Fig. 1.2 Tiempo de validación para 10,000 muestras.	5
Fig. 1.3 Gráfica de dispersión y tendencia de los tiempos de validación de archivos de Statistica.	6
Fig. 1.4 Gráfica de dispersión y tendencia de los tiempos de procesamientos de archivos de Excel.	8
Fig. 1.5 Gráfica de dispersión y tendencia de los tiempos de procesamientos de archivos de Statistica.	9
Fig. 2.1 Mapa de principales placas tectónicas en el mundo,( Wikipedia, 2010).	10
Fig. 2.2 proceso de subducción de placas (Wikipedia, 2009).	11
Fig. 2.3 Principales zonas de subducción en el mundo.	12
Fig. 2.4 Modelo petrogénico del proceso de subducción, (Wilson, 1989).	12
Fig. 2.5 Proceso de formación de Rift. (Fernández, 2009).	13
Fig. 2.6 Mecanismo de Formación de un Rift. (Wilson, 1989).	14
Fig. 2.7 Ejemplo de una zona de Rift. (Fernández, 2009).	15
Fig. 2.8 Ejemplo de Islas oceánicas. (NASA, 2003).	16
Fig. 2.9 Formación de plumas calientes. (Aznar, 2010).	17
Fig. 2.10 Principales localidades de Hot spot. (Wikipedia, 2010).	18
Fig. 2.11 Principales localidades de MOR. (Wilson, 1989).	19
Fig. 2.12 Mecanismo de formación MOR, (Wilson, 1989).	20
Fig. 2.13 Diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB) m1 (Agrawal et al., 2004).	24
Fig. 2.14 Diagrama (IAB-CRB-OIB)m1 (Agrawal et al., 2004).	25
Fig. 2.15 Diagrama (IAB-CRB-MORB)m1 (Agrawal et al., 2004).	26
Fig. 2.16 Diagrama (IAB-OIB-MORB) m1 (Agrawal et al., 2004).	27
Fig. 2.17 Diagrama (CRB-OIB-MORB) m1 (Agrawal et al., 2004).	28
Fig. 2.18 (IAB-CRB-OIB-MORB) m2 (Verma et al., 2006).	30
Fig. 2.19 (IAB-CRB-OIB) m2 (Verma et al., 2006).	31
Fig. 2.20 (IAB-CRB-MORB) m2 (Verma et al., 2006).	32
Fig. 2.21 (IAB-OIB-MORB) m2 (Verma et al., 2006).	33
Fig. 2.22 (CRB-OIB-MORB) m2 (Verma et al., 2006).	34
Fig. 2.23 (IAB-CRB+OIB-MORB) t1 (Agrawal et al., 2008).	35
Fig. 2.24 (IAB-CRB-OIB) t1 (Agrawal et al., 2008).	36
Fig. 2.25 (IAB-CRB -MORB) t1 (Agrawal et al., 2008).	37
Fig. 2.26 (IAB- OIB-MORB) t1 (Agrawal et al., 2008).	38
Fig. 2.27 (CRB-OIB-MORB) t1 (Agrawal et al., 2008).	39
Fig.4.1 Diagrama básico de la estructura del software.	43



Fig. 4.2 Diagrama básico del procesamiento.	48
Fig. 4.3 Lista de columnas faltantes en el archivo de entrada de TecD.	49
Fig. 4.4 Forma de acceso a la información de errores que detectó TecD.	50
Fig. 4.5 Sub-tabla que contiene información de los errores que TecD detectó en el archivo de entrada.	50
Fig. 4.6 Estructura general del proceso de validación del archivo.	51
Fig. 4.7 Estructura general del procesamiento del archivo.	51
Fig. 4.8 Diagrama de flujo del programa.	53
Fig. 4.9 Pantalla principal del programa TecD.	54
Fig. 4.10 Barra de menú de TecD.	55
Fig. 4.11 Estructura de la barra de menú.	55
Fig. 4.12 Barra de iconos de la pantalla principal	56
Fig. 4.13 Ejemplo de las funciones programadas en Statistica.	56
Fig. 4.14 Ejemplo de comparación de diagramas	58
Fig. 4.15 Ejemplo de validación de nombre con respecto a la posición del punto en el diagrama.	59
Fig. 5.1 Mapa de localización de Filipinas	60
Fig. 5.2 Capacidad geotermoeléctrica instalada en cada país (Gutiérrez, 2010)	61
Fig. 5.3 Pantalla de bienvenida TecD.	61
Fig. 5.4 Barra de menú en idioma Inglés.	62
Fig. 5.5 Submenú de la barra menú para cambiar las opciones de SIO2ADJ.	62
Fig. 5.6 Submenú de la barra menú para cambiar las opciones de TecD.	62
Fig. 5.7 Archivo→Abrir archivo desde la barra de menú.	63
Fig. 5.8 Abrir archivo desde la barra de íconos.	63
Fig. 5.9 Ventana de verificación del menú OPCIONES y TecD.	63
Fig. 5.10 Ventana de recomendación para revisar en un menú OPCIONES y TecD.	64
Fig. 5.11 Ventana después de dar clic en el botón “Sí” de la ventana mostrada en la Fig. 5.9.	64
Fig. 5.12 Cuadro de diálogo al abrir archivo.	65
Fig. 5.13 Barra de progreso de apertura del archivo de entrada.	65
Fig. 5.14 Tabla con registros de archivo.	66
Fig. 5.15 Acceso a la Sub-tabla de detalle de errores.	66
Fig. 5.16 Descripción de errores en el registro número1 del archivo de entrada.	67
Fig. 5.17 Sub-tabla de detalle de errores.	67
Fig. 5.18 Botón para procesar el archivo.	67
Fig. 5.19 Ventana para guardar archivo procesado.	68
Fig. 5.20 Cuadro de diálogo para guardar archivo en ubicación específica.	68
Fig. 5.21 Ventana para generación de reportes.	69
Fig. 5.22 Cuadro de diálogo guardar archivo.	69
Fig. 5.23 Menú gráficas.	69
Fig. 5.24 Ventana para guardar gráficas.	70
Fig. 5.25 Cuadro de dialogo para crear y guardar gráficas en una carpeta específica.	70
Fig. 5.26 Opción ventanas de la barra de menú.	70
Fig. 5.27 Utilización de la opción para acomodar las ventanas en la pantalla.	71
Fig. 5.28 Diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB) propuestas 2004 y 2006.	71
Fig. 5.29 Diagrama (IAB-CRB-OIB) propuestas 2004 y 2006.	72
Fig. 5.30 Diagrama (IAB-CRB-MORB) propuestas 2004 y 2006.	72
Fig. 5.31 Diagrama (IAB-OIB-MORB) propuestas 2004 y 2006.	73
Fig. 5.32 Diagrama (CRB-OIB-MORB) propuestas 2004 y 2006.	73
Fig. 5.33 Archivo de resultados del procesamiento con TecD.	74
Fig. 5.34 Reporte que genera TecD después del procesamiento de los datos	74
Fig. 5.35 Menú opciones para modificar SIO2ADJ a cualquier valor.	75
Fig. 5.36 Archivo de reporte con 31 muestras procesadas.	76
Fig. 5.37 Mapa de localización de El Salvador. (ICC, 2010).	77
Fig. 5.38 Capacidad geotermoeléctrica instalada en cada país (Gutierrez, 2010).	78
Fig. 5.39 Mapa de localización del campo geotérmico de Berlín.	78
Fig. 5.40 Tabla con registros de archivo de datos de entrada “Berlín, el Salvador”.	79

Fig. 5.41 Sub-tabla de detalle de errores del registro número 14.	80
Fig. 5.42 Resultados en el diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB) de las propuestas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008).	80
Fig. 5.43 Resultados en el diagrama (IAB-CRB-MORB) de las propuestas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008).	81
Fig. 5.44 Resultados en el diagrama (IAB-CRB-MORB) de las propuestas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008).	81
Fig. 5.45 Resultados en el diagrama (IAB-OIB-MORB) de las propuestas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008).	82
Fig. 5.46 Resultados en el diagrama (CRB-OIB-MORB) de las propuestas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008).	82
Fig. 5.47 Reporte de resultados del campo geotérmico Berlín, El Salvador.	83

## Capítulo 1

## GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Durante la exploración y explotación de un campo geotérmico se realizan diversos estudios y análisis de la geología del lugar. Una de las finalidades es poder conocer la tectónica dominante que dio origen a los magmas y a la fuente de calor. Para ello, se han utilizado herramientas como la aplicación del método estadístico de análisis discriminante aplicado a la tectónica de placas, en los llamados diagramas de discriminación tectonomagmática. Estos diagramas sirven para conocer los ambientes tectónicos regionales, bajo los cuales fueron generados los magmas en estos campos.

Desde que Pearce y Cann (1971, 1973) descubrieron que los magmas de diferentes entornos tectónicos podían ser distinguibles por su composición química, se han propuesto una gran cantidad de diagramas de discriminación tectonomagmática.

En el trabajo ***“Statistical Evaluation of Bivariate, Ternary and Discriminant Function Tectonomagmatic Discrimination Diagrams”*** por (Verma, 2010), se evaluaron un total de 28 diagramas de discriminación tectonomagmática mediante la utilización de herramientas y metodologías estadísticas para el cálculo de las tasas de éxito. Utilizando extensas bases de datos geoquímicos de rocas del Mioceno al reciente, con muestras de zonas con un ambiente tectónico conocido y no controversial, en ese trabajo se concluye que sólo los diagramas de discriminación propuestos en (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008), pueden ser recomendados para usarse en trabajos futuros, esto debido a que la mayoría de los diagramas ampliamente utilizados, bivariados, ternarios y de discriminación tectonomagmática, no son muy exitosos en la distinción de ambientes tectonomagmáticos.

Actualmente, existe una gran variedad de programas que son utilizados para identificar ambientes tectonomagmáticos, sin embargo, estos no contemplan los diagramas recomendados por (Verma, 2010).

Por lo que en este trabajo, el software que se realizó para la aplicación de diagramas de discriminación tectonomagmática, se encuentra basado en los diagramas, (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006) y (Agrawal et al., 2008), recomendados por (Verma, 2010), debido a que demostraron tener éxito en la distinción de ambientes tectonomagmáticos.

## **1.2. OBJETIVO**

Realizar el software (programa computacional) denominado **TecD** (Tectonomagmatic Discrimination) que genere diagramas de discriminación tectonomagmática, grafique e identifique cuatro ambientes tectónicos y realice un análisis resumido de los resultados obtenidos, para su aplicación a campos geotérmicos y áreas volcánicas.

## **1.3. OBJETIVOS PARTICULARES**

- Realizar una plantilla en los formatos Excel (\*.xls; \*.xlsx) y Statistica (\*.sta) para la representación de datos con los que se alimentará el programa.
- Realizar un programa que adquiera datos de una plantilla en Excel (\*.xls; \*.xlsx) y Statistica (\*.sta).
- Que el programa mediante ciertos parámetros químicos grafique e identifique el tipo de ambiente tectónico al que pertenecen las muestras de datos de rocas contenidas en un archivo Excel o Statistica.
- Que el programa genere reportes en los formatos Excel o Statistica.
- Que el programa genere gráficas en pantalla y archivo.
- Realizar la validación del programa mediante la aplicación a un campo geotérmico, con respecto a la información reportada en la bibliografía.
- Realizar el análisis de la información.

## **1.4. JUSTIFICACIÓN**

Una de las tareas del análisis geotérmico es conocer la tectónica dominante que dio origen a los magmas y a la fuente de calor. Por lo que se realizó un software para la discriminación de ambientes tectonomagmáticos y su aplicación a campos geotérmicos, el cual se encuentra basado en los trabajos recomendados por (Verma, 2010), los cuales contienen una gran cantidad de ecuaciones para su uso y éstos aún no se encuentran programados.

## **1.5. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS DEL PROGRAMA TecD.**

### **1.5.1. Requerimientos de software.**

El software TecD necesita las siguientes aplicaciones instaladas en la computadora, para su funcionamiento.

- *Microsoft Windows XP, Windows Vista o Windows 7.*
- *Framework 1.1*
- *Microsoft Excel (\*.xls, \*.xlsx)*
- *Statistica (\*.sta)*
- *SINCLAS (Verma et al., 2002).*

Para la utilización de elementos mayores TecD necesita que el archivo se encuentre previamente procesado por SINCLAS, (Verma et al., 2002).

### **1.5.2. Requerimientos de Hardware.**

Los requerimientos mínimos de hardware de TecD son:

- *Procesador 300 MHz (recomendado de 500 MHz o superior) Intel Pentium/Celeron o AMD K6 / Athlon / Duron o compatible.*
- *256 MB de RAM o más.*
- *Adaptador de vídeo Super VGA (800 × 600) o de mayor resolución*

### **1.5.3. Tiempo requerido para el procesamiento.**

El tiempo de procesamiento del programa TecD depende de las características de la computadora. Por lo tanto, para la estimación de tiempos de procesamiento del programa TecD se realizaron diversas pruebas en una computadora con las siguientes características:

- *Procesador: Intel Core 2 Duo T660 2.2GHz.*
- *Memoria RAM: 6.0G.*
- *Sistema operativo: Windows 7, de 64 bits.*

Las pruebas de procesamiento del programa TecD se realizaron variando la cantidad de muestras del archivo de entrada y tomando el tiempo en que tarda en realizar el proceso de **validación del archivo** y el tiempo que se tarda en realizar el **procesamiento del archivo** en cada uno de los archivos con diferentes números de muestras.

Las mediciones de tiempo de procesamiento se realizaron mediante un cronómetro programado dentro del código de TecD, para así asegurar el momento en que inicia el procesamiento y su terminación, se realizaron 3 repeticiones por cada número de muestras por archivo.

La velocidad de acceso a los procesos depende de la aplicación que se utilice, por lo que las pruebas se realizaron con archivos de Excel y Statistica.

### 1.5.3.1. Tiempo de validación de archivos de Excel.

<i>Validación del archivo</i>					
<i>N</i>	<i>Tiempo_1</i>	<i>Tiempo_2</i>	<i>Tiempo_3</i>	<i>x</i>	<i>S</i>
10	1	1	1	1	0
20	1	1	1	1	0
30	2	2	2	2	0
40	2	2	2	2	0
50	2	2	2	2	0
60	2	2	3	2.3	0.6
70	3	2	3	2.7	0.6
80	3	3	2	2.7	0.6
90	3	3	4	3.3	0.6
100	3	4	3	3.3	0.6
200	5	6	5	5.3	0.6
300	8	8	8	8	0
400	11	11	10	10.7	0.6
500	14	13	13	13.3	0.6
600	15	16	16	15.7	0.6
700	18	18	18	18	0
800	21	20	20	20.3	0.6
900	24	23	22	23	1
1000	26	25	26	25.7	0.6

*Tabla 1.1 n=Número de muestras del archivo, Tiempo\_1, Tiempo\_2, Tiempo\_3=Tiempo en segundos, x=Media, S=Desviación estándar.*

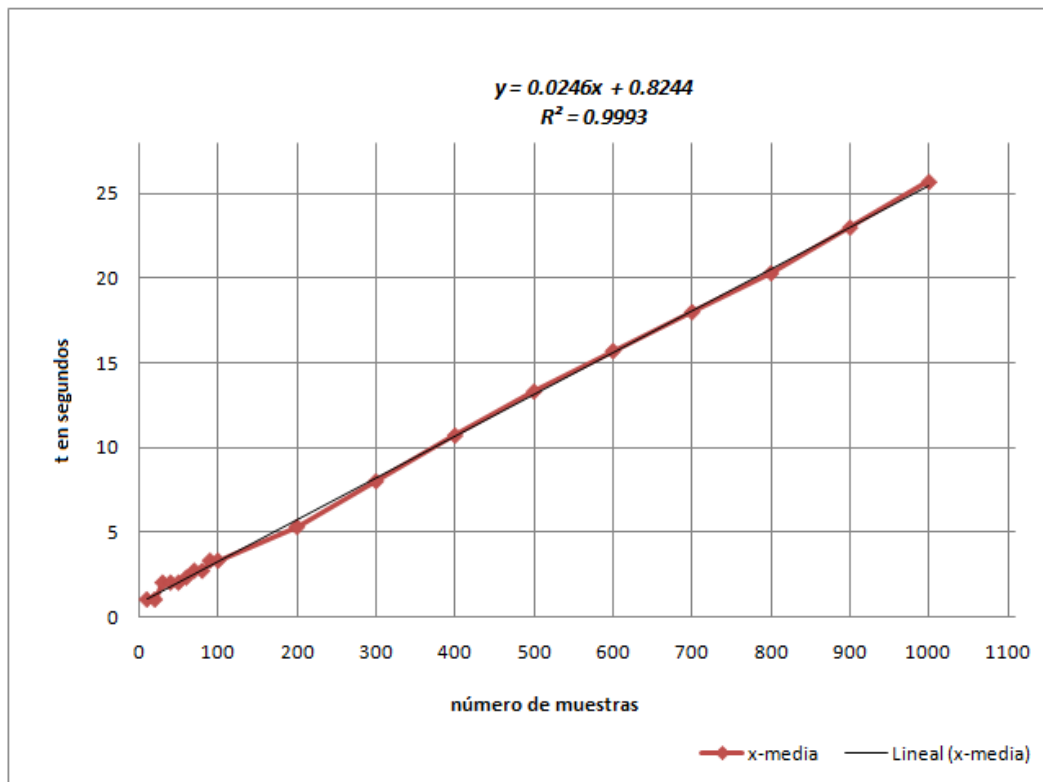


Fig. 1.1 Gráfica de dispersión y tendencia de los tiempos de validación de archivos Excel.

Como podemos observar en la Fig.1.1, el comportamiento del tiempo de procesamiento de los datos es lineal por lo que si quisiéramos saber el tiempo que tardaría el programa en procesar la validación de 10,000 muestras estaría dado por la ecuación:

$$y = 0.0246 (10,000) + 0.8244 = 246.8s$$

En donde “y” es el tiempo en segundos, que son aproximadamente 4.11 minutos.

Se realizó una prueba con un archivo de 10,000 muestras, el tiempo fue de 255s o 4.25 minutos.

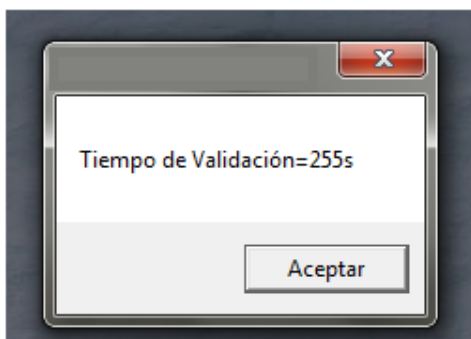


Fig. 1. 2 Tiempo de validación para 10,000 muestras.

1.5.3.2. Tiempo de validación de archivos de Statistica

Validación del archivo

N	Tiempo_1	Tiempo_2	Tiempo_3	x	S
10	2	2	2	2	0
50	7	6	7	6.7	0.6
100	11	11	11	11	0
500	58	58	58	58	0
1000	108	109	109	108.7	0.6
5000	591	592	591	591.3	0.6

Tabla 1. 2 n=Número de muestras del archivo, Tiempo\_1, Tiempo\_2, Tiempo\_3=Tiempo en segundos, x=Media, S=Desviación estándar.

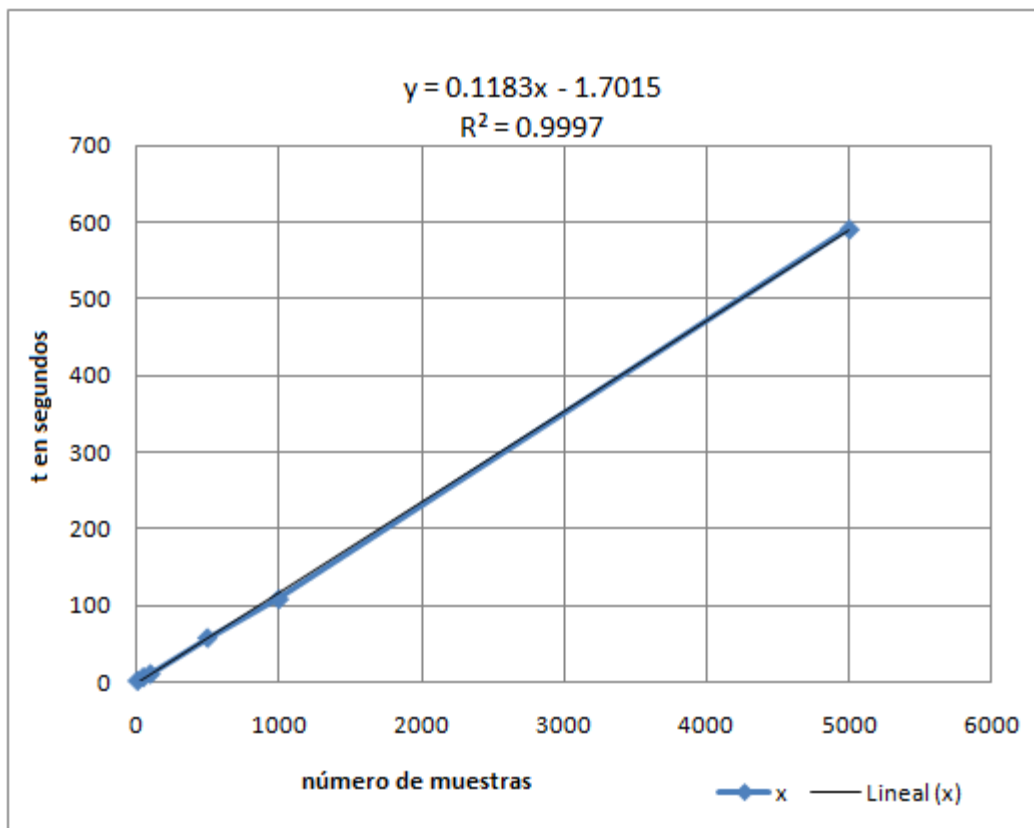


Fig. 1. 3 Gráfica de dispersión y tendencia de los tiempos de validación de archivos Statistica.



**1.5.3.3. Tiempo de procesamiento de archivos de Excel.**

Para la estimación de tiempos de procesamiento se realizó el mismo procedimiento que para estimar los tiempos de validación, los resultados se muestran en la tabla 1.3.

**Procesamiento del archivo**

<b>N</b>	<b>Tiempo_1</b>	<b>Tiempo_2</b>	<b>Tiempo_3</b>	<b>x</b>	<b>S</b>
10	1	1	1	1	0
20	1	1	1	1	0
30	2	2	2	2	0
40	3	3	3	3	0
50	3	4	3	3.3	0.6
60	3	4	4	3.7	0.6
70	4	5	4	4.3	0.6
80	5	5	5	5	0
90	5	5	6	5.3	0.6
100	6	6	6	6	0
200	12	11	11	11.3	0.6
300	17	17	17	17	0
400	23	23	23	23	0
500	28	28	28	28	0
600	33	34	34	33.7	0.6
700	39	38	40	39	1
800	47	46	46	46.3	0.6
900	54	51	51	52	1.7
1000	56	55	57	56	1

**Tabla 1. 3** n=Número de muestras del archivo, Tiempo\_1, Tiempo\_2, Tiempo\_3=Tiempo en segundos, x=Media, S=Desviación estándar.

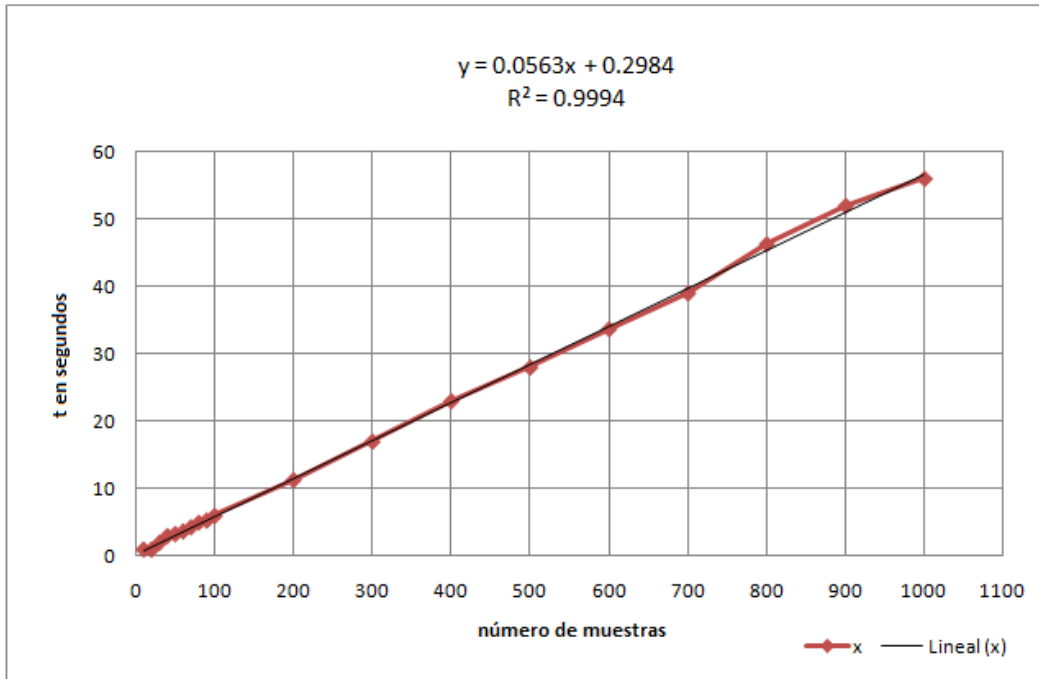


Fig. 1. 4 Gráfica de dispersión y tendencia de los tiempos de procesamiento de archivos Excel.

De la Fig.1.4, podríamos estimar el tiempo que tardaría el programa en procesar un archivo con 10,000 muestras mediante la ecuación:

$$y=0.05663 (10,000) + 0.2984 =563.3s$$

En donde “y” es el tiempo en segundos, que son aproximadamente 9.39 minutos.

#### 1.5.3.4. Tiempo de procesamiento de un archivo de Statistica.

Validación del archivo

n	Tiempo_1	Tiempo_2	Tiempo_3	x	S
10	3	2	3	2.7	0.6
50	10	10	10	10	0
100	18	18	18	18	0
500	90	90	90	90	0
1000	179	178	179	178.7	0.6
5000	1003	1004	1003	1003.3	0.6

Tabla 1. 4 n=Número de muestras del archivo, Tiempo\_1, Tiempo\_2, Tiempo\_3=Tiempo en segundos, x=Media, S=Desviación estándar.

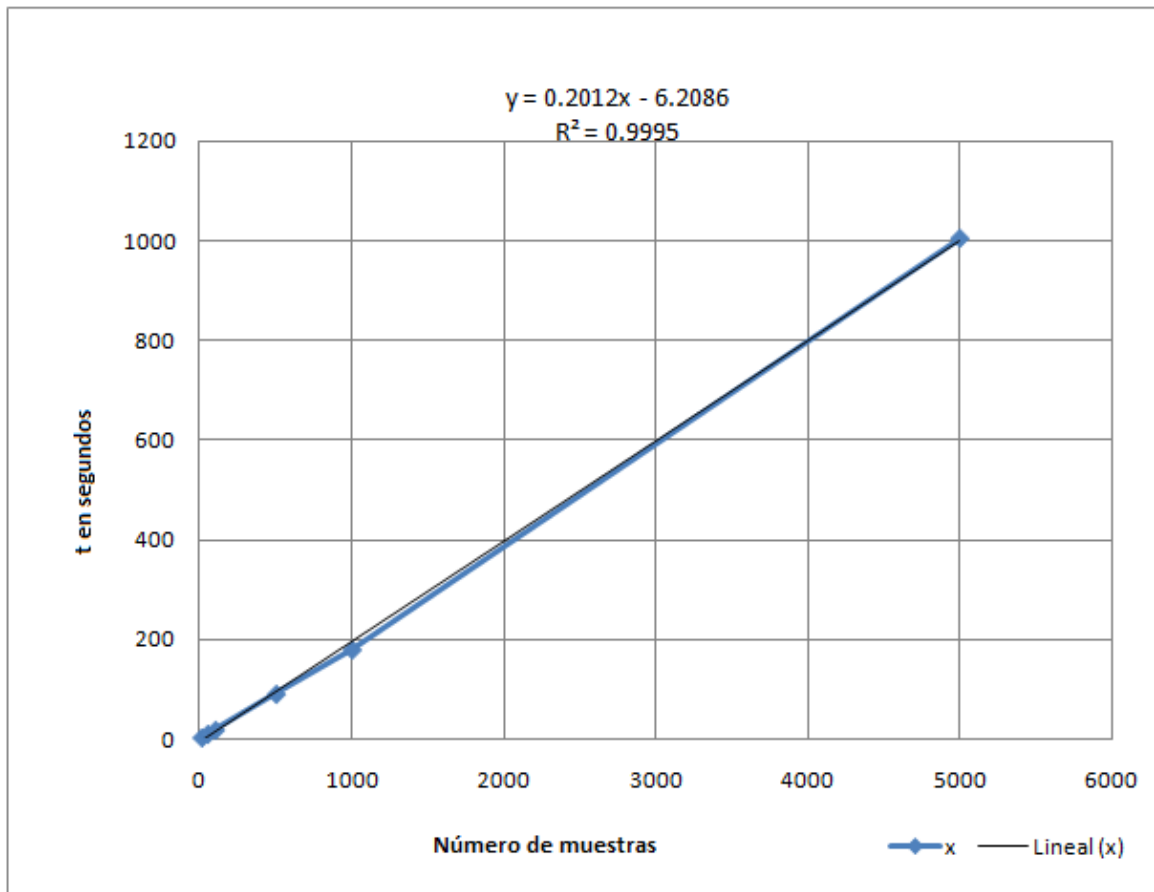


Fig. 1. 5 Gráfica de dispersión y tendencia de los tiempos de procesamiento de archivos Statistica.

#### 1.5.4. Limitaciones de procesamiento.

La cantidad de muestras que el programa TecD puede procesar es proporcional a las características de su equipo, espacio en disco duro, velocidad de procesamiento y memoria RAM.

## Capítulo 2

## MARCO TEÓRICO

### 2.1. TECTÓNICA DE PLACAS

La teoría de tectónica de placas explica el movimiento de la rígida capa externa de la Tierra llamada litósfera, la cual se encuentra formada por placas que encajan entre sí como un rompecabezas (Wegener, 1966).

A las zonas de separación, colisión o deslizamiento de las placas litosféricas se les denomina límites de placa. Estas placas están hechas de rocas pero la roca es, por lo general, muy liviana en comparación con el denso fluido que tiene debajo. Esto permite que las placas "floten" sobre el material más denso (Randy, 2010).

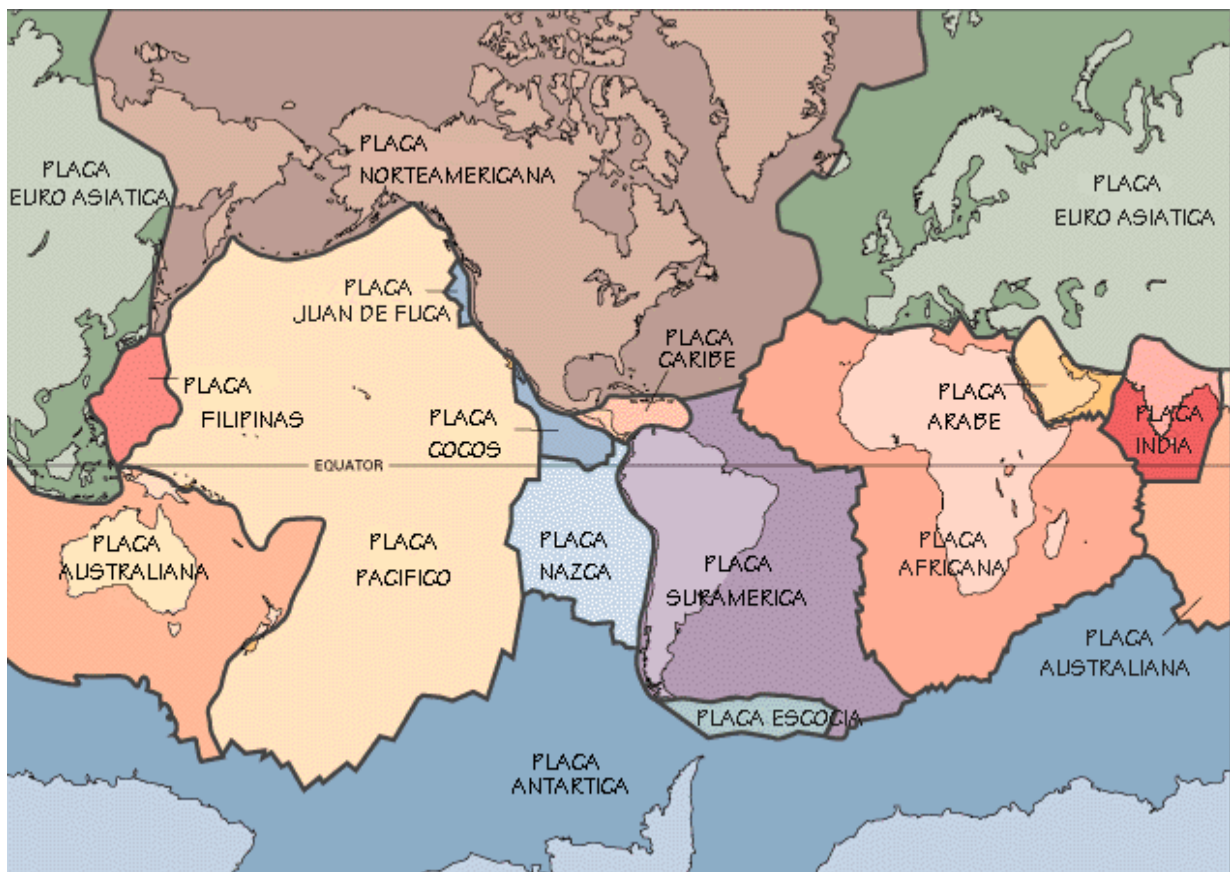


Fig. 2. 1 Mapa de principales placas tectónicas en el mundo (Wikipedia, 2010).

Los movimientos de convección que ocurren muy dentro de la Tierra llevan calor desde el interior hasta la superficie, esto hace que las placas se muevan muy lentamente a lo largo de la superficie, a un ritmo de 5 a 10 cm por año (Randy, 2010).

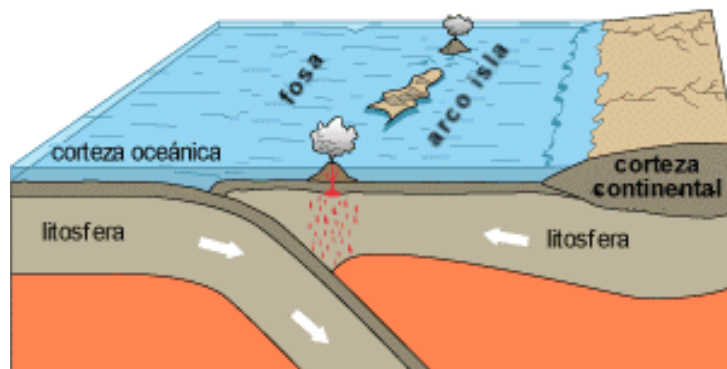
Debido a los posibles movimientos relativos entre dos placas, los límites o bordes de las placas se clasifican en:

- Límites divergentes o zonas de dorsal o límites constructivos
- Límites convergentes o zonas de subducción o límites destructivos
- Límites transcurrentes o fallas transformantes.

## 2.2. AMBIENTES TECTÓNICOS PRINCIPALES

### 2.2.1. Arcos de isla: island arc (IA)

Los arcos de islas oceánicas representan los sitios de subducción de una placa oceánica debajo de otra. Sus rasgos característicos son cadenas lineares o curvas de islas formando el frente volcánico, a veces rodeado por cuencas marginales formadas por procesos de extensión del piso oceánico detrás del arco (Wilson, 1989).



*Fig. 2. 2 proceso de subducción de placas Wikipedia (2009)*

### 2.2.1.1. Principales zonas de subducción en el mundo

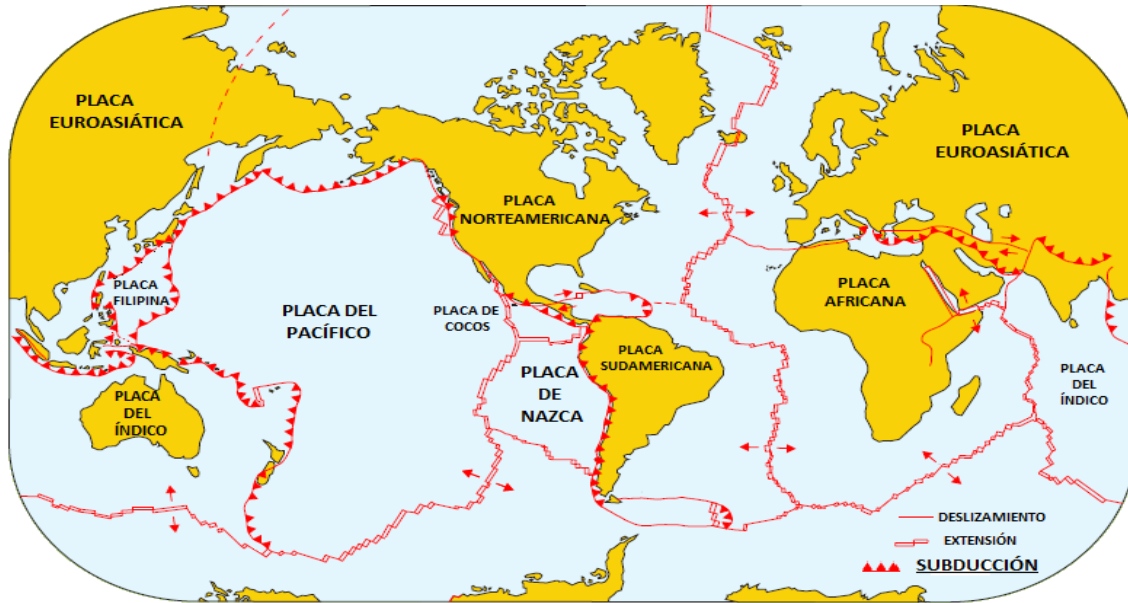


Fig. 2. 3 Principales zonas de subducción en el mundo (IGN, 2010).

### 2.2.1.2. Modelo petrogénico.

Los arcos de islas oceánicas representan los productos del tipo menos complicado de magmatismo relacionado con la subducción, específicamente uno en el que cuando el magma asciende la contaminación por materiales de la corteza continental es despreciada (Wilson, 1989).

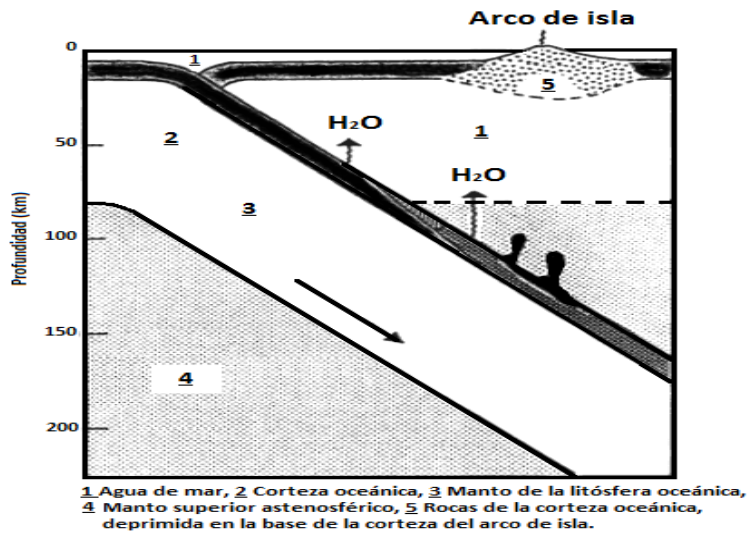


Fig. 2.4 Modelo petrogénico del proceso de subducción, Wilson (1989).

### 2.2.1.3. Estructura térmica y procesos de fusión parcial

La distribución de temperaturas en la placa en subducción y en la capa de manto es uno de los factores decisivos que controlan el comienzo de la fusión parcial. La generación de magma comienza en esos sitios donde la temperatura comienza a fundir los materiales presentes. La fusión parcial de cualquiera de los materiales puede ocurrir en la zona de subducción con las condiciones adecuadas (Wilson, 1989).

En la corteza oceánica subducida, la mineralogía de las rocas básicas (basalto, dolerita, gabro) varía durante la subducción como función de la presión, temperatura y composición de la fase vapor (Wilson, 1989).

### 2.2.1.4. Cámaras magmáticas

Las evidencias indican la existencia de grandes almacenamientos de magma dentro de la corteza y sobre el manto de los arcos de islas donde los magmas primarios pueden estancarse y fraccionarse (Wilson, 1989).

Estas cámaras magmáticas ocurren a profundidades menores que 20-30 km y pueden extenderse dentro de unos cientos de metros de la superficie (Wilson, 1989).

## 2.2.2. Rift Continental: continental rift (CR).

Bajo ciertas zonas de la litósfera a veces se producen corrientes de convección ascendentes por las que suben materiales calientes menos densos. En estas zonas, la litósfera continental se abomba, se estira y se fragmenta, produciéndose una depresión o Rift en la que se puede acumular el agua y formarse lagos. Se trata de zonas con abundante actividad volcánica (Wilson, 1989).

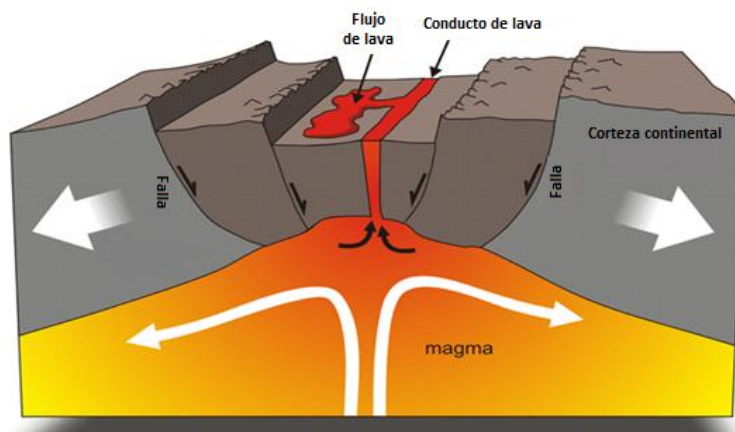
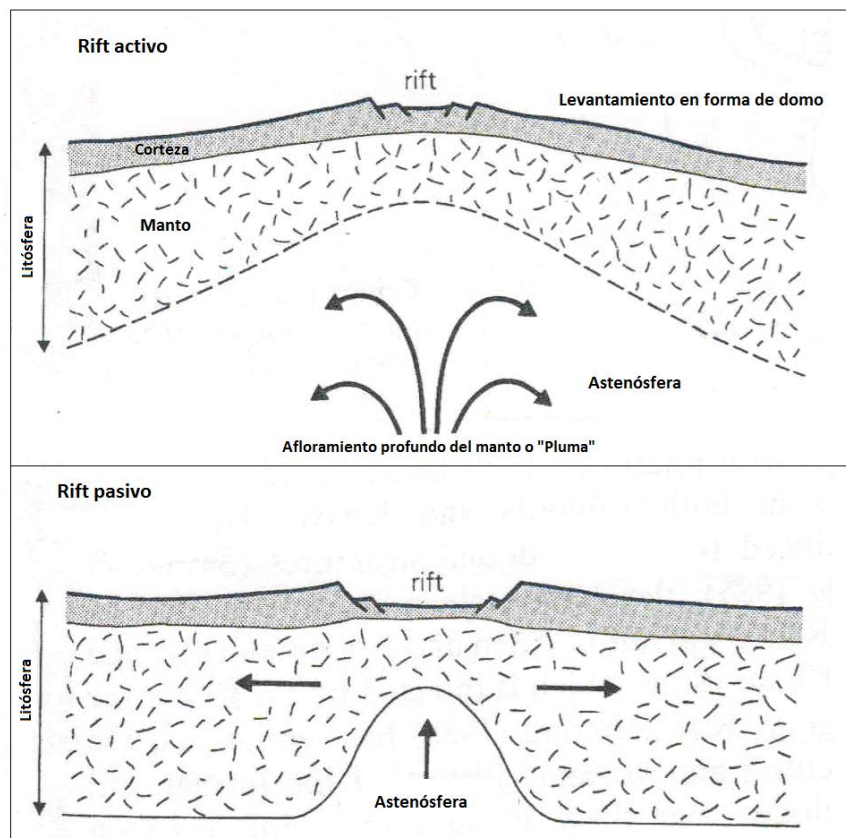


Fig. 2.5 Proceso de formación de Rift. Fernández (2009)

Sin embargo, se piensa en mecanismos más complejos y aún hay disputa entre el concepto de Rift activo y pasivo.

### 2.2.2.1. Mecanismo de formación de un Rift

Para decidir si un Rift es activo o pasivo, es necesario tener conocimiento de la estructura profunda de la litósfera, y correlacionar las extensiones horizontales con la elevación de la superficie (Wilson, 1989).



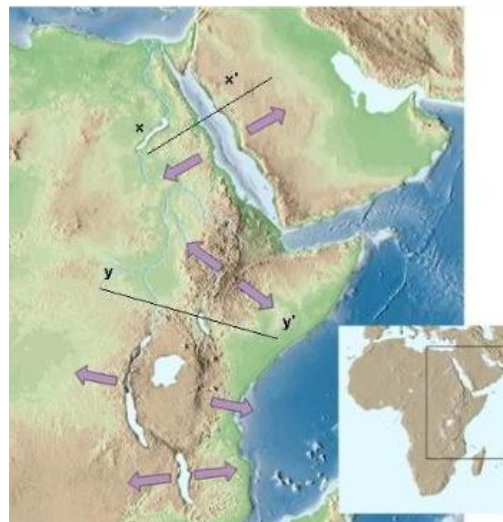
**Fig. 2.6 Mecanismo de formación de un Rift. Wilson (1989)**

Los Rift activos, se han supuesto así dadas la magnitud de su transferencia de calor y su actividad sísmica, lo que se supone consecuencia del adelgazamiento de la corteza. Estos adelgazamientos tienen una longitud transversal aproximada de 1000 km (Wilson, 1989).



También, se asocia a las formaciones anomalías gravitacionales; que se explican dado el flujo de magma de baja densidad hacia la corteza, fundido parcial de la litósfera y bajas velocidades de la astenósfera (Wilson, 1989).

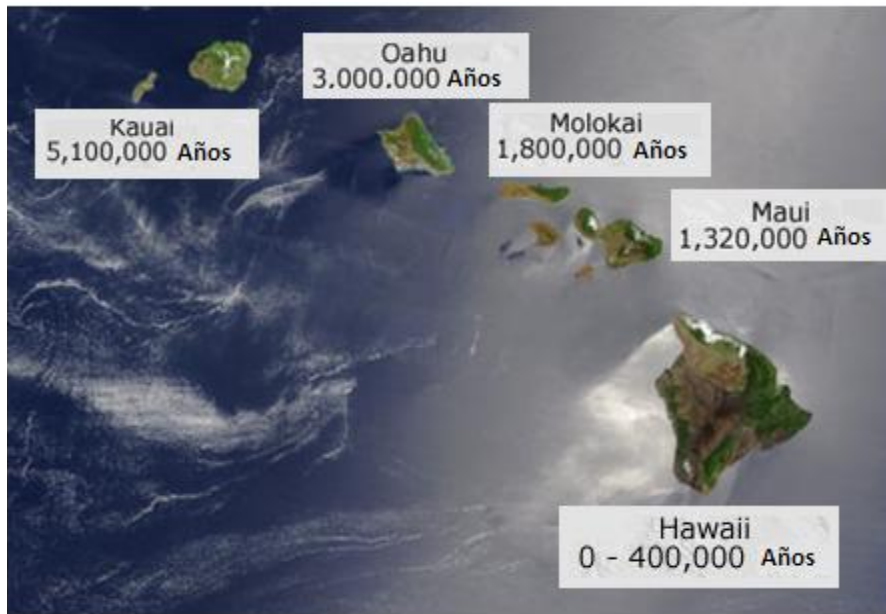
Una zona de este tipo se encuentra en el llamado Gran Valle del Rift Africano, donde los levantamientos en la corteza han producido grandes domos. Sin embargo, existen otras actividades volcánicas dentro de la placa Africana, todas ellas asociadas con la elevación de la corteza. En ellas se incluye La Tibesti, Ahaggar y la Jebel Marra. (Fernández, 2009).



**Fig. 2.7** Ejemplo de una zona de Rift. (Fernández, 2009).

### 2.2.3. Islas Oceánicas: ocean-island (OI)

Las islas oceánicas, se levantan directamente del fondo del mar como consecuencia de la actividad volcánica. A menudo aparecen en grupo (NASA, 2003).



*Fig. 2.8 Ejemplo de Islas oceánicas. (NASA, 2003).*

Los volcanes de las islas oceánicas son inmensas estructuras de hasta 10,000 m por encima del nivel base de los fondos marinos adyacentes, con dimensiones mayores que las montañas más grandes de los continentes (Wilson, 1989).

Poco se sabe sobre la estructura y composición de sus bases submarinas, hasta ahora, el conocimiento se limita a los conos volcánicos emergentes.

La mayoría de los conos emergentes consisten en la superposición de varios centros volcánicos, lo que indica la migración de la actividad con el tiempo (Wilson, 1989).

### 2.2.3.1. Puntos Calientes (Hot spot)

Los puntos calientes son manifestaciones de efusividad magmática intraplaca asociados a la existencia de plumas calientes bajo ésta (Wilson, 1989).

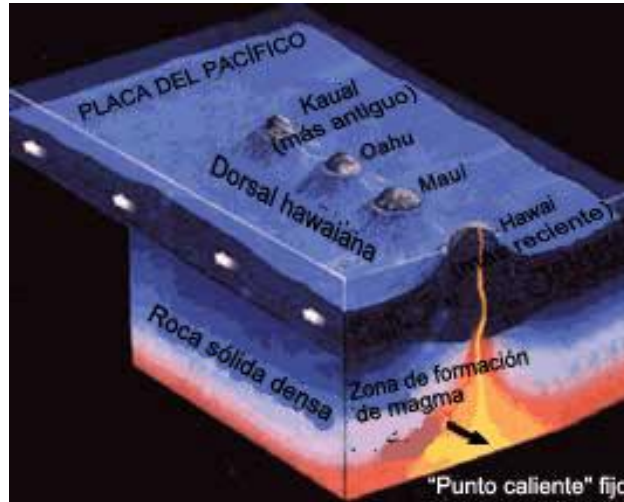


Fig. 2.9 Formación de plumas calientes. Aznar (2010)

Las corrientes convectivas dentro del manto terrestre producen a veces unas plumas de magma más caliente que asciende hasta entrar en contacto con la corteza terrestre donde su elevada temperatura funde esta, creando fenómenos que en caso de alcanzar la superficie dan lugar a volcanes de naturaleza más o menos basáltica (basalto) (Wilson, 1989).

Según esta teoría, tras una erupción volcánica, el magma sale al exterior y forma una isla, situada en origen sobre el punto caliente. Con el tiempo, la isla se desplaza porque las placas que forman la litosfera están en continuo movimiento. En cada erupción una nueva isla emergerá del mismo punto caliente, por esa cada isla tiene una edad geológica diferente (Wilson, 1989).

Esta teoría explica perfectamente las cadenas lineales de las islas Hawai, pero aplicada a las islas Canarias no resuelve numerosos interrogantes.

### 2.2.3.2. Principales localidades de Hot Spot

En la figura 2.10 se muestran las principales zonas en el mundo en donde se encuentran puntos calientes.

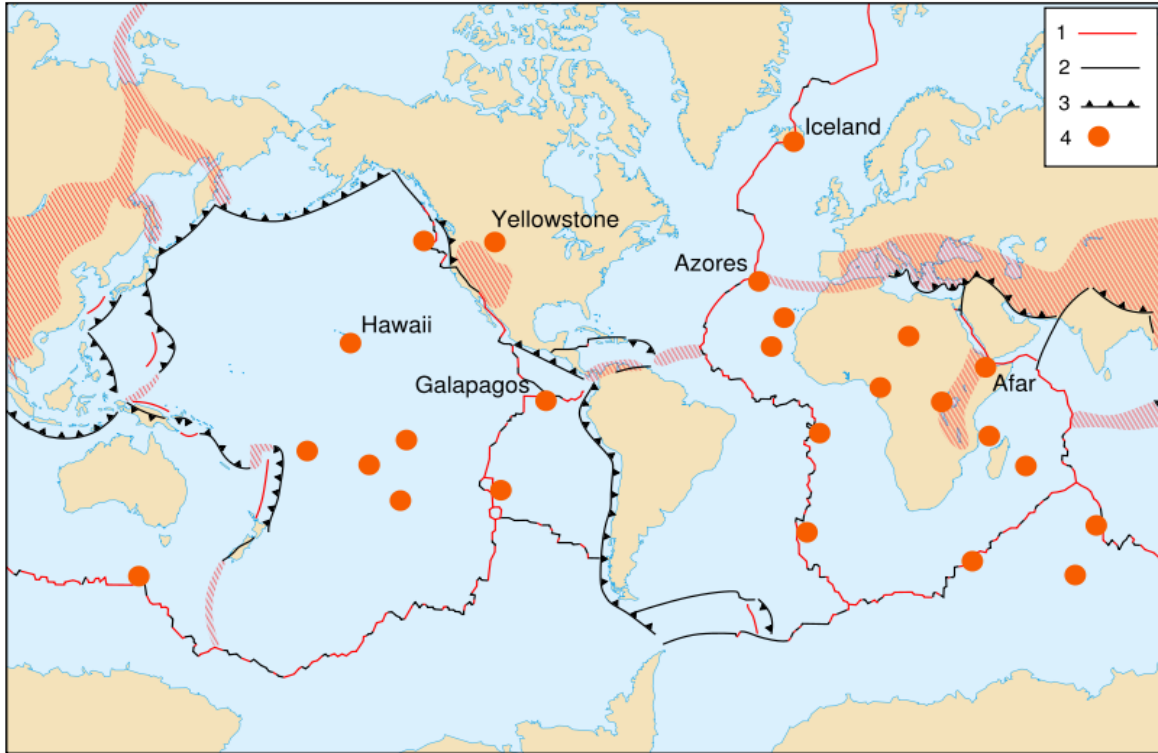


Fig. 2.10 Principales localidades de puntos calientes, 1: Placas divergentes, 2: Placas Transformantes, 3: Placas convergentes, 4: Zona de puntos calientes, (Wikipedia, 2010).

### 2.2.4. Cordilleras Oceánicas: mid-ocean ridge (MOR)

Las MOR son relieves submarinos formados por el ascenso de magma el cual se enfría sobre la corteza oceánica. Estas cordilleras alcanzan una altura promedio entre 1000 y 3000 m sobre el suelo oceánico y se extienden por los movimientos divergentes de las placas tectónicas y representan la formación de nueva litósfera oceánica (Corteza+Manto), (Wilson, 1989).

#### 2.2.4.1. Principales localidades de MOR

Se han identificado seis MOR principales alrededor del mundo

- *East Pacific Rise (EPR)*
- *Mid-Atlantic Ridge (MAR)*
- *South West Indian Ocean Ridge (SWIR)*
- *South East Indian Ocean Ridge (SEIR)*
- *Central Indian Ocean Ridge (CIR)*
- *Reykjanes Ridge (RR)*

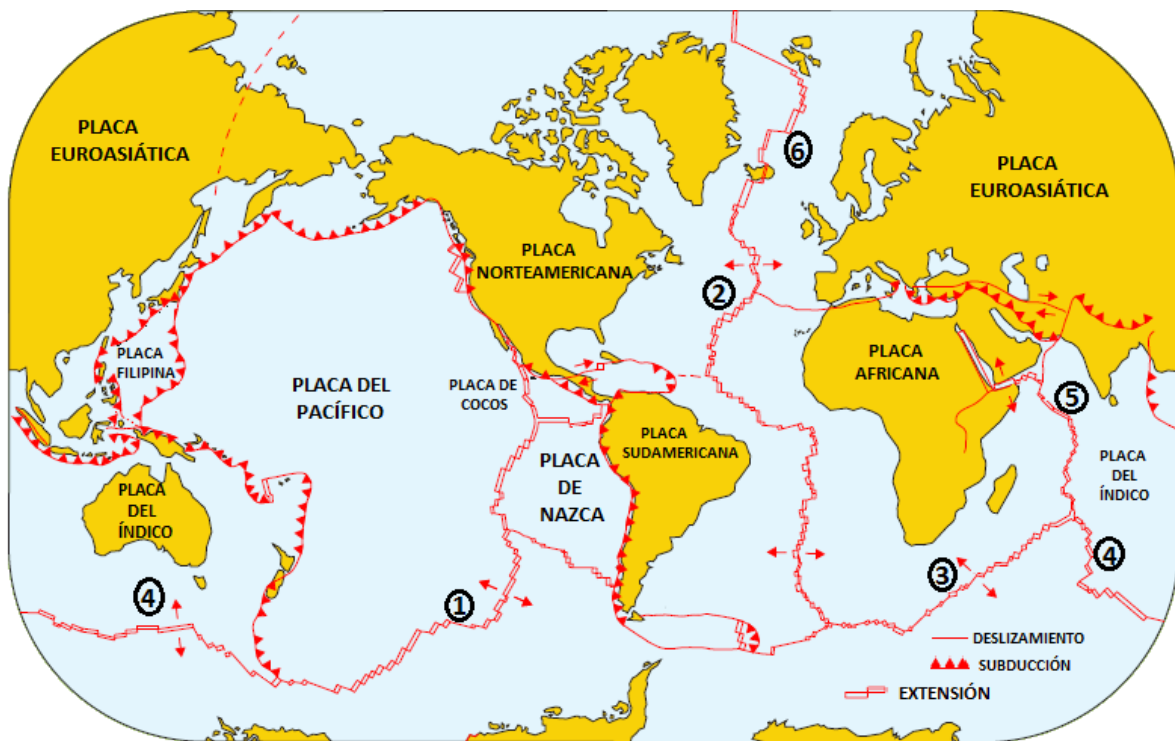
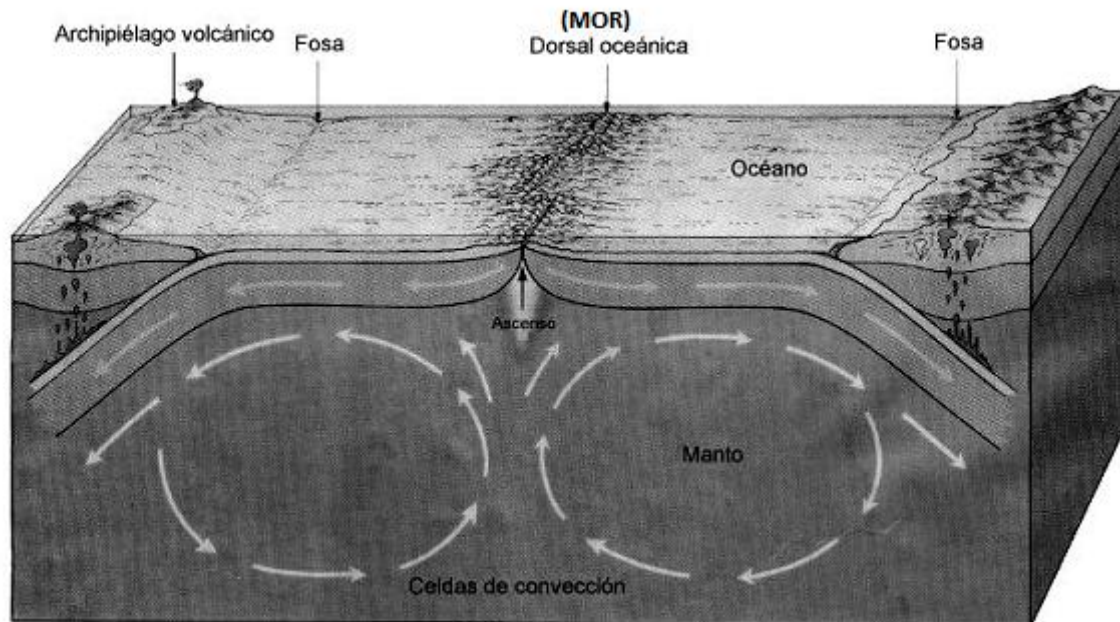


Fig. 2.11 Principales localidades de MOR. Wilson (1989), (IGN, 2010)

#### 2.2.4.2. Mecanismo de formación de MOR

El magma dentro del manto se encuentra fluyendo en direcciones opuestas provocando el adelgazamiento de la corteza oceánica. Este adelgazamiento provoca la salida de material magmático formado de una fusión parcial de roca de origen ígneo, lherzolita, bajo una descompresión adiabática al salir hacia la superficie, (Wilson, 1989).

La fusión parcial resulta en la formación de magma basáltico, el cual es inyectado a través de las fisuras estrechas a lo ancho de la cordillera, entra en erupción en contacto con agua de mar y se crea una nueva corteza oceánica (Wilson, 1989).



*Fig. 2.12 Mecanismo de formación MOR . Wilson (1989)*

#### **2.2.4.3. Modelo petrogénico**

Las MOR están situadas sobre la zona de corrientes ascendentes de magma pertenecientes al manto. El material asciende hacia la corteza oceánica y se descomprime adiabáticamente, a 1200°C, produciendo un magma basáltico (Wilson, 1989).

### 2.3. DIAGRAMAS DE DISCRIMINACION

Los diagramas de discriminación Tectonomagmática son diagramas que nos ayudan a inferir el ambiente tectónico del que se originan las rocas mediante sus elementos mayores y/o traza.

En la geoquímica de rocas volcánicas, los pioneros en este tipo de investigación fueron Pearce y Cann en 1973, al crear diagramas de discriminación tectonomagmática, basados en datos geoquímicos de diferentes tipos de ambientes tectónicos

Desde los años 70's se han propuesto una gran variedad de diagramas de discriminación tectonomagmática, bivariados, ternarios y de función discriminante.

En el trabajo titulado **“Statistical Evaluation of Bivariate, Ternary and Discriminant Function Tectonomagmatic Discrimination Diagrams”** (Verma, 2010), se realizó una evaluación de un total de 28 diagramas de discriminación tectonomagmática:

#### 4 bivariados

- ➔ Ti/Y–Zr/Y (Pearce y Gale, 1977)
- ➔ Zr–Zr/Y ( Pearce y Norry, 1979)
- ➔ Ti/1000–V (Shervais, 1982)
- ➔ Nb/Y–Ti/Y (Pearce, 1982)

#### 6 ternarios

- ➔ Zr–3Y–Ti/1000 (Pearce y Cann, 1973)
- ➔ MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–FeO<sub>t</sub> (Pearce et al., 1977)
- ➔ Th–Ta–Hf/3 (Wood, 1980)
- ➔ 10MnO–15P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–TiO<sub>2</sub> (Mullen, 1983)
- ➔ Zr/4–Y–2Nb (Meschede, 1986)
- ➔ La/10–Nb/8–Y/15 (Cabanis y Lecolle, 1989)

#### 3 diagramas de función discriminante.

- ➔ Score1–Score2 (Butler y Woronow, 1986)
- ➔ F1–F2 (Pearce, 1976)
- ➔ F2–F3 (Pearce, 1976)

3 grupos de diagramas de función discriminante, los cuales constan de un total de 15 diagramas en grupos de 5.

- ➔ Cinco diagramas basados en elementos mayores (Agrawal et al., 2004).
- ➔ Cinco diagramas con funciones discriminantes basadas en relaciones de log-transformado basados en elementos mayores (Verma et al., 2006).
- ➔ Cinco diagramas con funciones discriminantes basadas en relaciones de log-transformado basados en elementos traza inmóviles (Agrawal et al., 2008).

Para la realización de la evaluación de los 28 diagramas se utilizaron 6 bases de datos representativas de todo el mundo del Mioceno al reciente (rocas frescas), con un conocido ambiente tectónico, no controversial, de rocas básicas y ultra básicas.

- ➔ Island Arc Basalt (IAB)
- ➔ Island Back Basalt (Arc)
- ➔ Continental Rifts Basalt (CRB)
- ➔ Ocean Island Basalt (OIB)
- ➔ Mid Ocean Ridges Basalt (MORB)
- ➔ E-MORB

Los tipos de magma y rocas se calcularon usando el programa computacional SINCLAS, (Verma et al., 2002), al final se reportaron las implicaciones de la evaluación de los diagramas y se sugirió si se deben o no continuar utilizando estos diagramas.

Los resultados de la evaluación de los diagramas indicó que sólo los grupos de diagramas propuestos en los artículos (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008), pueden ser totalmente recomendados para su uso en el futuro, debido a que los diagramas evaluados bivariados y ternarios resultaron ser menos eficientes al tener las menores tasas de éxito, y los diagramas de función discriminante publicados previamente, (Butler y Woronow, 1986), (Pearce, 1976), presentan algunos problemas en la clasificación, además que algunos de ellos han sido poco utilizados.

Cada uno de los grupos de diagramas recomendados por (Verma, 2010), proponen una serie de cinco diagramas, en donde el primer diagrama contempla 4 ambientes tectónicos: IAB, CRB, OIB, MORB y los otros cuatro diagramas una combinación de los 4 ambientes tectónicos en grupos de tres, como se muestra en la tabla 2.1.



Diagrama	Número de ambientes	Ambientes tectónicos
1	4	IAB, CRB, OIB, MORB
2	3	IAB, CRB, OIB
3	3	IAB, CRB, MORB
4	3	IAB, OIB, MORB
5	3	CRB, OIB, MORB

Tabla 2. 1 Combinación de diagramas recomendados por (Verma, 2010).

A continuación se realiza una breve descripción de los artículos en los que fueron publicados los grupos de diagramas de discriminación tectonomagmática recomendados por (Verma, 2010).

### **2.3.1. Discriminant Analysis Applied to Establish Major-Element Field Boundaries for Tectonic Varieties of Basic Rocks (Agrawal et al. 2004)**

El artículo propone la utilización de la composición química de los elementos mayores de rocas básicas de diferentes ambientes tectónicos.

Cada uno de los 5 diagramas propuestos por (Agrawal et al. 2004) consta de un par de ecuaciones (DF1, DF2), para la obtención de las coordenadas (x, y), los coeficientes en las ecuaciones son resultado un análisis estadístico discriminante, utilizando como variables de discriminación los elementos mayores ajustados:  $SiO_{2adj}$ ,  $TiO_{2adj}$ ,  $Al_2O_{3adj}$ ,  $Fe_2O_{3adj}$ ,  $MnO_{adj}$ ,  $MgO_{adj}$ ,  $CaO_{adj}$ ,  $Na_2O_{adj}$ ,  $K_2O_{adj}$ ,  $P_2O_{5adj}$ .

Las fronteras de los campos del diagrama están representadas por un conjunto de coordenadas.

#### **2.3.1.1. Diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB)m1**

##### **✿ Ecuaciones.**

$$(DF1)_{(IAB-CRB-OIB-MORB)} = 0.258 \times (SiO_2)_{adj} + 2.395 \times (TiO_2)_{adj} + 0.106 \times (Al_2O_3)_{adj} + 1.019 \times (Fe_2O_3)_{adj} - 6.778 \times (MnO)_{adj} + 0.405 \times (MgO)_{adj} + 0.119 \times (CaO)_{adj} + 0.071 \times (Na_2O)_{adj} - 0.198 \times (K_2O)_{adj} + 0.613 \times (P_2O_5)_{adj} - 24.065 \quad (1)$$

$$DF2_{(IAB-CRB-OIB-MORB)} = 0.730 \times (SiO_2)_{adj} + 1.119 \times (TiO_2)_{adj} + 0.156 \times (Al_2O_3)_{adj} + 1.332 \times (Fe_2O_3)_{adj} + 4.376 \times (MnO)_{adj} + 0.493 \times (MgO)_{adj} + 0.936 \times (CaO)_{adj} + 0.882 \times (Na_2O)_{adj} - 0.291 \times (K_2O)_{adj} - 1.572 \times (P_2O_5)_{adj} - 59.472 \quad (2)$$

La ecuación **DF1**, da como resultado la coordenada en “x” en el diagrama y la ecuación **DF2**, la coordenada en el eje “y”. El sufijo **adj** se refiere al cálculo de las concentraciones sin agua, ajustadas un 100% utilizando el programa informático SINCLAS empleando (Middlemost, 1989) con la recomendación de ajuste de hierro-oxidación (Verma et al., 2002).

### ✿ Diagrama

El diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB) m1, propuesto por (Agrawal et al., 2004), se muestra en la Fig. 2.13.

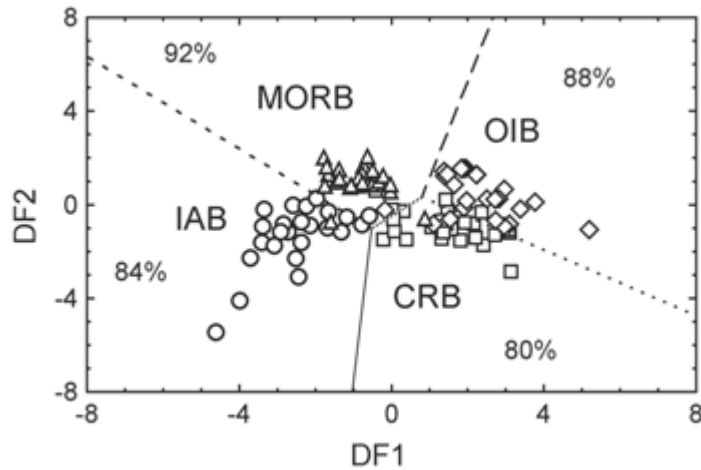


Fig. 2.13 Diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB) m1 (Agrawal et al., 2004).

La simbología y los datos graficados expuesto en la figura se encuentran descritos en (Agrawal et al., 2004).

### ✿ Coordenadas de Frontera

Las fronteras de los diagramas son las líneas que dividen un ambiente tectónico de otro y se encuentran dadas por un par de coordenadas que indican el inicio y fin de cada línea divisoria.

- IAB-CRB (-1.03, -8.00) (-0.52, -0.99)
- CRB-OIB (0.80, 0.32) (8.00, -4.75)
- OIB-MORB (0.80, 0.32)(2.67, 8.00)
- IAB-MORB (-0.52, -1.03)(-8.00, 6.33)

➔ CRB-MORB (-0.52, -1.03) (0.80, 0.32).

**2.3.1.2. Diagrama (IAB-CRB-OIB)m1**

✿ Ecuaciones

$$\begin{aligned}
 (DF1)_{(IAB-CRB-OIB)} = & 0.251 \times (SiO_2)_{adj} + 2.034 \times (TiO_2)_{adj} - 0.100 \times (Al_2O_3)_{adj} + \\
 & 0.573 \times (Fe_2O_3)_{adj} + 0.032 \times (FeO)_{adj} - 2.877 \times (MnO)_{adj} + 0.260 \times (MgO)_{adj} + \\
 & 0.052 \times (CaO)_{adj} + 0.322 \times (Na_2O)_{adj} - 0.229 \times (K_2O)_{adj} - 18.974
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 (DF2)_{(IAB-CRB-OIB)} = & 2.150 \times (SiO_2)_{adj} + 2.711 \times (TiO_2)_{adj} + 1.792 \times (Al_2O_3)_{adj} + \\
 & 2.295 \times (Fe_2O_3)_{adj} + 1.484 \times (FeO)_{adj} + 8.594 \times (MnO)_{adj} + 1.896 \times (MgO)_{adj} + \\
 & 2.158 \times (CaO)_{adj} + 1.201 \times (Na_2O)_{adj} + 1.763 \times (K_2O)_{adj} - 200.276
 \end{aligned} \tag{4}$$

✿ Diagrama

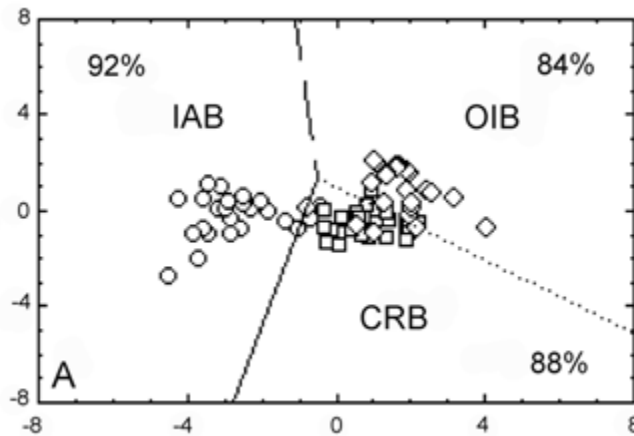


Fig. 2.14 Diagrama (IAB-CRB-OIB)m1 (Agrawal et al., 2004)

✿ Coordenadas de Frontera

➔ IAB-CRB (-0.52, 1.34) (-2.76, -8.00)

➔ CRB-OIB (-0.52, 1.34) (8.00, -5.11)

➔ IAB-OIB (-0.52, 1.34) (-1.09, 8.00)

### 2.3.1.3. Diagrama (IAB-CRB-MORB)m1

#### ✿ Ecuaciones

$$(DF1)_{(IAB-CRB-MORB)} = 0.435 \times (SiO_2)_{adj} - 1.392 \times (TiO_2)_{adj} + 0.183 \times (Al_2O_3)_{adj} + 0.148 \times (FeO)_{adj} + 7.690 \times (MnO)_{adj} + 0.021 \times (MgO)_{adj} + 0.380 \times (CaO)_{adj} + 0.036 \times (Na_2O)_{adj} + 0.462 \times (K_2O)_{adj} - 1.192 \times (P_2O_5)_{adj} - 29.435 \quad (5)$$

$$(DF2)_{(IAB-CRB-MORB)} = 0.601 \times (SiO_2)_{adj} - 0.335 \times (TiO_2)_{adj} + 1.332 \times (Al_2O_3)_{adj} + 1.449 \times (FeO)_{adj} + 0.756 \times (MnO)_{adj} + 0.893 \times (MgO)_{adj} + 0.448 \times (CaO)_{adj} + 0.525 \times (Na_2O)_{adj} + 1.734 \times (K_2O)_{adj} + 2.494 \times (P_2O_5)_{adj} - 78.236 \quad (6)$$

#### ✿ Diagrama

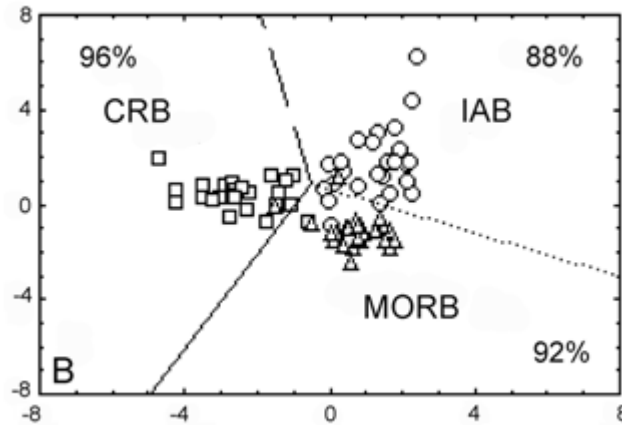


Fig. 2.15 Diagrama (IAB-CRB-MORB)m1 (Agrawal et al., 2004)

#### ✿ Coordenadas de Frontera

- CRB-MORB (-0.49, 0.84) (-4.97, -8.00)
- IAB-MORB (-0.49, 0.84) (8.00, -3.04)
- IAB-CRB (-0.49, 0.84) (-1.93, 8.00)

### 2.3.1.4. Diagrama(IAB-OIB-MORB)m1

#### ✿ Ecuaciones

$$(DF1)_{(IAB-OIB-MORB)} = 1.232 \times (SiO_2)_{adj} + 4.166 \times (TiO_2)_{adj} + 1.085 \times (Al_2O_3)_{adj} + 3.522 \times (Fe_2O_3)_{adj} + 0.500 \times (FeO)_{adj} - 3.930 \times (MnO)_{adj} + 1.334 \times (MgO)_{adj} + 1.085 \times (CaO)_{adj} + 0.416 \times (Na_2O)_{adj} + 0.827 \times (K_2O)_{adj} - 119.050 \quad (7)$$

$$(DF2)_{(IAB-OIB-MORB)} = 1.384 \times (SiO_2)_{adj} + 1.091 \times (TiO_2)_{adj} + 0.908 \times (Al_2O_3)_{adj} + 2.419 \times (Fe_2O_3)_{adj} + 0.886 \times (FeO)_{adj} + 5.281 \times (MnO)_{adj} + 1.269 \times (MgO)_{adj} + 1.790 \times (CaO)_{adj} + 2.572 \times (Na_2O)_{adj} + 0.138 \times (K_2O)_{adj} - 134.295 \quad (8)$$

#### ✿ Diagrama

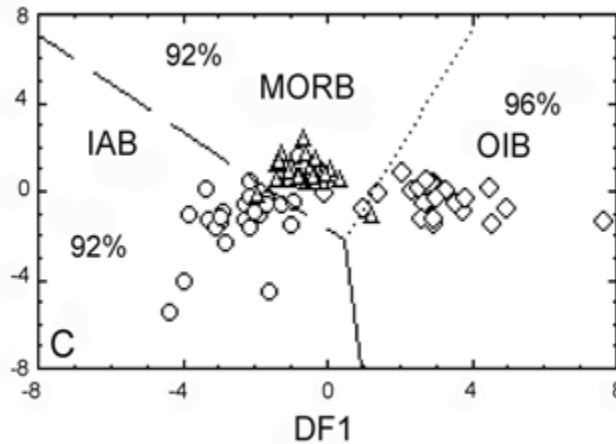


Fig. 2.16 Diagrama (IAB-OIB-MORB)m1 (Agrawal et al., 2004).

#### ✿ Coordenadas de Frontera

- ➔ IAB-OIB (0.50, -2.17) (0.97, -8.00)
- ➔ OIB-MORB (0.50, -2.17) (4.27, 8.00)
- ➔ IAB-MORB (0.50, -2.17) (-8.00, 7.10)

### 2.3.1.5. Diagrama(CRB-OIB-MORB)m1

#### ✿ Ecuaciones

$$(DF1)_{(CRB-OIB-MORB)} = 0.310 \times (SiO_2)_{adj} + 1.936 \times (TiO_2)_{adj} + 0.341 \times (Al_2O_3)_{adj} + 0.760 \times (Fe_2O_3)_{adj} + 0.351 \times (FeO)_{adj} - 11.315 \times (MnO)_{adj} + 0.526 \times (MgO)_{adj} + 0.084 \times (CaO)_{adj} + 0.312 \times (K_2O)_{adj} + 1.892 \times (P_2O_5)_{adj} - 32.909 \quad (9)$$

$$(DF2)_{(CRB-OIB-MORB)} = 0.703 \times (SiO_2)_{adj} + 2.454 \times (TiO_2)_{adj} + 0.233 \times (Al_2O_3)_{adj} + 1.943 \times (Fe_2O_3)_{adj} - 0.182 \times (FeO)_{adj} - 2.421 \times (MnO)_{adj} + 0.618 \times (MgO)_{adj} + 0.712 \times (CaO)_{adj} - 0.866 \times (K_2O)_{adj} - 1.180 \times (P_2O_5)_{adj} - 56.455 \quad (10)$$

#### ✿ Diagrama

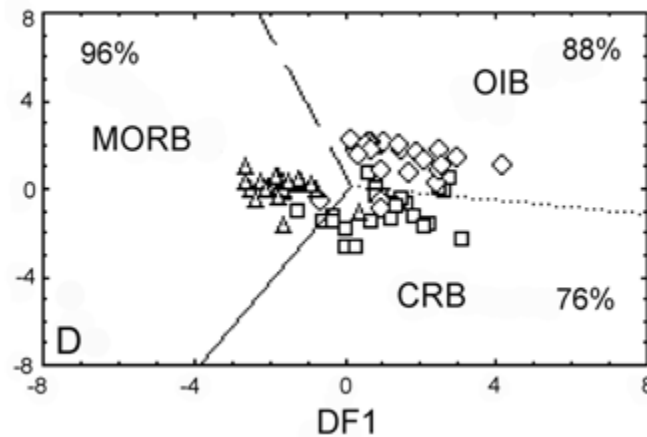


Fig. 2.17 Diagrama (CRB-OIB-MORB)m1 (Agrawal et al., 2004).

#### ✿ Coordenadas de Frontera

- CRB-MORB (0.17, 0.07) (-3.83, -8.00)
- CRB-OIB (0.17, 0.07) (8.00, -1.17)
- OIB-MORB (0.17, 0.07) (-2.28, 8.00)

**2.3.2. Discriminating four tectonic settings: Five new geochemical diagrams for basic and ultrabasic volcanic rocks based on log-ratio transformation of major-element data por (Verma et al., 2006)**

Este artículo se basa en una propuesta nueva de 5 diagramas de discriminación, la cual propone el la manipulación estadística de datos de composiciones químicas, mediante el cálculo de logaritmo natural de la proporción entre elementos mayores y un divisor común en este caso  $(\text{SiO}_2)_{\text{adj}}$ .

$$\begin{aligned} & \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}, & \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}, & \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}, & \ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}, \\ & \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}, & \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}, & \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}, & \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}, \\ & \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}, & \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}}. \end{aligned}$$

De tal forma que las unidades de medición son canceladas y los datos de composición teóricamente limitados entre 0-1 o 0-100% se convierten al espacio adimensional y el logaritmo natural de la relación de variables abre prácticamente el espacio de  $-\infty$  a 0.

**2.3.2.1. Diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB)<sub>m2</sub>**

**✿ Ecuaciones**

$$\begin{aligned} \text{DF1}_{(\text{IAB-CRB-OIB-MORB})_{m2}} = & -4.6761 \times \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 2.5330 \times \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - \\ & 0.3884 \times \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 3.9688 \times \ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.8980 \times \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - \\ & 0.5832 \times \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.2896 \times \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.2704 \times \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + \\ & 1.0810 \times \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.1845 \times \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 1.5445 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{DF2}_{(\text{IAB-CRB-OIB-MORB})_{m2}} = & 0.6751 \times \ln(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 4.5895 \times \ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + \\ & 2.0897 \times \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.8514 \times \ln(\text{FeO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 0.4334 \times \ln(\text{MnO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + \\ & 1.4832 \times \ln(\text{MgO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 2.3627 \times \ln(\text{CaO}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} - 1.6558 \times \ln(\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + \\ & 0.6757 \times \ln(\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 0.4130 \times \ln(\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2)_{\text{adj}} + 13.1639 \end{aligned} \quad (12)$$

✿ Diagrama

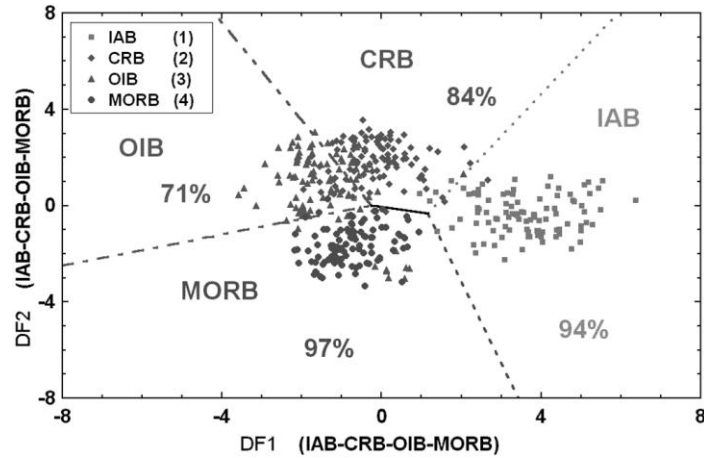


Fig. 2.18 (IAB-CRB-OIB-MORB) m2 (Verma et al., 2006).

✿ Coordenadas de Frontera

- IAB-CRB (1.160, -0.333) (5.912, 8.000)
- CRB-OIB (-0.266, 0.020) (-4.190, 8.000)
- OIB-MORB (-8.000, -2.490) (-0.266, 0.020)
- IAB-MORB (1.160, -0.333) (3.431, -8.000)
- CRB-MORB (1.160, -0.333) (-0.266, 0.020)

2.3.2.2. Diagrama (IAB-CRB-OIB)m2

✿ Ecuaciones

$$\begin{aligned}
 DF1_{(IAB-CRB-OIB)m2} = & 3.9998 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} - 2.2385 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + \\
 & 0.8110 \times \ln(Fe_2O_3/SiO_2)_{adj} - 2.5865 \times \ln(FeO/SiO_2)_{adj} - 1.2433 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + \\
 & 0.4872 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} - 0.3153 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} + 0.4325 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} - \\
 & 1.0262 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} + 0.0514 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} - 0.5718
 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 DF2_{(IAB-CRB-OIB)m2} = & -1.3705 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 3.0104 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + \\
 & 0.3239 \times \ln(Fe_2O_3/SiO_2)_{adj} + 1.8998 \times \ln(FeO/SiO_2)_{adj} - 1.9746 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + \\
 & 1.4411 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} - 2.2656 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} + 1.8665 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} + \\
 & 0.2872 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} + 0.8138 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 1.8202
 \end{aligned} \quad (14)$$



✿ Diagrama

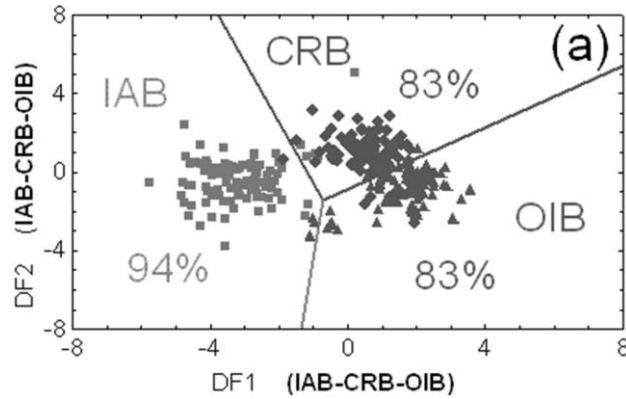


Fig. 2.19 (IAB-CRB-OIB) m2 (Verma et al., 2006).

✿ Coordenadas de Frontera

- IAB-CRB (-0.733, -1.405) (-3.788, 8.000)
- CRB-OIB (-0.733, -1.405) (8.000, 5.428)
- IAB-OIB (-1.343, -8.000) (-0.733, -1.405)

2.3.2.3. Diagrama (IAB-CRB-MORB)m2

✿ Ecuaciones

$$\begin{aligned}
 DF1_{(IAB-CRB-MORB)m2} = & -1.5736 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 6.1498 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + \\
 & 1.5544 \times \ln(Fe_2O_3/SiO_2)_{adj} + 3.4134 \times \ln(FeO/SiO_2)_{adj} - 0.0087 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + \\
 & 1.2480 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} - 2.1103 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} - 0.7576 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} + \\
 & 1.1431 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} + 0.3524 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 16.8712
 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 DF2_{(IAB-CRB-MORB)m2} = & + 3.9844 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 0.2200 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + \\
 & 1.1516 \times \ln(Fe_2O_3/SiO_2)_{adj} - 2.2036 \times \ln(FeO/SiO_2)_{adj} - 1.6228 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + \\
 & 1.4291 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} - 1.2524 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} + 0.3581 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} - \\
 & 0.6414 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} + 0.2646 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 5.0546
 \end{aligned} \quad (16)$$

✿ Diagrama

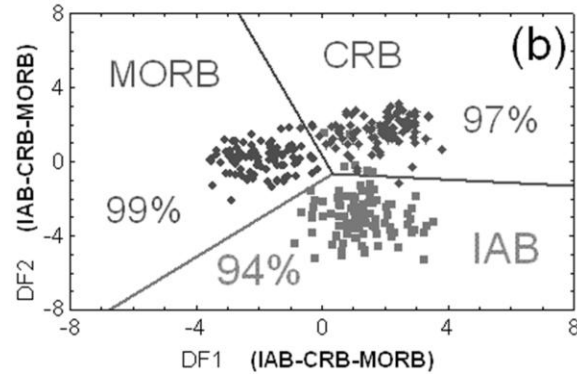


Fig. 2.20 (IAB-CRB-MORB) m2 (Verma et al., 2006).

✿ Coordenadas de Frontera

- IAB-CRB (8.000, -1.332) (0.361, -0.619)
- CRB-MORB (-2.673, 8.000) (0.361, -0.619)
- IAB-MORB (-6.779, -8.000) (0.361, -0.619)

2.3.2.4. Diagrama (IAB-OIB-MORB)m2

✿ Ecuaciones

$$\begin{aligned}
 DF1_{(IAB-OIB-MORB)m2} = & + 5.3396 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} - 1.6279 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + \\
 & 0.8338 \times \ln(Fe_2O_3/SiO_2)_{adj} - 4.7362 \times \ln(FeO/SiO_2)_{adj} - 0.1254 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + \\
 & 0.6452 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 1.5153 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} - 0.8154 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} - \\
 & 0.8888 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} - 0.2255 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 5.7755 \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 DF2_{(IAB-OIB-MORB)m2} = & + 1.1799 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 5.5114 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + \\
 & 2.7737 \times \ln(Fe_2O_3/SiO_2)_{adj} - 0.1341 \times \ln(FeO/SiO_2)_{adj} + 0.6672 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + \\
 & 1.1045 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} - 1.7231 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} - 3.8948 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} + \\
 & 0.9471 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} - 0.1082 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 15.4984 \quad (18)
 \end{aligned}$$

✿ Diagrama

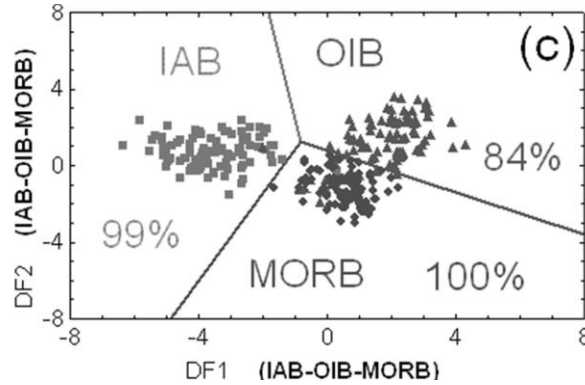


Fig. 2.21 (IAB-OIB-MORB) m2 (Verma et al., 2006).

✿ Coordenadas de Frontera

- ➔ IAB-OIB (-0.830, 1.224)(-1.824, 8.000)
- ➔ OIB-MORB (-0.830, 1.224)(8.000, -3.583)
- ➔ IAB-MORB (-4.865, -8.000)(-0.830, 1.224).

2.3.2.5. Diagrama (CRB-OIB-MORB)m2

✿ Ecuaciones

$$DF1_{(CRB-OIB-MORB)m2} = -0.5183 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 4.9886 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 2.2204 \times \ln(Fe_2O_3/SiO_2)_{adj} + 1.1801 \times \ln(FeO/SiO_2)_{adj} - 0.3008 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 1.3297 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} - 2.1834 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} - 1.9319 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} + 0.6976 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} + 0.8998 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 13.2625 \quad (19)$$

$$DF2_{(CRB-OIB-MORB)m2} = +5.0509 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} - 0.4972 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 1.0046 \times \ln(Fe_2O_3/SiO_2)_{adj} - 3.3848 \times \ln(FeO/SiO_2)_{adj} + 0.5528 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 0.2925 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 0.4007 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} - 2.8637 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} - 0.2189 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} - 1.0558 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 2.8877 \quad (20)$$

✿ Diagrama

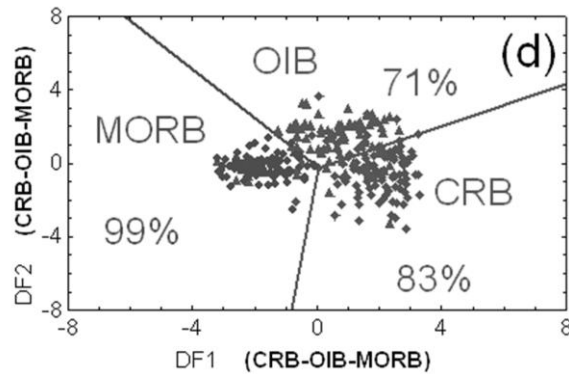


Fig. 2.22 (CRB-OIB-MORB) m2 (Verma et al., 2006).

✿ Coordenadas de Frontera

- ➔ CRB-OIB (0.029, -0.222) (8.000, 4.322).
- ➔ OIB-MORB (0.029, -0.222) (-6.177, 8.000).
- ➔ CRB-MORB (-0.819, -8.000) (0.029, -0.222).

**2.3.3. Tectonic Discrimination of Basic and Ultrabasic Volcanic Rocks through Log-Transformed Ratios of Immobile Trace Elements por (Agrawal et al., 2008)**

Este artículo se basa en la transformación de las relaciones del logaritmo natural La/Th, Sm/Th, Yb/Th, y Nb/Th.

En (Agrawal et al., 2004) y (Verma et al., 2006), se señala la dificultad para discriminar Rift Continentales (CRB) y las Islas Oceánicas (OIB), y en este artículo Agrawal et al., (2008) se propuso un nuevo método para mejorar este tipo de discriminación combinando en el primer diagrama CRB+OIB, (llamada placa WPB (within plate basalt) en trabajos anteriores), la separación de CRB y OIB se logra en los otros cuatro diagramas restantes.

### 2.3.3.1. Diagrama (IAB-CRB+OIB-MORB)t1

#### ✿ Ecuaciones

$$DF1_{(IAB-CRB+OIB-MORB)_t1} = +0.3518 \times \ln(La/Th) + 0.6013 \times \ln(Sm/Th) - 1.3450 \times \ln(Yb/Th) + 2.1056 \times \ln(Nb/Th) - 5.4763 \quad (21)$$

$$DF2_{(IAB-CRB+OIB-MORB)_t1} = -0.3050 \times \ln(La/Th) - 1.1801 \times \ln(Sm/Th) + 1.6189 \times \ln(Yb/Th) + 1.2260 \times \ln(Nb/Th) - 0.9944 \quad (22)$$

#### ✿ Diagrama

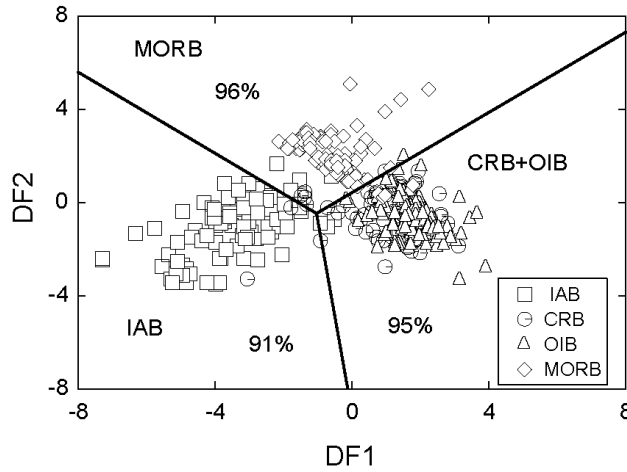


Fig. 2.23 (IAB-CRB+OIB-MORB) t1 (Agrawal et al., 2008).

#### ✿ Coordenadas de Frontera

- IAB-CRB+OIB (-0.12, -8) (-1.03, -0.47)
- CRB+OIB-MORB (8, 7.32) (-1.03, -0.47)
- IAB-MORB (-8, 5.6) (-1.03, -0.47)

### 2.3.3.2. Diagrama (IAB-CRB-OIB)t1

#### ✿ Ecuaciones

$$DF1_{(IAB-CRB-OIB)_t1} = 0.5533 \times \ln(La/Th) + 0.2173 \times \ln(Sm/Th) - 0.0969 \times \ln(Yb/Th) + 2.0454 \times \ln(Nb/Th) - 5.6305 \quad (23)$$

$$DF2_{(IAB-CRB-OIB)_t1} = -2.4498 \times \ln(La/Th) + 4.8562 \times \ln(Sm/Th) - 2.1240 \times \ln(Yb/Th) - 0.1567 \times \ln(Nb/Th) + 0.9400 \quad (24)$$

#### ✿ Diagrama

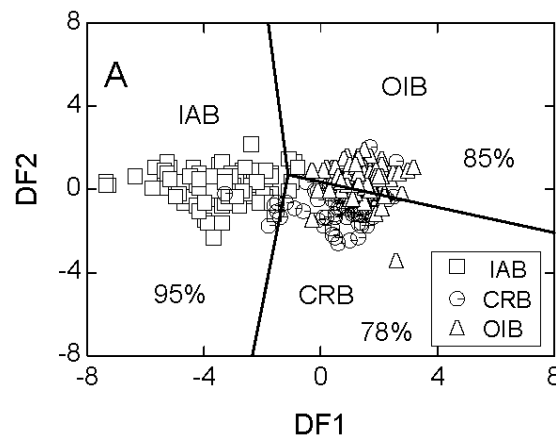


Fig. 2.24 (IAB-CRB-OIB) t1 (Agrawal et al., 2008).

#### ✿ Coordenadas de Frontera

➤ IAB-CRB (-1.12, 0.71) (-2.34, -8.00)

➤ CRB-OIB (-1.12, 0.71) (8.00, -2.08)

➤ IAB-OIB (-1.12, 0.71) (-1.8, 8.00)

### 2.3.3.3. Diagrama (IAB-CRB-MORB)t1

#### ✿ Ecuaciones

$$DF1_{(IAB-CRB-MORB)t1} = 0.3305 \times \ln(La/Th) + 0.3484 \times \ln(Sm/Th) - 0.9562 \times \ln(Yb/Th) + 2.0777 \times \ln(Nb/Th) - 4.5628 \quad (25)$$

$$DF2_{(IAB-CRB-MORB)t1} = -0.1928 \times \ln(La/Th) - 1.1989 \times \ln(Sm/Th) + 1.7531 \times \ln(Yb/Th) + 0.6607 \times \ln(Nb/Th) - 0.4384 \quad (26)$$

#### ✿ Diagrama

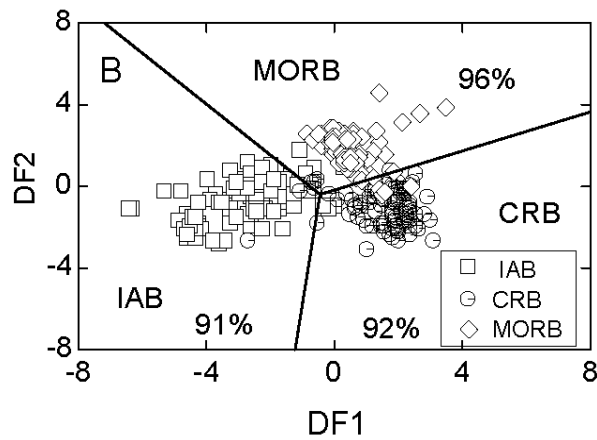


Fig. 2.25 (IAB-CRB -MORB) t1 (Agrawal et al., 2008).

#### ✿ Coordenadas de Frontera

- IAB-CRB (-0.44, -0.39) (-1.22, -8.00)
- CRB-MORB (-0.44, -0.39) (8.00, 3.65)
- IAB-MORB (-0.44, -0.39) (-7.18, 8.00)

### 2.3.3.4. Diagrama (IAB-OIB-MORB)t1

✿ Ecuaciones

$$DF1_{(IAB-OIB-MORB)_t1} = 1.7517 \times \ln(\text{Sm/Th}) - 1.9508 \times \ln(\text{Yb/Th}) + 1.9573 \times \ln(\text{Nb/Th}) - 5.0928 \quad (27)$$

$$DF2_{(IAB-OIB-MORB)_t1} = -2.2412 \times \ln(\text{Sm/Th}) + 2.2060 \times \ln(\text{Yb/Th}) + 1.2481 \times \ln(\text{Nb/Th}) - 0.8243 \quad (28)$$

✿ Diagrama

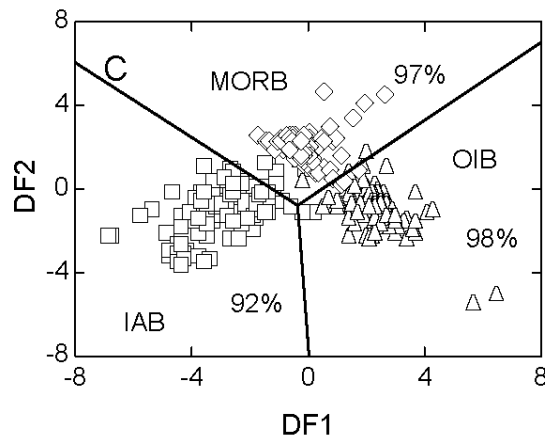


Fig. 2.26 (IAB- OIB-MORB) t1 (Agrawal et al., 2008).

✿ Coordenadas de Frontera

- IAB-OIB (-0.36, -0.78) (0.03, -8.00)
- OIB-MORB (-0.36, -0.78) (8.00, 7.03)
- IAB-MORB (-0.36, -0.78) (-8.00, 6.06)



2.3.3.5. Diagrama (CRB-OIB-MORB)t1

✿ Ecuaciones

$$DF1_{(CRB-OIB-MORB)t1} = -0.5558 \times \ln(La/Th) - 1.4260 \times \ln(Sm/Th) + 2.2935 \times \ln(Yb/Th) - 0.6890 \times \ln(Nb/Th) + 4.1422 \quad (29)$$

$$DF2_{(CRB-OIB-MORB)t1} = -0.9207 \times \ln(La/Th) + 3.6520 \times \ln(Sm/Th) - 1.9866 \times \ln(Yb/Th) + 1.0574 \times \ln(Nb/Th) - 4.4283 \quad (30)$$

✿ Diagrama

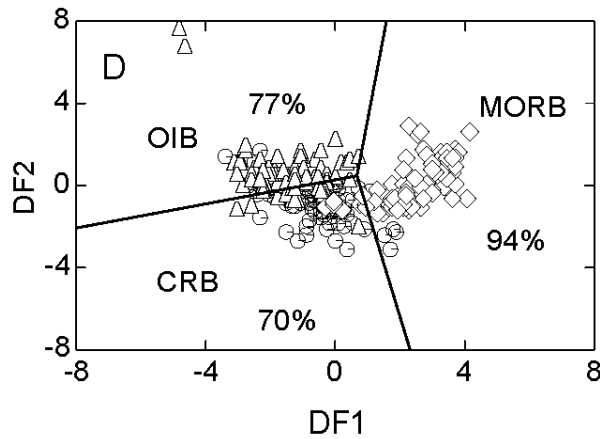


Fig. 2.27 (CRB-OIB-MORB) t1 (Agrawal et al., 2008).

✿ Coordenadas de Frontera

- CRB-OIB (0.67, 0.48) (-8.00, -2.06)
- OIB-MORB (0.67, 0.48) (1.58, 8.00)
- CRB-MORB (0.67, 0.48) (2.31, -8.00)

## **2.4. LENGUAJE DE PROGRAMACION VB.NET**

*Visual Basic .NET (VB.NET) es un lenguaje de programación orientado a objetos que se puede considerar una evolución de Visual Basic implementada sobre el framework .NET.*

*Algunas ventajas de usar este lenguaje son:*

- Visual Basic intenta crear un equilibrio entre confiabilidad, facilidad de uso y eficiencia en la definición del lenguaje.*
- Es un lenguaje fácil de utilizar.*
- Permite un desarrollo rápido del programa sin que se vea afectada la confiabilidad.*
- Produce código predecible y eficiente.*

## Capítulo 3

### ESTADO DEL ARTE EN PROGRAMAS COMO HERRAMIENTAS DE GRAFICACIÓN GEOQUÍMICA QUE CONTENGAN DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN TECTONOMAGMÁTICA

Existen una gran variedad de programas que sirven como herramientas para graficar en diagramas de discriminación tectonomagmática. A continuación se mencionan algunos de ellos.

#### 3.1. IgPet

IgPet es un software comercial que maneja diagramas petrológicos, incluyendo Harker, Fenner, triangulares y gráficas log. Diagramas para fines especiales, por ejemplo, Irvine y Baragar (1971), incluye CMAS O'Hara, Walker, Grove, Baker y Eggler, incluye diagramas de araña REES, Wood, Thompson, Sun y McDonough, (RockWare, 2010).

#### 3.2. Newpet

Newpet es un software hecho en quickBasic en Ms-Dos como un software comercial, realiza cálculos geoquímicos y un gran número de gráficos geotectónicos, realiza la norma CIPW, también realiza cálculos petrogénicos, cristalización parcial o fraccionada, (Clarke, 1994).

#### 3.3. Minpet

Minpet es un software hecho en Visual Basic, para Windows 3.1/95/98, realiza una gran variedad de gráficas geotectónicas, (Richard, 1995).

#### 3.4. GCDKit

GCDKit es programa de libre distribución, escrito en el lenguaje informático R, para el cálculo de estadísticas y gráficos. Es un paquete para Petrología ígnea, pero puede ser generalizada para representar cualquier otro tipo de gráficas (Janoušek et al., 2006). Algunos de los diagramas que contiene este software son:

- Zr/4-2Nb-Y, (Meschede, 1986)
- (Pearce, 1973)
- Pearce, 1979)
- MgO-FeO<sub>t</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Pearce et al., 1977)
- (Shervais, 1982)
- Th-Hf/3-Ta, (Wood, 1980)
- Th-Hf/3-Nb/16 (Wood, 1980)
- Th-Zr/117-Nb/16 (Wood, 1980)

### **3.5. Petrograph**

Petrograph es un software de libre distribución, para visualizar, modelar, y presentar datos geoquímicos de Petrología ígnea, Geoquímica, Geofísica, capaz de representar los datos en diferentes diagramas, incluye clasificaciones y gráficas "Petro-tectónicas. El código fuente está escrito en Visual Basic 6.0 y se ejecuta bajo las plataformas Windows 98/2000/XP, (Petrelli, 2005).

Algunos de los diagramas que contiene este software son:

- [Q'(F')-ANOR-volcanic] (Streckeisen et al., 1979)
- [K,O-SiO<sub>2</sub>] (Middlemost, 1975)
- [TAS Alkalies-Silica-volcanic] (LeBas et al., 1986)
- [SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>OAndesite Types] (Gill, 1981)
- AFM (Irvine et al., 1971)
- [Ti-Zr] (Pearce et al., 1973)
- [Ti-Zr-Y] (Pearce et al., 1973)
- [Ti-Zr-Sr] (Pearce et al., 1973)
- [Nb-Zr-Y] (Meschede, 1986)
- [Th-Hf-Ta] (Wood, 1980)
- [Nb-Y] (Pearce et al., 1984)
- [Ta-Yb] (Pearce et al., 1984)
- [Rb-(Y+Nb)] (Pearce et al., 1984)
- [Rb-(Yb+Ta)] (Pearce et al., 1984)

### **3.6. Geoplot**

Geoplot es una aplicación en una hoja de cálculo de Excel, usada para el almacenamiento manipulación y graficar datos geoquímicos, (Zhou et al., 2006).

Otra opción que se ha utilizado para la distinción de ambientes tectónicos, es el empleo de redes neuronales, un ejemplo de ello se muestra en el trabajo "Geochemical characterization of oceanic basalts using Artificial Neural Network", (Das, 2009).

Existen muchos y muy variadas opciones para realizar gráficas geotectónicas, desde programas libres hasta programas comerciales, hechos para entornos MS-dos, Windows y Mac, sin embargo, todos estos programas no contemplan los diagramas recomendados por (Verma, 2010), los cuales han resultado ser muy exitosos al momento de determinar el ambiente tectónico.

## Capítulo 4

# TecD SOFTWARE PARA LA APLICACIÓN DE DIAGRAMAS DE DISCRIMINACIÓN TECTONOMAGMÁTICA

### 4.1. ESTRUCTURA DEL SOFTWARE

TecD es un programa basado en los diagramas, (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008), programado en el lenguaje Visual Basic.net, bajo el Framework 1.1 en la plataforma Windows. Los datos de entrada y salida del software son archivos de Excel con los formatos (\*.xls, \*.xlsx), o Statistica con el formato (\*.sta) y gráficas en los formatos wmf, gif, bmp.

#### 4.1.1. Diagrama básico

El Software consta de entrada de datos, procesamiento y salida, Fig. 4.1.

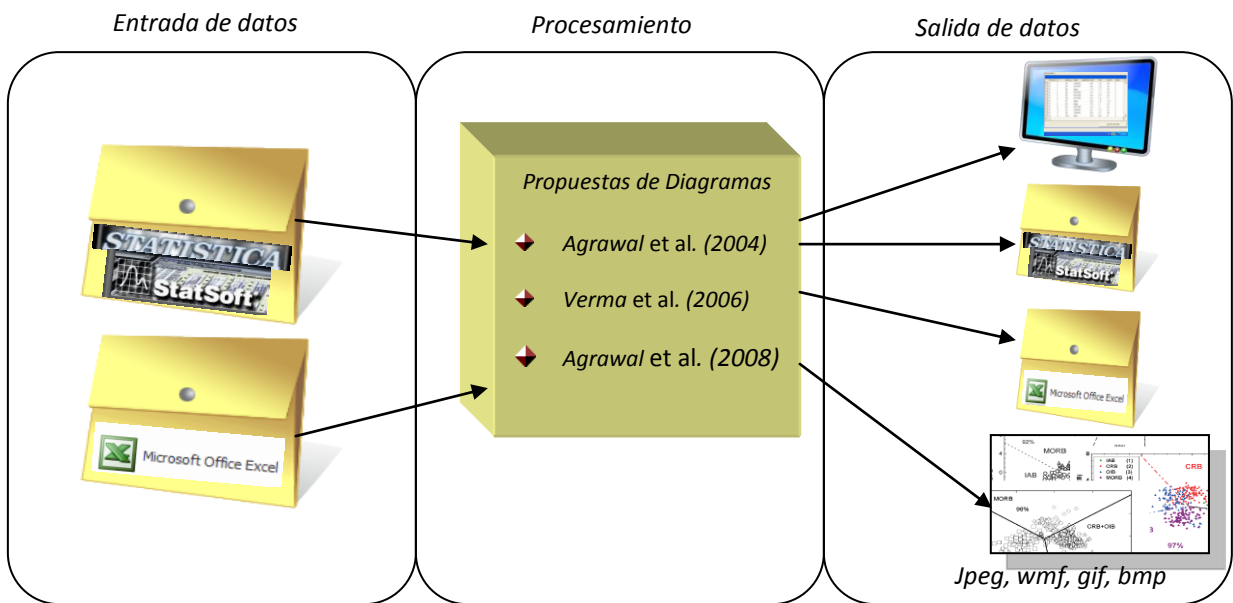


Fig. 4.1 Diagrama básico de la estructura del software.

#### 4.1.2. Entrada de datos

La entrada de datos para el software TECD se realiza mediante un archivo de datos hecho en Microsoft Excel (\*.xls o \*.xlsx) o en StatSoft-Statistica, la estructura del archivo se encuentra predeterminada por una plantilla con los campos necesarios para el uso de TecD. Se Debe tomar en consideración que los nombres de los campos propuestos en la plantilla, no deben modificarse y deben encontrarse todos en el archivo, ya que, de no ser así, TecD no será capaz de procesar el archivo de entrada.

Los campos de entrada y resultados que debe contener el archivo de entrada de TecD se encuentran listados en la tabla 4.1 organizados con respecto a la propuesta de grupo de diagramas.

<b>Propuesta de grupo de diagramas</b>	<b>Campos de entrada</b>		<b>Campos de resultados</b>	
	<b>Información General</b>	<b>Elementos mayores ajustados</b>	<b>Resultados de ecuaciones</b>	<b>Ambiente tectónico resultante</b>
<i>Agrawal (2004)</i>	SERIAL_NUM, NAME, INDMSTRA	SIO2ADJ, TIO2ADJ, AL2O3ADJ, FE2O3ADJ, FEOADJ, MNOADJ, MGOADJ, CAOADJ, NA2OADJ, K2OADJ, P2O5ADJ.	DF1_1234m1, DF2_1234m1, DF1_123m1, DF2_123m1, DF1_124m1, DF2_124m1, DF1_134m1, DF2_134m1, DF1_234m1, DF2_234m1,	TECTYPE_1234m1 TECTYPE_123m1 TECTYPE_124m1 TECTYPE_134m1 TECTYPE_234m1
<i>Verma (2006)</i>			DF1_1234m2, DF2_1234m2, DF1_123m2, DF2_123m2, DF1_124m2, DF2_124m2, DF1_134m2, DF2_134m2, DF1_234m2, DF2_234m2,	TECTYPE_1234m2 TECTYPE_123m2 TECTYPE_124m2 TECTYPE_134m2 TECTYPE_234m2
<i>Agrawal (2008)</i>		LA,SM,NB,YB,TH	DF1_1234t1, DF2_1234t1, DF1_123t1, DF2_123t1, DF1_124t1, DF2_124t1, DF1_134t1, DF2_134t1, DF1_234t1, DF2_234t1,	TECTYPE_1234t1 TECTYPE_123t1 TECTYPE_124t1 TECTYPE_134t1 TECTYPE_234t1

Tabla 4.1 descripción de las variables del archivo de entrada y salida de TecD.

Los campos de entrada son los datos con los que se alimentara el programa y los campos de resultados es en donde TecD almacenara los resultados que obtuvo después de procesado el archivo de entrada.

➔ Descripción de los campos de entrada:

Los campos de entrada se encuentran divididos en dos partes:

✿ *Información general:*

*SERIAL\_NUM* ← Número consecutivo

*NAME* ← Nombre de la muestra

*INDMSTRA* ← Indicador de procesamiento

✿ *Datos de elementos mayores:*

Para procesar un archivo con la propuesta de diagramas, (Agrawal et al., 2004) y/o (Verma et al., 2006), el archivo debe tener información en los campos: **SIO2ADJ, TIO2ADJ, AL2O3ADJ, FE2O3ADJ, FEOADJ, MNOADJ, MGOADJ, CAOADJ, NA2OADJ, K2OADJ, P2O5ADJ**, los cuales son elementos mayores ajustados, obtenidos mediante un previo procesamiento de los datos con el programa SINCLAS, (Verma et al., 2002).

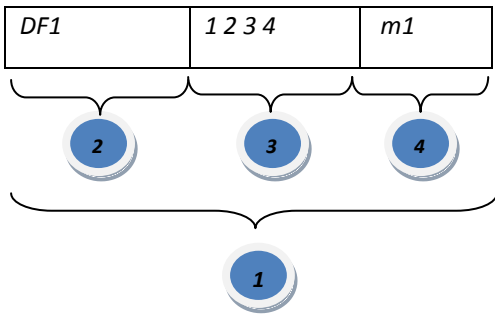
Para procesar un archivo con la propuesta de diagramas, (Agrawal, 2008), el archivo debe contener información en los campos: **LA, SM, NB, YB, TH**, los cuales son los elementos traza, Lantano, Samario, Niobio, Yterbio y Torio.

➔ Descripción de los campos de resultados

La sección de resultados consta de quince campos por cada una de las propuestas de diagramas, diez son para resultados de cada par de ecuaciones de diagrama nombrados "DF", y cinco para el nombre del ambiente tectónico resultante por cada diagrama nombrado "TECTYPE".

El nombre de los campos en donde se almacenan los resultados de las ecuaciones se describe con el siguiente ejemplo.

**Ejemplo: DF1\_1234m1**



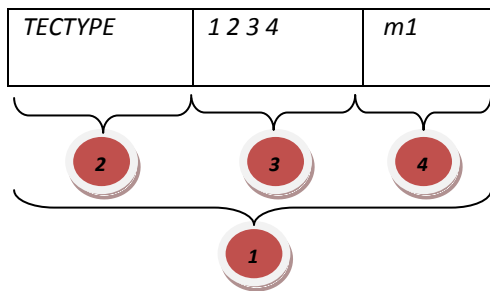
Número	Descripción
1	El resultado en la columna de este campo es un valor numérico.
2	DF1: Función Discriminante en el eje X. DF2: Función Discriminante en el eje Y.
3	Como se describe en la tabla 2.1 la combinación de los 4 ambientes, representa cada uno de los 5 diagramas propuestos en los artículos.  Los números 1, 2, 3, 4 corresponden a cada uno de los 4 ambientes tectónicos  <b>1= IAB, 2=CRB, 3=OIB, 4=MORB</b> Entonces las combinaciones para cada diagrama son representados por:  1234, 123, 124, 134, 234
4	m1= Mayores Artículo (Agrawal et al., 2004)  m2=Mayores Artículo (Verma et al., 2006)  t1= Traza Artículo (Agrawal et al., 2008)





**Tabla 4.2 Descripción de los nombres de los campos en donde TecD almacena el resultado del procesamiento.**



A continuación se hace una descripción del nombre de los campos en donde se almacena el nombre del ambiente tectónico resultante.

**Ejemplo: TECTYPE\_1234m1**



<b>Numero</b>	<b>Descripción</b>
	El resultado en la columna de este campo indica el nombre del ambiente en donde cayó la muestra el resultado puede ser: <ul style="list-style-type: none"> <li>➔ IAB</li> <li>➔ CRB</li> <li>➔ OIB</li> <li>➔ MORB</li> </ul>
	La palabra TECTYPE, es constante.
	Indica el diagrama de acuerdo a la combinación de números como se muestra en la tabla 4.2.
	Indica a que artículo pertenece el resultado como se muestra en la tabla 4.2.

**Tabla 4.3** Descripción de los nombres de los campos en donde TecD almacena el nombre del ambiente resultante del procesamiento.

### 4.1.3. Procesamiento

El procesamiento del archivo depende de las opciones que hayan sido seleccionadas en la interface y consta de 2 partes principales. Fig.4.2

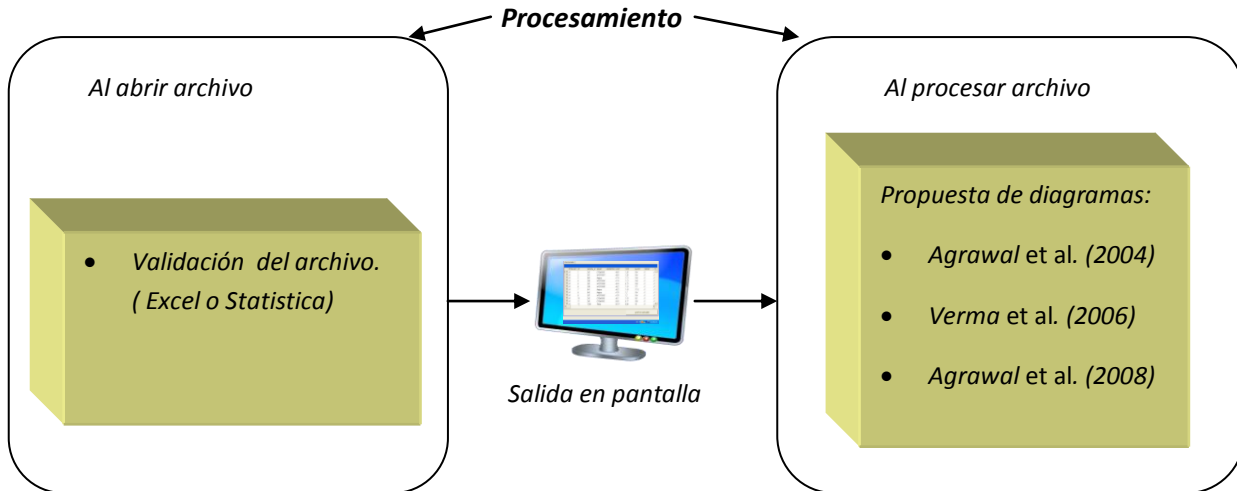


Fig. 4.2 Diagrama básico del procesamiento.

**1.- Cuando se abre el archivo:** El software verifica que todos los campos y datos se encuentren correctamente en el archivo de entrada. Una vez concluida esta tarea, el programa mostrara una tabla en pantalla del archivo abierto, y una sub-tabla con los posibles errores encontrados, los errores pueden deberse a:

- No se encuentran todos los campos que necesita TecD en el archivo.

Cuando el archivo de entrada no contiene todos los nombres campos necesarios o no se encuentran debidamente escritos, TecD detecta cuales son los campos y despliega una lista con los campos faltantes, como se muestra en la Fig. 4.5.

ID	COLUMN	DESCRIPTION
0	CONSI, SERIAL_NUM	La columna no se encontro en el archivo
1	NAME	La columna no se encontro en el archivo
2	INDMSTRA	La columna no se encontro en el archivo
3	FE_PROC	La columna no se encontro en el archivo
4	SIO2ADJ	La columna no se encontro en el archivo
5	TIO2ADJ	La columna no se encontro en el archivo
6	AL2O3ADJ	La columna no se encontro en el archivo
7	FE2O3ADJ	La columna no se encontro en el archivo
8	FEOADJ	La columna no se encontro en el archivo
9	MNOADJ	La columna no se encontro en el archivo
10	MGOADJ	La columna no se encontro en el archivo
11	CAOADJ	La columna no se encontro en el archivo
12	NA2OADJ	La columna no se encontro en el archivo
13	K2OADJ	La columna no se encontro en el archivo
14	P2O5ADJ	La columna no se encontro en el archivo
15	LA	La columna no se encontro en el archivo
16	SM	La columna no se encontro en el archivo
17	YB	La columna no se encontro en el archivo
18	BA	La columna no se encontro en el archivo
19	TH	La columna no se encontro en el archivo
20	V	La columna no se encontro en el archivo
21	Y	La columna no se encontro en el archivo
22	ZP	La columna no se encontro en el archivo

Fig. 4.3 Lista de Columnas faltantes en el archivo de entrada de TecD.

- No se encontraron datos o los datos no son numéricos en algún campo necesario para procesar por alguna de las opciones de propuestas de diagramas seleccionados.

Al seleccionar alguna de las tres o todas las opciones de las propuestas de diagramas, (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008). TecD revisará que el archivo de entrada contenga la información completa por cada opción seleccionada en el menú principal, y mostrara en pantalla las inconsistencias que haya detectado.

En la columna “TOTAL\_ERROR” se muestra el número total de errores o advertencias por registro la sección de errores se encuentra disponible en una sub-tabla por cada registro, en la parte izquierda de cada registro puede acceder haciendo clic en el signo “+” y posteriormente en “Errors”.

TOTAL ERR	ID	SERIAL_NU	NAME	INDMSTRA	FE_PROC	SIO2ADJ	TIO2ADJ	AL2
<-- Warning	1	18129	SoHo0001		MIDDLEMO	49.361	3.188	15.5
<-- Warning	2	18129	SoHo0002		MIDDLEMO	49.361	3.188	15.5
<-- Warning	3	18129	SoHo0003		MIDDLEMO	49.361	3.188	15.5

NUMERROR	IDERROR	COLUMNA	NOMBRE_C	FILA	VALOR	TIPO DE ERROR
1	1	23	SM	2		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos
2	1	24	YB	2		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos
3	1	27	TH	2		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos

Fig. 4.4 Forma de acceso a la información de errores que detectó TecD.

Posteriormente se desplegará una tabla con la información de errores, como se muestra en la Fig. 4.5.

tabla1: TOTAL ERRORS: <-- Warning ID: 1 SERIAL_NUM: 18129 NAME: SoHo0001 INDMSTRA: FE_PROC: MIDDLEM						
NUMERROR	IDERROR	COLUMNA	NOMBRE_C	FILA	VALOR	TIPO DE ERROR
1	1	23	SM	2		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos
2	1	24	YB	2		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos
3	1	27	TH	2		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos

Fig. 4.5 Sub-tabla que contiene información de los errores que TecD detectó en el archivo de entrada

En donde:

- ✿ **NUMERROR:** Contador de número de errores por registro.
- ✿ **IDERROR:** número de muestra.
- ✿ **COLUMNA:** El número de columna donde se encuentra el error.
- ✿ **NOMBRE\_COLUMNA:** El nombre de la columna donde se encuentra el error.
- ✿ **FILA:** La fila en el archivo donde se encuentra el error.
- ✿ **VALOR:** El valor que contiene la celda.
- ✿ **TIPO DE ERROR:** Descripción del error.

En la Fig. 4.6 se muestra como se encuentra estructurado el proceso de validación del archivo.

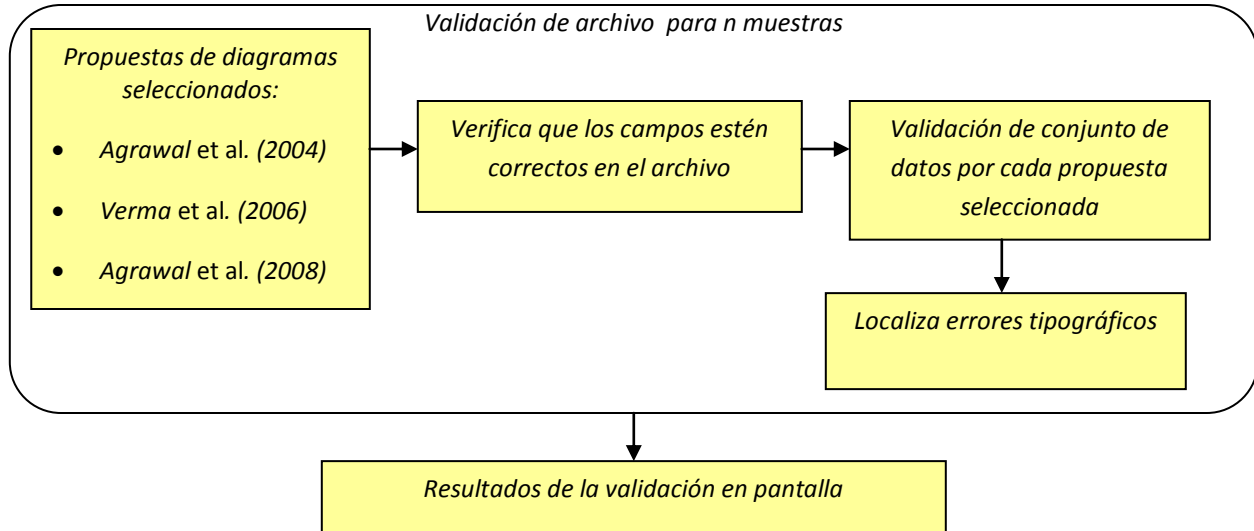


Fig. 4.6 Estructura general del proceso de validación del archivo.

**2.- Cuando el usuario decide procesar el archivo:** TecD verifica la cantidad de errores en el archivo y entonces, el software procesa el archivo con respecto a las opciones de las propuestas de diagramas seleccionadas de las, realizando por cada muestra una serie de operaciones.

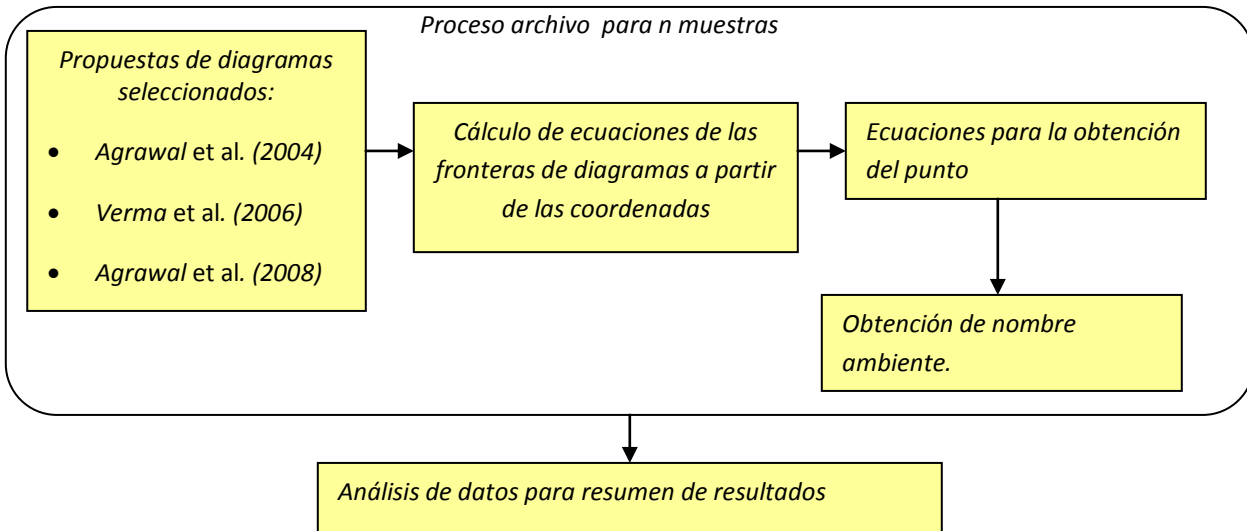


Fig. 4.7 Estructura general del procesamiento del archivo.

#### **4.1.4. Salida de datos**

La salida de datos se realiza de 3 formas:

##### **✿ Tabla y sub-tabla de datos en pantalla**

Tabla en donde podemos observar los datos contenidos en el archivo posterior a la validación y los resultados del archivo una vez que se ha realizado el procesado.

Sub-tabla en donde podemos visualizar la ubicación y descripción de los posibles errores que contienen los datos del archivo y las advertencias de procesamiento.

##### **✿ Archivo de Excel o Statistica**

La salida en archivo depende básicamente del formato del archivo de entrada ya sea Excel o Statistica, TecD genera 2 archivos diferentes al terminar el procesamiento del archivo de entrada.

1.-Un archivo con terminación **res**, este archivo es una copia del que fue abierto, pero con todos los resultados de los cálculos realizados por TecD

2.- Un archivo con terminación **rep**, contiene una tabla con un resumen de los resultados obtenidos en TecD, con los porcentajes totales de muestras que cayeron en cada uno de los 4 ambientes tectónicos.

##### **✿ Gráficas**

La opción de gráficas es activada en el menú principal cuando el procesamiento es terminado con éxito, las gráficas pueden visualizarse en pantalla y en archivos generados en el directorio seleccionado con extensión wmf, o mediante la opción **“Guardar como...”** del menú **“Archivo”** para grabar individualmente cada gráfica con extensión wmf, bmp o gif en la ubicación preferente.

## 4.2. FUNCIONAMIENTO LÓGICO DEL SOFTWARE

El software se encuentra orientado a eventos, sin embargo, con la finalidad de esquematizar de manera generalizada el programa se muestra el siguiente diagrama de flujo.

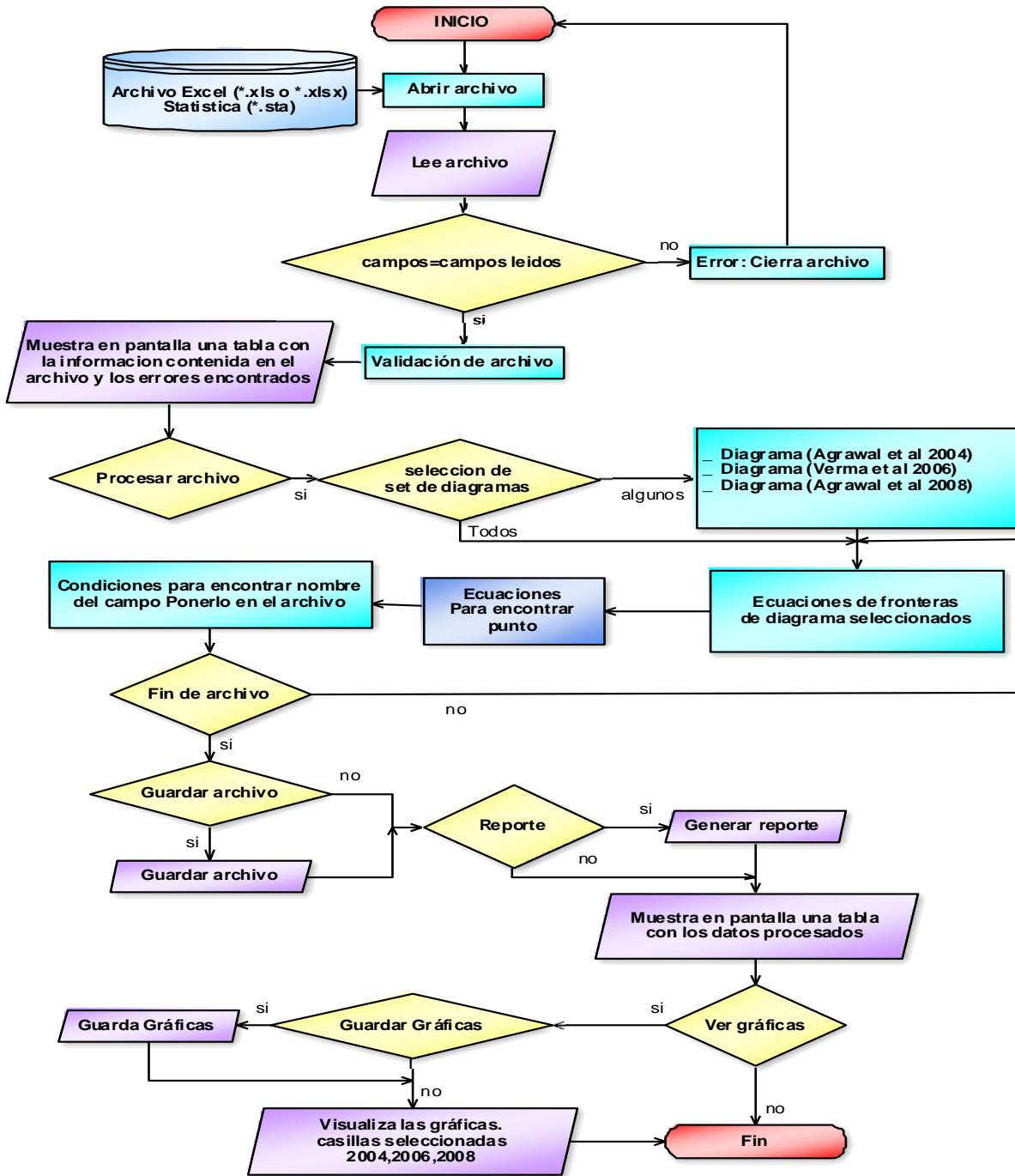


Fig. 4.8 Diagrama de flujo del programa

### 4.3. ESTRUCTURA DE LA INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz de usuario es la parte del programa que hace que el usuario interactúe con el programa, de tal forma que en ésta es en donde el usuario elige los eventos que desea que ocurran, al iniciar TecD se abrirá una ventana como se muestra en la Fig.4.5, la cual consta de:

- 1) Barra de Menú.
- 2) Barra de íconos.
- 3) Área Contenedora de ventanas.

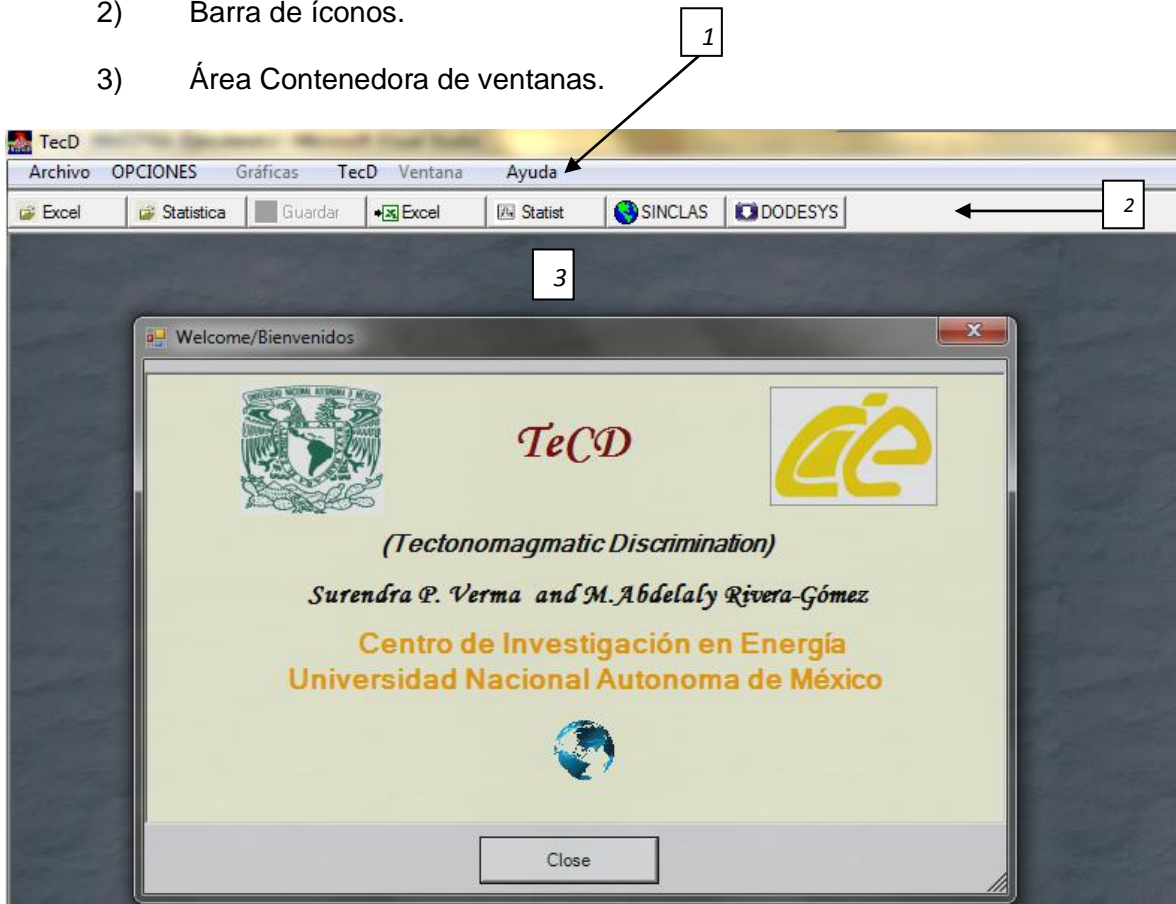


Fig. 4.9 Pantalla principal del programa TecD, en el área contenedora se encuentra la pantalla de bienvenida de TecD.



### 4.3.1. Barra de menú.

La barra de menú de TecD es la parte en donde se encuentran las principales opciones del programa.

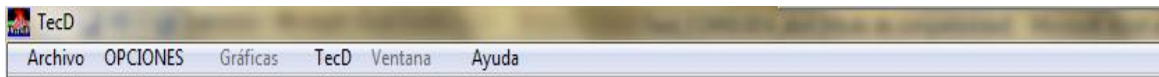


Fig. 4.10 barra de menú de TecD.

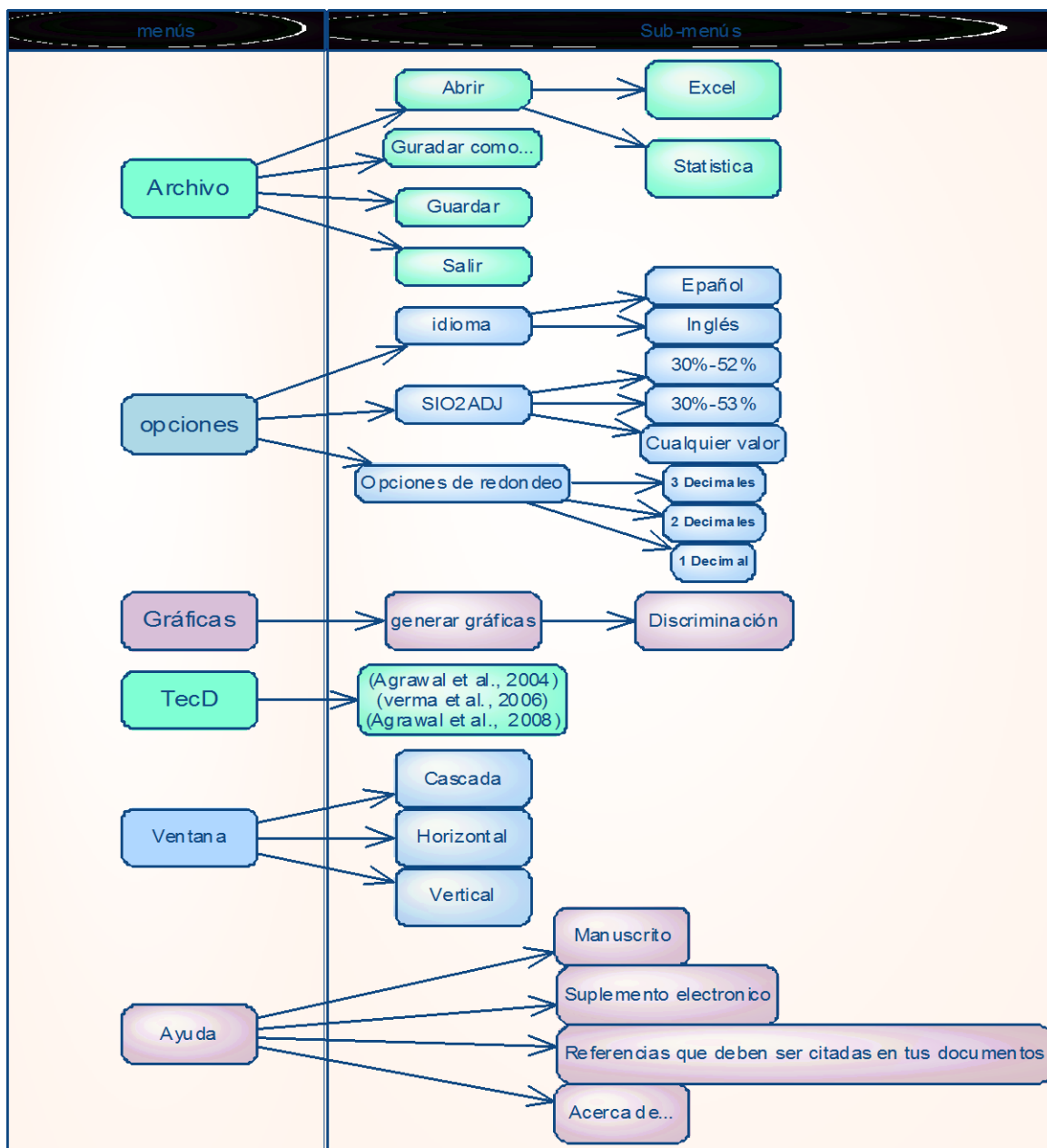


Fig. 4.11 Estructura de la barra de menú.

### 4.3.2. Barra de íconos

La barra de íconos de TecD contiene 6 botones que proporcionan un acceso directo a ciertas funciones.

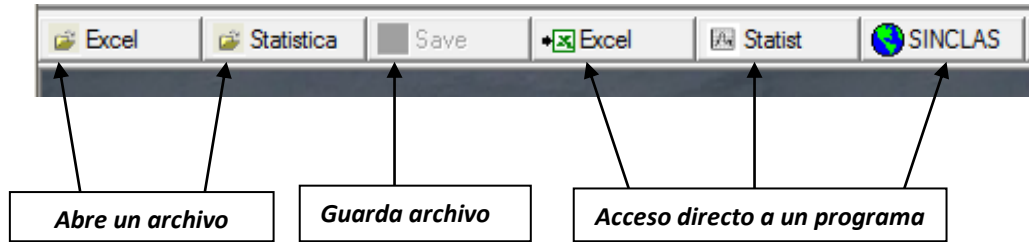


Fig. 4.12 Barra de íconos de la pantalla principal

## 4.4. VALIDACIÓN DEL SOFTWARE TecD.

### 4.4.1. Validación de ecuaciones

La validación de las ecuaciones de TecD se realizó mediante un archivo de Statística en donde ya se habían programado las funciones de cada uno de los diagramas propuestos por (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008), en la Fig.4.13, se muestra un ejemplo de la función programada en la columna DF1\_1234.

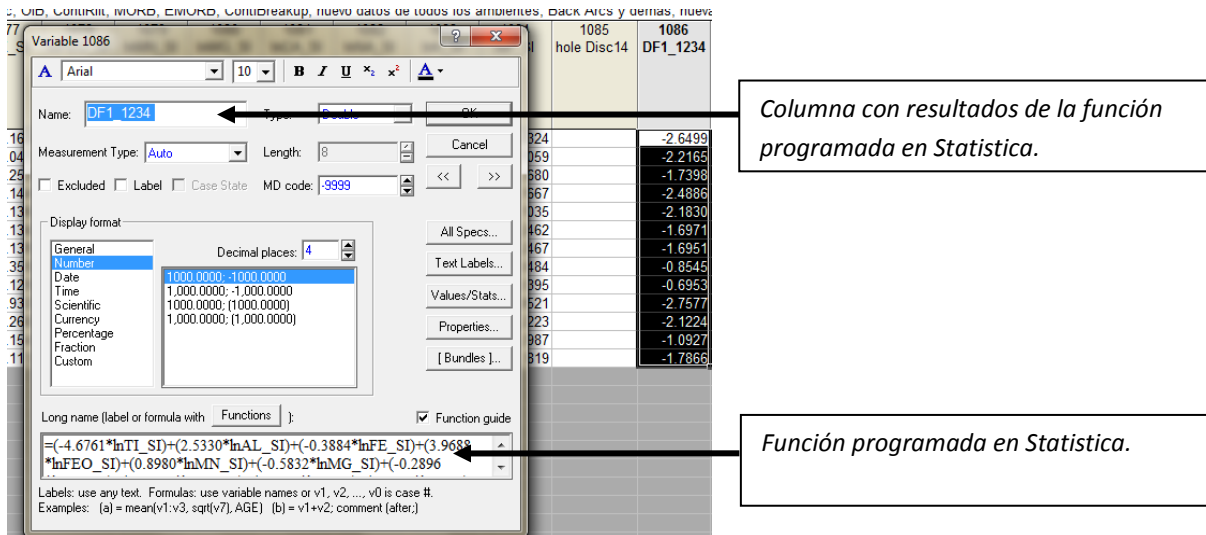


Fig. 4.13 Ejemplo de las funciones programadas en Statística.

Para verificar que no existiera error en TecD en las ecuaciones se compararon los resultados, realizando una resta entre los resultados de las funciones programadas en Statistica con los resultados del programa TecD, por cada una de las propuestas de diagramas.

En la tabla 4.4 se muestra un ejemplo de la validación de las ecuaciones del primer diagrama (1234) de la propuesta del artículo (Verma et al., 2006).

Registros	Resultados de funciones programadas en Statistica		Resultados de TecD		Diferencia entre resultados	
	DF1_1234	DF2_1234	DF1_1234m2	DF1_1234m2	DF1_1234 - DF1_1234m2	DF1_1234 - DF1_1234m2
SoHo0001	-2.64994573	-0.01602063	-2.64994573	-0.01602063	0.00	0.00
SoHo0002	-2.21649949	0.49862638	-2.21649949	0.49862638	0.00	0.00
SoHo0003	-1.73982718	-0.32759215	-1.73982718	-0.32759215	0.00	0.00
SoHo0004	-2.48859622	-0.11214024	-2.48859622	-0.11214024	0.00	0.00
SoHo0005	-2.18303638	0.24935516	-2.18303638	0.24935516	0.00	0.00
SoHo0006	-1.69711115	0.08608351	-1.69711115	0.08608351	0.00	0.00
SoHo0007	-1.6951061	0.07980003	-1.6951061	0.07980003	0.00	0.00
SoHo0008	-0.85450657	-0.26874808	-0.85450657	-0.26874808	0.00	0.00
SoHo0009	-0.69532136	0.07154823	-0.69532136	0.07154823	0.00	0.00
SoHo0010	-2.75772621	0.5897119	-2.75772621	0.5897119	0.00	0.00
SoHo0011	-2.12239284	-0.40228103	-2.12239284	-0.40228103	0.00	0.00
SoHo0012	-1.09265335	0.72757206	-1.09265335	0.72757206	0.00	0.00
SoHo0013	-1.78662922	-0.14974024	-1.78662922	-0.14974024	0.00	0.00

Tabla 4.4 Validación de ecuaciones TecD, los datos de las muestras fueron sacados de (Soager et al., 2009)

#### 4.4.2. Validación de diagramas

La validación de las ecuaciones de las fronteras de los diagramas se realizó comparando los diagramas de TecD con los diagramas hechos previamente en un archivo de Statistica.

En la Fig. 4.14 se muestra una comparación de un diagrama hecho en Statistica y un diagrama hecho en TecD.

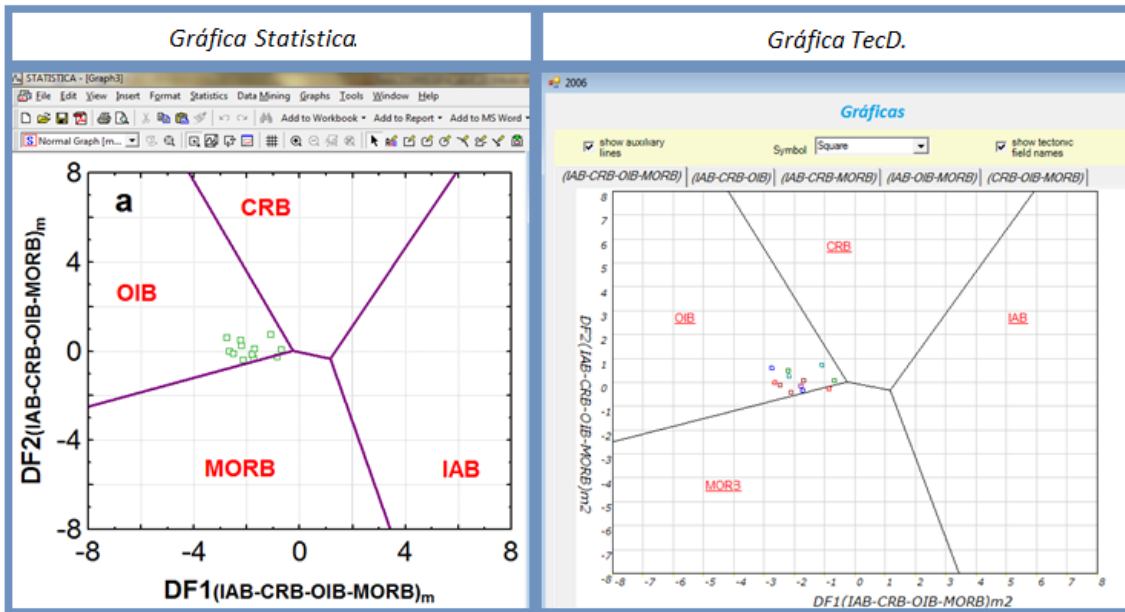


Fig. 4.14 Ejemplo de comparación de diagramas

#### 4.4.3. Validación del nombre del ambiente resultante de TecD

Para saber si TecD estaba dando el campo correcto en donde se localizaba la muestra, se compararon los resultados del nombre de ambiente de TecD con los diagramas programados en un archivo de Statistica y verificando que el nombre correspondía al nombre del ambiente en la grafica.

En la Fig. 4.15 se muestra un ejemplo que muestra el nombre que resulta de TecD con respecto a la posición del punto en el diagrama hecho en Statistica el cual corresponde al diagrama 1234m2 (Verma et al, 2006).

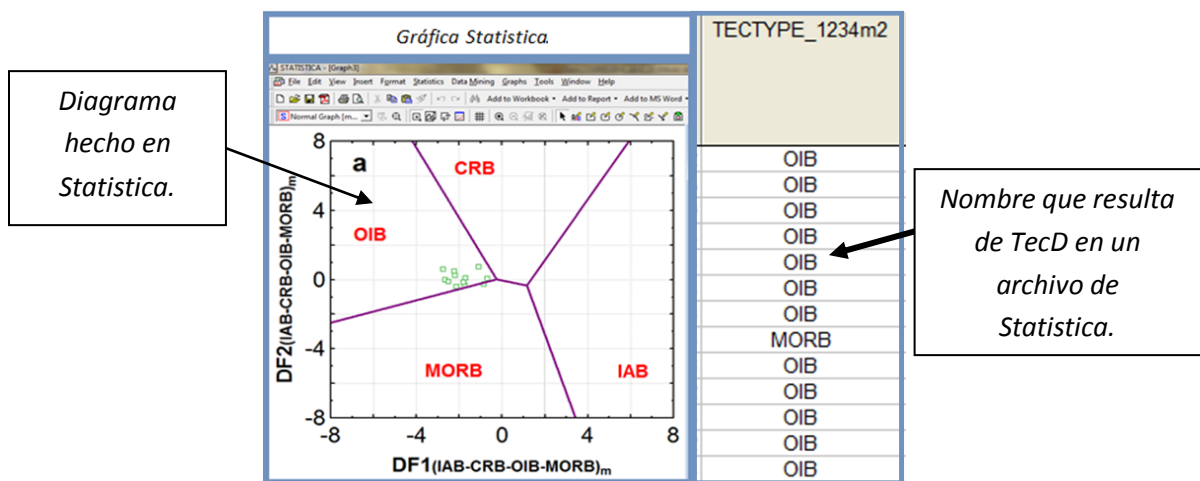


Fig. 4.14 Ejemplo de validación de nombre con respecto a la posición del punto en el diagrama.

#### 4.4.4. Validación del archivo de reporte

Se sumaron el número de puntos por campo en cada diagrama y se compararon con el archivo de reporte que genera TecD.

## Capítulo 5

### APLICACIÓN DEL SOFTWARE A CAMPOS GEOTÉRMICOS

#### 5.1 CASO DE ESTUDIO I: CAMPO GEOTÉRMICO DE PALINPINON, LA ISLA DE NEGROS, FILIPINAS.

##### 5.1.1 Campo geotérmico de Palinpinon, La isla de negros, Filipinas

Las islas Filipinas se encuentran localizadas entre la placa Filipinas y la placa Euroasiática en una zona de subducción.

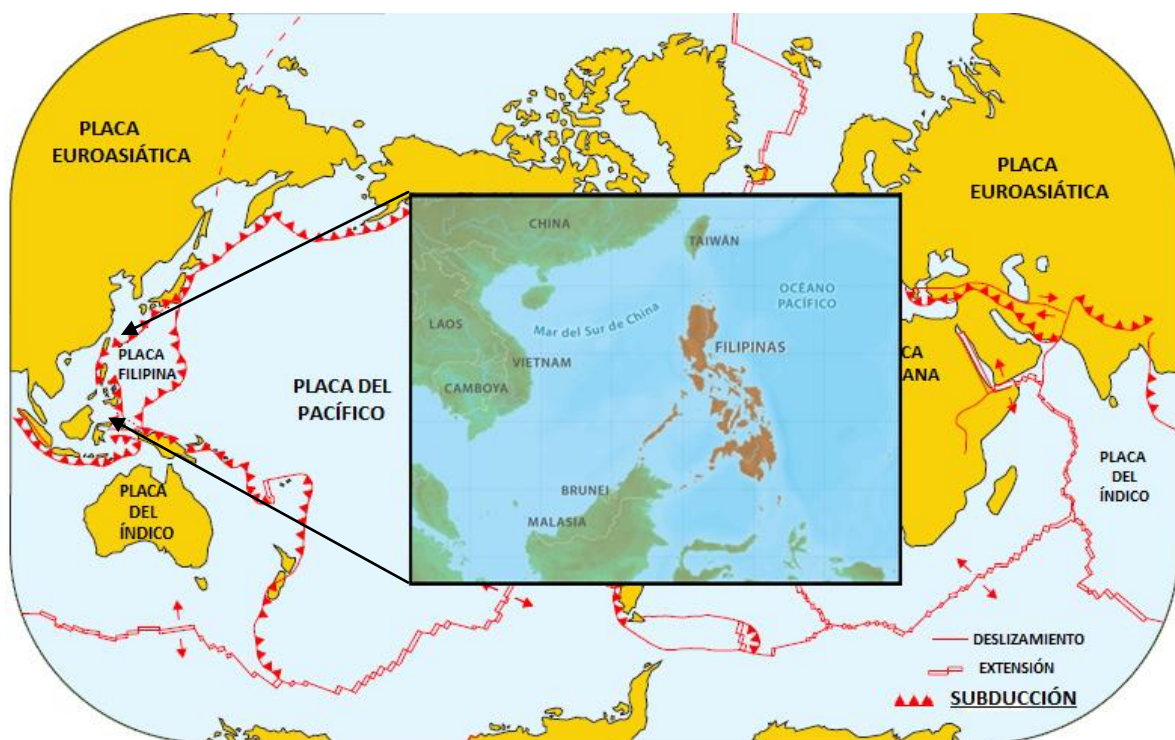


Fig. 5.1 Mapa de localización de Filipinas, (IGN, 2010).

Filipinas se encuentra dentro de los primeros lugares en producción de energía eléctrica a través de la geotermia, con una producción aproximada de 1,912 Mwe.

PAÍS	MWe
1. Estados Unidos	3,093.5
→ 2. Filipinas	1,912.2
3. Indonesia	1,197.3
4. México	958.0
5. Italia	842.5
6. Nueva Zelanda	628.0
7. Islandia	574.6
8. Japón	555.2
9. El Salvador	204.4
10. Kenya	167.0

Fig. 5.2 capacidad geotermoeléctrica en Mega Watts eléctricos instalada en cada país Gutiérrez (2010).

### 5.1.2 Entrada de datos

Un total de 31 muestras fueron extraídas y capturadas en el archivo de entrada que utiliza el programa TecD, del artículo de (Rae et al., 2004).

### 5.1.3 Procesamiento de los datos en TecD

Una vez lanzada la aplicación una pantalla de "Bienvenida" se abrirá, la cual deberá ser cerrada, para habilitar las opciones de TecD.

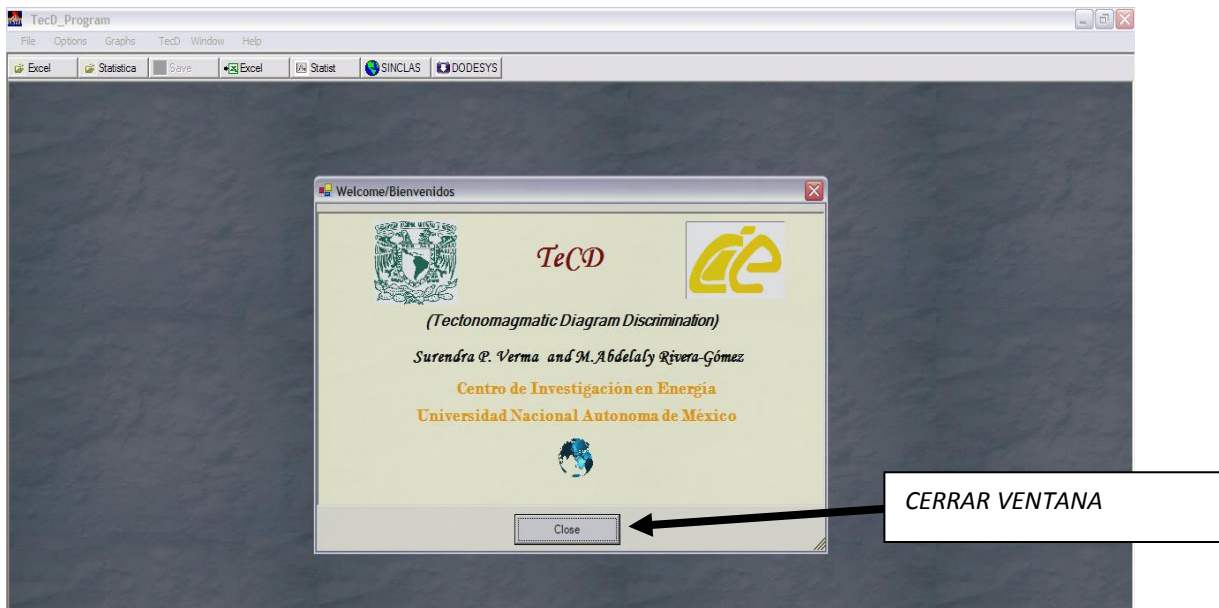


Fig.5.3. Pantalla de Bienvenida TecD.

Una vez Cerrada la ventana de bienvenida, se debe ir al menú **OPTIONS** debido a que TecD se encuentra en Idioma Inglés por defecto, en donde:

1.-Se cambiará el idioma a Español

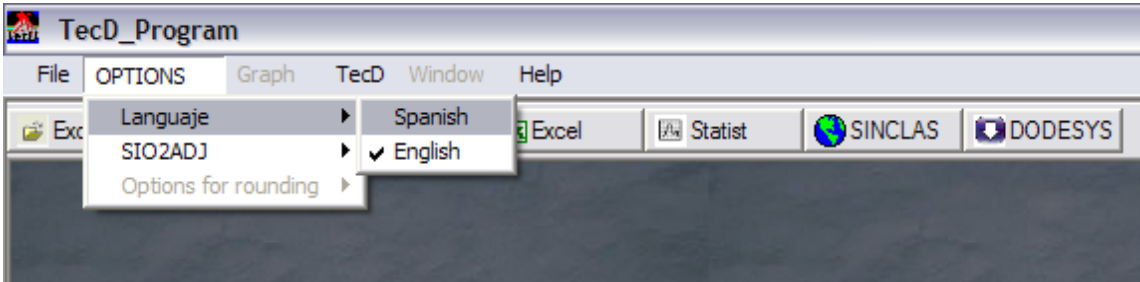


Fig. 5.4 Barra de menú en idioma Inglés.

2.-Se revisará el intervalo que será válido para SIO2ADJ (Oxido de Silicio Ajustado).

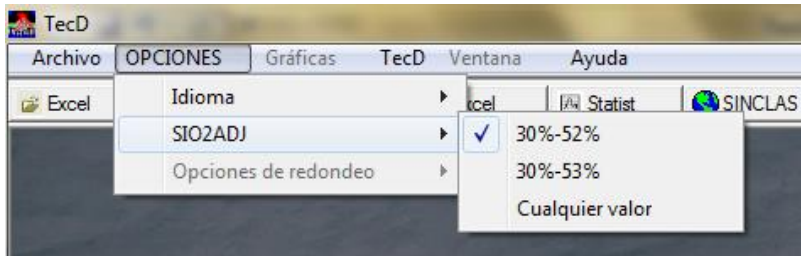


Fig. 5.5 Submenú de la barra menú para cambiar las opciones de SIO2ADJ.

Una vez configurado las opciones del menú **OPCIONES** debe revisar la opciones del menú **TecD**, en donde por defecto el programa tiene elegidos la propuesta de diagramas de los artículos (2004-2008), sin embargo se puede seleccionar o des-seleccionar las opciones.

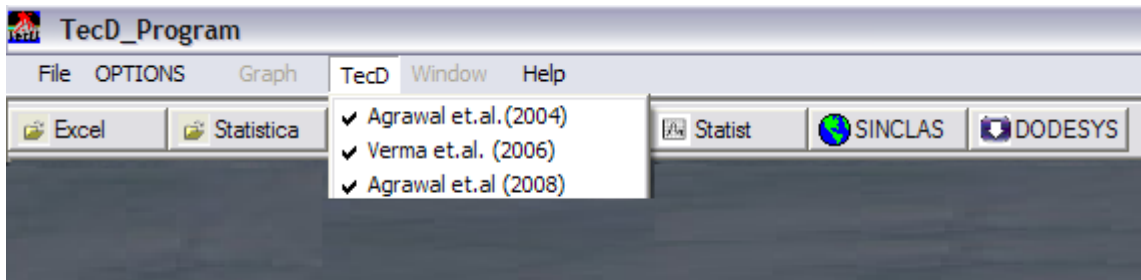


Fig. 5.6 Submenú de la barra menú para cambiar las opciones de TecD.



Una vez configurado TecD, para abrir un archivo se debe ir al menú **Archivo** o **directamente a la barra de íconos**. En donde elegiremos abrir un Archivo en formato Statistica.

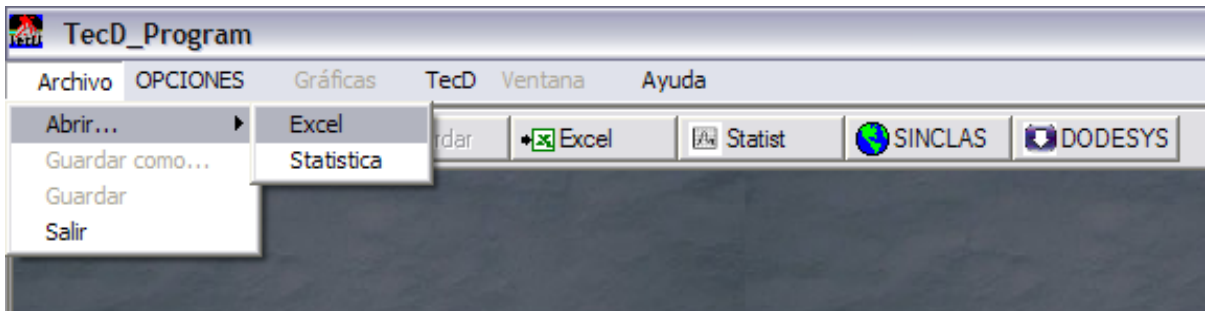


Fig. 5.7 Archivo → Abrir archivo desde la barra de menú.

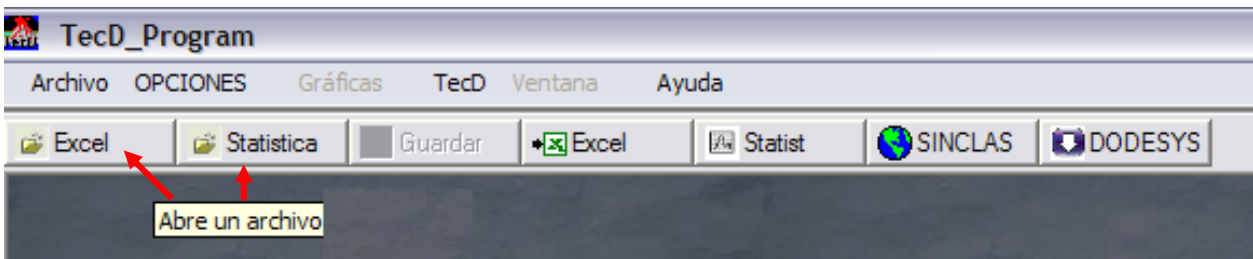


Fig. 5.8 Abrir archivo desde la barra de íconos.

Una vez elegido el formato en el que abrirá el archivo se mostrará la ventana de la Fig.5.9.

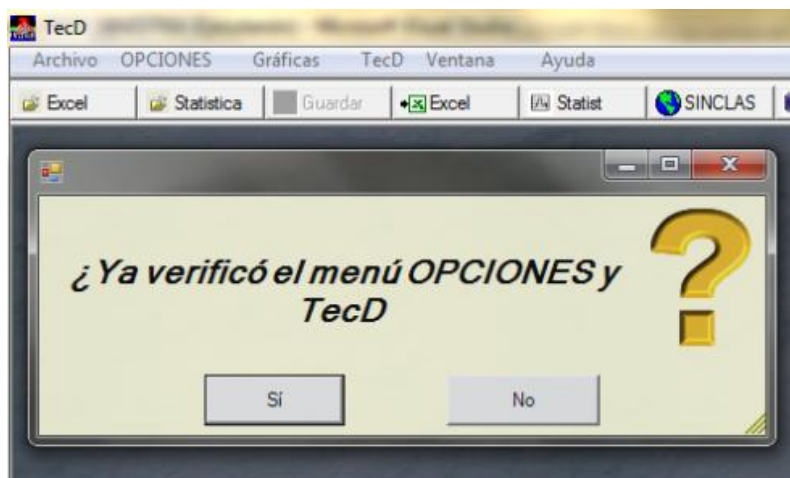


Fig. 5.9 Ventana de verificación del menú OPCIONES y TecD.

En este caso ya se ha verificado previamente el menú→OPCIONES y menú→TecD entonces se debe hacer clic en el Botón “Sí”, en caso de que se presione el Botón “No” entonces la siguiente pantalla será mostrada.

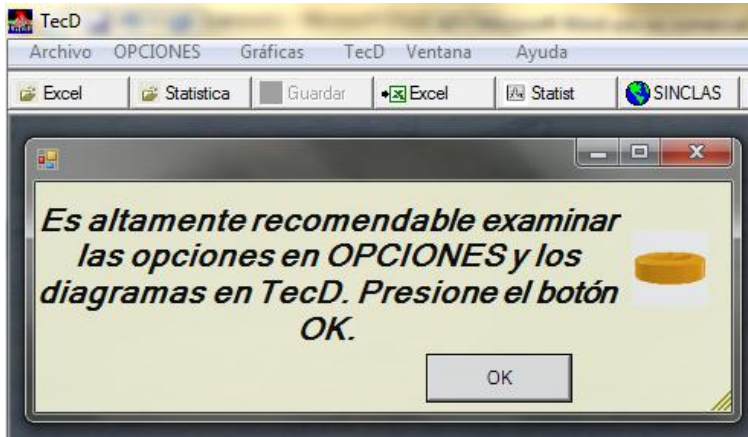


Fig. 5.10 Ventana de recomendación para revisar en menú OPCIONES y TecD.

Inmediatamente después de dar un clic en el Botón **OK** la ventana se cerrará y se tendrá que volver a intentar abrir un archivo.

Al dar clic en el botón “Sí” en la ventana mostrada en la Fig.5.9 la siguiente pantalla se mostrará.

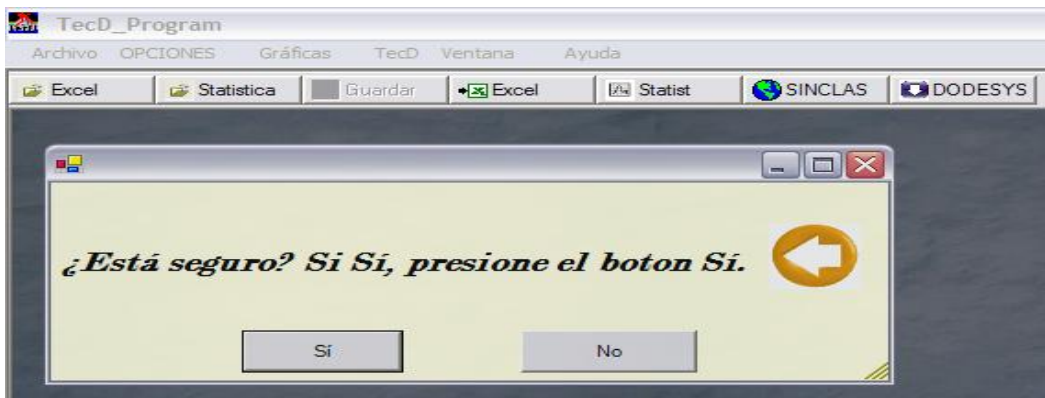


Fig. 5.11 ventana después de dar clic en el botón “Sí” de la ventana mostrada en la Fig.5.9.

Al dar Clic en el botón “Sí” a la ventana y se abrirá el cuadro de dialogo, en donde elegiremos el archivo que deseamos abrir.

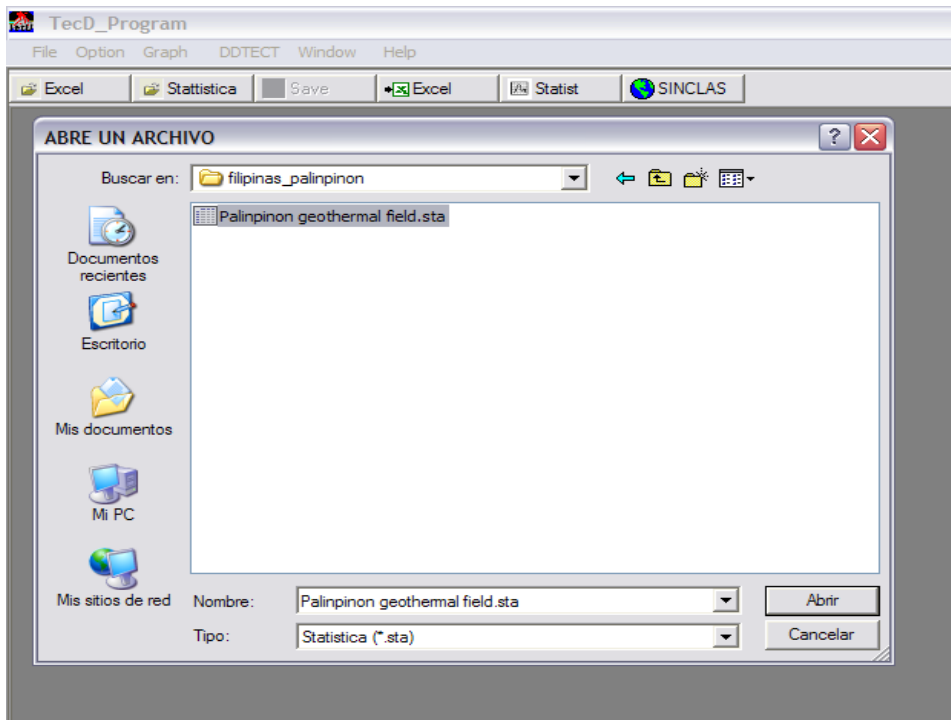


Fig. 5.12 Cuadro de diálogo de abrir archivo

Una barra de progreso nos indicara el estado de lectura y validación del archivo.

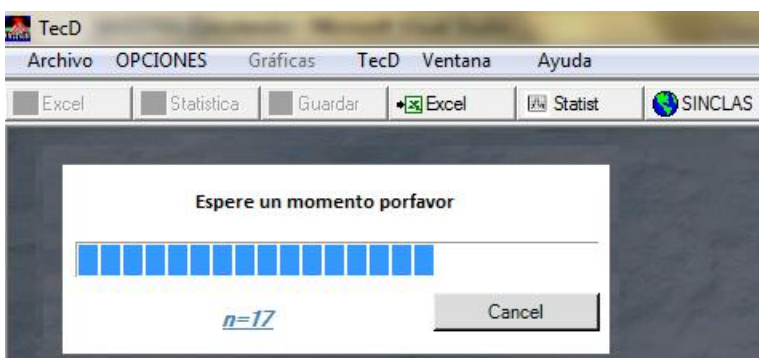


Fig. 5.13 Barra de Progreso de apertura del archivo de entrada.

Cuando se haya revisado y validado el archivo se mostrará en pantalla una tabla, en donde se puede apreciar el estado de cada registro del archivo abierto, La primera columna muestra el total de errores por registro, la segunda un Identificador, y posteriormente los datos contenidos en el archivo.

TOTAL ERR	ID	SERIAL_NU	NAME	INDMSTRA	FE_PROC	SIO2ADJ	TIO2ADJ	AL2
<-4 Errors	1	1	148773		MIDDLEMO	59.683	0.572	18.0
<- Warning	2	2	148775		MIDDLEMO	52.674	0.684	15.0
<-4 Errors	3	3	148777		MIDDLEMO	60.965	0.512	18.1
<-4 Errors	4	4	148780		MIDDLEMO	62.726	0.442	18.3
<-4 Errors	5	5	148771		MIDDLEMO	56.882	0.734	19.0
<- Warning	6	6	148588		MIDDLEMO	49.298	0.948	18.1
<- Warning	7	7	148747		MIDDLEMO	52.25	1.017	17.7
<-4 Errors	8	8	148559		MIDDLEMO	65.758	0.351	16.6
<-4 Errors	9	9	148575		MIDDLEMO	63.815	0.371	17.4
<-4 Errors	10	10	148597		MIDDLEMO	63.736	0.391	17.3
<-4 Errors	11	11	148692		MIDDLEMO	63.081	0.412	17.6
<-4 Errors	12	12	148674		MIDDLEMO	63.822	0.401	17.3
<-4 Errors	13	13	148755		MIDDLEMO	56.999	0.753	18.9
<-4 Errors	14	14	148763		MIDDLEMO	64.719	0.381	17.0
<-4 Errors	15	15	148770		MIDDLEMO	64.008	0.381	17.3
<-4 Errors	16	16	148555		MIDDLEMO	62.376	0.441	17.8
<- Warning	17	17	148565		MIDDLEMO	52.186	0.786	19.2
<-4 Errors	18	18	148581		MIDDLEMO	59.206	0.522	18.2
<-4 Errors	19	19	148582		MIDDLEMO	55.007	0.513	19.0

Fig. 5.14 Tabla con registros de archivo

De un total de 31 muestras sólo 7 resultaron validas para el programa, esto es debido a que para la utilización de los diagramas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006) el SIO2 no debe exceder de 53% y en este caso sólo 7 muestras fueron menores que ese porcentaje. Los campos marcados con un warning son muestras que tienen alguna advertencia; sin embargo el registro puede ser compilado.

Para el caso de los diagramas de (Agrawal et al., 2008), los datos no contenían alguno de los elementos traza que requieren los diagramas.

Para ver más detalles de los errores del archivo existe una subtabla que puede ser visualizada el dar clic en la parta izquierda de la columna “TOTAL ERROR”.

TOTAL ERR	ID	SERIAL_NU	NAME	INDMSTRA	FE_PROC	SIO2ADJ
<-4 Errors	1	1	148773		MIDDLEMO	59.683
Errors Detail						
<- Warning	2	2	148775		MIDDLEMO	52.674

Fig. 5.15 Acceso a la Sub-tabla de detalle de errores

NUMERROR	IDERROR	COLUMNA	NOMBRE_C	FILA	VALOR	TIPO DE ERROR
1	1	56	SIO2ADJ	1	59.683	EL SIO2ADJ DEBE SER > 30 pero < 52.
2	1	143	SM	1		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos o contener texto
3	1	151	YB	1		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos o contener texto
4	1	173	TH	1		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos o contener texto

Fig. 5.16 Descripción de errores en el registro número 1 del archivo de entrada.

Como podemos observar el registro no contiene datos en la columna de SM, YB, TH por lo que no se procesara la opción (Agrawal et al., 2008), y el valor de SIO2ADJ es mayor a 52% por lo que tampoco se procesara por (Agrawal et al., 2004) y (Verma et al., 2006).

Para regresar a la tabla anterior de clic en la flecha de la esquina superior derecha, de la tabla.

COLUMNA	NOMBRE_C	FILA	VALOR	TIPO DE ERROR
56	SIO2ADJ	1	59.683	EL SIO2ADJ DEBE SER > 30 pero < 52.
143	SM	1		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos o contener texto
151	YB	1		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos o contener texto
173	TH	1		Los valores de las celdas no deben ser 0,nulos o contener texto

Presione para calcular

Fig. 5.17 Sub-tabla de detalle de errores.

Con esta información, decidimos ejecutar el archivo con las muestras que fueron validas.

TOTAL ERR	ID	SERIAL_NU	NAME	INDMSTRA	FE_PROC	SIO2ADJ	TIO2ADJ	AL2O3ADJ	FE2O3ADJ	FEOAL
<-4 Errors	1	1	148773		MIDDLEMO	59.683	0.572	18.03	1.393	3.98
<- Warning	2	2	148775		MIDDLEMO	52.674	0.684	15.038	1.744	5.812
<-4 Errors	3	3	148777		MIDDLEMO	60.965	0.512	18.158	1.56	4.456
<-4 Errors	4	4	148780		MIDDLEMO	62.726	0.442	18.318	1.306	3.732

Presione para calcular

Fig. 5.18 Botón para procesar el archivo.

Una vez que el proceso finaliza, aparece una ventana preguntando si desea guardar el archivo procesado, el archivo contendrá las variables calculadas.

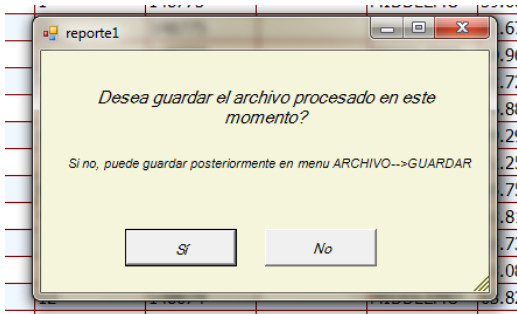


Fig. 5.19 Ventana para Guardar archivo Procesado.

Como se muestra en la Fig.5.19 la ventana muestra que posteriormente puede usted elegir guardar el archivo en el menú **ARCHIVO→GUARDAR**.

Al dar clic en la opción “**Si**” aparecerá una ventana como se muestra en la Fig.

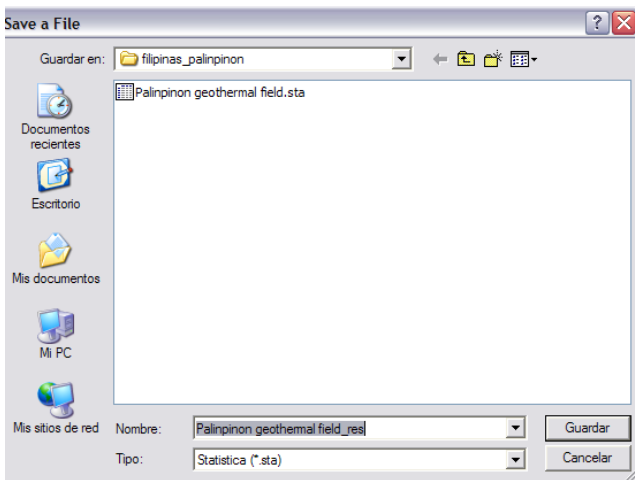


Fig. 5.20 Cuadro de diálogo para Guardar archivo en ubicación específica.

Como podemos observar la Fig. Es un cuadro de diálogo en donde automáticamente el programa asigna el nombre del archivo con el **nombre del archivo de entrada + la palabra “\_res”**.

Posterior a ese cuadro de diálogo, aparece otro cuadro para la generación del reporte de la información en donde se resumen todos los cálculos.

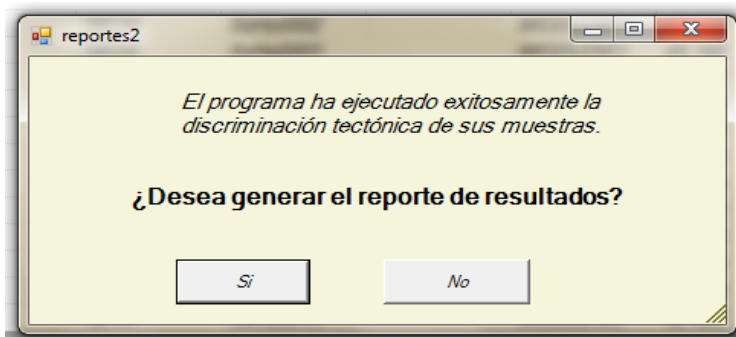


Fig. 5.21 Ventana para Generación de reportes.

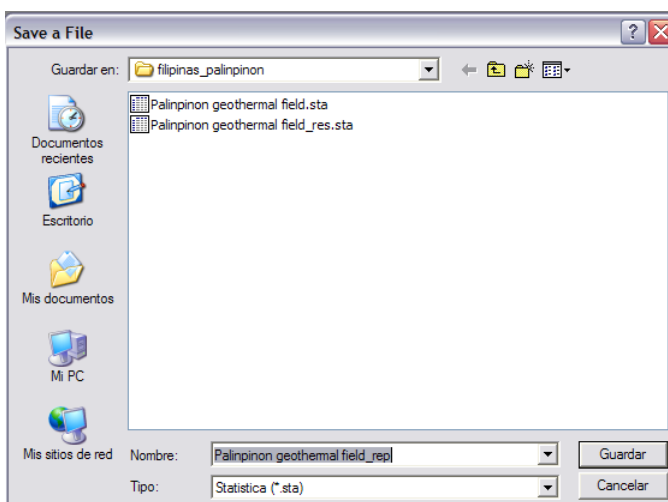


Fig. 5.22 Cuadro de Diálogo guardar archivo

El programa asigna un nombre automáticamente, que es el nombre del archivo abierto más la palabra **\_rep**.

Una vez terminado el proceso, el menú ha activado la opción de **gráficas**.

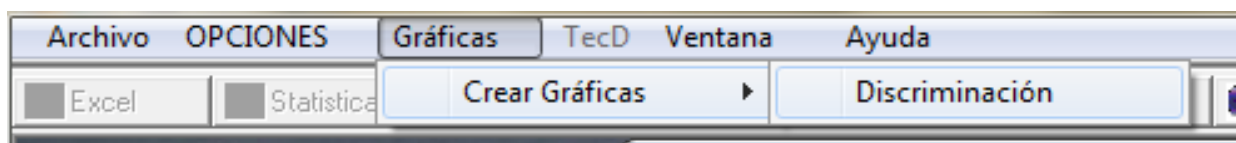


Fig. 5.23 Menú Gráficas

Una vez presionada la opción, se generan las gráficas correspondientes, y se guardan en disco si así se desea.

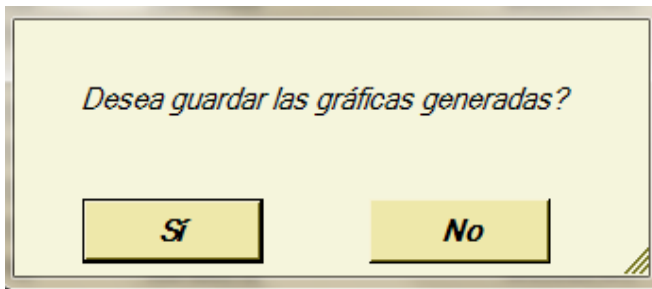


Fig. 5.24 Ventana para guardar gráficas.

Al dar clic en la opción “**Sí**” Aparecerá el cuadro de diálogo en donde podemos crear una carpeta para almacenar todas las gráficas.

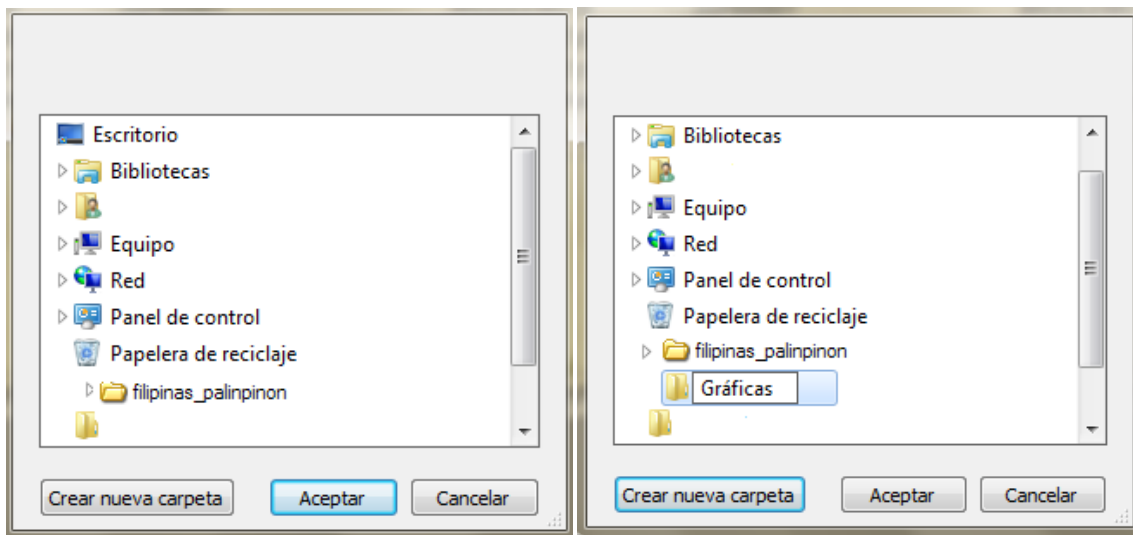


Fig. 5.25 Cuadro de dialogo para crear y guardar gráficas en una carpeta específica.

Al dar clic en la opción “**Aceptar**” se desplegaran el conjunto de diagramas en pantalla. Puede visualizar todas las ventanas accediendo al menú “**Ventana**” localizado en la barra de menú.

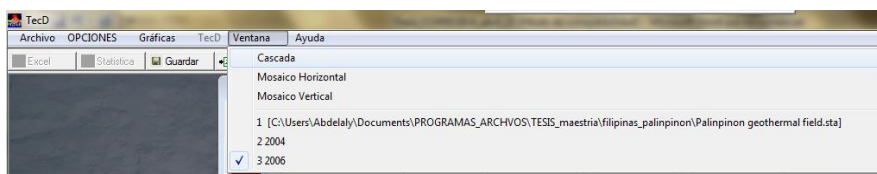


Fig. 5.26 Opción Ventanas de la barra de menú

Como podemos observar en la Fig.31A., El menú “**Ventana**” despliega 3 opciones para acomodar las ventanas en la pantalla, y en la parte inferior señala el número de ventanas abiertas y además de que usted puede acceder a cualquiera de ellas desde esta posición.



Elegiremos la opción **“Mosaico Horizontal”**. Y las ventanas quedarían como se muestra en la Fig.5.27.

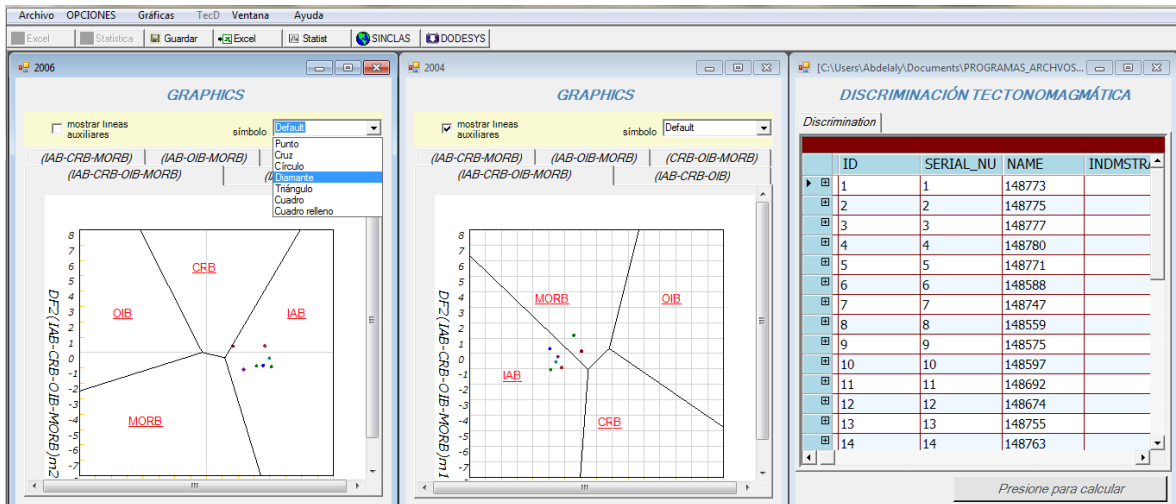


Fig. 5.27 utilización de la opción para acomodar las ventanas en la pantalla.

Cada ventana contiene 5 pestañas en donde podemos encontrar los 5 diagramas correspondientes a la propuesta de diagramas del artículo. En cada ventana existe la posibilidad de cambiar el tipo de símbolo de las gráficas y poner o quitar las líneas auxiliares.

La siguiente figura muestra los resultados en el primer diagrama para la propuesta 2004 y 2006, recordamos que para este caso el archivo no contenía datos para graficar la propuesta de artículo 2008.

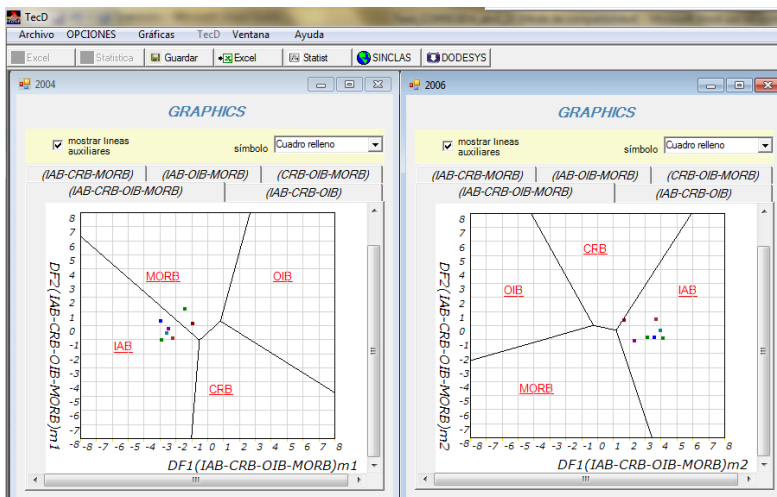


Fig. 5.28 diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB) propuestas 2004 y 2006.

Como podemos observar de la figura 5.28, para la propuesta 2004, 5 muestras cayeron en el campo IAB y 2 en el campo MORB, para la propuesta 2006 las 7 muestras cayeron en el campo IAB.

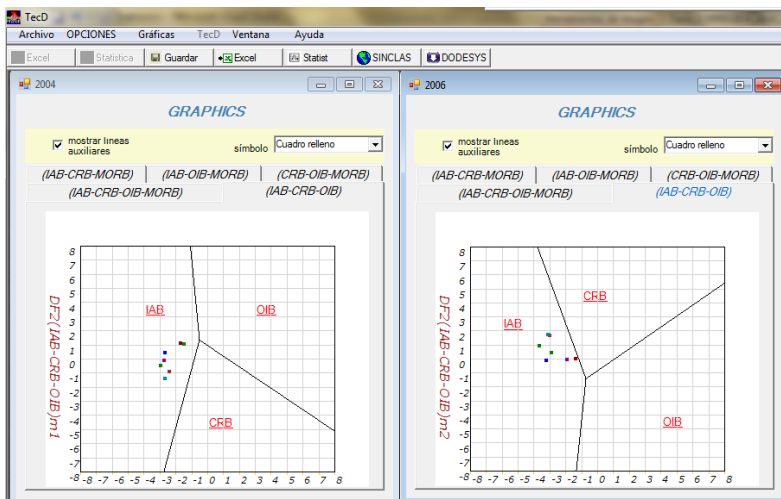


Fig. 5.29 diagrama (IAB-CRB-OIB) propuestas 2004 y 2006.

La figura 5.29, muestra que para el diagrama (IAB-CRB-OIB) en ambas propuestas las muestras cayeron en el campo IAB.

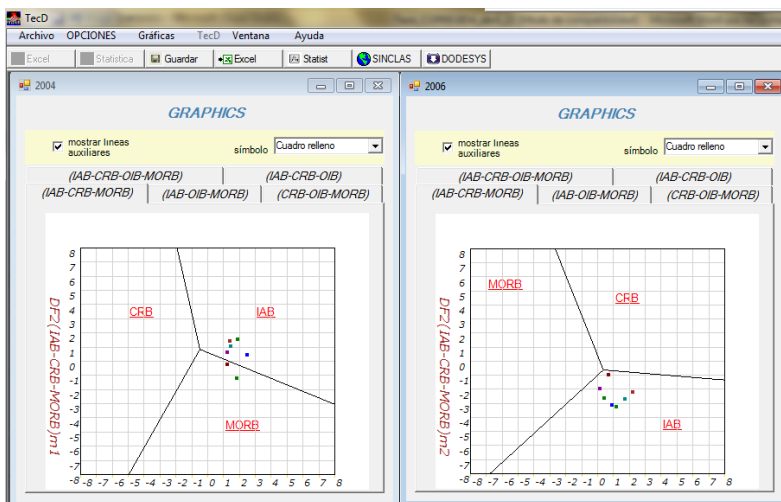


Fig. 5.30 diagrama (IAB-CRB-MORB) propuestas 2004 y 2006..

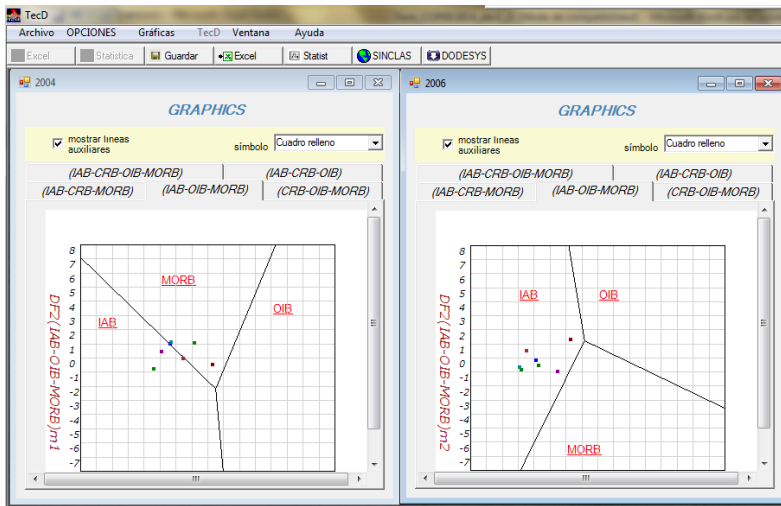


Fig. 5.31 diagrama (IAB -OIB-MORB) propuestas 2004 y 2006.

Podemos observar en las imágenes que los datos se encuentran más orientados en el campo IAB, Arco de Isla, que es precisamente zona de subducción.

En la figura 5.32 se muestra el diagrama (CRB-OIB-MORB) y cómo podemos observar no se encuentra el campo preferido es decir el campo IAB, por lo que este diagrama no es aplicable, esto es debido a que en todos los casos siempre existe un diagrama del conjunto de 5 de cada propuesta de artículos que no contiene alguno de los campos, por lo que un diagrama no es aplicable porque en ese diagrama no existe el ambiente tectónico al que pertenecen las muestras.

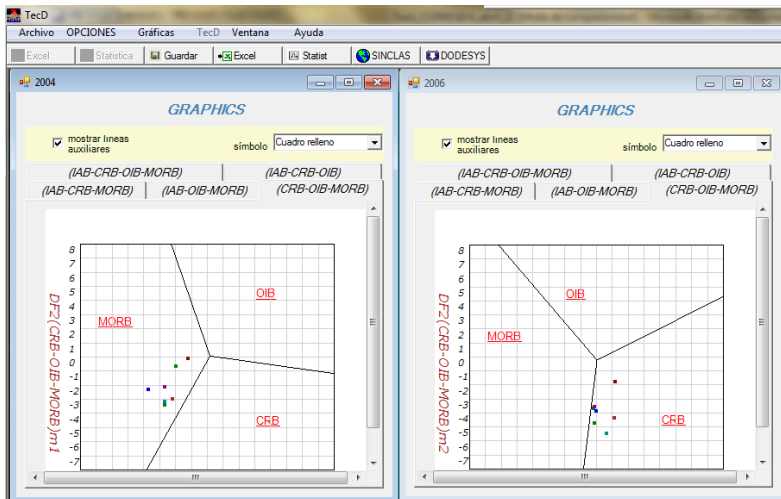


Fig. 5.32 diagrama (CRB -OIB-MORB) propuestas 2004 y 2006.

### 5.1.4 Análisis de los resultados

➤ Archivo con terminación “res”

El archivo con terminación rep contiene los archivos originales+ resultados obtenidos con TecD.

	181 DF1_1234m1	182 DF2_1234m1	183 TECTYPE_1234m1	184 DF1_123m1	185 DF2_123m1	186 TECTYPE_123m1
1						
2	-1.443838	1.184189	MORB	-1.490198	1.037815	IAB
3						
4						
5						
6	-2.452171	-0.205282	IAB	-2.770445	-0.090144	IAB
7	-0.956702	0.159582	MORB	-1.706921	1.115549	IAB
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17	-2.950569	0.321212	IAB	-2.704163	0.479057	IAB

Fig. 5.33 Archivo de Resultados del Procesamiento con TecD.

En la figura podemos observar las columnas “DF1\_” y “DF2\_” contienen la coordenada en “x” y en “y”, la columna “TECTYPE\_” contiene el nombre del ambiente en que cayó cada una de las muestras.

➤ Archivo con terminación “rep\_”

Para analizar la información de forma cuantitativa, se abre el archivo que se generó con la terminación **\_rep**, para observar más a detalle los resultados del programa.

	1 Número total de muestras	2 Publicación (diagramas)	3 Identificación de la figura	4 IAB (1)	5 CRB+OIB (2+3)	6 CRB (2)	7 OIB (3)	8 MORB (4)	9 %IAB	10 %CRB+OIB	11 %CRB	12 %OIB	13 %MORB	14 Comentario
1	31													
2	7	Agrawal et al. (2004)	Fig_1234m1	5	0	0	2	71.4		0	0	28.6	*** No olvide que	
3			Fig_123m1	7	0	0		100		0	0		uno de los cinco diagramas	
4			Fig_124m1	5	0	0	2	71.4		0	0	28.6	de cada publicación NO es aplicable.	
5			Fig_134m1	3	0	0	4	42.9		0	0	57.1		
6			Fig_234m1		0	0	7			0	0	100	Es importante identificarla.	
7														
8	7	Varma et al. (2006)	Fig_1234m2	7	0	0	0	100		0	0	0		
9			Fig_123m2	7	0	0		100		0	0			
10			Fig_124m2	7	0	0	0	100		0	0	0		
11			Fig_134m2	7	0	0	0	100		0	0	0		
12			Fig_234m2		7	0	0			100	0	0		
13														
14	0	Agrawal et al. (2008)	Fig_123411	0	0	0	0							
15			Fig_12311	0	0	0	0							
16			Fig_12411	0	0	0	0							
17			Fig_13411	0	0	0	0							
18			Fig_23411	0	0	0	0							
19														

Fig. 5.34 Reporte que genera TecD después del Procesamiento de los datos.

Para analizar el archivo es importante saber cómo está distribuida la información en el archivo.

- ✿ El primer renglón de la primera columna muestra el número total de muestras que contiene el archivo, en este caso son 31, posteriormente en los siguientes renglones se muestra el número de muestras que fueron procesadas para cada propuesta de diagramas.

Se observa que para el caso de (Agrawal et al., 2004) y (Verma et al., 2006), 7 muestras se procesaron mediante TecD, y para el caso de (Agrawal et al., 2008) ninguna muestra fue procesada.

- ✿ La columna “**Publicacion (Diagramas)**” contiene el nombre de la propuesta de diagramas.
- ✿ Desde la columna **IAB (1)** hasta la columna **MORB (4)** se muestra el número de muestras de todo el archivo que cayeron en cada ambiente, y como podemos observar **IAB (1)** es el ambiente preferido para el campo geotérmico de palinpinon.
- ✿ Las celdas vacías indican que para ese diagrama esa columna no es aplicable.
- ✿ Desde la columna **IAB%** hasta la columna **MORB%** se indica el porcentaje total de muestras que corresponden a cada ambiente, en este caso observamos que para ambas propuestas de archivos los porcentajes de **IAB%** son los que resultaron más altos con respecto a los demás ambientes.

El archivo contiene una nota la cual siempre debe tomarse en cuenta en el momento que interpretemos la información contenida en el archivo “rep\_” generado por TecD.

Aun cuando estos diagramas no fueron hechos para el SIO2Adj mayor a 53% se realizó una prueba procesando todos los datos del archivo cambiando la opción de SIOADJ del menú OPCIONES.

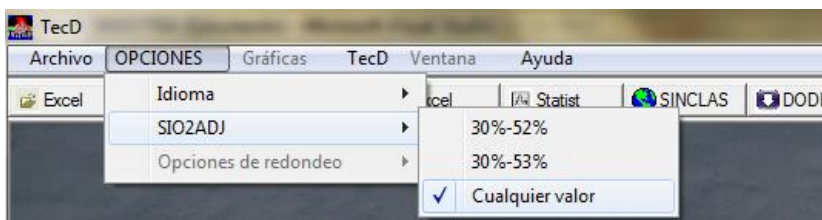


Fig. 5.35 Menú Opciones para modificar SIO2ADJ a cualquier valor.

Los resultados nos indicaron que el mejor porcentaje es el ambiente IAB, Aun cuando para este caso fue exitoso utilizar TecD para rocas con sílice mayor a 53% no podemos concluir que TecD funcione para rocas que no sean básicas.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Número total de muestras	Var1	Publicación (diagramas)	Identificación de la figura	IAB (1)	CRB+OIB (2+3)	CRB (2)	OIB (3)	MORB (4)	%IAB	%CRB+OIB	%CRB	%OIB	%MORB	Comentario
1	31													
2	31	Agrawal et al. (2004)	Fig_1234m1	23		0	0	8	74.2		0	0	25.8	*** No olvide que
3			Fig_123m1	28		3	0		90.3		9.7	0		uno de los cinco diagramas
4			Fig_124m1	23		0		8	74.2		0		25.8	de cada publicación NO es:
5			Fig_134m1	22			0	9	71			0	29	
6			Fig_234m1			2	0	29			6.5	0	93.5	Es importante identificarla.
7														
8	31	Verma et al. (2006)	Fig_1234m2	30		0	0	1	96.8		0	0	3.2	
9			Fig_123m2	31		0	0		100		0	0		
10			Fig_124m2	29		0		2	93.5		0		6.5	
11			Fig_134m2	31			0	0	100			0	0	
12			Fig_234m2			10	0	21			32.3	0	67.7	

Fig. 5.36 Archivo de reporte con 31 muestras procesadas.

### 5.1.5 Conclusiones.

Los resultados del programa TecD, indicaron que las muestras que se obtuvieron del campo geotérmico de palinpinon, pertenecen al ambiente tectónico de IAB (Arco de isla).

## 5.2 CASO DE ESTUDIO II: CAMPO GEOTÉRMICO DE BERLÍN, EL SALVADOR

### 5.2.1 Campo geotérmico de Berlín, El Salvador

El Salvador está ubicado en el frente volcánico de América Central (CAVF), una cadena volcánica que se extiende por más de 1000 Km desde Guatemala hasta Costa Rica, y en relación con la subducción de la litosfera relativamente joven (edad <25 Ma.) de la Placa de Cocos debajo de la Placa del Caribe, Agostini et al., (2006).



*Fig. 5.37 Mapa de localización de El Salvador, ICC (2010).*

El Salvador se encuentra dentro de los primeros 10 lugares en producción de energía eléctrica a través de la geotermia, con una producción aproximada de 204 Mwe.

PAÍS	MWe
1. Estados Unidos	3,093.5
2. Filipinas	1,912.2
3. Indonesia	1,197.3
4. México	958.0
5. Italia	842.5
6. Nueva Zelanda	628.0
7. Islandia	574.6
8. Japón	555.2
→ 9. El Salvador	204.4
10. Kenya	167.0

Fig. 5.38 Capacidad geotermoeléctrica instalada en cada país (Gutiérrez, 2010).

El campo geotérmico de Berlín se encuentra ubicado a 120 km al Este (oriente) de la ciudad capital, en el flanco norte del complejo volcánico Berlín-Tecapa, en el lugar conocido como Cantón Montañaíta del Municipio de Alegría y Departamento de Usulután.



Fig. 5.39 Mapa de localización del campo geotérmico de Berlín.



### 5.2.2 Entrada de datos

Un total de 14 muestras fueron extraídos y capturados en el templete que utiliza el programa TecD, del artículo Agostini et al., (2006).

### 5.2.3 Procesamiento de los datos

Debido a que en la mayoría de las muestras el SIO2ADJ era mayor que 53% se selecciono la opción de procesar todas las muestras en el menú OPCIONES→SIO2ADJ→cualquier valor.

Para realizar el procesamiento de los datos se requiere abrir el archivo desde el programa TecD, En la Tabla se muestra un total de 14 muestras y el estado de cada registro del archivo abierto.

	TOTAL ERRO	ID	SERIAL_NUM	NAME	INDMSTRA	SIO2	TIO2	AL2O3	FE2O3
▶	Ready	1	1	ACDC0001		47.63	1.07	18.58	5.84
▣	<- Warning	2	2	ACDC0002		50.03	1.12	17.48	3.39
▣	<- Warning	3	3	ACDC0003		50.68	1.22	17.92	0
▣	<- Warning	4	4	ACDC0004		51.19	1.14	17.55	0
▣	<- Warning	5	5	ACDC0005		58.14	0.99	16.7	8.25
▣	<- Warning	6	6	ACDC0006		60.49	1.03	15.61	0
▣	<- Warning	7	7	ACDC0007		60.82	0.7	17.46	3.81
▣	<- Warning	8	8	ACDC0025		54.15	0.76	17.77	3.6
▣	<- Warning	9	9	ACDC0026		55.99	0.75	17.46	3.08
▣	<- Warning	10	10	ACDC0027		56.58	0.71	17.29	2.62
▣	<- Warning	11	11	ACDC0028		57.97	0.9	17.28	2.43
▣	<- Warning	12	12	ACDC0029		61.89	0.59	16.25	1.19
▣	<- Warning	13	13	ACDC0030		63.9	0.66	16.57	1.19
▣	<-10 Errors	14	14	ACDC0031		65.36	0.7	16.5	0

Fig. 5.40 Tabla con registros de archivo de datos de entrada "Berlín, el Salvador".

Sin embargo, solo 13 resultaron validas para el programa, esto es debido a que el registro 14 tiene 10 errores y no puede ser procesado.

IDERROR	NUMERROR	COLUMN	NAME_COLU	ROW	VALUE	ERROR TYPE
14	1	56	SIO2ADJ	15	67.08	EL SIO2 DEB
14	1	138	LA	15		Los valores de
14	2	143	SM	15		Los valores de
14	3	151	YB	15		Los valores de
14	4	165	NB	15		Los valores de
14	5	173	TH	15		Los valores de
14	6	165	NB	15		Los valores de
14	7	176	V	15		Los valores de
14	8	177	Y	15		Los valores de
14	9	179	ZR	15		Los valores de

Fig. 5.41 Sub-tabla de detalle de errores del registro número 14.

Con esta información, decidimos ejecutar el archivo con las muestras que fueron validas, y posteriormente aceptamos guardar todos los archivos generados.

Posteriormente graficamos los resultados en TecD. Los resultados fueron los siguientes.

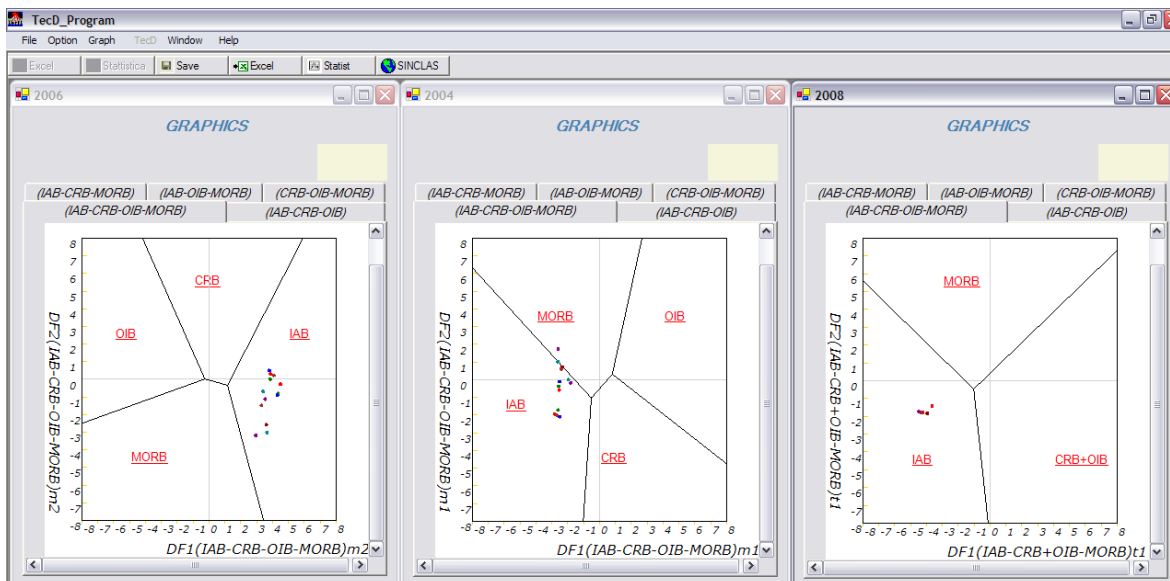


Fig. 5.42 resultados en el diagrama (IAB-CRB-OIB-MORB) de las propuestas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008).

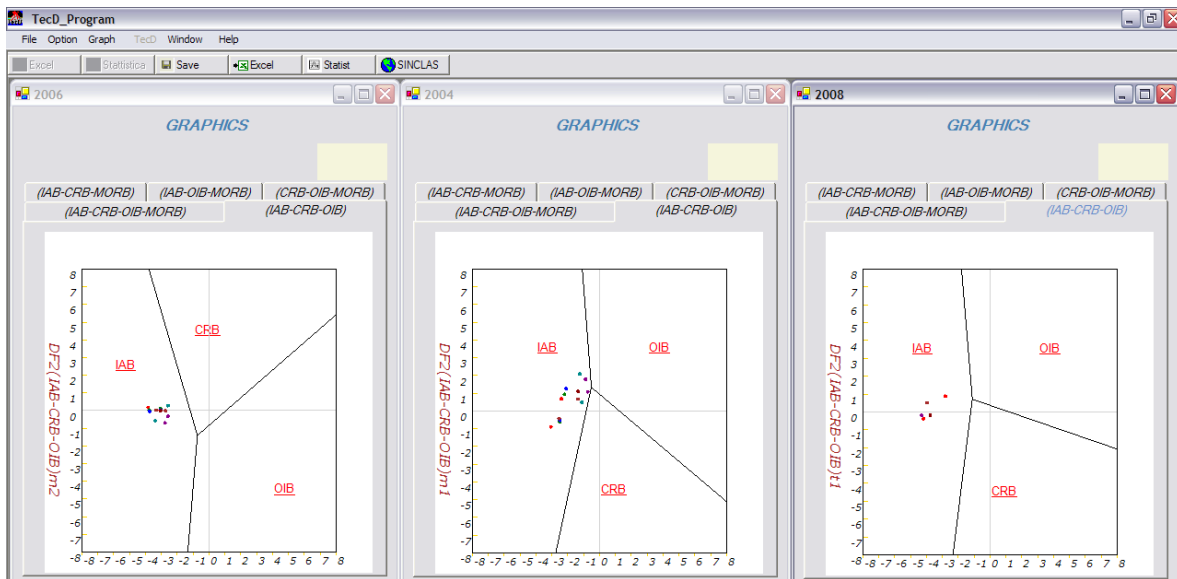


Fig. 5.43 resultados en el diagrama (IAB-CRB-MORB) de las propuestas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008)

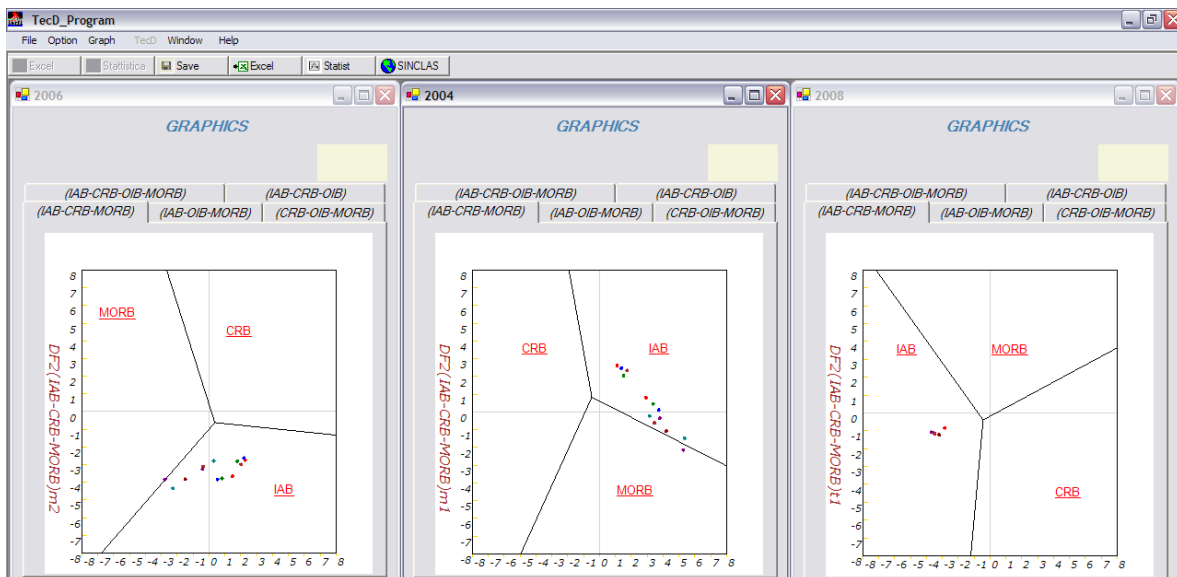


Fig. 5.44 resultados en el diagrama (IAB-CRB-MORB) de las propuestas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008)

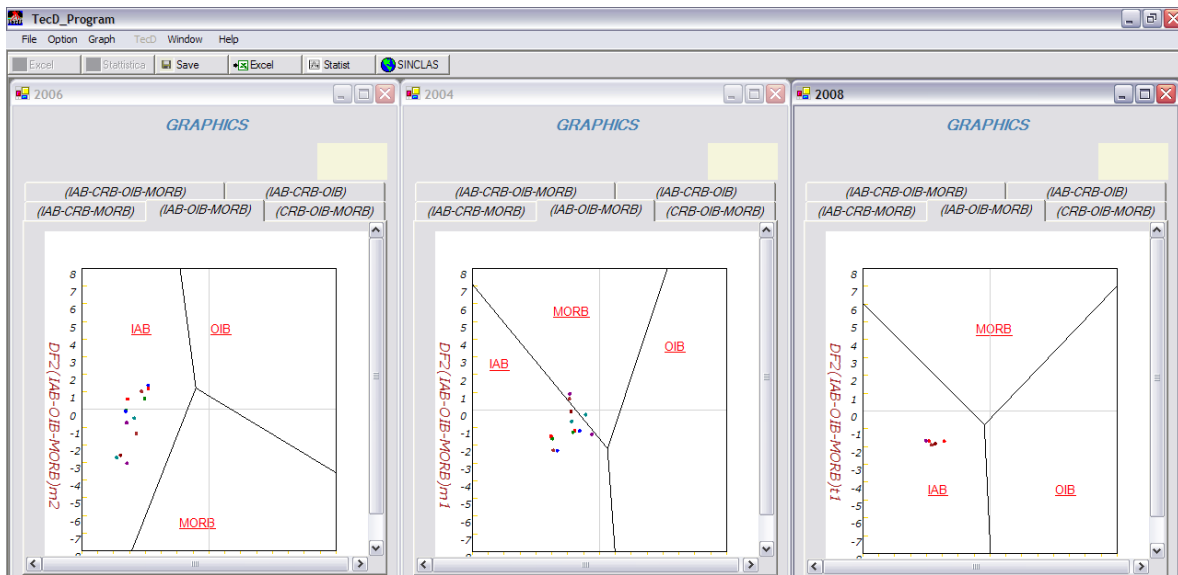


Fig. 5.45 resultados en el diagrama (IAB-OIB-MORB) de las propuestas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008)

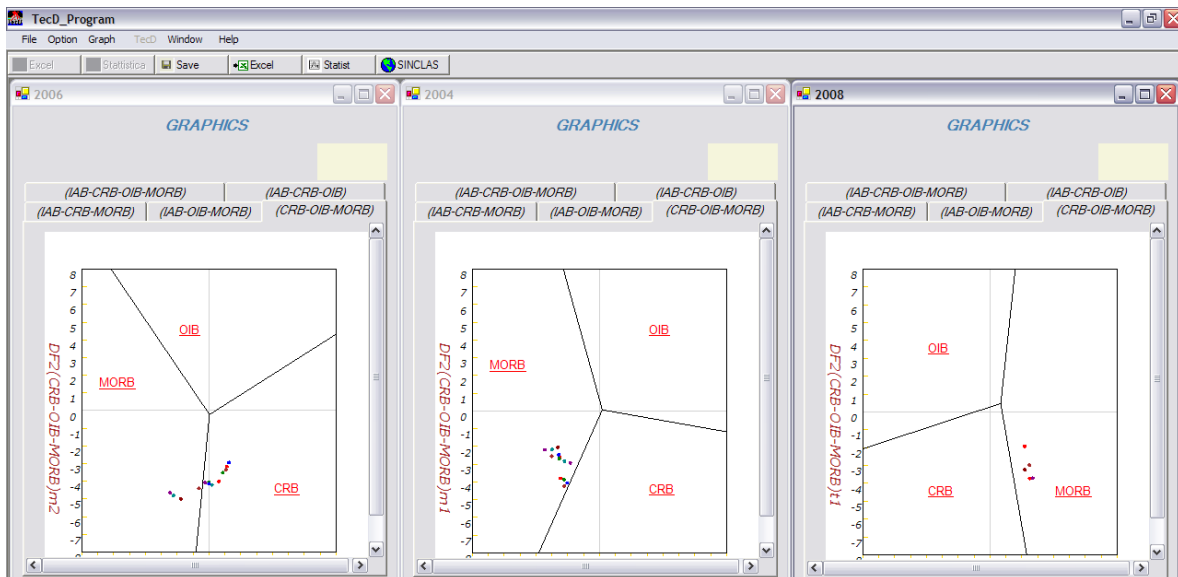


Fig. 5.46 resultados en el diagrama (CRB-OIB-MORB) de las propuestas (Agrawal et al., 2004), (Verma et al., 2006), (Agrawal et al., 2008)

Podemos observar en las imágenes que los datos se encuentran más orientados en el campo **IAB** Arco de Isla, zona de subducción.

### 5.2.4 Análisis de los resultados

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Num.Total mi	Know Tectoni	Diagram Disc	Num.Fig	IAB	CRB+OIB	CRB	OIB	MORB	%IAB	%CRB+OIB	%CRB	%OIB	%MORB	Remarks
2	14														
3	13	Agrawal et al	Fig_1234m1	12	12		0	0	1	92.3076923		0	0	7.69230769	
4			Fig_123m1	13	13		0	0		100		0	0		
5			Fig_124m1	12	12		0	0	1	92.3076923		0	0	7.69230769	
6			Fig_134m1	10	10		0	0	3	76.9230769			0	23.0769231	
7			Fig_234m1				0	0	13			0	0	100	
8															
9	13	Verma et al	Fig_1234m2	13	13		0	0	0	100		0	0	0	
10			Fig_123m2	13	13		0	0		100		0	0		
11			Fig_124m2	12	12		0	0	1	92.3076923		0	0	7.69230769	
12			Fig_134m2	13	13		0	0	0	100			0	0	
13			Fig_234m2				9	0	4			69.2307692	0	30.7692308	
14															
15	5	Agrawal et al	Fig_1234t1	5	5	0			0	100	0			0	
16			Fig_123t1	5	5		0	0		100		0	0		
17			Fig_124t1	5	5		0	0	0	100		0	0		
18			Fig_134t1	5	5		0	0	0	100			0	0	
19			Fig_234t1				0	0	5			0	0	100	

Fig. 5.47 Reporte de resultados del campo geotérmico Berlín, El Salvador.

### 5.2.5 Conclusiones

Los porcentajes de los tres artículos, Agrawal et al., (2004), Verma et al., (2006), Agrawal et al., (2008), fueron superiores al 70% en IAB, en la discriminación, dando como resultado el ambiente tectónico, Arco de Isla.

## Capítulo 6

### CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa computacional para la aplicación de diagramas de discriminación tectonomagmática al cual llamamos “**TecD**”.

TecD se encuentra desarrollado en el lenguaje Visual Basic.net, bajo la plataforma Windows, con la opción de idioma de la interfaz en inglés y español.

Contempla las propuestas de diagramas recomendadas por (Verma., 2010), que en conjunto pueden mejorar el análisis de muestras para la determinación del ambiente tectónico al que pertenecen.

El programa puede determinar el campo en que cae cada muestra, mediante el proceso de comparación de ecuaciones de frontera con respecto a una coordenada (x, y) la cual se obtiene como resultado de las funciones de discriminación DF's y este resultado es almacenado en un archivo.

TecD maneja una interfaz gráfica en la cual podemos visualizar los datos previos al procesamiento y los resultados obtenidos después del procesamiento en una tabla, además de que también podemos visualizar los resultados mediante 2 archivos generados por TecD, uno en el que se muestran los resultados y otro en donde podemos observar un resumen de resultados al cual llamamos reporte.

En “TecD” se pueden visualizar los resultados gráficamente, mediante una opción de graficar los resultados en los diagramas recomendados por (Verma., 2010), con la opción de almacenar los diagramas en los formatos wmf, gif, jpeg, bmp.

TecD es un programa que agiliza los tiempos para la discriminación de ambientes tectonomagmáticos, y ayuda en la determinación de ambientes tectónicos a los que pertenecen un grupo de muestras de rocas.

## **TRABAJOS FUTUROS**

- *Se recomienda agregar un grupo de diagramas que se encuentran en proceso de publicación por (Verma y Agrawal, 2010), que se basan en todas las recomendaciones Agrawal et al., (2004), Verma et al., (2006), Agrawal et al., (2008), utilizando elementos inmóviles, TiO<sub>2</sub>, Nb, V, Y, Zr.*
- *Se recomienda hacer un análisis de otros diagramas de discriminación propuestos en los últimos años y agregarlos al programa TecD.*
- *Agregar la opción de usar el archivo Statistica que se utiliza habitualmente en el CIE-UNAM para las compilaciones de datos geoquímicos de rocas de diferentes partes del mundo.*
- *Completar y corregir la versión en inglés del programa.*
- *Publicar el programa TecD en una revista internacional.*

## REFERENCIAS

- Agostini, S., Corti, G., Doglioni, C., Carminati, E., Innocenti, F., Tonarini, S., Manetti, P., Di Vincenzo, G., Montanari, D., 2006, Tectonic and magmatic evolution of the active volcanic front in El Salvador: insight into the Berlín and Ahuachapán geothermal areas: *Geothermics*, 35(), 368-408.
- Agrawal, S., Guevara, M., Verma, S.P., 2008, Tectonic discrimination of basic and ultrabasic rocks through log-transformed ratios of immobile trace elements: *International Geology Review*, 50(12), 1057-1079.
- Agrawal, S., Guevara, M., Verma, S.P., 2004, Discriminant analysis applied to establish major-element field boundaries for tectonic varieties of basic rocks: *International Geology Review*, 46(7), 575-594.
- Butler, J.C., Woronow, A., 1986, Discrimination among tectonic settings using trace element abundances of basalts: *Journal of Geophysical Research*, 91(B10), 10289-10300.
- Cabanis, B., Lecolle, M., 1989, Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des séries volcaniques et la mise en évidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale : *C.R. Acad. Sci. Paris*, 309(), 2023-2029.
- Das P., Iyer S. P., 2009, Geochemical characterization of oceanic basalts using Artificial Neural Network : *Geochemical transactions*, 10(13), doi: 10.1186/1467-4866-10-13.
- Gill, J.B., 1981, *Orogenic andesites and plate tectonics*: Berlin, Springer-Verlag, 390 p.
- Irvine, T.N., Baragar, W.R.A., 1971, A guide to the classification of the common volcanic rocks: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(), 523-548.
- Janoušek, V., Farrow, C. M., Erban, V. 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology* 47(6):1255-1259



- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: *Journal of Petrology*, 27(3), 745-750.
- Meschede, M., 1986, A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram: *Chemical Geology*, 56(), 207-218.
- Middlemost, E.A.K., 1975, The basalt clan: *Earth-Science Reviews*, 11(), 337-364.
- Middlemost, E.A.K., 1989, Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks: *Chemical Geology*, 77(1), 19-26.
- Mullen, E.D., 1983, MnO/TiO<sub>2</sub>/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: a minor element discrimination for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis: *Earth and Planetary Science Letters*, 62(), 53-62.
- Pearce, J.A., 1976, Statistical analysis of major element patterns in basalts.: *Journal of Petrology*, 17(1), 15-43.
- Pearce, J.A., 1982, Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries, In Thorpe R.S. (ed.), *Andesites: Chichester, John Wiley & Sons*, 525-548.
- Pearce, J.A., Cann, J.R., 1971, Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr and Y: *Earth and Planetary Science Letters*, 12(), 339-349.
- Pearce, J.A., Cann, J.R., 1973, Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses: *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2), 290-300.
- Pearce, J.A., Gale, G.H., 1977, Identification of ore-deposition environment from trace-element geochemistry of associated igneous host rocks: *Geological Society of London*, 7(Special Publication), 14-24.
- Pearce, J.A., Norry, M.J., 1979, Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(), 33-47.

- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks: *Journal of Petrology*, 25(4), 956-983.
- Pearce, J.A., Lippard, S.J., Roberts, S., 1984, Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. In Kokoelar, B.P., Howells, M.F. (ed.), *Marginal basins geology*: Oxford, Blackwell Scientific, 77-94.
- Pearce, T.H., Gorman, B.E., Birkett, T.C., 1977, the relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks: *Earth and Planetary Science Letters*, 36 ( ), 121-132.
- Rae A.J., Cooke D.R., Phillips, D., Zaide-Delfin, M., 2004, The nature of magmatism at Palinpinon geothermal field, Negros Island, Philippines: implications for geothermal activity and regional tectonics: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 129(), 321-342.
- Richard L.R., 1995, *MinPet: Mineralogical and petrological data processing system*: Québec, Canada, Software Geologico, version 2.02.
- Shervais, J.W., 1982, Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas: *Earth and Planetary Science Letters*, 59(), 101-118.
- Soager N., Holm P. M., 2009, Extended correlation of the Paleogene Faroe Islands and East Greenland plateau basalts, *Lithos*, 107(3) 205-215.
- Streckeisen, A., Le Maitre, R.W., 1979, A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks: *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*, 136(2), 169-206.
- Verma, S.P., 2010, *Statistical Evaluation of Bivariate, Ternary and Discriminant Function Tectonomagmatic Discrimination Diagrams*: *Turkish Journal of Earth Sciences*.
- Verma, S.P., Torres-Alvarado, I.S., Sotelo-Rodríguez, Z.T., 2002, SINCLAS: standard igneous norm and volcanic rock classification system: *Computers & Geosciences*, 28(), 711-715.
- Verma, S.P., Guevara, M., Agrawal, S., 2006, Discriminating four tectonic settings: five new geochemical diagrams for basic and ultrabasic volcanic rocks based on log-ratio transformation of major-element data: *Journal of Earth System Science*, 115(5), 485-528.

*Wegener, A., 1966, The origin the continents and oceans, 110p.*

*Wilson, M., 1989, Igneous petrogenesis. A global tectonic approach: London, Chapman & hall, 456p.*

*Wood, D.A., 1980, The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province: Earth and Planetary Science Letters, 50(), 11-30.*

*Zhoua J., Lia X., 2006, GeoPlot: An Excel VBA program for geochemical data plotting: Computers & Geosciences 32( 4), 554-560.*

## REFERENCIAS ELECTRONICAS

Aznar, J. 2010, *Proyecto Biosfera, Conducción y convección del calor interno*.  
<<http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/1bachillerato/estrucinternatierra/contenido4.htm>>

Clarke D. 1994, *NewPet for DOS*.  
<<ftp://www.esd.mun.ca/pub/geoprogs/np940107.exe>>

Fernández, F. R., 2009, *Bordes Constructivos o Divergentes, Rift Continental*.  
<[http://elprofedenaturales.files.wordpress.com/2009/10/continental\\_rift.jpg](http://elprofedenaturales.files.wordpress.com/2009/10/continental_rift.jpg)>

Gutiérrez L. C., 2010, *Asociación Geotérmica Mexicana, energía Geotérmica*.  
<[http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?page\\_id=112](http://www.geotermia.org.mx/geotermia/?page_id=112)>

ICC, 2010, *Institut cartographic catalunya*.  
<[http://www.icc.es/web/content/es/common/cartoteca/cartoteca\\_fons\\_series\\_mon\\_america\\_pro.html](http://www.icc.es/web/content/es/common/cartoteca/cartoteca_fons_series_mon_america_pro.html)>

IGN, 2010, *Instituto Geográfico Nacional de España, ministerio de fomento*.  
<[http://www.ign.es/espmap/figuras\\_ma\\_eso/pdf/MedioESO\\_Fig\\_01.pdf](http://www.ign.es/espmap/figuras_ma_eso/pdf/MedioESO_Fig_01.pdf)>

Janoušek V., Farrow V.E. et al 2006, *Geochemical Data Toolkit (GCDkit) for Windows*. <<http://www.gla.ac.uk/gcdkit/archive.html>>

NASA, 2003, *Earth Observatory, Hawaiian Islands*. <<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=3510>>

Petrelli, M., 2005, *Petrograph, Department of Earth Sciences, University of Perugia, Italy*. <<http://www.unipg.it/~maurip/SOFTWARE.htm>>

Randy, R, 2010. *Windows to the Universe (Ventanas al Universo), University Corporation for Atmospheric Research (UCAR)*.  
<[http://www.windows2universe.org/earth/interior/plate\\_tectonics.html&lang=sp](http://www.windows2universe.org/earth/interior/plate_tectonics.html&lang=sp)>

RockWare, 2010. *Earth Science and GIS software*.  
<<http://www.rockware.com/product/overview.php?id=102>>

*Wikipedia, 2009, Tema: Orogénesis, enciclopedia libre electrónica.*  
<<http://es.wikipedia.org/wiki/Orog%C3%A9nesis>>

*Wikipedia, 2010, Tema: Puntos Calientes, enciclopedia libre electrónica.*  
<[http://es.wikipedia.org/wiki/Placa\\_tect%C3%B3nica](http://es.wikipedia.org/wiki/Placa_tect%C3%B3nica)>

*Wikipedia, 2010, Tema: Tectónica de Placas, enciclopedia libre electrónica.*  
<[http://es.wikipedia.org/wiki/Placa\\_tect%C3%B3nica](http://es.wikipedia.org/wiki/Placa_tect%C3%B3nica)>