

Universidad de los Andes  
Facultad de Ingeniería  
Postgrado en Matemática Aplicada a la Ingeniería

**ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA ENERGÍA DE  
DEFORMACIÓN ENTRE LAS PLACAS TECTÓNICAS  
EUROASIÁTICA, AUSTRALIANA Y FILIPINA**

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

Trabajo Especial de Grado presentado en la Universidad de los Andes como requisito  
para optar al título de Magister Scientiae en Matemática Aplicada a la Ingeniería

Ing. Jesús Alberto Torres Hoyer  
C.I. 17.239.478

Tutor  
MSc María Elisa Elberg

Mérida, Febrero de 2014

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY - NC - SA 3.0 VE )

## Agradecimientos

A Dios Todopoderoso y la Virgen, especialmente la Virgen de la Inmaculada y Coromoto.

A mi tutora, Profesora María Elisa Elberg, quien con su dedicación, paciencia y apoyo me ayudó a culminar esta etapa de mi vida profesional, mil gracias por los conocimientos compartidos tanto académicos como lecciones de vida.

Al Profesor Leonardo González, por todos los consejos, asesorías y ayuda prestada durante la investigación, gracias por las palabras de aliento y apoyo cuando fueron necesarias.

A Magaly Dávila, por su incommensurable colaboración durante mis estudios.

A todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al buen desarrollo y termino de la presente investigación.

## Índice General

Portada	i
Agradecimientos	ii
Índice General	iii
Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	viii
Índice de Ecuaciones	x
Resumen	xii
Capítulo I: Generalidades	1
1.1. Introducción	2
1.2. Planteamiento del Problema	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Justificación	4
1.5. Alcances y Limitaciones	4
Capítulo II: Marco Referencial	6
2.1. Antecedentes	7
2.2. Ubicación y Descripción del Área de Estudio	8
2.3. Fundamentos Teóricos	17
2.3.1. Deriva Continental, Expansión del Fondo Oceánico y Tectónica de Placas	17
2.3.1.1. Deriva Continental	17
2.3.1.2. Expansión del Fondo Oceánico	18
2.3.1.3. Tectónica de Placas	18
2.3.2. Esfuerzo, Deformación y Energía de Deformación	26
2.3.2.1. Esfuerzo	26
2.3.2.2. Deformación	28
2.3.2.3. Energía de Deformación	28
2.3.3. Método de Elementos Finitos	31
2.3.3.1. Revisión General del MEF	31
2.3.3.2. Construcción del Modelo en Elementos Finitos	34
2.3.4. Principio de Saint Venant	42
Capítulo III: Metodología	43
3.1. Estudios Preliminares	44
3.2. Modelado Numérico	44
3.2.1. Pre-procesamiento	45
3.2.1.1. Elaboración de la geometría	45
3.2.1.2. Comportamiento mecánico de los materiales	45
3.2.1.3. Propiedades geomecánicas de los materiales	47
3.2.1.4. Cargas y condiciones de borde	47
3.2.1.5. Selección del elemento y generación de la malla	53

3.2.2. Procesamiento	54
3.3.3. Post-procesamiento	54
3.3. Correlación y análisis de valores geomecánicos	54
Capítulo IV: Presentación y Análisis de los Resultados	56
4.1. Generalidades del Modelo	57
4.2. Simulación Geomecánica: Evolución y Convergencia	57
4.3. Análisis del Modelo Definitivo	60
4.3.1. Distribución de los desplazamientos nodales	60
4.3.2. Distribución y Magnitudes de esfuerzos	70
4.3.3. Distribución y Magnitudes de deformaciones	75
4.3.4. Energía de Deformación Unitaria	80
4.4. Correlación y análisis de los valores numéricos	83
4.4.1. Placa Australiana	84
4.4.1.1. Zona I: Zona de subducción Oeste de la placa Australiana respecto a la Euroasiática	84
4.4.1.2. Zona II: Zona de subducción Central de la placa Australiana respecto a la Euroasiática	100
4.4.1.3. Zona III: Zona oriental extrema de interacción entre la placa Australiana y Euroasiática	102
4.4.2. Placa Euroasiática	103
4.4.2.1. Zona I: Zona de subducción con Australiana	104
4.4.2.2. Zona III: Zona de interacción con la placa Filipina	118
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	120
5.1. Conclusiones	121
5.2. Recomendaciones	124
Referencias Bibliográficas	126
Anexos	131

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Ubicación del área de estudio	9
Figura 2.2. Mapa físico del área de estudio	10
Figura 2.3. Mapa Físico de las Filipinas	12
Figura 2.4. Mapa Físico de la Isla de Java	13
Figura 2.5. Mapa Físico de la Isla de Sumatra	14
Figura 2.6. Mapa Físico de la Isla de Borneo	14
Figura 2.7. Mapa Físico de la Isla de Sulawesi	15
Figura 2.8. Mapa Físico de las Islas Molucas	16
Figura 2.9. Litosfera y Astenosfera	19
Figura 2.10. Límites de las Placas Tectónicas	20
Figura 2.11. Geometría del movimiento de las placas	24
Figura 2.12. Relaciones de movimientos entre los límites de placa y el polo de Euler	25
Figura 2.13. Vectores de velocidades lineales de las placas en el planeta	26
Figura 2.14. Estado general de esfuerzo para un elemento diferencial bi y tridimensional	27
Figura 2.15. Seis tipos diferentes de deformación	29
Figura 2.16. Elemento diferencial sometido a tracción y función que relaciona la fuerza de tracción y la extensión existente	29
Figura 2.17. Forma y Posición de los nodos de algunos elementos bidimensionales	33
Figura 3.1. Cargas aplicadas a las placas Australiana y Filipina	49
Figura 3.2. Condiciones de borde empleadas en la Placa Euroasiática	50
Figura 3.3. Condiciones de borde empleadas en la Placa Filipina	51
Figura 3.4. Condiciones de borde empleadas en la Placa Australiana	51
Figura 3.5. Movimientos de placas relativos para el modelo de movimiento global NUVEL-1	52
Figura 4.1. Curvas de calibración del modelo considerado	59
Figura 4.2. Distribución de los desplazamientos nodales en la dirección Z	60
Figura 4.3. Sectorización de los desplazamientos nodales calculados para el límite de la placa Euroasiática	62
Figura 4.4. Comparación de los desplazamientos calculados en la zona sur de la placa Euroasiática con los mapas reales	63
Figura 4.5. Comparación entre los desplazamientos nodales a lo largo de la zona A previamente indicada con el mapa físico de la zona de Java	64
Figura 4.6. Detalle de la distribución de desplazamientos nodales en la dirección Z en la placa Filipina	65
Figura 4.7. Perfil transversal de la zona de contacto entre las placas Euroasiática y Filipina	66
Figura 4.8. Distribución de desplazamientos nodales en la dirección Z en la Placa Australiana	67

Figura 4.9. Perfil de la colisión entre la placa Euroasiática y Australiana	67
Figura 4.10. Vista inferior del modelo, obsérvese la subducción de las placas Australiana y Filipina respecto a la placa Euroasiática	68
Figura 4.11. Perfil de la colisión entre la placa Filipina, Euroasiática y Australiana	68
Figura 4.12. Desplazamientos nodales en el plano X,Y. a) Desplazamientos en la dirección X. b) Desplazamientos en la dirección Y	69
Figura 4.13. Distribución de los esfuerzos máximos principales	70
Figura 4.14. Distribución de los esfuerzos mínimos principales	71
Figura 4.15. Distribución de los esfuerzos medios principales	72
Figura 4.16. Distribución de esfuerzos en la dirección X	73
Figura 4.17. Distribución de esfuerzos en la dirección Y del modelo	74
Figura 4.18. Distribución de esfuerzos en la dirección Z del modelo	75
Figura 4.19. Distribución de las deformaciones máximas principales	76
Figura 4.20. Distribución de las deformaciones medias principales	76
Figura 4.21. Distribución de las deformaciones mínimas principales	77
Figura 4.22. Distribución de las deformaciones en la dirección X	78
Figura 4.23. Distribución de las deformaciones en la dirección Y	79
Figura 4.24. Distribución de deformaciones unitarias en la dirección Z	79
Figura. 4.25. Distribución de la Energía de Deformación Interna	82
Figura 4.26. Detalle de la distribución de la Energía de Deformación Interna en los límites de las placas consideradas por el modelo	82
Figura 4.27. Energía de Deformación Interna consecuencia de la formación de Nueva Zelanda	83
Figura 4.28. Energía consecuencia del empotramiento asignado a la placa Euroasiática para generar la rotación de las placas Filipina y Australiana en torno a ésta	83
Figura 4.29. División de la placa Australiana en zonas según la distribución de desplazamientos, esfuerzos, deformaciones y energía de deformación unitaria	85
Figura 4.30. Distribución de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática	87
Figura 4.31. Correlación de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z en los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática	88
Figura 4.32. Distribución de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática	91
Figura 4.33. Correlación de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z en los perfiles paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática	92

Figura 4.34. Distribución de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática).	96
Figura 4.35. Distribución de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática)	97
Figura 4.36. Correlación de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z en los perfiles en profundidad (perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática)	99
Figura 4.37. Correlación de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z en los perfiles en profundidad (paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática)	100
Figura 4.38. División del límite de la placa Euroasiática en zonas según la distribución de desplazamientos, esfuerzos, deformaciones y energía de deformación unitaria	104
Figura 4.39. Distribución de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles paralelos a la zona de subducción con la placa Australiana	107
Figura 4.40. Distribución de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Australiana	111
Figura 4.41. Distribución de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (paralelos a la zona de subducción con la placa Australiana)	116
Figura 4.42. Distribución de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (perpendicular a la zona de subducción con la placa Australiana)	118

## Índice de Tablas

Tabla 3.1. Coordenadas locales de las placas en estudio (Tomado de Elberg y Sosa, 2008).	46
Tabla 3.2. Parámetros Geomecánicos de la litosfera	47
Tabla 3.3. Fuerzas aplicadas en el modelo considerado	48
Tabla 3.4. Vectores de Euler respecto a Norteamérica	52
Tabla 3.5. Vectores de Euler calculados para las placas en estudio, en base al modelo de movimiento global NUVEL-1 <sup>a</sup>	53
Tabla 4.1. Valores utilizados para la calibración de los modelos.	58
Tabla 4.2. Valores calculados de la energía de deformación interna (SENER), esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33, respectivamente) para los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática	86
Tabla 4.3. Valores calculados de la energía de deformación interna, esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z para los perfiles paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática. Los elementos se muestran desde la izquierda a derecha de la placa	89
Tabla 4.4. Valores calculados de la energía de deformación interna (SENER), esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33, respectivamente) para los perfiles en profundidad (perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática). Los elementos se muestran incrementando en su profundidad	94
Tabla 4.5. Valores calculados de la energía de deformación interna (SENER), esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33, respectivamente) para los perfiles en profundidad (paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática). Los elementos se muestran incrementando en su profundidad	96
Tabla 4.6. Valores calculados de la energía de deformación interna (SENER), esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33, respectivamente) para los perfiles paralelos a la zona de subducción con la placa Australiana. Los elementos que se muestran van en dirección Este - Oeste	106
Tabla 4.7. Valores calculados de la energía de deformación interna (SENER), esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33, respectivamente) para los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Australiana. Los elementos que se muestran van desde la zona de Subducción hacia el interior de la placa	108
Tabla 4.8. Valores calculados de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (paralelos a la zona de subducción con la placa Australiana)	112

Tabla 4.9. Valores calculados de la energía de deformación unitaria (SENER), esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (perpendicular a la zona de subducción con la placa Australiana) 116

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## Índice de Ecuaciones

Ecuación 2.1.	21
Ecuación 2.2.	21
Ecuación 2.3.	22
Ecuación 2.4.	22
Ecuación 2.5.	24
Ecuación 2.6.	24
Ecuación 2.7.	24
Ecuación 2.8.	28
Ecuación 2.9.	29
Ecuación 2.10.	30
Ecuación 2.11.	30
Ecuación 2.12.	31
Ecuación 2.13.	31
Ecuación 2.14.	31
Ecuación 2.15.	31
Ecuación 2.16.	31
Ecuación 2.17.	31
Ecuación 2.18.	36
Ecuación 2.19.	36
Ecuación 2.20.	36
Ecuación 2.21.	36
Ecuación 2.22.	36
Ecuación 2.23.	37
Ecuación 2.24.	37
Ecuación 2.25.	37
Ecuación 2.26.	37
Ecuación 2.27.	37
Ecuación 2.28.	37
Ecuación 2.29.	37
Ecuación 2.30.	37
Ecuación 2.31.	38
Ecuación 2.32.	38
Ecuación 2.33.	38
Ecuación 2.34.	39
Ecuación 2.35.	39
Ecuación 2.36.	39
Ecuación 2.37.	39
Ecuación 2.38.	40
Ecuación 2.39.	40
Ecuación 2.40.	41
Ecuación 2.41.	41

---

Ecuación 2.42.	42
Ecuación 2.43.	42
Ecuación 3.1.	52
Ecuación 3.2.	53

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## Resumen

### Análisis numérico de la energía de deformación entre las placas tectónicas Euroasiática, Australiana y Filipina

Ing. Jesús Alberto Torres Hoyer

Tutor: MSc. María Elisa Elberg

La tectónica de placas es una teoría que permite explicar gran parte de los fenómenos geológicos existentes, surgió como consecuencia de una serie de observaciones respecto a los continentes y viene a constituir la unión de dos propuestas, la deriva continental de Wegener y la expansión del fondo oceánico de Hess. Esta teoría postula que existen bloques de litosfera, conocidos como placas, capaces de moverse sobre un material más blando, astenosfera. Las placas constituyen segmentos rígidos por lo que las deformaciones se presentan en sus límites, de aquí surge la idea de analizar la energía de deformación de las zonas de contacto entre las placas Euroasiática, Australiana y Filipina empleando el Método de Elementos Finitos con base a esfuerzos, deformaciones y desplazamientos, bajo calibración de modelos a estados naturales conocidos. Para ello se cumple una etapa metodológica que se inicia con estudios preliminares que permiten recopilar la información necesaria para la elaboración de los modelos, que se someten al análisis numérico, para posteriormente estudiar a detalle sus resultados, en este caso se presenta una correlación numérica entre los esfuerzos, deformaciones y energía de deformación interna calculadas, obteniéndose que los máximos valores de desplazamientos, esfuerzos, deformaciones y energía de deformación se encuentran en los límites de las placas, adicionalmente donde los resultados son consecuencia de la interacción de dos placas tectónicas los mismos disminuyen de forma no lineal a medida que se aleja de dicha región, las distribuciones paralelas demuestran la alta complejidad estructural de esa zona. Por su parte, en las regiones donde existe superposición de efectos, los comportamientos numéricos de las variables no son evidentes. Por último, la energía de deformación calculada representa una fracción de la energía acumulada producto de la subducción, puesto que se considera un deslizamiento libre de fricción, la magnitud de los sismos que pudieran derivarse de la liberación de esta energía rondan los 6.8° de magnitud en la escala de Richter.

*Palabras claves: Tectónica de Placas, Método de Elementos Finitos, Energía de Deformación, Correlación Numérica*



[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)  
**CAPÍTULO I**  
**GENERALIDADES**

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY - NC - SA 3.0 VE )

## Capítulo I

### Introducción y Generalidades

#### 1.1. Introducción

La tectónica de placas es una teoría propuesta en 1968, como resultado de la unión de varios conceptos planteados hasta la época, entre los cuales se encuentra la deriva continental y la expansión del fondo oceánico presentadas por Alfred Wegener y Harry Hess respectivamente. Según el modelo propuesto por la tectónica de placas, la corteza y el manto superior se comportan como una unidad rígida, conocida como litosfera, que es capaz de desplazarse libremente sobre otra más débil y profunda, denominada astenosfera.

La litosfera está dividida en varias partes conocidas como placas, las cuales son capaces de moverse, por lo que su forma y tamaño varían en función de los límites y tipo de interacción que tenga con sus vecinas [21].

Los límites entre las placas son las zonas de interacción entre ellas, estos pueden ser límites convergentes, donde dos placas tectónicas colisionan y una tiende a descender por debajo de la otra, lo que genera la destrucción de corteza en las llamadas zonas de subducción; límites divergentes, donde dos placas se separan ocasionando el ascenso del manto y la creación de nueva corteza y; por último, límites transformantes, donde las placas se deslizan una respecto a la otra, sin que se cree o se destruya material.

El planeta Tierra es un sistema dinámico, donde las placas tectónicas son sólo una parte de él, estos segmentos de litosfera están en constante movimiento e interactuando entre sí, como consecuencia de esto se tienen los accidentes geográficos más imponentes tales como El Himalaya, Los Andes, los arcos de islas como el cinturón de fuego del pacífico, las Antillas del Caribe, además de los terremotos más destructivos, Sumatra en 2008, Chile en 2010, entre otros.

Cabe destacar que las placas, se consideran rígidas por lo que poca, idealmente ninguna, deformación ocurre en su interior. Los límites de placas cubren cerca del 15% de la superficie de la Tierra y cerca del 40% de la población mundial vive en ellos, aspecto que justifica su estudio.

La tectónica de placas permite explicar gran parte de los fenómenos geológicos, por lo cual el estudio de las zonas de contacto y sus efectos, medidos en desplazamientos, deformaciones y esfuerzos, permiten el análisis numérico de la energía de deformación que se genera durante la interacción de las placas tectónicas dentro del planeta.

En esta investigación se estudian las placas Euroasiática, Australiana y Filipina, sus límites de contacto, en base a esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y energía de deformación. La interacción entre las placas tectónicas no es un problema sencillo, por ello se recurre al Método de Elementos Finitos (MEF).

## 1.2. Planteamiento del Problema

El estado de esfuerzos y deformaciones producto de la interacción entre las placas tectónicas es, en gran parte, responsable de la creación de arcos de islas y sistemas montañosos como Los Andes, El Himalaya, Las Filipinas, entre otros. A medida que se forman de estos sistemas, las concentraciones de energía de deformación han sido elevadas, y durante el contacto progresivo estos valores han sobrepasado ciertos límites lo cual ha provocado liberación en algunos casos progresiva y en otros violenta [17].

Esta investigación analiza los estados naturales de los contactos entre las placas Euroasiática, Australiana y Filipina, empleando el Método de Elementos Finitos para obtener y correlacionar la energía de deformación, esfuerzos y desplazamientos en modelos numéricos.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo General

Analizar la energía de deformación de las zonas de contacto entre las placas Euroasiática, Australiana y Filipina empleando el Método de Elementos Finitos con base a esfuerzos, deformaciones y desplazamientos, bajo calibración de modelos a estados naturales conocidos.

### 1.3.2. *Objetivos Específicos*

- ✓ Realizar el modelado numérico tridimensional de los contactos entre las placas Euroasiática, Australiana y Filipina.
- ✓ Validar los modelos numéricos con base a desplazamientos calibrados a estados naturales conocidos.
- ✓ Obtener valores de energía de deformación, esfuerzos, deformaciones en los modelos.
- ✓ Analizar, con base a correlación numérica, los resultados obtenidos en la simulación.

### 1.4. **Justificación**

La tectónica de placas es una teoría que permite explicar muchos de los fenómenos ocurridos en nuestro planeta a lo largo del tiempo geológico.

El conocimiento de las interacciones entre las placas, así como sus efectos, es fundamental en la Geología y de allí surge la idea de analizar la energía de deformación en las zonas de contacto entre las placas Euroasiática, Australiana y Filipina, previa calibración de los modelos en base a los estados actuales de la zona.

La decisión de trabajar en esta región del planeta parte del hecho que es una zona muy activa, donde en los últimos años se han venido presentando varios sismos de grandes intensidades.

El análisis de la interacción entre placas tectónicas y los fenómenos asociados a ellas, implica considerar geometrías, cargas y condiciones de frontera complejas, requiriendo métodos numéricos, en este caso el Método de Elementos Finitos, para obtener soluciones a estos problemas utilizando computación de alto nivel.

### 1.5. **Alcances y Limitaciones**

Esta investigación plantea analizar el estado de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y energía de deformación interna, producto de la interacción entre las placas tectónicas Euroasiática, Filipina y Australiana, utilizando modelos elásticos tridimensionales de espesor unitario.



Las propiedades geomecánicas utilizadas se consideran isotrópicas y homogéneas, correspondiendo a valores teóricos medios de la litosfera. Se establece la fuerza de tensión de placas para la definición del movimiento descendente entre ellas.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)



[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## CAPÍTULO II

### MARCO REFERENCIAL

## Capítulo II

### Marco Referencial

#### 2.1. Antecedentes

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un método numérico de relativamente poco empleo en la geología, quizás por el desconocimiento de su confiabilidad o la creencia que es un método complejo y difícil de aplicar; no obstante, esta situación ha estado cambiando en los últimos años producto de los grandes avances en la computación, que ha reducido significativamente los tiempos de computo y facilitado enormemente el empleo de la técnica al investigador.

Se presentan antecedentes donde se aplica el MEF en la geología o ingeniería geológica, de forma general, y otros que son realmente significativos donde se aplica el método en la tectónica global.

**Torres, Gutiérrez, y Elberg** [23], en el 2010 obtuvieron la distribución de esfuerzos, desplazamientos y deformaciones en los límites de las placas Euroasiática, Australiana y Filipina empleando el método de elementos finitos.

**Gutiérrez, Torres y Elberg** [9], en el 2010 simularon la formación del Himalaya por el contacto entre las placas tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe.

**Infante, Torres y Elberg** [11], en el 2010, analizaron la estabilidad de los taludes del sector San José de las Flores y de la antigua sede de la Facultad de Ingeniería (Mérida-Edo. Mérida) en condiciones sísmicas empleando el programa de elementos finitos ABAQUS.

**Elberg, Paredes, y Sayago** [6], en el 2010 generaron modelos donde se observa cómo influye la disposición de la esquistosidad y la pendiente en los afloramientos de taludes ubicados en el Estado Miranda en Venezuela, para analizar el riesgo geológico mediante el Método de Elementos Finitos.

**Torres, Torres y Monsalve** [24], en el 2009, analizaron la estabilidad de tres taludes que componen el subtramo San Juan de Colón – San Félix de la Autopista San Cristóbal – La Fria empleando el Método de Elementos Finitos.

**Elberg y Sosa** [7], en el 2008, estudiaron la energía de deformación entre las placas Suramericana, Nazca y Caribe, aplicando el Método de Elementos Finitos, con ayuda del programa comercial ABAQUS.

**Sosa, Alam y Elberg** [19], durante el 2008, aplicaron el MEF en la simulación de zonas susceptibles a movimientos de masa en la Franja Costera del Estado Carabobo, en Venezuela.

**Quintero, Elberg, González y Bongiorno** [16], en el 2006, utilizando el Método de Elementos Finitos, simularon en dos y tres dimensiones, mediante un modelo elástico, el Túnel de Estanques en la Autopista Rafael Caldera del Estado Mérida y su comportamiento ante el desplazamiento del Corrimiento de Mesa Bolívar.

**Lacruz y Elberg** [12], en el 2005, realizaron un estudio de presas de tierra a partir de un modelo elástico y poro-elástico bajo las condiciones de servicio, mediante el uso del programa comercial ABAQUS.

**Dyksterhuis, Albert y Muller** [4], en el 2005, efectuaron un análisis del estado de esfuerzos intraplaca actual y del Mioceno, en la Placa Indo-Australiana, empleando el Método de Elementos Finitos, con ayuda del programa comercial ABAQUS.

**Cabello, Navarrete y Elberg** [1], en el 2004, simularon la Falla La Hechicera, logrando la elaboración de un modelo ideal elástico usando el Método de Elementos Finitos.

## 2.2. Ubicación y Descripción del Área de Estudio

Las placas Euroasiática, Australiana y Filipina, se encuentran en contacto en el extremo oriental del planeta (Fig. 2.1).

El área pertenece a la región conocida como el cinturón de fuego del pacífico, el cual es un arco volcánico formado por la subducción de las placas Filipina, Australiana y Pacífico respecto a las placas Euroasiática y Filipina. Se estudia específicamente el Sureste Asiático y Oceanía, como se muestra en la figura 2.2.

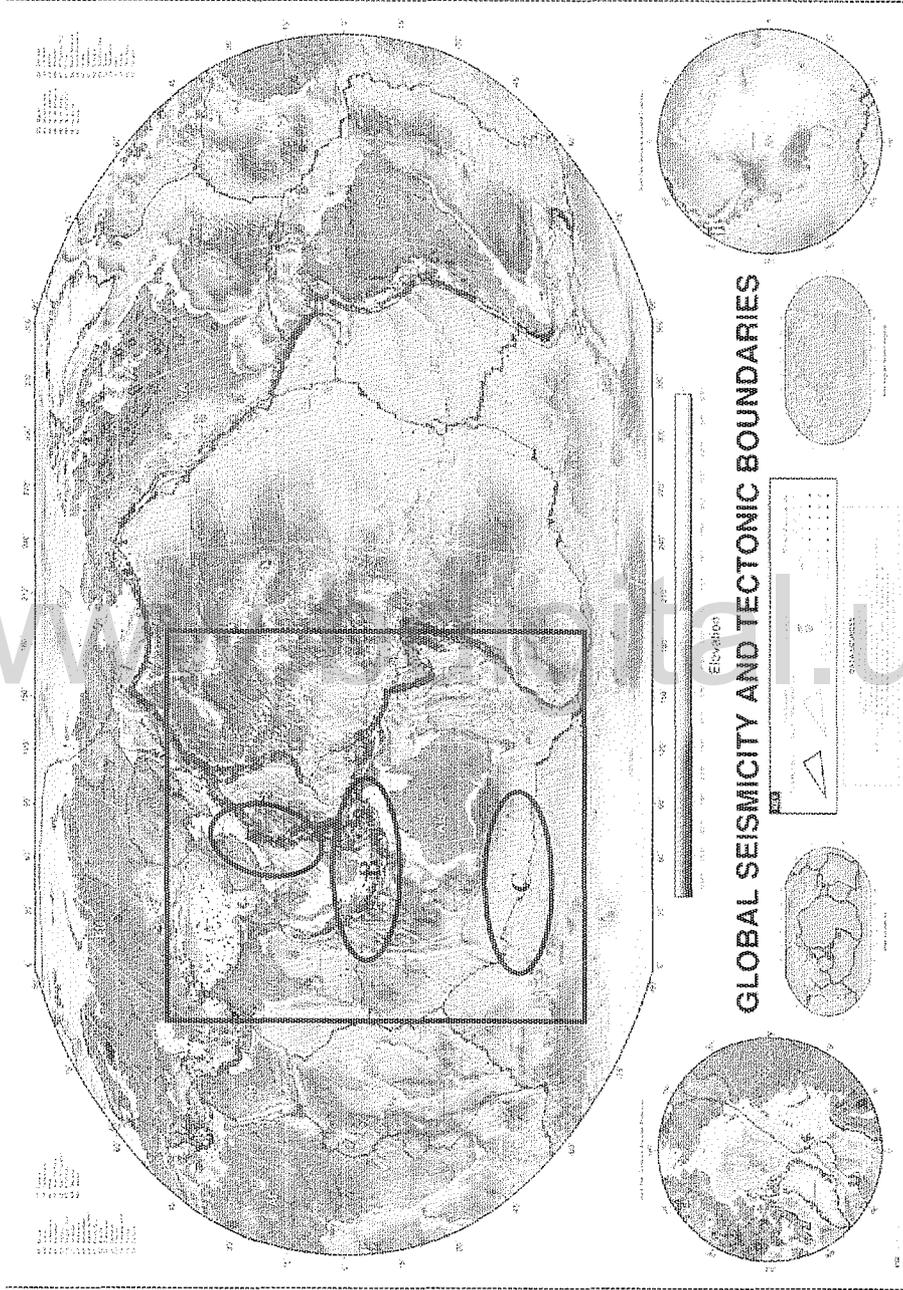


Figura 2.1. Ubicación del área de estudio. Nótese que las placas en estudio tienen diversos tamaños y composiciones, la placa Euroasiática es principalmente continental, Filipina es netamente oceánica y la placa Australiana es mixta. Las zonas A, B y C indican los diferentes bordes que se presentan en el área de estudio, A y B representan zonas de subducción y C una dorsal (tomado de [8]).



Figura 2.2. Mapa Físico del Área de Estudio (Tomado de [2]).

La región está conformada por más de 8000 islas, donde destacan las islas de Java, Indonesia, Borneo, Filipinas, Ryu Kyu, Taiwan, entre otras. A continuación se describen las islas más importantes del área y las características que fueron utilizadas como criterio de calibración de los modelos [26].

- **Filipinas:**

Las Filipinas es un archipiélago de 7107 islas (Fig. 2.3), limita al Este con el mar de Filipinas, al Oeste con el mar de China Meridional y al Sur con el mar de Célebes o Sulawesi. La isla de Borneo está situada a sólo unos cientos de kilómetros al sudoeste y Taiwán se encuentra directamente al norte. Las Molucas y Sulawesi se encuentran en el suroeste y Palaos está ubicado al este de las islas.

La mayoría de las islas son montañosas y son de origen volcánico. La montaña más alta es el monte Apo con una altitud de 2954 msnm y está situado en la isla de Mindanao. La depresión de Galathea en la fosa de Filipinas es el punto más profundo en el territorio, y el tercero más profundo en el mundo.

El territorio experimenta una actividad sísmica y volcánica frecuente. La meseta de Benham, al este en el mar de Filipinas, es una región submarina con una actividad tectónica muy activa. Diariamente se registran alrededor de 20 sismos, aunque la mayoría son débiles; el último terremoto importante registrado fue en Luzón en 1990 y en junio de 1991 se produjo la erupción terrestre más grande del siglo XX en el monte Pinatubo.

- **Isla de Java**

La isla de Java está situada en una cadena de islas con Sumatra al noroeste, y las islas de Bali y de Madura al este, la isla de Borneo al noreste y al sur la isla Christmas. Java posee un origen casi totalmente volcánico y contiene 38 montañas cuya forma cónica característica indica que en un tiempo pasado fueron volcanes activos. Es la décimotercera isla más grande del mundo con una superficie de 132.000 km<sup>2</sup> y es la isla más poblada del mundo. El mapa físico de la isla se observa en la figura 2.4 destacando que su punto más elevado es 3.676 msnm, en el Monte Semeru.



Figura 2.3. Mapa Físico de las Filipinas (Tomado de [26])

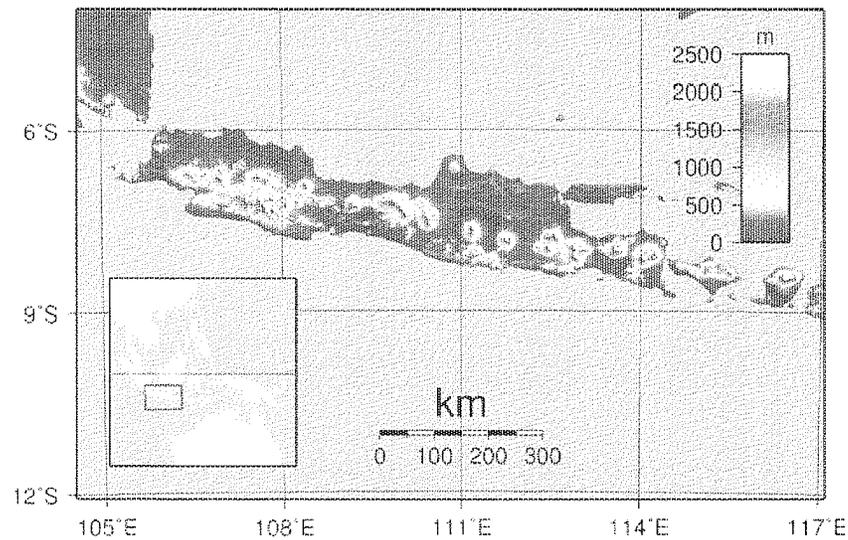


Figura 2.4. Mapa Físico de la Isla de Java (Tomado de [26]). La isla que se encuentra al Noreste es la Isla de Madura y su altitud máxima no supera los 300 msnm.

- **Sumatra**

Es una gran isla del Sureste asiático, localizada en aguas del océano Índico y perteneciente a Indonesia. Con una superficie de 473.605 km<sup>2</sup>, es la sexta isla más grande del mundo.

La espina dorsal de la isla es la cadena de las montañas Barisan, siendo el punto más alto, el volcán Kerinci con 3.805 msnm, que se encuentra aproximadamente en el punto medio de la cordillera, figura 2.5. Sumatra ha tenido algunos de los terremotos más poderosos tales como los ocurridos en 1833, 2004, 2005 y 2007.

- **Borneo**

Borneo es la tercera mayor isla del mundo y está ubicada en el sureste asiático. Administrativamente, la isla se encuentra dividida entre Brunéi, Malasia e Indonesia, como se observa en la figura 2.6.

Borneo está rodeado por el Mar del Sur de China, al norte y al noroeste, el Mar de Sulu al noreste, el Mar de Célebes al este y el Mar de Java hacia el sur. Al oeste de Borneo se encuentran la península de Malaca y Sumatra, al sur Java, al este Sulawesi, y al noreste, Filipinas.

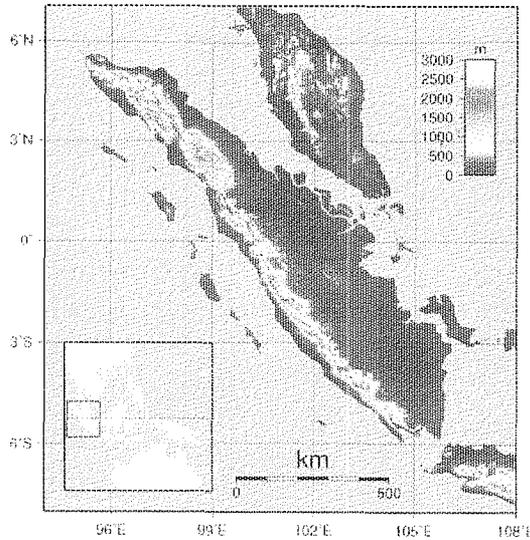


Figura 2.5. Mapa Físico de la Isla de Sumatra (Tomado de [26]).

Antes de que los niveles del mar subieran al final de la última Edad de Hielo, Borneo era parte de Asia continental, formando con Java y Sumatra, las regiones montañosas de la península que se extendía al este de la actual Indochina y Tailandia. El Mar de China Meridional y el Golfo de Tailandia cubren las antiguas zonas bajas de esta península.

El punto más alto corresponde al Monte Kinabalu con una altitud de 4095 msnm.

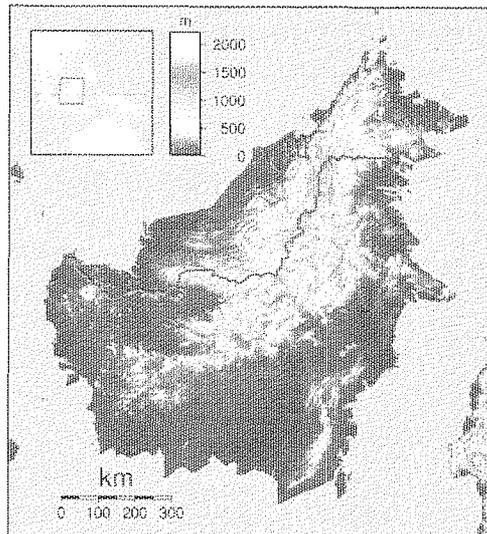


Figura 2.6. Mapa Físico de la Isla de Borneo (Tomado de [26]).

- **Sulawesi o Isla de Célebes**

Es una de las cuatro islas mayores de la Sonda de Indonesia, ubicado entre el archipiélago de las Molucas y la isla de Borneo. Es la undécima isla más grande del mundo. Está rodeada, al oeste, por Borneo, al norte por las Filipinas, al este por las Molucas y al sur por Flores y Timor. La isla tiene una forma muy particular y distintiva, dominada por cuatro grandes penínsulas. La parte central es sumamente montañosa, no volcánica en su mayoría. Su punto más elevado es el Bulu Rantemario con 3478 msnm (Fig. 2.7).

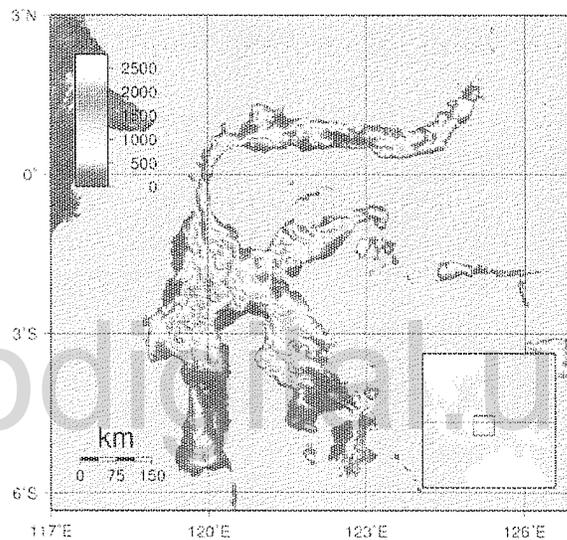


Figura 2.7. Mapa Físico de la Isla de Sulawesi (Tomado de [26]).

- **Islas Molucas (*Maluku*)**

Es un archipiélago de Indonesia, donde se estima la existencia de 1027 islas, las cuales en su mayoría son montañosas y boscosas, tal como se muestra en la figura 2.8. Se encuentran limitadas al oeste por Sulawesi y las islas menores de Sonda; y al este por la Nueva Guinea. Geológicamente es una región compleja, debido a la existencia de varias microplacas, corresponden a un arco volcánico donde han existido 70 erupciones importantes en los últimos 500 años, muchas de estas islas presentan volcanes emergiendo del mar, la máxima elevación registrada es de 3027 msnm en Seram y es consecuencia del empuje de la placa Australiana.

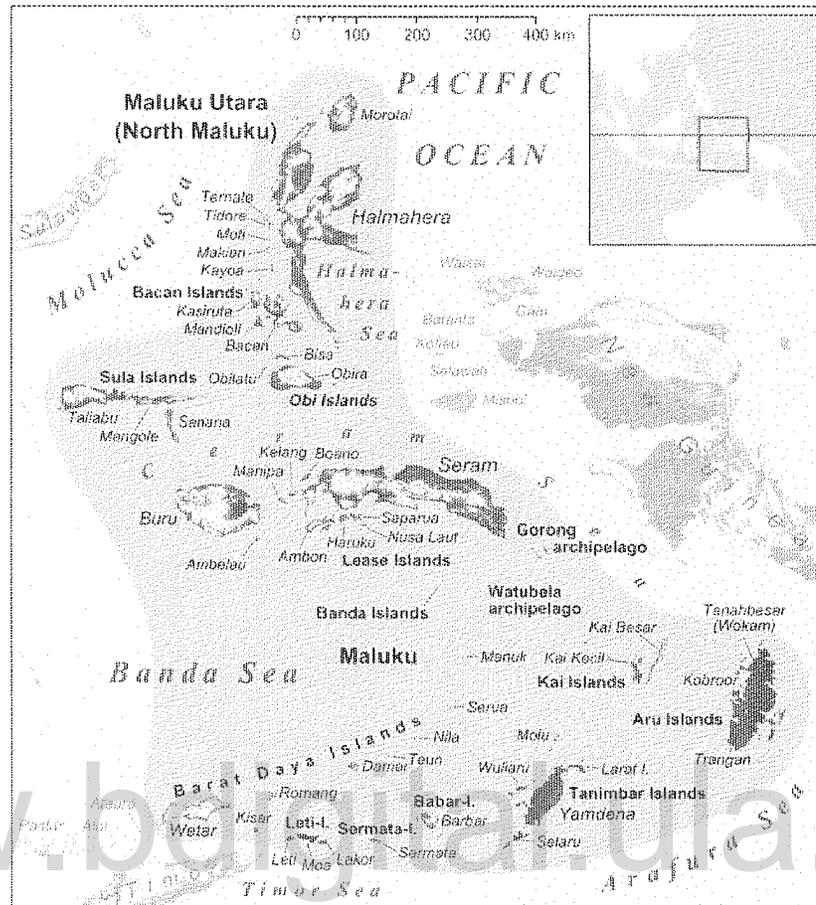


Figura 2.8. Mapa Físico de las Islas Molucas (Tomado de [26])

- **Ryu Kyu**

Las islas Ryu Kyu son una cadena de islas volcánicas japonesas, las principales islas que lo componen son Okinawa, Sakishima, Tokara entre otras, tiene una elevación máxima de 1936 msnm.

- **Taiwán**

La isla de Taiwán tiene una superficie total de 35.980 km<sup>2</sup> y está situada al sureste de la China continental. Existe un contraste entre los dos tercios orientales de la isla, con un terreno muy montañoso, con cinco cordilleras dispuestas de norte a sur, culminando en el pico Yu Shan a 3952 msnm. La zona llana está en la costa occidental, donde se concentra el 75% de la población.

- **Adaman y Nicobar**

Las Islas de Andamán y Nicobar forman parte de los territorios de la India. Están localizadas en el océano Índico, en la parte sur del 10° N, estando las Andamán al norte y Nicobar al sur. Sus altitudes no superan los 1000 msnm.

### 2.3. Fundamentos Teóricos

#### 2.3.1. Deriva Continental, Expansión del Fondo Oceánico y Tectónica de Placas.

Para poder definir la tectónica de placas, se hace necesario describir las hipótesis de la deriva continental y la expansión del fondo oceánico.

##### 2.3.1.1. Deriva Continental

La deriva continental fue propuesta por Alfred Wegener en 1915, en base a una serie de observaciones climáticas, geográficas, geológicas y biológicas (fósiles).

Wegener sugirió que hace 200 millones de años había existido un súper continente denominado Pangea, el cual se había dividido en varias partes que vendrían a representar los continentes actuales. La evidencia de Wegener era interesante, él observó que:

- Los continentes suramericano y africano coincidían en buena medida, y que su correspondencia aumentaba si se consideraba la plataforma como límite del continente.
- Existen numerosos fósiles idénticos a ambos lados del océano Atlántico.
- Las formaciones rocosas, a ambos lados del océano eran idénticas.

A pesar de esto los científicos del momento no consideraron en serio su hipótesis, quizás por algunas debilidades o falta de exactitud en alguna de sus propuestas [21].

Las principales objeciones a la hipótesis de Wegener eran:

- La incapacidad de indicar un mecanismo responsable del movimiento de los continentes.
- Para Wegener, los continentes habían atravesado el suelo oceánico, sin embargo no existían pruebas de que el mismo fuera lo suficientemente débil

como para permitir este movimiento sin experimentar grandes deformaciones [21].

Estas deficiencias en su hipótesis marcaron el pensamiento de la época y generaron que su idea no fuera aceptada.

### **2.3.1.2. Expansión del Fondo Oceánico**

Durante los años cincuenta y sesenta, los avances tecnológicos permitieron cartografiar el suelo oceánico, descubriendo así la existencia del sistema global de dorsales oceánicas, caracterizadas por un intenso vulcanismo y elevado flujo térmico. Adicionalmente, se determinó que las rocas oceánicas no superaban los 160 millones de años de edad. Estos datos fueron recopilados por Harry Hess, en una teoría que posteriormente se denominaría expansión del fondo oceánico [21].

Hess propuso que las dorsales estaban ubicadas en zonas de ascenso del manto y a medida que el material ascendía, se expandía lateralmente y generaba que el suelo oceánico se desplazara lateralmente, de forma parecida a una cinta transportadora, alejándose de la dorsal. Hess además planteó que las fosas oceánicas eran lugares donde la corteza oceánica regresaba al manto, puesto que esto permitía explicar la juventud de las rocas oceánicas [21].

### **2.3.1.3. Tectónica de Placas**

La tectónica de placas es una teoría robusta, propuesta en 1968, que unifica los conceptos de deriva continental y expansión del fondo oceánico. Permite explicar el movimiento de la litosfera por medio de los mecanismos de subducción y de expansión del fondo oceánico, los cuales son responsables de los rasgos geológicos terrestres [21].

Según la tectónica de placas, el manto superior y la corteza se comportan como una unidad rígida, que flota sobre una capa más débil y caliente denominada astenosfera (Fig. 2.9). Las placas tectónicas constituyen segmentos de litosfera, perfectamente móviles, que cambian frecuentemente de tamaño y forma [21], éstas son consideradas

unidades rígidas por lo que poca, idealmente ninguna, deformación ocurre en su interior, sólo en sus límites [20].

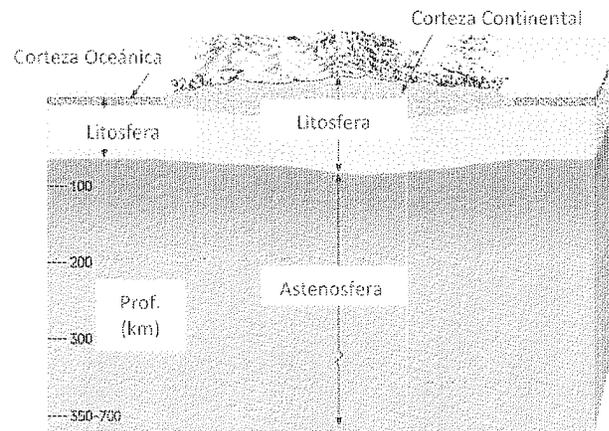


Figura 2.9. Litosfera y Astenosfera. Obsérvese que la Litosfera se encuentra constituida por la Corteza y el Manto Superior, constituye la capa mecánica más externa de la Tierra y tiene un espesor variable según el lugar que se considere, por su parte, la Astenosfera es una capa menos rígida y más caliente que la anterior y juega un papel fundamental en el movimiento de las placas (Modificado de [21])

Las placas tectónicas son capaces de moverse lentamente como resultado de la distribución desigual de calor en el interior del manto. Es conocido que las dorsales oceánicas son lugares donde el manto caliente asciende hasta llegar a la superficie, generando nueva corteza, no obstante el planeta no varía su volumen, por lo que deben existir zonas donde la corteza sea consumida, estos dos lugares junto con una zona de reajuste de esfuerzos constituyen los límites de placas, que se proceden a explicar a continuación:

- Límites convergentes: son zonas donde dos placas colisionan (Fig. 2.10a), en ellos una placa más densa o antigua desciende por debajo de otra más liviana o joven, provocando el consumo de corteza oceánica, como resultado de esto se generan los arcos de islas (Fig. 2.10a-1) o arcos continentales (Fig. 2.10a-2). En caso de colisionar dos placas continentales se generan los orógenos de colisión

- Límites divergentes (Fig. 2.10b) son áreas donde dos placas se separan entre sí, como resultado de esto se tienen zonas donde se crea nueva corteza oceánica, estos son las denominadas dorsales oceánicas.
- Límites transformantes (Fig. 2.10c) son zonas de reajuste de esfuerzos, en ellas se deslizan dos placas lateralmente, sin crear o destruir corteza.

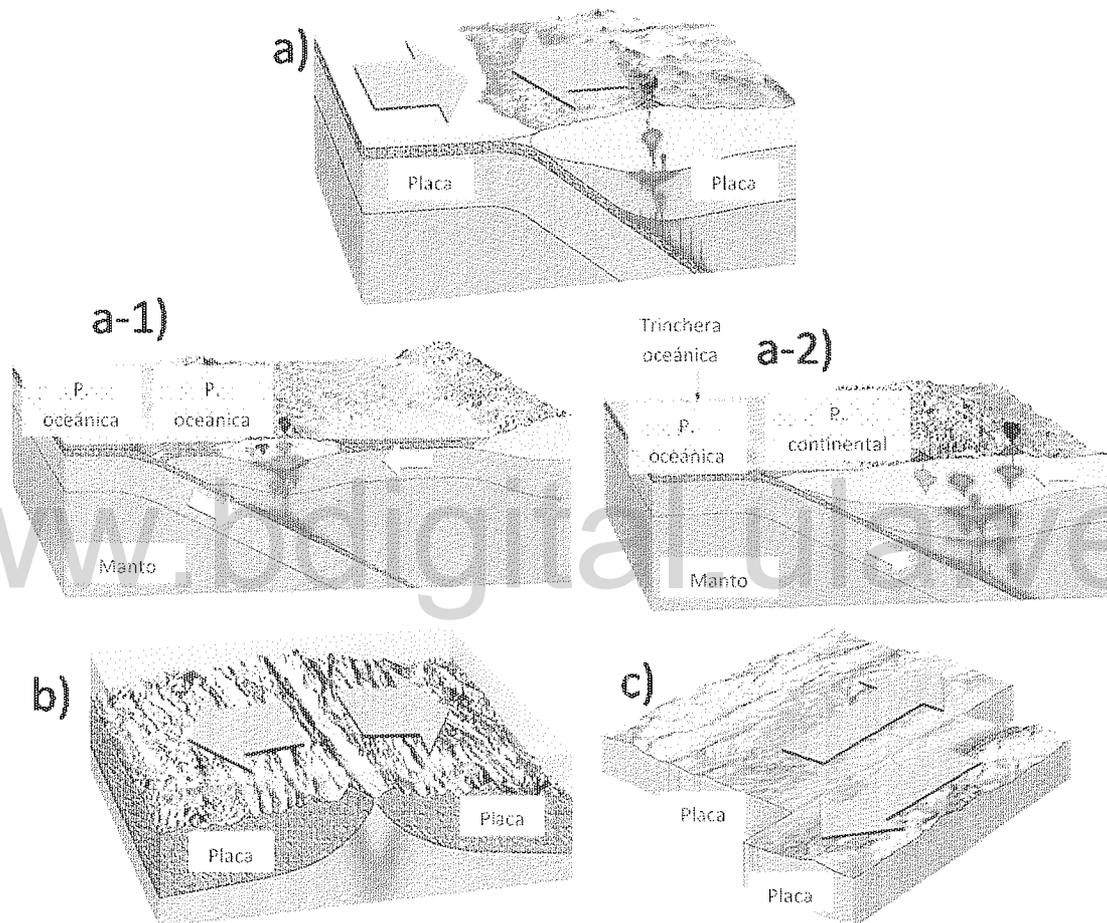


Figura 2.10. Límites de las Placas Tectónicas, el movimiento está dado por las flechas violetas.

a) Límites Convergentes, en estos se genera una colisión entre dos placas, la más densa penetra en el manto produciendo consumo de litosfera, estos pueden ser océano -- océano (a-1) en cuyo caso se origina un arco de islas u océano -- continente (a-2) donde resulta un arco volcánico.

b) Límites Divergentes, lugares donde se alejan las placas y se crea nueva corteza.

c) Límites Transformantes, zonas donde las placas se deslizan lateralmente sin que se produzca o consuma litosfera (Modificada de [21]).

En el fenómeno de la subducción se produce el ingreso de una placa fría, dentro del manto, calentándose lentamente a medida que desciende, las placas subducen rápidamente en comparación con el tiempo necesario para que el manto que las rodea las caliente. Por lo tanto, permanecen más frías, densas y mecánicamente más resistentes que el manto, lo que genera una flotabilidad negativa en las placas tectónicas y para [20] pareciera ésta ser la principal fuerza responsable del movimiento de las placas. Como consecuencia de este fenómeno se originan una serie de fuerzas que se describen a continuación:

- **Fuerza de Empuje de la Dorsal (FED).**

Wilson (1993, citado en [4]) señala que esta fuerza surge como consecuencia de la elevada topografía de la dorsal oceánica y corresponde a un gradiente de presión que actúa normal al rumbo de la misma.

Son varios los autores que han tratado de cuantificar su magnitud, así como el efecto que esta tiene en la subducción, [25] indican que la contribución de esta fuerza al momento de la subducción de la litosfera oceánica está dada por la relación:

$$F_{RP} = g\rho_m\alpha_v(T_m - T_0) \left[ 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\rho_m\alpha_v(T_m - T_0)}{(\rho_m - \rho_0)} \right] \kappa t \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde, la gravedad ( $g$ ) es  $10\text{m/s}^2$ , las densidades del manto ( $\rho_m$ ) y del agua ( $\rho_w$ ) son  $3300$  y  $1000 \text{ kg/m}^3$ , respectivamente, la difusibilidad termal ( $\kappa$ ) es  $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ , la diferencia de temperatura entre el manto y la superficie es ( $T_m$  y  $T_0$ ) es  $1200 \text{ K}$ , el coeficiente de expansión termal ( $\alpha_v$ ) es  $3 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  y  $t$  es la edad de la litosfera en segundos.

Por su parte [20] también presentan una ecuación para estimar el valor de esta fuerza, ellos se basan en los mecanismos focales presentes en las placas oceánicas y consideran que las placas no se están acelerando. Esta ecuación es significativamente más sencilla (Ec. 2.2) y corresponde al primer término de la propuesta por [25], sólo que no se considera la diferencia de temperatura entre el manto y la corteza por ser esta última relativamente pequeña en comparación con la temperatura del primero.

$$F_R = g\alpha_v\rho_m T_m \kappa t \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde los términos corresponden a los mencionados en la ecuación 2.1.

Nótese que ambas expresiones contienen la edad de la litosfera, por lo cual para el cálculo de dicha fuerza se debe considerar una isócrona y aplicarla normal a la dorsal estudiada. Otro aspecto a considerar, es que el valor de la fuerza es cero justo en la dorsal y se incrementa linealmente con la edad de la litosfera, por lo que el nombre empuje de dorsal no es el más correcto, sin embargo sigue siendo el más utilizado en la literatura. La fuerza no es resultado de un empuje en la dorsal sino de la anomalía de densidad dentro de la placa que se está enfriando.

- **Fuerza de Tensión de Placa en la Zona de Subducción (FTP).**

Se origina por la flotabilidad negativa de la litosfera oceánica densa que desciende en las zonas de subducción, y es proporcional al exceso de masa de la placa en relación con la masa del manto desplazado (Spence, 1987, citado en [4]).

Según [25] la contribución de la fuerza puede ser dada por la relación:

$$F_{SP} = \left( 2\rho_m g \alpha_v b (T_c - T_0) \left( \frac{\kappa \lambda}{2\pi u_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right) + \left( \frac{2(T_c - T_0) \gamma \Delta \rho_{OS}}{\rho_m} \left( \frac{\kappa \lambda}{2\pi u_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

Ec. 2.3

Donde, la gravedad (g) es 10 m/s<sup>2</sup>, las densidades del manto ( $\rho_m$ ) y del agua ( $\rho_w$ ) son 3300 y 1000 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, la difusibilidad termal ( $\kappa$ ) es 1 mm<sup>2</sup>/s, la diferencia de temperatura entre el manto y la superficie es ( $T_m$  y  $T_0$ ) es 1200 K, el coeficiente de expansión termal ( $\alpha_v$ ) es 3x10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>, t es la edad de la litosfera en segundos, b es la longitud de la placa,  $\lambda$  es 4000 Km,  $u_0$  = 50 mm/año,  $\Delta\rho_{OS}$  es 270 kg/m<sup>3</sup>.

Para placas de gran velocidad (5-10 cm/año) la placa que subduce alcanza velocidad terminal, esto quiere decir que las fuerzas relacionadas con la flotabilidad negativa de la placa son balanceadas por las fuerzas de arrastre viscoso que actúan en la placa conforme esta entra en el manto, y la fuerza neta experimentada por la placa es bastante pequeña (Forsyth and Uyeda, 1975 citado en [4]).

[20], señalan que la FTP es la principal responsable del efecto de subducción y a su vez proponen que la fuerza neta está dada por la relación

$$F = \frac{g\alpha_v\rho_m T_m v L^2}{24\kappa} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde, (g) es la gravedad, ( $\rho_m$ ) la densidad del manto, ( $\kappa$ ) la difusibilidad termal, ( $T_m$ ) la temperatura del manto, ( $\alpha_v$ ) el coeficiente de expansión termal, (v) es la velocidad de subducción y (L) es el espesor de la placa.

La discusión sobre el papel de la fuerza de tensión de placa no se limita a estos autores, de hecho Schellart (2004, citado en [4]) sugiere que tan sólo el 8–12% de la FTP es transferido, mientras Conrad y Lithgow-Bertelloni (2002, citado en [4]) sugieren que cerca de un 70–100% puede ser transmitido.

Los autores tienen diferentes puntos de vista, por lo que en este estudio se analizan las propuestas y se acogen los puntos que, a criterio del autor, tienen mayor asidero teórico. Por ejemplo, existe un momento en que las fuerzas de roce, tienen un orden de magnitud similar a la FTP y la contrarrestan, estando dado el movimiento de las placas por la importancia relativa de la FTP sobre las fuerzas que se oponen al movimiento. Si bien la velocidad terminal se logra en placas de gran velocidad, a juicio del autor también influyen otros aspectos como el ángulo de subducción, por nombrar alguno.

La expresión para FED es similar al término FTP, porque ambas son fuerzas generadas por las flotabilidades debido a los contrastes de densidad entre la placa y el manto. Nótese que ambas dependen de la misma manera del término  $g\alpha\rho_m T_m (\Delta T)$ , si se está considerando el enfoque de [25]) que describe la fuerza debida al contraste de densidad, pero diferentemente de  $\kappa$  porque un enfriamiento rápido incrementa el empuje de la dorsal, mientras que un calentamiento rápido disminuye la tensión de placa. Aunque es útil pensar en las fuerzas por separado, ambas se deben al sistema de convección del manto.

Las corrientes de convección del manto son las responsables del movimiento de las placas, lo que le imprime un dinamismo al planeta evidenciado en la alta sismicidad y vulcanismo asociado a los límites de placas (fig. 2.1). La mayoría de los sismos y

terremotos están asociados a la liberación de energía que genera el movimiento en la interfaz entre dos placas [20].

El movimiento relativo entre dos placas cualesquiera puede ser descrito como una rotación alrededor del Polo de Euler (Fig. 2.11). Esta condición controla el tipo de límite que se producirá (Fig. 2.12). En cualquier punto  $r$  a lo largo del límite entre la placa  $i$  y la placa  $j$ , con una latitud  $\lambda$  y una longitud  $\mu$ , la velocidad lineal de la placa  $j$  respecto a la placa  $i$  es:

$$V_{ji} = \omega_{ji} \times r \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde,  $V$  es la velocidad lineal,  $r$  es el vector posición del punto en el límite de la placa y  $\omega$  es el vector de la velocidad angular o el Vector de Euler.

El vector de Euler está dado por la relación:

$$\omega = (|\omega| \cos \theta \cos \phi, |\omega| \cos \theta \sin \phi, |\omega| \sin \theta) \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde  $\theta$  es la latitud y  $\phi$  la longitud del polo de Euler.

Ambos vectores,  $r$  y  $\omega$ , están definidos desde un origen ubicado en el centro de la Tierra (Fig. 2.11).

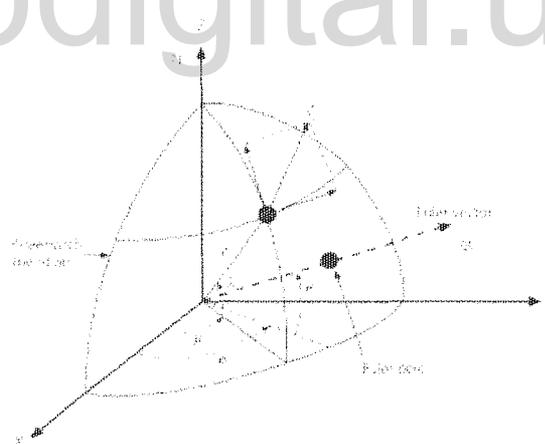


Figura 2.11. Geometría del movimiento de las placas. La velocidad lineal en el punto  $r$  está dada por  $v_{ji} = \omega_{ji} \times r$ . El polo de Euler es la intersección del vector de Euler con la superficie de la Tierra. Note que las longitudes oeste y latitudes sur son negativas (Tomada de [20]).

La dirección del movimiento es un círculo pequeño, paralelo a una “latitud” definida en torno al polo de Euler (Fig. 2.12). La convención utilizada es que la primera placa

llamada (j) se mueve en sentido antihorario, en el sentido de la mano derecha, alrededor del polo con respecto a la segunda placa.

La magnitud del movimiento relativo se incrementa con la distancia respecto al polo, tal como se menciona en la figura 2.12, porque:

$$|v_{ji}| = |\omega_{ji}|r \sin \gamma \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde  $\gamma$  es el ángulo entre el polo de Euler y el sitio.

Esta teoría se verifica fácilmente cuando se observan todos los vectores de velocidades lineales de las placas tectónicas del planeta (Fig. 2.13).

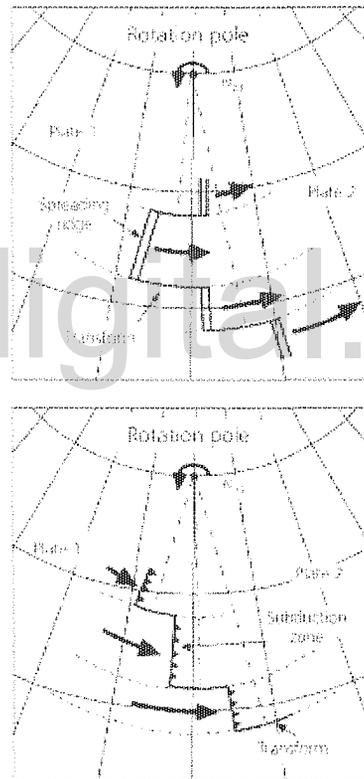


Figura 2.12. Relaciones de movimientos entre los límites de placa y el polo de Euler. Movimientos relativos ocurren a lo largo de pequeños círculos sobre el polo de Euler (líneas punteadas) a una velocidad que se incrementa con la distancia al polo. Note la diferencia en el tipo de límite entre las placas, que se genera por el cambio en el sentido de rotación.  $\omega_j$  es el vector de Euler correspondiente a la rotación antihoraria de la placa j con respecto a la placa i. Siendo así, en (a) la placa 2 rota en sentido antihorario respecto a la placa 1 (flechas de mayor tamaño), se alejan entre sí, y se genera una zona de expansión; mientras que en (b) se aprecia lo contrario, la placa 1 rota en sentido contrario a las agujas del reloj respecto a la placa 2, se genera un acercamiento, y por lo tanto el fenómeno de subducción (Tomada de [20]).

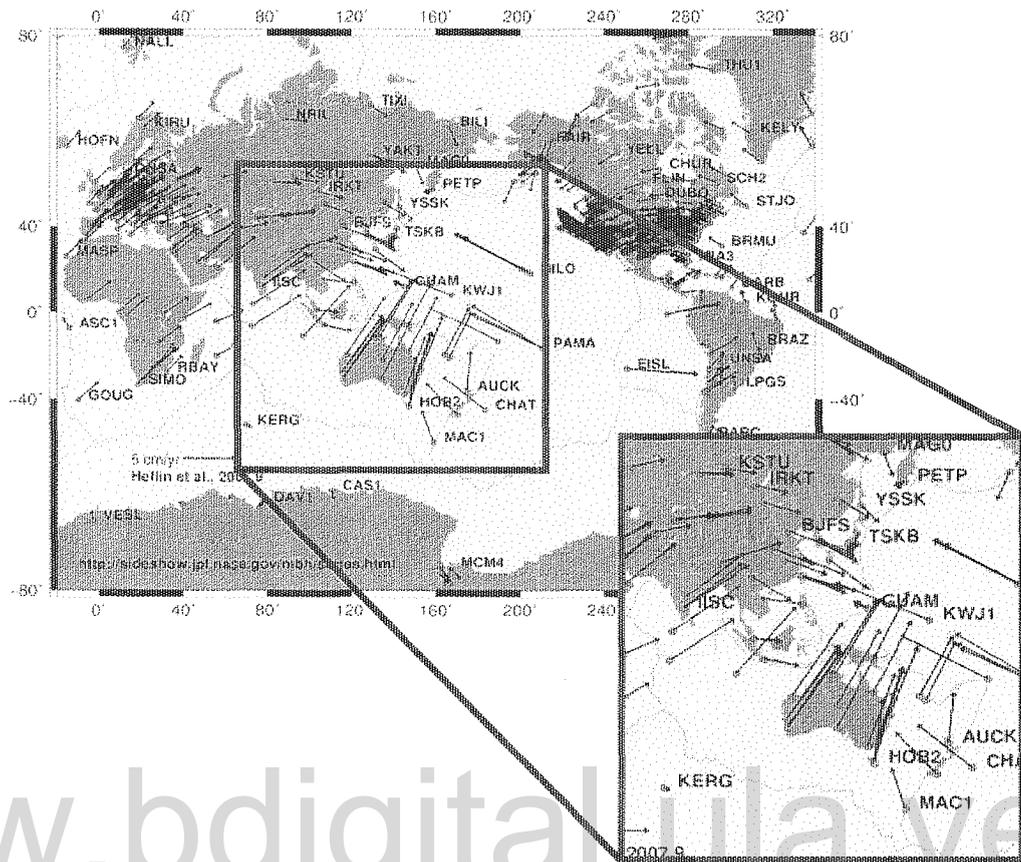


Figura 2.13. Vectores de velocidades lineales de las placas en el planeta, obsérvese que los vectores que describen los movimientos de las placas no son paralelos entre sí, sino que por el contrario describen una rotación. Si se detalla el movimiento de la placa Australiana se podrá identificar que la misma gira en sentido antihorario. Esta situación se repite en la placa Filipina y el caso opuesto (rotación horaria) se presenta en la placa Euroasiática, no obstante para el modelo esta se considera estática (Tomada de [26]).

### 2.3.2. Esfuerzo, Deformación y Energía de Deformación.

#### 2.3.2.1. Esfuerzo.

Es la cantidad de fuerza que actúa sobre una unidad de superficie aplicada sobre un plano cualquiera de un cuerpo. En geología, interesan los esfuerzos causados en las rocas por la gravedad y los que son causados por fuerzas independientes de la masa del cuerpo en cuestión, en este caso las fuerzas tectónicas.

La gravedad crea el esfuerzo llamado presión litostática, que es el esfuerzo que sufre un determinado punto debido al peso de las rocas que tiene encima. La presión

litostática no suele ser de tipo hidrostático: en general, el esfuerzo en la dirección vertical al que está sometido un punto de la Tierra en profundidad es igual a la presión litostática, mientras que el esfuerzo en cualquier otra dirección suele ser diferente. Las diferencias dependen mucho de las propiedades mecánicas de las rocas. Sólo a grandes profundidades, donde las rocas están sometidas a altas presiones y temperaturas, las diferencias de presión en unas direcciones u otras son mínimas [14]. En la mayoría de los casos, se admite que las deformaciones son tan lentas en geología, que puede considerarse que en un instante dado, los cuerpos están en equilibrio y por tanto puede aplicárseles la tercera ley de Newton. Por este motivo, se puede considerar siempre el esfuerzo como causado por una pareja de fuerzas compuestas, tensionales o compresivas, actuando sobre una superficie [14].

Un esfuerzo que actúe perpendicularmente a un plano se denomina esfuerzo normal, y uno que actúe paralelamente a un plano, esfuerzo de cizalla o de corte.

Un esfuerzo oblicuo puede descomponerse en uno perpendicular al plano y en otro paralelo a él. Esta descomposición da lugar a las componentes normal y de cizalla, y se denotan con las letras  $\sigma$  y  $\tau$  respectivamente (Fig. 2.14)

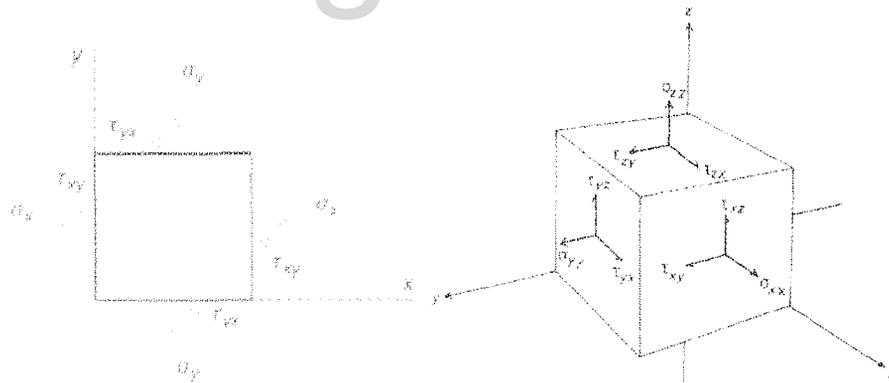


Figura 2.14. Estado general de esfuerzo para un elemento diferencial bi y tridimensional (tomado de [14]).

Cabe destacar, que el esfuerzo normal tiende a comprimir o separar, según sea compresivo o tensional, mientras que el esfuerzo de cizalla tiende a romper el cuerpo por el plano en que actúa y a desplazar las dos mitades del cuerpo.

El estado de esfuerzos se representa como un tensor de segundo orden, donde la diagonal principal corresponde a los esfuerzos normales y las componentes restantes se refieren a los esfuerzos de cizalla, una característica importante del tensor de esfuerzos es que es una matriz simétrica.

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.8.}$$

### 2.3.2.2. Deformación.

Se define la deformación como cualquier cambio en la posición o en las relaciones geométricas internas sufrido por un cuerpo como consecuencia de la aplicación de un campo de esfuerzos. Las deformaciones son causadas por esfuerzos, de forma que ambos conceptos están ligados por una relación de causa - efecto [14].

La deformación puede ser: traslación-rotación, homogénea-inhomogénea, elástica-plástica, frágil-dúctil, entre otras (Fig. 2.15).

La mayor deformación de la corteza se produce a lo largo de los bordes de las placas, ya que al interactuar unas con otras, las fuerzas tectónicas deforman las unidades de rocas [21].

Cuando las rocas son sometidas a esfuerzos empiezan a deformarse, normalmente plegándose, fluyendo o fracturándose, estas deformaciones pueden ser elásticas o plásticas. Las deformaciones elásticas son reversibles, mientras que, en la deformación plástica se producen cambios permanentes, es decir, el tamaño y forma de una unidad de roca es alterada para siempre [21].

### 2.3.2.3. Energía de Deformación.

[22] presentan una forma bastante sencilla de entender el concepto de energía de deformación y cómo se calcula, parten del elemento que se muestra en la figura 2.16, sobre el cual actúa solamente la tensión normal  $\sigma_x$ . La fuerza y extensión correspondientes serán  $\sigma_x dydz$  y  $\epsilon_x dx$ , respectivamente.

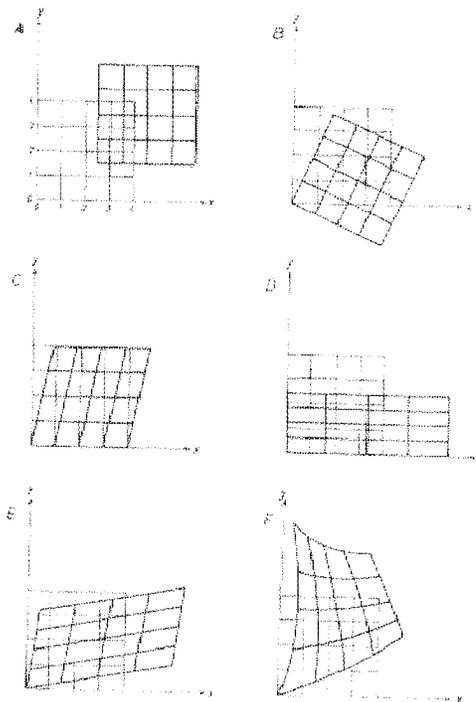


Figura 2.15. Seis tipos diferentes de deformación. A- traslación, B- rotación, C, D y E- deformación interna homogénea, F- deformación interna inhomogénea (tomado de [14])

www.bdigital.ula.ve

Por su parte, la relación existente entre estas dos cantidades es la representada por una recta tal como la  $OA$  de la figura 2.16, y el trabajo realizado durante la deformación viene dado por el área del triángulo  $OAB$  ( $\frac{1}{2} (\sigma_x dydz) (\epsilon_x dx)$ ).

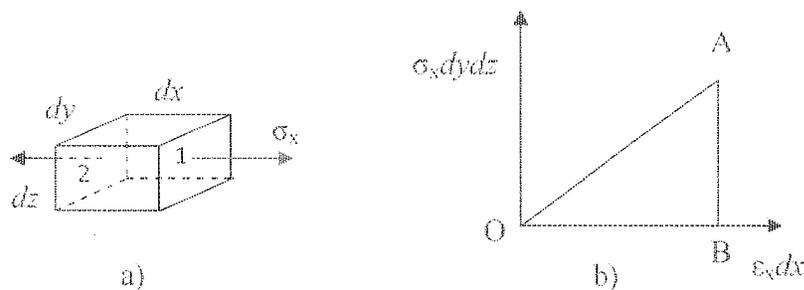


Figura 2.16. Elemento diferencial sometido a tracción y función que relaciona la fuerza de tracción y la extensión existente (tomado de [22])

Llamado  $dV$  a este trabajo se tiene:

$$dV = \frac{1}{2} \sigma_x \epsilon_x dx dy dz \quad \text{Ec. 2.9}$$

siendo evidente que este mismo trabajo es realizado sobre todos los elementos del cuerpo en análisis suponiendo que el volumen de todos ellos sea el mismo. La energía en la que se convierte este trabajo va a variar. En el caso de un gas, la compresión adiabática del mismo eleva su temperatura. Si es una barra de acero lo que se comprime adiabáticamente, la temperatura se eleva también aunque en pequeña cantidad. El calor correspondiente, sin embargo, representa solamente una fracción del trabajo realizado por la fuerza de compresión; fracción esta tan pequeña, que a efectos prácticos puede ser despreciada. En consecuencia, se puede aceptar que el trabajo realizado no se emplea en la generación de calor, siendo todo él almacenado en forma de la llamada energía de deformación o energía potencial elástica.

Las mismas consideraciones se aplican cuando sobre el elemento actúan las seis componentes de tensión  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$  (figura 2.16b). La conservación de la energía requiere que el trabajo realizado no dependa del orden en que apliquen las fuerzas, sino de su magnitud final [22].

El cálculo del trabajo realizado, es más sencillo si las fuerzas o tensiones aumentan todas simultáneamente con igual velocidad. Entonces, la relación entre cada fuerza y el desplazamiento correspondiente sigue siendo lineal como en la figura 2.16b, de forma que el trabajo realizado por todas esas fuerzas será:

$$dV = V_0 dx dy dz \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde

$$V_0 = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{xz} \gamma_{xz}) \quad \text{Ec. 2.11}$$

es la energía de deformación correspondiente a la unidad de volumen.

Al considerar el trabajo hecho sobre el elemento, cuando las tensiones varían a través del cuerpo y las fuerzas másicas no son nulas. Considerando la fuerza  $\sigma_x dy dz$  que actúa sobre la cara 1 del elemento de la figura 2.16a, el trabajo que realiza al desplazarse  $u$  será  $\frac{1}{2} (\sigma_x u) dy dz$ , donde el subíndice 1 indica que las funciones  $\sigma_x$  y  $u$  deben ser evaluadas en el punto 1. De igual forma, la fuerza  $\sigma_x dy dz$  que actúan sobre la cara 2 realiza el trabajo  $-\frac{1}{2} (\sigma_x u) dy dz$ , siendo el trabajo total para las 2 caras:

$$\frac{1}{2}[(\sigma_X u)_1 - (\sigma_X u)_2]dydz \quad \text{Ec. 2.12}$$

que en el límite es:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\sigma_X u) dx dy dz \quad \text{Ec. 2.13}$$

Calculando ahora el trabajo realizado por las tensiones tangenciales  $\tau_{xy}$  y  $\tau_{xz}$  sobre las caras 1 y 2 y sumándolo a la expresión anterior, tendremos la siguiente expresión para el trabajo hecho sobre esas dos caras por las tres componentes de la tensión:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\sigma_X u + \tau_{xy} v + \tau_{xz} w) dx dy dz \quad \text{Ec. 2.14}$$

donde  $v$  y  $w$  son las componentes de del desplazamiento en la direcciones  $y$  y  $z$ . El trabajo realizado sobre los otros dos pares de caras puede hallarse de igual manera encontrándose para el trabajo total hecho por las tensiones sobre las caras la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\sigma_X u + \tau_{xy} v + \tau_{xz} w) dx dy dz + \frac{\partial}{\partial y} (\sigma_Y v + \tau_{yz} w + \tau_{xy} u) + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma_Z w + \tau_{xz} u + \tau_{yz} v) \right] dx dy dz \quad \text{Ec. 2.15}$$

El trabajo realizado por las fuerzas másicas será:

$$\frac{1}{2} (Xu + Yv + Zw) dx dy dz \quad \text{Ec. 2.16}$$

Y el trabajo total será la suma de (e) y (f) que diferenciado (e) queda así:

$$\frac{1}{2} \left[ \sigma_x \frac{\partial u}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial y} + \sigma_z \frac{\partial w}{\partial z} + \tau_{xy} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \tau_{yz} \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \tau_{xz} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + u \left( \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X \right) + v \left( \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + Y \right) + w \left( \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + Z \right) \right] dx dy dz$$

Ec. 2.17

### 2.3.3. Método de Elementos Finitos (MEF).

#### 2.3.3.1. Revisión general del MEF.

Como se puede observar, el problema planteado trata de resolver ecuaciones diferenciales como las mostradas anteriormente, con condiciones de borde particulares.

Cuando se analizan problemas que involucran geometrías, cargas y materiales complicados, como en este caso, no es posible obtener soluciones analíticas, por ello, se recurre a métodos numéricos como el MEF, para obtener soluciones aceptables.

El Método de Elementos Finitos consiste en dividir o discretizar el cuerpo en partes más pequeñas de diversas formas geométricas simples conocidos como elementos, conectados entre sí por nodos que pueden estar en las esquinas o en los lados del elemento [15]. En el MEF, en vez de resolver el problema para todo el cuerpo en una operación, se formulan las ecuaciones para cada elemento y se combinan para obtener la solución completa [13]. Mientras mayor número de elementos se utilicen para modelar el problema mejor resultado se obtiene. Este método numérico da valores aproximados de las incógnitas en un número discreto de puntos del continuo.

Si se analiza un cuerpo bi o tridimensional se sabe que éste tiene infinito número de puntos donde cada uno tiene 2 ó 3 grados de libertad (gdl), el número de ecuaciones en este caso es infinito y el problema no puede ser resuelto. Sin embargo, si se escoge un número finito pero suficientemente grande de nodos, el problema puede ser resuelto y una forma deformada aproximada puede ser obtenida. Esto es la base del MEF [15]

Según [15] los métodos numéricos que resuelven problemas de carga-deformación, entre ellos el MEF, deben satisfacer lo siguiente:

- equilibrio,
- compatibilidad de esfuerzos,
- relación esfuerzo - deformación, y
- condiciones de frontera (condiciones de carga y deformación en la frontera)

Las relaciones esfuerzo-deformación es un aspecto muy amplio y el más crucial, del cual depende la exactitud de la solución [15].

La mayor desventaja del MEF para [15] es el esfuerzo requerido para preparar los datos de un problema, además del hecho que se deben resolver un gran número de ecuaciones (varios cientos o miles) para obtener soluciones. El tiempo de solución sube exponencialmente si el problema es no lineal.

A pesar de sus desventajas el MEF es un método extremadamente popular, [15] expresa que esto quizás se deba a que incluyen la habilidad de:

- Modelar formas complejas rápidamente.
- Manejar condiciones de cargas generales sin dificultades.
- Modelar cuerpos compuestos de muchos materiales porque las ecuaciones de los elementos se evalúan individualmente.
- Manejar ilimitados números y tipos de condiciones de fronteras.
- Variar el tamaño de los elementos para hacer posible usar elementos más pequeños donde sea necesario.
- Incluye efectos dinámicos.
- Manejar comportamientos no lineales para algunos materiales.

Como ya se ha dicho, en el MEF un continuo es dividido en varios tipos de elementos, algunos de los cuales se muestran en la figura 2.17.

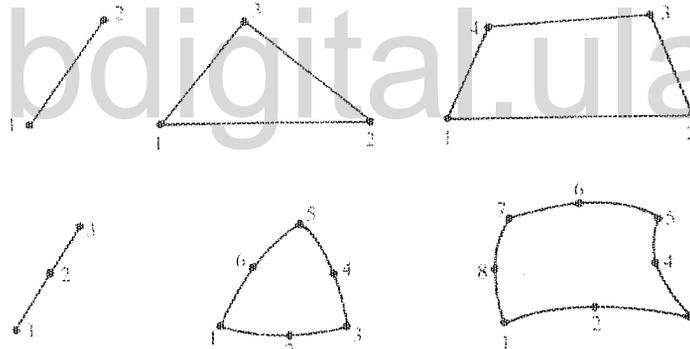


Figura 2.17. Forma y Posición de los nodos de algunos elementos bidimensionales, los elementos que tienen nodos únicamente en las esquinas son elementos lineales, mientras que los que tienen nodos en los lados son conocidos como elementos parabólicos o de orden superior (tomado de [15])

Los elementos lineales tienen nodos sólo en sus esquinas, mientras que aquellos que tienen nodos, tanto en las esquinas como en los lados son llamados elementos parabólicos o de orden superior, ellos tienen funciones de forma parabólicas que, en general, proporcionan mayor exactitud con mayor costo computacional [3].

En el MEF, los desplazamientos son calculados en los nodos, y los esfuerzos en el interior del elemento. Los desplazamientos en cualquier punto del elemento se relacionan a los desplazamientos de los nodos a través de funciones de forma.

Las funciones de forma de los elementos más comúnmente utilizados fueron encontradas por intuición e inspección. Para elementos de alto orden, se deben utilizar más procedimientos matemáticos formales para derivar las expresiones de las funciones de forma [15]. Las funciones de forma cuadrática permiten que la deformación unitaria y el esfuerzo varíen linealmente dentro del elemento. Cuando se usan funciones de forma lineal, la deformación unitaria y el esfuerzo resultan ser constantes dentro del elemento [3].

Según [3] las funciones de forma deben satisfacer lo siguiente:

- Sus primeras derivadas deben ser finitas dentro de un elemento;
- Los desplazamientos deben ser continuos a través de la frontera del elemento.
- Los movimientos de cuerpo rígido no deben generar ningún esfuerzo en el elemento.

La selección del elemento dependerá del problema a analizar, en todo caso, los elementos que forman el compuesto se unen entre sí formando una malla. La selección de la malla en el MEF se realiza según criterio del investigador, el número total de elementos y nodos a ser usado en un problema particular depende de la aproximación deseada de los resultados, costo de computación y preparación de los datos. Cabe mencionar que la malla no tiene que ser uniforme; la regla general es tener elementos más pequeños en donde se esperan cambios de esfuerzos y de forma. La malla se organiza de forma que cada elemento sea de un solo material [15].

Un aspecto importante del MEF son las condiciones de frontera, las cuales se deben especificar para evitar que la estructura se pueda mover libremente como un cuerpo rígido y mantenga la correspondencia con el medio que lo rodea. Las condiciones de frontera son de dos tipos generales: condiciones de frontera homogéneas (las más comunes) ocurren en locaciones que están completamente prevenidas de movimiento, y condiciones de frontera no homogéneas que ocurren donde valores finitos de desplazamientos son especificados [13].

Para problemas estructurales hay dos aproximaciones generales asociadas con el MEF. La primera de ellas llamada Método de fuerza o flexibilidad, usa las fuerzas internas como incógnitas y la segunda aproximación llamada método de desplazamiento o método de rigidez, asume los desplazamientos de los nodos como las incógnitas del problema [13]. Tradicionalmente se utiliza el método de la formulación de desplazamientos.

Aunque el MEF es una herramienta muy poderosa, su utilización en la actualidad no es generalizada, situación que está cambiando en los últimos años producto de los avances experimentados en la computación.

#### **2.3.3.2. Construcción del Modelo en Elementos Finitos.**

Según [3], un modelo en elementos finitos puede considerarse completo y bien estructurado cuando se cumple coherentemente con los apartados que se describen a continuación:

##### **2.3.3.2.1. División del Cuerpo en Elementos**

En todo problema de elementos finitos el primer paso es establecer la geometría y discretizar el cuerpo, utilizando elementos con buenas relaciones de radio y sección transversal uniforme.

Debe destacarse que al igual que la sección transversal, se procura que las cargas y los materiales sean constantes dentro del elemento, pudiendo éstas variar de elemento en elemento. Es conveniente colocar un nodo en cada punto de aplicación de cargas.

Normalmente se obtienen mejores aproximaciones conforme se incrementan el número de elementos, no obstante algunas veces un gran número de elementos genera errores de redondeo que van en descrédito de los resultados obtenidos [5].

Se debe procurar que la numeración de los nodos de los elementos sea óptima para disminuir el semiancho de banda y así reducir el tamaño de la matriz de rigidez global, con el correspondiente ahorro de tiempo computacional.

### 2.3.3.2.2. Coordenadas y Funciones de Forma.

Para el establecimiento de las coordenadas del elemento se considera un sistema coordinado intrínseco ( $\xi$ ) dado por las coordenadas de los nodos ( $x, y, z$ ). Este sistema ( $\xi$ ) se usa para definir las funciones de forma ( $N$ ), que permiten interpolar el campo de desplazamiento dentro del elemento a partir de los desplazamientos nodales ( $q$ ).

El campo de desplazamiento dentro del elemento puede escribirse en términos de los desplazamientos nodales como:

$$u = Nq \quad \text{Ec. 2.18}$$

Donde,  $u$  es la matriz de desplazamientos dentro del elemento,

$$u = [u \quad v \quad w]^T \quad \text{Ec. 2.19}$$

$N$  es la matriz de la función de forma, de Número de Dimensiones (ND)\*gdl, y depende del elemento considerado,

y,  $q$  son los desplazamientos nodales

$$q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad \dots \quad q_n]^T \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde  $n$  son los grados de libertad.

En elementos lineales el campo de desplazamiento dentro del elemento se interpola usando funciones de forma lineales. Esta aproximación se vuelve más exacta conforme se consideran más elementos. Las funciones de forma dependerán del elemento utilizado.

### 2.3.3.2.3. Relación Deformación Unitaria -- Desplazamiento.

Las deformaciones unitarias pueden ser normales ( $\varepsilon$ ) o tangenciales ( $\gamma$ ), las cuales pueden representarse vectorialmente como:

$$\varepsilon = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}]^T \quad \text{Ec. 2.21}$$

Las relaciones entre deformaciones unitarias se pueden escribir:

$$\varepsilon = \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial w}{\partial z} \quad \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^T \quad \text{Ec. 2.22}$$

Obsérvese que la deformación unitaria va a ser la razón de cambio de los desplazamientos en las direcciones consideradas, aplicando la regla de la cadena, es

posible relacionar los desplazamientos en el interior del elemento con los desplazamientos nodales, mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon = Bq \quad \text{Ec. 2.23}$$

Donde,  $\varepsilon$  es la deformación unitaria, B es matriz de deformación unitaria-desplazamiento del elemento la cual relaciona las coordenadas con los desplazamientos nodales y q son los desplazamientos nodales.

Los elementos de la matriz B, son constantes que están expresadas por las coordenadas nodales.

Nótese que en un elemento lineal, tanto la deformación unitaria como el esfuerzo son constantes dentro del elemento, sin embargo para fines de interpolación el esfuerzo obtenido puede considerarse que es el valor en el centroide del elemento.

#### 2.3.3.2.4. Relación Deformación Unitaria – Esfuerzo.

Para materiales elásticos lineales, como se sabe, las relaciones esfuerzo-deformación están descritas con la ley de Hooke generalizada. Si el material es isótropo las propiedades que influyen son el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

La ley de Hooke puede escribirse como:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad \text{Ec. 2.24}$$

$$\varepsilon_y = -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \quad \text{Ec. 2.25}$$

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \quad \text{Ec. 2.26}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad \text{Ec. 2.27}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad \text{Ec. 2.28}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad \text{Ec. 2.29}$$

Donde

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{Ec. 2.30}$$

### 2.3.3.2.5. Enfoque de Energía Potencial.

En la mecánica de sólidos, el problema es determinar el desplazamiento del cuerpo, que satisfaga las ecuaciones de equilibrio. Los esfuerzos están relacionados con las deformaciones y estas a su vez con los desplazamientos. Esto conduce a resolver ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden. A la solución de estas ecuaciones se les denomina solución exacta, no obstante estas respuestas existen únicamente para geometrías y condiciones muy simples. Para problemas de geometrías complejas y condiciones de frontera y de carga general, la obtención de estas soluciones es casi imposible. Los métodos de solución aproximada, entre ellos el MEF, emplean métodos de energía potencial que imponen condiciones menos estrictas sobre las funciones.

La energía potencial total ( $\Pi$ ) de un cuerpo elástico se define como la suma de la energía de deformación unitaria total ( $U$ ) y el potencial de trabajo ( $WP$ ), donde:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma^T \varepsilon dV \quad \text{Ec. 2.31}$$

$$WP = - \int_V u^T f dV - \int_S u^T T ds - \sum_i u_i^T P_i \quad \text{Ec. 2.32}$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \sigma^T \varepsilon dV - \int_V u^T f dV - \int_S u^T T ds - \sum_i u_i^T P_i \quad \text{Ec. 2.33}$$

Aquí se consideran sistemas conservativos, donde el potencial de trabajo es independiente de la trayectoria. El principio de la energía potencial se puede enunciar de la siguiente manera:

Para sistemas conservativos, de todos los campos de desplazamiento cinemáticamente admisibles, aquellos que corresponden a condiciones de equilibrio extremizan la energía potencial total. Si la condición extrema es un mínimo, el estado de equilibrio es estable.

#### 2.3.3.2.5.1. Método de Rayleigh-Ritz.

El método de Rayleigh-Ritz implica la construcción de un campo de desplazamiento supuesto. Los desplazamientos deben ser cinemáticamente admisibles (satisfacer las condiciones de borde). Finalmente se minimiza la energía potencial total y se obtiene el conjunto de ecuaciones a resolver.

### 2.3.3.2.5.2. Método de Galerkin.

El método de Galerkin usa el conjunto de ecuaciones gobernantes en el desarrollo de una forma integral. Usualmente se presenta como uno de los métodos de residuos ponderados. Los métodos aproximados consisten en hacer igual a cero el residuo relativo a una función pesada. La selección de la función pesada conduce a varios métodos de aproximación. En el método de Galerkin las funciones pesadas se escogen a partir de la función de base y en muchos casos son combinaciones lineales de las funciones de base.

### 2.3.3.2.6. Matriz de Rigidez del Elemento

Ya se ha visto que la energía potencial es

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_L \sigma^T \varepsilon A dx - \int_L u^T f A dx - \int_L u^T T dx - \sum_i u_i P_i \quad \text{Ec. 2.34}$$

Como el cuerpo se ha discretizado, la expresión queda como una sumatoria de cada uno de los elementos

$$\Pi = \sum_e \frac{1}{2} \int_e \sigma^T \varepsilon A dx - \sum_e \int_e u^T f A dx - \sum_e \int_e u^T T dx - \sum_e Q_i P_i$$

Ec. 2.35

Donde el primer término corresponde a la energía de deformación del elemento.

Haciendo un proceso de sustitución se logra obtener la rigidez del elemento, que para el caso del elemento considerado queda:

$$k^e = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B^T DB |\det J| d\xi d\eta d\zeta \quad \text{Ec. 2.36}$$

Cabe destacar que la integración de esta ecuación se realiza numéricamente.

Considerando el segundo término de la expresión de la energía potencial y realizando un análisis similar al caso anterior se tiene el vector fuerza del elemento.

Y por último, considerando el tercer término de la energía potencial se tiene la fuerza de tracción del elemento,

Así, la energía potencial total puede escribirse como,

$$\Pi = \frac{1}{2} Q^T K Q - Q^T F \quad \text{Ec. 2.37}$$

Donde  $K$  es la matriz de rigidez global,  $F$  el vector de carga global y  $Q$  es el vector de desplazamiento global.

### 2.3.3.2.7. Ensamble de la matriz de rigidez global y del vector de carga

Para el ensamble de la matriz de rigidez global los elementos de  $k^e$  se colocan en los lugares apropiados de la matriz  $K$ , con base a la conectividad del elemento, los elementos que se traslapan simplemente se suman. Se puede denotar este ensamble de forma simbólica como

$$K \leftarrow \sum_e k^e \quad \text{Ec. 2.38}$$

De forma similar el vector de carga global  $F^e$  se ensambla a partir de los vectores de fuerza y de los vectores de carga puntual de los elementos como

$$F \leftarrow \sum_e (f^e + T^e) + P \quad \text{Ec. 2.39}$$

#### 2.3.3.2.7.1. Propiedades de la matriz de rigidez global

1. La dimensión de la matriz de rigidez global  $K$  es  $(N \times N)$ , donde  $N$  es el número de nodos. Esto se obtiene del hecho de que cada nodo solo tiene un grado de libertad.
2.  $K$  es simétrica.
3.  $K$  es la matriz en banda. Es decir, todos los elementos fuera de la banda son cero.

Note que  $K_{\text{en banda}}$  es de dimensión  $[N \times NBW]$ , donde  $NBW$  es el semiancho de banda. En muchos problemas unidimensionales, la conectividad del elemento  $i$  es  $i, i+1$ . En tales casos la matriz en banda solo tiene dos columnas ( $NBW=2$ ). En dos y tres dimensiones, la forma directa de  $K$  en banda o en forma de perfil, a partir de las matrices de los elementos, implica algo de contabilidad

$$NBW = (\text{diferencia entre los números que conectan a un elemento}) + 1$$

### 2.3.3.2.8. Condiciones de Frontera: Manejo de las Ecuaciones de Elementos Finitos.

Las condiciones de frontera no son más que condiciones de desplazamiento y cargas en la superficie del cuerpo, estas deben satisfacerse independientemente del valor asignado para que el problema a resolver sea válido. Es importante destacar que las condiciones de borde deben ser cónsonas con la realidad del modelo, puesto que condiciones incorrectas conllevaran a soluciones de poca o ninguna relevancia.

Sirven para establecer las ecuaciones de equilibrio, de las que se puedan determinar desplazamientos nodales, esfuerzos en los elementos y reacciones en los soportes.

Las condiciones de frontera son generalmente del tipo donde se especifica un valor para el desplazamiento a lo largo de los grados de libertad.

Se enfatiza que condiciones de fronteras impropias pueden conducir a resultados erróneos. Además, las condiciones de frontera deben modelar con exactitud el sistema físico. Se presentan dos métodos para manejar las condiciones de borde.

#### 2.3.3.2.8.1. Enfoque de eliminación.

El enfoque de eliminación consiste en suprimir las filas y columnas de la matriz de rigidez global, donde existan restricciones, esto dará una K modificada. De igual forma se modifican el vector de carga correspondiente F y el vector de desplazamiento Q. Se resuelve:

$$KQ=F \quad \text{Ec. 2.40}$$

Se extrae para cada elemento, el vector de desplazamiento q del vector Q usando la conectividad del elemento, y se determinan los esfuerzos correspondientes.

Finalmente usando las filas de la matriz K eliminadas inicialmente, se evalúan las fuerzas de reacción en cada grado de libertad de soporte.

#### 2.3.3.2.8.2. Enfoque de penalización.

Si se considera las condiciones de frontera

$$Q_{p1} = a_1, Q_{p2} = a_2, \dots, Q_{pr} = a_r \quad \text{Ec. 2.41}$$

1. Se modifica la matriz de rigidez estructural  $K$  agregando un número grande  $C$  a cada uno de los elementos diagonales,  $p_1$ -ésimo,  $p_2$ -ésimo, ...,  $p_r$ -ésimo de  $K$ . También se modifica los vectores de carga global  $F$  agregándole  $Ca_1$  a  $F_{p1}$ ,  $Ca_2$  a  $F_{p2}$ , ..., y  $Ca_r$  a  $F_{pr}$ . Se resuelve  $KQ=F$  para los desplazamientos  $Q$  donde  $K$  y  $F$  son las matrices modificadas de rigidez y carga.
2. Se extrae el vector  $q$  de desplazamiento del elemento del vector  $Q$  usando la conectividad del elemento y también se determinan los esfuerzos en los elementos.
3. Se evalúa la fuerza de reacción en cada soporte con

$$R_{pi} = -C(Q_{pi} - a_i) \quad i = 1, 2, \dots, r \quad \text{Ec. 2.42}$$

Se debe observar que el enfoque de penalización es un enfoque aproximado. La exactitud de la solución, en especial de las fuerzas de reacción, depende de la selección de  $C$ .

Un simple esquema sugiere la elección de la magnitud de  $C$

$$C = \max |K_{ij}| \times 10^4 \quad \text{Ec. 2.43}$$

$$1 \leq i \leq N$$

$$1 \leq j \leq N$$

#### 2.3.4. Principio de Saint Venant.

El principio de Saint Venant establece que en tanto las diferentes aproximaciones sean estáticamente equivalentes, las soluciones resultantes serán válidas en regiones bastante alejadas del apoyo. Es decir, las soluciones pueden diferir en forma significativa sólo en la vecindad inmediata del soporte. Es de destacar que este principio se puede extrapolar a cualquier tipo de fuerza aplicada, y funciona de igual manera, la carga aplicada tenderá a formar un área de atenuación según el punto de aplicación, la extensión del área dependerá de la magnitud de la fuerza, área de aplicación y propiedades del material [3].



[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

# CAPÍTULO III

## METODOLOGÍA

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY - NC - SA 3.0 VE )

---

## Capítulo III

### Metodología

Todo trabajo de investigación requiere la aplicación de una serie de etapas organizadas coherentemente que permitan la consecución de los objetivos planteados, en este caso se pueden organizar en tres grandes fases: estudios preliminares, modelado numérico y correlación de valores geomecánicos. La descripción de estas etapas se muestra a continuación:

#### 3.1. Estudios Preliminares.

Tienen como objetivo el conocimiento geológico general de la zona del proyecto, así como las investigaciones previas donde se hayan empleado modelos numéricos para representar realidades geológicas.

Estos estudios consisten en la búsqueda de toda la información significativa disponible. Se debe hacer énfasis en los aspectos topográficos, tectónicos y geológicos, de carácter regional y local, de manera que se puedan definir las características del modelo: geometría, materiales, cargas, condiciones de frontera, así como los parámetros de calibración, puesto que los modelos deben corresponder a los estados naturales actuales para que sean válidos.

La recopilación de información es fundamental puesto que el empleo del MEF en geología es relativamente reciente, y la gran mayoría de estudios se han enfocado hacia la geotecnia; siendo pocos los autores que han modelado placas tectónicas [4], [9] y [23], y aún más escasos los que han trabajado con la energía de deformación interna que se acumula producto de la interacción entre las mismas como [7].

#### 3.2. Modelado Numérico

El análisis numérico de las placas tectónicas y su interacción se realiza en este caso empleando el Método de los Elementos Finitos. Un análisis completo por elementos

finitos es una interacción de tres etapas: pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento.

El pre-procesamiento implica la preparación de datos, tales como la geometría, las condiciones de frontera y la información sobre las cargas y el material. La etapa de procesamiento implica la solución de las ecuaciones planteadas que resulta en la evaluación de los desplazamientos, esfuerzos, deformaciones y energía de deformación interna. Por último la etapa de post-procesamiento versa sobre la presentación de resultados, en esta se muestra la configuración deformada y se analizan los resultados obtenidos durante la etapa de cálculos [3].

En los apartados subsiguientes se muestran detalladamente las tres etapas y se especifica la secuencia empleada en cada una de ellas para la elaboración del modelo.

### **3.2.1. Pre-procesamiento**

#### **3.2.1.1. Elaboración de la geometría.**

Esta etapa resulta compleja puesto que los diversos autores no logran unificar criterios respecto a los conceptos y características relacionadas con las placas que componen el planeta.

La obtención de las geometrías de las placas tectónicas en estudio se realiza en base a coordenadas obtenidas por imágenes satelitales georreferenciadas, relación a dimensiones reales del planeta y uso de coordenadas locales para graficar los puntos que determinan los límites de las placas [7].

En la tabla 3.1 se muestra las coordenadas tomadas para las placas en estudio.

#### **3.2.1.2. Comportamiento mecánico de los materiales.**

Una vez definida la geometría, se procede a establecer el comportamiento mecánico de los materiales. En este caso, se decide realizar una simulación elástica de las placas, lo que significa que existe una relación lineal entre el esfuerzo aplicado y las deformaciones.

Tabla 3.1. Coordenadas locales de las placas en estudio (Tomado de [7]).

Placas Euroasiática		Placa Filipina		Placa Australiana	
X	Y	X	Y	X	Y
0.0	15.0	2.9	9.3	4.4	2.2
2.3	15.0	3.1	9.3	4.2	3.1
2.0	14.5	3.3	8.7	4.4	3.6
1.7	14.0	3.6	8.0	5.8	4.8
2.0	13.3	2.7	7.5	6.6	6.0
2.5	12.8	2.2	7.0	5.7	6.0
3.0	12.4	2.0	7.5	5.2	5.5
3.4	12.0	1.5	8.1	4.5	6.5
3.2	11.2	2.9	9.3	2.2	7.0
3.0	10.7			2.1	6.5
2.9	9.3			0.3	6.8
1.5	8.1			0.0	7.0
2.0	7.5			-0.3	6.8
2.2	7.0			-1.3	6.8
2.1	6.5			-1.3	6.0
0.3	6.8			-1.5	5.5
0.0	7.0			-0.7	5.2
-1.1	9.2			-0.5	4.5
-1.5	9.1			-0.7	4.5
-1.7	8.6			-0.5	4.0
-3.0	8.9			0.0	3.8
-3.5	9.6			0.5	3.4
-3.8	9.2			1.4	3.2
-4.7	9.3			1.4	3.5
-5.1	9.5			2.7	3.5
-5.4	9.2			3.6	2.4
-5.5	9.3			4.3	2.0
-7.8	9.5			4.4	2.2
-8.4	9.9				
-8.2	10.4				
-8.4	11.0				
-9.0	11.1				
-8.8	11.7				
-8.5	11.8				
-8.0	12.0				
-7.5	12.5				
-7.5	13.0				
-7.0	13.5				
-6.5	13.7				
-6.0	13.8				
-6.2	14.2				
-6.0	15.0				
0.0	15.0				

### 3.2.1.3. Propiedades Geomecánicas de los materiales.

Las placas tectónicas en estudio (Fig. 2.1), se encuentran constituidas en su mayoría por corteza continental y corteza oceánica, es decir, se trata de segmentos de litósfera mixta. [25] señalan propiedades para las cortezas, continental y oceánica, litosfera y astenosfera. En vista de esto, y en aras de simplificar el modelo sin perder correspondencia con el medio geológico, se considera la placa como un bloque de litosfera de 100 Km de espesor, referidos a las coordenadas locales, lo que permite trabajar sin particiones y con un solo material isótropo y homogéneo.

Los parámetros geomecánicos utilizados en estas simulaciones, corresponden a valores estándar de litosfera según [25] y se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Parámetros Geomecánicos de la litosfera

	E [kg/km <sup>2</sup> ]	$\nu$	$\rho$ [kg/km <sup>3</sup> ]
Litosfera	1.62E17	0.28	3.36E12

El empleo de valores medios de la litosfera implica que no se está considerando las diferencias de densidades entre la litosfera oceánica y la continental, por lo que se deben agregar fuerzas conocidas como tensión de placa y empuje de dorsal para compensar esta simplificación y asegurar que el modelo se corresponda con la realidad geológica que se quiere representar.

### 3.2.1.4. Cargas y Condiciones de Borde

Las cargas y las condiciones de borde influyen en gran medida en los resultados obtenidos en el análisis numérico. Las cargas aplicadas deben ser tales que permitan simular la subducción, no sólo en cuanto al proceso como tal, sino que también debe procurarse que los movimientos de las placas sean consistentes con la realidad observada. Adicionalmente, las fuerzas deben emular los levantamientos para que estos sean comparados con los estados naturales y así poder validar los modelos.

Por su parte, las condiciones de frontera son diseñadas de forma tal que no se incurra en restricciones o libertades innecesarias, adicionalmente deben acoplarse a la realidad, para que no se pierda la correspondencia con el medio geológico.

#### 3.2.1.4.1. Cargas aplicadas al modelo.

El trabajar las placas como un bloque de litosfera isótropo implica incluir las fuerzas de empuje de la dorsal (FED) y tensión de placa (FTP) en la zona de subducción. No se incluye la tracción basal que generan las corrientes de convección del manto por el escaso conocimiento científico general que se tiene de esa zona, las magnitudes de la misma y los efectos que esta pudiera tener en la litosfera.

Para la definición de la FED y FTP se emplean como base las ecuaciones propuestas por [25] por considerar que incluyen mayor cantidad de parámetros. Se acogen los ajustes realizados por [4] en función de lograr un ajuste con las direcciones de esfuerzos medidos en el Mapa de Esfuerzos Australianos (Hillis y Reynolds, 2000, citados en [4]). Los datos de las cargas empleados en esta simulación se resumen en la tabla 3.3. Para tener una idea de las magnitudes prácticas de las cargas impuestas la dorsal FED1 corresponde a una magnitud de 19 MPa para un espesor de 100 Km de espesor.

Tabla 3.3. Fuerzas aplicadas en el modelo considerado. El convenio de signos empleados indica que las positivas apuntan hacia dentro de la placa (modificado de [4]).

Localización	Magnitud (N/m)
Dorsal Oceánica Australiana (FED1)	$1,9 \times 10^{12}$
Dorsal Oceánica Filipina (FED2)	$5 \times 10^{10}$
Papúa Nueva Guinea (PNG)	$3,8 \times 10^{12}$
Arco Banda (BA)	$-0,5 \times 10^{12}$
Java (JAVA)	$-0,3 \times 10^{12}$
Solomon (SOL)	$1,20 \times 10^{12}$
Sumatra (SUM)	$2,00 \times 10^{12}$
Nueva Zelanda (NZ)	$2,40 \times 10^{12}$
Alpes Sureños de Nueva Zelanda (SNZ)	$2,8 \times 10^{12}$

La figura 3.1 muestra las localizaciones donde las fuerzas fueron aplicadas al modelo.

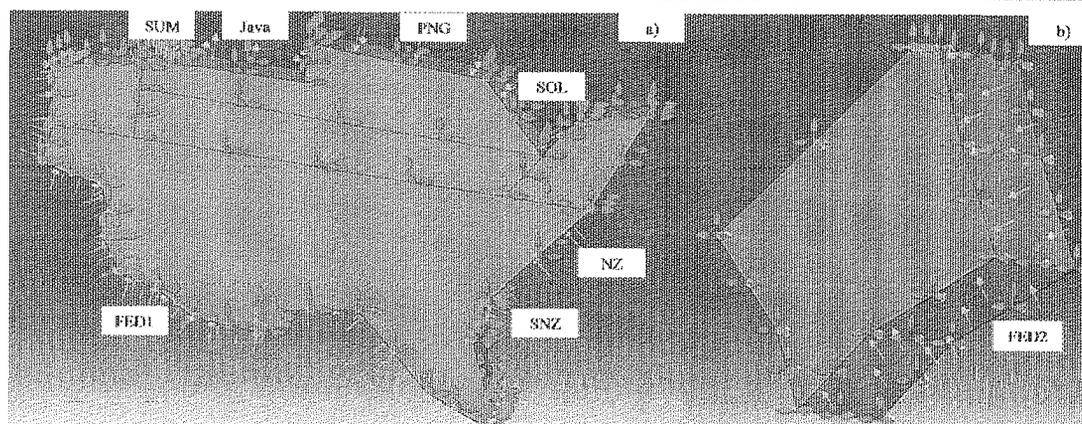


Figura 3.1. Cargas aplicadas a las placas Australiana y Filipina. Los vectores de color lila hacen referencia a las cargas impuestas (SUM: Sumatra, Java, PNG: Papua Nueva Guinea, SOL: Solomon, NZ: Nueva Zelanda, SNZ: Alpes Sureños de Nueva Zelanda, FED1: Fuerza de Empuje de la Dorsal Australiana, FED2: Fuerza de Empuje de la Dorsal Filipina), los vectores fucsia señalan las velocidades angulares impuestas para la rotación en torno a los polos de Euler.

#### 3.2.1.4.2. Condiciones de borde

Las condiciones de frontera son diseñadas de forma tal que sean consistentes con la realidad, para que no se pierda la correspondencia con el medio geológico. En este sentido, se debe procurar que la interacción entre las placas tectónicas, especialmente en sus límites sea acorde con la realidad observada en el planeta.

El movimiento de las placas puede establecerse como un movimiento relativo si se considera una de ellas estática. En este caso, se establece que la placa inmóvil es la Euroasiática, por ser la más grande, la de menor velocidad angular y tener la mayor cantidad de movimiento, esta última es una razón fundamental puesto que su colisión con cualquier placa vecina pudiera generar deformaciones internas, lo que contradice una de las hipótesis de la tectónica de placas. Siendo así, se fija la placa Euroasiática evitando que se llegue a casos hiperestáticos, con la finalidad de permitir la deformación en los límites (Fig. 3.2).

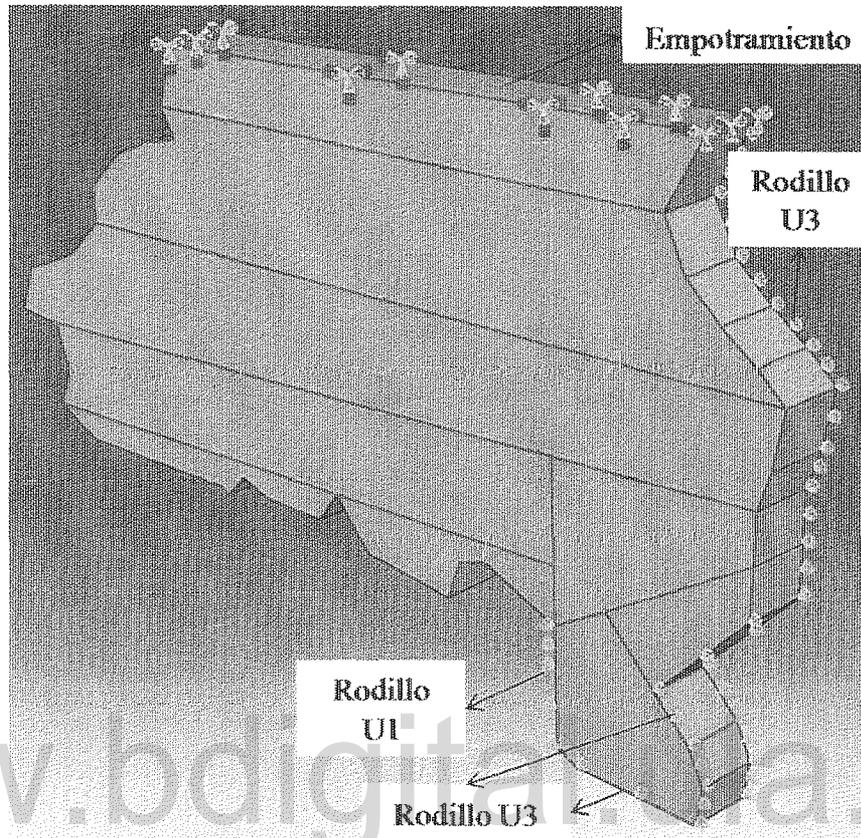


Figura 3.2. Condiciones de borde empleadas en la Placa Euroasiática, las cuales consisten en empotramientos en el sector más alejado de los límites a estudiar, rodillos en la cara inferior, puesto que dicha placa es continental y no subduce por debajo de ninguna, rodillos en el contacto con la Placa Hindú, puesto que este límite corresponde a una falla transformante, y una línea de rodillos en la cara superior en las zonas de contacto con la placa Filipina y Australiana para evitar el rebote elástico en las zonas de subducción.

Posteriormente se les asignan rodillos a las Placas Filipinas (Fig. 3.3) y Australiana (Fig. 3.4), para permitir el movimiento de las placas mencionadas.

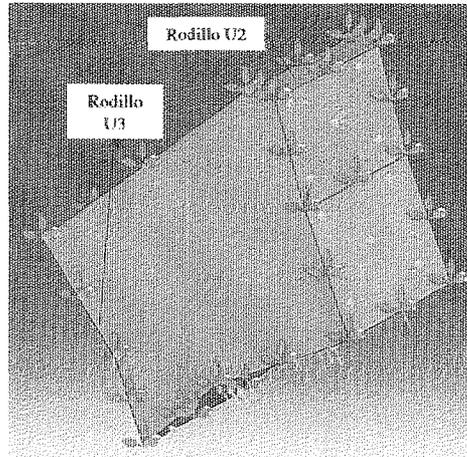


Figura 3.3. Condiciones de borde empleadas en la Placa Filipina, las cuales consisten en rodillos en para evitar el rebote elástico, la deformación excesiva y permitir el movimiento de la placa conforme a la realidad observada.

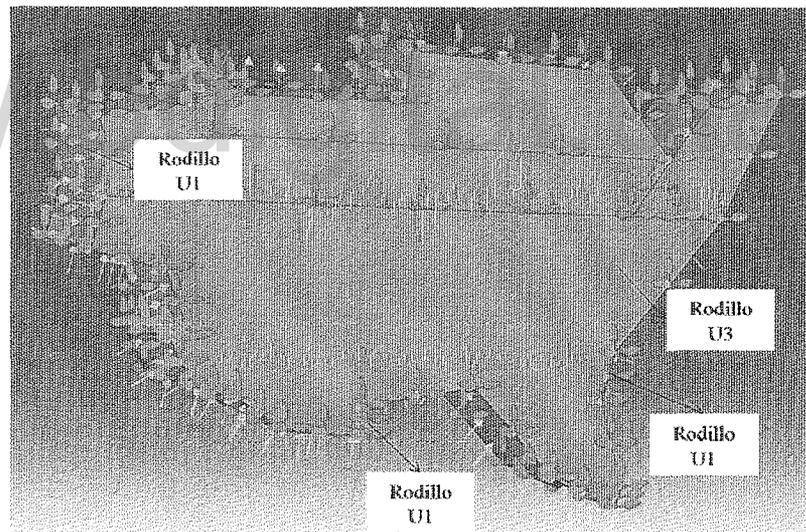


Figura 3.4. Condiciones de borde empleadas en la Placa Australiana, las cuales consisten en rodillos en la cara superior para evitar el rebote elástico y permitir el movimiento de la placa conforme a la realidad observada, adicionalmente se ubicaron rodillos en puntos específicos para evitar la deformación excesiva de la placa mencionada.

Para definir el patrón de movimiento de las placas Filipina y Euroasiática se hace uso de los Polos de Rotación de Euler y del modelo de movimiento relativo NUVEL-1<sup>a</sup> (Figura 3.5 y Tabla 3.4), que especifica los movimientos de todas las placas respecto

a Norteamérica. Los vectores allí empleados siguen el convenio establecido, anti horario respecto a Norteamérica.

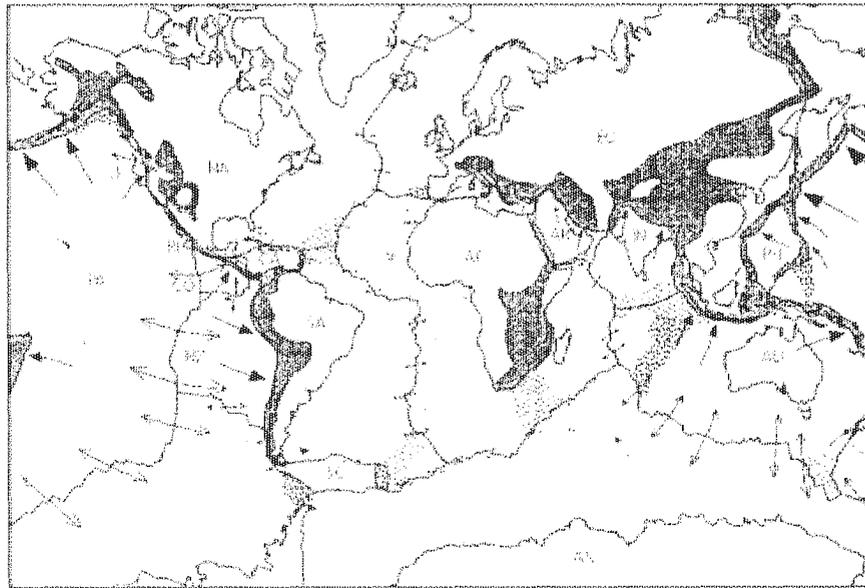


Figura 3.5. Movimientos de placas relativas para el modelo de movimiento global NUVEL-1. La longitud de los vectores es proporcional al desplazamiento si las placas mantienen su velocidad por 25 m.a. La divergencia en las dorsales está señalada por flechas opuestas, la convergencia se indica con una sola flecha en la placa que subduce. Los límites de placas se muestran como zonas difusas definidas en base a la sismicidad, topografía y cualquier otra evidencia de fallamiento (tomado de [20]).

Tabla 3.4 Vectores de Euler respecto a Norteamérica (Modificado de [20])

Placa	Latitud del polo (°N)	Longitud (°E)	$ \omega $ (°/ma)
Australiana	29.112	49.006	0.7579
Euroasiática	62.408	135.831	0.2137
Filipina	-43.986	-19.814	0.8389

Es conocido que,

$$\omega_j = -\omega_i$$

Ec. 3.1

Adicionalmente, como las placas son rígidas, todos los movimientos ocurren en sus límites y se pueden sumar los vectores de Euler, ya que el movimiento de la placa  $j$

con respecto a la placa k es igual a la suma del movimiento de la placa j con respecto a la placa i y el movimiento de la placa i respecto a la placa k.

$$\omega_{jk} = \omega_{ji} + \omega_{ik} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Aplicando estas teorías y los datos suministrados por la tabla 3.4, es posible obtener las velocidades angulares de las placas Filipina y Australiana respecto a la Euroasiática, las cuales se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Vectores de Euler calculados para las placas en estudio, en base al modelo de movimiento global NUVEL-1<sup>a</sup>

Placa Tectónica	Vector de Euler (rad/ma)
Filipina	$[-7.39 \times 10^{-3}, 2.66 \times 10^{-3}, -7.58 \times 10^{-3}]$
Australiana	$[-5.44 \times 10^{-3}, 6.26 \times 10^{-3}, -4.62 \times 10^{-3}]$

Cabe recordar que todos los puntos en un límite de placa tienen la misma velocidad angular pero la magnitud de la velocidad lineal varía en función de la distancia al polo de Euler, por esta razón se usa velocidad angular y no velocidad lineal, para definir el movimiento de la placa.

### 3.2.1.5. Selección del elemento y generación de la malla.

Los elementos que forman el compuesto se unen entre sí formando una malla. La selección de la malla en el MEF es arbitraria, el número total de elementos y nodos a ser usado en un problema particular depende de la aproximación deseada de los resultados, costo de computación y preparación de los datos [15].

Se realizan mallados uniformes, donde las simulaciones se inician con mallados gruesos, con el fin de verificar datos y resultados de forma rápida, evitando de esta forma la pérdida del tiempo computacional. Posteriormente se incrementan el número de elementos para mejorar la aproximación, este proceso se realiza hasta obtener la convergencia de los resultados, es decir el punto a partir del cual el incremento en el número de elementos no mejora significativamente los resultados obtenidos.

Una vez lograda la convergencia se pasa a un refinamiento H-Adaptativo, el cual consiste en disminuir el tamaño de los elementos justo en los lugares donde se desean obtener las mejores aproximaciones en los cálculos de las variables de salida [5]. Esto se realiza en los límites de placa.

### **3.2.2 Procesamiento.**

En esta etapa el paquete computacional, ABAQUS, resuelve las ecuaciones que permiten obtener los valores de desplazamientos, esfuerzos, deformaciones y energía de deformación del problema propuesto. Se debe recordar que los desplazamientos son calculados en los nodos, y los esfuerzos en el interior del elemento.

El programa ABAQUS sigue el método de desplazamiento o método de rigidez, el cual asume los desplazamientos de los nodos como las incógnitas del problema. Las funciones de forma relacionan los desplazamientos en los nodos con los desplazamientos en cualquier punto del elemento. Las relaciones deformación-desplazamiento y esfuerzos-deformación, permiten derivar las ecuaciones para cada elemento, las cuales se resuelven de forma matricial y permiten obtener las incógnitas del problema.

### **3.2.3 Post-procesamiento.**

Esta etapa en sí, consiste en la presentación e interpretación de los resultados. Los resultados mostrados corresponden a la distribución de esfuerzos, de deformaciones, de los desplazamientos y la energía de deformación.

## **3.3. Correlación y Análisis de Valores Geomecánicos**

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones numéricas, se analizan los mismos, especialmente las distribuciones de esfuerzos, deformaciones y energía de deformación unitaria.

Los esfuerzos están referidos a un sistema coordinado, sus magnitudes son variables y dependen principalmente de las condiciones del problema analizado.

Los valores de desplazamientos son fundamentales para la calibración del modelo, no obstante su interpretación debe realizarse de manera aislada. Con la idea de ampliar estos análisis, se seleccionan áreas de interés de acuerdo a las distribuciones obtenidas, con la finalidad de correlacionar las variables involucradas. Para realizar esto de una forma correcta, en primer lugar se deben normalizar los valores obtenidos, para poder referirlos a los resultados de energía de deformación y deformación unitaria. Una vez efectuado esto, se procede a comparar la energía de deformación unitaria con cada una de las variables, con la finalidad de establecer relaciones directas entre ellas, consiguiendo de esta manera, resultados y análisis más completos.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)



[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**CAPÍTULO IV**  
PRESENTACIÓN Y  
ANÁLISIS DE LOS  
RESULTADOS

## Capítulo IV

### Presentación y Análisis de los Resultados

Las simulaciones se realizaron empleando el Método de Elementos Finitos, el cual permite obtener soluciones numéricas aproximadas a problemas complejos.

Este capítulo describe en primera instancia las generalidades del modelo, posteriormente se presenta una breve descripción de los modelos preliminares que conllevaron a estos resultados, acompañado de la convergencia del mismo, para finalmente presentar y analizar los resultados obtenidos.

#### 4.1. Generalidades del Modelo

El modelo se estableció en base a la geometría definida durante la investigación documental, extruidas con ancho unitario, aspecto que debe considerarse al interpretar los desplazamientos nodales por la relación de escala del modelo.

La principal simplificación en el modelo fue considerar las placas constituidas por un material, litosfera. Se trabaja con los valores promedios y se agregan las fuerzas de empuje de dorsal y de tensión de placa para generar el mecanismo impulsor de ellas, además de contrarrestar la variación en las densidades de los bloques de litosfera.

#### 4.2. Simulaciones Geomecánicas: Evolución y Convergencia

Las simulaciones no correspondieron a un único modelo, sino que en realidad se basaron en un proceso, donde en primer lugar se analizaron las interacciones entre las placas de dos en dos, Euroasiática-Filipina, Euroasiática-Australiana, para finalmente integrarlas en un modelo donde se pueda analizar la tectónica general de la zona.

Los modelos fueron extruidos con un ancho unitario, las propiedades geomecánicas de los materiales se consideraron homogéneas e isotrópicas, correspondiendo a las promedios para la litosfera.

El punto crucial de estas simulaciones fue el establecimiento de las cargas y condiciones de borde necesarias para simular los comportamientos conocidos,

cuidando que no se perdiera la continuidad con el medio geológico y asegurar de esta manera la correspondencia con el mundo real.

Previo a cualquier interpretación de resultados se debe verificar la convergencia de los mismos, puesto que la aproximación de la solución se mejora según se incrementa el número de elementos hasta cierto nivel. [5] señalan que en una gráfica de calibración se presentan tres zonas, la primera denominada zona de convergencia impropia donde el mallado es burdo y se generan grandes errores, la segunda, donde los resultados van tendiendo hacia cierto valor, que corresponde al valor buscado, y la tercera donde el incremento en el número de elementos no se traduce en una mejor aproximación, sino que por el contrario corresponden a resultados erráticos producto del redondeo de la solución de las ecuaciones para cada elemento.

La curva de calibración obtenida para este modelo y los valores para su construcción se presentan en la figura 4.1 y tabla 4.1, en la curva se pueden identificar claramente las dos primeras etapas señaladas en el párrafo anterior, se utilizó como variable de calibración los desplazamientos nodales en la dirección Z. Nótese que los resultados obtenidos con mallados constituidos por menos de 317 elementos, pertenecen a la zona 1, posteriormente se observa que los resultados empiezan a aproximarse a un valor y que el tiempo de computo se mantiene relativamente constante, hasta que llega a una zona donde el tiempo de cálculo se incrementa significativamente, es en este valor a partir del cual se considera la convergencia del modelo.

Tabla 4.1. Valores utilizados para la calibración de los modelos.

Número de elementos	U3 (MAX) $\times 10^3$ km	U3 (LUGAR) $\times 10^3$ km	Tiempo (s)
208	0,2237	0,0262	6,7000
222	0,1273	0,0246	9,2000
280	0,1468	0,0318	12,3000
317	0,0893	0,0893	12,3000
732	0,0232	0,0232	18,5000
1036	0,0342	0,0342	13,3000
2304	0,0380	0,0380	3,5000
3843	0,0321	0,0321	8,0000
14440	0,0261	0,0261	70,8000
104890	0,0223	0,0223	1822,6000

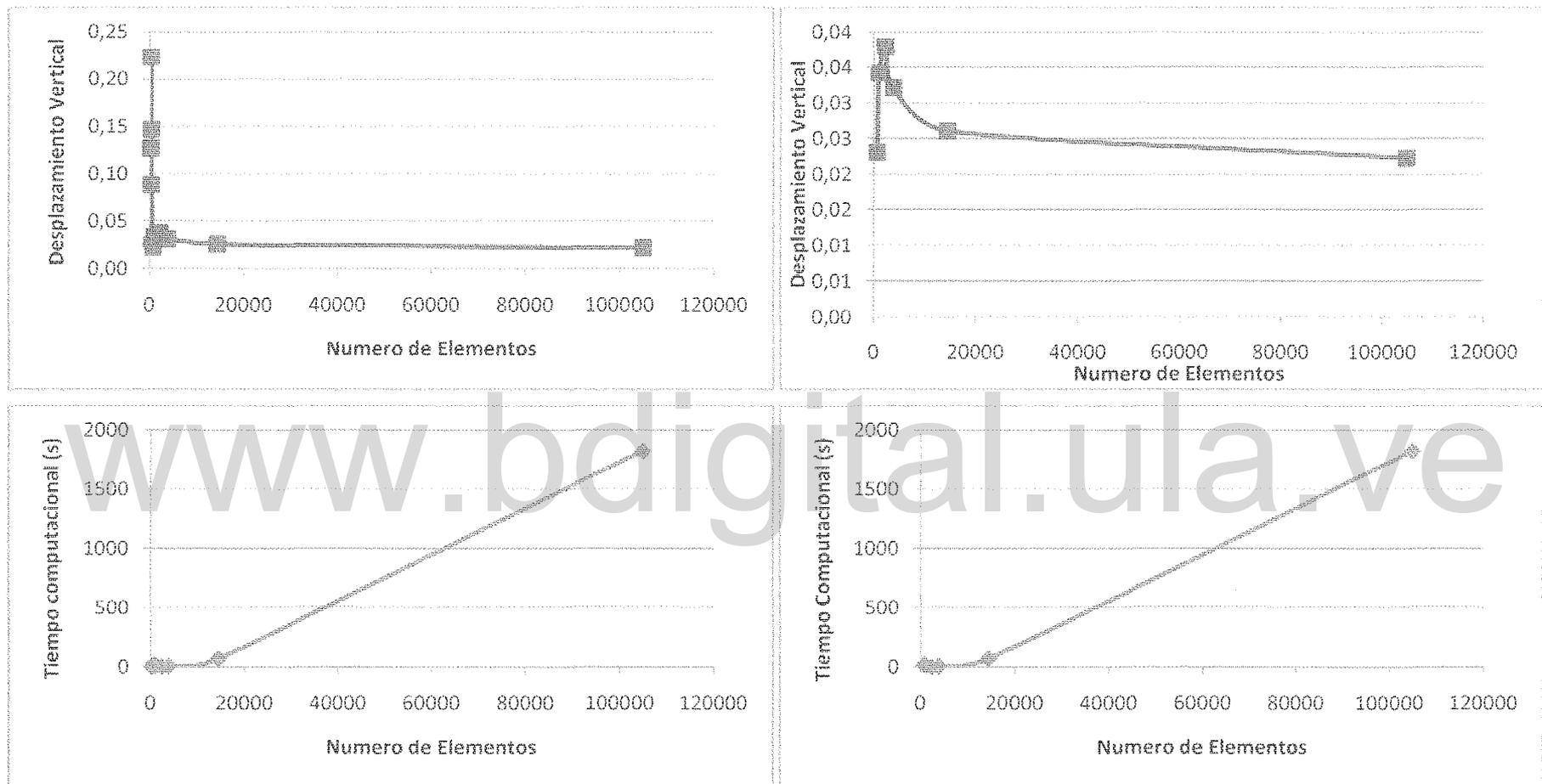


Figura 4.1. Curvas de calibración del modelo considerado. a) Número de elementos vs.  $U_z$ , nótese que para un número bajo de elementos, los resultados no siguen un patrón, conforme se incrementan los elementos el resultado converge. b) número de elementos vs. Tiempo de cómputo, obsérvese como el tiempo se incrementa cuando se utilizan más de 14440 elementos, c) y d) detalles de las curvas anteriormente mencionadas.

### 4.3. Análisis del Modelo Definitivo

#### 4.3.1. Distribución de desplazamientos nodales

El análisis de la distribución de desplazamientos es de especial importancia, puesto que es la variable que se empleó para la calibración del modelo, especialmente en lo referente a cargas y condiciones de borde.

En primer lugar se presenta la distribución de los desplazamientos en la dirección Z, esta variable, según se diseñó el modelo representa las elevaciones topográficas de la región, en la figura 4.2 se muestran los resultados obtenidos. Como se aprecia, los máximos valores se encuentran concentrados en las zonas adyacentes a los límites de las placas. Para un mejor análisis de estos resultados se procede a dividir los resultados en dos grandes zonas, la primera correspondiente al límite de la placa Euroasiática y la segunda el límite de la placa Filipina.

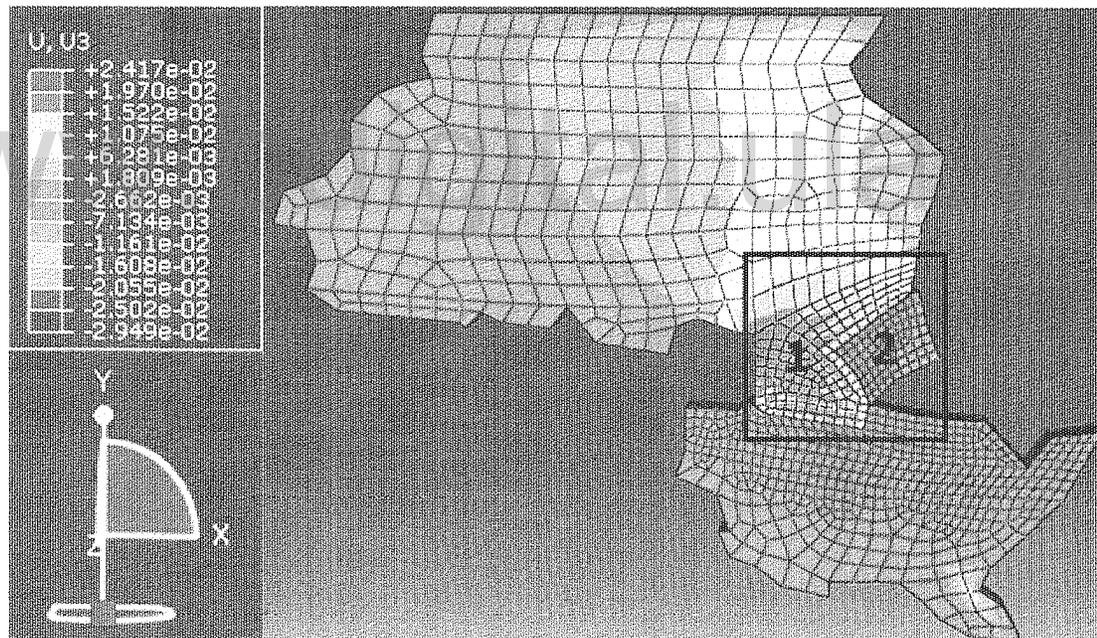


Figura 4.2. Distribución de los desplazamientos nodales en la dirección Z. 1 corresponde a los desplazamientos máximos de la placa Euroasiática y 2 a los desplazamientos de la placa Filipina.

La primera región, constituida por los límites de la placa Euroasiática, es la más compleja, puesto que los levantamientos son resultado del empuje de la placa Australiana y Filipina, correspondiendo a los máximos valores en todo el modelo.

Para un mayor análisis, se procedió a sectorizar la región, con la finalidad de comprender los patrones de distribución y poder asociarlos a la realidad según se muestra en las figuras 4.3 y 4.4. La zona marcada con la letra A constituye la cadena de elevaciones más meridional de la región, representa el archipiélago de las islas de Java. Más al norte, zona B, se encuentra otra cadena representada por Seram, Buru y parte de Sulawesi. La zona C, zona circular, se asocia con la isla de Sulawesi; y la zona D, es una región donde los levantamientos son generalizados, con valores que rondan entre los 1500 y 1900 msnm, y se corresponde a la zona de Borneo.

Si el análisis se desplaza hacia la frontera con la placa Filipina, especialmente el límite sur, zona E, se puede observar que se trata de una cadena que corresponde a las islas que constituyen las Filipinas, siendo el punto de mayor elevación la correspondiente a la isla de Luzón.

Ahora, haciendo lo mismo respecto al límite norte, entre la placa Filipina y Euroasiática, zona F, se identifica que se encuentra bien definida la isla de Taiwán y una incipiente cadena que corresponde a las islas Ryu Kyu y el Archipiélago de Japón, se establece que en la formación de éste último influye adicionalmente la placa Pacífico.

Por último, hacia el extremo occidental del modelo, zona G, se observa cierta curvatura, que viene a representar las islas de Sumatra hasta Andaman y Nicobar.

El análisis no se limita a validar la distribución de las elevaciones y relacionarlas geográficamente con los archipiélagos e islas que se presenten en la región, sino que se ha podido verificar la alta correlación existente entre las alturas obtenidas en estas simulaciones y las elevaciones topográficas presentes en la zona, destaca por ejemplo los valores obtenidos en la zona A de la figura 4.3, donde si se comparan los desplazamientos de cada nodo con el mapa físico de Java las coincidencias son notables (Fig. 4.5).

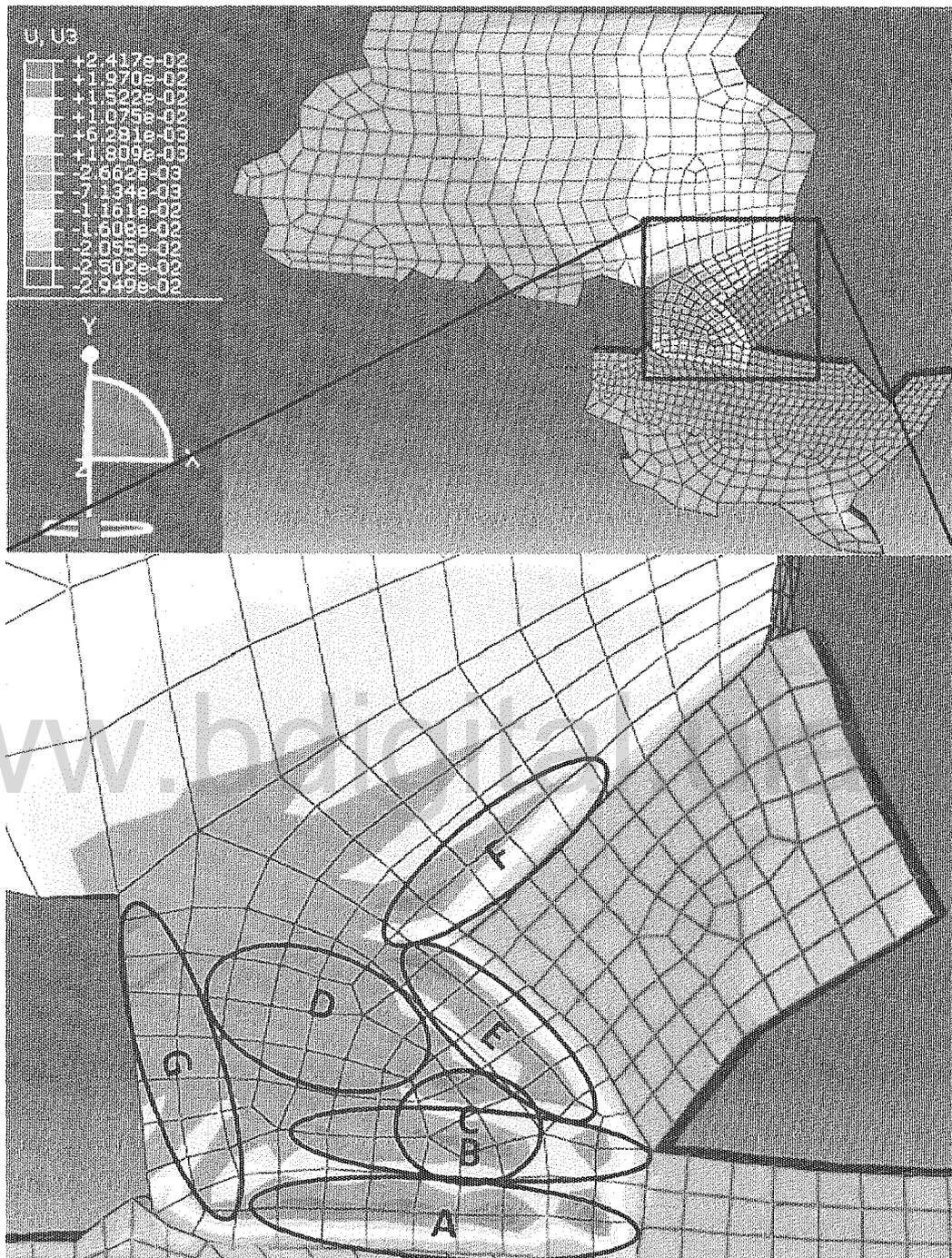


Figura 4.3. Sectorización de los desplazamientos nodales calculados para el límite de la placa Euroasiática.

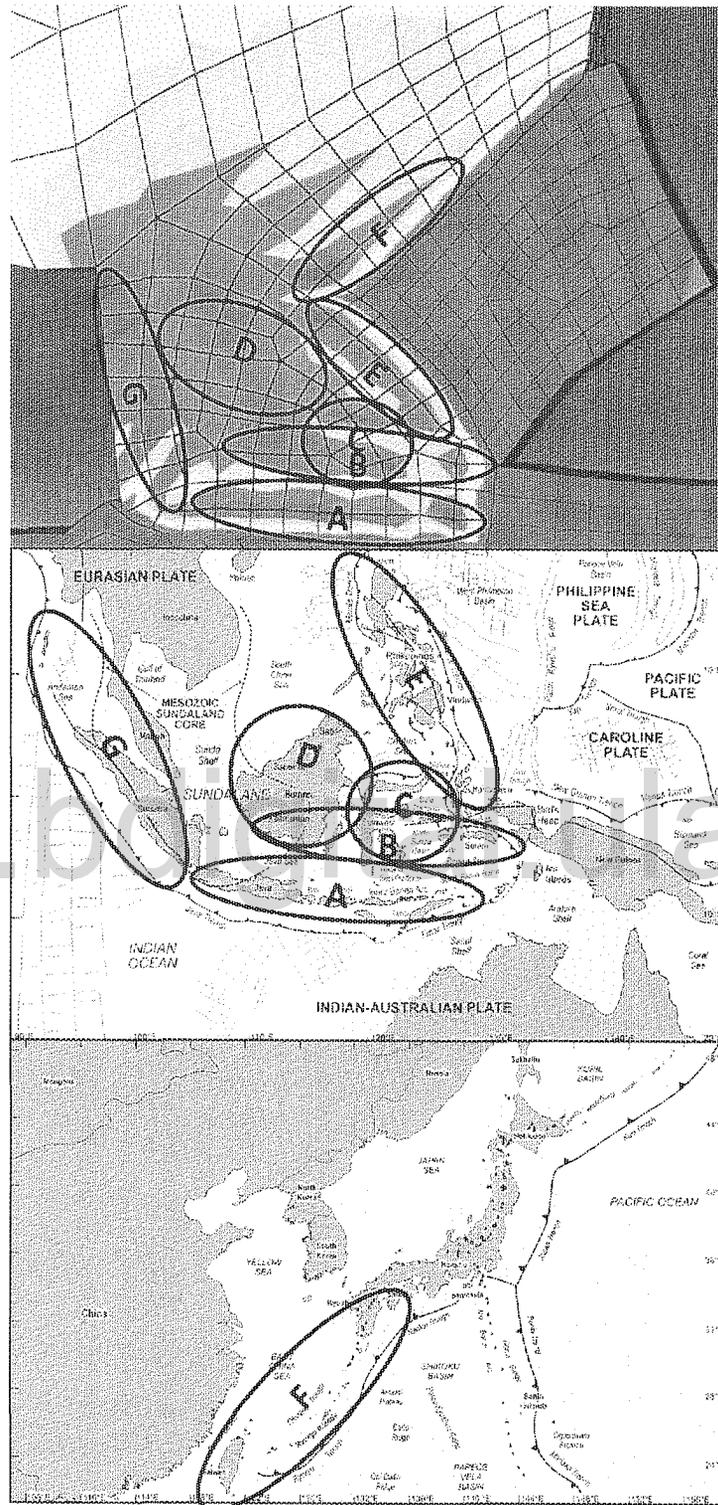


Figura 4.4. Comparación de los desplazamientos calculados en la zona sur de la placa Euroasiática con los mapas reales (tomado de [10]). La escala de colores es la misma de la figura 4.3

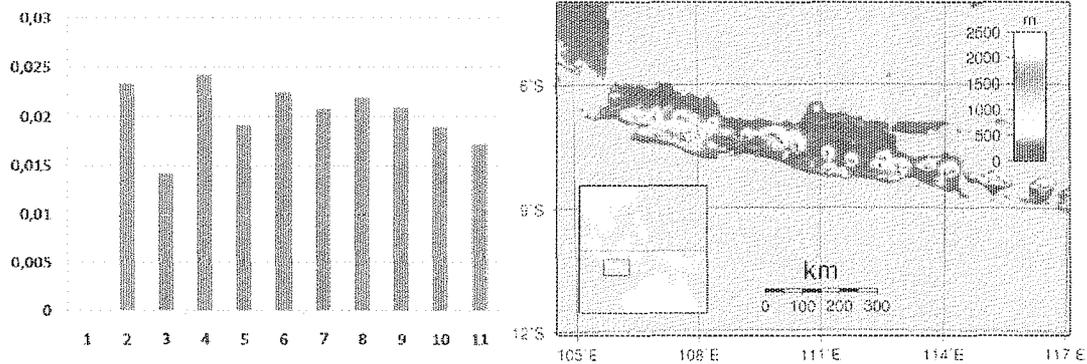


Figura 4.5. Comparación entre los desplazamientos nodales a lo largo de la zona A previamente indicada con el mapa físico de la zona de Java. Los valores de desplazamiento están en  $\times 10^2$  km.

En ese mismo sentido, la zona B, que corresponde a parte de las islas Molucas y Sulawesi (Fig. 4.3, 2.7 y 2.8), presentan una alta coincidencia con las elevaciones reales, donde en el modelo se obtienen alturas entre 1000 y 2400 msnm y la topografía del área indican altitudes promedio entre 1000 y 2500 metros, las máximas alturas registradas rondan los 3400 msnm, pero se debe recordar que es un archipiélago y por lo tanto las zonas más altas son compensadas con las áreas que se encuentran bajo el nivel del mar.

La zona C, Sulawesi, figuras 2.7 y 4.3, presenta altitudes promedio de 2000 a 2500 msnm y el modelo refleja alturas entre 1900 y 2400 msnm. La zona D, Borneo representada en las figuras 4.3 y 2.6, es una región donde los levantamientos son generalizados, con valores que rondan entre los 1500 y 1900 msnm, cuando la realidad señala altitudes que están entre 500 y 2000 msnm.

El archipiélago de Ryu Kyu tiene altitudes máximas de 1936 msnm y el modelo establece desplazamientos nodales entre 1500 y 2000 m. Taiwán por su parte tiene alturas que superan los 3900 msnm, no obstante estas regiones montañosas no alcanzan el 25% y las zonas llanas sobrepasan el 75% por lo que el modelo representa correctamente la realidad del área.

La segunda zona de interés de la figura 4.2, corresponde a la placa Filipina, un detalle de la misma se muestra en la figura 4.6, en ella es posible observar que los desplazamientos son negativos, es decir la placa desciende, esto es producto que se

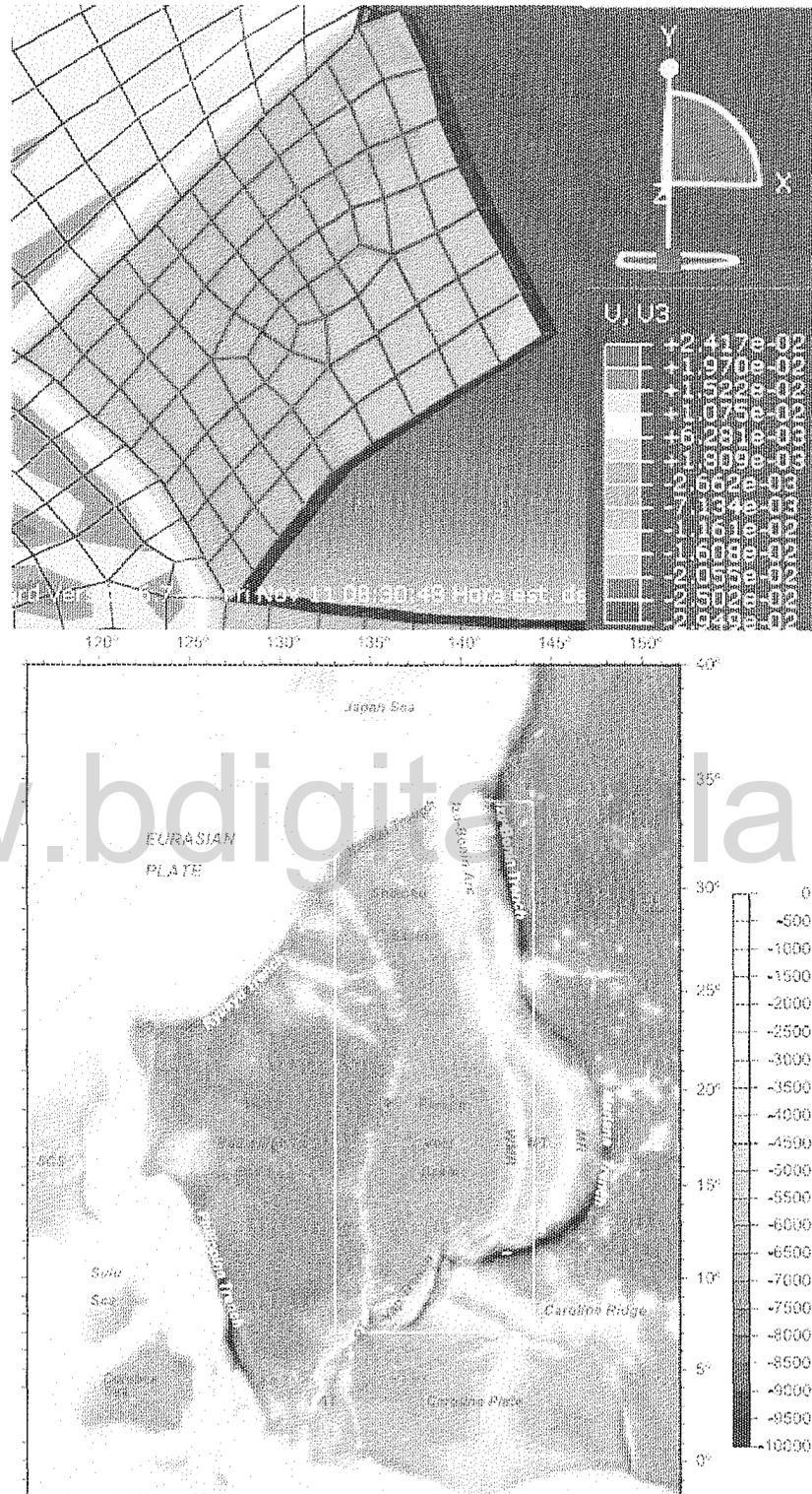


Figura 4.6. Detalle de la distribución de desplazamientos nodales en la dirección Z en la placa Filipina, resultados obtenidos comparado con la batimetría de la región (tomado de [18])

trata de una placa que subduce, sin embargo al comparar las distribuciones de desplazamientos nodales con la batimetría del área, se verifica que en ambas existen dos zonas; la más oriental, cuencas Shikoku y Parece Vela, cuyas profundidades oscilan entre los 1000 y 4000 metros, y la más occidental donde se encuentran las trincheras de Filipina y Ryu Kyu donde se alcanzan las mayores profundidades. En este análisis debe recordarse que existe una línea de rodillos en el límite de la placa Filipina para evitar el levantamiento por colisión de esta zona, por lo cual no se genera la trinchera propiamente dicha, esto a su vez influye en la distribución de los desplazamientos nodales, no obstante se presenta la misma distribución.

Destaca la formación de la subducción entre ambas placas, tal como se muestra en la figura 4.7, los patrones de desplazamiento sugieren que la placa Filipina tiende a deslizarse bajo la placa Euroasiática, al fondo es posible observar los levantamientos productos del empuje lateral de la placa. La distribución de colores en la placa Euroasiática muestra su grado de afectación.

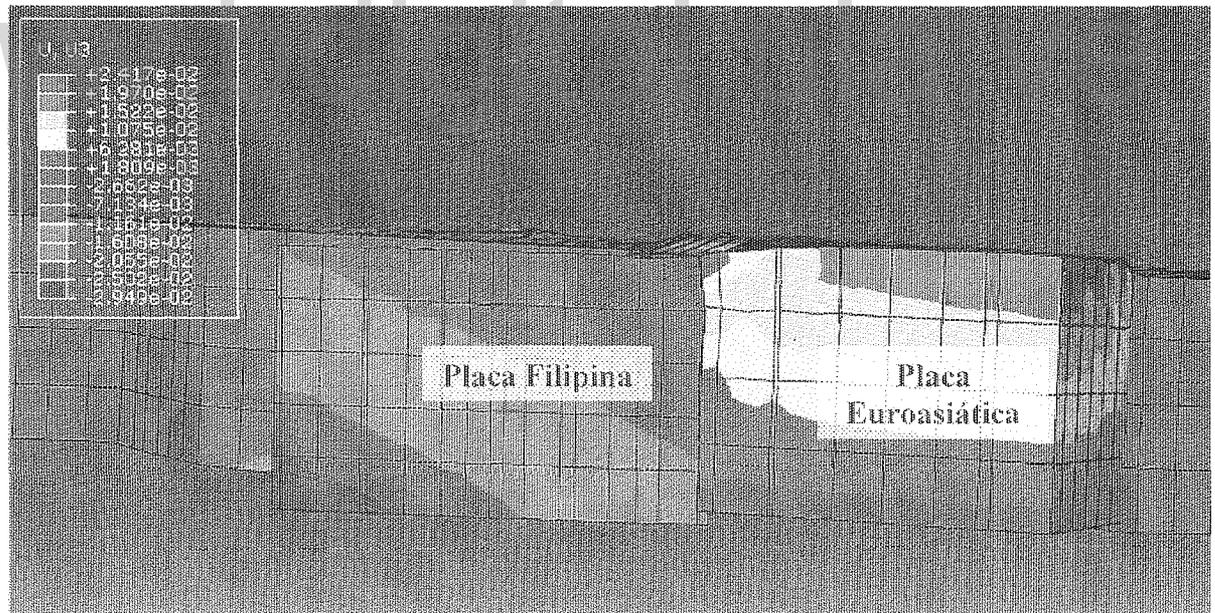


Figura 4.7. Perfil transversal de la zona de contacto entre las placas Euroasiática y Filipina, es posible observar la tendencia al descenso de Filipina por debajo de la Euroasiática. Las distribuciones de colores en las placas sugieren la formación de la zona de Benioff y el grado de afectación de la placa Euroasiática.

Considerado la placa Australiana, al observar la distribución de colores, es notable que la misma tiene una distribución bastante homogénea y ello es resultado de las condiciones de borde aplicadas, no obstante existe un punto singular, hacia el extremo meridional de la placa, zona A de la figura 4.8, el cual representa la zona de Nueva Zelanda.

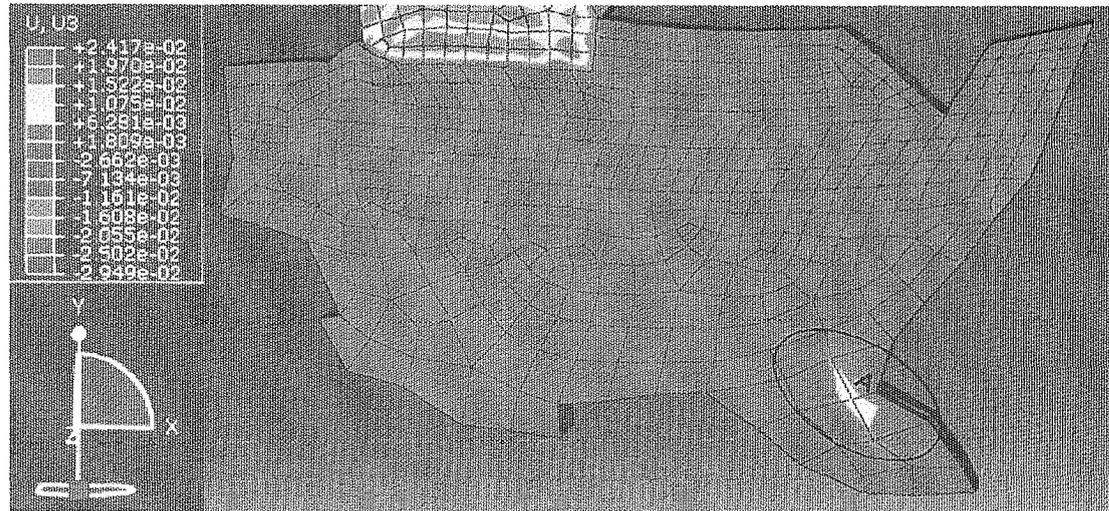


Figura 4.8. Distribución de desplazamientos nodales en la dirección Z en la Placa Australiana, la uniformidad obtenida corresponde a las condiciones de borde empleadas, el levantamiento de la zona A representa la región de Nueva Zelanda.

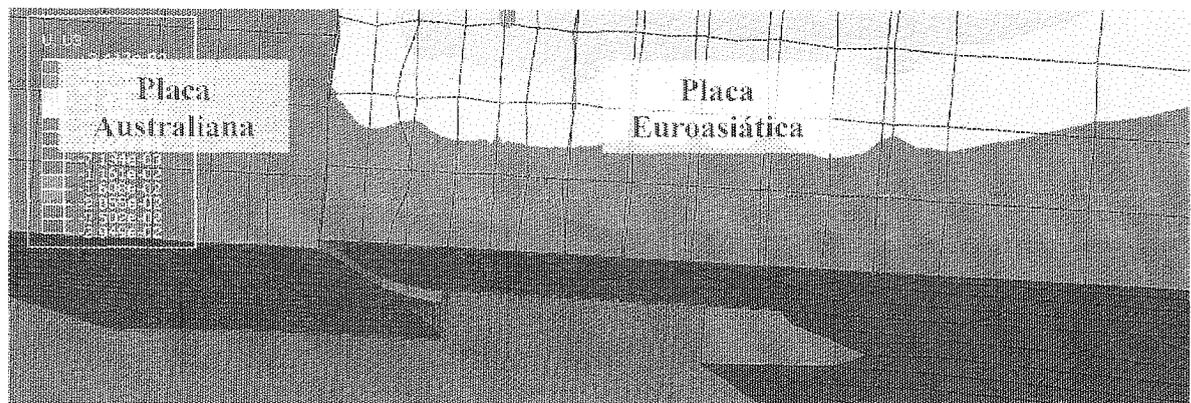


Figura 4.9. Perfil de la colisión entre la placa Euroasiática y Australiana, donde se muestra la subducción de la última bajo la primera.

Al igual que en el caso anterior, figura 4.9, en esta zona resulta interesante observar la formación del fenómeno de subducción, donde es posible identificar que la placa

Australiana subduce bajo la Euroasiática, siendo consistente con todos los modelos de la tectónica general.

En la figura 4.10, se muestra la subducción de las tres placas consideradas, donde se aprecia que el modelo corresponde con lo propuesto por la tectónica de placas.

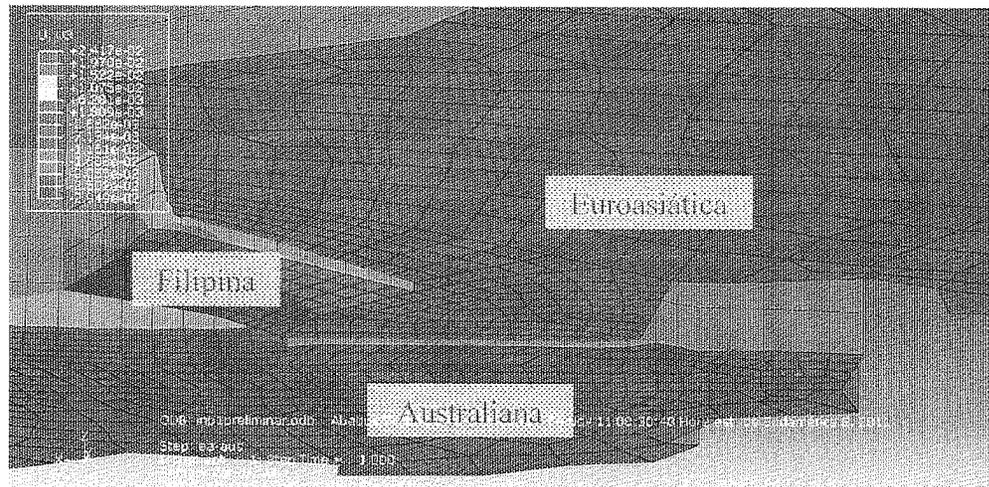


Figura 4.10. Vista inferior del modelo, obsérvese la subducción de las placas Australiana y Filipina respecto a la placa Euroasiática.

www.bdigital.ula.ve

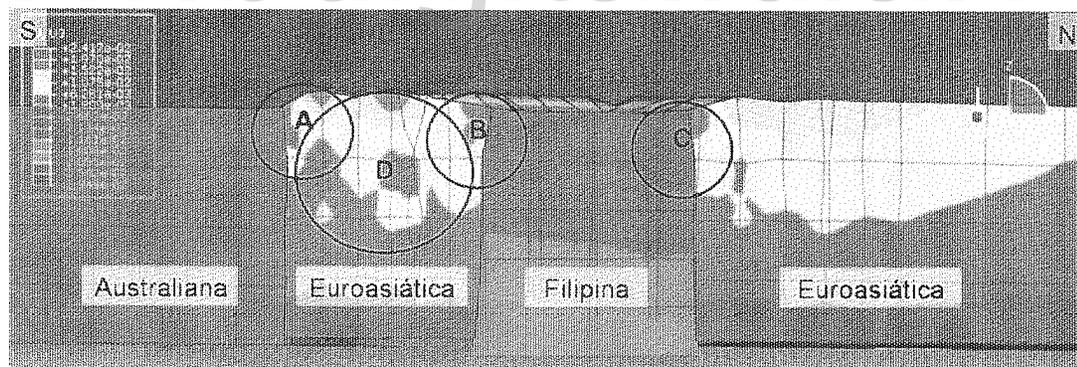


Figura 4.11. Perfil de la colisión entre la placa Filipina, Euroasiática y Australiana.

Si se realiza un corte de forma tal que se muestren las tres placas los resultados establecen la complejidad tectónica del área, se observan claramente tres fallas inversas (zona A, B y C, Fig. 4.11), donde se representan las trincheras de Java, Filipina y Ryu Kiu, respectivamente. Si se analiza la zona más septentrional es posible identificar que se trata de una subducción tradicional donde la placa Filipina

desciende respecto a la placa Euroasiática, sin embargo al desplazarse al sur se observa que existe una región de la placa Euroasiática que se ve afectada por las dos subducciones (Australiana-Euroasiática, Filipina-Euroasiática), por lo cual los patrones de desplazamientos nodales se superponen (zona D, Fig. 4.11). Igualmente se puede establecer que el empuje proveniente de la placa Australiana influye en la formación de las islas Ryu Kyu y Japón.

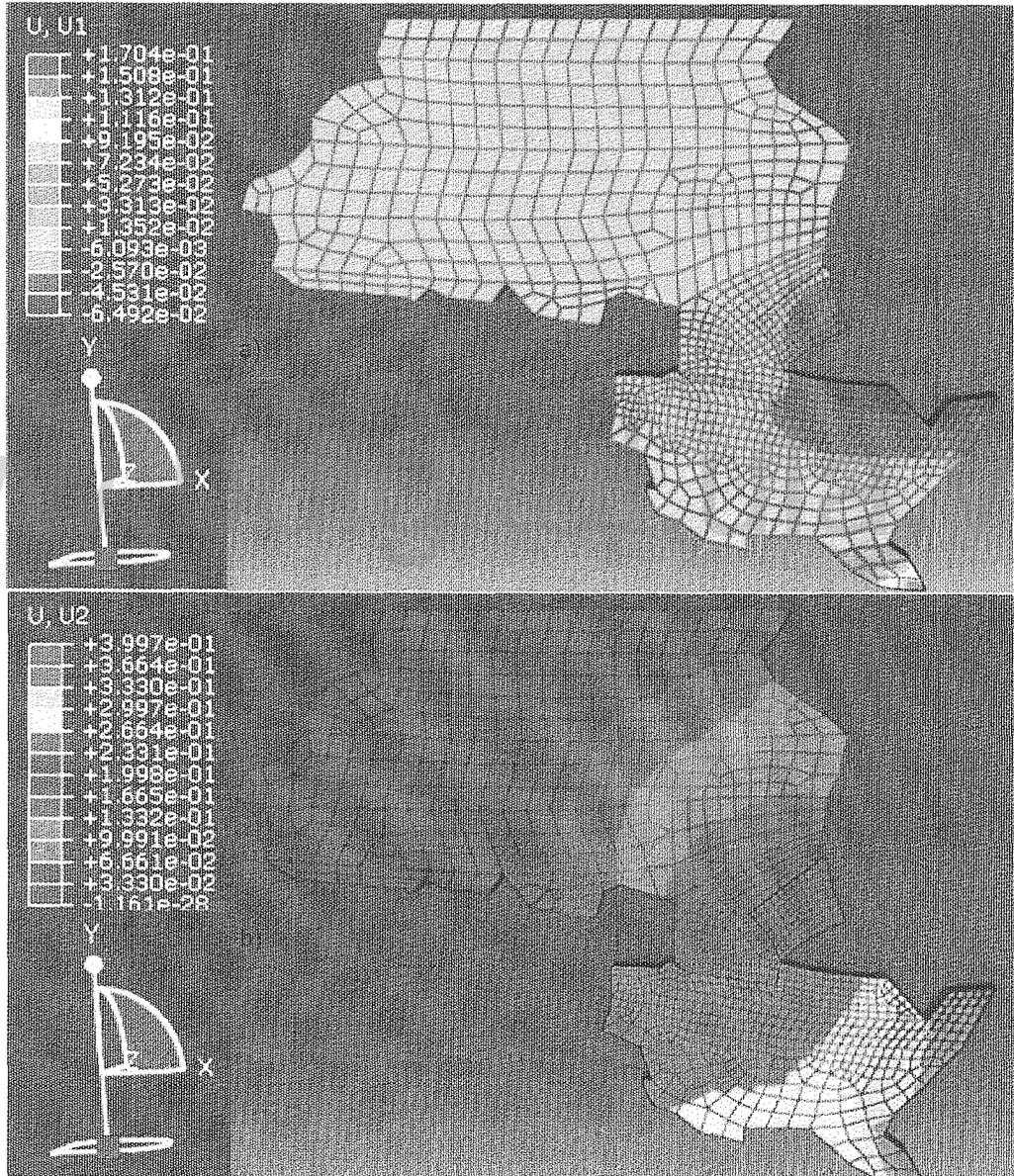


Figura 4.12. Desplazamientos nodales en el plano X,Y. a) Desplazamientos en la dirección X. b) Desplazamientos en la dirección Y

Para finalizar el análisis de los resultados de los desplazamientos nodales, se debe considerar los desplazamientos en las direcciones X e Y los cuales se muestran en la figura 4.12; estos son importantes puesto que permiten verificar cuales son los movimientos predominantes en las placas y si el movimiento de ellas es cónsono con la realidad, puesto que la suma de ambos desplazamientos debe dar la dirección de movimiento de las placas en torno al polo de rotación de Euler.

#### 4.3.2. Distribución y magnitudes de esfuerzos

Para el análisis de los esfuerzos en primer lugar se debe aclarar el convenio de signos empleado por el programa, en el cual las compresiones son negativas y las tensiones positivas.

En primer lugar, se analizan los esfuerzos máximos principales (Fig. 4.13), al observar la distribución de dichos valores se puede identificar que las magnitudes más altas se encuentran en la zona de interacción de las placas, son compresivos puesto que corresponde a una zona de subducción, donde las placas tectónicas convergen y colisionan.

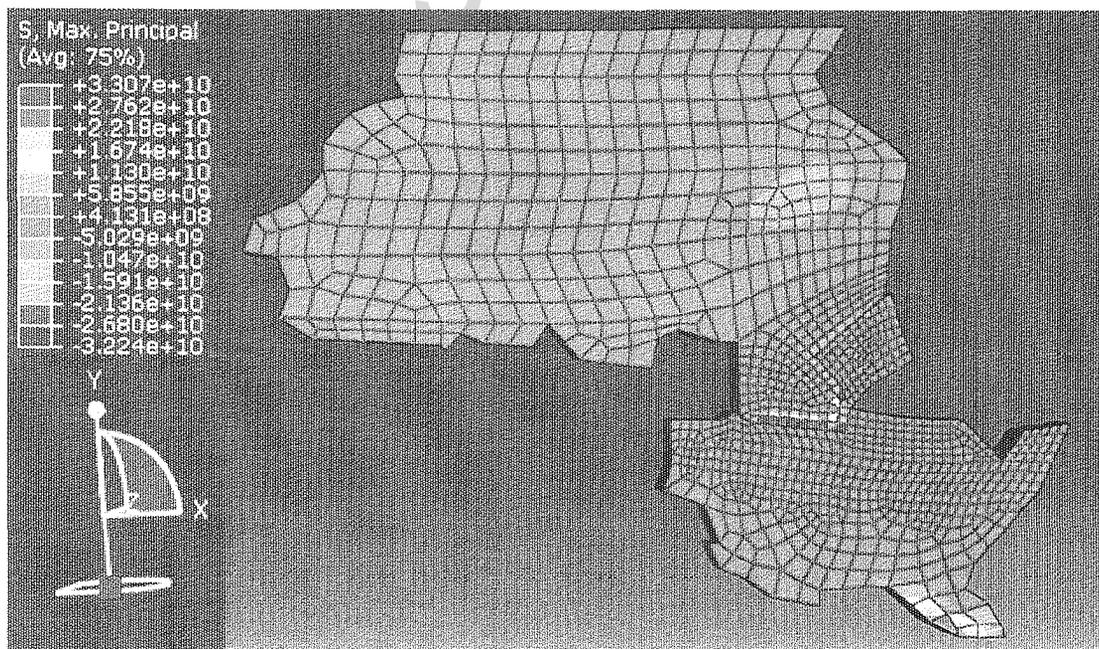


Figura 4.13. Distribución de los esfuerzos máximos principales ( $\sigma_1$ ). Las magnitudes están expresadas en  $\text{kg}/\text{km}^2$ .

El análisis de los esfuerzos mínimos principales indica que en toda la región adyacente a los límites de las placas están en regímenes compresivos, variando según el límite y placa considerada, como se muestra en la figura 4.14, en ese sentido se puede afirmar que los valores más elevados se encuentran en la región de la placa Euroasiática, a compresión, y a partir de allí se genera una disipación de los valores según el principio de Saint Venant. Los valores intermedios se encuentran en la placa Filipina, su distribución es relativamente uniforme a excepción de la zona de contacto entre las placas, puesto que es allí donde se experimentan las mayores compresiones. Por último, los menores valores compresivos se encuentran en la placa Australiana, las máximas concentraciones dentro de ésta se ubican justo en los límites con la placa Euroasiática.

La concentración que se muestra en el límite de la placa Euroasiática con la Índia permite inferir que el empuje, tanto de la placa Filipina como Australiana, contribuyen en la formación de los Himalayas, puesto que la distribución de los esfuerzos así parecen indicarlo.

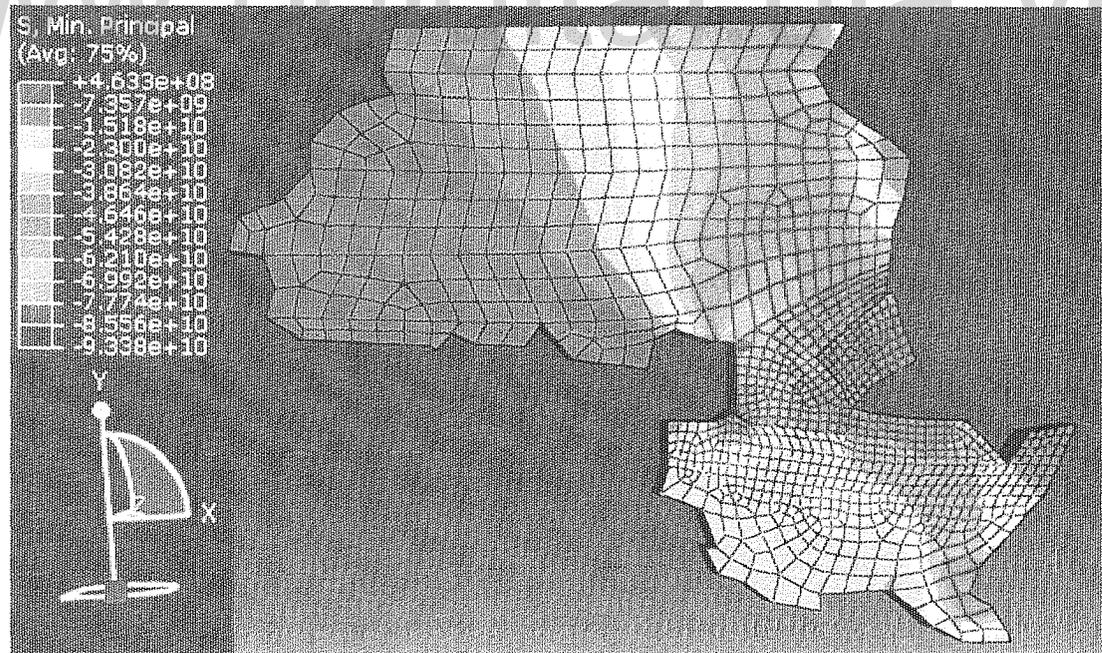


Figura 4.14. Distribución de los esfuerzos mínimos principales ( $\sigma_1$ ). Las magnitudes están expresadas en  $\text{kg}/\text{km}^2$ .

La distribución del esfuerzo principal intermedio se muestra en la figura 4.15, ésta básicamente señala que las zonas de interacción entre placas se encuentran sometidas a altos esfuerzos compresivos, producto del empuje generado por el movimiento de los bloques de litosfera, es un esfuerzo que determina en gran medida el comportamiento tectónico de una determinada región, de hecho gran parte de los postulados de esfuerzos y deformaciones en rocas se han realizado en base a los tres esfuerzos principales.

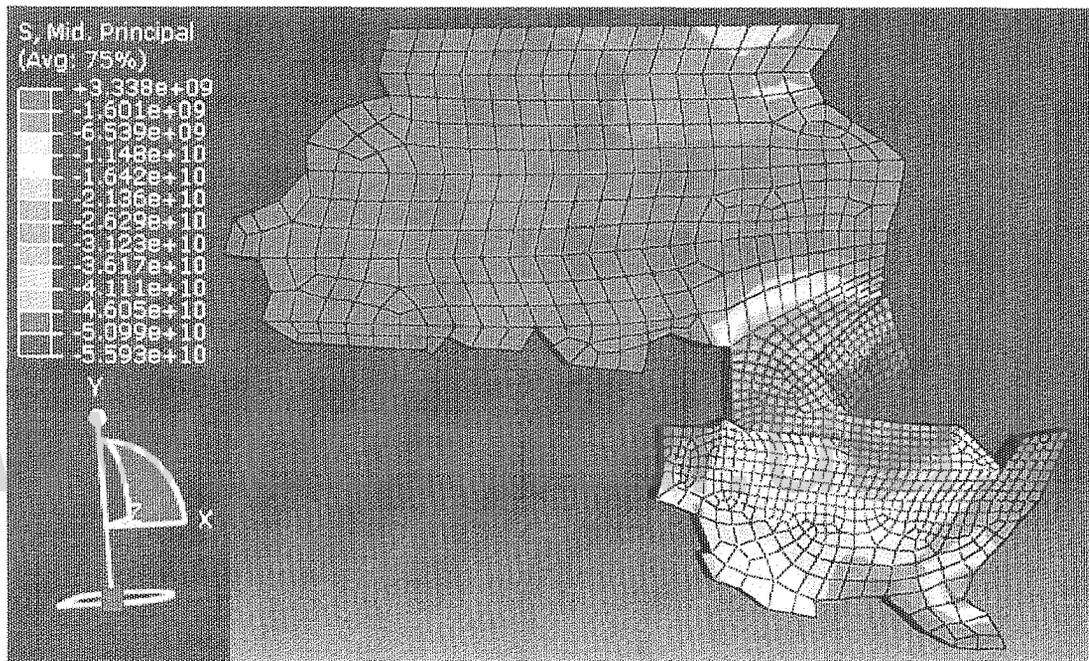


Figura 4.15. Distribución de los esfuerzos medios principales ( $\sigma_2$ ). Las magnitudes están expresadas en  $\text{kg}/\text{km}^2$ .

Respecto al esfuerzo en la dirección X, figura 4.16, se puede identificar que existen varias zonas según la distribución de colores, la primera en la zona de interacción de las tres placas estudiadas, la segunda en toda la placa Australiana y la tercera en el resto de la placa Euroasiática.

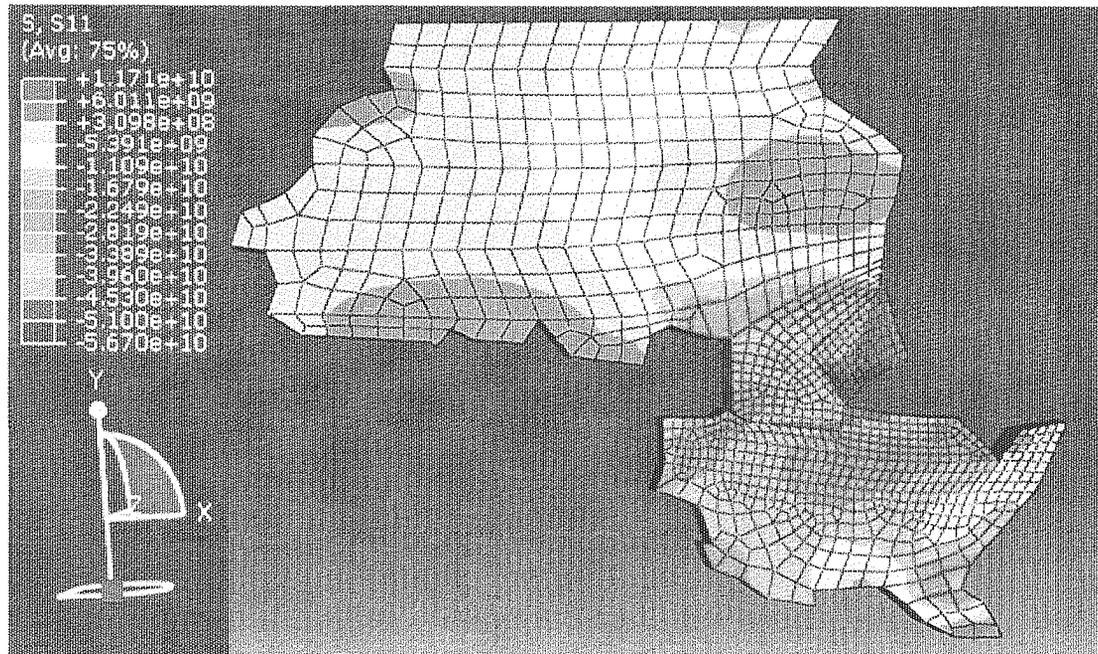


Figura 4.16. Distribución de esfuerzos en la dirección X. Las magnitudes están expresadas en  $\text{kg}/\text{km}^2$

Las zonas que se encuentran a tensión son producto de las condiciones de borde y cargas empleadas; por ejemplo en la zona 3, es posible identificar que existen tres regiones de color naranja que se encuentran a tensión y esto es consecuencia del empotramiento realizado a la placa Euroasiática, al estar inmóvil y ser sometida a la colisión, en rangos elásticos, es razonable que lo que se comprime en un sector debe alargarse en otro. Como la región anclada se encuentra en la parte norte de la placa y el empuje se produce en el extremo suroriental de la misma, existe una región intermedia donde algunos elementos se encuentran a tensión.

Este mismo fenómeno se puede observar en la placa Australiana, especialmente hacia las caras libres de la placa, donde las cargas impuestas para generar el movimiento ocasionan un efecto de tensión en dichos puntos, por lo cual no deben ser considerados, no obstante se puede identificar que prácticamente en la totalidad de la placa los esfuerzos dominantes son compresivos.

Los máximos valores se encuentran en los límites de placas y en algunos sectores de la placa Filipina, siendo todos compresivos. Esto es un resultado muy significativo, puesto que es lo que se espera en una zona de subducción, esto permite enmarcar el

contexto tectónico general en un sistema compresivo. En esta dirección, los esfuerzos máximos están principalmente asociados a la colisión entre la placa Filipina y Euroasiática, y al empuje que la primera le imprime a la segunda.

En el análisis de la distribución de los esfuerzos en la dirección Y, figura 4.17, se observa que, en general, en todas las placas se presenta un régimen compresivo, estando los máximos valores asociados al empuje de la placa Australiana y esto es debido a que el movimiento dominante de la misma es en ese sentido. Los esfuerzos distensivos tienen el mismo origen que los observados en la dirección X.

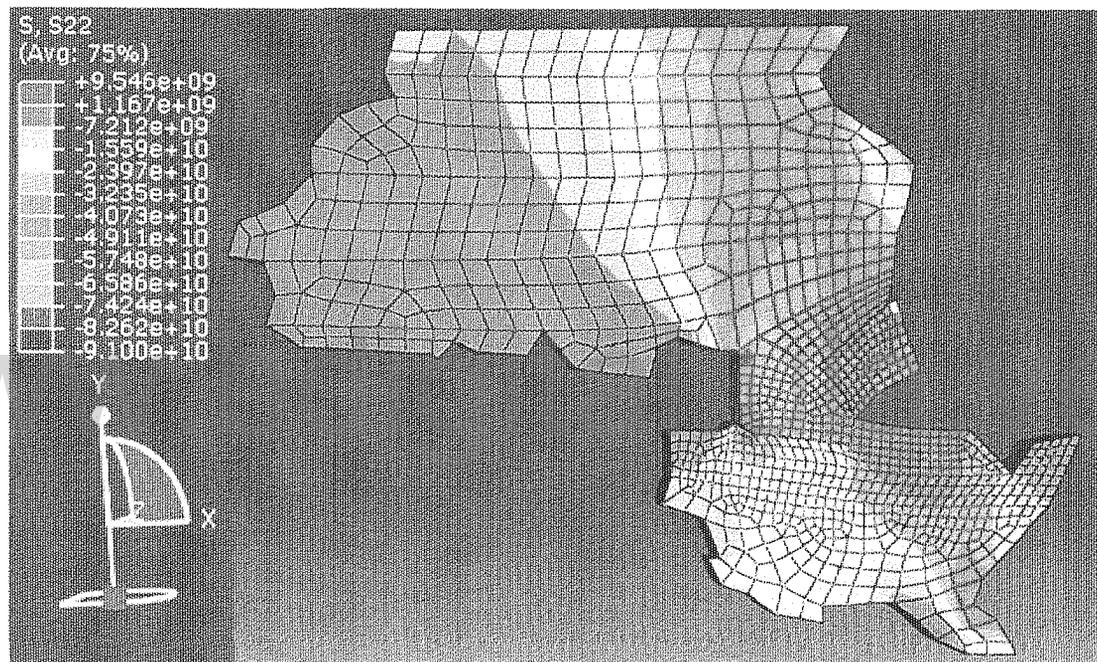


Figura 4.17. Distribución de esfuerzos en la dirección Y del modelo. Las magnitudes están expresadas en  $\text{kg}/\text{km}^2$

Por último, el análisis de los esfuerzos en la dirección Z, muestra claramente que los máximos valores se encuentran en el límite de la placa y son compresivos como se observa en la figura 4.18. Un efecto interesante que se presenta en este modelo es el efecto de tensión que sufren algunos elementos en las adyacencias a elementos sometidos a compresión y esto está asociado al hecho de que cuando un elemento se somete a una compresión con cierta inclinación los elementos vecinos pueden experimentar efectos de tensión para contrarrestar este efecto, un ejemplo similar a

esto se puede observar al comprimir una goma de borrar por el extremo superior, las partículas inmediatamente adyacentes a la zona de aplicación de la carga estarán sometidas a compresión, pero una vez estos disminuyan acorde con el principio de Saint Venant, las vecinas deberán someterse a tensión para compensar el efecto.

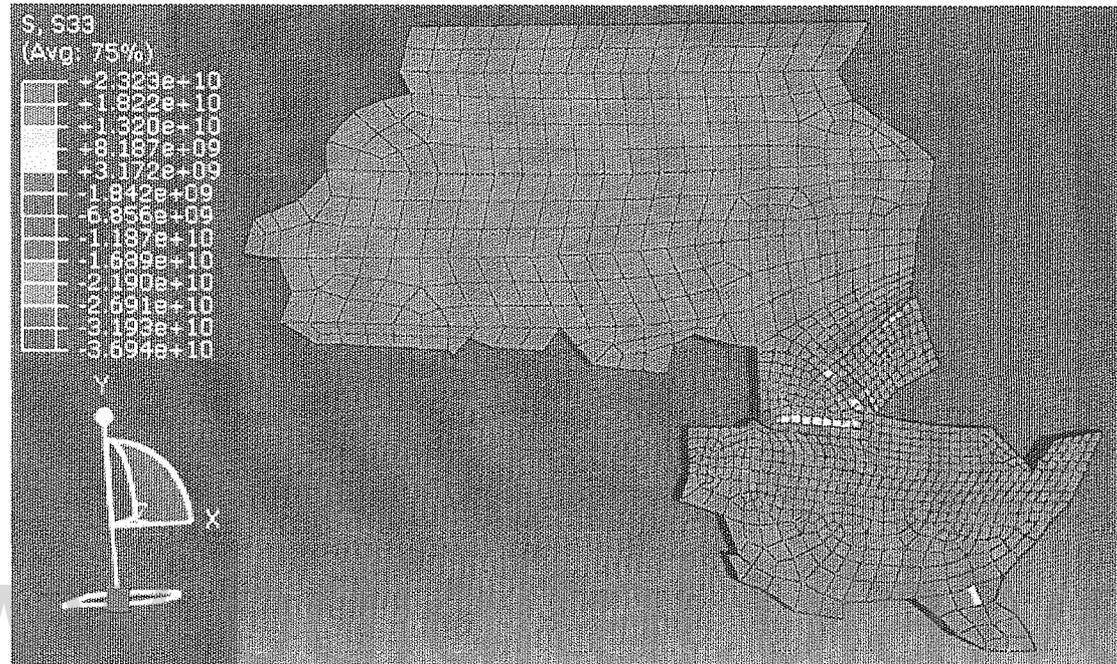


Figura 4.18. Distribución de esfuerzos en la dirección Z del modelo. Las magnitudes están expresadas en  $\text{kg}/\text{km}^2$ .

#### 4.3.3. Distribución y Magnitudes de Deformaciones.

El estudio de las deformaciones se realiza de forma similar a los esfuerzos, en primer lugar se presentan las deformaciones máximas, medias y mínimas principales para posteriormente considerar las presentadas en los ejes X, Y, Z.

Las deformaciones máximas principales se muestran en la figura 4.19, en ella es posible observar que los máximos valores se alcanzan en los límites de las placas tectónicas, fiel al postulado de la tectónica de placas, los valores indican los levantamientos que se producen como consecuencia del empuje y subducción al colisionar tanto la placa Filipina y Australiana con la Euroasiática.

Por su parte, las deformaciones medias principales, se observan en la figura 4.20, aquí se identifica que las máximas magnitudes se alcanzan en la placa Filipina,

correspondiendo a valores negativos, la distribución señala nuevamente que en la zona de contacto es donde se alcanzan las mayores magnitudes y a partir de ellas se generan zonas de atenuación conforme a los postulados de Saint Venant y la tectónica de placas.

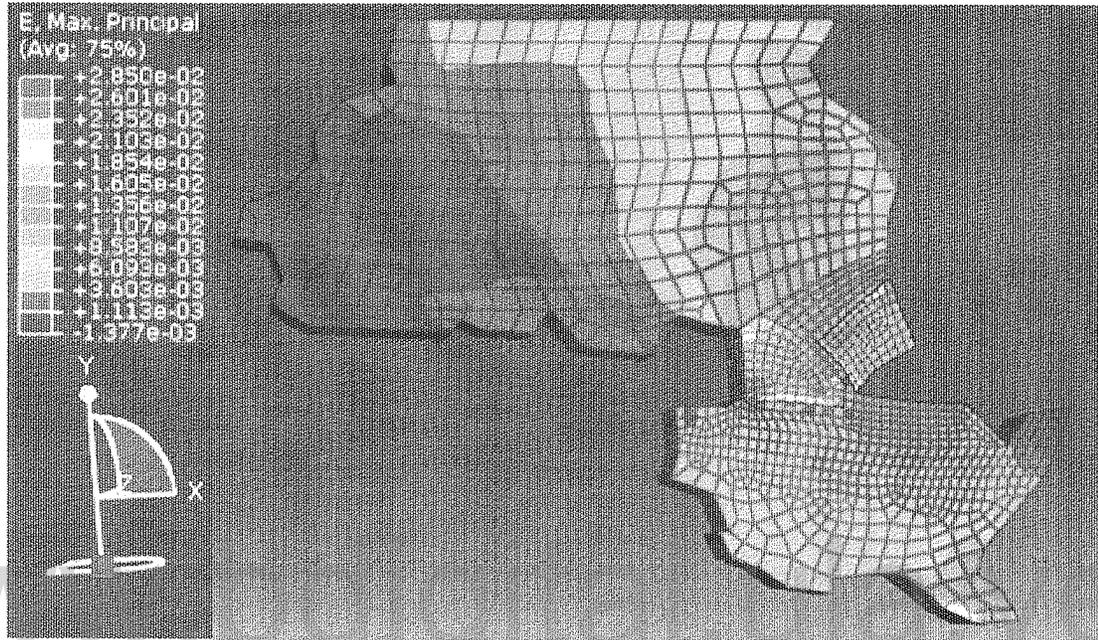


Figura 4.19. Distribución de las deformaciones máximas principales.

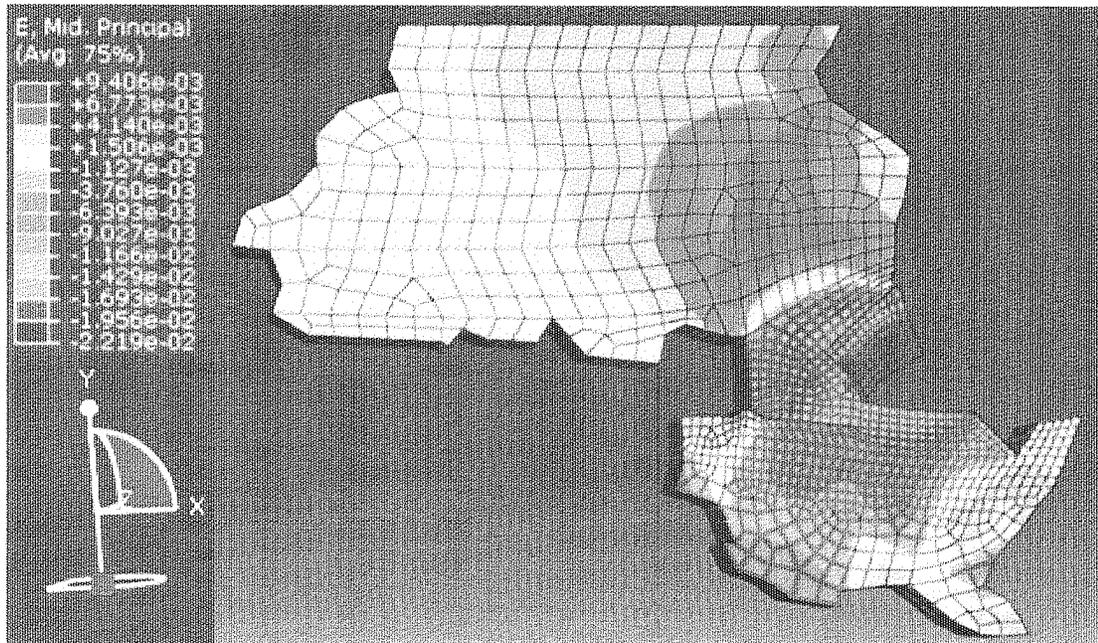


Figura 4.20. Distribución de las deformaciones medias principales

La distribución de las deformaciones mínimas principales se muestra en la figura 4.21, el análisis es muy similar a las dos distribuciones previamente mostradas y a la de los esfuerzos principales, donde las máximas magnitudes se alcanzan en los límites de las placas estudiadas y en la frontera de la placa Euroasiática con Hindú.

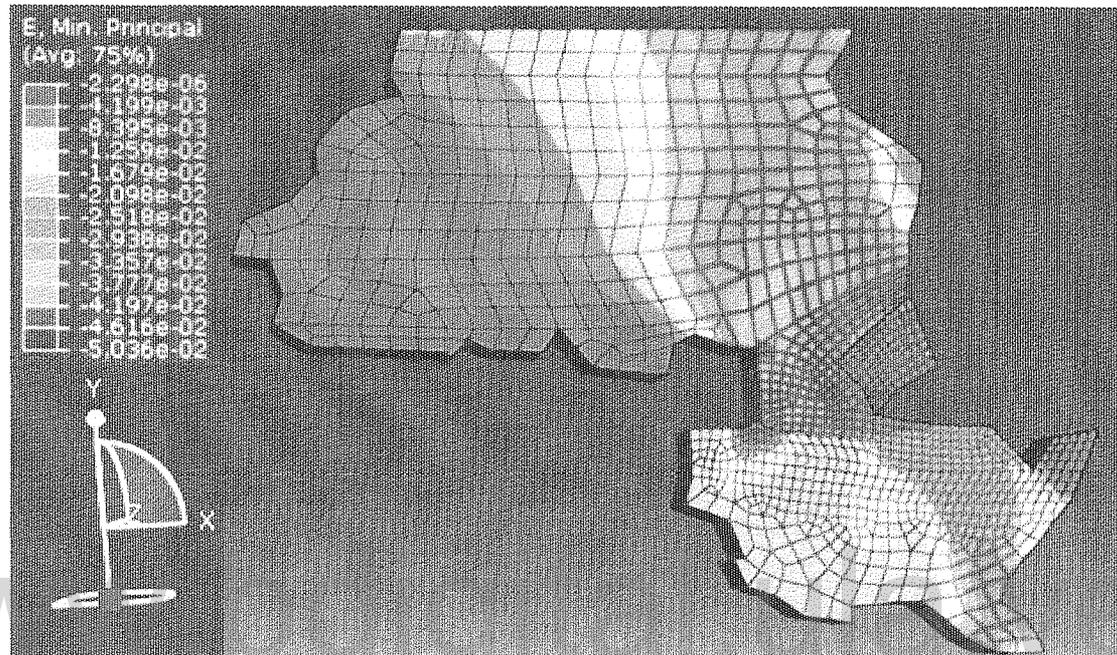


Figura 4.21. Distribución de las deformaciones mínimas principales

Para finalizar el análisis de las deformaciones se muestran las deformaciones en el eje X, Y y Z (figuras 4.22, 4.23 y 4.24), en ellas básicamente se observan que los máximos valores son alcanzados en los límites de las placas y se van atenuando progresivamente conforme se alejan de las zonas de interacción entre las placas, resulta evidente también que las mismas guardan estrecha relación con los esfuerzos en las mismas direcciones, lo cual es lógico puesto que se está trabajando en los rangos elásticos, donde hay una proporcionalidad entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones asociadas.

Los valores de las deformaciones en el eje X (fig. 4.22) varían de  $-3.388 \times 10^{-3}$  a  $-2.873 \times 10^{-2}$ , las máximas magnitudes se presentan en las zonas donde la placa Filipina interactúa con la Euroasiática y hacia el extremo oriental de la subducción entre ésta última y Australiana.

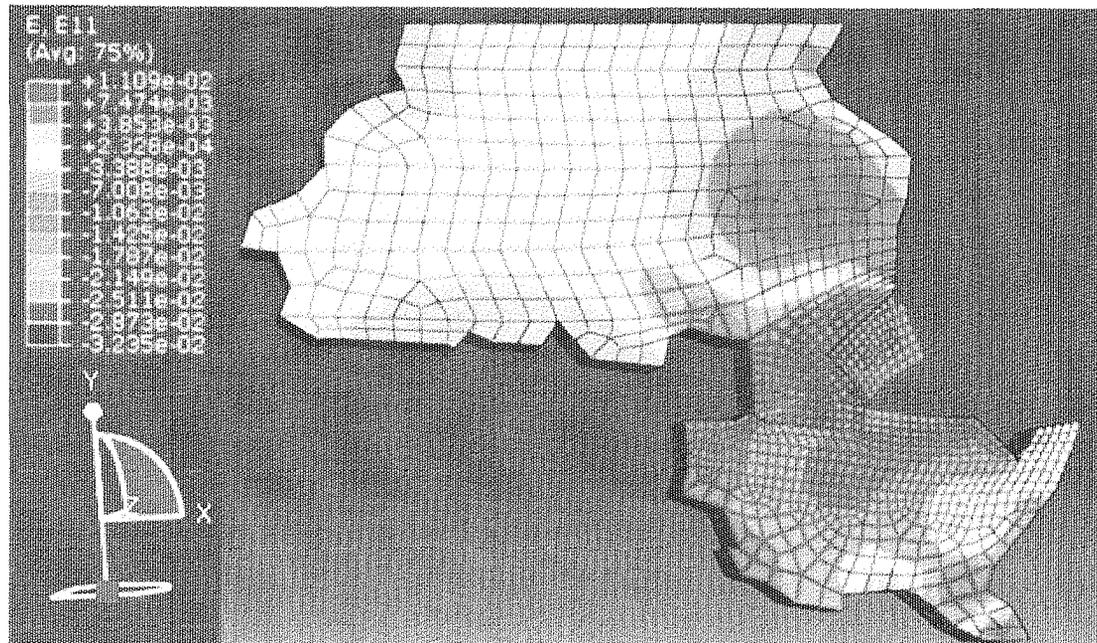


Figura 4.22. Distribución de las deformaciones en la dirección X.

En cuanto a la distribución de las deformaciones en el eje Y, figura 4.23, las máximas magnitudes están asociadas al empuje que le realiza la placa Australiana a la Euroasiática, nuevamente se genera la concentración en el límite de la placa Euroasiática con la Hindú, siendo consecuencia de las condiciones de borde impuestas en el modelo para asegurar la correspondencia con el medio geológico. Las magnitudes varían de  $-2.293 \times 10^{-3}$  a  $-4.386 \times 10^{-2}$ .

Las deformaciones unitarias en el eje Z se muestran en la figura 4.24, exhiben sus máximos valores justo en la zona de interacción y esto se debe a que es justo allí donde se genera tanto el descenso de la placa oceánica más densa por debajo de la placa continental, como el levantamiento asociado a este fenómeno. Las magnitudes varían de  $2.845 \times 10^{-2}$  a  $-2.298 \times 10^{-2}$ .

Al analizar estas deformaciones respecto a su magnitud se observa que las mismas tienen órdenes de magnitud que varían entre  $10^{-4}$  y  $10^{-2}$ , lo cual indica que se encuentran en el valor límite que marca las deformaciones elásticas para el concreto y las rocas, en este sentido se puede expresar que las deformaciones que estén por

debajo de  $10^{-3}$  son deformaciones elásticas, no obstante aquellas que superan este umbral serán deformaciones plásticas o permanentes.

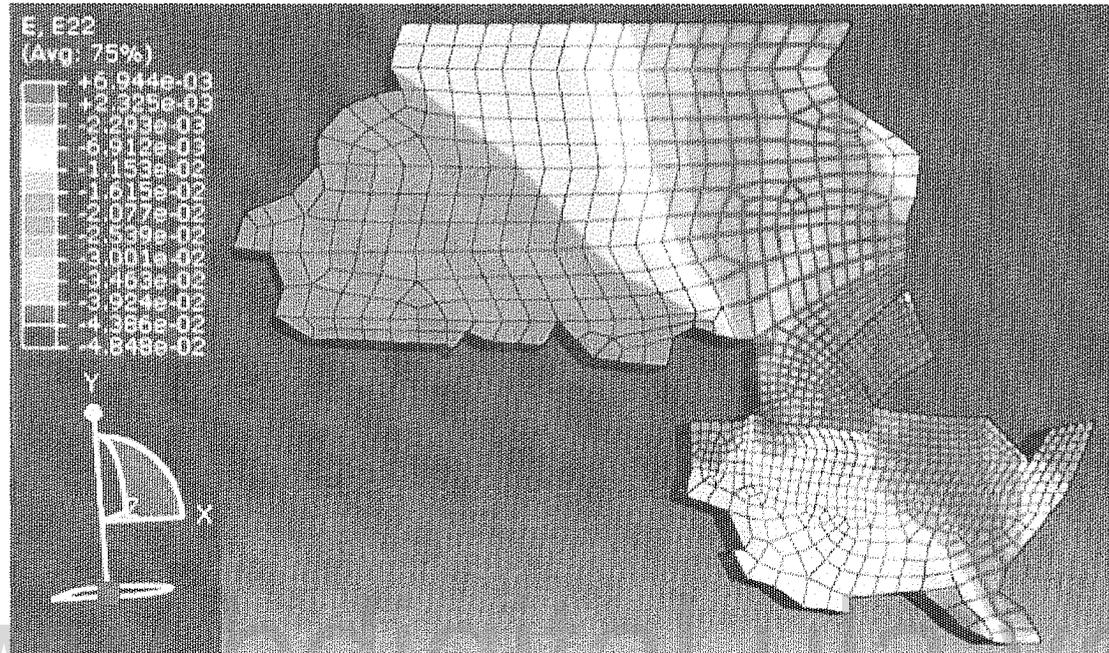


Figura 4.23. Distribución de las deformaciones en la dirección Y.

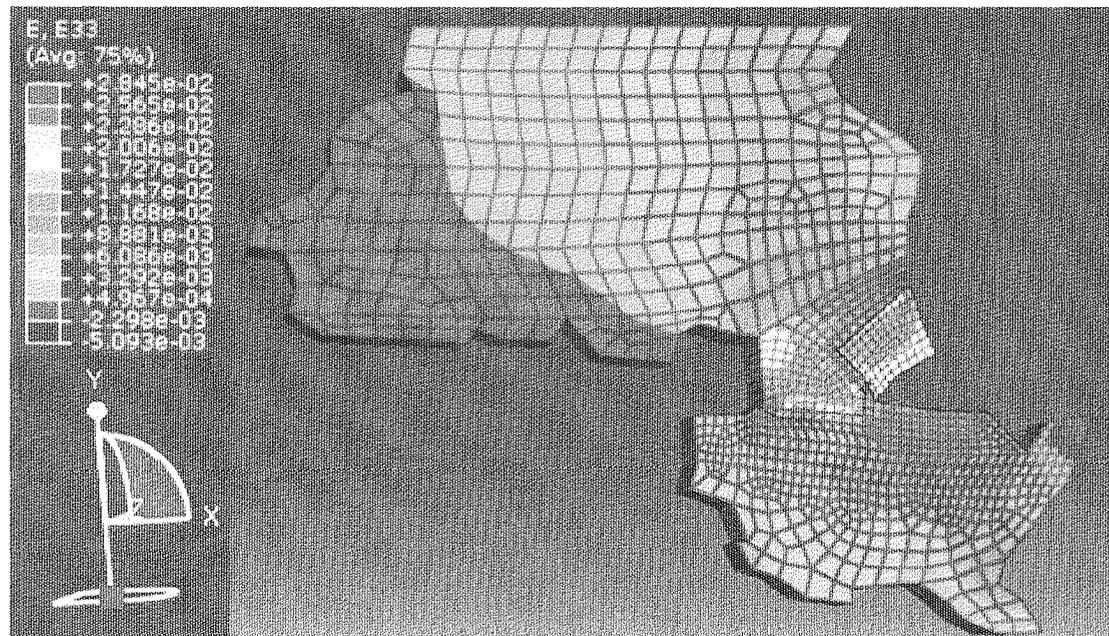


Figura 4.24. Distribución de deformaciones unitarias en la dirección Z.

Esto es cónsono con los postulados de la tectónica de placas, donde se esperan deformaciones plásticas de gran intensidad, debido a los altos esfuerzos que se encuentran en la región producto del movimiento de las placas, estas deformaciones llegan a ser tan importantes que en las mayores profundidades, cercanas a los 700 km, pueden alcanzar el punto de anatexia o fusión parcial de estas rocas, este aspecto es muy importante puesto que permite explicar fácilmente el vulcanismo asociado a los límites de placas.

#### **4.3.4. Energía de Deformación Unitaria**

La energía de deformación interna representa la energía en que se transforma el trabajo realizado durante la deformación de un cuerpo. Partiendo de este hecho la interpretación de esta variable se refiere a la cantidad de energía potencial elástica que son capaces de acumular las placas tectónicas conforme subducen y se deforman.

Las aplicaciones geológicas de este cálculo son muy interesantes, puesto que es conocido que las placas tectónicas al deslizarse una respecto a la otra no constituyen cuerpos libres de fricción, sino que por el contrario constituyen cuerpos de diversa naturaleza que generan una alta tasa de rozamiento durante su desplazamiento relativo, que muchas veces ese desplazamiento se va dando suavemente hasta que llega un momento en que las fuerzas de rozamiento superan las tendentes al movimiento y las placas se estancan, generando una acumulación de energía, cuando esta energía supera determinados niveles se genera una liberación de la misma que puede ser abrupta o paulatina; cuando la liberación es violenta se generan los denominados sismos o terremotos en función de la magnitud de energía liberada.

Esta liberación ocasionará que las placas queden nuevamente libres y sean capaces de desplazarse, de hecho producto de la liberación de energía pueden definirse dos tipos de desplazamiento, el primero denominado desplazamiento cosísmico, que es el que se genera producto del movimiento telúrico y el desplazamiento post-sísmico o asísmico que es el que se genera como consecuencia del movimiento y busca la nueva estabilidad del sistema.

La energía de deformación interna viene a representar parte de la energía acumulada en una placa tectónica producto de la subducción y permite tener una idea de la magnitud de la energía que es capaz de acumularse sólo por el deslizamiento sin fricción entre dos bloques de litosfera promedio, evidentemente se trata de una fracción de la energía acumulada, sin embargo la magnitud de la misma da idea sobre la magnitud que pudiera ser liberada en determinado momento y permite comprender el carácter destructivo de los sismos.

Un aspecto que se debe resaltar es que con esto no se pueden predecir los sismos puesto que en primer lugar solo se trata de una fracción puesto que las placas como se dijo al inicio no son cuerpos libres de fricción y adicionalmente no se considera que el material se deforme plásticamente.

La distribución de la energía de deformación en el modelo estudiado, figura 4.25, sigue los patrones esperados al ser máxima en las zonas de interacción entre las placas, específicamente en los límites de ella, destacan cuatro puntos asociados con los máximos valores. Los dos primeros, zona A y B de la figura 4.26, corresponden a la energía acumulada producto de la subducción de la placa Filipina debajo de la Euroasiática. La tercera zona, zona C, por su parte está asociada a la interacción que se genera entre la placa Australiana y Euroasiática. Por último, la región que corresponde al límite entre la placa Euroasiática e Hindú, zona D, debe ser considerarse según lo expuesto en el apartado 4.3.2.

Existen dos zonas adicionales a las mencionadas y son producto de las cargas y condiciones de borde impuestas al modelo, la primera de ella, figura 4.27, representa la energía acumulada por la carga que genera la formación de Nueva Zelanda, y la segunda, figura 4.28, es un efecto del empotramiento que se le realizó a la placa Euroasiática, para que los modelos fueran consistentes con las rotaciones en torno a los polos de Euler, por lo cual no debe ser considerada.

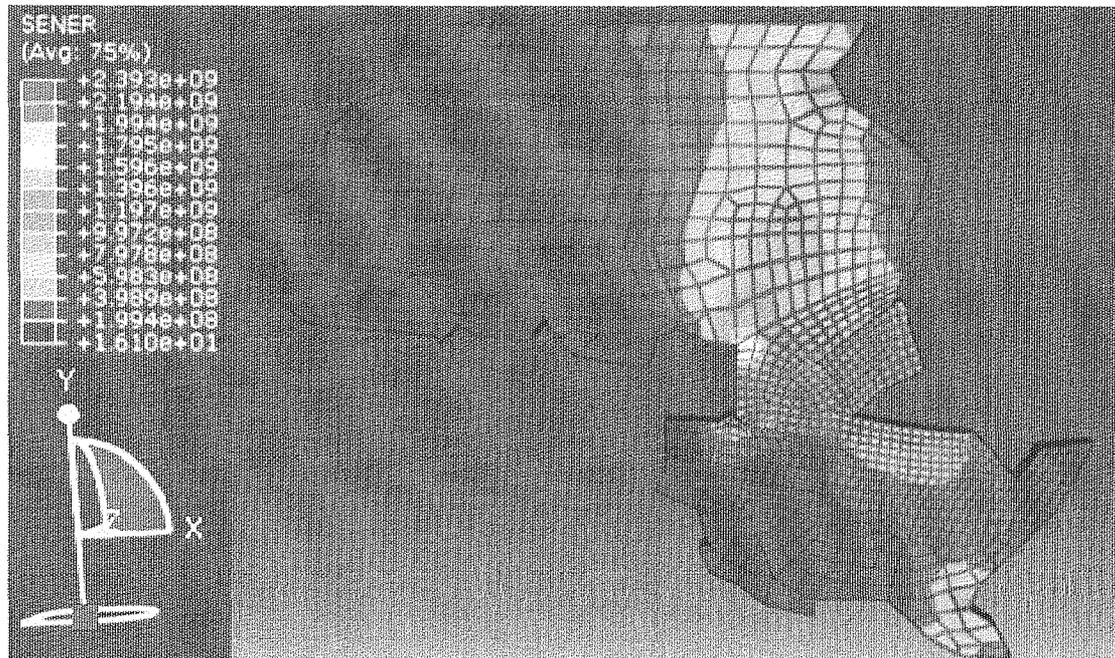


Figura. 4.25. Distribución de la Energía de Deformación Interna

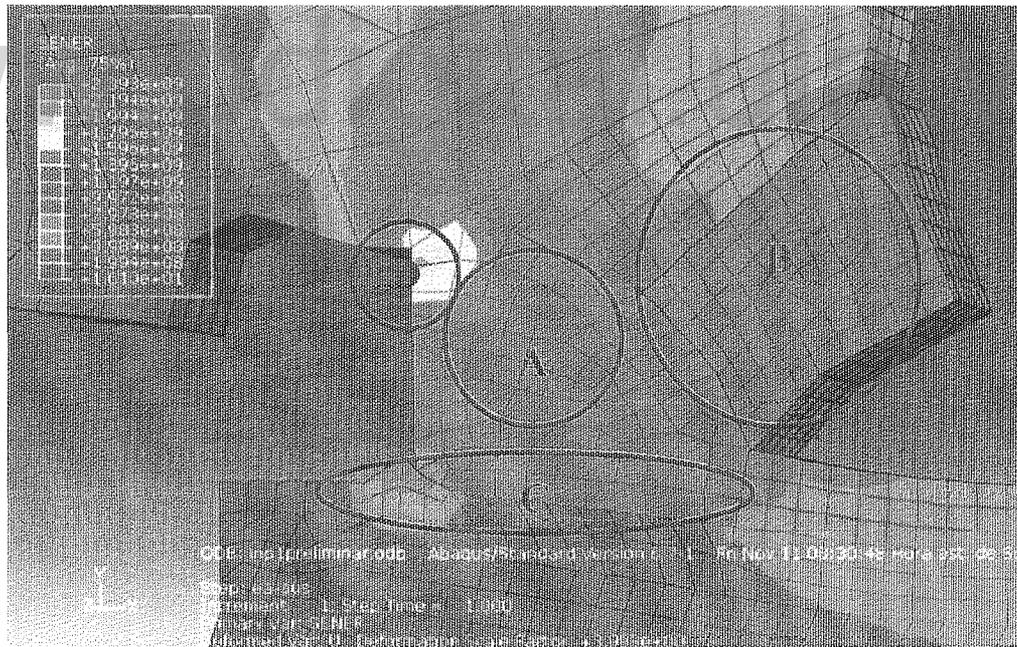


Figura 4.26. Detalle de la distribución de la Energía de Deformación Interna en los límites de las placas consideradas por el modelo.

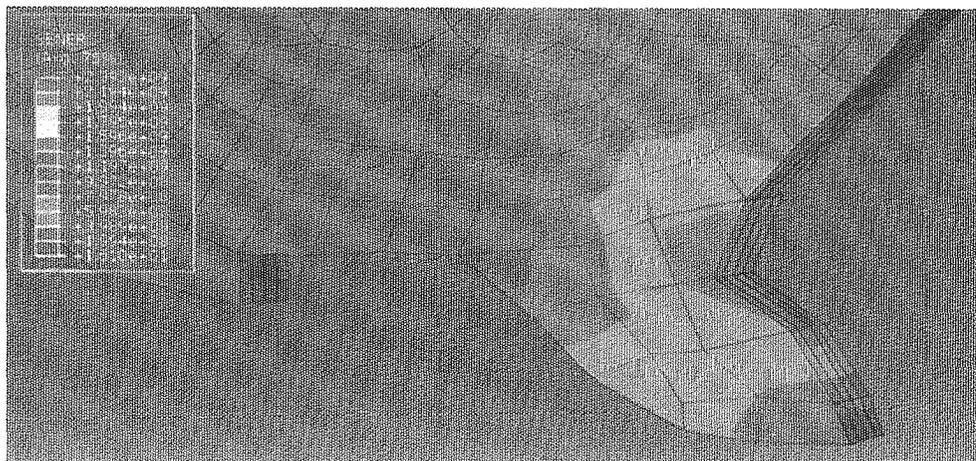


Figura 4.27. Energía de Deformación Interna consecuencia de la formación de Nueva Zelanda.

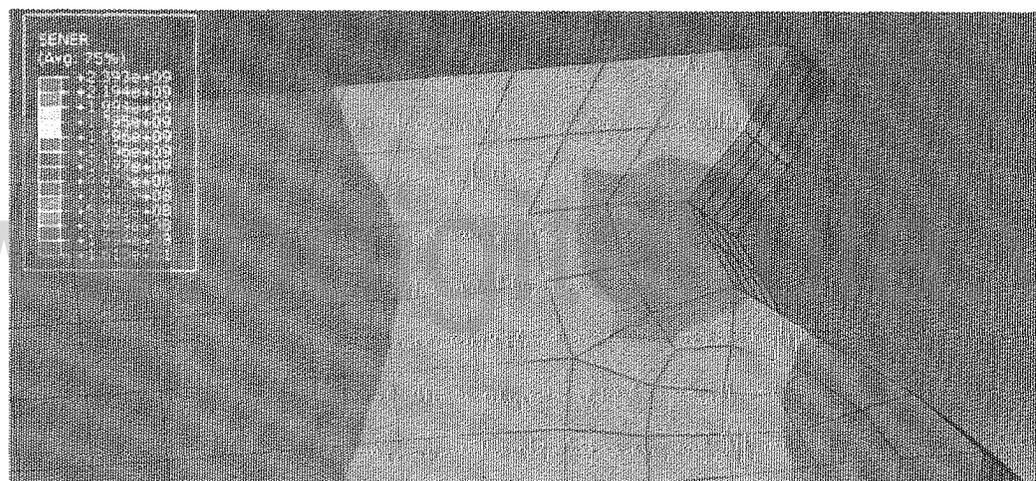


Figura 4.28. Energía consecuencia del empotramiento asignado a la placa Euroasiática para generar la rotación de las placas Filipina y Australiana en torno a ésta.

En función de la magnitud de energía calculada por la simulación y empleando las ecuaciones propuestas por Bernal y Tavera se logra determinar que los sismos derivados de la liberación abrupta y total de esta energía, corresponden a magnitudes de 6.8 y 6.75° en la escala de Richter para magnitudes de ondas superficiales y corpóreas respectivamente. Estas magnitudes corresponden con lo esperado para una región de subducción, sin llegar a ser las liberaciones más catastróficas puesto que la simulación sólo considera una fracción de la energía acumulada.

#### 4.4. Correlación y Análisis de los Valores Numéricos.

Con base en los resultados mostrados y analizados en este capítulo, se busca correlacionar los mismos en áreas de interés, correspondientes a los límites de las placas tectónicas, puesto que es allí donde se presentan los máximos valores de las variables calculadas.

Las correlaciones realizadas consistieron en comparar los esfuerzos, las deformaciones y la energía de deformación interna en las direcciones X, Y, Z, según perfiles longitudinales, transversales y en profundidad.

##### 4.4.1. Placa Australiana.

Para el análisis de esta placa se dividió la misma en tres regiones como se muestra en la figura 4.29.

##### 4.4.1.1. Zona I: Zona de Subducción Oeste de la placa Australiana respecto a la Euroasiática.

###### 4.4.1.1.1. Perfiles Perpendiculares.

Se realizaron cuatro secciones transversales, paralelas entre sí, los valores numéricos calculados por el programa para cada elemento que conforman dicho perfil se muestran en la tabla 4.2 y en la figura 4.30. En ellas se observan los esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z, junto con la energía de deformación interna.

A partir de la tabla 4.2 y figura 4.30 es posible identificar que existe una tendencia, de todas las variables, a disminuir sus magnitudes conforme se aleja de la zona de interacción con las placas tectónicas vecinas, esto es consistente con el principio de Saint Venant y los postulados de la tectónica de placa, que establecen las placas como bloques de litosfera rígidos, lo que resulta significativo es el hecho que no muestran una relación lineal sino que la misma es polinómica, indicando una disminución abrupta en las variables consideradas.

Ahora, correlacionando las tres variables en las direcciones X, Y, Z (Figura 4.31), es posible observar que en las direcciones X e Y existe una tendencia general a la

disminución conforme se aleja de la zona de subducción, no obstante en la dirección Z, las magnitudes de las variables tienden a disminuir, salvo en el caso del esfuerzo donde existen efectos de compresión y tensión alternados.

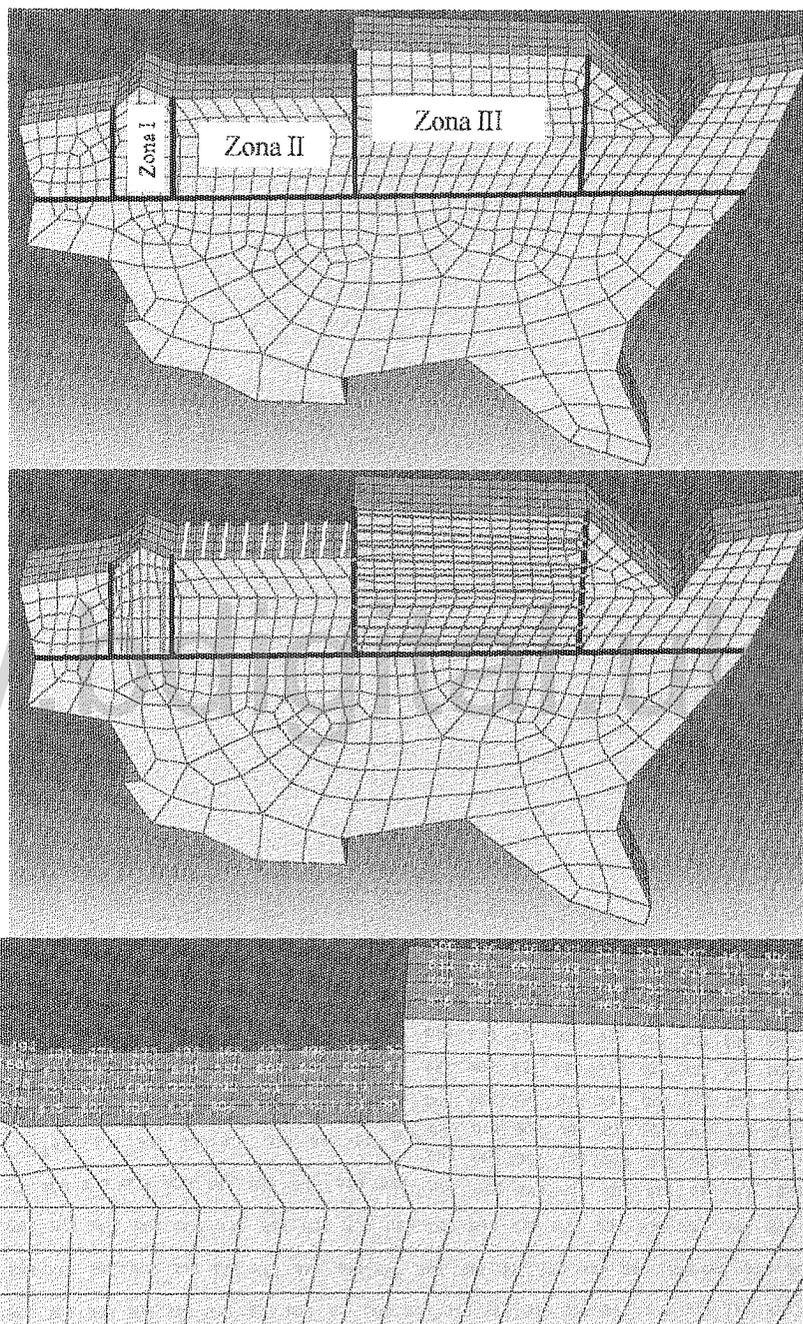


Figura 4.29. División de la placa Australiana en zonas según la distribución de las variables en estudio y dirección de los perfiles considerados, de color naranja se denotan los perfiles perpendiculares, rojo los paralelos y amarillo los perfiles en profundidad, por último se muestran los elementos que constituyen las zonas consideradas.

Tabla 4.2. Valores calculados de la energía de deformación interna, esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33, respectivamente) para los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática. Los elementos que se muestran van desde la zona de Subducción hacia el interior de la placa.

## a. Primer Perfil

Elementos	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1062	-2,29E-02	-8,60E-04	7,79E-03	-4,18E+10	-1,39E+10	-3,00E+09	7,93E+08
1053	-9,96E-03	-1,64E-03	4,98E-03	-1,79E+10	-7,41E+09	9,70E+08	1,42E+08
1061	-1,05E-02	-7,58E-03	6,35E-03	-2,27E+10	-1,90E+10	-1,37E+09	3,49E+08
1033	-9,47E-03	-6,54E-03	6,65E-03	-1,95E+10	-1,58E+10	8,68E+08	2,54E+08
1063	-8,65E-03	-6,14E-03	5,49E-03	-1,84E+10	-1,53E+10	-5,34E+08	2,07E+08
1043	-8,26E-03	-5,30E-03	5,53E-03	-1,69E+10	-1,32E+10	5,38E+08	1,69E+08

## b. Segundo Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1035	-1,83E-02	-7,59E-03	8,30E-03	-3,73E+10	-2,38E+10	-3,64E+09	1,03E+09
1050	-1,50E-02	-1,06E-02	1,04E-02	-3,13E+10	-2,57E+10	9,31E+08	6,92E+08
1071	-8,86E-03	-9,99E-03	6,94E-03	-2,08E+10	-2,22E+10	-8,05E+08	3,49E+08
1034	-8,11E-03	-9,57E-03	7,07E-03	-1,88E+10	-2,07E+10	4,00E+08	2,86E+08
1051	-6,99E-03	-8,21E-03	5,79E-03	-1,64E+10	-1,80E+10	-2,56E+08	2,03E+08
1037	-7,52E-03	-7,16E-03	5,74E-03	-1,67E+10	-1,63E+10	5,91E+07	1,70E+08

## c. Tercer Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
829	-1,27E-02	-2,18E-02	1,21E-02	-3,42E+10	-4,57E+10	-2,80E+09	1,18E+09
803	-8,75E-03	-1,49E-02	9,30E-03	-2,27E+10	-3,05E+10	1,95E+08	6,24E+08
806	-7,27E-03	-1,41E-02	7,90E-03	-2,01E+10	-2,88E+10	-8,82E+08	3,84E+08
244	-5,67E-03	-1,22E-02	7,09E-03	-1,58E+10	-2,41E+10	3,11E+08	2,68E+08
271	-6,23E-03	-1,00E-02	6,23E-03	-1,60E+10	-2,08E+10	-1,95E+08	2,01E+08
298	-6,16E-03	-8,55E-03	5,80E-03	-1,50E+10	-1,80E+10	1,66E+08	1,60E+08

## d. Cuarto Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
830	-7,16E-03	-2,41E-02	1,30E-02	-2,37E+10	-4,51E+10	1,83E+09	7,95E+08
854	-3,67E-03	-2,08E-02	8,35E-03	-1,76E+10	-3,92E+10	-2,39E+09	5,20E+08
900	-4,49E-03	-1,57E-02	8,32E-03	-1,52E+10	-2,93E+10	1,01E+09	3,20E+08
245	-4,57E-03	-1,35E-02	6,61E-03	-1,50E+10	-2,64E+10	-8,79E+08	2,37E+08
272	-5,19E-03	-1,12E-02	6,66E-03	-1,44E+10	-2,21E+10	5,52E+08	1,91E+08
299	-5,53E-03	-9,79E-03	5,74E-03	-1,47E+10	-2,01E+10	-4,39E+08	1,59E+08

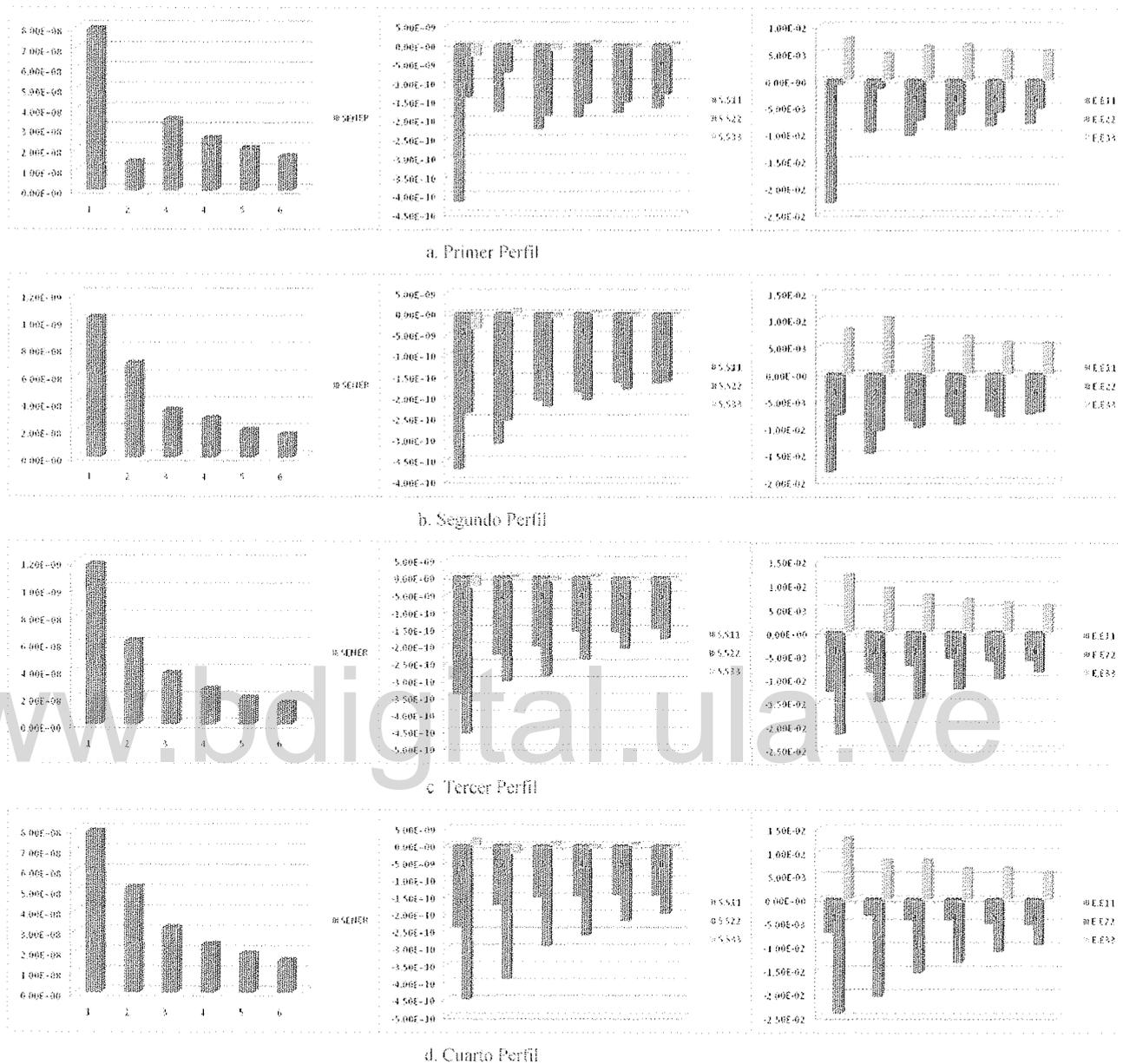


Figura 4.30. Distribución de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática.

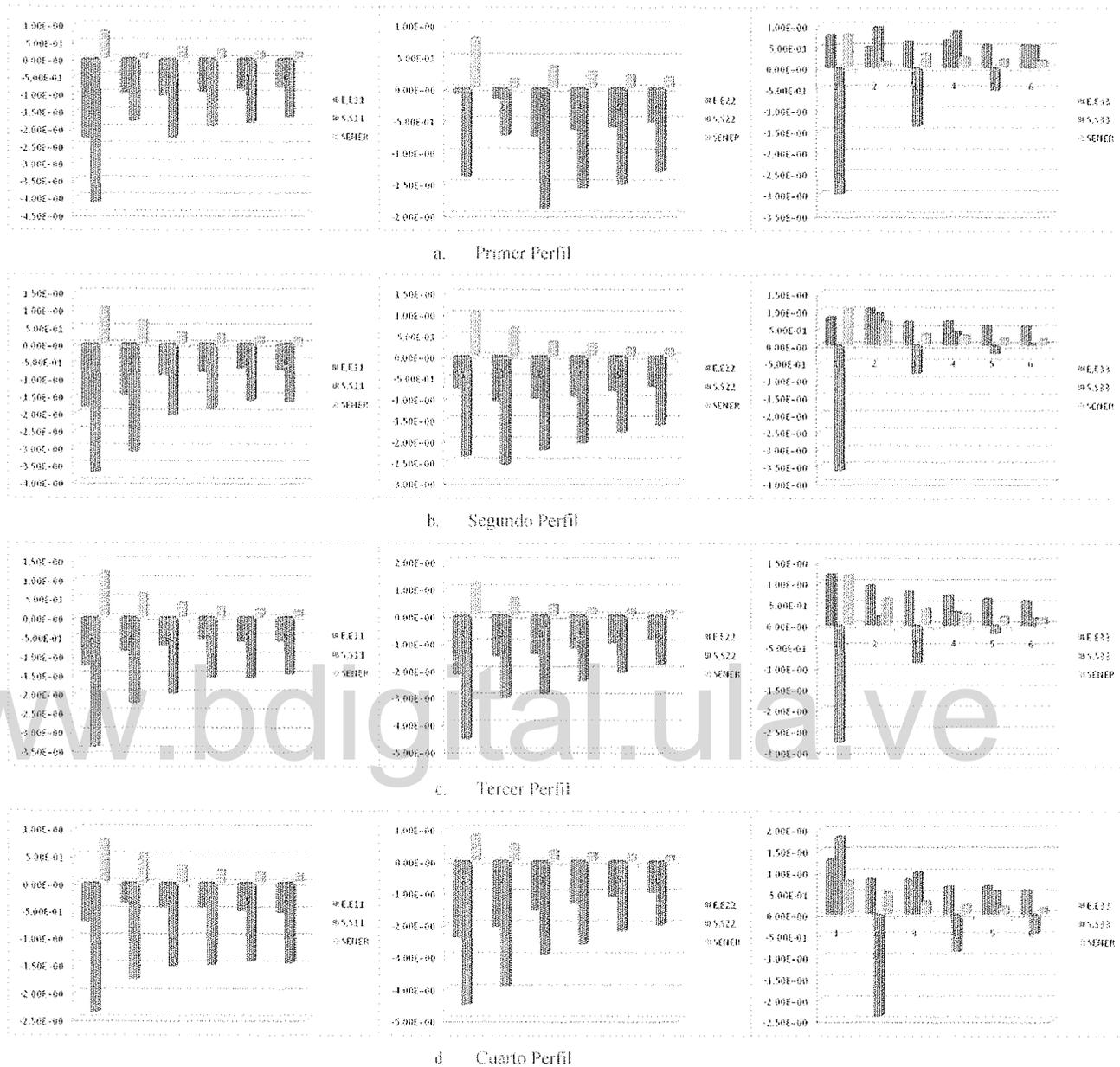


Figura 4.31. Correlación de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z en los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática.

#### 4.4.1.1.2. Perfiles Paralelos.

En este caso se realizaron seis perfiles paralelos entre sí, que vienen a completar la malla en superficie, los resultados numéricos y representación gráfica de los mismos se muestran en la tabla 4.3 y figura 4.32.

Tabla 4.3. Valores calculados de la energía de deformación interna, esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z para los perfiles paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática. Los elementos se muestran desde la izquierda a derecha de la placa (Oeste-Este en referencias geográficas)

## a. Primer Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1062	-2,29E-02	-8,60E-04	7,79E-03	-4,18E+10	-1,39E+10	-3,00E+09	7,93E+08
1035	-1,83E-02	-7,59E-03	8,30E-03	-3,73E+10	-2,38E+10	-3,64E+09	1,03E+09
829	-1,27E-02	-2,18E-02	1,21E-02	-3,42E+10	-4,57E+10	-2,80E+09	1,18E+09
830	-7,16E-03	-2,41E-02	1,30E-02	-2,37E+10	-4,51E+10	1,83E+09	7,95E+08

## b. Segundo Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1053	-9,96E-03	-1,64E-03	4,98E-03	-1,79E+10	-7,41E+09	9,70E+08	1,42E+08
1050	-1,50E-02	-1,06E-02	1,04E-02	-3,13E+10	-2,57E+10	9,31E+08	6,92E+08
803	-8,75E-03	-1,49E-02	9,30E-03	-2,27E+10	-3,05E+10	1,95E+08	6,24E+08
854	-3,67E-03	-2,08E-02	8,35E-03	-1,76E+10	-3,92E+10	-2,39E+09	5,20E+08

## c. Tercer Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1061	-1,05E-02	-7,58E-03	6,35E-03	-2,27E+10	-1,90E+10	-1,37E+09	3,49E+08
1071	-8,86E-03	-9,99E-03	6,94E-03	-2,08E+10	-2,22E+10	-8,05E+08	3,49E+08
806	-7,27E-03	-1,41E-02	7,90E-03	-2,01E+10	-2,88E+10	-8,82E+08	3,84E+08
900	-4,49E-03	-1,57E-02	8,32E-03	-1,52E+10	-2,93E+10	1,01E+09	3,20E+08

## d. Cuarto Perfil

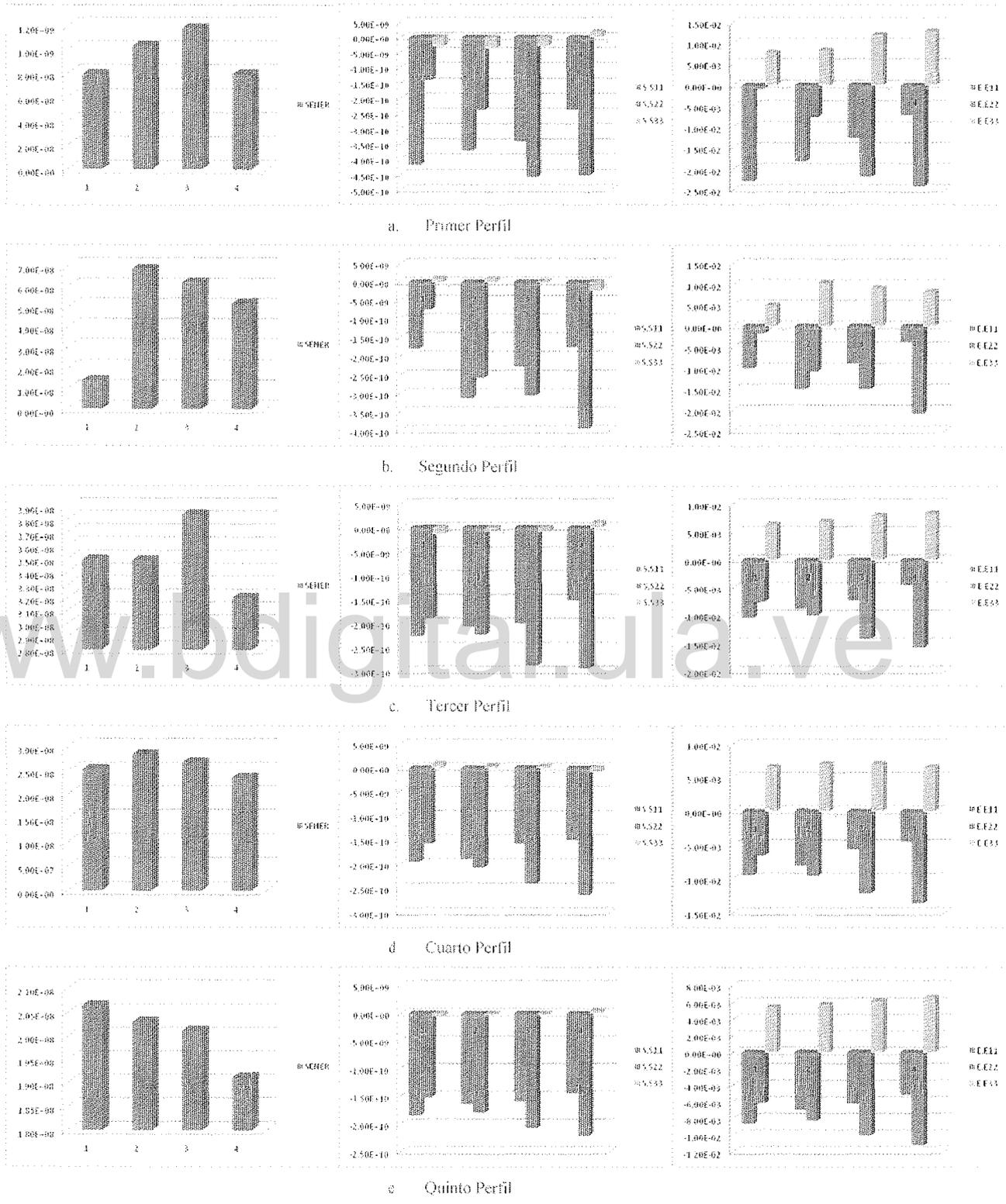
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1033	-9,47E-03	-6,54E-03	6,65E-03	-1,95E+10	-1,58E+10	8,68E+08	2,54E+08
1034	-8,11E-03	-9,57E-03	7,07E-03	-1,88E+10	-2,07E+10	4,00E+08	2,86E+08
244	-5,67E-03	-1,22E-02	7,09E-03	-1,58E+10	-2,41E+10	3,11E+08	2,68E+08
245	-4,57E-03	-1,35E-02	6,61E-03	-1,50E+10	-2,64E+10	-8,79E+08	2,37E+08

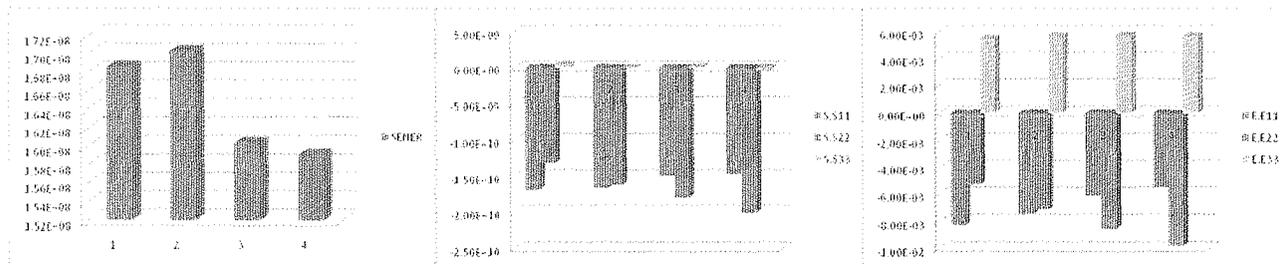
## e. Quinto Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1063	-8,65E-03	-6,14E-03	5,49E-03	-1,84E+10	-1,53E+10	-5,34E+08	2,07E+08
1051	-6,99E-03	-8,21E-03	5,79E-03	-1,64E+10	-1,80E+10	-2,56E+08	2,03E+08
271	-6,23E-03	-1,00E-02	6,23E-03	-1,60E+10	-2,08E+10	-1,95E+08	2,01E+08
272	-5,19E-03	-1,12E-02	6,66E-03	-1,44E+10	-2,21E+10	5,52E+08	1,91E+08

## f. Sexto Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1043	-8,26E-03	-5,30E-03	5,53E-03	-1,69E+10	-1,32E+10	5,38E+08	1,69E+08
1037	-7,52E-03	-7,16E-03	5,74E-03	-1,67E+10	-1,63E+10	5,91E+07	1,70E+08
298	-6,16E-03	-8,55E-03	5,80E-03	-1,50E+10	-1,80E+10	1,66E+08	1,60E+08
299	-5,53E-03	-9,79E-03	5,74E-03	-1,47E+10	-2,01E+10	-4,39E+08	1,59E+08



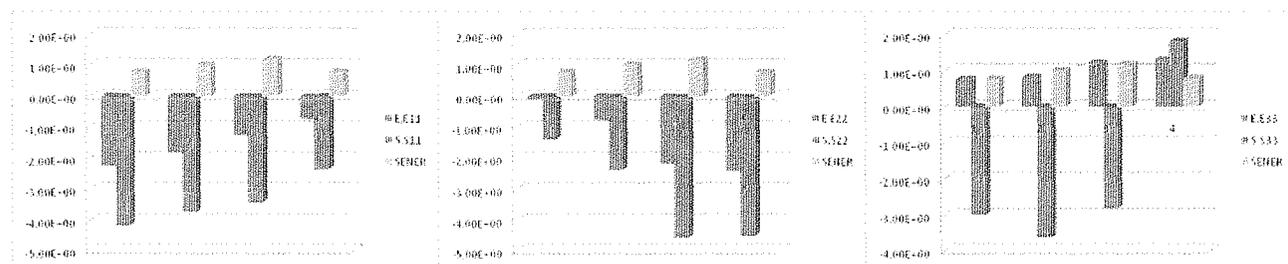


c. Sexto Perfil

Figura 4.32. Distribución de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática.

Respecto a estos perfiles no se observa una tendencia marcada como en los perfiles anteriores, no obstante la energía de deformación interna se incrementa hacia el centro del perfil, lo cual corresponde a la región donde se experimenta la mayor interacción con la placa vecina. Para los esfuerzos y deformaciones se identifica que los mismos disminuyen en el eje X y un incremento en dichos parámetros en el eje Y, siempre en la dirección Oeste-Este. Este resultado determina que las variaciones en los esfuerzos y deformaciones en zonas paralelas a los límites de placas son grandes, lo que se evidencia por la alta complejidad estructural presente en estas regiones del planeta.

Respecto a las correlaciones entre las tres variables mostrada en la figura 4.33, se observa el mismo patrón descrito en el caso anterior, donde la energía de deformación se maximiza hacia las zonas de mayor interacción con la placa adyacente y los esfuerzos y deformaciones se incrementan y disminuyen en las direcciones Y y X, en sentido Oeste-Este.



a. Primer perfil



Figura 4.33. Correlación de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z en los perfiles paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática.

#### 4.4.1.1.3. Perfiles en Profundidad

Para culminar el análisis de esta zona, se presentan los perfiles realizados paralelos a la dirección Z, para identificar como variaban dichos parámetros en función de la profundidad.

Respecto a los perfiles en dirección perpendicular a la subducción, se puede decir que los mismos indican una tendencia a la disminución de la energía de deformación interna desde la superficie hacia la profundidad, de forma no lineal, como consecuencia que en profundidad los materiales de la Tierra se empiezan a comportar como sólidos capaces de fluir; mientras que los valores de esfuerzos y deformaciones unitarias permanecen con pequeñas variaciones, siempre en el mismo orden de magnitud (Tabla 4.4 y figura 4.34) lo que indica que las variaciones de los esfuerzos y deformaciones, en las direcciones X, Y, son mínimas cuando se profundiza en la subducción. Por su parte si se consideran las líneas paralelas a la zona de subducción se identifica que existe una tendencia a la misma disminución indicada para la energía de deformación interna, salvo en el tercer elemento; mientras que los esfuerzos y deformaciones, al igual que el caso anterior muestran el mismo orden de magnitud (Tabla 4.5 y figura 4.35).

Tabla 4.4. Valores calculados de la energía de deformación interna, esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33, respectivamente) para los perfiles en profundidad (perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática). Los elementos se muestran incrementando en su profundidad.

## a. Primer Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1062	-2,29E-02	-8,60E-04	7,79E-03	-4,18E+10	-1,39E+10	-3,00E+09	7,93E+08
1022	-2,26E-02	-9,35E-04	8,33E-03	-4,10E+10	-1,35E+10	-1,74E+09	7,48E+08
982	-2,26E-02	-6,82E-04	8,54E-03	-4,06E+10	-1,28E+10	-1,10E+09	7,37E+08
942	-2,20E-02	-1,25E-03	8,95E-03	-3,94E+10	-1,31E+10	-2,11E+08	7,19E+08

## b. Segundo Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1058	-1,58E-02	-4,90E-03	8,46E-03	-2,99E+10	-1,61E+10	8,20E+08	4,72E+08
1018	-1,60E-02	-4,30E-03	7,27E-03	-3,08E+10	-1,59E+10	-1,31E+09	4,48E+08
978	-1,59E-02	-3,91E-03	7,41E-03	-3,02E+10	-1,50E+10	-6,25E+08	4,28E+08
938	-1,52E-02	-4,54E-03	7,81E-03	-2,88E+10	-1,53E+10	3,07E+08	4,23E+08

## c. Tercer Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1061	-1,05E-02	-7,58E-03	6,35E-03	-2,27E+10	-1,90E+10	-1,37E+09	3,49E+08
1021	-1,08E-02	-7,31E-03	7,32E-03	-2,24E+10	-1,80E+10	5,45E+08	3,29E+08
981	-1,06E-02	-6,87E-03	6,51E-03	-2,23E+10	-1,76E+10	-6,22E+08	3,09E+08
941	-1,02E-02	-7,02E-03	6,52E-03	-2,15E+10	-1,75E+10	-3,63E+08	3,12E+08

## d. Cuarto Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1033	-9,47E-03	-6,54E-03	6,65E-03	-1,95E+10	-1,58E+10	8,68E+08	2,54E+08
993	-9,75E-03	-5,73E-03	5,83E-03	-2,01E+10	-1,50E+10	-4,03E+08	2,34E+08
953	-9,75E-03	-5,61E-03	6,15E-03	-1,98E+10	-1,45E+10	3,57E+08	2,29E+08
913	-9,43E-03	-5,60E-03	5,89E-03	-1,93E+10	-1,45E+10	9,72E+07	2,29E+08

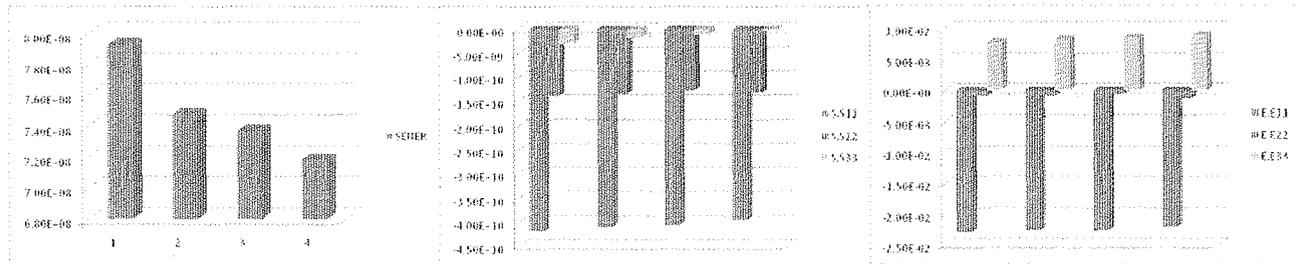
## e. Quinto Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1063	-8,65E-03	-6,14E-03	5,49E-03	-1,84E+10	-1,53E+10	-5,34E+08	2,07E+08
1023	-8,79E-03	-5,86E-03	5,71E-03	-1,83E+10	-1,46E+10	1,64E+07	1,98E+08
983	-8,86E-03	-5,52E-03	5,47E-03	-1,84E+10	-1,42E+10	-2,58E+08	1,93E+08
943	-8,79E-03	-5,35E-03	5,37E-03	-1,82E+10	-1,38E+10	-2,75E+08	1,94E+08

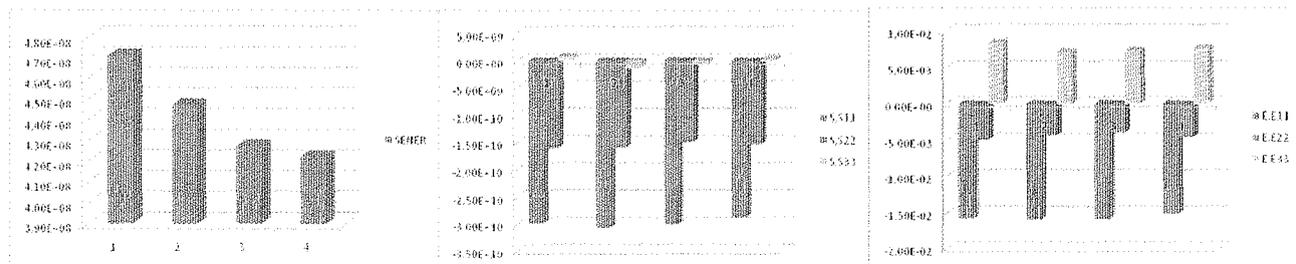
## f. Sexto Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1043	-8,26E-03	-5,30E-03	5,53E-03	-1,69E+10	-1,32E+10	5,38E+08	1,69E+08
1003	-8,45E-03	-4,94E-03	5,27E-03	-1,72E+10	-1,28E+10	1,25E+08	1,63E+08
963	-8,48E-03	-4,64E-03	5,12E-03	-1,72E+10	-1,23E+10	3,20E+07	1,58E+08
923	-8,58E-03	-4,39E-03	5,19E-03	-1,71E+10	-1,18E+10	3,08E+08	1,60E+08

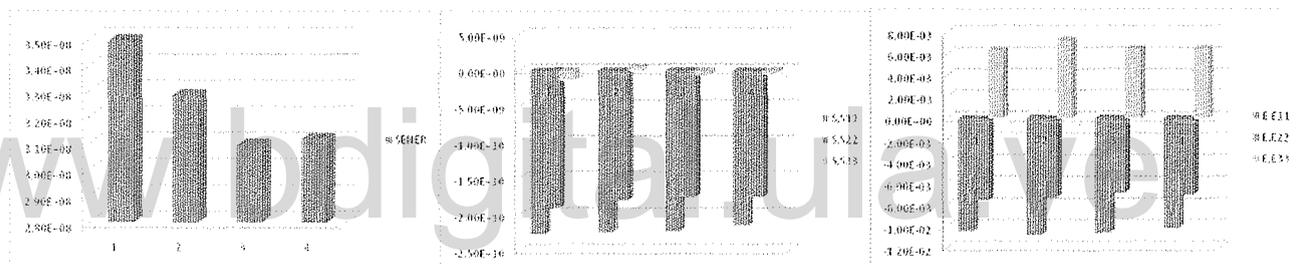
a. Primer Perfil



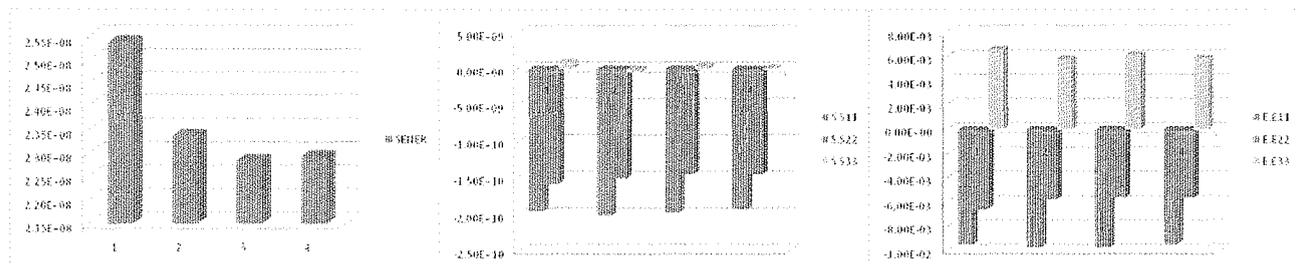
b. Segundo Perfil



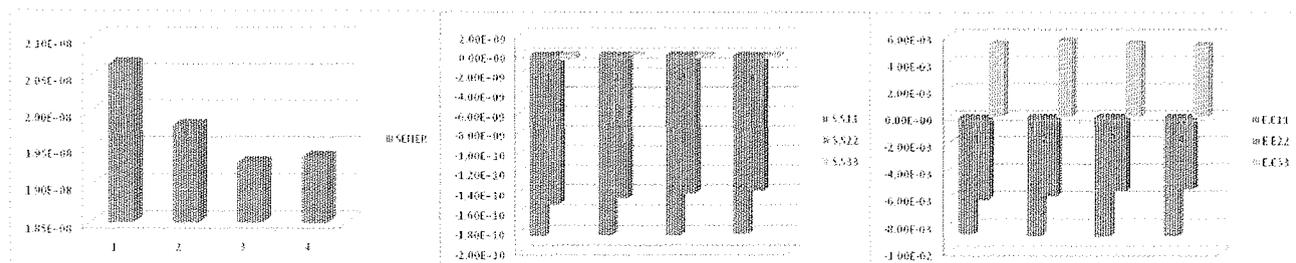
c. Tercer Perfil



d. Cuarto Perfil



e. Quinto Perfil



f. Sexto Perfil

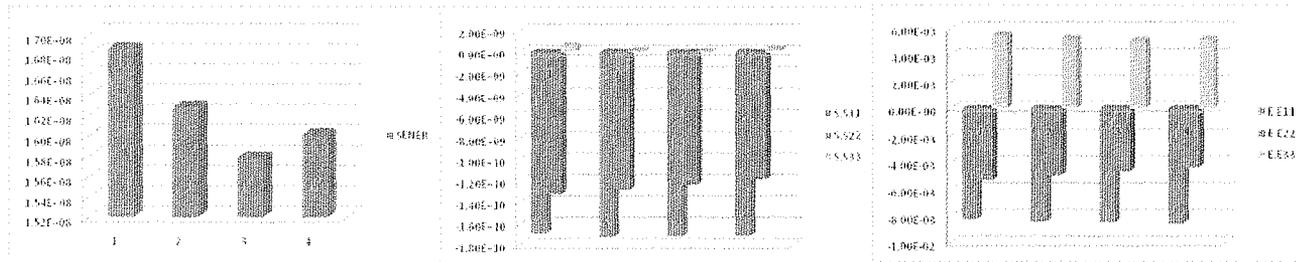


Figura 4.34. Distribución de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática).

Tabla 4.5. Valores calculados de la energía de deformación interna, esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33, respectivamente) para los perfiles en profundidad (paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática). Los elementos se muestran

incrementando en su profundidad

a. Primer Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1062	-2,29E-02	-8,60E-04	7,79E-03	-4,18E+10	-1,39E+10	-3,00E+09	7,93E+08
1022	-2,26E-02	-9,35E-04	8,33E-03	-4,10E+10	-1,35E+10	-1,74E+09	7,48E+08
982	-2,26E-02	-6,82E-04	8,54E-03	-4,06E+10	-1,28E+10	-1,10E+09	7,37E+08
942	-2,20E-02	-1,25E-03	8,95E-03	-3,94E+10	-1,31E+10	-2,11E+08	7,19E+08

b. Segundo Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
1035	-1,83E-02	-7,59E-03	8,30E-03	-3,73E+10	-2,38E+10	-3,64E+09	1,03E+09
995	-1,75E-02	-8,25E-03	9,92E-03	-3,49E+10	-2,32E+10	-1,89E+08	9,26E+08
955	-1,85E-02	-7,96E-03	1,07E-02	-3,60E+10	-2,28E+10	8,45E+08	9,86E+08
915	-1,71E-02	-7,85E-03	9,69E-03	-3,39E+10	-2,22E+10	-1,02E+06	8,85E+08

c. Tercer Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
829	-1,27E-02	-2,18E-02	1,21E-02	-3,42E+10	-4,57E+10	-2,80E+09	1,18E+09
717	-1,13E-02	-1,94E-02	1,01E-02	-3,08E+10	-4,11E+10	-3,71E+09	8,74E+08
605	-1,23E-02	-2,03E-02	1,05E-02	-3,33E+10	-4,35E+10	-4,53E+09	1,03E+09
493	-1,12E-02	-1,94E-02	1,08E-02	-3,00E+10	-4,05E+10	-2,22E+09	8,86E+08

d. Cuarto Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
830	-7,16E-03	-2,41E-02	1,30E-02	-2,37E+10	-4,51E+10	1,83E+09	7,95E+08
718	-7,42E-03	-1,78E-02	9,26E-03	-2,22E+10	-3,54E+10	-1,12E+09	4,60E+08
606	-7,42E-03	-2,04E-02	9,34E-03	-2,43E+10	-4,07E+10	-3,07E+09	5,97E+08
494	-6,77E-03	-1,87E-02	9,32E-03	-2,16E+10	-3,67E+10	-1,22E+09	4,89E+08

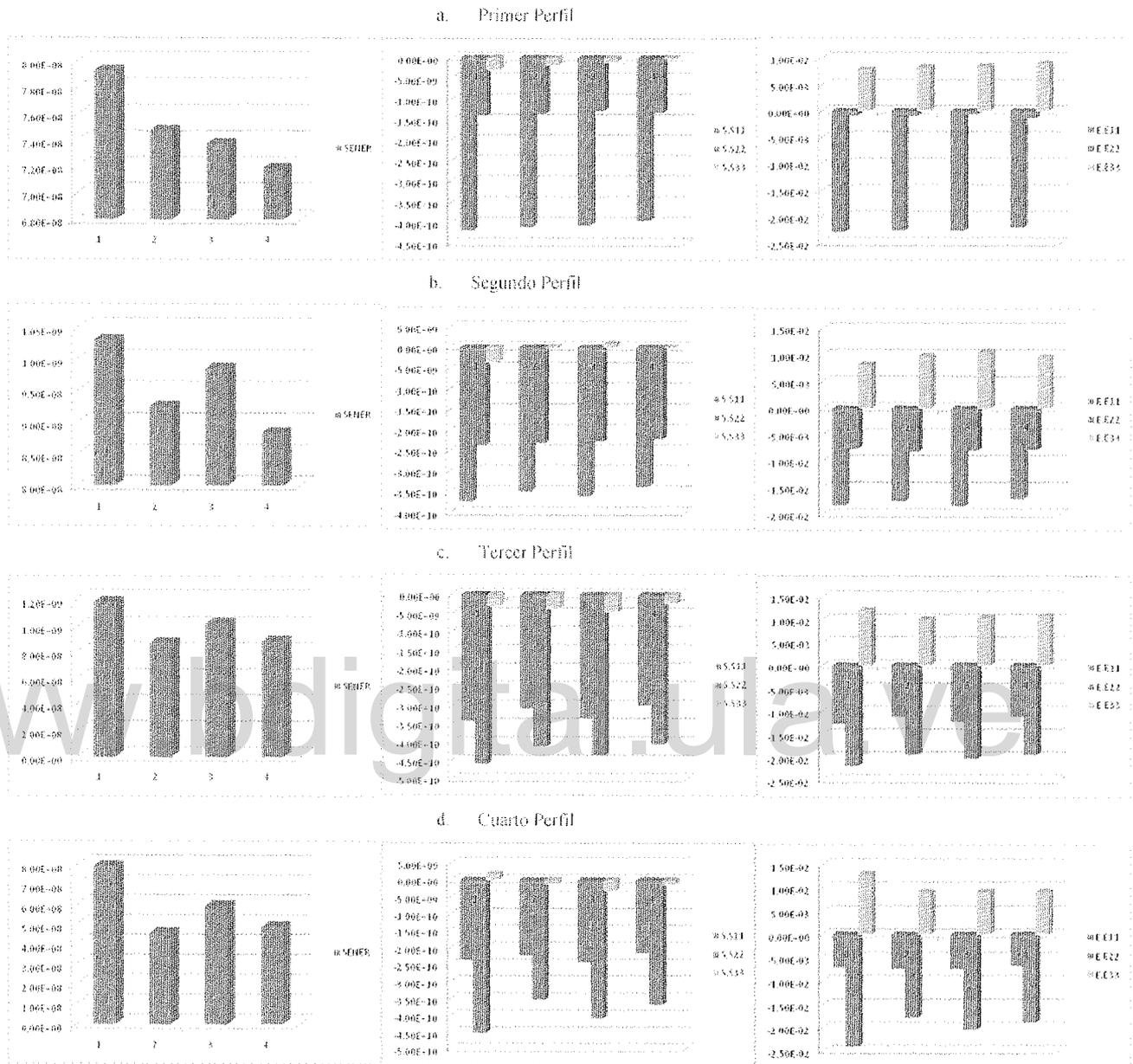
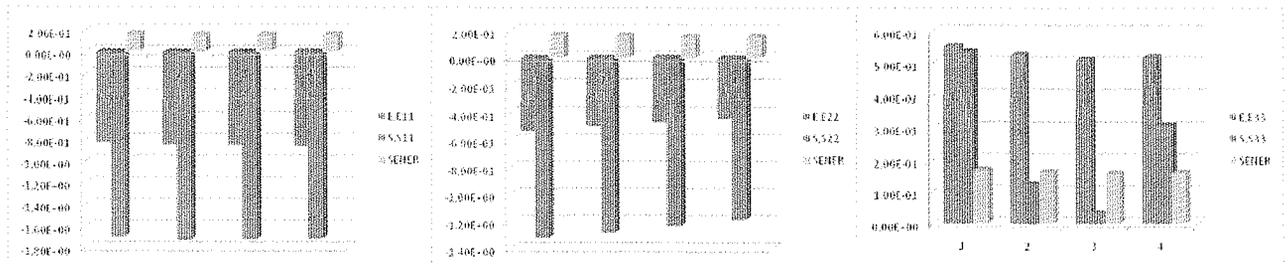


Figura 4.35. Distribución de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática).

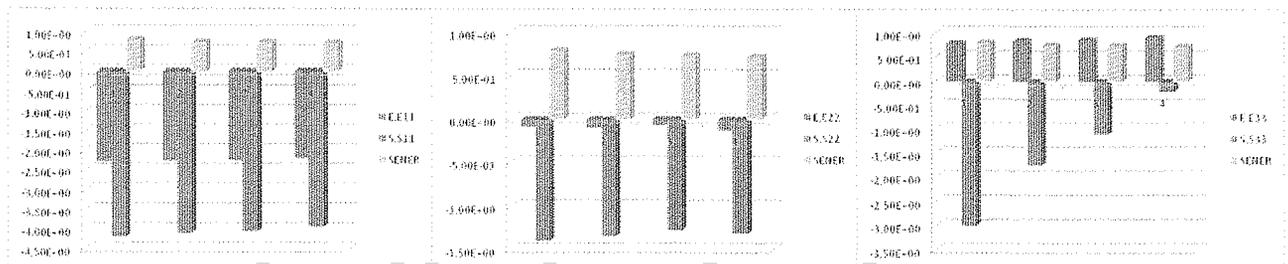
Respecto a las correlaciones entre variables en esta zona (figuras 4.36 y 4.37) se puede observar una clara estabilidad de las mismas en las direcciones X e Y, sólo en algunos perfiles paralelos a la zona de subducción existen pequeñas fluctuaciones. Por su parte en la dirección Z, no se aprecia ninguna tendencia entre las variables.



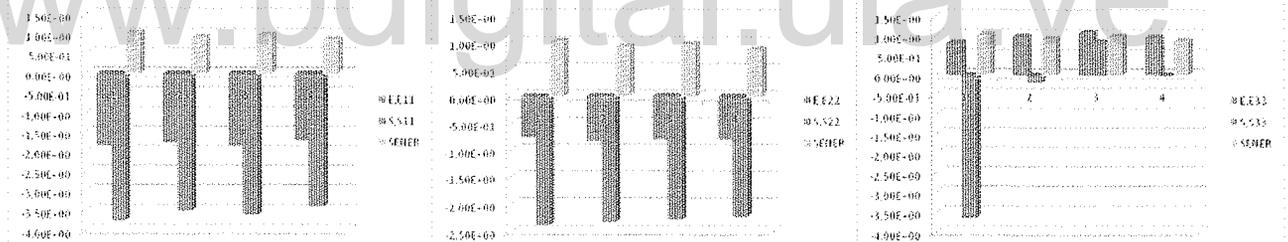


f. Sexto Perfil

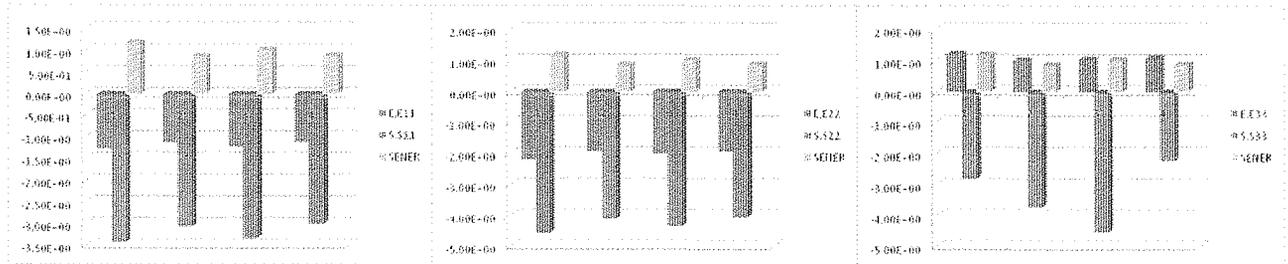
Figura 4.36. Correlación de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z en los perfiles en profundidad (perpendiculares a la zona de subducción con la placa Euroasiática).



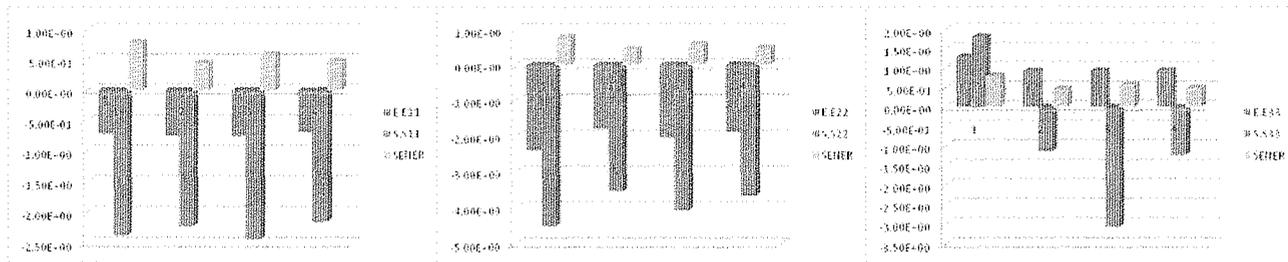
a. Primer Perfil



b. Segundo Perfil



c. Tercer Perfil



d. Cuarto Perfil

Figura 4.37. Correlación de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z en los perfiles en profundidad (paralelos a la zona de subducción con la placa Euroasiática).

#### 4.4.1.2. Zona II: Zona de Subducción Central de la placa Australiana respecto a la Euroasiática.

##### 4.4.1.2.1. Perfiles Perpendiculares.

En esta zona la energía de deformación unitaria muestra el comportamiento identificado en la región anterior, zona I; es decir, ella disminuye en forma no lineal conforme se aleja de la zona de subducción, donde los máximos valores de esta variable se encuentran en el límite de la placa y disminuyen según se adentren en el bloque de litosfera, se observa una anomalía en este comportamiento hacia el Este de esta zona, sin embargo la distribución del último perfil muestra nuevamente el comportamiento señalado, esto podría deberse al movimiento de la placa Australiana respecto a la Euroasiática.

Respecto a la distribución de esfuerzos es notoria la diferencia en las magnitudes calculadas en las direcciones X, Y y Z, donde ésta última es dos órdenes de magnitud menor que las calculadas para las otras dos direcciones. La dirección Y muestra una inclinación a la disminución no lineal, guardando estrecha relación con la distribución de la energía de deformación interna, por lo cual se propone que en esta zona, el esfuerzo en esa dirección define en gran medida la energía de deformación interna, como consecuencia que el principal movimiento de esta placa es en la dirección Y.

Las deformaciones presentan el mismo comportamiento que los esfuerzos, salvo que en este caso comparando las magnitudes en función de las direcciones éstas son del mismo orden de magnitud en las direcciones X, Z y un orden de magnitud mayor en

la dirección Y. Haciendo comparaciones con el valor referencial  $3 \times 10^{-3}$ , que se asume como el valor límite para las deformaciones elásticas, se observa que muchas de ellas superan este valor, o presentan magnitudes muy similares, por lo cual podrían presentarse deformaciones plásticas, y modelos con este análisis se justifican.

Respecto a la correlación realizada entre las tres variables en función de sus direcciones se puede decir que en la dirección X se mantienen constantes, por su parte la dirección Y parece indicar una tendencia a la disminución no lineal de los esfuerzos y las deformaciones, manteniéndose constante la energía de deformación interna, aunque analizando los valores numéricos (anexo A) se identifica la misma tendencia que los esfuerzos en dicha dirección.

#### 4.4.1.2.2. Perfiles Paralelos.

Los perfiles paralelos a la zona de subducción varían conforme se aleja del límite de la placa, en este sentido es posible decir que la energía de deformación interna disminuye progresivamente hacia el centro de cada uno de los perfiles, la disminución en sentido Oeste-Este es muy marcada en los límites de la placa, no obstante si se aleja de dicha zona, adentrándose dentro de la placa, la tendencia cambia y se produce un incremento no lineal hacia el Este. Los esfuerzos y deformaciones muestran un comportamiento similar, donde las magnitudes de dichas variables en sentido X e Y alternan en importancia en sentido Oeste-Este. En la mayoría de los perfiles los esfuerzos y deformaciones en la dirección Y tienen una magnitud más alta hacia el Oeste, estos disminuyen hacia el centro y posteriormente se incrementan nuevamente para alcanzar valores similares a la de las respectivas variables en dirección X, por su parte las variables en esta última dirección mencionada muestran una tendencia al incremento hacia el Este, alcanzando los máximos valores en los elementos cercanos al extremo oriental de dicha zona. Respecto a las variables en la dirección Z, estas se conservan constantes, sin embargo resalta que la magnitud en los esfuerzos son menores que en las otras direcciones consideradas.

Las variables cuando se correlacionan en función de la dirección muestran un comportamiento idéntico, donde las tendencias se repiten entre los esfuerzos y las deformaciones.

#### **4.4.1.2.3. Perfiles en Profundidad.**

En estas secciones se puede identificar el mismo comportamiento que en la zona anterior, donde se evidencia una tendencia a la disminución de la energía de deformación interna desde la superficie hacia la profundidad, de forma no lineal, como consecuencia del cambio en el comportamiento de los materiales; por su parte los valores de esfuerzos y deformaciones unitarias tienen los mismos órdenes de magnitud en las direcciones X e Y lo que indica que las variaciones de los esfuerzos y deformaciones son mínimas cuando se profundiza en la subducción. Respecto a los esfuerzos en la dirección Z, estos son un orden de magnitud menor a las otras direcciones, pero las deformaciones son del mismo orden de magnitud.

#### **4.4.1.3. Zona III: Zona Oriental extrema de Interacción entre la placa Australiana y Euroasiática.**

En esta zona sólo se analizan los perfiles en dirección perpendicular puesto que es una región donde se presenta la interacción con la placa Pacífico, lo cual escapa a los objetivos de esta investigación, se sugiere realizar estudios adicionales para complementar los resultados obtenidos en esta investigación.

##### **4.4.1.3.1. Perfiles Perpendiculares.**

En esta región la energía de deformación interna muestra una tendencia a la disminución no lineal conforme se adentra en la placa, esta es la misma tendencia que se identifica en los esfuerzos y deformaciones en la dirección X. Por su parte los esfuerzos y deformaciones en la dirección Y son los de mayor magnitud en el modelo para este sector y muestran una tendencia general a la disminución, sin embargo presentan un incremento hacia la parte central de cada perfil. Ahora analizando la dirección Z es notable que los valores de esfuerzos son mínimos respecto a las

magnitudes calculadas para las otras direcciones, correspondiendo a dos o tres órdenes de magnitud la diferencia entre estos valores, mientras que las deformaciones son moderadas en esta dirección observándose claramente la tendencia a la disminución conforme se aleja del límite de la placa, todas éstas variables superan el límite de referencia por lo cual podrían tratarse de deformaciones plásticas (Anexo B). Estos comportamientos están enmarcados dentro de lo propuesto por la tectónica de placas, donde los mayores esfuerzos y deformaciones se presentan en los límites de placas, disipándose conforme se adentra en el interior de la placa. Adicionalmente, las magnitudes más elevadas están asociadas a las direcciones de movimiento preponderante de las placas.

Comparando las tres variables estudiadas, según las direcciones seleccionadas, es claro que las mismas siguen el mismo comportamiento, el cual es la disminución general conforme se aleja del límite de la placa, salvo por los esfuerzos en la dirección Z, los cuales presentan una fluctuación entre tensión y compresión.

#### 4.4.2. Placa Euroasiática.

Al igual que en el caso anterior, se dividió el área de interacción de la placa Euroasiática con las placas Australiana y Filipina, en tres zonas mostradas en la figura 4.38, la primera de ellas corresponde al límite con la placa Australiana, o donde se presentan principalmente sus efectos, la tercera donde se evidencian las consecuencias de la interacción con la placa Filipina, y la segunda donde se presentan características de ambos empujes. Dada la complejidad los resultados de esta última zona se deciden analizar únicamente la zona I y III. La presentación y discusión de estos resultados se realiza en función de las zonas y la dirección de los perfiles.

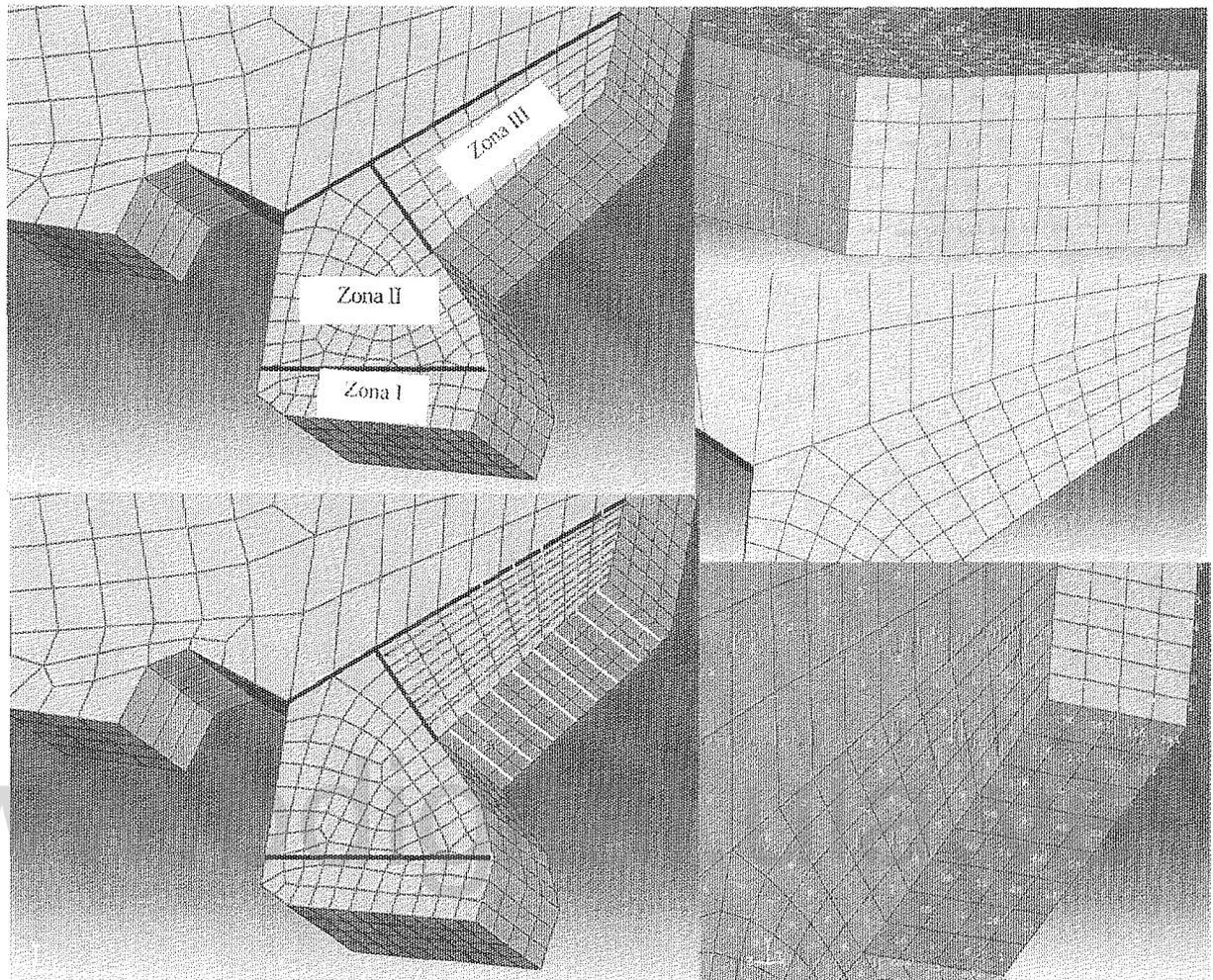


Figura 4.38. División de la placa Euroasiática en zonas según la distribución de las variables en estudio; dirección de los perfiles considerados, de color naranja se denotan los perfiles perpendiculares, rojo los paralelos y amarillo los perfiles en profundidad, por último se muestran los elementos que constituyen las zonas consideradas.

#### 4.4.2.1. Zona I: Zona de Subducción con Australiana

##### 4.4.2.1.1. Perfiles Paralelos.

En la tabla 4.6 y figura 4.39 se muestran los valores calculados para la energía de deformación interna, esfuerzos y deformaciones del área considerada; respecto a estos resultados es notoria la tendencia a incrementarse progresivamente la energía de deformación, el esfuerzo y la deformación unitaria en la dirección Y, conforme se desplaza hacia el Oeste, esto es indicativo que en la zona existe tanto la influencia de la subducción de la placa Australiana como de la placa Filipina, lo cual le confiere

una alta complejidad a la región. En este sentido, se observa que los máximos valores alcanzados se encuentran entre el sexto y octavo elemento de Este a Oeste, lo cual permite establecer que el empuje que provoca la placa Filipina es primordial en esta zona, adicionalmente se ratifica que la continuidad del medio geológico, representada en este caso por la placa Hindú, influye en gran medida en los resultados, puesto que evita que la placa Euroasiática rote en sentido horario producto del empuje de las placas Australiana y Filipina.

Por su parte, los esfuerzos y deformaciones en la dirección X (tabla 4.6 y figura 4.39), experimentan una disminución en la dirección Oeste-Este, mientras que dichas variables en la dirección Z exhiben el mismo comportamiento en general. En la dirección Y se muestra la misma tendencia de la energía de deformación interna, el cual muestra un incremento conforme se desplaza en la dirección Oeste-Este, en este sentido el empuje de la placa Australiana también es importante y constituye una región donde se superponen los efectos de los empujes de las placas Filipinas y Australiana.

#### 4.4.2.1.2. Perfiles Perpendiculares.

En los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Australiana (tabla 4.7 y figura 4.40) la complejidad provocada por la interacción de las tres placas es notable, puesto que en ellos se observa que no existe una tendencia marcada en ninguna de las variables. Se identifica una tendencia a la disminución de la energía de deformación interna conforme se aleja de la zona de subducción, coincidiendo con el comportamiento observado en el apartado 4.4.1, salvo por algunos incrementos puntuales en nodos intermedios que son consecuencia del empuje producido por la placa Filipina y la simulación de la placa Hindú.

Respecto a los esfuerzos y deformaciones se aprecia que en la mayor parte de los casos dichas variables son mayores en la dirección Y que en las otras dos, X, Z, no obstante se observa que los valores en la dirección X, adquieren mayor importancia conforme se acerca al límite con la placa Filipina, producto que allí es donde se experimentan los mayores empujes provenientes de dicho bloque de litosfera.

Tabla 4.6. Valores calculados de la energía de deformación interna, esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33, respectivamente) para los perfiles paralelos a la zona de subducción con la placa Australiana. Los elementos que se muestran van en dirección Este - Oeste.

## a. Primer perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
685	-1,82E-02	-1,58E-02	-2,15E-03	-5,22E+10	-4,92E+10	-3,19E+10	9,30E+08
675	-1,76E-02	-2,23E-02	5,62E-03	-5,00E+10	-5,59E+10	-2,05E+10	1,06E+09
686	-1,55E-02	-2,22E-02	-2,10E-04	-5,01E+10	-5,86E+10	-3,08E+10	1,09E+09
700	-1,64E-02	-2,42E-02	4,60E-03	-4,97E+10	-5,95E+10	-2,31E+10	1,12E+09
699	-1,43E-02	-2,47E-02	1,81E-04	-4,93E+10	-6,25E+10	-3,10E+10	1,17E+09
698	-1,44E-02	-2,64E-02	2,97E-03	-4,87E+10	-6,39E+10	-2,67E+10	1,21E+09
714	-1,28E-02	-2,78E-02	2,10E-03	-4,72E+10	-6,61E+10	-2,83E+10	1,24E+09
708	-1,32E-02	-3,06E-02	3,76E-03	-4,89E+10	-7,10E+10	-2,75E+10	1,42E+09
765	-8,22E-03	-3,50E-02	2,71E-03	-4,31E+10	-7,70E+10	-2,92E+10	1,53E+09
706	-7,70E-03	-2,14E-02	5,02E-04	-3,28E+10	-5,01E+10	-2,24E+10	7,14E+08
683	-5,92E-03	-1,57E-02	-1,31E-03	-2,59E+10	-3,83E+10	-2,01E+10	4,45E+08

## b. Segundo Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
719	-1,40E-02	-2,14E-02	8,61E-03	-3,92E+10	-4,86E+10	-1,06E+10	7,88E+08
687	-1,72E-02	-2,71E-02	2,84E-02	-3,46E+10	-4,70E+10	2,32E+10	1,28E+09
692	-1,38E-02	-2,87E-02	1,93E-02	-3,62E+10	-5,50E+10	5,80E+09	1,10E+09
688	-1,56E-02	-3,01E-02	2,63E-02	-3,54E+10	-5,37E+10	1,77E+10	1,32E+09
726	-1,32E-02	-3,20E-02	2,25E-02	-3,49E+10	-5,87E+10	1,01E+10	1,29E+09
691	-1,38E-02	-3,31E-02	2,66E-02	-3,37E+10	-5,82E+10	1,73E+10	1,43E+09
716	-1,12E-02	-3,46E-02	2,21E-02	-3,33E+10	-6,28E+10	8,84E+09	1,38E+09
738	-8,19E-03	-3,93E-02	2,66E-02	-2,71E+10	-6,65E+10	1,69E+10	1,65E+09
707	-4,11E-03	-3,73E-02	1,97E-02	-2,26E+10	-6,46E+10	7,50E+09	1,34E+09
709	-6,59E-03	-3,84E-02	2,68E-02	-2,30E+10	-6,33E+10	1,93E+10	1,64E+09
683	-5,92E-03	-1,57E-02	-1,31E-03	-2,59E+10	-3,83E+10	-2,01E+10	4,45E+08

## c. Tercer Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
710	-1,49E-02	-1,91E-02	2,06E-03	-4,46E+10	-4,99E+10	-2,31E+10	8,16E+08
766	-1,76E-02	-2,07E-02	1,37E-02	-4,20E+10	-4,59E+10	-2,36E+09	8,30E+08
734	-1,31E-02	-2,45E-02	7,82E-03	-4,06E+10	-5,49E+10	-1,41E+10	8,85E+08
747	-1,57E-02	-2,53E-02	1,42E-02	-4,16E+10	-5,36E+10	-3,65E+09	9,82E+08
746	-1,14E-02	-2,69E-02	6,38E-03	-4,01E+10	-5,97E+10	-1,76E+10	9,76E+08
689	-1,27E-02	-2,91E-02	1,34E-02	-3,89E+10	-5,97E+10	-5,90E+09	1,08E+09
732	-8,88E-03	-3,15E-02	9,71E-03	-3,59E+10	-6,46E+10	-1,24E+10	1,12E+09
733	-8,40E-03	-3,27E-02	1,32E-02	-3,31E+10	-6,38E+10	-5,75E+09	1,16E+09

673	-5,48E-03	-3,43E-02	1,05E-02	-3,06E+10	-6,70E+10	-1,04E+10	1,21E+09
737	-9,93E-03	-2,69E-02	1,39E-02	-3,10E+10	-5,25E+10	-8,11E+08	9,12E+08
671	-6,78E-03	-2,70E-02	1,06E-02	-2,72E+10	-5,27E+10	-5,12E+09	7,94E+08

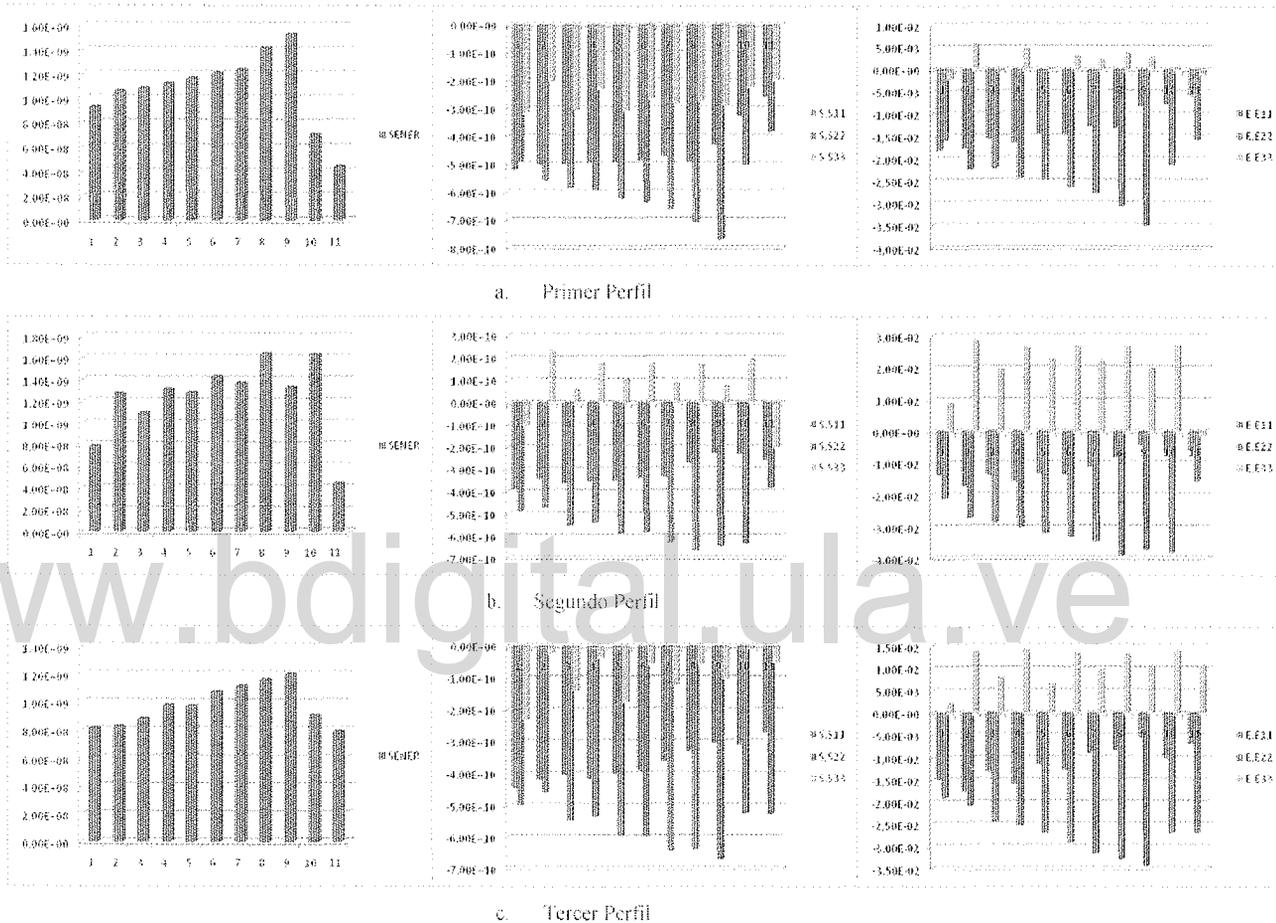


Figura 4.39. Distribución de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles paralelos a la zona de subducción con la placa Australiana.

Tabla 4.7. Valores calculados de la energía de deformación interna, esfuerzos y deformaciones en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33, respectivamente) para los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Australiana. Los elementos que se muestran van desde la zona de Subducción hacia el interior de la placa.

a. Primer Perfil							
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
685	-1,82E-02	-1,58E-02	-2,15E-03	-5,22E+10	-4,92E+10	-3,19E+10	9,30E+08
719	-1,40E-02	-2,14E-02	8,61E-03	-3,92E+10	-4,86E+10	-1,06E+10	7,88E+08
710	-1,49E-02	-1,91E-02	2,06E-03	-4,46E+10	-4,99E+10	-2,31E+10	8,16E+08
b. Segundo Perfil							
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
675	-1,76E-02	-2,23E-02	5,62E-03	-5,00E+10	-5,59E+10	-2,05E+10	1,06E+09
687	-1,72E-02	-2,71E-02	2,84E-02	-3,46E+10	-4,70E+10	2,32E+10	1,28E+09
766	-1,76E-02	-2,07E-02	1,37E-02	-4,20E+10	-4,59E+10	-2,36E+09	8,30E+08
c. Tercer Perfil							
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
686	-1,55E-02	-2,22E-02	-2,10E-04	-5,01E+10	-5,86E+10	-3,08E+10	1,09E+09
692	-1,38E-02	-2,87E-02	1,93E-02	-3,62E+10	-5,50E+10	5,80E+09	1,10E+09
734	-1,31E-02	-2,45E-02	7,82E-03	-4,06E+10	-5,49E+10	-1,41E+10	8,85E+08
d. Cuarto Perfil							
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
700	-1,64E-02	-2,42E-02	4,60E-03	-4,97E+10	-5,95E+10	-2,31E+10	1,12E+09
688	-1,56E-02	-3,01E-02	2,63E-02	-3,54E+10	-5,37E+10	1,77E+10	1,32E+09
747	-1,57E-02	-2,53E-02	1,42E-02	-4,16E+10	-5,36E+10	-3,65E+09	9,82E+08
e. Quinto Perfil							
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
699	-1,43E-02	-2,47E-02	1,81E-04	-4,93E+10	-6,25E+10	-3,10E+10	1,17E+09
726	-1,32E-02	-3,20E-02	2,25E-02	-3,49E+10	-5,87E+10	1,01E+10	1,29E+09
746	-1,14E-02	-2,69E-02	6,38E-03	-4,01E+10	-5,97E+10	-1,76E+10	9,76E+08
f. Sexto Perfil							
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
698	-1,44E-02	-2,64E-02	2,97E-03	-4,87E+10	-6,39E+10	-2,67E+10	1,21E+09
691	-1,38E-02	-3,31E-02	2,66E-02	-3,37E+10	-5,82E+10	1,73E+10	1,43E+09
689	-1,27E-02	-2,91E-02	1,34E-02	-3,89E+10	-5,97E+10	-5,90E+09	1,08E+09
g. Séptimo Perfil							
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
714	-1,28E-02	-2,78E-02	2,10E-03	-4,72E+10	-6,61E+10	-2,83E+10	1,24E+09
716	-1,12E-02	-3,46E-02	2,21E-02	-3,33E+10	-6,28E+10	8,84E+09	1,38E+09
732	-8,88E-03	-3,15E-02	9,71E-03	-3,59E+10	-6,46E+10	-1,24E+10	1,12E+09

h. Octavo Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
708	-1,32E-02	-3,06E-02	3,76E-03	-4,89E+10	-7,10E+10	-2,75E+10	1,42E+09
738	-8,19E-03	-3,93E-02	2,66E-02	-2,71E+10	-6,65E+10	1,69E+10	1,65E+09
733	-8,40E-03	-3,27E-02	1,32E-02	-3,31E+10	-6,38E+10	-5,75E+09	1,16E+09

i. Noveno Perfil

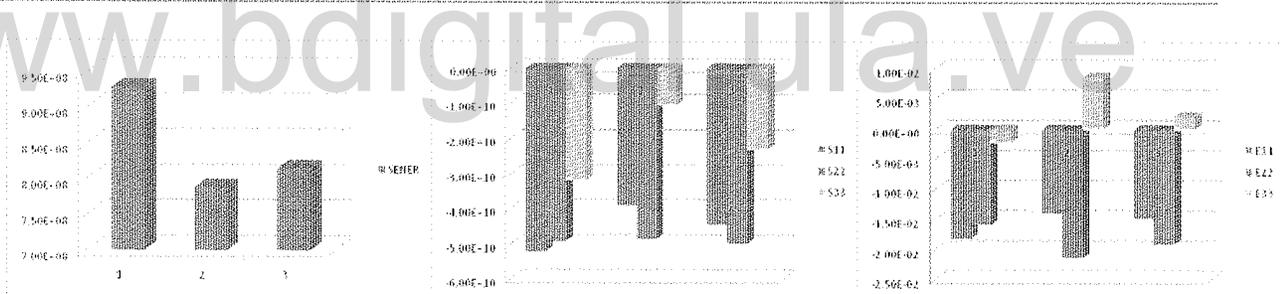
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
765	-8,22E-03	-3,50E-02	2,71E-03	-4,31E+10	-7,70E+10	-2,92E+10	1,53E+09
707	-4,11E-03	-3,73E-02	1,97E-02	-2,26E+10	-6,46E+10	7,50E+09	1,34E+09
673	-5,48E-03	-3,43E-02	1,05E-02	-3,06E+10	-6,70E+10	-1,04E+10	1,21E+09

j. Décimo Perfil

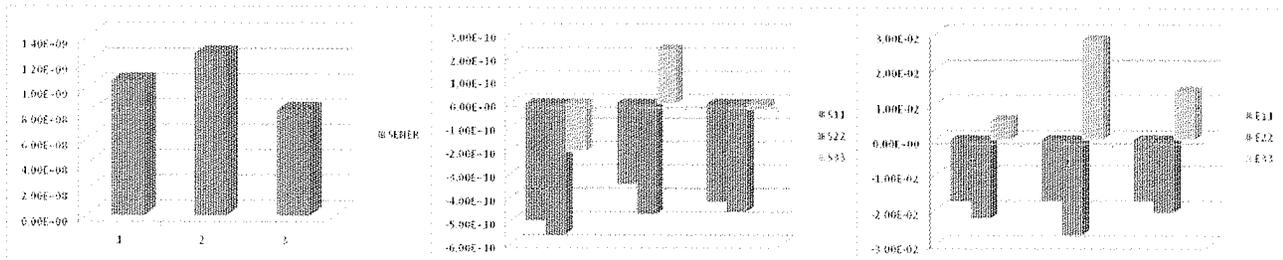
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
706	-7,70E-03	-2,14E-02	5,02E-04	-3,28E+10	-5,01E+10	-2,24E+10	7,14E+08
709	-6,59E-03	-3,84E-02	2,68E-02	-2,30E+10	-6,33E+10	1,93E+10	1,64E+09
737	-9,93E-03	-2,69E-02	1,39E-02	-3,10E+10	-5,25E+10	-8,11E+08	9,12E+08

k. Decimo Primer

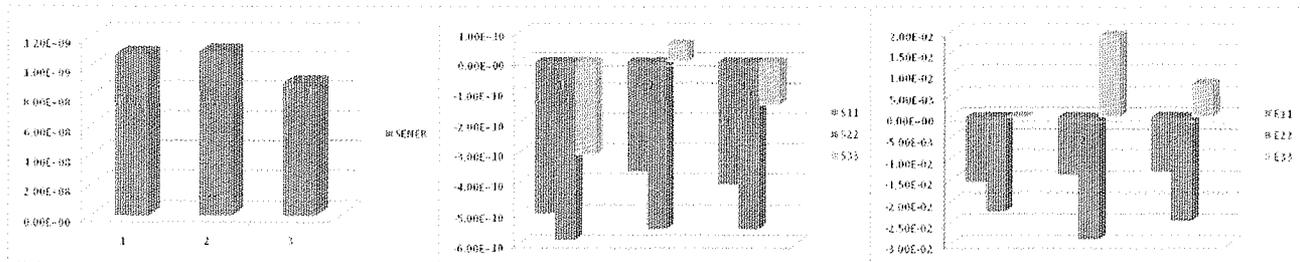
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
683	-5,92E-03	-1,57E-02	-1,31E-03	-2,59E+10	-3,83E+10	-2,01E+10	4,45E+08
671	-6,78E-03	-2,70E-02	1,06E-02	-2,72E+10	-5,27E+10	-5,12E+09	7,94E+08



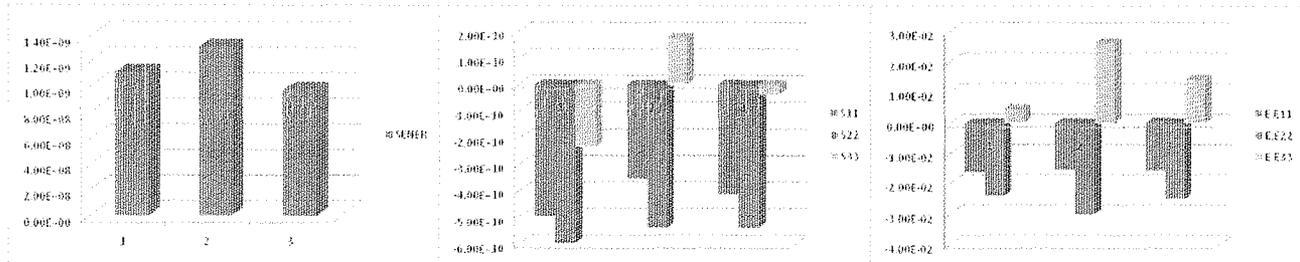
a) Primer Perfil



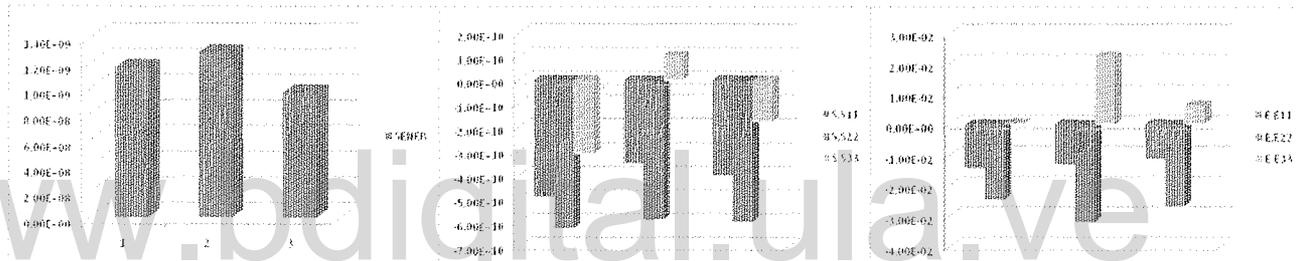
b) Segundo Perfil



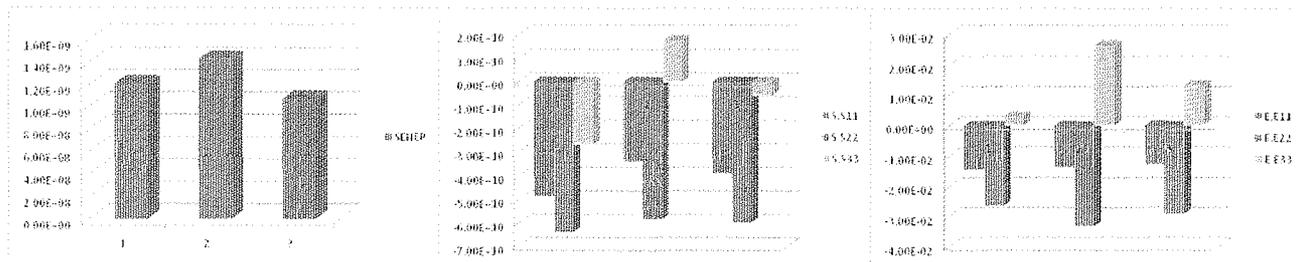
e) Tercer Perfil



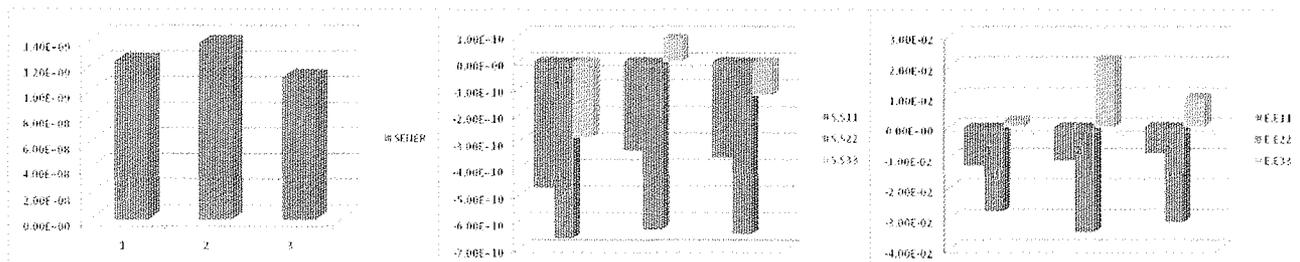
d) Cuarto Perfil



e) Quinto Perfil



f) Sexto Perfil



g) Séptimo Perfil

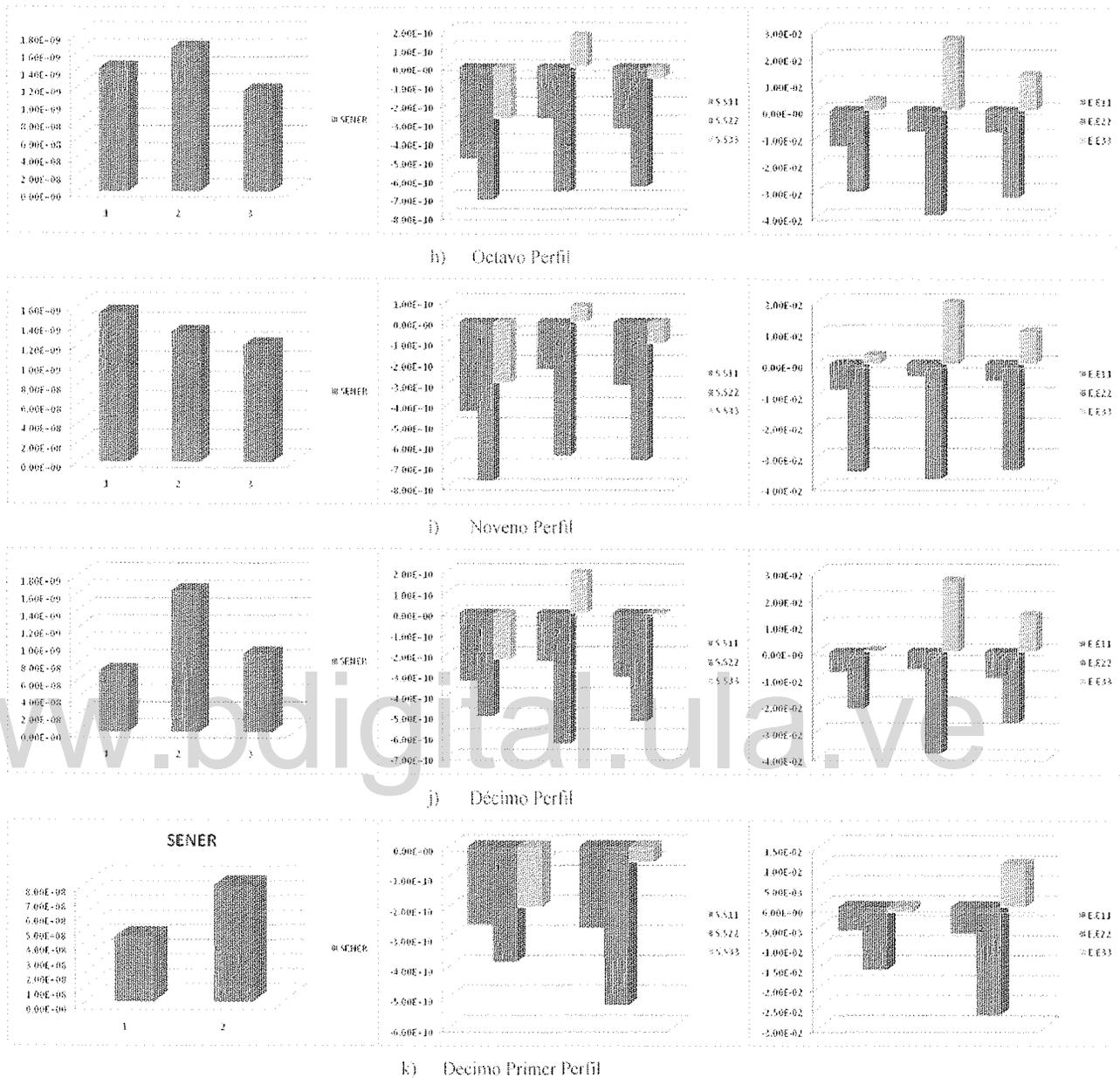


Figura 4.40. Distribución de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles perpendiculares a la zona de subducción con la placa Australiana.

#### 4.4.2.1.3. Perfiles en Profundidad

Al igual que en el caso de la placa Australiana no existen tendencias, al respecto se puede decir que si se consideran los perfiles en profundidad en dirección paralela al limite de la placa (Tabla 4.8 y Figura 4.41), el esfuerzo y las deformaciones en las

direcciones X, Y se mantienen constantes, siendo observable un incremento de las magnitudes en el eje X conforme se acerca al límite con la placa Filipina, y hacia el extremo occidental del perfil mostrado se aprecia un decremento en la magnitud de todos los esfuerzos. Por su parte, estas variables en la dirección Z exhiben una marcada tendencia a la disminución de sus magnitudes en forma no lineal, en el caso de las deformaciones estas pasan a ser alargamientos.

Tabla 4.8. Valores calculados de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (paralelos a la zona de subducción con la placa Australiana).

a. Primer perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
685	-1,82E-02	-1,58E-02	-2,15E-03	-5,22E+10	-4,92E+10	-3,19E+10	9,30E+08
784	-1,93E-02	-1,86E-02	7,03E-03	-4,92E+10	-4,83E+10	-1,59E+10	8,75E+08
883	-1,75E-02	-1,83E-02	8,55E-03	-4,42E+10	-4,52E+10	-1,12E+10	7,55E+08
982	-1,98E-02	-1,92E-02	1,02E-02	-4,82E+10	-4,75E+10	-1,03E+10	8,86E+08

b. Segundo Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
675	-1,76E-02	-2,23E-02	5,62E-03	-5,00E+10	-5,59E+10	-2,05E+10	1,06E+09
774	-1,82E-02	-2,74E-02	1,02E-02	-5,15E+10	-6,31E+10	-1,55E+10	1,27E+09
683	-5,92E-03	-1,57E-02	-1,31E-03	-2,59E+10	-3,83E+10	-2,01E+10	4,45E+08
972	-1,69E-02	-2,87E-02	1,18E-02	-4,86E+10	-6,35E+10	-1,23E+10	1,25E+09

c. Tercer Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
686	-1,55E-02	-2,22E-02	-2,10E-04	-5,01E+10	-5,86E+10	-3,08E+10	1,09E+09
785	-1,85E-02	-2,72E-02	1,37E-02	-4,93E+10	-6,03E+10	-8,55E+09	1,23E+09
884	-1,86E-02	-2,52E-02	1,16E-02	-4,94E+10	-5,78E+10	-1,12E+10	1,13E+09
983	-1,78E-02	-2,82E-02	1,30E-02	-4,91E+10	-6,23E+10	-1,01E+10	1,26E+09

d. Cuarto Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
700	-1,64E-02	-2,42E-02	4,60E-03	-4,97E+10	-5,95E+10	-2,31E+10	1,12E+09
799	-1,68E-02	-2,92E-02	1,08E-02	-4,96E+10	-6,52E+10	-1,46E+10	1,29E+09
898	-1,79E-02	-2,74E-02	1,37E-02	-4,82E+10	-6,01E+10	-8,12E+09	1,20E+09
997	-1,79E-02	-3,04E-02	1,40E-02	-5,02E+10	-6,60E+10	-9,83E+09	1,39E+09

## e Quinto Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
699	-1,43E-02	-2,47E-02	1,81E-04	-4,93E+10	-6,25E+10	-3,10E+10	1,17E+09
798	-1,68E-02	-3,00E-02	1,38E-02	-4,80E+10	-6,46E+10	-9,25E+09	1,32E+09
897	-1,69E-02	-2,79E-02	1,24E-02	-4,75E+10	-6,13E+10	-1,04E+10	1,19E+09
996	-1,77E-02	-3,08E-02	1,51E-02	-4,93E+10	-6,59E+10	-7,77E+09	1,40E+09

## f Sexto Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
698	-1,44E-02	-2,64E-02	2,97E-03	-4,87E+10	-6,39E+10	-2,67E+10	1,21E+09
797	-1,49E-02	-3,16E-02	1,18E-02	-4,69E+10	-6,81E+10	-1,31E+10	1,36E+09
896	-1,63E-02	-2,94E-02	1,37E-02	-4,64E+10	-6,30E+10	-8,43E+09	1,25E+09
995	-1,64E-02	-3,24E-02	1,47E-02	-4,82E+10	-6,85E+10	-8,79E+09	1,45E+09

## g Séptimo Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
714	-1,28E-02	-2,78E-02	2,10E-03	-4,72E+10	-6,61E+10	-2,83E+10	1,24E+09
813	-1,43E-02	-3,28E-02	1,32E-02	-4,54E+10	-6,89E+10	-1,06E+10	1,39E+09
912	-1,46E-02	-3,05E-02	1,27E-02	-4,46E+10	-6,46E+10	-1,00E+10	1,25E+09
1011	-1,49E-02	-3,34E-02	1,46E-02	-4,60E+10	-6,93E+10	-8,56E+09	1,44E+09

## h Octavo Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
708	-1,32E-02	-3,06E-02	3,76E-03	-4,89E+10	-7,10E+10	-2,75E+10	1,42E+09
807	-1,43E-02	-3,53E-02	1,24E-02	-4,81E+10	-7,46E+10	-1,44E+10	1,60E+09
906	-1,44E-02	-3,30E-02	1,25E-02	-4,63E+10	-6,98E+10	-1,22E+10	1,43E+09
1005	-1,43E-02	-3,60E-02	1,39E-02	-4,74E+10	-7,49E+10	-1,18E+10	1,63E+09

## i Noveno Perfil

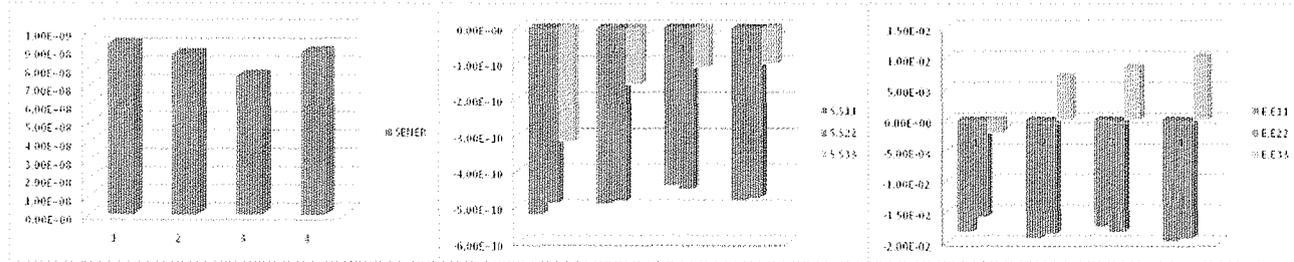
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
765	-8,22E-03	-3,50E-02	2,71E-03	-4,31E+10	-7,70E+10	-2,92E+10	1,53E+09
864	-9,17E-03	-3,91E-02	1,15E-02	-4,12E+10	-7,91E+10	-1,51E+10	1,66E+09
963	-8,14E-03	-3,72E-02	1,11E-02	-3,79E+10	-7,46E+10	-1,35E+10	1,47E+09
1062	-8,77E-03	-4,01E-02	1,36E-02	-3,96E+10	-7,93E+10	-1,13E+10	1,69E+09

## j Décimo Perfil

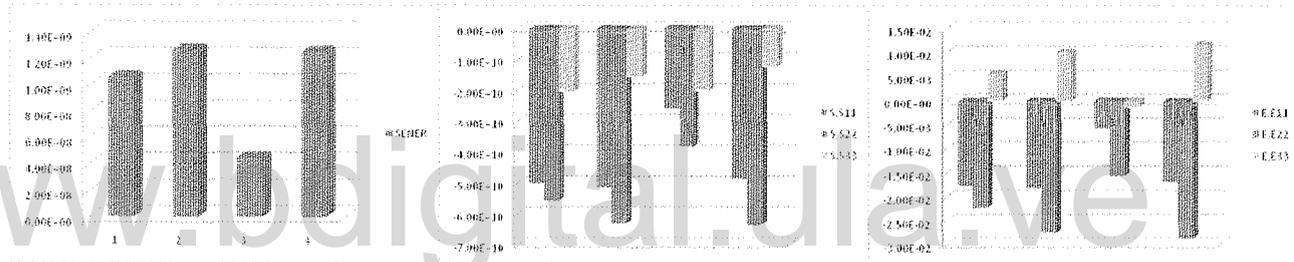
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
706	-7,70E-03	-2,14E-02	5,02E-04	-3,28E+10	-5,01E+10	-2,24E+10	7,14E+08
805	-8,21E-03	-2,38E-02	8,71E-03	-2,91E+10	-4,89E+10	-7,73E+09	6,69E+08
904	-7,77E-03	-2,40E-02	1,17E-02	-2,60E+10	-4,65E+10	-1,34E+09	6,51E+08
1003	-8,68E-03	-2,51E-02	1,31E-02	-2,76E+10	-4,84E+10	-4,40E+07	7,28E+08

k. Decimo Primer Perfil

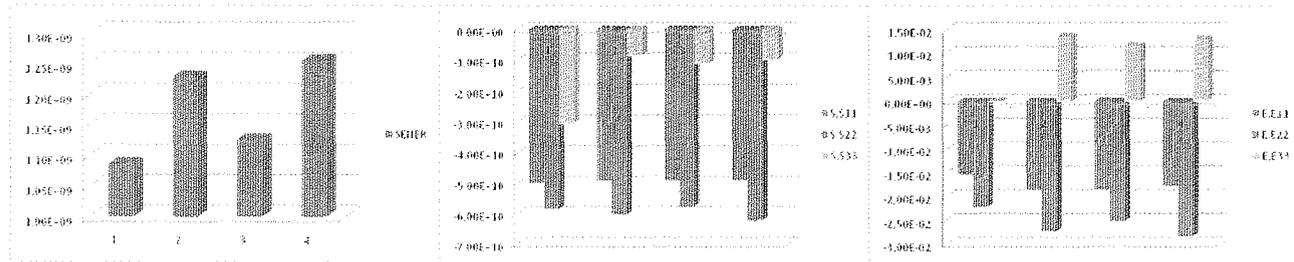
Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
683	-5,92E-03	-1,57E-02	-1,31E-03	-2,59E+10	-3,83E+10	-2,01E+10	4,45E+08
782	-6,36E-03	-1,72E-02	9,99E-03	-1,90E+10	-3,26E+10	1,74E+09	3,83E+08
881	-7,16E-03	-1,74E-02	1,19E-02	-1,93E+10	-3,23E+10	4,79E+09	4,04E+08
980	-7,59E-03	-1,79E-02	1,35E-02	-1,92E+10	-3,22E+10	7,40E+09	4,39E+08



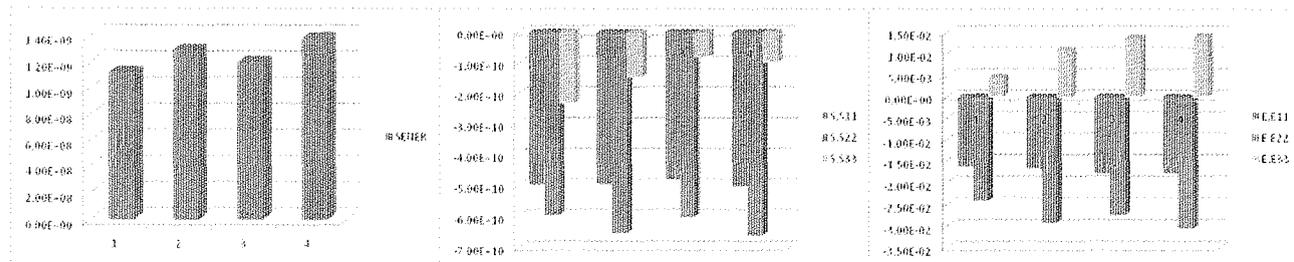
a. Primer Perfil



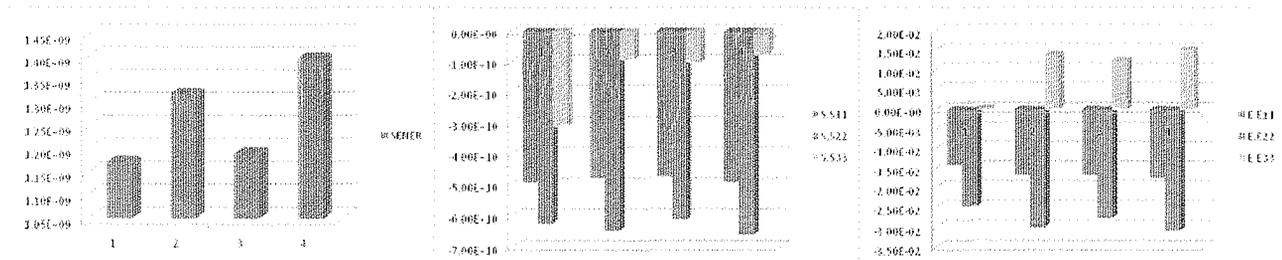
b. Segundo Perfil



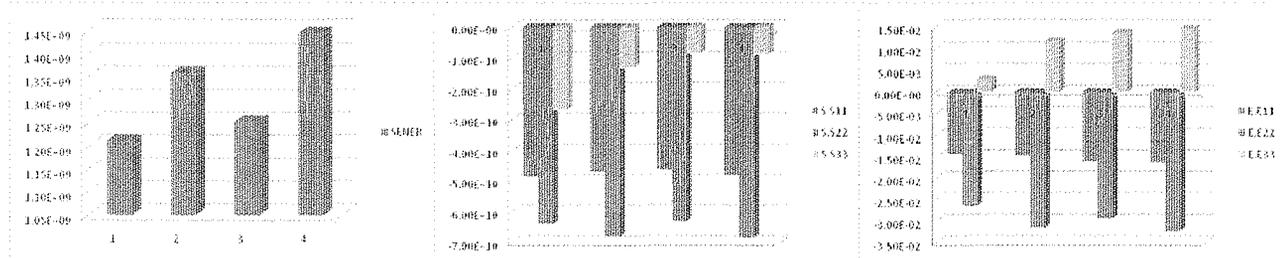
c. Tercer Perfil



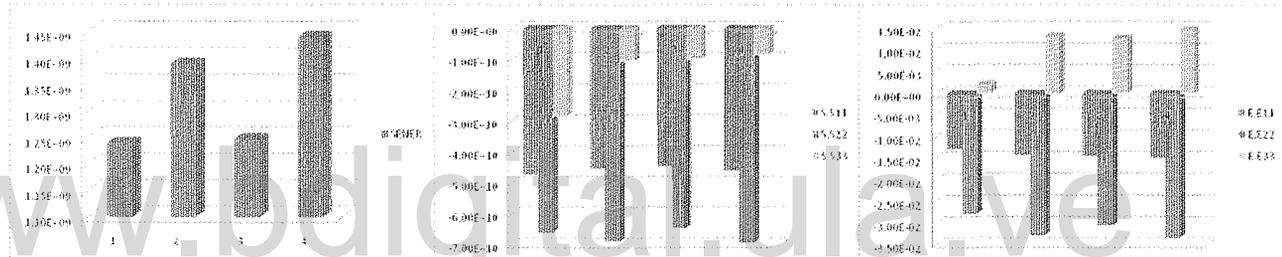
d. Cuarto Perfil



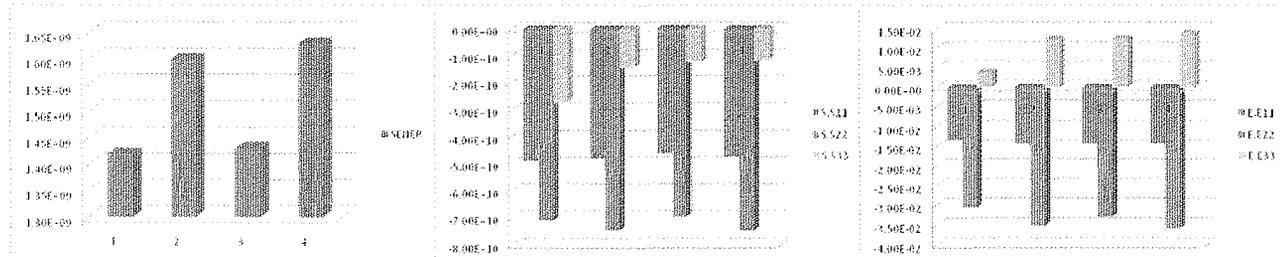
e. Quinto Perfil



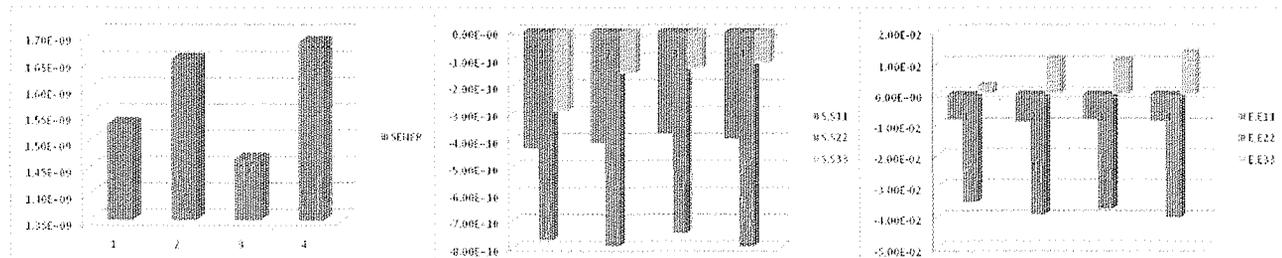
f. Sexto Perfil



g. Séptimo Perfil



h. Octavo Perfil



i. Noveno Perfil

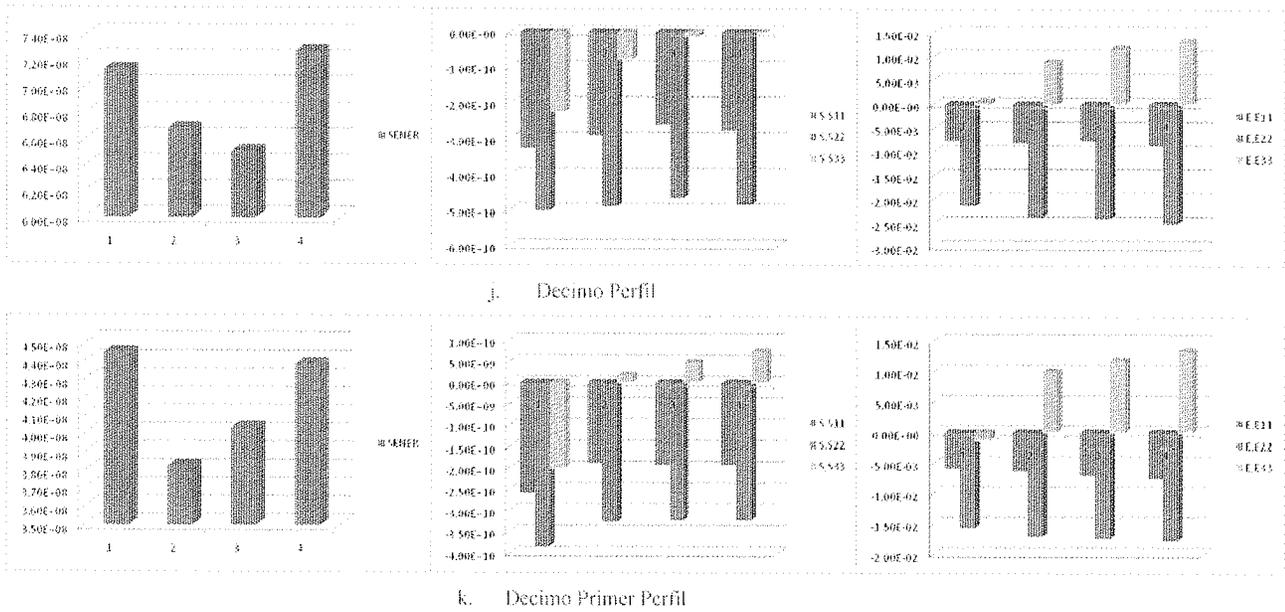


Figura 4.41. Distribución de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (paralelos a la zona de subducción con la placa Australiana).

Por su parte, si se consideran los perfiles en profundidad pero en dirección perpendicular a la subducción (Tabla 4.9 y Fig. 4.42) se observa que todas las variables estudiadas se presentan estables, conservando el mismo orden de magnitud, sólo los esfuerzos y las deformaciones en el eje Z presentan una variación no lineal.

Tabla 4.9. Valores calculados de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (perpendicular a la zona de subducción con la placa Australiana)

a. Primer perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
685	-1,82E-02	-1,58E-02	-2,15E-03	-5,22E+10	-4,92E+10	-3,19E+10	9,30E+08
784	-1,93E-02	-1,86E-02	7,03E-03	-4,92E+10	-4,83E+10	-1,59E+10	8,75E+08
883	-1,75E-02	-1,83E-02	8,55E-03	-4,42E+10	-4,52E+10	-1,12E+10	7,55E+08
982	-1,98E-02	-1,92E-02	1,02E-02	-4,82E+10	-4,75E+10	-1,03E+10	8,86E+08

b. Segundo Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
719	-1,40E-02	-2,14E-02	8,61E-03	-3,92E+10	-4,86E+10	-1,06E+10	7,88E+08
818	-1,67E-02	-2,27E-02	9,03E-03	-4,56E+10	-5,32E+10	-1,30E+10	9,46E+08
917	-1,46E-02	-2,10E-02	8,82E-03	-4,00E+10	-4,81E+10	-1,04E+10	7,55E+08
1016	-1,66E-02	-2,20E-02	1,05E-02	-4,37E+10	-5,05E+10	-9,32E+09	8,75E+08

c. Tercer Perfil

Elemento	E,E11	E,E22	E,E33	S,S11	S,S22	S,S33	SENER
710	-1,49E-02	-1,91E-02	2,06E-03	-4,46E+10	-4,99E+10	-2,31E+10	8,16E+08
809	-1,70E-02	-2,41E-02	1,22E-02	-4,48E+10	-5,38E+10	-7,84E+09	1,01E+09
908	-1,52E-02	-2,20E-02	8,82E-03	-4,21E+10	-5,07E+10	-1,17E+10	8,47E+08
1007	-1,77E-02	-2,28E-02	1,10E-02	-4,62E+10	-5,27E+10	-9,95E+09	9,81E+08

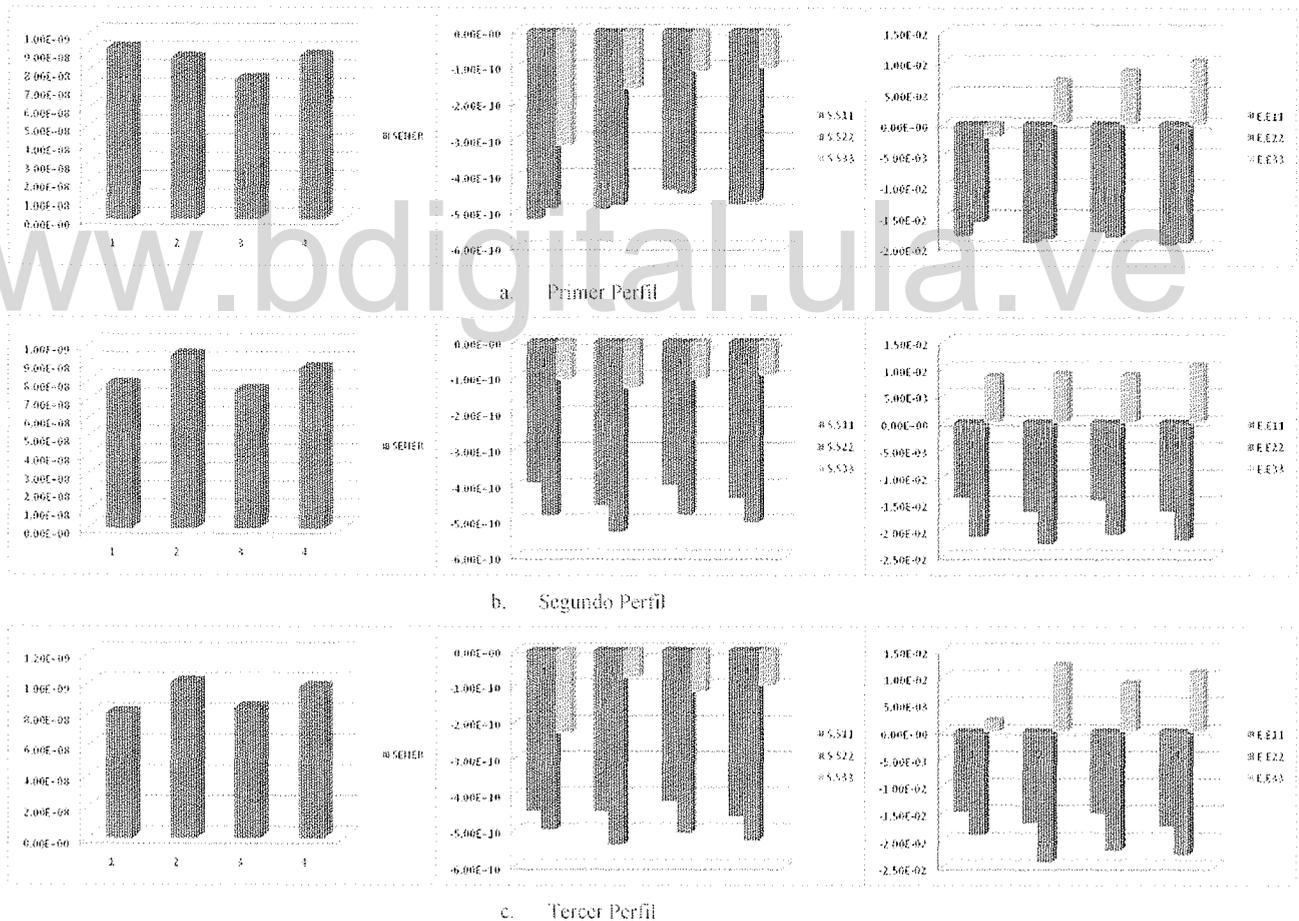


Figura 4.42. Distribución de la energía de deformación unitaria, esfuerzos y deformaciones unitarias en las direcciones X, Y, Z (S11, S22, S33, E11, E22 y E33 respectivamente) en los perfiles en profundidad (perpendicular a la zona de subducción con la placa Australiana)

#### **4.4.2.2. Zona III: Zona de Interacción con la Placa Filipina.**

##### **4.4.2.2.1. Perfiles Perpendiculares.**

La energía de deformación interna de esta región (Anexo C) se mantiene constante, sin embargo hacia el extremo norte de la región, es posible identificar una tendencia a la disminución no lineal de esta variable conforme se aleja del límite de la placa, este resultado es cónsono con lo obtenido en los perfiles anteriores e indica que cuando se estudia una región donde los resultados son producto de la interacción de dos placas tectónicas únicamente, la energía de deformación interna alcanza sus valores máximos en el límite de la placa y ésta disminuye de forma no lineal hacia el interior de la misma, coincidiendo totalmente con los postulados de la tectónica de placas.

Los esfuerzos y deformaciones muestran un patrón similar, los mismos varían según la dirección considerada, en este sentido se puede decir que los esfuerzos en la dirección X marcan un patrón de disminución no lineal conforme se aleja de la subducción; por su parte la dirección Y muestra la misma tendencia observada para la energía de deformación interna, donde se mantienen aproximadamente constante para el extremo sur de esta región, sin embargo cuando se establece claramente la acción de la placa Filipina sobre la placa Euroasiática esta disminuye de forma no lineal. La dirección Z muestra alternancia entre esfuerzos y deformaciones positivas y negativas, disminuyendo sus magnitudes según se aleja del límite de la placa.

##### **4.4.2.2.2. Perfiles Paralelos**

Si se considera la dirección paralela a la zona de subducción entre la placa Filipina y Euroasiática es resaltante la tendencia a la disminución de la energía de deformación unitaria en sentido Suroeste-Noreste, los ligeros incrementos que se observan en los perfiles son consecuencia del claro empuje de la placa Filipina sobre la placa Euroasiática.

Los esfuerzos en las direcciones X e Y muestran el mismo patrón indicado anteriormente, siendo más evidente conforme se adentra en la placa Euroasiática. Al igual que en perfiles anteriores, resalta que los esfuerzos en la dirección Z tienen magnitudes menores que en las dos direcciones. Las deformaciones por su parte,

salvo por el perfil más cercano al límite de las placas, muestran una tendencia a la disminución en sus magnitudes, haciéndose más evidente conforme se aleja del límite de la placa tectónica en cuestión.

#### 4.4.2.2.3. Perfiles en profundidad.

Al igual que en los casos anteriores, la energía de deformación interna muestra fluctuaciones, sin embargo en este caso parecen incrementarse conforme se aumenta la profundidad. Los esfuerzos y deformaciones en los ejes X e Y se conservan constantes y en la dirección Z se aprecian que cuando se estudia en sentido paralelo al límite de la placa existe el patrón a disminuir de forma no lineal en profundidad.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)



[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**CAPÍTULO V**  
**CONCLUSIONES Y**  
**RECOMENDACIONES**

## Capítulo V

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 5.1. Conclusiones

Al finalizar la presente investigación se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- ✓ El desarrollo de los modelos es un proceso complejo que implica numerosas simulaciones. El establecimiento de materiales, cargas y condiciones de borde deben ser realizados cuidadosamente, siempre buscando la correspondencia con el medio geológico, calibrando a estados naturales conocidos.
- ✓ Cuando se trabaja con propiedades de litosfera promedio se deben agregar las fuerzas impulsoras del movimiento para generar la subducción y emular los desplazamientos que permiten calibrar los modelos, en este caso la fuerza de empuje de la dorsal y la tensión de placas, que son fuerzas consecuencia de las diferencias de densidades producto del desequilibrio térmico.
- ✓ La distribución de desplazamientos indica que el modelo es consistente con la rotación en torno a los polos de Euler, considerando en este caso la placa Euroasiática inmóvil y las restantes giran en torno a ella. Por su parte la distribución de los desplazamientos en la dirección Z, marca la formación de los archipiélagos de Java, Filipinas, Sumatra, Adaman y Nicobar, Taiwán y un incipiente Japón, entre otros. Los valores de los desplazamientos no sólo coinciden en distribución sino que también presentan valores promedios relacionados con las altitudes topográficas registradas en esas regiones.
- ✓ Conforme se considera un número mayor de placas tectónicas se incrementan las similitudes con las condiciones del medio observado, siendo necesaria la

aplicación de cargas más pequeñas para emular los mismos desplazamientos, consecuencia que se incrementa la correspondencia con el medio geológico.

- ✓ La distribución de desplazamientos en la placa Filipina coincide en buena medida con la batimetría del área, las magnitudes difieren producto de las condiciones de borde aplicadas para evitar el rebote elástico de la placa al colisionar con Euroasiática.
- ✓ Los cortes transversales realizados muestran la tendencia a la subducción de las placas Filipina y Australiana por debajo de la Euroasiática; existiendo, dentro de ésta última, una zona compresiva limitada por dos fallas inversas que marcan la frontera entre las placas tectónicas, en esta región se observa la combinación de efectos de ambas subducciones.
- ✓ Las máximas magnitudes de esfuerzos se encuentran en los límites de las placas tectónicas, correspondiendo a valores negativos, coincidiendo con el régimen tectónico observado, los resultados obtenidos permiten tener una estimación de sus magnitudes, los cuales no se han medido fehacientemente hasta los momentos. A partir de los máximos valores se genera una zona de atenuación consistente con el principio de Saint Venant.
- ✓ Las deformaciones siguen el mismo patrón de distribución de los esfuerzos, siendo éstas más significativas en las zonas donde se tienen los máximos valores de esfuerzos.
- ✓ Las deformaciones calculadas varían entre  $10^{-4}$  y  $10^{-2}$ , lo cual indica que se encuentran en el valor límite que marca las deformaciones elásticas, aquellas que superan el umbral  $10^{-3}$  serán deformaciones plásticas o permanentes. Esto es cónsono con los postulados de la tectónica de placas, donde se esperan deformaciones plásticas de gran intensidad, debido a los altos esfuerzos que se encuentran en la región producto del movimiento de las placas, estas

deformaciones llegan a ser tan importantes que en grandes profundidades, se puede alcanzar la fusión parcial de las rocas.

- ✓ La distribución de esfuerzos y deformaciones que se muestra en el límite de la placa Euroasiática con la Hindú permite inferir que el empuje, tanto de la placa Filipina como Australiana, contribuyen en la formación de los Himalayas.
- ✓ La energía de deformación interna calculada viene a representar parte de la energía acumulada en una placa tectónica producto de la subducción y permite tener una estimación de la magnitud de la energía que es capaz de acumularse sólo por el deslizamiento sin fricción entre dos bloques de litosfera promedio. Se trata de una fracción de la energía acumulada, puesto que en realidad las placas son de litosfera mixta, continental y oceánica, con fricción al momento de deslizarse, sin embargo la magnitud de la energía de deformación estimada indica la cantidad que pudiera ser liberada en determinado momento y así comprender el carácter destructivo de los sismos. Suponiendo que se libere la totalidad de la energía calculada generaría un movimiento telúrico de 6.8 grados en la escala de Richter.
- ✓ Los resultados de las correlaciones numéricas indican que en las zonas donde existe interacción entre dos placas tectónicas únicamente existe una tendencia a la disminución no lineal de las variables conforme se introducen en el interior de la placa, en dirección perpendicular al límite, esto se enmarca perfectamente dentro del principio de Saint Venant y de los postulados de la tectónica de placas.
- ✓ Si se consideran la energía de deformación interna, los esfuerzos y las deformaciones unitarias en cada una de las direcciones X, Y, Z, bajo las mismas condiciones enunciadas en la conclusión anterior, la tendencia se

aprecia en el plano horizontal, mientras que en el eje Z no se evidencia claramente la misma.

- ✓ Los perfiles paralelos a las zonas de subducción ponen en evidencia la alta complejidad estructural en las regiones adyacentes a los límites de placas tectónicas, puesto que no existen ninguna tendencia clara entre las variables correlacionadas.
- ✓ Destaca el hecho que según la dirección predominante de movimiento dentro de la placa tectónica, los esfuerzos asociados a esa dirección controlan en gran medida la energía de deformación interna.

## 5.2. Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos en esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones para futuros estudios:

- ✓ Según simulaciones realizadas preliminarmente en esta investigación se destaca que conforme se incrementan el número de placas en los modelos, los resultados obtenidos calibran más fácilmente disminuyendo significativamente las magnitudes de cargas a aplicar para emular los estados naturales, en vista de esto se propone que las simulaciones realizadas trabajen con el mayor número posible de placas, dentro de lo factible.
- ✓ En esta investigación se trabajaron modelos homogéneos, cuyas propiedades constituyeron valores promedios de la litosfera, se recomienda hacer las diferenciaciones de material, considerando una escala horizontal mayor, para que las mismas no constituyan una limitante del mallado.

- ✓ Igualmente se sugiere realizar simulaciones donde se incluya la fuerza de tracción basal que le genera las corrientes de convección a la litosfera para emular el movimiento de las placas.
- ✓ Trabajar con geometrías de períodos previos para correlacionar los movimientos observados en la simulación con los registrados en la Tierra y así calibrar mejor los modelos.
- ✓ Estudiar la energía de deformación interna provocada por los modelos con geometrías antiguas, comparándolas zonas de mayores magnitudes con los sismos más catastróficos, para establecer algún patrón.
- ✓ Incluir en las simulaciones deslizamiento con rozamiento entre las placas para incrementar la correspondencia con el medio geológico.
- ✓ Realizar simulaciones donde se considere el comportamiento plástico de los materiales e incluir aspectos térmicos que permitan verificar la fusión parcial de las rocas a grandes profundidades.



[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**REFERENCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS**

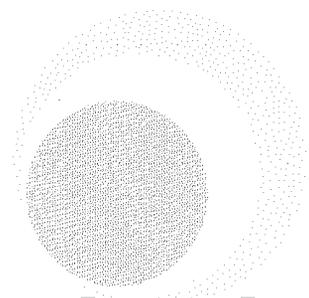
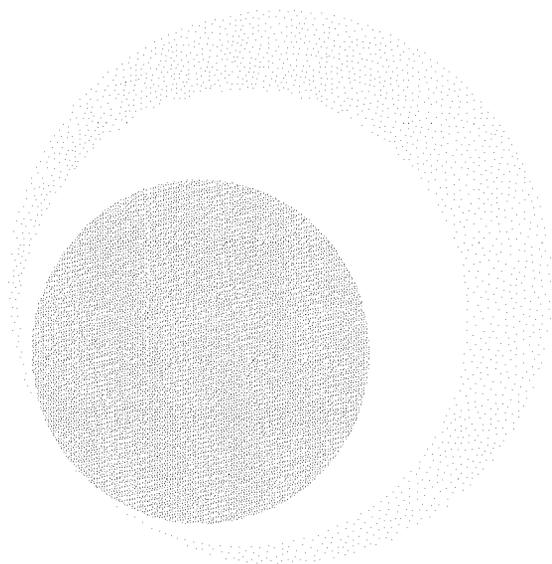
### Referencias Bibliográficas

- [1]. Cabello D., Navarrete M. y Elberg, M. 2004. Simulación Geomecánica de la Falla la Hechicera. Tesis de Pregrado. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida, Venezuela. No publicada.
- [2]. Central Intelligence Agency. 1999. Mapa Físico de Oceanía. Disponible: <http://www.zonu.com/fullsize/2009-09-18-7486/Mapa-Fisico-de-Oceania-1999.html>. Consulta: 2013, Febrero 11.
- [3]. Chandrupatta, TR, Belegundo, AD. 1999. Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería. (Alonso, J.E. trad., Ríos Sánchez, MA. colab.) 2da Ed. Pearson Educación. México.
- [4]. Dyksterhuis, S, Albert R.A. y Muller R.D. 2005. Finite element modelling of contemporary and palaeo-intraplate stress using ABAQUS™. Computers and Geosciences. 31: 297-307.
- [5]. Elberg, M., y Febres, H. 2004. Proceso automatizado de refinamiento H-adaptativo usando índices de energía de deformación. Ciencia e Ingeniería. 25: 143-148.
- [6]. Elberg, M. Paredes, M. y Sayago, G. 2010. Análisis del Riesgo Geológico en el Estado Miranda mediante el Método de Elementos Finitos. En Chacón R., León F., Duarte, V. y Verastegui O. (Editores). Modelos computacionales en ingeniería: Desarrollos novedosos y aplicaciones. Caracas.
- [7]. Elberg, M y Sosa, G. 2008. Estudio de la energía de deformación entre las placas Suramericana, Nazca y Caribe con la aplicación del método de

- elementos finitos. En Martino, L., Carrera, V., Larrazábal, G., y Cerrolaza, M. (Editores). Desarrollo y avances en métodos numéricos para Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Caracas.
- [8]. Global Seismicity and tectonics Boundaries Disponible: <http://twitpic.com/4wcl8/full> Consulta: 2012, Marzo 25
- [9]. Gutiérrez, J., Torres, J., y Elberg, M. 2010. Uso de Elementos Finitos en el análisis numérico de la formación del Himalaya por el contacto entre las Placas Tectónicas Euroasiática, Hindú y Árabe. En Chacón R., León F., Duarte, V. y Verastegui O. (Editores). Modelos computacionales en ingeniería: Desarrollos novedosos y aplicaciones. Caracas.
- [10]. Hall, R. 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations. *Journal of Asian Earth Sciences*. 20: 353-431.
- [11]. Infante E., Torres R. y Elberg, M. 2010. Simulación numérica de la respuesta sísmica de taludes bajo diferentes condiciones locales. En Chacón R., León F., Duarte, V. y Verastegui O. (Editores). Modelos computacionales en ingeniería: Desarrollos novedosos y aplicaciones. Caracas.
- [12]. Lacruz, A. y Elberg, M. 2005. Análisis de la Simulación Geomecánica de Presas de Tierra a partir del Modelo Poroelastoplástico basados en el Método de Elementos Finitos. Tesis de Pregrado. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida, Venezuela.
- [13]. Logan, DL. 1993. A First Course in the Finite Element Method. 2da Ed. FWS Publishing Company. Boston.

- [14]. Martínez Catalán, J.R. 2002. Geología Estructural y Dinámica Global. Disponible: <http://web.usal.es/~gabi/apuntes.html>. Consulta: Noviembre, 2010.
- [15]. Pande, G. N, Beer G, Williams J.R. 1990. Numerical Methods in Rock Mechanics. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. England.
- [16]. Quintero, J., Elberg, M., González, L. y Bongiorno, F. 2006. Estudio del Comportamiento del Túnel de Estanques de la Autopista Rafael Caldera y del Corrimiento de Mesa Bolivar con base a Simulación Geomecánica por el Método de Elementos Finitos en Medio Elástico. En Gamez, B., Ojeda D., Larrazábal G. y Cerrolaza M. (Editores) Simulación y Modelado en Ingeniería y Ciencias. Caracas.
- [17]. Sauter, F. 1989. Fundamentos de ingeniería sísmica. Editorial tecnológica de Costa Rica. Instituto tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- [18]. Sdrolias, M., Roest, W., Dietman, R. 2004. An expression of Philippine Sea plate rotation: the Parece Vela and Shikoku Basins. *Tectonophysics*. 394: 69-86.
- [19]. Sosa, G., Alam, M. y Elberg, M. 2008. Aplicación del Método de Elementos Finitos en la simulación de zonas susceptibles a movimientos de masa en la franja eostera del Estado Carabobo, Venezuela. *Ciencia e Ingeniería*. 29(2):199-206.
- [20]. Stein, S. y Wysession, M. 2002. An Introduction to Seismology, Earthquakes and Earth Structure. Blackwell Publishing.

- [21]. Tarbuck, E. y Lutgens, F. 2000. Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física. Prentice Hall, Madrid.
- [22]. Timoshenko y Goodier. 1968. Theory of Elasticity. Mc Graw Hill. Estados Unidos de América
- [23]. Torres, J., Gutiérrez, J., y Elberg, M. 2010. Simulación numérica de los límites entre las placas Euroasiática, Australiana y Filipina empleando el Método de Elementos Finitos. En Chacón R., León F., Duarte, V. y Verastegui O. (Editores). Modelos computacionales en ingeniería: Desarrollos novedosos y aplicaciones. Caracas.
- [24]. Torres J., Torres R. y Monsalve M. 2009. Análisis de Estabilidad de la Autopista San Cristóbal – La Fria: Subtramo San Juan de Colón – San Félix. Estado Táchira. Memorias presentadas en el X Congreso Nacional de Geotecnia, V Encuentro Centroamericano de Geotecnistas. San José, Costa Rica.
- [25]. Turcotte, G.D. y Schubert. 1988. Geodynamics. Clarendon Press Oxford.
- [26]. Wikipedia. 2012. Tectónica de Placas. Disponible: <http://es.wikipedia.org/>. Consulta: 2012, Marzo, 25.



**ANEXOS** [www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)



Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela  
(CC BY - NC - SA 3.0 VE )