



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Ciencias Geológicas

**LA TRANSPOSICIÓN DIDÁCTICA DE LA TEORÍA DE
CONVECCIÓN EN EL MANTO EN EL NIVEL UNIVERSITARIO
SUPERIOR**

**Tesis presentada para optar al título de Doctora de la Universidad de Buenos Aires
en el área de Didáctica de la Geología.**

María Leonor Bonan

Directores de Tesis: Dr. João Praia

Dr. José Sellés Martínez

CEFIEC, FCEN, UBA

Buenos Aires, 2006.

LA TRANSPOSICIÓN DIDÁCTICA DE LA TEORÍA DE CONVECCIÓN EN EL MANTO EN EL NIVEL UNIVERSITARIO SUPERIOR

RESUMEN

Esta investigación trata de develar cuestiones inherentes a la transposición didáctica del nivel universitario superior a través de un contenido específico de gran relevancia para las Ciencias de la Tierra, la teoría de convección en el manto. Se pretende analizar qué se enseña sobre este dominio de investigación que actualmente se encuentra en plena actividad. La pregunta que nuestra investigación pretende responder es de qué manera este conocimiento y la forma en la que se produce se enseñan en este nivel educativo, nivel en el que la distancia entre el conocimiento científico y el que se enseña es pequeña.

Distintas son las cuestiones que atraviesan esta temática y ello se debe, en parte, al nivel en el que se implica pues se trata de indagar cuáles son los mecanismos que reorganizan un discurso científico en un discurso didáctico. Además, por tratarse de un campo de investigación en actividad, el conocimiento que se enseña cambia en el tiempo pues los modelos se modifican, se desechan o evolucionan y resulta interesante desentrañar cómo se traslada esta dinámica a la enseñanza. En especial, nos interesa saber qué se enseña sobre las controversias dado el lugar destacado que ocupan como mecanismo de cambio científico y, paradójicamente, poco o nada se conoce sobre su enseñanza.

Palabras Clave: Transposición Didáctica - Nivel Universitario Superior - Teoría de Convección en el Manto - Evolución Histórica - Controversias Científicas - Libros de Texto.

THE DIDACTIC TRANSPOSITION OF MANTLE CONVECTION THEORY IN HIGH LEVEL

ABSTRACT

The aim of this work is to gain insight in matters inherent to the didactic transposition in high level of education by means of a specific subject of great relevance in the field of Earth Sciences: the theory of mantle convection. For this, an analysis of what is taught in this presently very active research field was developed. What this work aims to answer is how this knowledge, and the way in which it is being produced, is given at an educational level in which the gap between what is being researched and what is being taught is small.

Because of the implicated level, different are the questions spanning this subject. Which are the mechanisms converting a scientific discourse into a didactic one? Further more, the knowledge being taught in this active research field is changing in time, and models are being modified, rejected or evolving: how is this dynamic translated into teaching? And particularly, considering the pivotal role controversies occupy as a mechanism of scientific change, and, paradoxically, how little they seem to appear in education: what is being taught about scientific controversies?

Key words: Didactic transposition - High level - Mantle convection theory - Historical evolution - Scientific controversy - Textbooks.

Dedicatoria

A mi familia

Agradecimientos

Muchas son las personas que han hecho posible el desarrollo y la culminación de este trabajo y a todas ellas quisiera expresar mi agradecimiento.

Agradezco al Dr. João Praia que a lo largo de estos años me ayudara a transitar el proceso de investigación, especialmente la definición del problema, las estrategias específicas del análisis y el bagaje bibliográfico aportado. También por los estímulos permanentes para avanzar en todas las etapas de este proceso. En especial, valoro enormemente los aportes académicos que ha realizado y la rigurosidad de análisis y crítica aportada en cada una de las etapas transitadas. En lo personal, le agradezco la paciencia que implicó atravesar este proceso a la distancia.

Quiero agradecer especialmente al Dr. José Sellés Martínez por haber transitado conmigo, por haberme acompañado en este difícil y largo proceso. Agradezco, especialmente, su ingerencia en mi formación geológica y profesional. Sus aportes académicos resultaron fundamentales para ingresar en las Ciencias de la Tierra y profundizar en una temática de alta especificidad. En lo personal, le agradezco su excelente humor, incluso, en los momentos más difíciles.

A la Dra. Lydia Galagovsky con quién he mantenido largas y fructíferas charlas sobre la Didáctica de las Ciencias y sobre el diseño de esta tesis doctoral. También por haber estado siempre presente frente a los obstáculos que se presentaron brindando su apoyo incondicional.

A la Dra. Elsa Meinardi quisiera agradecerle haber generado la condición de posibilidad de culminación de esta tesis y, también, sus valiosas sugerencias académicas a lo largo de todo el proceso de la investigación y de la escritura de la tesis.

A Agustín Ardúriz-Bravi por haber estado desde el principio de los tiempos didácticos, a lo largo de estos 12 años. Agradezco enormemente su atenta y rigurosa mirada académica sobre este trabajo y también sus sugerencias, especialmente las de origen

epistemológico. En lo personal, agradezco su conocimiento y versatilidad en la construcción de apodos que tanto nos hacen reír.

Al CEFIEC, institución a la que pertenezco desde sus comienzos, primero como alumna y desde 1996 como docente. Quisiera agradecer especialmente a los docentes que contribuyeron con mi formación académica y profesional y también a mis alumnos.

A Andrea, Leonardo, Elina y María Inés por ser parte de la hinchada permanente que me alentó a seguir este trabajo, por el aguante y los buenos momentos compartidos los martes a la tarde, junto con Elsa y Agustín en ocasiones de la DEPE.

A Alicia Kriner, Augusto Rapalini y Guillermo Re por sus sugerencias académicas.

A Adriana Schnek por sus aportes académicos y profesionales que resultaron de enorme importancia para el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos, Rubí, Adriana, Ariel, Rolfi, Andrea, Graciela, Mirtha y Ernesto por el aliento permanente.

A mis padres, a quienes les debo la posibilidad de haber estudiado y el apoyo incondicional a este emprendimiento.

A mi hija Eva Panuqui y a mi marido Anto por haberme acompañado cotidianamente en el esfuerzo de realizar este trabajo, por la paciencia que tuvieron frente a mi ausencia traducida en el tiempo invertido en ello a lo largo de todos estos años. También a mi perro Motor que hace dos años dejó de existir pero que hasta último momento estuvo recostado bajo la computadora acompañándome.

Gracias a todos los que no nombro pero que de forma directa o indirecta participaron en el desarrollo de mi doctorado.

Índice

Capítulo 1: Introducción	6
Índice de Abreviaturas	7
1.1. Introducción general	8
1.2. El problema de investigación	8
1.3. Los objetivos de la investigación	9
1.4. Contexto general de definición del problema de investigación	10
1.4.1. La TD como forma de indagar la enseñanza	10
1.4.2. La Teoría de Convección en el Manto en el contexto de las Ciencias de la Tierra	11
1.5. Organización teórica general de nuestro estudio	13
1.6. Relevancia de nuestra investigación	14
1.7. Breve descripción de los capítulos que conforman esta tesis	15
Capítulo 2: Referentes teóricos de nuestro análisis	17
Introducción	18
Primera Parte: Ubicación de nuestro estudio en la producción de conocimiento	18
2.1.- Caracterización epistemológica de la Didáctica de las Ciencias	18
2.1.1 Estatus epistemológico de la Didáctica de las Ciencias	19
2.1.2.- Las fuentes teóricas de la Didáctica de las Ciencias	20
2.1.3.- El objeto de estudio de la Didáctica de las Ciencias	21
2.1.4.- Las líneas de investigación establecidas en la Didáctica de las Ciencias	21
2.1.5.- Ubicación de nuestro objeto de estudio en la Didáctica de las Ciencias	25
2.2.- Caracterización epistemológica de la Didáctica de la Geología	25
2.2.1.- La Geología en el ámbito de las Ciencias Naturales	25
2.2.2.- Panorama de la producción teórica en Didáctica de la Geología	28
2.2.3.- El estado del arte de la investigación sobre los procesos geológicos internos	31
2.2.3.1.- La producción acerca de la enseñanza y el aprendizaje de los procesos geológicos internos	32
2.2.3.2.- El análisis curricular y la producción de materiales didácticos sobre los procesos geológicos internos	34
2.2.3.3.- Las representaciones de los profesores sobre los procesos geológicos internos	35
2.3.- Contexto de inserción de nuestro estudio	36
Segunda Parte: Los marcos teóricos fuente de nuestra investigación	37
2.4.- Inserción conceptual de nuestra investigación en la Didáctica de las Ciencias Naturales	37
2.5.- Nociones epistemológicas que enmarcan nuestro estudio	40
2.5.1.- La perspectiva de las Ciencias Cognitivas sobre la ciencia	40
2.5.2.- El realismo como marco de la teoría cognoscitiva	40
2.5.3.- La noción de modelo científico en la teoría cognitiva	41
2.5.4.- La noción de teoría	43
2.5.5.- Disciplinas, modelos y representaciones	43
2.5.6.- Aspectos sociales de la ciencia	44
2.6.- Los aportes de la Historia de la Ciencia	51
2.7.- Los campos controversiales	53
2.8. A modo de cierre de la Segunda Parte	55

Tercera Parte: La transposición didáctica a través de los libros de texto	56
2.9 La transposición didáctica	56
2.9.1.- El contexto teórico de introducción de la TD	57
2.9.2.- Los ámbitos y funcionamientos del saber	58
2.9.3.- Los modelos didácticos y los modelos científicos.....	59
2.9.4.- Contexto general de concepción de la TD.....	59
2.9.5.- Identificación de las operaciones subsumidas en la TD	62
2.9.6 - La textualización de la ciencia a enseñar.....	64
2.9.7.- Los libros de texto como textualizadores de la ciencia a enseñar	65
2.9.8.- Los libros de texto de nivel científico avanzado: la primera transposición.....	66
2.10.- Los aportes de la Lingüística a nuestro estudio	67
2.10.1.- La comunicación científica: las publicaciones científicas y libros de texto	68
2.10.2.- El análisis estructural.....	69
Comentarios finales.....	72
Capítulo 3: Desarrollo Metodológico de nuestra investigación	73
3.1 Generalidades	74
3.2 El diseño de la investigación	75
3.3 Procedimientos Metodológicos.....	76
3.3.1 Identificación de los niveles estructurales de los libros de texto	77
3.3.1.1 Macroestructura	77
3.3.1.2 Superestructura	77
3.3.1.3 Microestructura	77
3.3.1.3.1 El armado del recorte disciplinar a través del CE.....	77
3.3.1.3.2 Definición de categorías microestructurales.....	79
3.3.2 Descripción de los niveles estructurales de los libros de texto	79
3.3.2.1 Macroestructura	79
3.3.2.2 Superestructura	80
3.3.2.3 Microestructura	80
3.3.3 Descripción de las operaciones subyacentes a la TD objeto de nuestro análisis	80
3.3.3.1 La desincretización	81
3.3.3.2 La objetivación.....	82
3.3.3.3 La publicidad	83
3.3.4 Los alcances y las limitaciones del análisis de las operaciones de la TD.	83
3.4 Las primeras determinaciones metodológicas.....	84
3.4.1 Los criterios de selección de la muestra	84
3.4.2 La determinación de la muestra.....	84
3.4.2 La selección del concepto estructurante	85
3.4.3 La selección de las publicaciones y la forma de citarlas.....	86
3.5 Particularidades de la comunicación de nuestro análisis.....	86
Capítulo 4: Contexto histórico de evolución del modelo de convección en el manto.....	88
4.1.- Introducción	89
4.2.- Primera etapa: origen y evolución temprana de la idea de convección en el manto	90
4.2.1.- El contraccionismo como concepción de planeta	90
4.2.2.- Protomodelos de convección en el manto	91

4.3.- Segunda etapa: la convección como mecanismo subyacente al desplazamiento de la superficie terrestre.....	93
4.3.1.- El surgimiento de la geofísica como campo disciplinar.....	94
4.3.2.- La sucesión de modelos de convección: de Holmes a Hess.....	96
4.4.- La aceptación de la tectónica de placas como nuevo punto de partida: de lo simple a lo complejo.....	100
4.4.1.- La convección en el manto como campo disciplinar con autonomía..	101
4.4.2.- Evolución conceptual: origen y desarrollo del campo controversial..	102
4.4.2.1.- El consenso abre un campo de investigación próspero	102
4.4.2.2.- El problema que dio origen al campo controversial: la movilidad del manto inferior.....	106
4.4.2.3.- La participación del manto inferior en la convección: la convección global.....	107
4.4.2.4.- El surgimiento del modelo rival de la convección global: la convección estratificada	113
4.4.2.5.- La conformación del campo controversial: galería de modelos..	115
4.4.2.6.- Los caminos de la controversia en el tiempo	118
4.4.2.7.- El desenlace de la controversia: el aporte crucial de la tomografía sísmica.....	124
4.4.3.- La situación del campo de investigación en la actualidad.....	126
A modo de cierre del capítulo	133
Capítulo 5: El análisis estructural de los libros de texto	135
Introducción	136
5.1. El análisis estructural de L1.....	136
5.1.1 Macroestructura	136
5.1.2 Superestructura	137
5.1.2.1 Las secciones que estructuran el libro.....	138
5.1.2.2 Descripción general de cada capítulo.....	139
5.1.3 Microestructura.....	145
5.1.3.1 Generalidades	145
5.1.3.2 Niveles semánticos de relación del concepto estructurante	146
5.1.3.2.2 Subordinación semántica: contexto de sustentación conceptual del concepto estructurante	150
5.1.3.2.3 Coordinación semántica: problemas empíricos asociados con la viscosidad del manto.....	156
5.1.4. Acerca de la descripción estructural de L1.....	161
5.2. Análisis estructural de L2	162
5.2.1 Macroestructura	162
5.2.2 Superestructura	164
5.2.2.1 Secciones que estructuran el libro.....	164
5.2.2.2 Descripción general de cada capítulo.....	165
5.2.3 Microestructura.....	169
5.2.3.2 Niveles semánticos de relación de la viscosidad del manto.....	170
5.2.3.2.1 Supraordinación semántica: vínculos conceptuales entre el concepto estructurante y el modelo de convección.....	170
5.2.3.2.2 Subordinación semántica: contexto de sustentación conceptual de la viscosidad del manto.....	177
5.2.3.2.3 Coordinación semántica: problemas empíricos asociados con la viscosidad del manto.....	178
5.3. El análisis estructural de L3.....	183

5.3.1 Macroestructura	183
5.3.2. Superestructura	185
5.3.2.1 Las secciones que estructuran el libro.....	186
5.3.2.2 La descripción general de cada capítulo	186
5.3.3 Microestructura.....	191
5.3.3.1 Generalidades	191
5.3.3.2 Niveles semánticos de relación de la viscosidad del manto.....	192
5.3.3.2.1 Supraordinación semántica: vínculos conceptuales del concepto estructurante con el modelo de convección.....	193
5.3.3.3 Subordinación semántica: contexto de sustentación conceptual de la viscosidad del manto.....	200
5.3.3.2.3 Coordinación semántica: problemas empíricos asociados con la viscosidad del manto.....	206
A modo de cierre del capítulo	211
Capítulo 6: Análisis de los mecanismos subyacentes a la transposición didáctica.....	213
6.1 Análisis del proceso de objetivación	214
6.1.1. Análisis de la objetivación plasmada en L1	215
6.1.2. Análisis de la objetivación plasmada en L2	227
6.1.3. Análisis de la objetivación plasmada en L3	230
Síntesis comparativa sobre la objetivación	242
6.2 Análisis del proceso de Publicidad.....	242
6.2.1 Análisis de la publicidad plasmada en L1.....	243
Superestructura.....	243
6.2.3.1 Supraordenación.....	244
6.2.3.2 Subordinación	248
6.2.3.3 Coordinación.....	251
6.2.1.4 Conclusiones parciales.....	254
6.2.2 Análisis de la publicidad plasmada en L2.....	257
6.2.2.1 Macroestructura	257
6.2.2.2 Superestructura	257
6.2.2.3 Microestructura	259
6.2.2.3.1 Supraordenación.....	259
6.2.2.3.2 Coordinación.....	262
6.2.2.4 Conclusiones parciales.....	263
6.2.3 Análisis de la publicidad plasmada en L3.....	265
6.2.3.1 Macroestructura	265
6.2.3.2 Superestructura	265
6.2.3.3 Microestructura	266
6.2.3.3.1 Supraordenación.....	266
6.2.3.3.2 Subordinación	269
6.2.3.3.3 Coordinación.....	273
6.2.3.4 Conclusiones parciales.....	274
Capítulo 7: Reflexiones e implicancias.....	276
7.1 Reflexiones emergentes del análisis de las operaciones subyacentes a la TD	278
7.1.1. Reflexiones sobre el proceso de desincretización.....	278
7.1.2. Reflexiones sobre el proceso de Objetivación	281
7.1.3. Reflexiones sobre el proceso de Publicidad	283
7.2. Conclusiones generales.....	287

7.3. Alcance de nuestro estudio y estudios posteriores.....	290
Bibliografía	293
Anexo de Publicaciones	303
Anexo de Imágenes	304
The Earth Crust and the Upper Mantle	305
L1: Dynamic Earth. Plates, Plumes and Mantle Convection	309
Imágenes del Capítulo 6	309
Imágenes del Capítulo 10	315
Imágenes del Capítulo 12	321
L2: The Earth's Mantle. Composition, Structure, and Evolution	326
Imágenes del Capítulo 5	326
Imágenes del Capítulo 10	330
L3: Mantle Convection in the Earth and Planets	339
Imágenes del Capítulo 5	339
Imágenes del Capítulo 6	350
Imágenes del Capítulo 15	351
Tabla de Preguntas	352

Capítulo 1: Introducción

Resumen del capítulo

En este capítulo se introduce al lector de este informe en el problema general que plantea esta investigación. Para ello, se definen, a groso modo, los elementos teóricos más destacados sobre los que se desarrolla nuestro estudio. Se caracterizan someramente el problema de investigación, los objetivos que se persiguen y su importancia. Por último, se expone una breve síntesis de los restantes capítulos de la tesis.

Índice de Abreviaturas

CE = Concepto Estructurante

CM = Convección en el Manto

MCM = Modelo de Convección en el Manto

MVM = Modelo de Viscosidad del Manto

PTD = Primera Transposición Didáctica

TCM = Teoría de Convección en el Manto

TD = Transposición Didáctica

VM = Viscosidad del Manto

1.1. Introducción general

La TD de la TCM en el nivel universitario superior es una temática de investigación que no cuenta con antecedentes en el ámbito de la producción en la Didáctica de las Ciencias. Sin embargo, ambas teorías, la TD y la TCM, son pilares teóricos fundamentales en sus disciplinas de origen y, por ello, consideramos que un estudio que las conjugue puede resultar de interés, especialmente en el ámbito de la Didáctica de la Geología.

Por un lado, la TD es una herramienta teórica de la didáctica que ha trascendido desde la Didáctica de la Matemática hacia otros dominios educativos, entre los que se encuentran las didácticas específicas de las Ciencias Naturales. La TD es un proceso de gestión del conocimiento que da cuenta de las transformaciones que operan sobre éste para convertirlo en objeto de enseñanza y de aprendizaje. Se trata de una transformación intrínseca al acto educativo, más allá de su nivel y, por lo tanto, esencial a la Didáctica de las Ciencias.

Por otro lado, la TCM surge como un campo autónomo de investigación cuando, en la década de los 60 del siglo XX, se consolida la teoría de la tectónica de placas a través de la cual se logró explicar e interpretar un gran número de fenómenos y objetos geológicos de orígenes diversos. Desde aquel momento, la evolución del conocimiento sobre la TCM ha alcanzado grandes consensos pero, sin embargo, desde que la teoría fue adoptada por la comunidad científica también se han planteado fuertes controversias que, incluso, permanecen hasta nuestros días. El manto es la interfase entre la corteza y el núcleo, y la convección es el mecanismo termo-tectónico que regula el comportamiento a escala planetaria, mecanismo que también se postula para el resto de los planetas sólidos del sistema solar. De allí su importancia.

1.2. El problema de investigación

Nuestro problema de investigación intenta develar cómo deviene un discurso científico en discurso didáctico a través de la TD. Esta herramienta teórica permite visibilizar las transformaciones que sufre el conocimiento cuando se asume la finalidad de enseñarlo en un contexto preciso. Los estudios sobre la TD suelen situarse en los niveles básicos de la enseñanza, en los que circula un conocimiento científico

conceptualmente muy alejado del conocimiento científico que se produce. En cambio, en el nivel universitario superior, la distancia tiende a ser mínima los modelos que se enseñan suelen ser cercanos a los modelos científicos actuales, se achican las distancias conceptual y temporal entre lo que se produce y lo que se enseña.

Creemos que los libros de texto son propuestas de enseñanza muy trascendentes por dos motivos: plasmar ser forma clásica en la que se plasma la TD y ser la principal fuente de conocimiento para la enseñanza del nivel universitario superior. Estos libros de texto son escritos por científicos que resultan ser los encargados de comunicar las novedades que se producen en un dominio, reorganizan discursivamente el conocimiento científico con el fin de ser enseñado. Los libros de texto serán la ventana a través de la cual indagaremos la enseñanza e intentaremos alcanzar nuestros objetivos.

Nuestro problema de investigación se caracteriza por ser interdisciplinar, en el sentido que se define a través de la interacción de aportes provenientes de variadas disciplinas. La Didáctica de las Ciencias aporta el encuadre general de la investigación y se sirve de fuentes para tomar herramientas teóricas y metodológicas que posibilitan organizar el análisis de nuestro objeto de estudio. Participan modelos provenientes de las siguientes disciplinas: Epistemología, Historia de las Ciencias, Lingüística, Geología General, Geofísica, Física y Matemática.

1.3. Los objetivos de la investigación

A través de nuestra investigación pretendemos describir cómo opera la TD de la TCM en el nivel universitario superior y explicar de qué manera se transforma el conocimiento científico en objeto de enseñanza. Además, centramos nuestra atención en la enseñanza de controversias, lo que nos lleva a rastrear su constitución y, por ende, la evolución histórica del campo de investigación asociado con la CM, en especial, en el marco de la historia reciente de las Ciencias de la Tierra.

Nuestros objetivos pueden sintetizarse como sigue:

- 1.- Describir qué se enseña acerca de la TCM en el nivel universitario superior a través de los libros de texto
- 2.- Describir cómo se lo hace

- 3.- Comparar distintas propuestas de enseñanza
- 4.- Describir cómo evolucionó la TCM hasta la actualidad

1.4. Contexto general de definición del problema de investigación

1.4.1. La TD como forma de indagar la enseñanza

Pensamos que la TD propuesta por Chevallard (1997) es una herramienta teórica potente para analizar la enseñanza de la TCM en el nivel universitario superior. Este dispositivo teórico establece la particular relación que existe entre el conocimiento científico, el conocimiento a enseñar y el conocimiento enseñado. Especialmente, nos interesa profundizar en aquellas operaciones inherentes a la TD que conectan con la esencia de la enseñanza, aquellas que dejan fuera las acciones asociadas con el aprendizaje, las que se centran en convertir el conocimiento científico en conocimiento a enseñar.

Utilizaremos la TD para reflexionar sobre los procesos de transformación de saberes científicos en saberes enseñables. La consideraremos como un método analítico que nos ayuda a buscar y descubrir cómo son los pormenores de esa transformación que opera sobre el saber científico.

La TD procura desentrañar cuáles son los mecanismos que se aplican sobre un objeto de saber para extraerlo del ámbito científico e insertarlo en un ámbito didáctico. El saber didáctico generado difiere del científico en su propia naturaleza. Así, el saber científico es la referencia del saber didáctico pero no se identifica sin más con éste, tanto el ambiente epistemológico como la significación y el alcance de los conceptos que estos dos tipos de saberes estructuran, son diferentes. En el nivel educativo que nos ocupa el movimiento de saberes se realiza al interior del ámbito científico que los produce. Son los mismos investigadores los que están habilitados para enseñarlos, es decir que son los mismos miembros de la comunidad científica los que producen conocimiento científico y conocimiento didáctico. En cambio, en los demás niveles educativos los actores que realizan la TD no son científicos lo que da lugar a distinguir la TD del nivel universitario superior y consideramos pertinente denominarla como la primera transposición didáctica

(PTD). Nos preguntamos cómo opera la PTD, cómo se comportan las operaciones subyacentes a ella.

Los estudios sobre la transposición didáctica suelen realizarse en los niveles básicos de la enseñanza y se centran, generalmente, en los sesgos o distorsiones conceptuales que se producen sobre el conocimiento científico. En cambio, en el nivel educativo que analizamos, la atención no se centra en las omisiones o deformaciones conceptuales sino en la deconstrucción del discurso científico y su reconstrucción en un discurso didáctico, sin disminuir su nivel de complejidad. Esta particularidad da lugar a hacer una distinción entre la PTD y las que operan en otros niveles educativos. Creemos que los resultados de nuestro trabajo pueden ser un aporte a la Didáctica de las Ciencias pues no existen estudios previos sobre la PTD aunque no podemos perder de vista que para ello es necesario profundizar en un contenido específico, lo que nos lleva a tener cuidado con la generalización de los resultados hacia la Didáctica de las Ciencias Naturales. El contenido sobre el que opera la PTD ubica nuestro trabajo específicamente en la Didáctica de la Geología.

1.4.2. La Teoría de Convección en el Manto en el contexto de las Ciencias de la Tierra

La TCM es una familia de modelos que puede situarse en el marco de las Ciencias de la Tierra. Esta teoría explica el enfriamiento planetario a escala global, gestionando y disponiendo de modelos provenientes de diferentes campos disciplinares, integrándolos en un modelo a escala planetaria. Cada uno de estos campos tiene por objeto de estudio algún “detalle” de la dinámica planetaria, con algún abordaje específico, desde algún ángulo particular. Son modelos complementarios que posibilitan acceder a una visión global del comportamiento del planeta en su conjunto.

Las Ciencias de la Tierra pueden concebirse como la convergencia de múltiples y variadas disciplinas agrupadas. Geofísica, Paleobiología, Geoplanetología, Geoquímica, Geoinformática, Genética de Poblaciones, entre otras, son disciplinas que aportan a la construcción de su objeto de estudio (Sequeiros y Anguita, 2003) involucrando la participación de microespecialistas y generalistas, éstos últimos encargados de poner en

común los problemas que vinculan a estos campos, buscando sus conexiones clave (Anguita, 1993).

Las Ciencias de la Tierra suelen interpretarse a la luz de la Teoría de los Sistemas. Éstos se definen como conjuntos compuestos de elementos que interactúan entre sí. Cada sistema es un todo, cuyos elementos son subsistemas. Esta concepción se asienta sobre el interés de conceptos tales como complejidad, interacción, propiedades emergentes, autoorganización, entre otros.

Los sistemas se organizan de manera jerárquica a través de sus interconexiones. El Sistema Solar, por ejemplo, está compuesto por los planetas que, a su vez, son sistemas integrados por otros sistemas: núcleo, manto, litosfera y atmósfera. Las Ciencias de la Tierra aspiran a comprender las conexiones entre los subsistemas a través de la interacción de diferentes disciplinas.

Los sistemas se caracterizan porque presentan estructuras estáticas, sistemas transformadores, mecanismos de control y mecanismos de evolución (Anguita, 1993). La CM es el mecanismo de control termo-tectónico que libera la energía planetaria a gran escala. Este mecanismo actúa en la Tierra y, además, en los planetas sólidos del Sistema Solar y es considerado de suma relevancia en el ámbito de las Ciencias de la Tierra (Sequeiros y Anguita, 2003).

Una revisión disciplinar publicada sobre la evolución de las Ciencias de la Tierra en los últimos 25 años (Jacoby, 2001) hace largas referencias a los roles que jugó la TCM en la Historia de la Geología brindando un panorama del estado del arte en la actualidad. Los avances que se produjeron en este campo de investigación se deben, en gran parte, a diversos aportes tecnológicos. En especial, el conocimiento sobre este campo ha crecido mucho a partir del avance de los modelos numéricos o computacionales, las tomografías sísmicas, la tecnología satelital y los experimentos de laboratorio, que aportan al desarrollo de diversas áreas relativas a la CM. Sin embargo, muchas cuestiones permanecen abiertas y otras tantas están en controversia (Jacoby, 2001).

1.5. Organización teórica general de nuestro estudio

Para analizar los mecanismos de la TD que transforman el conocimiento científico es necesario determinar a qué llamaremos conocimiento científico, problema eminentemente epistemológico que abordaremos desde las ciencias cognitivas, a través de la propuesta de Ronald Giere (1992) que considera que la ciencia se elabora en base a la evolución de modelos científicos que se asemejan en ciertos aspectos y en ciertos grados a los problemas del mundo real de los que quieren dar cuenta. Las fuentes que darán lugar a reconstruir la evolución de la TCM son publicaciones científicas, publicaciones de índole histórica y libros científicos relacionados con la temática, dado que los modelos científicos actuales son productos históricos, al igual que las controversias que se producen entre ellos. Las controversias que se establecen entre modelos científicos suelen estar relacionadas entre sí dando lugar a la conformación de campos controversiales (Nudler, 2002). Esta reconstrucción abordará aspectos que van más allá del conocimiento, que involucran a la comunidad científica que los produjo. De este modo, caracterizaremos a la ciencia a través de la evolución conceptual de sus modelos contextualizados en la comunidad científica a lo largo de su historia.

Para evaluar qué se enseña sobre la TCM y cómo se lleva a cabo en los libros de texto será necesario realizar un recorte disciplinar. Para ello, acudiremos a la noción de concepto estructurante (CE) (Gagliardi, 1986), es decir, de algún concepto central de la TCM que nos permita seleccionar un recorte de la estructura disciplinar de la teoría. La selección del CE se realizará, además, teniendo en cuenta las controversias relacionadas con la TCM, de modo de poder analizar si se enseñan y cómo. El CE abre la posibilidad de seleccionar un recorte del campo controversial y poner en evidencia la relación entre las controversias y de qué modo se trasladan a la enseñanza.

Seleccionaremos una muestra de libros de texto que expongan y expliquen la TCM del nivel universitario superior para analizar cómo se lleva a cabo la TD tanto del conocimiento establecido como el que se encuentra en controversia. Para realizar la descripción de qué se enseña acerca de la TCM en los libros de texto recurriremos al análisis textual clásico (van Dijk, 1978). La combinación del análisis estructural y el CE nos permitirá desmenuzar cada propuesta de enseñanza para luego abordar el análisis de las operaciones de la TD que le subyacen.

A través del CE y el análisis estructural recorreremos la estructura disciplinar, dando lugar a realizar una descripción de la enseñanza y su análisis de un recorte disciplinar específico en las diferentes propuestas de enseñanza.

1.6. Relevancia de nuestra investigación

Nuestro interés en el tema de la investigación surge de contrastar la gran importancia que posee la TCM en el ámbito de las Ciencias de la Tierra en la actualidad y el poco impacto que tiene en el ámbito de la Didáctica de la Geología. Esta situación se asienta en la escasa producción didáctica al respecto, en especial, por la combinación de la temática y el nivel educativo en el que ancla nuestro estudio.

Las propuestas de enseñanza a analizar sobre la TCM en el nivel universitario superior permitirán generar una descripción de la selección y la secuenciación conceptual y, también, de las representaciones que se utilizan para estructurar el discurso didáctico. Dicha descripción informará qué se enseña sobre la TCM en el nivel universitario superior y cómo se lo hace. Este aporte se materializará en un relevamiento de los modelos que las propuestas de enseñanza configuran entre sí para desarrollar la TCM. Debido a su condición interdisciplinar, se develarán las relaciones conceptuales que dan lugar a la identificación de tramas conceptuales que pueden resultar en una contribución al diseño curricular de todos los niveles educativos, inclusive el universitario.

El relevamiento histórico y epistemológico de la evolución de la TCM será un resultado de la investigación que contribuye con el desarrollo de la Didáctica de la Geología. La publicación de trabajos parciales de corte didáctico, histórico y epistemológico sobre la TCM (Ver Anexo de Publicaciones: Bonan, 2006; Bonan *et al.*, 2004; Bonan, 2002; Bonan, *et al.*, 2001) constituye un aporte concreto a esta área. Estas publicaciones contribuyen a socializar el conocimiento del contexto científico en el que se produce la evolución conceptual. La descripción de los aspectos históricos y epistemológicos producto de esta investigación aporta al desarrollo de una imagen de ciencia más acorde con los consensos epistemológicos actuales, en particular, muy útiles a la formación docente.

Las investigaciones del ámbito de la Didáctica de las Ciencias han mostrado que la educación científica produce representaciones sobre la actividad científica muy alejadas de las que consensúan las visiones epistemológicas actuales. El análisis de la PTD aporta a explicar qué se explicita sobre la construcción de la ciencia en los discursos didácticos. Las representaciones epistemológicas que devienen de las sucesivas TD que descienden por el sistema educativo están condicionadas por la imagen de ciencia que resulte de la PTD, lo que destaca su importancia. La Didáctica de las Ciencias, en general, está atravesada por la noción de transposición didáctica. No existen antecedentes sobre la investigación de la PTD en un campo disciplinar específico que si bien aporta los resultados a su didáctica específica asociada también aporta conocimiento sobre las transformaciones que operan sobre el discurso científico cuando la distancia conceptual es mínima, en general.

1.7. Breve descripción de los capítulos que conforman esta tesis

Durante el desarrollo de la tesis se despliegan los marcos teóricos que se articulan con nuestras estrategias metodológicas con el fin de realizar nuestro análisis. En el **capítulo 1** hemos presentado de forma general nuestro problema de investigación, los propósitos que persigue, los referentes teóricos más destacados y la relevancia general de nuestro trabajo. Para concluir este capítulo presentaremos un breve resumen de los capítulos siguientes.

En el **capítulo 2** se desarrollan los marcos teóricos que sustentan nuestro trabajo. En primer lugar, se presenta un análisis epistemológico de la Didácticas de las Ciencias, en general, y de la Didáctica de la Geología, en particular, con el fin de situar en la nuestra investigación en la producción existente y, con ello, determinar sus peculiaridades. Luego, se describen diferentes propuestas teóricas que aportan conocimiento al análisis de nuestro objeto de estudio. Y por último, se presenta un recorte que integra distintas perspectivas teóricas y permite encuadrar nuestra investigación.

En el desarrollo del **capítulo 3** se presenta el diseño metodológico que guía nuestra investigación. Se caracterizan los procedimientos metodológicos que

posibilitan la intervención, su construcción y las primeras determinaciones metodológicas que dan lugar a transitar la investigación.

En general, los capítulos 4, 5 y 6 presentan la materialización de nuestra investigación. El **capítulo 4** presenta una reconstrucción histórica del campo asociado con la investigación de la Teoría de Convección en el Manto desde su origen hasta la actualidad con el fin de conocer su evolución histórica y componer un panorama global del campo en la actualidad, describir las principales características de la teoría y las discusiones existentes a su alrededor. Este capítulo sirve de referencia para el desarrollo de los capítulos 5 y 6.

El **capítulo 5** describe cómo se enseña la TCM en el nivel universitario superior a través de diferentes propuestas de enseñanza centradas en esta especialidad. Se profundiza en la estructura disciplinar para describir los modelos y el nivel de profundidad con el que se los enseña. Se presta especial atención a la enseñanza de las controversias y su participación en el entramado disciplinar.

En el **capítulo 6** se analiza cómo se enseña la TCM y con qué recursos se lo hace. También, se profundiza sobre cómo se enseñan cuestiones que los especialistas discuten en la actualidad y con qué recursos las abordan. Se develan algunas cuestiones inherentes a la transformación del discurso científico en discurso didáctico.

En el transcurso del **capítulo 7** presentamos las reflexiones que surgen de comparar diferentes propuestas de enseñanza sobre la TCM y ofrecer algunas explicaciones sobre qué se enseña, cómo y por qué se lo hace, en especial, sobre las controversias científicas. Reflexionamos también sobre los alcances y limitaciones de nuestro estudio así como también sobre líneas futuras de investigación que surgen de la investigación.

Capítulo 2: Referentes teóricos de nuestro análisis

Resumen del capítulo

En este capítulo desarrollamos el marco teórico que define nuestro estudio. Éste se sitúa en la Didáctica de las Ciencias¹, en especial en la Didáctica de la Geología. Caracterizaremos la producción de la investigación en estas disciplinas con el fin de situar la investigación, buscar antecedentes relevantes y determinar las fuentes teóricas que nos sirvan para delimitar el objeto de nuestro estudio.

¹ Ciencias por Ciencias Naturales.

Introducción

Nos interesa analizar el estado del arte de la Didáctica de las Ciencias para comprender el campo en el que se inserta nuestra investigación. Por tratarse de una ciencia social joven, la forma de definir los problemas de investigación es poco ortodoxa. Creemos que cuando un problema de investigación no forma parte de una tradición establecida es aconsejable recurrir al análisis epistemológico de la disciplina en la que se inserta pues éste puede orientar las acciones asociadas con, por un lado, encuadrar la investigación y, por otro, para concebir su diseño metodológico (Bonan, 2005). La mirada metacientífica nos aporta una representación de la organización de la Didáctica de las Ciencias como campo disciplinar que nos guiará en el diseño de la organización conceptual y metodológica de nuestra investigación y, también, en sus alcances y limitaciones.

Consideraremos a las didácticas específicas como dominios de investigación que presentan tanto problemas comunes a la Didáctica de las Ciencias como problemas específicos relacionados con una determinada disciplina. En este sentido, abordaremos el estado del arte de la Didáctica de la Geología y, en especial, de un área de ésta que investiga sobre la enseñanza y el aprendizaje de los procesos geológicos internos. Nuestra investigación puede considerarse a priori como exploratoria debido a la conjunción de algunas circunstancias, entre las más destacadas: la situación marginal de la Didáctica de la Geología en el ámbito de la Didáctica de las Ciencias, su anclaje en el nivel universitario y la especificidad del contenido disciplinar geológico a abordar.

Primera Parte: Ubicación de nuestro estudio en la producción de conocimiento

2.1.- Caracterización epistemológica de la Didáctica de las Ciencias

Nos parece apropiado caracterizar epistemológicamente la Didáctica de las Ciencias a través de su estatus epistemológico, sus fuentes teóricas, su objeto de estudio y los consensos alcanzados en el campo.

Su estatus epistemológico da una idea de la naturaleza de la investigación a realizar (exploratoria, descriptiva, explicativa o posibles combinaciones entre ellas) que, en buena medida, depende de la producción científica disponible. Las fuentes teóricas aportarán modelos de otras disciplinas que nos permitirán definir los rasgos de la investigación y los presupuestos que definirán nuestro marco teórico. La definición del objeto de estudio dará lugar al planteamiento del problema en el universo de problemas de investigación posible que concibe la Didáctica de las Ciencias (Samaja, 1997). De su estatus epistemológico surgen, además, los consensos alcanzados en el campo.

2.1.1 Estatus epistemológico de la Didáctica de las Ciencias

El estatus epistemológico de la Didáctica de las Ciencias puede concebirse como producto de su evolución histórico-disciplinar que configura su estado en la actualidad. No existe pleno consenso respecto de éste pues algunos autores la consideran como una disciplina en estado emergente (Porlán, 1998; Cachapuz *et al.*, 2001), mientras que otros (Espinet, 1999; Adúriz Bravo, 1999) como una disciplina *casi* consolidada.

Adúriz-Bravo (1999) propone analizar su estatus en 5 etapas, desde su inicio hasta su configuración actual:

- a) Etapa a-disciplinar:** Desde finales del siglo pasado hasta 1950. Producción fragmentaria de trabajos, desconexión entre autores y falta de marco teórico de referencia.
- b) Etapa tecnológica:** Desde 1950 hasta 1970. Producción de un volumen considerable de estudios (evaluación de curricula difundidos en EEUU).
- c) Etapa protodisciplinar:** Desde 1970 hasta 1980. Creciente conciencia de la comunidad: reuniones profesionales, revistas de divulgación de trabajos científicos e incorporación en las universidades como un área de conocimiento. Consolidación como comunidad con estructura de funcionamiento y de comunicación aunque no del marco teórico.

d) Etapa como disciplina emergente: Desde 1980 hasta 1990. Se inicia un consenso a nivel teórico y metodológico. A final de la década la comunidad se acoge al constructivismo.

e) Etapa como disciplina casi consolidada: Desde 1990 continua. Se han consolidado las redes de difusión de los resultados de investigación, ha aumentado el número de producciones, se han consolidado los departamentos universitarios e introducido titulaciones universitarias y finalmente aparecen marcos teóricos más coherentes y mejor formulados que inician líneas de investigación valoradas científicamente. La Didáctica de las Ciencias se transforma en objeto de enseñanza, lo que aporta a considerarla una disciplina casi consolidada.

Ya sea que actualmente la Didáctica de las Ciencias se encuentre como disciplina emergente o casi consolidada nos interesa destacar que las investigaciones propias de este campo tienden a afianzar su producción teórica y, además, son insumos de la formación de especialistas en Didáctica de las Ciencias.

2.1.2.- Las fuentes teóricas de la Didáctica de las Ciencias

La relación que adopta la Didáctica de las Ciencias con sus fuentes teóricas está en estrecha relación con su estatus disciplinar. Esta disciplina ha definido líneas de investigación en las que se cobijan algunos estudios pero para muchas otras no existen antecedentes en los que enmarcar un problema que se busca investigar. En estos casos, las disciplinas que funcionan a modo de fuentes se han planteado problemas afines y aportan marcos conceptuales y metodológicos que pueden ser útiles al desarrollo de la Didáctica de las Ciencias. Algunas de estas disciplinas son (Espinet, 1999):

- las disciplinas científicas cuya enseñanza y/o aprendizaje plantean problemas
- las metadisciplinas como la Historia, Epistemología y Sociología de las Ciencias, que abordan los problemas derivados de la comprensión del desarrollo y evolución de la actividad científica
- la Psicología, que aporta el conocimiento sobre el sujeto que aprende
- la Pedagogía, que aporta el conocimiento sobre el análisis de las relaciones entre enseñanza y aprendizaje y los diferentes contextos institucionales donde se realiza

- la Sociología, la Lingüística, la Antropología, la Axiología y sus interacciones, que aportan conocimiento sobre los factores que intervienen en la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias.

En general, en relación con las fuentes teóricas (Cachapuz *et al*; 2005; Adúriz-Bravo, 1999) se sugiere explorar abordajes interdisciplinarios entre fuentes que resulten relevantes para encarar un problema de investigación en didáctica, además de los antecedentes propios del problema, en caso de que éstos existan. También las disciplinas fuentes pueden aportar estrategias de índole metodológico.

2.1.3.- El objeto de estudio de la Didáctica de las Ciencias

¿Cuál es el objeto de estudio de Didáctica de las Ciencias? Es decir... qué posibles problemas de investigación puede concebir. Ésta es una cuestión central para la Epistemología. Adúriz Bravo (1999) realiza un relevamiento sobre cómo se ha definido este objeto de estudio a lo largo del tiempo con el fin de arriesgar una definición de criterio amplio que pueda abarcar un gran número de definiciones y las investigaciones que se realizan y se han realizado durante su evolución. Este autor considera que la Didáctica de las Ciencias estudia:

- la estructura intrínseca de las Ciencias Naturales
- los procesos de gestión de las Ciencias Naturales (transposición, enseñanza y aprendizaje)
- los actores y contextos involucrados en los procesos anteriores

Es posible incluir, al amparo de esta definición, problemas didácticos de diversos orígenes. En particular, investigar la TD de la CM implica abordar un proceso de gestión de un contenido científico particular, proceso que es protagonizado por ciertos actores y también los contextos en los que se desarrolla dicho proceso.

2.1.4.- Las líneas de investigación establecidas en la Didáctica de las Ciencias

La producción en Didáctica de las Ciencias ha crecido mucho en los últimos años, lo que llevó a la comunidad a trabajar para lograr consensos cada vez

más amplios (Cachapuz, *et. al.*; 2005). Los consensos pueden relevarse a través de las áreas de investigación que se han consolidado a lo largo del tiempo, entre ellas, podemos citar: las representaciones o concepciones ingenuas, el lenguaje científico (en sí mismo o el que circula en las clases de ciencias), las actitudes hacia la ciencia, los aspectos epistemológicos, el desarrollo cognitivo, los trabajos prácticos y la resolución de problemas, los estudios que vinculan la Ciencia con la Tecnología, la Sociedad y el Ambiente y, por último, la evaluación.

Podemos afirmar con cierto grado de generalidad que hay consenso, además, en integrar diferentes perspectivas teóricas como los enfoques lingüísticos, psicológicos y epistemológicos, entre varias posibilidades. También en aceptar al constructivismo como un marco teórico y en revalorizar los estudios históricos y epistemológicos de la ciencia.

Otro consenso que adquiere cada vez mayor interés es el de dirigir la atención sobre la formación docente y la relación entre las prácticas docentes y la investigación en Didáctica de las Ciencias (Meinardi *et al.*, 2006). Particularmente en el nivel universitario, se plantea como desafío la innovación de la enseñanza universitaria a la luz de las investigaciones producidas en el campo, ya que tradicionalmente en los ámbitos docentes universitarios se estima que la formación en contenidos científicos alcanza para enseñar bien una asignatura. Sin embargo, existe cada vez más preocupación por parte de los profesores universitarios en indagar de qué se tratan los aportes que provienen de esta disciplina con el fin de optimizar la formación universitaria (Cachapuz *et al.*, 2005).

a) Los aportes de la Epistemología y la Historia de las Ciencias

Durante la década de 1990 se consolida una línea de investigación sobre la influencia de la Epistemología y la Historia de las Ciencias en la educación en ciencias. Se investigan, especialmente, las representaciones sobre la naturaleza de la ciencia tanto en docentes como alumnos (Adúriz Bravo, 2001). Actualmente, se ha presentado una síntesis de más de una década de trabajos sobre estos aspectos (Gil *et al.*, 2005). En ella, se caracterizan las representaciones epistemológicas ingenuas y se señala cada vez con más fuerza tanto su peso en la formación como la necesidad de generar propuestas para superarlas (Adúriz Bravo, 2005; Praia *et al.*; 2005, a y b). En

especial, se brinda especial atención a la noción de teoría (Marqués y Praia, 2006) y, con ello, a la de modelo. Las cargas teórica y empírica se ponen en función de un problema científico (Paria *et. al.*, 2005,a) destacando el rol que tienen las hipótesis en la construcción del conocimiento (Paria *et. al.*, 2005, b).

La inclusión de la formación epistemológica e histórica en el nivel universitario genera interés pero no es al momento una práctica generalizada. Sin embargo, cada vez se sostiene con más fuerza su inclusión, especialmente en el ámbito de la formación de profesores de primaria y secundaria.

b) Notas sobre el constructivismo

Bajo la denominación de constructivismo se amparan marcos teóricos de orígenes diversos. Nos interesa señalar que, en primer lugar, el consenso alrededor del constructivismo no es tal pues hay autores que señalan (Castorina, 1998, por ejemplo) que el constructivismo pedagógico es un término polisémico que admite, incluso, posturas teóricas controvertidas. Aunque, sin embargo, bajo este paraguas existe cierto consenso que sitúa al aprendizaje como un proceso de construcción no lineal y, además, no se trata de una teoría sino de una unidad de análisis abarcativa (Camilloni, 1998).

El constructivismo epistemológico (Piaget y García, 1980) plantea un paralelo entre la evolución histórica del pensamiento y su construcción por un sujeto. Este paralelismo se asienta en la determinación de estadios evolutivos que se corresponden entre ambas construcciones, la histórica y la personal. Más allá de esta hipótesis, estos estudios junto con otros específicos del ámbito de la Didáctica de las Ciencias (Viennot, 1979) fueron considerados pioneros en las relaciones que se establecieron entre la Historia de las Ciencias y la Didáctica de las Ciencias. En ambos tipos de estudios la Historia de la Ciencia es una fuente primaria que brinda una orientación sobre cómo evoluciona su construcción onto y filogenéticamente. Acudir a las fuentes históricas originales para reconstruir la génesis conceptual de un campo o de un problema permite acceder a las dificultades inherentes a su construcción y a disponer de una forma de profundizar epistemológicamente la mirada (Bonan, 1996).

c) Los conceptos estructurantes

En todas las disciplinas, en particular la Didáctica de las Ciencias, existen ciertos conceptos estructurales que le dan coherencia a su estructura sintáctica. Estos conceptos suelen conocerse como conceptos estructurantes (Gagliardi, 1986). Su identificación y estudio es un punto central del análisis metateórico y también se conocen como conceptos transversales o metadisciplinarios en el ámbito de la Didáctica de las Ciencias (Adúriz Bravo, 1999).

Esta noción es muy útil a nuestros propósitos pues habilita una forma de establecer vínculos al interior de una disciplina, viabilizando posibles recorridos para penetrar en las disciplinas involucradas en este estudio.

Además, nos parece importante señalar que entre los conceptos estructurantes del ámbito de la Didáctica de las Ciencias es reconocido como central el de *transposición didáctica* (Adúriz-Bravo, 1999). La TD articula la ciencia erudita con la ciencia escolar, haciendo de ambas y de sus relaciones teóricas, un objeto de estudio fundamental de la Didáctica de las Ciencias (Sanmartí e Izquierdo, 1997).

d) La formación docente

La formación docente es una de las áreas prioritarias de investigación en la Didáctica de las Ciencias. Su objetivo es achicar la brecha existente las orientaciones de intervención provenientes de la investigación y el perfil académico y los intereses de los docentes (Cachapuz, *et al.*, 2005; Adúriz-Bravo, *et al.*, 2003 (a); Adúriz-Bravo, 2001).

La formación docente tiene una componente netamente disciplinar y una componente pedagógica. Ésta última, generalmente, no forma parte de la formación de los docentes del nivel universitario.

Las investigaciones existentes apuntan a las representaciones mentales de los profesores tanto de aspectos epistemológicos como disciplinares de las que surge la necesidad de consolidar una formación en Didáctica de las Ciencias (Oliva, 2005), además de la formación pedagógica general. La formación docente que refiere a los aspectos epistemológicos resulta muy potente para fortalecer la mirada metacientífica de la disciplina objeto de enseñanza (Cudmani y Salinas, 2004).

2.1.5.- Ubicación de nuestro objeto de estudio en la Didáctica de las Ciencias

Este panorama epistemológico general sobre la Didáctica de las Ciencias nos permite situar nuestro estudio en el campo. Éste se inserta en una didáctica específica, la Didáctica de la Geología, pues se centra fuertemente en la gestión (TD) de un contenido científico específico (la TCM) en un contexto particular (la educación universitaria).

El contenido científico determina la introspección en la Didáctica de la Geología con el doble fin de rastrear posibles antecedentes y situar nuestro trabajo en el desarrollo de este campo.

El relevamiento realizado nos orienta acerca de los marcos que pueden ser útiles a nuestros propósitos. En particular, la Epistemología, distintos campos de las Ciencias Naturales, la Historia, la Sociología de las Ciencias y la Lingüística son fuentes primarias de nuestra investigación.

2.2.- Caracterización epistemológica de la Didáctica de la Geología

Como se ha señalado la Didáctica de la Geología es el área de la Didáctica de las Ciencias en la que se inserta nuestro estudio. Haremos una distinción inicial entre las Ciencias Naturales y la Geología para luego plantear las relaciones entre sus didácticas asociadas. Luego, nos interiorizaremos de la producción al interior de la Didáctica de la Geología como área específica para luego adentrarnos sobre los resultados de la investigación didáctica de los procesos geológicos internos. Por último, ofreceremos un encuadre de nuestro trabajo a la luz de este panorama.

2.2.1.- La Geología en el ámbito de las Ciencias Naturales

a) ¿Cuáles son las Ciencias Naturales?

Las Ciencias Naturales son aquellas ciencias fácticas cuyo objeto de estudio se centra en la naturaleza. Tradicionalmente, se considera que las Ciencias Naturales

son la Astronomía, la Física, la Química, la Biología y la Geología, disciplinas que presenta similitudes en su génesis y su funcionamiento (Adúriz Bravo, 1999). Esta asignación resulta inapropiada para los estudios que comprometen a más de una disciplina, campos de investigación que se generan por problemas en los que más de una de ellas inca la mirada. Los campos disciplinares actuales son hereditarios de una tradición conceptual e institucional específica, conocida, especialmente, por quiénes forman parte de dicha tradición. La geofísica, por ejemplo, es una ciencia natural cuyas construcciones históricas definen una tradición propia que se diferencia tanto de la Física como de la Geología y, aunque conserva características de ambas no se identifica con ninguna de ellas. Existen diferentes clasificaciones de las Ciencias pero pensamos que todas ellas tienen limitaciones.

b) La Geología en el marco de las Ciencias de la Tierra

La Geología puede integrarse disciplinarmente a un conjunto más amplio, las Ciencias de la Tierra que algunos autores han concebido como la *nueva Geología* (Sequeiros y Anguita, 2003).

Las Ciencias de la Tierra suelen interpretarse a la luz de la Teoría de los Sistemas (Anguita, 1993). Esta teoría destaca el rol de conceptos tales como complejidad, interacción, propiedades emergentes, autoorganización, entre otros. Esta perspectiva, ha llevado a los geólogos a establecer relaciones con otras disciplinas, desde la física hasta la meteorología. La integración conceptual y metodológica de muchas ciencias cubre el intento de considerar al planeta Tierra como un sistema energético en el contexto del universo (Sequeiros y Anguita, 2003).

Utilizaremos la denominación Didáctica de la Geología para seguir la tradición de su inclusión como área de la Didáctica de las Ciencias Naturales (Izquierdo, 1999), una tradición que será el referente de la naturaleza didáctica de nuestro estudio. Sin embargo, consideramos epistemológicamente más apropiado referir a las Ciencias de la Tierra, las que consideran a la CM como un mecanismo de control planetario (Anguita, 1993) que aporta las claves para la comprensión de la evolución planetaria a gran escala (Anguita, 1996).

c) Las relaciones entre la Didáctica de las Ciencias Naturales y la Didáctica de la Geología

Es importante señalar, que muchos de los aportes que surgen de las didácticas específicas trascienden su propio dominio y son captados desde otras didácticas. Este es el caso de la TD (Chevallard, 1998), por ejemplo, concepción proveniente del ámbito de la Didáctica de la Matemática, que hoy tiene valor para comprender el proceso de enseñanza en otras didácticas.

Existen ideas centrales que pueden trascender los límites de las didácticas específicas sin perder potencialidad, lo que supone que existen producciones significativas generalizables (Davini, 1996). Así, los distintos niveles de organización, la integración de sistemas conexos, la modelización, la utilización de herramientas matemáticas, los diseños experimentales y su relación con los cuerpos teóricos, son problemáticas comunes que pueden ubicarse en la Didáctica de las Ciencias Naturales (Galagovsky *et al.*, 1998).

Existen constructos teóricos que son exclusivos de su especificidad disciplinar y, con ello de su didáctica específica asociada. Por ejemplo, las explicaciones teleológicas en relación con el proceso de selección de la evolución de las especies, es una temática específica de la Didáctica de la Biología y las explicaciones sobre el tiempo geológico originadas en la aparente inmutabilidad del paisaje, es propia de la Didáctica de la Geología.

d) La especificidad del objeto de estudio geológico

El objeto de estudio geológico --y, con ello, la Didáctica de la Geología-- está condicionado por problemáticas específicas que lo atraviesan y se conjugan: su reconstrucción histórica, la concepción del espacio y del tiempo, las condiciones de presión y temperatura a las que ocurren los procesos y la replica de los experimentos, entre los factores más importantes (Pedrinaci, 2001).

La Geología suele considerarse como una ciencia histórica y, por lo tanto, narrativa. Esta narrativa condiciona la descripción de los hechos ocurridos que no pudieron ser presenciados, escenas que no pueden ser recreadas ni observadas, que pueden sustentarse en evidencias ligadas a estos hechos... o no; así, los objetos

geológicos pueden ser tomados como registros cuyas marcas conducen a diferentes interpretaciones. Los referentes empíricos podrán servir a la estructuración de una o más hipótesis sobre la ocurrencia de un evento (Paschoale, 1990). El conocimiento geológico se sustenta, en parte, en metodologías interpretativas o hermenéuticas, frecuentemente utilizadas por las ciencias históricas. Percibimos y concebimos al objeto geológico como incompleto al tener éste una historia previa inaccesible (Frodeman, 1995; Ault, 1998).

Por un lado, muchos procesos ocurren en condiciones de presión y temperatura imposibles de observar o de reproducir en el laboratorio, y por otro, el espacio y el tiempo son variables que impregnan la construcción del objeto geológico. Los problemas de investigación que se formulan están atravesados por estas variables, que pueden considerarse independientes pero en algún punto no pueden disociarse, los eventos ocurren en un lugar y momento geológico determinado.

Estas peculiaridades del objeto de estudio geológico condicionan los estudios didácticos.

2.2.2.- Panorama de la producción teórica en Didáctica de la Geología

a) A la luz de la Didáctica de las Ciencias

Las didácticas específicas asociadas con la Geología y la Astronomía son áreas de la Didáctica de las Ciencias Naturales que cuentan con poco desarrollo frente a la atención que reciben otras áreas: biología, física y química (Sanmartí y Azcárate, 1997).

Nos interesa relevar la producción específica de la Didáctica de la Geología, en primer lugar, en referencia a la Didáctica de las Ciencias y, luego, al interior de la Didáctica de la Geología. Por último, pretendemos abordar los antecedentes de investigación de las problemáticas asociadas con los procesos geológicos internos, (sub)área que alberga la temática geológica de nuestro estudio didáctico.

Consideraremos un trabajo publicado reciente (Pedrinaci *et al.*, 2004) en el que se presenta un estudio sobre las publicaciones de Didáctica de la Geología durante

el período 1999-2003. Se tienen en cuenta las publicaciones de Didáctica de la Geología que aparecen en las revistas de Didáctica de las Ciencias que tienen mayor impacto: International Journal of Science Education, Journal of Research in Science Teaching, Science Education, ASTER, Enseñanza de las Ciencias e Investigación en la Escuela. La siguiente tabla sintetiza el peso que tiene la producción de la Didáctica de la Geología en dicho período en relación con la totalidad de publicaciones de Didáctica de las Ciencias.

	Didáctica de la Geología	Didáctica de las Ciencias
Journal of Research in Science Teaching	6	310
Science Education	2	267
International Journal of Science Education	1	96
ASTER	14	372
Alambique	20	267
Enseñanza de las Ciencias	3	180
	46	1492

Los datos muestran que la Didáctica de la Geología ocupa una situación marginal dentro de la Didáctica de las Ciencias (Pedinaci *et al.*, 2004; pp: 43). Los autores atribuyen como posibles causas (que se cumplen con cierta regularidad más allá de los contextos particulares en los que ocurren): la menor cantidad de geólogos en relación con los científicos de otras ramas de las ciencias, el reducido número de revistas específicas de Didáctica de la Geología, curricularmente, los contenidos geológicos en la educación primaria no anclan en una asignatura sino que suelen estar repartidos entre las Ciencias Naturales y la Geografía; en el nivel medio tienen presencia escasa o nula y, en el nivel universitario Geología es una carrera elegida por pocos.

Respecto de los temas de las publicaciones, los autores los clasifican en cinco categorías: *reflexiones teóricas* (R), *investigaciones* (I), *experiencias y proyectos realizados* (E), *propuestas curriculares* (P), *técnicas concretas* (T) y *trabajos de actualización disciplinar* (A). La siguiente tabla muestra el número de

publicaciones de cada categoría en el mismo período en las revistas de Didáctica de las Ciencias.

	R	I	E	P	T	A	Tot
Journal of Research in Science Teaching	0	5	1	0	0	0	6
Science Education	0	2	0	0	0	0	2
International Journal of Science Education	0	12	2	0	0	0	14
ASTER	0	1	0	0	0	0	1
Alambique	4	6	2	8	0	0	20
Enseñanza de las Ciencias	0	1	2	0	0	0	3
Total	4	27	7	8	0	0	46

En relación con los temas, las revistas de Didáctica de las Ciencias no publican trabajos sobre *técnicas concretas y actualización disciplinar*. Tiene sentido que esto sea así por tratarse de dos categorías bastante específicas que presentan poco interés para el público general y, como ya habíamos mencionado, son pocos los geólogos. En cambio, si bien aparecen algunos trabajos sobre *reflexiones teóricas, experiencias y proyectos realizados y propuestas curriculares*, son muy escasos y, por último, podríamos decir que la publicación de *investigaciones* tiene una presencia relativamente significativa.

b) Al interior de la Didáctica de la Geología

El relevamiento de Pedrinaci (*et al.*, 2004) considera las revistas específicas dedicadas a la Didáctica de la Geología para analizar sus publicaciones a la luz de las mismas categorías utilizadas para caracterizar la representatividad relativa de la Didáctica de la Geología respecto de otras didácticas específicas de las Ciencias Naturales. Los autores incluyeron en su análisis las revistas: *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, Journal of Geoscience Education* y *Teaching Earth Sciences*.

El análisis de las publicaciones se exhibe en la siguiente tabla²:

² Reflexiones teóricas (R), investigaciones (I), experiencias y proyectos realizados (E), propuestas curriculares (P), técnicas concretas (T) y trabajos de actualización disciplinar (A)

	R	I	E	P	T	A	Tot
Journal of Geoscience Education	5	29	4	34	17	15	104
Teaching Earth Sciences	0	5	5	10	2	10	32
Enseñanza de las Ciencias de la Tierra	18	6	2	3	19	8	56
Total	23	40	11	47	38	33	192

Las revistas de Didáctica de la Geología hacen una selección muy diferente de la que hacen las de Didáctica de las Ciencias Naturales. Las diferencias más notables se refieren al alto porcentaje de *propuestas curriculares, técnicas concretas y trabajos de actualización disciplinar*, diferencia que los autores (Pedrinaci, *et al*; 2004) explican a través de la función divulgadora y polivalente que las revistas quieren desempeñar.

La revista *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* aporta un número significativo de *reflexiones teóricas* a diferencia de las anglosajonas que otorgan gran importancia a las propuestas curriculares.

En lo que se refiere concretamente a las investigaciones, nos interesan especialmente aquellas que se vinculan con los procesos geológicos internos que, como antes referimos, es el marco geológico en el que se enmarca conceptualmente nuestra investigación.

2.2.3.- El estado del arte de la investigación sobre los procesos geológicos internos

Presentaremos aquí un panorama de las investigaciones de Didáctica de la Geología que sirve de contexto de nuestro estudio. Desde mediados de 1980 surgen investigaciones didácticas en temáticas relacionadas con los procesos geológicos internos. Si bien la producción es muy heterogénea, existen ciertos consensos teóricos y una buena base de propuestas de enseñanza. Los estudios, salvo producciones aisladas,

se sitúan en el nivel básico y medio de la enseñanza y surgieron como consecuencia del revuelo académico que causó la consolidación de la tectónica de placas, que ocurrió en momentos cercanos a la apertura filosófica que se generó con la aparición del clásico libro de Thomas Kuhn (1970), *La estructura de las revoluciones científicas*.

La Geología recibió mucha atención por parte de historiadores y filósofos de la ciencia que analizaron sobre cómo se logró consenso acerca de la teoría de tectónica de placas. Proliferaron publicaciones en torno a esta cuestión lo que favoreció la producción del ámbito de la Didáctica de la Geología pues éstas funcionaron como insumo de propuestas didácticas.

Nosotros nos centraremos en la parte de esta producción que refiere a los procesos geológicos internos a través de distintos tipos de estudios: los relacionados con su enseñanza y/o su aprendizaje, su inclusión curricular y el diseño de herramientas didácticas. Además, encontramos interesante indagar, aunque someramente, las representaciones o concepciones de los docentes sobre los procesos geológicos internos y una publicación de didáctica universitaria que puede señalarse como un antecedente relevante en relación con su modo de abordaje.

2.2.3.1.- La producción acerca de la enseñanza y el aprendizaje de los procesos geológicos internos

Una parte importante de la producción de la Didáctica de la geología ha dedicado sus esfuerzos al desarrollo de temáticas relacionadas con la enseñanza y/o el aprendizaje de los procesos geológicos internos, particularmente con el modelo de tectónica de placas y muy marginalmente con el MCM. Muchos estudios se centraron en estos temas, por ejemplo: Valenzuela, *et. al.*, 2003; Gobert, 2001; Pedrinaci, 2001; Carmen Tizón *et al.*, 1998; Marques, 1998; Duschl, 1997; Praia y Cachapuz, 1997; Marques y Thompson, 1997; García Cruz, 1996; Arnold *et al.*, 1995; Praia, 1995, Ross y Shuell, 1993; Sharp, *et al.*, 1995; Schoon, 1992; Nussbaum, 1985, entre los más destacados; además, la revista ASTER (1995) publicó dos números completos dedicados a la Didáctica de la Geología, en los que existen varios artículos enfocados a la enseñanza y el aprendizaje de los procesos geológicos internos. Desde ya que estas citas no son uniformes y presentan aspectos parciales de la enseñanza y/o el aprendizaje de los procesos geológicos internos.

Presentaremos una adaptación de la síntesis que propone Pedrinaci (2001) respecto de la enseñanza y el aprendizaje de los procesos geológicos internos, cuya organización se sustenta en la concepción de obstáculo epistemológico (Bachelard, 1938), la idea de objetivo-obstáculo de Astolfi (1993) y una publicación (Gohau, 1995) que se centra en una investigación de los obstáculos epistemológicos de origen geológico. Pedrinaci considera que ciertos obstáculos epistemológicos condicionan la manera de interpretar los procesos naturales, asociando modelos geológicos del pasado con las representaciones mentales de los alumnos. Sin embargo, señala que esta asociación es limitada por las diferencias de contexto intelectual, cultural, tecnológico y social entre los alumnos de hoy y los pensadores del pasado (Pedrinaci, 2001).

Los obstáculos se presentan en forma separada en esta síntesis. Sin embargo, se señala que no son independientes unos de otros sino que se encuentran relacionados en las explicaciones de quienes los manifiestan. Sólo haremos una descripción somera de ellos.

a) la inmutabilidad aparente del paisaje terrestre

La perspectiva estática de la Tierra se presenta como obstáculo persistente que obstruye el aprendizaje sobre el origen de las rocas, la edad de la Tierra o el origen de las cordilleras, entre otros procesos.

b) el catastrofismo precientífico

Contrariamente al obstáculo anterior, la concepción catastrofista posee la capacidad de inhibir el cuestionamiento sobre los procesos geológicos o la búsqueda de explicaciones.

c) el origen de las rocas

En general, no percibimos la formación de ninguna roca, el ritmo y la profundidad a la que ocurren estos procesos hace que permanezcan ocultos ante la mirada de cualquier observador.

d) el tiempo geológico

La dificultad de representar valores temporales de las magnitudes requeridas en Geología se atribuye a la diferencia existente con la escala temporal humana (Brusi *et al.*, 1994).

e) la diversidad y amplitud de escalas espaciales

La comprensión de la dinámica interna de la Tierra exige el manejo de enormes escalas espaciales. Los procesos implicados en su estudio requieren una perspectiva global del planeta pero también la utilización simultánea de escalas menores, microscópicas incluso.

f) la inaccesibilidad de ciertos procesos geológicos

Los procesos geológicos que se originan y desarrollan en el interior de la Tierra, lo hacen generalmente a grandes profundidades por lo que son imposibles de ser observados. Tampoco es posible reproducirlos en condiciones de laboratorio.

g) la naturaleza de las rocas

El estado físico de las rocas en la superficie terrestre dificulta la representación de su comportamiento ante los esfuerzos, particularmente el referido a la deformación plástica.

2.2.3.2.- El análisis curricular y la producción de materiales didácticos sobre los procesos geológicos internos

Muchos trabajos se ocupan del análisis curricular y de la producción de materiales didácticos sobre los procesos geológicos internos, con diferentes estilos y enfoques. Para analizar estos aspectos, hemos seleccionado tres publicaciones de países que incluyen los procesos geológicos internos en su enseñanza: una de la “American Geological Institute” (2001), otra de la “Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra” (Brusi, 2001) y un libro publicado por el “Ministério da Educação de Portugal” (2002). La publicación española es una adaptación de una publicación de la “Earth Science Teachers’ Association” de Inglaterra. La inclusión de los procesos geológicos en el curriculum y su desarrollo varía de acuerdo al país y al nivel pero existen ciertos consensos básicos que resumimos a continuación.

En general, los procesos geológicos internos suelen ubicarse en asignaturas de diferentes, en Geografía o en distintas Ciencias Naturales (Ciencias Naturales, Geología, Ciencias de la Vida y de la Tierra, entre otras). Se ubican a partir del nivel curricular de 12 a 14 años, con mayor o menor grado de profundidad según la orientación curricular y nivel del que se trate. En nuestro país, estos contenidos suelen

estar dispersos en diseños curriculares de EGB3 dependiendo su desarrollo de cada jurisdicción.

La prescripción curricular suele explicitar la necesidad de asociar los contenidos conceptuales con las condiciones de realización de la actividad científica, situada en su contexto histórico y, en la medida de lo posible, asociar los procesos con contextos cotidianos. Más allá del modo de abordarlos, los procesos geológicos que suelen incluirse son los asociados con: los volcanes y terremotos, las placas tectónicas, los subsistemas terrestres y su asociación con la energía interna de la Tierra.

2.2.3.3.- Las representaciones de los profesores sobre los procesos geológicos internos

Nos interesa especialmente abordar ciertos aspectos sobre las representaciones o concepciones de los profesores acerca de la enseñanza de la deriva continental (Praia, 1995), por proporcionar información relevante sobre un contenido geológico muy relacionado con la CM y, además, porque su enfoque didáctico se alinea con nuestro abordaje, que será desarrollado más adelante.

Surge de analizar las representaciones epistemológicas y conceptuales de los profesores en servicio, sobre temas relacionados con dinámica interna de la Tierra, que los profesores poseen poco dominio conceptual sobre la dinámica interna de la Tierra y que presentan dificultades, en especial, en la comprensión de sus aspectos físicos.

La noción de teoría resulta especialmente útil para trabajar sobre las representaciones conceptuales, epistemológicas e históricas, en particular, de los profesores (Praia, 1995). En forma general, las representaciones sobre la naturaleza de la ciencia, y más aun de sus relaciones con la historia y con la ciencia conceptual –por así llamarla--, suelen resultar muy alejadas de la *actividad real* de hacer ciencia, al menos como así lo afirman o acuerdan autores como Toulmin, Popper, Kuhn, Bunge, Laudan y Giere, entre los más destacados (Gil, *et al.*, 2005).

Específicamente, en relación con la formación universitaria relativa a los procesos geológicos internos, hemos dado con una referencia aislada (Smith, 1995). Tal es el caso de una publicación didáctica dirigida a docentes universitarios de Geología y Geofísica en la que se presenta una serie de modelos sobre los procesos geológicos internos para incorporar la Historia de la Ciencia a las clases universitarias. Se alude,

particularmente, a los debates sobre los modelos del interior de la Tierra desde el siglo XIX a fin de trabajar los cambios de teoría que se suceden en un período de tiempo. Esta publicación refiere concretamente a la evolución de los modelos sobre la dinámica interna desde una perspectiva histórica. Esta propuesta se sustenta, a su vez, en la teoría epistemológica de Giere (1992) que forma parte de nuestro marco teórico, que desarrollaremos más adelante.

La formación epistemológica, histórica y disciplinar relativa a los procesos geológicos internos en el nivel universitario es un tema que presenta relevancia teórica por sus implicancias en la enseñanza sobre el funcionamiento del planeta en todos los niveles, incluso en la formación docente. Sin embargo no se dispone de investigaciones previas al respecto.

2.3.- Contexto de inserción de nuestro estudio

La TD de la TCM es el tema principal de nuestra investigación. De acuerdo con nuestra definición de Didáctica de las Ciencias (ver 2.1.3) se trata del proceso de gestión universitaria de una área geológica, que involucra su estructura conceptual y actividad científica asociada. Son fuentes de nuestro estudio, la Geología, la Geofísica, la Física, la Lingüística, la Epistemología, la Historia y la Sociología de la Geología.

A través del relevamiento hasta aquí presentado podemos afirmar que los pocos antecedentes sobre el tema de nuestro estudio se sitúan exclusivamente en los niveles educativos primario y secundario dando lugar a fuertes disidencias con el nivel universitario.

En relación con el conocimiento científico que circula en los niveles primario y secundario, el MCM se ubica como un modelo subsidiario pues, en general, los contenidos se articulan explicativamente a través del modelo de tectónica de placas. El lugar de la CM es el de un mecanismo de transferencia de calor que mueve las placas. Sin embargo, un análisis epistemológico general muestra que la tectónica de placas es una teoría cinemática mientras que la CM es dinámica. Las placas, como veremos más adelante, forman *un* modo de convección posible pero no el único. La CM es el mecanismo termo-tectónico que vincula las diferentes estructuras materiales de la Tierra a gran escala, entre ellas las placas.

El manto, al ser la estructura intermedia protagoniza la interacción con las estructuras extremas: las placas y el núcleo. La relevancia del MCM pasa inadvertida en los niveles educativos inferiores y, por tanto, muchas de las problemáticas didácticas ancladas en estos niveles no tienen trascendencia en el nivel universitario.

El análisis de los materiales didácticos y del currículo sobre los procesos geológicos internos de nivel universitario no ha sido abordado aún por la producción en la Didáctica de la Geología. Los problemas de enseñanza y aprendizaje antes expuestos tienen poca o casi ninguna ingerencia sobre nuestro objeto de investigación pues éstos a lo sumo podrían presentarse en las materias introductorias, que quedan fuera del alcance de nuestro estudio. El nivel educativo que nos ocupa es difícil de ser alcanzado por las investigaciones didácticas debido a la especificidad y multitud de modelos implicados.

La combinación de la temática, el nivel educativo en el que se asienta y la falta de antecedentes directos son condiciones determinantes que nos permiten anticipar que nuestra investigación es de tipo exploratoria.

Segunda Parte: Los marcos teóricos fuente de nuestra investigación

2.4.- Inserción conceptual de nuestra investigación en la Didáctica de las Ciencias Naturales

La Didáctica de las Ciencias Naturales tiene por objetivo reflexionar e intervenir en las prácticas de enseñanza y de aprendizaje. En especial, existe una preocupación destacada en incidir en la educación de la población en general y no, como hasta hace algunas décadas, exclusivamente en su finalidad propedéutica. Esta intención de intervención en la educación de la población, responde a una corriente de la didáctica conocida como la *ciencia escolar* (Meinardi *et al.*, 2002, Izquierdo *et al.*, 1999, Jiménez y Sanmartí, 1997). Ésta arraiga sus fundamentos epistemológicos en las ciencias cognitivas, por la influencia de los modelos cognitivos de ciencia en el diseño y fundamentación de su enseñanza (Izquierdo *et al.*, 1999).

La *ciencia escolar* se caracteriza por enseñar a pensar mediante modelos posibilitando un acceso escalonado hacia el conocimiento científico. Se le otorga cierta autonomía respecto de la ciencia que circula por los ámbitos científicos pues se atribuye valor a las representaciones científicas que logran construir los alumnos. Sin perder de vista el movimiento conceptual hacia la ciencia erudita, los contenidos escolares tienen originalidad y autosuficiencia, de modo de permitir un acceso escalonado hacia las formas científicas de modelización del mundo manteniéndose cercanos a las estructuras cognitivas y campos semánticos de los legos en situación de aprendizaje (Meinardi *et al.*, 1999). Si bien el origen de la ciencia escolar se sitúa en la intervención didáctica de los niveles educativos inferiores, su transferencia al nivel superior no presenta contradicciones. Si bien este enfoque surge en relación con la enseñanza en los niveles educativos más bajos, el aparato teórico que sustenta la ciencia escolar puede transferirse al nivel superior, en el que el acento no está puesto en lo que se pierde de los modelos científicos mediante la transposición sino sobre cómo se organiza el conocimiento a fin de volverlo enseñable sin perder su complejidad.

Ronald Giere considera que el modelo de ciencia que propone es útil a la Didáctica de las Ciencias pudiendo ser tomado como modelo epistemológico *soporte* del modelo de ciencia escolar (Giere, 1999). Una razón de peso para ello es que los estudiantes de ciencia son agentes cognitivos, al igual que los científicos, que tienen como meta la construcción y/o reconstrucción de modelos científicos. Dependiendo del nivel educativo sus representaciones serán más o menos lejanas a las de los científicos pero ambas comparten cuestiones relativas a la actividad de hacer ciencia, están inmersas en un proceso histórico y utilizan varios métodos para (re)producir conocimiento sobre el mundo. Los estudiantes del nivel superior pondrán en juego estrategias cognitivas parecidas a las de los científicos, la actividad de crear un modelo y la de recrearlo serán actividades cognitivas con varios elementos en común.

La ciencia escolar se origina en el *aprendizaje significativo* y la *TD* (Jiménez y Sanmartí, 1997). La significatividad del aprendizaje es una exigencia que limita y condiciona la actividad escolar porque la ciencia que se enseña debe tener sentido para el alumno con la finalidad de estimular y habilitar su capacidad de intervenir intencionalmente en el mundo. La significatividad del aprendizaje y la complejidad del conocimiento científico dependerán del nivel educativo, regulándose entre sí a través de

la TD. En los niveles educativos más elementales ésta se vuelve más radical contrariamente a lo que ocurre en la enseñanza superior en la que la complejidad del conocimiento científico se preserva, condición que otorga un carácter especial a la transposición en este nivel.

La ciencia escolar postula nuevos problemas a investigar. En especial, sobre los modelos teóricos y su relación con las analogías y las metáforas; el lenguaje y su contribución a la configuración de los hechos paradigmáticos; la metacognición y la evaluación escolar, entre otros. Se admite que los diferentes currículos de ciencias van a vertebrarse alrededor de modelos teóricos diferentes y elaborarán sus propios conceptos estructurantes y sus propios hechos paradigmáticos (Izquierdo *et al.*, 1999).

La ciencia escolar capitaliza, además, la noción de *concepto estructurante* (CE) (Gagliardi, 1986) que resulta ser una herramienta de suma utilidad para el análisis formal de la estructura de las disciplinas científicas eruditas y escolares. Se trata de conceptos disciplinares de muy alto nivel de inclusividad y abstracción, capaces de organizar teóricamente distintos conceptos y modelos disciplinares (Sanmartí e Izquierdo, 1997). Los CE dan lugar a la organización sintáctica y curricular de un área específica de conocimiento (Adúriz-Bravo, 2002). Según Izquierdo (1999) esta estructuración dejaría al descubierto los modelos irreductibles de las ciencias.

La ciencia escolar propone pensar a las estructuras disciplinares en modelos. Esta forma de organizar la ciencia es sumamente útil a nuestros fines pues el conocimiento científico se vuelve cada vez más complejo en el nivel superior y para profundizar en su análisis hay que organizar recortes disciplinares específicos. Los modelos, mediante sus conceptos y relaciones conceptuales arman tramas dotadas de coherencia y continuidad, habilitando distintos recorridos, que pueden ser generales o específicos. Los conceptos estructurantes permiten, a su vez, profundizar un aspecto específico, seleccionar y establecer un recorte disciplinar. En este sentido, funcionan a modo de enlaces entre estructuras disciplinares y habilitan un modo de bucear en ellas.

La CM subsume dentro de sí una gran variedad de modelos de orígenes disciplinares diferentes. Establecer un recorte disciplinar y profundizar en él es una condición necesaria para develar cómo opera la TD.

Las nociones de modelo y CE serán muy útiles a nuestros fines pues permitirán generar recorridos específicos a través de los cuales podremos analizar la TD.

2.5.- Nociones epistemológicas que enmarcan nuestro estudio

2.5.1.- La perspectiva de las Ciencias Cognitivas³ sobre la ciencia

El modelo cognitivo de ciencia (Giere, 1992) es considerado útil al desarrollo de la Didáctica de las Ciencias Naturales. Giere propone caracterizar epistemológicamente a la ciencia como una teoría cognoscitiva, en el sentido de que trata de la generación de conocimiento. Este autor no identifica a las Ciencias Cognoscitivas con la Psicología Cognitiva o los modelos computacionales de la cognición como tradicionalmente se lo hace sino que propone considerar a estas ciencias desde una perspectiva amplia. Así, introduce entre sus fuentes: partes de la Lógica y de la Filosofía, la Neurobiología Cognoscitiva, la Psicología Cognoscitiva, la Inteligencia Artificial, la Lingüística, la Sociología y la Antropología Cognoscitivas. No restringe a priori qué fuente se utilizará para explicar un determinado fenómeno de la ciencia sino que pretende unificar los distintos aportes de las ciencias cognitivas en una teoría única que pueda dar cuenta de cómo funciona la ciencia. Es, en este sentido, que Giere considera que se trata de una teoría unificada (Giere, 1992).

Esta unidad integra los contextos personal, social y cultural en los que se desarrolla la ciencia. Éstos son considerados como parte del conocimiento filosófico acerca de la ciencia, sin que con ello se interprete cierto absolutismo a un contexto particular. La ciencia se concibe como un constructo social en el que adquieren gran relevancia los intereses sociales y profesionales (Giere, 1992). La imagen sociológica de la ciencia permite explicar la existencia de desacuerdos en las fronteras de la investigación que no sólo se asientan en la racionalidad científica sino que incorporan a la explicación la interacción causal entre los científicos y el mundo.

2.5.2.- El realismo como marco de la teoría cognoscitiva

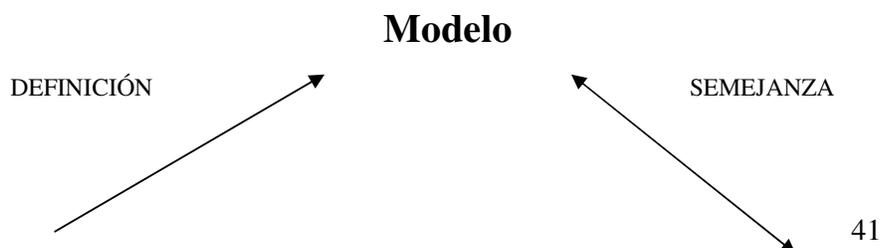
³ Utilizaremos indistintamente cognitiva y cognoscitiva.

El modelo cognoscitivo de ciencia que propone Giere (1982) se enmarca en las ciencias cognoscitivas, cuya idea central es que el ser humano produce representaciones internas, modelos internos sobre el mundo externo. Las representaciones suponen cierto tipo de *realismo* pues deben ajustarse al mundo, al menos en ciertos aspectos y grados, la mente no es un reflejo de la naturaleza, el mundo se presenta interpretado. Giere se considera un realista moderado.

Desde esta perspectiva, las teorías y los modelos son construcciones humanas que ajustan más o menos a los objetos el mundo. Son creaciones deliberadas para representar a la naturaleza. Cualquier forma de representación proporciona sólo una perspectiva del mundo, aduciendo que todas nuestras representaciones del mundo son parciales e imprecisas. A través de las interacciones con el mundo se puede distinguir cuáles son los modelos que se ajustan mejor bajo una perspectiva determinada. El mundo tiene una estructura global definida considerada muy compleja para ser abarcada completamente en una única representación, por lo que todas las representaciones son construcciones humanas resultantes de la experiencia individual y colectiva. Para no caer en el relativismo a ultranza, Giere considera que los resultados contingentes de la experimentación juegan un papel positivo en la determinación sobre si un modelo u otro se ajusta mejor a los aspectos del mundo sujetos aunque señala que el juicio científico está influido por otras variables. Los datos tienen menor peso según este autor que el que se han dado tradicionalmente los filósofos de la ciencia. Estas ideas se agrupan bajo un tipo de realismo conocido como *realismo perspectivo* (Giere, 1999).

2.5.3.- La noción de modelo científico en la teoría cognitiva

Los modelos son los medios con que los científicos representan el mundo para sí mismos y para los demás; son sistemas idealizados que tienen la intención de representar alguna porción del mundo. La conexión entre un modelo y el mundo real se expresa mediante afirmaciones, es decir, hipótesis (teóricas) que aseveran similitud, de modo específico y en un grado implícito de fidelidad entre el modelo abstracto y cualquier cosa del mundo real (Giere, 1999).



Conjunto de enunciados

Sistema Real

Relación entre conjuntos de enunciados, modelos y sistemas reales (Giere, 1992; pp: 108)

Una hipótesis teórica es una entidad lingüística, un enunciado o conjunto de enunciados que afirman cierto tipo de relación entre el modelo y un sistema real dado. Una hipótesis es verdadera o falsa según se mantenga la relación afirmada. Tradicionalmente, la relación entre el modelo y el sistema real suele pensarse como un isomorfismo pretendiendo que haya una correspondencia biunívoca entre ellos. Es posible aflojar los términos en los que se presenta dicha relación, en lugar de isomorfismo Giere propone que la relación entre el modelo y el sistema real sea de semejanza. Así, las hipótesis suponen una *semejanza* entre los modelos y los sistemas reales, en ciertos aspectos y grados. Los modelos no son simplemente estructuras matemáticas sino modelos “interpretados”. Por ello, los enlaces entre modelos no son conexiones lógicas sino relaciones de semejanza.

Para analizar el significado de la noción de modelo resulta indispensable distinguir tres niveles claramente diferenciados (Lombardi, 1998): (a) el sistema real, cuyas regularidades la teoría pretende describir, (b) el modelo, sistema abstracto que resulta del proceso de modelización y, cuando corresponda, (c) el modelo matemático, que constituye la estructura puramente sintáctica que expresa al modelo.

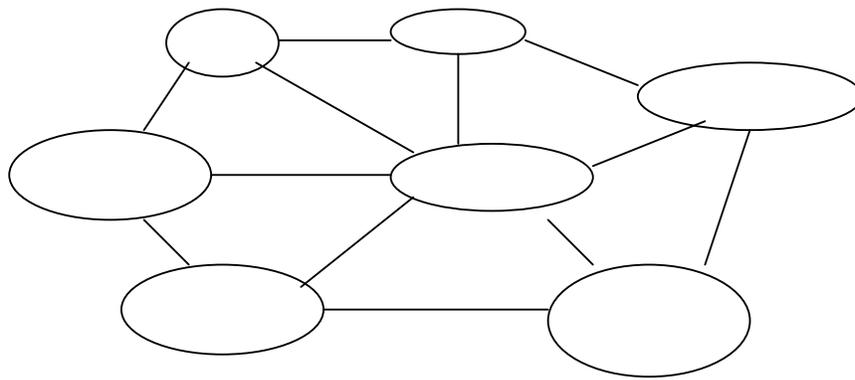
Cada problema científico que la ciencia intenta resolver define un recorte del sistema real cuya modelización da significado (contenido) a la teoría que pretende aportar conocimiento. Es decir, que la teoría no *actúa* directamente sobre el sistema real sino que está mediatizada por el modelo.

Desde el punto de vista cognitivo, es necesario realizar diferentes operaciones para apropiarse de una teoría científica. El proceso de modelización implica realizar un recorte del sistema real, su simplificación (de acuerdo al objeto de estudio), la postulación de entidades ideales y de estructuras que respondan, en algún grado, a las regularidades de las que la teoría pretende dar cuenta. Para interpretar un sistema formal habrá que dar

contenido a sus términos teóricos, asociándolos indirectamente a observables de la realidad externa. Los términos teóricos siguen siendo formas lógicas sin correspondencia directa con la realidad pero al estar interpretados son operadores en un modelo que pretende ser la representación mental (teórica) de esa misma realidad” (Adúriz Bravo et al., 1997).

2.5.4.- La noción de teoría

En este marco, las teorías son pensadas como un conglomerado o conjunto de conglomerados de modelos. Es decir, una población de modelos que consiste en familias de modelos relacionadas. Las teorías incluyen enunciados que definen la población de modelos que involucran y diversas hipótesis que los vinculan con los sistemas de la realidad. Las teorías se van haciendo cada vez más detalladas conforme vamos descubriendo nuevos aspectos del mundo. De igual forma crece el campo de los sistemas de la realidad que es cubierto por los modelos.



Representación parcial de familias de modelos (Giere, 1992; pp: 108)

2.5.5.- Disciplinas, modelos y representaciones

Las relaciones entre disciplinas está dirigida por la modelización: el conocimiento científico usa modelos sobre los que construye sus particulares puntos de vista acerca de lo que se considera la realidad, por lo cual diversas disciplinas distinguen el modo en el que la abordan contextual e históricamente. La ciencia consiste en una continua construcción, interrelación y revisión de los modelos y de las familias de modelos que emplea continuamente para hacer frente a la diversidad de sistemas reales. Cualquier “integración” entre disciplinas diversas debe, esencialmente, significar un modo

de comparar y relacionar entre sí modelos diversos y diversas estructuras de modelos (Arcà *et al.*, 1990).

Los científicos interactúan con objetos naturales y con sus propias representaciones o creaciones simbólicas, incluyendo oraciones, ecuaciones, gráficos, diagramas, fotografías, diseños de origen informático, etc. Estas creaciones son diferentes formas de representación que admiten los modelos y forman parte de un lenguaje específico con el que trabajan los científicos, incluso durante su formación. Es decir, que los modelos pueden expresarse a través de diferentes representaciones vinculadas entre sí. Dependiendo del campo científico en el que ancle un determinado modelo se utilizarán representaciones características que denotarán la especificidad de tal campo.

Según Giere, lo que los científicos hacen como agentes culturales influye de muchas maneras distintas lo que hacen como agentes cognitivos, por las implicancias que éstos tienen hacia otros ámbitos de su entorno social.

2.5.6.- Aspectos sociales de la ciencia

La modelización o construcción de un modelo como actividad es objeto de análisis de las Ciencias Cognoscitivas. Esta construcción, más allá de su creación, es realizada por diferentes agentes: los científicos que las crean, los profesores que las enseñan y los estudiantes que la aprenden; en este sentido, todos ellos son agentes cognitivos. Los modelos científicos son obras creadas por comunidades que, según ciertas especificidades, se agrupan en instituciones, interactúan a través de medios de comunicación muy eficientes y dan continuidad a su desarrollo conceptual, histórico y social. Fue sin duda Tomas Kuhn el filósofo de la ciencia que otorgó una importancia fundamental a las comunidades científicas y su devenir histórico como uno de los factores determinantes del progreso científico.

a) Las comunidades científicas

El progreso científico es caracterizado por Kuhn como el cambio de paradigmas a través de revoluciones científicas. La noción de paradigma ha gozado de muchas acepciones diferentes. Nosotros, en particular, en muchas ocasiones la consideraremos como sinónimo de modelo pues nos interesa desarrollar algunos aspectos de las

comunidades científicas que fueron ampliamente estudiados por Kuhn y que luego fueron incorporados por otras corrientes epistemológicas, entre ellas, el modelo cognitivo de ciencia que propone Giere. La noción de comunidad científica es una idea que comparten extensamente científicos, sociólogos y numerosos historiadores de la ciencia (Kuhn, 1971).

Para Kuhn una comunidad científica está formada por investigadores que practican una especialidad científica y tienen o han tenido una educación y una iniciación profesional similares. Las comunidades científicas están constituidas por personas formadas en un cuerpo complejísimo de teorías e instrumental, que constituyen una subcultura especial, en la cual sus miembros son el público exclusivo de sus trabajos de investigación y, a su vez, jueces mutuos. El trabajo creador individual está dirigido exclusivamente a otros miembros de la profesión, que comparten valores y creencias similares. Los problemas en los que trabajan los especialistas pertenecen a una empresa interna que consiste en aumentar, en amplitud y precisión, los acuerdos existentes entre las teorías y la naturaleza. Las comunidades científicas son productoras y, a la vez, validadoras del conocimiento científico (Kuhn, 1977).

A medida que pasa el tiempo, los modelos se articulan entre sí cada vez más, amoldándose a la naturaleza en un número creciente de enfoques y con mayor precisión. Hay una continua proliferación de especialidades científicas, en parte, por la extensión de las fronteras de la ciencia y, en parte, por la subdivisión de los campos existentes.

b) El sistema de comunicación científica

La creación de periódicos especializados y la fundación de sociedades son patrones institucionales que hacen a la constitución de una especialidad científica que ha adquirido prestigio propio. Los procesos de comunicación tienen una enorme influencia en la formación y articulación del conocimiento científico. La publicación, la lectura de publicaciones científicas y la búsqueda de información son tareas a las que los científicos dedican gran parte de su trabajo. El origen de las revistas especializadas está en la necesidad de disponer de un mecanismo que permita difundir los resultados de las investigaciones y evitar, mediante su publicación autógrafa, la apropiación de ideas por parte de otros investigadores.

En la actualidad todos los resultados de investigaciones se publican en revistas que sólo leen los miembros de una comunidad, quienes suelen conocerse entre sí, aunque tal vez no personalmente, y están al corriente de sus trabajos respectivos. Las revistas actúan como redes de comunicación e intercambio, como foros de educación y socialización de los nuevos científicos que comienzan su trabajo en una línea concreta de investigación. Los científicos jóvenes aprenden rápidamente quién es quién en un área determinada y qué investigadores son autoridades reconocidas por los demás especialistas. Vale la pena destacar que los seminarios, congresos y reuniones académicas desempeñan también un papel importante en la conformación de estas comunidades en la medida en la que ayudan a la difusión rápida de trabajos de investigación y favorecen su análisis y crítica por otros investigadores (Campanario, 1999).

Actualmente se publica un número enorme de revistas científicas, con frecuencias variables de publicación desde anuales hasta semanales y con diferentes formatos (electrónico o en soporte de papel). Además, para cada especialidad científica existe un orden tácito, generalmente implícito, de importancia de las revistas en las que publicar. También, existen revistas generales y específicas. A la hora de comunicar un resultado el investigador debe tomar la decisión de dónde hacerlo, decisión que determina el público al que se dirige. Por otra parte, esta elección contribuye con su acreditación personal como científico pues se somete a los procesos de arbitraje que posee cada tipo publicación (Rowland, 1999) y, con ello, al reconocimiento de sus colegas.

Las revistas científicas especializadas están destinadas a hacer público un conocimiento científico que se quiere comunicar y forman parte de una red de incumbencias temáticas. Las publicaciones científicas hacen públicos los resultados de las investigaciones pero primero deben someterse al arbitraje que cada revista propone a través de un comité editorial. Formar parte de éstos da al científico prestigio entre sus colegas y también poder de decisión sobre qué se publica y qué no. De hecho, algunos artículos no logran un acuerdo interno entre los miembros del comité que lo juzgan, a veces son rechazados y otras dan lugar a realizar revisiones por parte de sus autores. Ocasionalmente, puede suceder incluso que un artículo sea rechazado y que más tarde alguno de los resultados que se exponen en éste sea publicado por otro autor (Rowland,

1999). Estos mecanismos de acreditación de los resultados científicos pueden estar afectados por la pertenencia institucional de quienes los evalúan sobre todo cuando autores y árbitros son de escuelas científicas opuestas.

c) Los contextos de la actividad científica

Aunque los filósofos de la ciencia han prestado poca atención a la difusión del conocimiento científico y a la enseñanza, éstas constituyen una componente fundamental de la actividad científica.

Javier Echeverría (1995) considera que la enseñanza de las ciencias plantea problemas filosóficamente interesantes, por lo que incluye el *contexto de la educación* en su análisis de cómo se desarrolla la actividad científica. Atribuye su importancia al hecho de que la ciencia perdura como actividad gracias a la educación científica. Pero Echeverría no es el primer filósofo que pone la atención en la educación científica, Kuhn (1971) citó el *contexto de la pedagogía* en referencia al modo en el que se reproducen las comunidades científicas.

Desde la perspectiva de Echeverría, para analizar la actividad científica se puede pensar que existen cuatro contextos científicos: educación, innovación, evaluación y aplicación. Brevemente describiremos estos contextos con el fin de adentrarnos en el de la educación científica, considerado de nuestro interés. Si bien los contextos se presentan por separado se interrelacionan entre sí y se influyen recíprocamente.

(i) El contexto de innovación

El contexto de innovación puede pensarse como el clásico contexto de descubrimiento que se asocia con la producción de invenciones y novedades. En este contexto se incluyen cuestiones relativas a la capacidad creadora de quienes hacen ciencia y a los cambios que se producen en la ciencia cuando se incorporan estas innovaciones.

(ii) El contexto de evaluación

El contexto de evaluación es aquel que tradicionalmente se conoce como contexto de justificación. Echeverría involucra en este contexto otras cuestiones que pasaron desapercibidas en las posturas filosóficas tradicionales; entre éstas podemos citar:

la valoración de los hechos, las hipótesis, los problemas, los modelos, los descubrimientos y las innovaciones. En este sentido, los congresos, las sociedades científicas, las revistas especializadas y los libros de texto son expresiones paradigmáticas de este contexto. Las comunidades científicas desempeñan un rol fundamental en su definición. El contenido empírico, la capacidad predictiva y explicativa, el rigor, la axiomatización, la consistencia, la formalización, la belleza, la potencialidad heurística, la resolución de problemas, la simplicidad y la generalidad son algunos de los valores clásicos que se utilizan para evaluar el conocimiento científico.

(iii) El contexto de aplicación

Echeverría define el contexto de aplicación de la ciencia como aquel en el que se interviene adrede con la intención de modificar, transformar y mejorar algún entorno. En especial, las producciones y artefactos científicos sufren cambios cada vez más profundos e incorporan teoría en sus diseños dando lugar a alguna transformación en el mundo real.

(iv) El contexto de educación

El contexto de educación científica, según Echeverría, incluye dos acciones recíprocas básicas: la enseñanza y el aprendizaje de sistemas conceptuales y lingüísticos así como también de notaciones, técnicas operatorias, problemas y manejo de instrumentos. Los estudiantes de ciencias deben demostrar que poseen competencia para el manejo de los sistemas simbólicos y operatorios, condición determinante para ser reconocido o rechazado como posible candidato a devenir miembro de una comunidad científica concreta y acreditar e insertarse en el sistema científico.

La ampliación de los contextos científicos tradicionales que propone Echeverría plantea un vínculo entre la Didáctica de las Ciencias y la Epistemología a través del contexto de educación. Asimismo, la educación científica ha sido objeto de análisis filosófico como veremos en el siguiente apartado.

d) La educación científica

La enseñanza de la ciencia es el primer ámbito en donde la actividad científica tiene efectos reales, al transformar las mentes de las personas y estructurarlas conforme a los contenidos, reglas metodológicas y valores que caracterizan a la ciencia (Kuhn,

1961). La educación científica es la acción intencional con la que se materializa la génesis del conocimiento científico en los individuos.

La educación científica está regulada socialmente y posee sus propias técnicas de presentación, justificación, valoración y aplicación de los modelos científicos. Los contenidos de enseñanza son fijados previamente, en forma de planes de estudio para las distintas titulaciones, es decir, que hay una mediación social que delimita los conocimientos y las habilidades básicas del futuro científico (Echeverría, 1995).

Los procesos de educación científica marcan profundamente la intelección de qué son las teorías y las prácticas científicas, además de ser esenciales para la constitución de las comunidades científicas y, por ende, de los modelos científicos (Kuhn, 1977).

Los científicos trabajan a partir de los modelos adquiridos durante su formación sin conocer las circunstancias que les han dado su status. Estos modelos forman parte de una unidad histórica y pedagógica anterior y figuran en los libros de texto de los que aprenden su profesión los futuros científicos. Los estudiantes aceptan los modelos por la autoridad de los libros de texto y también de sus profesores sin cuestionarse su validez. Se trata de una educación que ha demostrado ser muy eficiente aunque se ha señalado que es muy estrecha y rígida (Kuhn, 1961).

e) Los libros de texto

El rol de los libros de texto en la formación científica ha sido objeto de diferentes análisis epistemológicos. Echeverría (1995) los recupera para objetivar la tradición de las comunidades científicas. Kuhn (1961, 1977) los distingue como un elemento esencial para analizar el devenir de las comunidades científicas. La sucesión de libros de texto refleja, al menos en parte, la evolución conceptual de una determinada especialidad.

En el proceso de formación profesional los investigadores transitan por la misma bibliografía técnica y han incorporado muchos aprendizajes idénticos de ella. En las Ciencias Naturales el estudiante depende principalmente de los libros de texto hasta que inicia sus propias investigaciones. Cuando se asignan lecturas de trabajos de investigación se restringen a los cursos más avanzados y a los que más o menos se inician donde

quedaron los libros de texto. Hasta las últimas etapas de la formación del futuro científico, el libro de texto substituye sistemáticamente a la literatura científica creadora que los hace posible.

Los libros de texto, tanto elementales como avanzados, exponen los modelos consensuados, ilustran muchas de sus aplicaciones y las comparan con experimentos y observaciones de condición ejemplar. Su finalidad es la de enseñar rápidamente al estudiante lo que su comunidad científica contemporánea cree conocer. Como pedagogía esta técnica de presentación es incuestionable. Pero cuando se combina con el aire generalmente no histórico de los escritos científicos se produce una imagen lineal y acumulativa de la ciencia, es decir, que ésta ha alcanzado su estado actual por medio de una serie de descubrimientos e inventos individuales, que al reunirse constituyen el caudal actual de conocimiento, lo que ha sido largamente cuestionado.

Es un objetivo de los textos enseñar los desarrollos conceptuales y procedimentales de los modelos, las relaciones entre los datos experimentales y los modelos teóricos. No tienen por objetivo explicar las idas y vueltas de la construcción de los modelos en juego sino más bien explicitar la última versión de estos, la más potente, la actualmente consensuada por la comunidad científica, obviando, por ejemplo, las dificultades históricas que surgieron o las condiciones sociales que permitieron desarrollar esa construcción particular. De todos modos, muchas veces cuentan con un capítulo introductorio que presenta algún desarrollo histórico del campo disciplinar sobre el que versa el texto. Así, los libros de texto comienzan truncando el sentido de los estudiantes sobre la historia de su disciplina, generalmente exhiben referencias dispersas a los héroes del pasado, generando la sensación de pertenecer a una extensa tradición histórica. Sin embargo, esta pertenencia es un poco engañosa pues los libros de texto refieren sólo a las partes del trabajo de los científicos del pasado que pueden verse como contribuciones al enunciado y a la solución de los problemas que exponen. Ya sea por selección o por distorsión, los científicos de épocas anteriores son representados implícitamente como si hubieran trabajado sobre el mismo conjunto de problemas fijos que el problema actual define, convalidando las metodologías científicas asociadas con éste (Kuhn, 1961). Por paradójico que parezca, un mayor énfasis en el desarrollo histórico y social de la ciencia apartaría demasiado al estudiante de los contenidos y métodos que constituyen el objetivo principal de la formación científica que deben ofrecer los libros de texto (Giere, 1999), lo

que se constituye en una distorsión sobre el funcionamiento del devenir científico, favoreciendo una imagen fluida y acumulativa de la ciencia.

2.6.- Los aportes de la Historia de la Ciencia

Hemos considerado el modelo cognitivo de ciencia de Giere como marco epistemológico fundamental que sustenta el modelo de ciencia escolar al que adscribimos nuestro estudio. El modelo cognitivo de ciencia formula el conocimiento científico en base a modelos, generando un desarrollo de corte evolutivo a diferencia del que sanciona Kuhn, de revoluciones científicas como procesos discontinuos que se manifiestan con características comunes. Sin embargo, Giere toma muchos elementos epistemológicos de análisis introducidos por Kuhn, lo que nos llevó a relevarlo como fuente primaria. Entre estos elementos, la Historia de la Ciencia es común a ambas fuentes bibliográficas aunque los recorridos e interpretaciones dadas sobre ella difieren. Para Giere, los procesos de selección de la información se depositan en el hecho de que son los historiadores quienes los realizan, signados por sus recursos cognitivos e inmersos en una determinada cultura historiográfica.

Los historiadores que se dedican a escribir la historia de una especialidad le confieren a su tema las fronteras prescritas en los libros de texto más recientes del campo que corresponda. Generalmente los registros se extraen de textos de la época en cuestión y de las fuentes científicas originales. Por ello, en la Historia de la Ciencia son pocos los temas que se pueden investigar sin atender al contenido de las ciencias pertinentes. El análisis de una época determinada lleva a examinar el contenido específico, tanto teórico como experimental, característico de ese momento. El historiador debe deshacerse de la ciencia que sabe, debiendo aprender el contenido específico de los textos y demás publicaciones del período que estudia. Además, existe un interés creciente de la historiografía actual de la ciencia por el papel de los factores no intelectuales, particularmente los institucionales y los socioeconómicos asociados con el desarrollo de la ciencia (Kuhn, 1977).

Desde la perspectiva cognoscitiva de la ciencia el cambio en ciencias es más evolucionista que revolucionario. Esto implica que el cambio es gradual, se reorganiza un nuevo sistema conceptual de mayor poder explicativo respecto del modelo anterior. La

Historia de la Ciencia provee descripciones de cómo se ha tratado de hacer ciencia y muestra que los modelos son provisorios y que se suceden unos a otros. Un modelo que reemplaza a otro no contiene al anterior, puesto que implica una nueva forma de pensar y modelar la realidad en distintos términos, se trata de un cambio que afecta no sólo a los conceptos sino también a sus relaciones, opera un cambio de sistema conceptual en la concepción global del sistema. Esto no quita que un nuevo modelo *sí* contenga las explicaciones y predicciones del anterior, pero añade nuevas, lo que motiva la sustitución.

Las diferencias entre ambas posturas (Kuhn vs. Giere) difieren en el modo en el que se produce el cambio de modelo, con o sin ruptura, materializando o no un modelo con continuidad conceptual respecto del anterior. No es nuestro interés centrarnos en cómo se produce el cambio pero asumiremos en nuestro trabajo el modelo de cambio evolucionista por ser afín al desarrollo histórico de la TCM, como veremos más adelante.

Existe un estudio (Thagard, 1992) que se enrola en las ciencias cognitivas y analiza la evolución científica en términos del cambio conceptual y la coherencia explicativa de un modelo. Thagard desarrolla un capítulo en el que analiza los cambios que se producen en la estructura conceptual asociada con la teoría de la deriva de los continentes de Wegener y la teoría de tectónica de placas. Este autor analiza cómo fue cambiando esta estructura evaluando el cambio conceptual a través del surgimiento de nuevos conceptos y de la reorganización estructural que se produce cuando se incorporan a la estructura teórica anterior.

Giere en su libro desarrolla un capítulo específico de corte histórico que trata sobre la consolidación del modelo de tectónica de placas, en el que aplica su modelo cognoscitivo de ciencia. El autor releva los libros de texto de la época y selecciona una serie de datos históricos para enhebrar los hechos a la luz de la comunidad científica de la época, sacando a relucir los recursos cognitivos de sus miembros y sus decisiones en función de sus intereses profesionales.

Existe un elemento común a todas estas posturas: el disenso entre escuelas rivales, entreverando las evidencias con las hipótesis teóricas. Estos análisis epistemológicos persiguen el fin de explicar cómo ocurren los cambios de teorías por lo que se discute el valor de unos aspectos por sobre otros. Nosotros no profundizaremos esta

discusión porque escapa a los límites de nuestro estudio. Seleccionar algunos elementos de la Historia de las Ciencias da lugar a ampliar la mirada sobre la producción de conocimiento científico y, con ello, de situar nuestro estudio didáctico.

2.7.- Los campos controversiales

Los miembros de una comunidad científica se ven a sí mismos y son considerados por otros como exclusivamente responsables de la investigación de todo un conjunto de objetivos comunes, que incluyen la preparación de sus propios sucesores. Dentro de tales grupos la comunicación es casi plena y el juicio profesional es, relativamente, unánime. Habitualmente los límites de la bibliografía general constituyen las fronteras de un tema científico y cada unidad, generalmente, tiene un tema propio. En las comunidades científicas hay escuelas, es decir, grupos que enfocan un mismo problema desde puntos de vista diferentes. Aunque en las Ciencias Naturales las escuelas son más escasas que en otros campos, suelen estar en competencia.

Los miembros de una comunidad científica afianzada trabajan a partir de un modelo o una familia de modelos relacionados que forman parte del consenso logrado, lo que les permite investigar los fenómenos de interés aumentando la eficiencia con la que la comunidad científica resuelve los problemas nuevos que se presentan.

La transición de un modelo a otro suele implicar competencias entre escuelas diferentes que compiten por el dominio de un ámbito. Una vez consensuado un nuevo modelo el número de escuelas se reduce casi inevitablemente a una, dando lugar a una práctica científica más coherente y eficiente.

Oscar Nudler (2002) muestra la potencialidad del estudio de las controversias como herramienta para analizar el cambio y el progreso en ciencia. Este autor considera que si bien han existido en la historia de la ciencia episodios marcados por fuertes discontinuidades o rupturas, ello no implica que no haya existido también una importante continuidad a través de esos mismos episodios. Introduce la noción de *campo controversial*, que se funda en la tendencia que muestran las controversias a propagarse y a generar otras controversias o a conectarse con otras controversias en marcha, dando lugar a una familia de controversias. Se dice que las familias de controversias se interrelacionan en

un campo controversial particular, ya sea que pertenezcan o no a la misma especialidad científica. Por lo general, desde esta perspectiva, existe una relación de correspondencia entre la estructura de los campos problemáticos y la estructura de los campos controversiales.

Algunos campos controversiales experimentan un proceso de transformación, pudiendo atravesar diferentes fases. La fase es progresiva si el proceso contribuye a poner de manifiesto y profundizar nuevos aspectos, relaciones o problemas relacionados con los objetos de indagación en cuestión. En cambio, si un campo controversial entra en una fase en la que hay reducción u obstaculización de las posibilidades de descubrimiento y profundización, se dice que la fase es regresiva.

El desarrollo de un campo controversial supone la existencia de algún terreno común formado por supuestos o problemas compartidos que no están sometidos a discusión, a partir de los cuales se plantean los desacuerdos. Este terreno común puede ser variable en extensión pero si no existe puede haber conflicto aunque no controversia, en el sentido de acuerdo racional. Esto no quiere decir que los participantes de una controversia sean necesariamente conscientes de la existencia y extensión del terreno común. Nudler considera que un campo controversial es normal cuando sus participantes desacuerdan sobre la base de un terreno común amplio y en su mayor parte implícito sobre el que sí acuerdan. El progreso que se logre en un campo controversial normal no suele ser capaz de alterar los supuestos fundamentales.

Sin embargo, cuando estas alteraciones no se producen por mucho tiempo es probable que el campo controversial tienda a estancarse y adquiera un carácter regresivo. Este bloqueo conceptual puede revertirse a partir de la intervención de un tercer actor, que refiere más a un individuo que a una corriente de pensamiento. Se trata de un nuevo elemento que participa del campo controversial, desafía a los participantes tradicionales poniendo en cuestión sus supuestos. Si este actor es, finalmente, tenido en cuenta se inicia un proceso de refocalización, es decir se realiza una evaluación de los supuestos comunes.

La refocalización es una transformación progresiva que consiste en la ampliación del campo controversial, relevando y poniendo el foco de la discusión en algunos supuestos que antes permanecían subyacentes u ocultos.

También puede ocurrir que la transformación no asuma la forma de un cambio de foco produciéndose una *sustitución* total del terreno común por uno nuevo. Esto ocurre de un modo gradual y cuando se afirma que se ha constituido un nuevo campo controversial, éste tendrá elementos de continuidad con campos anteriores. Incluso hasta cuando se trate de un caso extremo de cambio conceptual, es posible discernir una herencia conceptual por lo que, en última instancia se atraviesa una fase de refocalización.

Los campos controversiales propuestos por Nudler no implican que se renuncia a los aspectos de ruptura y permiten conceptualizar las continuidades históricas. A diferencia del modelo kuhniano, las controversias no significan inconmensurabilidad entre posturas rivales, dado que poseen un carácter dinámico y se transforman de modos insospechados a través del tiempo.

La noción de campo controversial como mecanismo de cambio y progreso científico ha sido aplicada a la controversia contemporánea sobre la irreversibilidad del tiempo (Lombardi, 2002) y a una controversia pasada conocida como la radiación del cuerpo negro (Barrachina, 2002). Ambos estudios son de corte epistemológico, en el sentido de caracterizar los elementos definidos por Nudler sobre las controversias, identificándolos en su marco histórico y conceptual.

Nosotros juzgamos que la noción de campo controversial es muy adecuada para caracterizar la génesis y el desarrollo socio-histórico del dominio de investigación asociado con la CM, aunque nuestro interés no radica en identificar tales elementos sino más bien utilizar la noción de campo controversial para caracterizar el dominio histórico de investigación relativa a la CM.

2.8. A modo de cierre de la Segunda Parte

En esta Segunda Parte del Capítulo 2 hemos desarrollado una serie de marcos teóricos útiles al desarrollo de nuestro estudio. En primer lugar hemos expuesto escuetamente la ciencia escolar como modelo didáctico en el que se ampara nuestra investigación y hemos justificado por qué creemos que el nivel educativo universitario puede ser un nivel de anclaje de este modelo didáctico.

Al amparo del modelo de ciencia escolar, hemos destacado la importancia de la noción de modelo y también hemos asumido que las teorías son familias de modelos. Hemos destacado cuál es la función de los libros de texto en la educación científica y, también introdujimos la noción epistemológica de campo controversial, que nos será de utilidad para evaluar la evolución del MCM pues, tal como vimos, se trata de una construcción sociohistórica que se vincula a través de la noción de comunidad científica y se trata de una teoría en plena actividad.

Tercera Parte: La transposición didáctica a través de los libros de texto

2.9 La transposición didáctica

En este apartado desarrollaremos la base teórica asociada con la TD. Este dispositivo didáctico fue definido originariamente en el ámbito de la didáctica de la matemática, pero dada su potencialidad teórica ha tomado el lugar de una idea central en las otras didácticas (Davini, 1995).

Según Frigerio (1991) la TD es el conjunto de las mediaciones adaptativas que operan sobre el saber científico volviéndolo un saber escolar. Estas mediaciones operan en distintos niveles educativos, cada nivel en su especificidad conserva lo que le es posible del conocimiento producido científicamente.

La designación de contenidos a enseñar se produce en forma institucional y se inscribe en un tiempo y lugar concretos. Esta designación involucra prescripciones curriculares, libros de texto y las adaptaciones que realiza el profesor cuando se apropia de estas herramientas que guían su práctica dando lugar a un contenido a enseñar en el aula a través de la puesta en práctica de la planificación del docente y, por último, un contenido enseñado a los alumnos (Gandara y Gil, 1995).

Cajas (2001) sitúa la TD como un complejo proceso de movimiento de saberes que tienen origen en la comunidad científica y se dirige hacia la comunidad educativa. La

TD adquiere se modifica cuando pensamos en la educación superior, pues es la misma comunidad la que gestiona los saberes, es la misma comunidad la que reorganiza el conocimiento que se produce con un formato didáctico, que le es útil a la hora de enseñar los modelos científicos en la formación superior.

2.9.1.- El contexto teórico de introducción de la TD

Debido a la centralidad que ocupa la TD en nuestro estudio es que acudiremos a su fuente original (Chevallard, 1995) para así lograr una introspección profunda de los aspectos de ésta que apuntan a nuestros objetivos. En este sentido, haremos una selección de aquellos aspectos que son afines a nuestros intereses y dejaremos fuera de nuestro análisis los que se asocian con los niveles de la enseñanza de los niveles básicos (primario y secundario).

La TD es una herramienta teórica que establece la particular relación que existe entre un modelo científico y el conocimiento que es enseñado en las aulas. Ives Chevallard (1985), su autor, define la TD como el pasaje del *saber sabio* al *saber enseñado*.

Es bueno a esta altura unificar nuestro lenguaje. Dado que ahondaremos en la propuesta de Chevallard, vale la pena precisar su terminología en función de nuestra construcción previa. En la edición en español de su libro hay una nota del traductor muy significativa, que expresa que a la hora de traducir *savant*, se refiere al saber académico. En esta nota se explicita que el saber académico es el que hace referencia al ámbito de su producción, es decir, a los investigadores y productores de este conocimiento y a sus prácticas relacionadas. Así, nosotros identificaremos al saber sabio con “la ciencia”, es decir, con los modelos científicos y las comunidades científicas que los producen y que se asocian por especialidad. Toda vez que haga falta sustituiremos estos términos de modo de comenzar a dibujar una coherencia semántica en nuestra tesis.

Chevallard define al sistema didáctico como la relación que se establece entre un docente, los alumnos y la ciencia. Pone en cuestión a qué se denomina ciencia en este sistema, llamando la atención sobre las relaciones que se entablan entre las prescripciones curriculares y la ciencia enseñada y, además, sobre la relación de ésta con la ciencia

erudita. La TD remite al pasaje de la ciencia erudita a la ciencia enseñada, indicando la existencia de una distancia obligada entre ambas.

En lo que respecta a la Didáctica de las Ciencias como campo de investigación, la TD es una herramienta que posibilita una mirada analítica sobre cuestiones que aparecen naturalizadas brindando la posibilidad de ejercer una vigilancia epistemológica del acto de enseñanza, cuestionando y reflexionando sobre cuestiones que parecen obvias. Para Chevallard, la ciencia es en sí misma un objeto de interés de la investigación en didáctica porque su pertenencia al sistema didáctico se configura debido a las transformaciones que sufre al pasar de la potencialidad a la acción a través del sistema didáctico. La ciencia es *la* referencia a la que debe acudir el sistema educativo para dictaminar los contenidos de enseñanza. La ciencia, en este sentido, preexiste a la intención de enseñanza. Cuando un contenido científico es designado para ser enseñado, en algún punto se está mirando al ámbito científico al que pertenece y éste *observa* de alguna forma lo que está pasando allí donde se enseña, existe cierta vigilancia sobre qué y cómo se enseña la ciencia.

Chevallard alude a la *noosfera* como un ente teórico que involucra la vigilancia que se realiza socialmente cuando ocurre la TD. Este control es ejercido desde lugares sociales diferentes, involucra a la sociedad en general y a la comunidad científica, en particular.

2.9.2.- Los ámbitos y funcionamientos del saber

Posibilitar la enseñanza de un determinado modelo científico implica someterlo a deformaciones que lo hacen apto para ser enseñado. El modelo enseñado es un producto diferente al modelo designado como *a enseñar*. Chevallard denomina al modelo enseñado como *saber enseñado*. Éste es exiliado de sus orígenes y separado de su producción histórica, en la esfera científica. El lugar de la ciencia en el proceso de transposición permite articular el análisis epistemológico con el didáctico, convirtiéndose en guía del buen uso de la Epistemología para la didáctica (Chevallard, 1998).

La TD relaciona dos ámbitos intrínsecamente diferentes porque el funcionamiento académico es distinto del funcionamiento didáctico, están relacionados pero no se superponen. La intervención del ámbito científico puede ocurrir de diferentes

formas. Suele ocurrir, por ejemplo, que la ciencia se vuelva obsoleta en el ámbito escolar pues las novedades que se producen en el ámbito científico no se trasladan de inmediato al ámbito escolar, situación que amerita la intervención del ámbito científico a fin de actualizar la ciencia que circula por las aulas. Otra forma de intervención, por ejemplo, se lleva a cabo a través de las lecturas críticas que pautan las editoriales antes de publicar un libro de texto científico a fin de evitar las *sustituciones patológicas* (Frigierio, 1991) de los contenidos científicos, es decir, su desnaturalización.

2.9.3.- Los modelos didácticos y los modelos científicos

Los modelos científicos son sometidos a mecanismos precisos que lo extraen del ámbito científico y lo insertan en el ámbito didáctico. Llamamos *modelo didáctico* al que resulta de realizar este tratamiento (Adúriz-Bravo y Galagovsky, 1997). Consideraremos que un modelo didáctico es una representación de orden superior (modelo del modelo científico) obtenida a través de la TD. El modelo didáctico es intrínsecamente diferente del modelo científico que le sirve de referencia. Tanto el ambiente epistemológico como la significación y el alcance de los conceptos que estructuran estos dos tipos de modelos son intrínsecamente diferentes (Joshua y Dupin, 1993).

Retomando la visión de modelos de las ciencias cognitivas y basados en trabajos anteriores (Adúriz-Bravo y Bonan, 2006; Adúriz-Bravo y Bonan, 2003; Adúriz-Bravo *et al.*, 2001; Adúriz-Bravo y Galagovsky, 1997; Adúriz-Bravo *et al.*, 1997) consideramos que un modelo didáctico puede preservar el nivel de complejidad del modelo científico o quizás sólo las formas (la “arquitectura” lógica) y que estas transformaciones están orientadas por la finalidad de la enseñanza que se persiga.

Es una cuestión central de esta investigación develar cómo se produce un modelo didáctico a partir de un modelo científico particular, el MCM. Es decir, comprender en profundidad la función de la TD de la TCM.

2.9.4.- Contexto general de concepción de la TD

Chevallard distingue dos sentidos diferentes de la TD: *stricto sensu*, al que refiere a la transformación de un modelo científico en su versión didáctica. Y *sensu lato* a la investigación científica del proceso de TD.

La TD puede discriminarse como dos procesos diferentes: en el pasaje del modelo científico al modelo didáctico y, de éste, al modelo enseñado. El primer pasaje se considera de fundamental importancia para la investigación didáctica, como afirma Chevallard porque marca el salto de lo implícito a lo explícito, de la práctica a la teoría, de lo preconstruido a lo construido.

Los estudios más frecuentes sobre la TD in stricto sensu se dedican a algunos de sus efectos más espectaculares como, por ejemplo, la creación de modelos didácticos que se desvinculan de sus referentes directos (los modelos científicos) o las sustituciones patológicas, que ponen de manifiesto la desconexión del modelo didáctico con el modelo científico.

La desnaturalización del proceso de TD y el análisis de la efectividad de un modelo didáctico es la condición de ruptura epistemológica que permite al didacta deshacerse de las evidencias y de la transparencia del universo de la enseñanza. Los hechos ya no vienen dados como irrenunciables sino que se someten a la mirada analítica, a la vigilancia epistemológica que la didáctica debe observar constantemente (Chevallard, 1995).

Esta vigilancia epistemológica apunta a conceder especial atención a los diferentes actores que se involucran en el proceso: el docente, el técnico curricular y el autor de los libros de texto. Cada uno en su ámbito instituye una norma didáctica que tiende a constituir un modelo didáctico distinto del modelo al que realmente da lugar. Éste es el modo en el que ejercen su normatividad, sin asumir conscientemente la responsabilidad epistemológica de este poder creador de normas. Por otra parte, la aprobación o el rechazo del científico especialista actúa sobre cada tipo de actor involucrado pero todos ellos sitúan esta apreciación como algo exterior a su proyecto y ajeno a su lógica interna. Esta apreciación puede ser considerada o puede acompañar dicha lógica pero raramente se integra a ella porque existe una imposibilidad de tomarla en cuenta debido a su génesis epistemológica, por provenir del ámbito científico, epistemológicamente diferente del ámbito educativo.

Chevallard realiza una comparación muy interesante: compara los efectos de la vigilancia epistemológica sobre la construcción de los modelos didácticos con el lugar que ocupa la reconstrucción histórica de los modelos científicos en relación con su enseñanza en el seno de la comunidad científica. La presentación didáctica de los modelos científicos es una versión más o menos degradada de su génesis histórica y de su estatuto actual, la enseñanza, de hecho, propone una epistemología artificial (Chevallard, 1995).

Chevallard establece la existencia de una diferencia entre lo que pertenece propiamente a un campo disciplinar y lo que implícitamente está presente pero que permanece invisible en alguna medida. Para ello define las *nociones científicas* como aquellas que se hacen explícitas en el discurso y, por otra parte, las *nociones paracientíficas* es decir, las que permanecen implícitas. Las nociones paracientíficas se ocultan para privilegiar cierta lógica práctica en función de la enseñanza. Este sentido práctico excluye la lógica que en éste se expresa, es decir, su contexto conceptual de inserción. Además define las nociones *protocientíficas* que se sitúan en un nivel aun más profundo, más implícito que las nociones paracientíficas. Las nociones protocientíficas son, en ocasiones, aquellas que subyacen a la definición precisa de una noción paracientífica. Por ejemplo, si consideramos que la *viscosidad* es una noción científica, la noción de *campo de velocidades* que subyace a la viscosidad es una noción paracientífica. La noción de *operador vectorial* es una noción protocientífica que subyace, a su vez, a la de campo de velocidades.

Una buena TD puede subsumir, en su construcción, algunas orientaciones provenientes del ámbito de producción de la Didáctica de las Ciencias. Chevallard encuentra especialmente interesante una línea de investigación que consiste en intentar *delimitar ventajosamente* la génesis sociohistórica de la ciencia designada como objeto de enseñanza. Para ello, sugiere que se cree una epistemología artificial que deje de lado los callejones sin salida, los fracasos, pero que redespiegue toda la riqueza de los desarrollos fecundos y a veces olvidados de la construcción histórica del saber.

Nosotros creemos que estos callejones sin salida son inherentes a la construcción de los modelos científicos y exhiben cómo se construye la ciencia. En consonancia con los marcos teóricos antes desarrollados coincidimos con Chevallard en involucrar la construcción histórica de la ciencia pero creemos que los modos de operar del mecanismo

de construcción científica, en particular, las controversias, son también materia de enseñanza.

2.9.5.- Identificación de las operaciones subsumidas en la TD

Pondremos especialmente atención a la definición que hace Chevallard, citando a Verret (1975), sobre los procesos encadenados que ocurren desde que la ciencia se produce hasta que es enseñada y acreditada por un sistema didáctico. No adoptaremos la terminología utilizada por Verret sino que la adaptaremos a la que venimos definiendo.

Verret afirma que la administración del sistema didáctico supone ciertas operaciones a realizar sobre la ciencia y otras a realizar sobre la acción de administrarla en sí misma. Las que actúan sobre la ciencia son: la *desincretización*, la *objetivación* y la *programación de los aprendizajes*. Y las operaciones que actúan sobre la administración son la *publicidad* y el *control social de los aprendizajes*. Veamos cómo se definen y qué características presentan:

a) La desincretización

La desincretización se define como el proceso por el cual se delimita la ciencia en campos de conocimiento específico que dan lugar a prácticas concretas de aprendizaje especializado. Esta operación indica que pensando en un lego que aprende habrá que producir un recorte conceptual que conduzca a la demarcación de modelos parciales que, en principio, se expresen en un discurso aparentemente autónomo.

Claramente, en el nivel educativo que nos ocupa, deben ser los especialistas en dicho campo quienes tengan el poder de realizar semejante distinción. La desincretización, en este caso, pondrá a los especialistas a trabajar sobre las familias de modelos que se conectan en dicho campo, a seleccionar conceptos y relaciones conceptuales, desglosando los modelos en partes autónomas.

Este proceso lleva a identificar las nociones científicas y las paracientíficas, estas últimas dadas a conocer a través de una organización conceptual. Si bien su reconocimiento es implícito, porque es a través de los criterios de selección y agrupamiento que se infiere, no es un objetivo de la TD explicitar estas nociones. Las nociones científicas y

paracientíficas constituyen el objeto del discurso y las nociones protocientíficas, si bien están implícitas en la construcción del discurso, permanecen ocultas para el lego al que están destinadas (Chevallard, 1995). La selección de estas nociones es inherente a la desincretización. Especialmente en el nivel universitario, esta operación es realizada por los científicos y su vigilancia epistemológica implica poseer una visión sincrética del campo disciplinar en cuestión.

b) La objetivación

Realizar una TD implica excluir del discurso didáctico que se crea a la persona que la realiza. Esto da lugar a un proceso de *despersonalización* u *objetivación* de la ciencia. La construcción de un discurso didáctico supone una transformación del conocimiento científico, en la que el especialista debe tender a abandonar su subjetividad. Al menos su intención debería ser alcanzar la objetividad conceptual. Este intento de objetividad implica, en alguna medida, que realice ciertas disociaciones del pensamiento personal al realizar su producción discursiva, que se despoje de sus creencias en función de un sujeto cognoscente destinatario del discurso.

c) La programación de los aprendizajes y de los controles

La *programación de los aprendizajes* es definida originalmente por Verret en conjunción con la *programación de los controles* y se asumen como la secuenciación razonable que permite una adquisición progresiva de los conocimientos expertos. Esta operación junto con la desincretización suponen una doble ficción, en primer lugar, la afirmación implícita de distinguir al menos ciertos conceptos de las relaciones en las que están implicados y, en segundo lugar, la afirmación de la posibilidad de realizar una reconstrucción acumulativa del conocimiento a partir de semejante diferenciación (Josua y Dupin, 1993).

La programación de los controles refiere al control social de la enseñanza, al sistema de acreditación institucional, tema que escapa a nuestros objetivos.

d) La Publicidad

La publicidad es una operación según la cual se expresa explícitamente la ciencia a enseñar, tanto en extensión como en comprensión. Este “dar a conocer” implica explicitar la construcción del conocimiento científico. Es el acto de poner a

disposición de otros el entramado conceptual de un campo particular. Esta operación en el nivel universitario avanzado resulta sumamente importante. La publicidad es el modo de dar a conocer los modelos, la forma en la que son construidos, las representaciones que se utilizan para ello, los datos, las técnicas operatorias, etc.

2.9.6 - La textualización de la ciencia a enseñar

Las operaciones recién descritas ocurren bajo un patrón secuencial cuando se realiza una TD, aunque algunas de ellas son sincrónicas entre sí. Chevallard define la *preparación didáctica* como una *puesta en texto del saber*. La preparación didáctica que realiza cualquier agente (docentes, técnicos curriculares y autores de libros de texto) exige plasmar la ciencia a enseñar por escrito. Esta textualización se produce por la exigencia discursiva de explicitar la ciencia a enseñar, delimitarla, secuenciarla en parcelas y, con ello, comunicarla.

La exigencia de explicitar discursivamente el conocimiento científico conduce a la delimitación de conocimientos parciales, que se expresan en un discurso aparentemente autónomo, (re)crearlo en función de una progresión que se organiza para estructurar el discurso.

Los agentes involucrados en la textualización tienen conciencia de la aparente autonomía que otorgan a los conceptos que participan de la desincretización. Aunque raramente explicitan esta independencia suelen considerarla como didácticamente útil. Además, al textualizar se suponen ciertas nociones anteriores (las nociones protocientíficas) que hacen al sincretismo de la ciencia que se quiere enseñar.

La desincretización produce, a su vez, la descontextualización de la ciencia a enseñar, su extracción de la red de problemas científicos en los que está implicada, red que le da su sentido completo. Según Chevallard, se produce una ruptura constitutiva del saber en su movimiento de creación y realización. Los agentes que realizan la TD seleccionan qué aspectos de la ciencia tienen intención de enseñar. En especial, en el nivel universitario avanzado, esta descontextualización generalmente deja fuera los aspectos asociados con las idas y vueltas conceptuales y los marcos históricos en los que se desenvuelve la comunidad científica (Ver 2.5.9).

2.9.7.- Los libros de texto como textualizadores de la ciencia a enseñar

Podemos decir, sin perder generalidad, que los libros de texto representan una de las formas fundamentales en las que se textualiza la ciencia a enseñar. Además, también hemos relevado el lugar central que tienen en la formación científica pues no sólo rigen la formación sino que señalan las fronteras conceptuales establecidas en el campo en cuestión, en un momento particular. Los autores de los libros de texto del nivel universitario avanzado son científicos especializados que hacen pública la construcción de sus modelos.

En especial, creemos que una forma fundamental de analizar la TD de la TCM puede realizarse a través de los libros de texto. Para ello habría que rastrear las operaciones que en estos se realizan. Es decir, analizar cómo se desincretiza, se objetiva, se publica y se programa la ciencia a enseñar a través de los libros de texto.

A principios de 1990 se publicó una obra (Grosbois *et al.*, 1992) que responde a una investigación sobre cómo se llevan a cabo algunas de las operaciones implícitas en la TD. Se analiza la TD como herramienta teórica a través de un CE de la Biología (la respiración) en el secundario. Nuestro abordaje de este trabajo es limitado porque su pertenencia disciplinar excede nuestro conocimiento pero nos interesa el enfoque asumido por esta investigación, es un antecedente relevante para nuestro estudio.

Las autoras definen la TD como una cadena didáctica, es decir, una serie de engranajes institucionales que ejecutan la tarea de estructurar el currículo. Así el conocimiento científico se legitima en diferentes esferas: la esfera científica que publica los resultados originales, la formación docente, la esfera escolar y el currículo en funcionamiento que se desarrolla en situaciones didácticas. El conocimiento científico se legitima en la educación formal a través de las instituciones y los currículos oficiales y, estos últimos, se concretan a través de los libros de texto escolares.

Las autoras comparan libros de texto anteriores y posteriores a una reforma curricular que se realizó en Francia con el fin de actualizar los programas de biología. Seleccionan dos de las operaciones subyacentes a la TD para su análisis: la objetivación y la desincretización. Contextualizan el concepto de respiración en su evolución

histórica a fin de acrecentar la vigilancia epistemológica. Acuden a obras de corte histórico y epistemológico para fundamentar las decisiones estructurales necesarias para el análisis.

Acerca de este estudio, nos interesa, especialmente, que las autoras hayan analizado libros de texto y seleccionado operaciones subyacentes a la TD y que a través de un CE las analicen. También que hayan recurrido a estudios metacientíficos para contextualizar el campo disciplinar.

Nuestro estudio no involucra cuestiones curriculares y se ubica en otro nivel educativo pero creemos que es una idea potente analizar algunas de estas operaciones a través de un CE en los libros de texto. En relación con la caracterización del campo hemos visto que los libros de texto funcionan como informantes de los límites del campo. Por otra parte, los libros de corte histórico y las publicaciones científicas ponen en evidencia la evolución del campo que de alguna manera deberán plasmarse en los textos científicos.

2.9.8.- Los libros de texto de nivel científico avanzado: la primera transposición

Es por lo hasta aquí expuesto, que consideramos que el libro de texto del nivel universitario avanzado puede considerarse como la PTD de un determinado campo disciplinar. Claramente esta decisión deja fuera la intervención de los docentes en la TD y los aspectos institucionales, agentes sumamente importantes pero cuya inclusión excede nuestros objetivos.

Nos interesa analizar cómo elaboran la TD los libros de texto que tratan de la TCM, cómo llevan a cabo las operaciones implícitas en la TD que elaboran. Naturalmente, dejamos fuera del análisis al control social de los aprendizajes y a las cuestiones asociadas con la programación de la ciencia a enseñar que subsumen dentro de sí al control social de los aprendizajes.

Una característica única de esta primera transposición es que los autores de libros de texto someten sus obras a la vigilancia epistemológica de la comunidad científica a la que pertenecen (ver 2.9.1). Naturalmente, esta vigilancia puede ser ejercida por un didacta de las ciencias pero supone realizar un proceso de sincretización de la ciencia que enseña el texto. Hemos visto que los libros de texto científicos no se ocupan de detallar cómo se configuró un determinado campo y presentan la ciencia desincretizada proponiendo un entramado particular para enseñarla. Por ello, será necesario diseñar una estrategia para sincretizar la ciencia que éstos enseñan.

La PTD entrelaza de una forma muy especial los procesos de publicidad y objetivación. Más aun si se trata de un campo de conocimiento especializado que se encuentra en estado controversial. Subyace a la operacionalización de la publicidad la tarea de exponer los códigos comunes al campo en cuestión, su lenguaje específico, unívoco y compartido por la comunidad científica, mostrar las principales técnicas operatorias y reglas metodológicas, así como también la concordancia entre los aspectos teóricos y los datos empíricos. Estos elementos son representaciones que se relacionan entre sí y, a la vez, se complementan dando coherencia y completitud a la construcción y justificación de un determinado modelo o familia de modelos. Por otra parte, la objetivación se pone a prueba cuando se involucran controversias sobre la ciencia que se quiere enseñar. Este hecho es bastante común en nuestro nivel educativo de análisis, en el que se enseñan teorías actuales que, comúnmente, presentan aspectos controvertidos. Nos preguntamos si el proceso de objetivación puede fracturarse en función de la predilección de un autor frente a una controversia teórica y también nos preguntamos si se utilizan las mismas representaciones asociadas con la publicidad en relación con estos aspectos controvertidos.

La desincretización y la programación de la ciencia a enseñar se conjugan en la estructura textual. Conocimiento científico especializado de otras áreas subyace a la construcción conceptual pormenorizada de los modelos científicos que los libros pretenden enseñar. En este sentido, los modelos actuales son de muy alto nivel de abstracción.

2.10.- Los aportes de la Lingüística a nuestro estudio

Resulta necesario caracterizar lingüísticamente el discurso científico que se comunica tanto en publicaciones científicas como en libros de texto, con el fin de dar curso a nuestro análisis.

2.10.1.- La comunicación científica: las publicaciones científicas y libros de texto

Zamudio y Torresi (1998) analizan discursos de diversos orígenes, entre ellos, el científico que se comunica a través de las publicaciones científicas. Lo caracterizan como un discurso lingüísticamente especializado que se manifiesta casi en total ausencia del agente que lo elabora. Esto se logra haciendo uso de la nominalización, es decir transformando los verbos en sustantivos. Esta acción produce el borramiento del agente que realiza tal transformación, transfiriendo la importancia al proceso. Esta característica es compartida por los libros de texto pues subyace al proceso de objetivación borrar las huellas de la enunciación deliberadamente (ver 2.9.5).

Otra característica importante del discurso científico especializado es la relativa escasez de paráfrasis, reformulaciones, definiciones y ejemplificaciones porque se presupone la competencia del lector experto, que trae como consecuencia el alejamiento semántico de los legos en el campo. Se presupone que el lector conoce no sólo el valor de los símbolos usados sino también el significado de las categorías que éstos designan dentro de la teoría en la que se expresan. Esta característica diferencia al discurso que utilizan las publicaciones científicas del que se utiliza en la divulgación científica y en los libros de texto.

En general, puede pensarse que las publicaciones científicas abordan, a grosso modo, tres clases de problemas muy diferentes: la determinación de los hechos significativos, el acoplamiento de los hechos con los modelos y la articulación de modelos. Existen también problemas ordinarios y su resolución puede resultar valiosa a la comunidad científica como un todo. Estos problemas surgen en ocasiones especiales.

Aunque no puede establecerse una regla, las publicaciones científicas se organizan a través de una introducción que encuadra el problema que la investigación resuelve y explica su relevancia en el campo. También suelen presentar una revisión de los

resultados alcanzados en el campo para destacar los aportes que se hacen a través de la investigación que el artículo comunica. Dependiendo de la pertenencia teórica o experimental de la investigación puede haber una sección destinada a presentar la metodología de trabajo que fue utilizada. También suele haber una sección en la que se presenten los resultados con diferentes tipos de representaciones (gráficos, tablas, etc.). Generalmente, las publicaciones científicas presentan una sección final en la que se exponen las conclusiones o una discusión sobre la inserción de estos resultados a la luz del campo disciplinar al que pretende aportar conocimiento (Beall y Trimbur, 1999).

Hemos visto, que los autores de los libros de texto restringen el acceso del público a través de la selección de nociones protocientíficas (ver 2.9.4) que exigen un nivel mínimo para habilitar la comprensión del discurso en juego.

Estas autoras (Zamudio y Torresi, 1998) se sitúan en una perspectiva del análisis lingüístico de cualquier tipo textual (descriptivo, explicativo, argumentativo, etc.) que distingue el nivel discursivo (nivel pragmático en el que se manifiestan las intenciones y las acciones comunicativas) del nivel esquemático superestructural (estructural o global que caracteriza a un tipo particular de texto). En particular, en lo que al análisis estructural se refiere, citan a Van dijk, autor que profundiza en el análisis estructural de textos.

2.10.2.- El análisis estructural

Creemos que puede establecerse una semejanza entre la estructura semántica que proponen los libros de texto y la estructura disciplinar de los modelos científicos que en ellos se plasman. Por este motivo nos interesa el análisis estructural de textos. Teun van Dijk (1998) es un lingüista que propone abordar el análisis textual enfocando sus estructuras. Existen antecedentes de la utilidad de su enfoque al interior de la Didáctica de las Ciencias, Izquierdo y Rivera (1997) utilizan este tipo de análisis para evaluar la calidad de un libro de texto de ciencias, especialmente de su coherencia. Pero postulan, además, que tratándose de ciencias experimentales, la coherencia, debe analizarse también entre los aspectos teóricos y experimentales inherentes a éstas.

Nosotros pensamos que el análisis estructural de van Dijk funciona como una puerta de acceso a la ciencia que se enseña a partir de los textos. Esta afirmación se basa

en la hipótesis de que la estructura textual guarda cierto paralelismo con la estructura disciplinar de los modelos científicos y, también, en el hecho de que los textos son escritos por científicos activos del campo que desincretizan la ciencia *de primera mano* generando recorridos para acceder a ella. El análisis estructural funcionará como una herramienta para organizar y transitar recorridos al interior de los libros de texto.

a) Hipótesis básicas del análisis estructural

van Dijk presenta un análisis textual general en el que pueden incluirse los libros de texto pero no es excluyente de otras formas textuales, por el contrario, define al texto como una unidad semántica con una estructura sintáctica particular. Su análisis se adapta a diferentes tipos textuales (descriptivo, explicativo, etc.) y también a textos de diferentes magnitudes (desde una proposición hasta un libro).

Este autor caracteriza a los textos en función de los contextos en los que se generan y define las comunidades lingüísticas como aquellas en las que sus hablantes asignan un significado determinado a sus enunciados lingüísticos a través de una convención.

van Dijk considera que el significado de una oración aislada es una proposición, tomada ésta como una unidad lingüística que se une a otras como ella por coordinación o por subordinación para formar una estructura compuesta que se caracteriza por un cierto orden secuencial. Las secuencias de proposiciones de órdenes estructurales diferentes organizan y desarrollan semánticamente un texto. Su análisis se basa en la determinación de diferentes niveles estructurales y las conexiones semánticas que se establecen al interior de un nivel o entre niveles.

b) Niveles estructurales de los textos

Este autor define tres niveles estructurales fundamentales: la macroestructura, la superestructura y la microestructura, que describiremos sintéticamente:

i) Macroestructura

Una macroestructura se define como un conjunto de textos, que dependiendo del contexto de su definición acuden al mismo significado global del tema. Se concibe como una proposición que equivale a la macroestructura o que es una parte de ella. El tema no

tiene por qué ser nombrado explícitamente en el texto pero si fuera el caso se puede decir que se trata de una *palabra temática* u *oración temática*. Ambas poseen la importante función cognitiva de poner al lector en condiciones de construir una macrointerpretación “correcta” del texto.

ii) Superestructura

Se denominan superestructuras a las estructuras globales que caracterizan el tipo de un texto. Una superestructura es una forma del texto, cuyo objeto --el tema – es su contenido. La superestructura determina el orden global de las partes del texto y, por lo tanto, su coordinación. Por ello, la superestructura debe componerse de determinadas unidades de una categoría determinada que están vinculadas con esas partes del texto previamente ordenadas. Una superestructura se plasma en la estructura del texto, es una especie de esquema al que el texto se adapta.

La superestructura y la macroestructura semánticas tienen una propiedad común: se definen para el texto en su conjunto o para determinados fragmentos de éste. En este sentido, hablamos de estructuras globales.

iii) Microestructura

La microestructura se define como la estructura que se organiza a través de una sucesión de preposiciones y de las relaciones que se establecen entre ellas. Esta sucesión hace posible la progresión del tema del texto y confiere coherencia a la secuencia de proposiciones. Esta coherencia se conoce como coherencia lineal.

Una microestructura no difiere en esencia de una macroestructura de la que, en realidad, deriva. Distinguimos entre macroestructuras y microestructuras según la amplitud y el alcance del texto a analizar.

c) Relaciones entre niveles estructurales

La estructura semántica de una unidad estructural tiene carácter secuencial. Una unidad de un determinado nivel establece una relación de tipo semántico con otra unidad, lo que pone de relieve que las unidades estructurales se definen en el contexto de otras de su mismo nivel. Pero también se establecen relaciones semánticas entre los niveles estructurales entre sí, relaciones que son condicionadas por su jerarquía relativa. Esta

propiedad de organización de los distintos niveles estructurales puede volverse introspectiva, condicionando el análisis semántico a unidades cada vez más acotadas.

Las conexiones semánticas se establecen a través de proposiciones que se ordenan en secuencias, que podrán o no ser semánticamente coherentes. La coherencia se mide tanto en el plano de los significados como en el plano de los referentes. Si la relación semántica se funda en el significado que se sigue de una secuencia se trata de una *relación intensional*. Y si la relación se funda en la asignación de referentes externos a la secuencia, se dice que se trata de una *relación extensional*.

El tránsito a través de una secuencia irá determinando la conexión de significados, cuya coherencia se manifiesta a través de ambos tipos de relaciones. Las relaciones intensionales serán las que asignen coherencia al interior de la secuencia en sí. Y las extensionales establecen conexiones con referencias externas a la secuencia a la que pertenece. La relación extensional puede conectarse con una referencia de otra unidad estructural del mismo nivel o de otro nivel estructural del mismo texto. Pero también la relación extensional puede aludir a un referente exterior al texto. van Dijk considera que las relaciones intensionales están condicionadas por la interpretación conceptual que se haga de ellas mientras que las relaciones extensionales responden a las actualizaciones de estos conceptos en el campo disciplinar al que pertenecen.

De modo general, una secuencia será semánticamente coherente cuando cada proposición de la secuencia pueda ser interpretada de manera intensional y extensional en relación con la interpretación de otras proposiciones de la secuencia o de referentes que implican tácitamente un significado de la secuencia. Es en este sentido que el análisis estructural de los textos está atravesado por la noción de interpretación relativa al contexto.

Comentarios finales

A través de este capítulo hemos recorrido diferentes marcos teóricos que nos permiten delinear nuestro estudio. Sobre el final del capítulo hemos intentado ir centrando nuestra atención en la interacción de los marcos definidos para así abordar el problema que nos ocupa.

Capítulo 3: Desarrollo Metodológico de nuestra investigación

Resumen del capítulo

En este capítulo abordaremos los aspectos metodológicos de nuestra investigación. En el capítulo anterior caracterizamos su abordaje teórico a través del cual delimitamos nuestro objeto, acción que determinó algunos aspectos metodológicos. Nuestras determinaciones nos llevan a indagar cómo se producen las operaciones subyacentes a la TD a través de los libros de texto que enseñanza la TCM en el nivel universitario superior. En este capítulo intentaremos comunicar cómo hacerlo.

3.1 Generalidades

La metodología de nuestra investigación es esencialmente cualitativa. Este tipo de metodología se orienta a describir e interpretar fenómenos, interesándose por el estudio de los significados. El enfoque de este tipo de investigación se caracteriza por ser holístico e inductivo. Se utiliza un enfoque global para abordar la problemática a investigar y se construyen las categorías o patrones a partir de la información obtenida. El proceso de investigación, además, es interactivo, progresivo y flexible (Latorre *et al.*, 1996).

La TD de la TCM terrestre es un campo muy poco explorado por la investigación en didáctica tanto por la escasez de investigaciones en el nivel superior, como así también del ámbito de la geofísica. Es decir, que contamos con pocos antecedentes sobre los que basar nuestro estudio. En este sentido, es que se trata de una investigación exploratoria y, por lo tanto, en muchos aspectos de tipo descriptivo.

El diseño de la investigación fue construyéndose a medida que fue avanzando la investigación, por lo que su diseño es emergente, se guía a través de los elementos definidos en nuestro relevamiento teórico y del progreso que vamos logrando a través de la investigación en sí.

En el capítulo anterior hemos caracterizado el vínculo existente entre lo que hemos dado en llamar la primera TD y los libros de texto del nivel universitario superior, fundamentado su asociación para realizar un análisis del recorte de las operaciones de la TD que se plasman a través de los textos. La temática geológica sobre la que trabajaremos condiciona el universo de los posibles textos a ser seleccionados, entre los cuales habrá que determinar la muestra.

Además, desarrollamos el análisis estructural como un modo de poder describir los libros de texto proponiendo realizar un recorrido semántico a través de la selección de un CE y de los diferentes niveles estructurales a definir en los libros de texto. La elección del CE permitirá habilitar un recorrido a realizar y, con ello, el modo de poder describir los libros de texto para, en una etapa posterior, analizar cómo llevan a cabo la TD. La descripción de los libros de texto nos habilitará una forma de evaluar las

operaciones anteriormente seleccionadas para nuestro estudio, por lo que será necesario definir qué representaciones utilizaremos para analizarlas.

Nuestra intervención en el diseño de la investigación se pone de manifiesto a través de las decisiones que vamos tomando durante su construcción. Es así que nuestras decisiones resultan un instrumento principal de la investigación. Por ello, los métodos de recogida de la información son de naturaleza interactiva y dialéctica, ir y venir de la investigación a los textos y de ellos a la investigación, guiados por el marco conceptual expuesto en el capítulo anterior.

Hasta aquí hemos formulado apreciaciones de corte teórico sobre nuestro problema de conocimiento. En el Capítulo 1, a través de su formulación y de la definición de los objetivos. Y, en el Capítulo 2, en el que introducimos elementos teóricos diversos que nos habilitan criterios fundamentados para diseñar nuestra intervención empírica. Este ajuste, tal cual sugiere Giere, implica establecer relaciones de semejanza entre los aspectos teóricos y los empíricos del estudio. Intentaremos definir, en este capítulo, los aspectos empíricos de nuestra investigación, fundamentando nuestras decisiones en los marcos desarrollados anteriormente.

En nuestra indagación sobre cómo opera la TD concebimos diferentes recortes que caracterizan su identidad, especialmente el nivel educativo y el contenido disciplinar específico, llevando nuestra atención sobre los libros de texto, considerados como la primera TD.

3.2 El diseño de la investigación

Nuestro proceso metodológico está guiado por un diseño de investigación abierto, en el sentido de que a medida que se hace luz, se avanza. Los escasísimos antecedentes sobre nuestro problema de conocimiento nos llevan a abordar un campo desconocido, nos posicionan ante la necesidad de ser lo suficientemente flexibles para proponer formas de abordaje metodológicas funcionales al panorama teórico armado en función de nuestra investigación.

El enfoque de nuestra investigación es holístico, pretendemos hacer converger concepciones teóricas de orígenes diversos, las ya desarrolladas en nuestro marco teórico, en la concepción de nuestro problema de investigación.

Se planificó realizar la investigación en tres fases de modo de poder organizar un abordaje dialéctico entre los aportes surgidos del marco teórico y las informaciones parciales que vamos obteniendo de la empiria.

Una fase exploratoria, en la que se realizó el primer abordaje de la investigación. A partir de éste se pensaron las estrategias de investigación y el modo en el que tramar la recogida de los datos. En esta etapa fue necesario relevar los libros de texto existentes sobre la CM, adquirir formación académica y determinar la muestra. A la vez, se dio comienzo al relevamiento sociohistórico asociado con la evolución de la TCM.

Una segunda fase, que podemos llamar de intervención, nos llevó a determinar el CE para describir los libros de texto, por un lado, y seleccionar las publicaciones científicas, que actúan como referentes científicos de nuestro tema geológico, por otro. Al determinar y ubicar el CE en la estructura de los libros de texto, es posible indagar qué relaciones extensionales conectan con las publicaciones externas a ellos y, con ello, habilitar un camino para realizar una reconstrucción socio-histórica parcial del campo. Este relevamiento conduce, en particular, a contextualizar qué se enseña acerca de los campos controversiales relativos a la CM.

Una tercera fase se concretó a través de la recogida y análisis de la información. Dado el carácter exploratorio de nuestra investigación y su naturaleza, podemos adelantar que los resultados que esperamos son de tipo descriptivo y, quizás, podamos aventurar alguna explicación sobre aspectos concretos. La descripción de los textos se realiza a través de la estructura semántica y conlleva en su génesis un sesgo hermenéutico. Sobre esta base descriptiva se organizó la forma de analizar las operaciones subyacentes a la TD.

3.3 Procedimientos Metodológicos

El libro de texto es nuestra unidad de análisis. Nos interesa identificar las estructuras que subyacen a su organización conceptual y, con ello, asignar los niveles estructurales propuestos por van Dijk para así poder realizar nuestro análisis. Esta identificación teórica tiene, claramente, consecuencias definitorias sobre la diagramación metodológica que desarrollamos.

3.3.1 Identificación de los niveles estructurales de los libros de texto

3.3.1.1 Macroestructura

En el marco de nuestro estudio, la macroestructura puede identificarse con la TCM, temática que debe ser principal en el desarrollo de los libros de texto que se seleccionen. Sin perder generalidad podemos asignar al título y a las generalidades que definen al texto como los elementos semánticos que permiten determinar su macroestructura.

3.3.1.2 Superestructura

Para identificar en los libros de texto la superestructura acudiremos al índice general de cada texto pues en éste se plasma su organización, se establecen categorías y estructuras de orden jerárquico y secuencial a través de los títulos y subtítulos, como así también de sus secciones, en caso de que las tenga. El índice orienta al lector en la identificación de la estructura conceptual que desarrolla el texto.

3.3.1.3 Microestructura

Para reconocer en el libro la microestructura hay que realizar una selección de contenidos. Es necesario transitar dicha selección estableciendo algún recorrido y para ello acudiremos a la noción de CE.

3.3.1.3.1 El armado del recorte disciplinar a través del CE

Los CE se relacionan con diferentes modelos teóricos al implicarse en su construcción pero también subsumen otros (sub)modelos en su definición y, además, establecen conexiones entre los modelos y los datos, es decir, la información proveniente

de la empiria, cuestión ésta que habrá que tener en cuenta a la hora de indagar estructuralmente los textos, tal como sostienen Izquierdo y Rivera (1997) (ver 2.10.2).

Consideramos que el CE, por su condición, es parte del entramado estructural que se propone a través del libro de texto. La centralidad teórica de un CE debe ponerse de relieve en la constitución del texto y debe evidenciarse de diferentes maneras y en distintos niveles de la estructura de cada texto. Dado que el análisis estructural es introspectivo, deberán existir marcas que conecten las partes entre los diferentes niveles, especialmente a través de las relaciones extensionales que aparezcan al interior de cada libro de texto.

El recorrido semántico a establecer a través del CE dará lugar a saber qué parte del campo disciplinar desarrolla cada libro y qué desarrollos se depositan fuera de cada uno de ellos. En síntesis, el CE debe estar ligado con el MCM, con los (sub)modelos que subyacen a su definición y con los datos con los que se compara.

El CE debe definir un aspecto semántico del MCM. Semánticamente, el MCM tiene una jerarquía conceptual mayor, es un modelo de mayor generalidad. El CE debe representar sólo un aspecto semántico del modelo. Los (sub)modelos que sustentan al CE son semánticamente de menor jerarquía conceptual ya que éste plasma una síntesis de ellos.

Por otra parte, el CE, siendo un ente teórico, debe precisar cuál es su semejanza con la empiria. En esta relación no se pone de manifiesto la jerarquía conceptual sino la forma semántica en la que se coordinan los aspectos teóricos y empíricos.

El análisis estructural, tal como lo define van Dijk, propone abordar tres estructuras jerárquicamente diferentes. Las relaciones extensionales e intensionales son las que dan lugar a plantear la introspección al interior de un nivel o de niveles entre sí.

Es de nuestro interés hacer una introspección al interior del nivel microestructural, de modo de conectar al CE con el MCM, con los submodelos que lo sustentan y con los datos que provienen de la empiria. Para ello, definiremos nuevas categorías estructurales que nos permitirán acceder a estas conexiones.

3.3.1.3.2 Definición de categorías microestructurales

Las conexiones semánticas deben cristalizarse a través de diferentes categorías teóricas que penetren en la microestructura del texto y, con ello, que atiendan a analizar los distintos tipos de conexiones que permitan recorrer cada texto. Por ello, proponemos crear tres categorías que cubran los aspectos semánticos recién expresados en relación con el análisis microestructural. Las llamaremos *supraordinación*, *subordinación* y *coordinación*. Definimos la supraordinación como la relación semántica que se establece entre el CE y el MCM, la subordinación la que se establece entre el CE y los modelos que subyacen a su construcción y, por último, la coordinación que vincula semánticamente los aspectos teóricos y empíricos a través del CE.

El recorrido a establecer a través del CE en las tres categorías definidas, puede armarse a partir de las relaciones extensionales e intensionales que define cada libro de texto.

A través de la superestructura es posible identificar la unidad estructural que desarrolla el MCM. En ésta, a su vez, podrá identificarse la presencia del CE y con ello, sus relaciones (extensionales) con otras unidades estructurales de diferentes jerarquías. Las que remitan al interior del libro indicarán cómo transitar dicho recorrido. Y las que remitan a publicaciones externas darán una idea de desarrollos que quedan implícitos en el libro. Estos desarrollos podrán referir a conocimientos establecidos o a aspectos controvertidos asociados con el MCM.

3.3.2 Descripción de los niveles estructurales de los libros de texto

Describiremos los niveles estructurales antes definidos a través de una narrativa que nos permita mostrar las relaciones semánticas entre niveles estructurales diferentes, por una parte, y al interior de un mismo nivel estructural, por otra. Caracterizaremos brevemente cómo realizaremos la descripción de cada uno de los niveles estructurales en los libros de texto.

3.3.2.1 Macroestructura

Describiremos la macroestructura a través de la presentación general que ofrece cada texto, es decir, su título, su prólogo, el público al que se dirige, entre otras informaciones que se ofrezcan al lector de modo general.

3.3.2.2 Superestructura

Haremos una descripción de la organización conceptual del libro de texto, describiendo las secciones, en caso de las tenga, y los capítulos de un modo sintético. Este trabajo nos permitirá rastrear los capítulos en los que se implican el MCM y el CE.

3.3.2.3 Microestructura

a) Supraordinación

Se describirán las unidades estructurales del libro de texto que desarrollen el MCM y se identificarán y describirán las relaciones semánticas entre el CE y el MCM que se presenten. Definimos la supraordinación como la secuencia semántica en la que se implica el CE en relación con el MCM que propone cada libro de texto. Concretamente, significa buscar las relaciones extensionales que conectan el MCM con el CE en el entramado de cada libro de texto.

b) Subordinación

Se describirán las unidades estructurales del libro de texto que conecten semánticamente al CE con los modelos que subyacen a su propia construcción.

c) Coordinación

Se describirán las unidades estructurales del libro de texto que conecten semánticamente los aspectos empíricos con los teóricos asociados con el CE.

3.3.3 Descripción de las operaciones subyacentes a la TD objeto de nuestro análisis

El análisis estructural nos brinda una manera organizada de describir y recorrer los libros de texto. En ellos, nos interesa *ver* cómo sus autores han plasmado las operaciones objeto de nuestro estudio: la desincretización, la objetivación y la publicidad.

3.3.3.1 La desincretización

La desincretización queda descripta, esencialmente, a través de la superestructura. Pues es en ésta en la que se describe la organización conceptual (delimitación y secuenciación) que proponen los libros de texto. La desincretización que hacen los autores es un movimiento que se inicia en el conocimiento sincretizado. En cambio, nuestro abordaje, por su condición, deberá realizarse en sentido contrario pues el movimiento se inicia en el conocimiento desincretizado con la pretensión de sincretizarlo.

Cuando hacemos referencia al conocimiento del campo disciplinar, entendemos que se trata de un producto histórico y que, por tanto, es necesario indagar cómo se produjo, qué caminos tomaron las ideas en la historia del campo. Así como existe una variada producción histórica y epistemológica sobre las discusiones entre modelos rivales respecto de la tectónica de placas, no se dispone de publicaciones que presenten una síntesis de las discusiones recientes sobre la TCM. Esta situación nos lleva a centrarnos en armar una sincretización del campo a través de una selección bibliográfica y su integración en un relato cronológico que de cuenta de la evolución conceptual del MCM a lo largo del tiempo, pero no se puede perder de vista que no se trata de un estudio historiográfico y que necesariamente la selección es un proceso reduccionista.

La sincretización de la ciencia implica acudir al nivel científico, a las publicaciones que son citadas como referentes externos junto con otras publicaciones que consideremos relevantes. El acceso a las citas se abre a través de las relaciones extensionales que conectan al texto con otras publicaciones. Pensamos que su selección y análisis nos permitirá organizar un recorrido histórico que de cuenta de la evolución conceptual del campo y, con ello, armar un relato de ésta.

Los modelos que los textos exponen se sustentan en citas concretas que remiten a publicaciones diversas. En este primer abordaje, haremos una selección de aquellas que nos resulten relevantes para caracterizar el contexto de producción científica. Las publicaciones que surjan de esta selección y las que seleccionemos para realizar el relevamiento histórico de la evolución de este campo serán consideradas

como las fuentes científicas de nuestro estudio. Por ejemplo, seleccionamos una cita para indagar en qué se asienta una afirmación, la buscamos y analizamos el contexto científico del que se desprende tal afirmación. También es posible que a partir de esta publicación se seleccionen otras.

El orden en el que se realiza la desincretización da lugar a la secuenciación conceptual que propone cada libro de texto. La trama particular que guía el CE subsume la forma en la que se diseña la adquisición progresiva del MCM. La desincretización es la operación plasmada en la estructura de cada texto que habilita el tránsito por la trama conceptual a través del CE.

3.3.3.2 La objetivación

Sabemos a priori que estamos trabajando con un campo controversial y que los autores de los libros de texto de este nivel educativo suelen ser científicos activos de éste. Por ende, la objetivación se pone fuertemente a prueba en la elaboración de los libros de texto. La ubicación de los autores en el seno de la evolución histórica del MCM se postula como una fuente de información primaria muy relevante pues al pertenecer a la comunidad científica tendrán alguna injerencia en el campo controversial que atraviesa a dicha comunidad. Es fundamental para abordar metodológicamente esta operación poseer una visión sincrética del campo de investigación a lo largo del tiempo, más específicamente de su historia reciente. De este modo, podremos ubicar a los autores en el desarrollo histórico de su campo lo que nos servirá de referente para evaluar la objetividad de sus afirmaciones en relación con la enseñanza.

Los libros de texto del nivel universitario avanzado suelen ser contruidos sobre la base de publicaciones anteriores. Como ya hemos visto, estas publicaciones son libros de texto y artículos científicos y permiten establecer la validez o la ampliación de un determinado conocimiento. Las citas que surgen a través de las relaciones extensionales dan lugar a reconstruir la procedencia de un tramo específico del campo. Pretendemos rastrear en el texto las citas que realizan los autores especialmente en relación con el campo controversial y establecer qué de éstas se transfieren al libro de texto. Es decir, a la luz de la publicación original habrá que evaluar, en alguna cuestión específica, qué y cómo se transfiere conocimiento de ésta al libro.

Las publicaciones científicas a seleccionar nos habilitarán una visión sincrética del campo y con ello la ubicación de los autores en la comunidad científica. Algunas de estas publicaciones serán, además, utilizadas para chequear qué de ellas se transfiere a los libros de texto.

3.3.3.3 La publicidad

La publicidad es una operación que se asocia con dar a conocer los resultados de la investigación y los diferentes tipos de representaciones que se utilizan para explicar el conocimiento que se ha alcanzado en el campo. Las representaciones pueden ser: explicaciones cualitativas, fórmulas, gráficos, tablas, etc. Para acceder a tales representaciones habrá que relevar cuáles son las que utilizan los libros de texto para desarrollar el conocimiento que pretenden enseñar. Una vez relevados los distintos tipos de representaciones se podrá establecer una descripción relativa a cada libro de texto. Esta descripción podrá proveer, en conjunto con el resto de la información que se obtenga de cada libro de texto, ciertas conclusiones que hablarán de las diferencias entre ellos.

3.3.4 Los alcances y las limitaciones del análisis de las operaciones de la TD

Debido a la naturaleza dialéctica de nuestra investigación, atravesamos períodos de resignificaciones conceptuales en lo que refiere a la sincretización del campo y su desincretización a través de los libros de texto. La desincretización que postula cada texto y su recorrido a través del CE abre el camino para realizar la sincretización y es a través de ésta que lograremos acceder a la objetivación y la publicidad que realizan los libros de texto.

La desincretización es el vehículo que nos habilita el ingreso a los libros de texto, situación que condiciona las limitaciones de su posible análisis. Sin embargo, esta operación está implícita en la descripción estructural que realizaremos de cada texto. Cada nivel estructural en sí aporta a la organización por excelencia de cada texto (recorte y secuenciación). El análisis estructural permite describir los recortes disciplinares, la forma en la que se organiza el conocimiento y el tipo y nivel de las representaciones que se proponen.

A través del análisis estructural quedará descrito cómo se desincretizó el MCM cada libro de texto y a través del orden de presentación de los distintos niveles estructurales se pondrá de manifiesto cómo se diagramó la selección y secuenciación de los contenidos de la enseñanza. Las descripciones que haremos serán, en este sentido parte de los resultados de nuestra investigación.

3.4 Las primeras determinaciones metodológicas

3.4.1 Los criterios de selección de la muestra

La selección de los libros que formarán la muestra responde a criterios internos de la investigación. Éstos se basan en diferentes fuentes de información: un relevamiento de la oferta internacional de los textos que tratan esta temática y el aporte de información brindado por informantes clave de esta investigación (Directores de Tesis y Docentes de la Asignatura *Geofísica de la Tierra Sólida*, Dto. de Geología, FCEN).

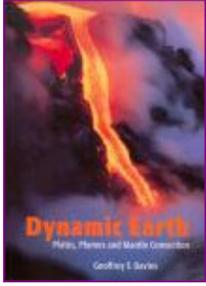
Su tamaño debe definirse en función de la oferta de libros de texto actuales de nivel universitario superior que enseñen la TCM. El mayor o menor provecho del estudio no resulta directamente de la cantidad de libros analizar sino de la pertinencia de sus características al tipo de preguntas planteadas en esta investigación (Samaja, 1993).

La característica unificadora de los libros a seleccionar debe establecerse a través del contenido específico --la TCM terrestre-- y del público al que están dirigidos. La temática deberá ser un contenido central de enseñanza de los textos, dejando fuera de la muestra los libros de Geología General del nivel universitario, en los que la temática se enseña pero no es central. Dejando de lado este nivel educativo y ascendiendo en la especificidad del campo disciplinar, la oferta de textos se reduce notablemente.

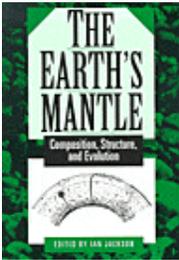
3.4.2 La determinación de la muestra

Seleccionamos tres textos, que denominaremos a partir de aquí como L1, L2 y L3, que enseñan la TCM cuya primera edición fuera posterior a 1998 y cuyo alcance fuera mayoritario en el área, en cuanto a su difusión. Describiremos las características generales de cada uno de ellos:

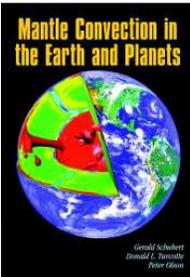
L1

<p>Título: Dynamic Earth. Plates, Plumes and Mantle Convection.</p> <p>Autor/es: Geoffrey Davies</p> <p>Editorial: Cambridge University Press</p> <p>Año de publicación: 1999</p> <p>Número de páginas: 458</p>	
---	--

L2

<p>Título: The Earth's Mantle. Composition, Structure and Evolution.</p> <p>Autor/es: Ian Jackson (Compilador)</p> <p>Editorial: Cambridge University Press</p> <p>Año de publicación: 1998.</p> <p>Número de páginas: 566</p>	
--	---

L3

<p>Título: Mantle Convection in the Earth and Planets.</p> <p>Autor/es: Gerald Schubert, Donald Turcotte y Peter Olson</p> <p>Editorial: Cambridge University Press</p> <p>Año de publicación: 2001.</p> <p>Número de páginas: 940</p>	
--	---

3.4.2 La selección del concepto estructurante

Una primera exploración de los libros de texto seleccionados y de la reconstrucción sociohistórica del campo disciplinar nos llevó a seleccionar la *viscosidad del manto* (VM) como CE. Nuestra elección se sustentó en su relevancia para el MCM y, además, por la formación académica de quien suscribe este informe, condición necesaria para profundizar en el recorte que el CE determina. La VM habilitará un recorrido para describir los libros de texto, que se arma en función de las características de cada uno de

ellos, aplicando el análisis estructural antes descrito que informará sobre cómo se inserta este modelo semánticamente en el entramado particular que arma cada libro de texto.

3.4.3 La selección de las publicaciones y la forma de citarlas

La selección de publicaciones que guiará nuestra reconstrucción sincrética del campo se realiza, en primera instancia, a partir de la selección de bibliografía de corte histórico y epistemológico y, también, de una serie de publicaciones que son citadas por los autores en sus libros de texto y que creemos que son clave para ello. A partir de estas fuentes se deben seleccionar otras fuentes de información que nos lleven a completar la información necesaria para cumplir nuestros objetivos.

En general, citaremos párrafos provenientes de los libros de texto y de las publicaciones en forma textual, en su idioma original pues entendemos que de mediar una traducción estaríamos realizando una interpretación adicional a la que ya realizamos a la hora de seleccionarlas. De este modo, citaremos textualmente a los autores. Respecto de terminologías disciplinares específicas se procurará buscar una traducción conveniente y cuando sea posible se adoptará la tradición terminológica existente en español.

3.5 Particularidades de la comunicación de nuestro análisis

Nuestro abordaje metodológico no coincide con la forma en la que pretendemos comunicarlo. Creemos conveniente presentar primero la reconstrucción histórica del campo (sincretización) y luego proceder a la descripción estructural de los libros de texto. Si bien este proceso ha sido atravesado en forma simultánea durante la investigación no es posible comunicarlo de esta manera a los lectores de este informe.

Nuestra reconstrucción histórica del campo involucra cuestiones históricas y disciplinares por lo que creímos conveniente someterla a una revisión crítica desde ambas perspectivas⁴.

⁴ Fueron revisores críticos del capítulo histórico el Dr Augusto Rapalini (Geofísico, FCEN, UBA) y la M. Scie. Adriana Schnek (Master en Epistemología e Historia de la Ciencia, Universidad Paris VII) cuyas sugerencias se han incorporado a este informe.

Además, pensamos que se gana en claridad al desarrollar el enfoque histórico durante el próximo capítulo (Capítulo 4). La Historia de la Ciencia puede funcionar como una puerta de entrada al campo disciplinar y, con ello, prepara al lector no experto en el campo disciplinar objeto de análisis para abordar la descripción estructural de los libros de texto en el capítulo siguiente (Capítulo 5), que penetra en recortes disciplinares específicos. La metodología de abordaje estructural de los libros de texto se ha ido afinando a medida que transitamos cada texto. Describiremos con mayor detalle a L1 para así mostrar cómo se aplican nuestros criterios descriptivos y más sintéticamente a L2 y L3.

Las operaciones asociadas con la TD son, en parte, descritas a través del análisis estructural de los textos. Trabajaremos sobre la sincretización durante del capítulo 4 a través la reconstrucción histórica del campo. La desincretización será descrita en el capítulo 5, a través del análisis estructural de los textos. Luego en el capítulo 6 se analizarán la objetividad y la publicidad. En el Capítulo 7 estableceremos, a modo de conclusiones finales, algunas reflexiones referentes a como opera la primera TD de la TCM.

Capítulo 4: Contexto histórico de evolución del modelo de convección en el manto

Resumen del capítulo

Este capítulo aborda la reconstrucción histórica del dominio de investigación asociado con la TCM, desde su origen hasta la actualidad. Se rastrean publicaciones de índole histórico y científico. Trabajamos sobre una periodización que nos permite diferenciar tres etapas diferentes por las que ha atravesado la teoría. Ponemos especial atención en las controversias entre modelos de convección.

4.1.- Introducción

El surgimiento y consolidación de la teoría de la tectónica de placas ha brindado un marco paradigmático que permite explicar e interpretar un gran número de fenómenos y objetos geológicos de orígenes diversos. Los movimientos relativos de las placas que constituyen la corteza terrestre explican cuestiones tan disímiles como la aparición de fósiles de la misma edad en distintos continentes y el origen de los terremotos.

El origen de la teoría de la tectónica de placas puede situarse en las primeras décadas del siglo XX cuando se instaló, en la comunidad científica de la época, el debate acerca de la deriva de los continentes impuesto por Alfred Wegener. En este debate entraba en juego la concepción acerca de la estructura y los procesos internos de la Tierra que constituyó uno de los elementos que obtuvo la aceptación de la deriva continental. En 1955, sin embargo, esta idea volvió a cobrar protagonismo y evolucionó rápidamente hacia la teoría de la tectónica de placas.

Entre el rechazo de la deriva continental y la aceptación de la tectónica de placas cambió la concepción sobre el interior de la Tierra: la discusión sobre lo que ocurría en la superficie de la Tierra ineludiblemente llevó a los científicos a concebir un modelo de su interior. De esta manera, la explicación del movimiento de la superficie se apoyó en una teoría, la CM, que explicaba la liberación de la energía interna del planeta. Esta teoría no era nueva sino que había surgido marginalmente en el siglo XIX y, con el transcurrir del tiempo, fue complejizándose, a medida que se desarrollaron otras áreas del conocimiento científico. Luego, a partir de la aceptación de la tectónica de placas, la CM se abrió como un campo de investigación impresionante que contó con gran apoyo de la comunidad científica, lo que le permitió crecer y propagarse hasta la actualidad, momento en el que se encuentra en plena actividad.

La línea histórica de nuestro estudio se centra en la TCM como teoría protagónica. A lo largo de la historia, la convección formó parte de diferentes modelos geodinámicos a gran escala, modificándose con el transcurrir del tiempo en función de explicar distintos fenómenos. En este estudio, recorreremos la evolución de esta idea, desde el siglo XIX hasta nuestros días.

En este apartado intentamos recrear el contexto del surgimiento y desarrollo de la idea de convección. Para ello, caracterizamos tres etapas: una etapa protodisciplinar en la que la idea de convección en el interior surge marginalmente; una segunda etapa que comienza con su aparición como mecanismo explicativo de la deriva de los continentes y finaliza con la aceptación de la tectónica de placas y una tercera etapa, que se centra en el desarrollo de la CM como campo de investigación independiente.

Nuestros principales referentes teóricos son los tres libros de texto analizados en esta tesis (Schubert, *et al.*, 2001; Davies, 1999; y Jackson, 1998), a partir de los cuales, a su vez, hemos escogido algunos artículos científicos (Glatzmaier & Schubert, 1993; Davies & Richards, 1992 y Davies, 1977) que los propios textos han citado como sustentos teóricos importantes en la evolución del MCM. Además, se utiliza un trabajo monográfico que resultó de un (macro) proyecto internacional dedicado a la investigación de los procesos internos del planeta (Hart, 1969). Respecto de los modelos más antiguos, tomamos como fuentes principales de información dos libros de historia de las ciencias geológicas (Le Grand, 1988; y Muir Wood, 1985). Por último, hemos elegido otras publicaciones que dan cuenta de diferentes propuestas que se han realizado a lo largo del tiempo, a fin de componer un panorama amplio. Nuestra selección no pretende ser representativa de la complejidad de la producción científica desarrollada a lo largo del tiempo; la intención es utilizar referentes de diferentes posturas teóricas que muestren el desarrollo de este campo de investigación.

4.2.- Primera etapa: origen y evolución temprana de la idea de convección en el manto

A fin de analizar el contexto de surgimiento de la idea de convección, presentamos la concepción de planeta que la circunscribía y los primeros (proto)modelos convectivos que fueron propuestos.

4.2.1.- El contraccionismo como concepción de planeta

A mediados del siglo XIX, surgió la teoría contraccionista a partir de las ideas defendidas originalmente por Buffon, que sugerían que la Tierra inicialmente se encontraba en estado fundido. Para el contraccionismo, el calor se iría perdiendo

lentamente de modo que el enfriamiento de la Tierra provocaría una pérdida de volumen. Así, el calor se difundiría hacia el espacio y la Tierra iría contrayéndose, produciendo deformaciones en su corteza, lo que explicaría por ejemplo, la conformación de montañas.

El contraccionismo postulaba que la Tierra, al ir enfriándose, provocaría que los materiales más densos se hundieran hacia el centro, formando un núcleo, y que los materiales menos densos ascendieran progresivamente hacia la superficie. La corteza se representaba como una capa delgada cuya temperatura era más baja que la del interior. Una consecuencia inmediata del modelo contraccionista es que, una vez producidas las contracciones principales, las características más evidentes de la superficie terrestre permanecerían bastante estables.

El contraccionismo funcionó como un modelo cualitativo sobre la evolución del planeta a gran escala, reconstruyendo los fenómenos geológicos pasados en relación con las marcas dejadas en su superficie. Esta concepción se propagó hasta el siglo XX, generando acalorados debates entre los geofísicos.

4.2.2.- Protomodelos de convección en el manto

Durante el siglo XIX, surgieron dos modelos que aplicaron la convección térmica en el interior de la Tierra con la intención de explicar ciertos fenómenos geológicos. Aludiremos a estas dos propuestas que pueden considerarse como antecedentes destacados del modelo que trascendió hacia el siglo XX.

a) El modelo de Hopkins

Una de las primeras menciones sobre la convección en el interior de la Tierra fue realizada, en 1839, por William Hopkins, el fundador de la escuela inglesa de la física de la Tierra (Muir Wood, 1985).

Hopkins se interesó por el estado térmico del interior terrestre compatibilizando el abordaje matemático con los datos físicos y químicos de las propiedades de la Tierra conocidas hasta ese momento.

Hopkins pretendía explicar el gradiente geotérmico asociando la fluidez del material con el aumento de la temperatura con la profundidad. Para ello, comparó las conductividades térmicas de diferentes rocas y encontró que el gradiente de temperaturas no era inversamente proporcional a la conductividad térmica. Además, reconoció que el punto de fusión de una sustancia variaba con la presión, lo que interferiría en los cálculos sobre el gradiente geotérmico de las profundidades de la Tierra basados en extrapolaciones lineales.

Este científico reconoció la importancia y el significado de la convección en cualquier transferencia de calor que se produjera en el interior fundido de la Tierra.

Hopkins recognized the significance of convection in any heat transfer within the molten interior (Moir Wood, 1985; pp: 25)

Si bien Hopkins no realizó una propuesta formal del modelo de convección aplicado al interior de la Tierra estaba interesado en la transferencia de calor desde el interior hacia la superficie, lo que lo llevó a estudiar los fenómenos antes nombrados.

b) El modelo de Fisher

En 1881, Osmond Fisher propuso la convección en el substrato como un agente tectónico, a modo de explicación cualitativa de conjunto que relacionaba la transferencia de calor desde el interior con las características geológicas exhibidas por la superficie terrestre.

Fisher asumió que el substrato era relativamente fluido, basándose en el concepto de isostasia desarrollado en la época. La corriente ascendente de la convección se encontraría bajo los océanos y la descendente bajo los continentes. Este científico sugirió, además, que la convección podría expandir los océanos y comprimir los continentes en sus márgenes, levantando montañas y formando fosas tectónicas.

Fisher's fluid was, most importantly, undergoing convection. Although the Earth was engaged in long-term cooling and contraction, the convective flux was providing horizontal drag, pushing up mountain ranges and opening rifts (Moir Wood, 1985; pp: 29).

El modelo de convección propuesto por este científico pretendía dar cuenta del flujo de calor proveniente de las profundidades de la Tierra en relación con su enfriamiento incorporando las características morfológicas de la superficie.

4.3.- Segunda etapa: la convección como mecanismo subyacente al desplazamiento de la superficie terrestre.

El conocimiento sobre la convección en el interior de la Tierra pudo desarrollarse cuando la geofísica gozó de cierta independencia como campo disciplinar. La geofísica fue perfilando su propia identidad al definir problemas propios de investigación y al adaptar los modelos que aportan las disciplinas de base –la física y la geología– al estudio de la Tierra. En las primeras décadas del siglo XX cuando se reactivó la idea de convección, la atención se concentró en el posible mecanismo de arrastre de los continentes, lo que desencadenó la propuesta de una sucesión de modelos que trataban de explicar dicha movilidad.

A través de los datos paleomagnéticos surgidos de analizar el fondo oceánico se dio crédito a la hipótesis de su expansión y surgió el concepto de placa tectónica. Así, la superficie del planeta se concibió como la superficie de una esfera que estaría conformada por placas móviles, separadas por diferentes tipos de márgenes. La CM era la explicación que subyacía a la expansión del fondo oceánico y con ello, al movimiento de las placas. Cuando se acepta la tectónica de placas –y con ello, la movilidad de la superficie— se acepta, aunque solapadamente, el MCM a modo de mecanismo dinámico explicativo de la Tierra como sistema.

El consenso sobre el modelo de convección abrió el panorama dinámico sobre el funcionamiento del planeta, generando una gran expectativa sobre los procesos que ocurren y ocurrieron en su interior a lo largo de su historia geológica.

Fue en este contexto que el modelo de convección pasó de ser un modelo subsidiario a ser un modelo protagónico dando lugar a una nueva etapa en su desarrollo como campo de investigación independiente.

4.3.1.- El surgimiento de la geofísica como campo disciplinar

Es posible afirmar que en 1830 comenzaron los primeros estudios geofísicos sobre el interior de la Tierra (Le Grand, 1988). Inicialmente, el análisis geofísico se orientó hacia la estructura térmica del interior de la Tierra, a partir de los datos térmicos que se obtuvieron de las perforaciones en minas subterráneas.

A comienzos del siglo XIX, algunos modelos incorporaron abordajes cuantitativos, utilizando el lenguaje matemático para interpretar los fenómenos geológicos. La construcción de la geofísica como campo disciplinar implicó la definición de un cuerpo de problemas, la creación de lenguaje, métodos y técnicas específicas, y la conformación de una comunidad científica con su respectivo soporte material (institutos, departamentos universitarios, canales de comunicación, etc.). Profundizar en esta temática es de una riqueza enorme pero se trata de un proceso complejo que excede los alcances de nuestro trabajo. De todos modos, haremos un relevamiento de algunos datos históricos útiles a nuestro análisis.

La convección como problema generó la construcción del lenguaje geofísico, como así también de métodos y técnicas particulares. Harold Jeffreys y Arthur Holmes fueron dos geofísicos pioneros que confrontaron sus argumentos sobre la deriva de los continentes, lo que contribuyó al desarrollo de la geofísica.

A principios del siglo XX, Harold Jeffreys intentó extender el rigor y la precisión de la matemática a la geología. En general, admitió la existencia de poca evidencia empírica en sus afirmaciones teóricas pero argumentó que usando la física era posible extrapolar un modelo de planeta, de su estructura y de los procesos que ocurrían en su interior, aunque fuera necesario introducir suposiciones *ad hoc* (Le Grand, 1988).

He (Jeffreys) admitted the paucity of empirical data on the interior of the earth but argued that using physics he could extrapolate to a model of its structure and processes although it was necessary to introduce “some *ad hoc* assumptions” (Le Grand, 1988; pp: 105)

Para este científico, la física establecería los límites para fundar una teoría geológica aceptable y generaría un acuerdo entre los aspectos teóricos y experimentales. El geofísico proveería una teoría general y el geólogo trataría los detalles.

The geophysicist provides a general theory; the geologist fills in the details (Jeffreys, 1935; citado por Le Grand, 1988; pp: 105)

Harold Jeffreys era partidario del contraccionismo y en 1920, utilizó la física para atacar la deriva continental, no sólo con su aparato conceptual sino también con su retórica.

Arthur Holmes fue un gran opositor de las ideas de Jeffreys. Holmes estudió física en el *Imperial College* de Londres y posteriormente se interesó en su aplicación a la investigación de problemas geológicos. El físico John Strutt (conocido como el Baron Rayleigh) lo había alentado a construir una escala absoluta de tiempo geológico basándose en la vida media de los elementos radioactivos. En 1913, Holmes publicó una técnica de datación radioactiva que le permitió establecer que la edad de la Tierra es aproximadamente de 4500 Ma.

Sus trabajos sobre la radioactividad y la historia térmica de la Tierra lo llevaron a concluir que la Tierra no se estaba contrayendo, es decir, que el movimiento de la superficie no tenía por qué ocurrir en la dirección radial, habilitando implícitamente el movimiento lateral de los continentes que ocurre en dirección tangencial (Le Grand, 1988).

Holmes argumentó contra las ideas de Jeffreys y trabajó para desarrollar una versión de la deriva compatible con la geofísica y la física. Una de las mayores dificultades que surgieron fue la diferencia de lenguaje existente entre los físicos y los geólogos, lo que generó, en muchas ocasiones, prejuicios o desentendimientos que influyeron en las decisiones que se tomaban respecto de las teorías.

Holmes discutió las ideas de Jeffreys con su mismo lenguaje (el de la física) respecto de la aplicación de la teoría y el ajuste de los datos; puede decirse que Holmes escribió geofísica pero de forma tal que sus escritos no estaban dominados por un lenguaje matemático complejo, a diferencia de los de Jeffreys que estaban abarrotados de matemática.

(...) a comparison of a page after page of Jeffrey equations and calculations with Holmes articles in which geological discussions are buttressed but not dominated by complex mathematics suggests that Holmes wrote geophysics so that it could be understandable to geologist but Jeffrey deliberately wrote over the heads of most of those involved in the debate over global theories (Le Grand, 1988; pp: 112)

Holmes se colocó en una posición respetada, ya que sus escritos eran comprensibles para los geólogos. Además, el inductivismo ingenuo estaba en boga y muchos geólogos, en contraste con las suposiciones *ad hoc*, creyeron que los métodos de la física no eran trasladables a la geología del modo en que Jeffreys lo había propuesto. Los datos disponibles sobre el interior eran escasos pero resultaba necesario ponerlos en correspondencia con los modelos geofísicos que se proponían. Todos estos hechos condujeron a desacreditar a Jeffreys.

En 1925, Holmes se dedica a correlacionar los datos provenientes de las perforaciones de las minas y medidas sísmicas y, de este modo, vinculó el movimiento lateral de los continentes con la descarga de calor proveniente de los materiales radioactivos.

In 1925 he rejected contractionist and, following Joly's lead, pursued the idea that the lateral motion of the continents might provide a means for discharging heat built up under them through radioactivity and convection currents (Le Grand, 1988; pp: 111)

Holmes conocía las propuestas de convección surgidas durante el siglo anterior, lo que lo llevó a modelizar termodinámicamente el interior a partir de los datos disponibles. Así la convección pasó a ser un problema geofísico de investigación.

4.3.2- La sucesión de modelos de convección: de Holmes a Hess

a) El primer modelo de Holmes

Se atribuye a Holmes el haber sido el primero en proponer, en 1928, un modelo convectivo para el interior de la Tierra. Si bien Holmes basó su modelo en los modelos propuestos históricamente, su mérito consistió en instalarlo en el debate

geológico de la época, al proponerlo como el mecanismo que explicaría la teoría de la deriva de los continentes propuesta por Wegener.

In January 1928 he (Holmes) assesses the forces called upon to tug and shove the continents and finds that the dominant forces involved in crustal movements must arise within the earth itself (Moir Wood, 1985; pp: 93)

Su propuesta de base era que la convección se desarrollaba en el substrato y tiraba de los continentes, empujándolos. Difería respecto de Fisher pues consideraba que la corriente ascendente se encontraría bajo un continente debido al efecto térmico de la radioactividad continental, una temática en la que había trabajado.

Holmes's basic proposal was that convection occurs under the lithosphere and drags the continents around. His proposed flow was different from Fisher's, in that Holmes, in his initial version, reasoned that convection might rise under a continent because of the thermal blanketing effect of continental radioactivity, a subject that he was very familiar with (Davies, 1999; pp: 59).

En su versión original, Holmes consideró que las ramas ascendentes de la convección serían capaces de partir los continentes y trasladar sus partes, mientras que las montañas se formarían por compresiones ocasionadas por las ramas descendentes.

Holmes fue el primer científico en estimar los órdenes de magnitud asociados con el fenómeno convectivo, la energía de su flujo y el esfuerzo generado por el movimiento.

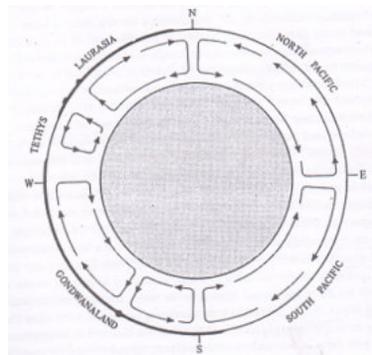


Figura 1: Primer modelo de convección propuesto por Holmes (1930). Citado por Le Grand (1989: 114)

b) El sustento empírico: los modelos de laboratorio

En 1939, David Griggs dio a conocer el resultado de una serie de experimentos de laboratorio para poner a prueba el modelo convectivo a escala reducida.

David Griggs (...) in a widely cited article drew upon the earlier foreign mathematical and empirical work and combined this with his own experimental and model building endeavors to argue for thermal convection currents (Le Grand, 1988; pp: 117)

Este modelo dinámico imitó la acción de las corrientes subcorticales de convección y la reacción que a ellas opone la corteza terrestre. La acción de las corrientes de convección en el substrato acciona la formación y desarrollo de un pliegue cortical dirigido hacia abajo (la raíz o tectógeno) con corrimientos hacia afuera cerca de la superficie. El modelo experimental se llevó a cabo haciéndose rotar dos cilindros.

(...) un proceso terrestre que requiere un millón de años puede ser reproducido en un minuto, la corteza fue hecha con una mezcla de arena y aceite pesado, mientras el substrato se componía de vidrio soluble muy viscoso (Holmes, 1973; pp: 403).

La cuestión acerca de por qué la roca sólida del manto se comporta como un fluido fue abordada en la década de 1950 cuando fueron identificados varios mecanismos que dieron cuenta de los lentos (10^4 años) movimientos de los materiales cristalinos. Estas investigaciones dieron lugar al desarrollo de las bases mecánicas del comportamiento fluido del manto.

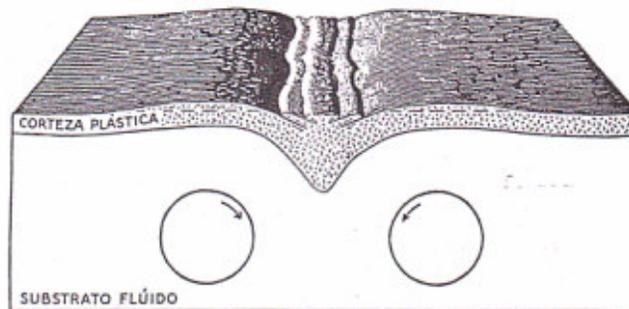


Figura 2: Diagrama del modelo dinámico de Griggs que imita la acción de las corrientes subcorticales de convección y la reacción que a ellas opone la corteza terrestre. Tomado de Holmes (1973: 403)

c) El nuevo modelo de Holmes

En su versión más tardía, de 1944, Holmes propuso que la corteza existente entre los fragmentos continentales divergentes podría extenderse a partir de la erupción de basalto fundido generado presumiblemente en la corriente ascendente desde el manto. Holmes también propuso que la corteza oceánica debía regresar al manto. En una versión posterior de su sistema convectivo propuso la generación de corteza basáltica a través de las corrientes ascendentes de la convección y su remoción a través de las descendentes. Así, Holmes iba precisando cada vez más su modelo. A su vez, propuso que la corteza subducida podría emerger en dos formas diferentes: la mayor parte subiría por el mismo sistema convectivo formando nueva corteza oceánica, y otra parte, ascendería forzando la subida independientemente, perforando la superficie y saliendo al exterior en forma de basalto fluido.

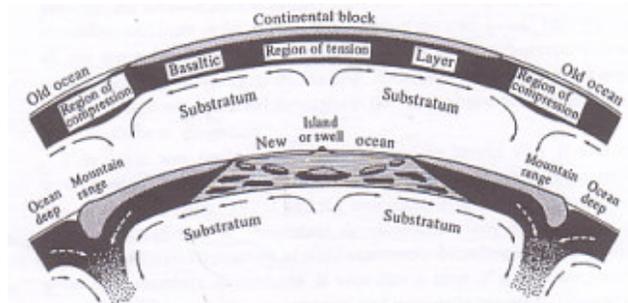


Figura 3: Modelo de convección posterior propuesto por Holmes. Explica la fragmentación y la deriva continental (Le Grand, 1989: 115).

d) El modelo de Hess

En 1959, Harry Hess sintetizó diferentes cuestiones teóricas, proponiendo la expansión del fondo oceánico; la corteza oceánica es material enfriado e hidratado proveniente del manto terrestre que se aparta a ambos lados de una dorsal meso-oceánica. Su hipótesis era que este material ascendía hacia la superficie a través de la rama ascendente de una célula convectiva. Integró, con las corrientes de convección de Holmes, datos aparentemente disímiles como la relativa corta edad de los océanos, la escasez de sedimentos, la existencia de las dorsales, las fosas halladas junto a los arcos insulares y su importante vulcanismo. Así, Hess postuló que el fondo oceánico se creaba en las dorsales y retornaba al manto en las fosas oceánicas.

Su propuesta (de Hess) era que el fondo oceánico se creaba en las crestas oceánicas, se extendía hacia las fosas oceánicas y luego se introducía por debajo de ellas en el manto.

Entonces relacionó sus modelos de fondo oceánico en expansión con la deriva continental, planteando que los continentes eran transportados por el mismo proceso, que estaba dirigido por corrientes de CM (Hallam, 1985; pp: 140).

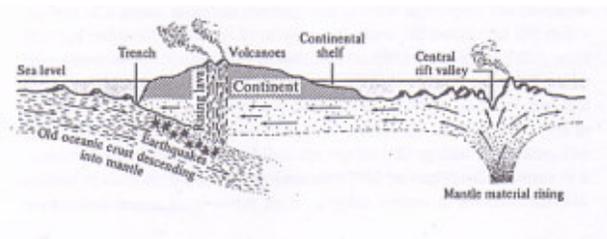


Figura 4: Modelo de expansión del suelo oceánico. (Legrand, 1989).

El modelo de Hess fue utilizado por Vine en 1963 para predecir el patrón magnético del fondo oceánico a fin de explicar las anomalías magnéticas del fondo oceánico que éste presentaba. Cuando los datos confirmaron las predicciones y se incorporaron los modelos sísmicos sobre la estructura interna surge el concepto de placa. La litosfera se definió como una capa rígida externa, constituida por varios bloques o placas, recubriendo otra capa, más blanda, que se conoció como astenosfera. La tectónica de placas fue propuesta por varios autores simultáneamente.

Esta hipótesis, que ha pasado a conocerse como la teoría de *tectónica de placas*, la propusieron independientemente D. McKenzie y R. Parker (1967) y W. Morgan (1968) (Uyeda, 1980; pp: 118).

Naturalmente, cuando concluyó la discusión sobre el movimiento de la superficie se puso de manifiesto la fecundidad de la CM como campo de investigación.

4.4.- La aceptación de la tectónica de placas como nuevo punto de partida: de lo simple a lo complejo

El período que va desde el rechazo de la deriva continental hasta la aceptación de la tectónica de placas ha sido muy analizado por la literatura filosófica e histórica. La discusión acerca del movimiento de la superficie terrestre enmascaró la discusión que se solapaba sobre el interior de la Tierra. La aceptación de la teoría de la tectónica de placas significó mucho más que la vuelta a la idea original de la deriva continental, significó una transformación radical de esta antigua idea. Además, en este período se

gestó un gran campo de investigación alrededor de la CM que ocupó un lugar protagónico sobre el que se orientó la investigación geológica.

4.4.1.- La convección en el manto como campo disciplinar con autonomía

Desde la época en que Wegener propuso su teoría, el debate se centró en el movimiento de la superficie; la cuestión asociada con el mecanismo que lo posibilitara era un tema secundario. Pero ni bien se aceptó la movilidad de las placas, en la década de 1960, hubo un acuerdo implícito en la aceptación de la TCM como modelo de interior acorde con estos movimientos superficiales.

Sin embargo, las afirmaciones sobre la ocurrencia del proceso convectivo contaban en aquel momento con poco desarrollo teórico y escaso sustento empírico. No existían prácticamente investigaciones sistematizadas sobre este tema, lo que generó diferentes debates en la comunidad científica y la conciencia de la necesidad de orientar la inversión hacia la investigación de este tema estratégico.

Así, se abrió un campo de investigación interdisciplinario que precisó del abordaje de diferentes perspectivas –especializaciones disciplinares necesarias y, a la vez, complementarias– que posibilitaran acceder a una visión global del comportamiento del planeta. La complejidad que implicó el abordaje de un problema de estas características requirió de la participación de científicos especialistas y generalistas a fin de abarcar un gran número de hipótesis y evidencias experimentales que aportaran conocimiento sobre la dinámica terrestre en general, y sobre el MCM, en particular.

Por ello, la investigación alrededor de este modelo se convirtió en un campo de investigación específico que recibió fuertes aportes de la comunidad geológica pero también se configuró como un campo controversial que se proyectó en el tiempo hasta nuestros días, en los que aún continúan las controversias. Su evolución tuvo un carácter sumamente dinámico. Después de la aceptación de la tectónica de placas, se generó una base teórica común alrededor de la convección. Pero a medida que se investigaron

distintas perspectivas, se establecieron, por una parte, consensos y disensos parciales y, por otra, modelos de convección rivales a gran escala.

4.4.2.- Evolución conceptual: origen y desarrollo del campo controversial

El inicio de este nuevo período significó que la comunidad profesional tomara conciencia acerca del alcance potencial de la TCM y se aunaran esfuerzos para explorar diferentes problemas involucrados. Esto, a su vez, significó que se propusieran diferentes respuestas a un mismo interrogante. Así, se plantearon diferentes frentes de batalla conceptuales sobre los que se iban logrando algunos consensos y controversias parciales.

Con el correr del tiempo, la controversia de mayor trascendencia es la que sitúa la convección en dos sistemas separados (uno ubicado en el manto superior y otro en el manto inferior), frente al modelo que postula un único sistema convectivo que opera en la totalidad de manto.

Indagamos el origen y desarrollo del campo controversial asociado con la TCM, tomando como punto de partida los acuerdos en el momento de la aceptación de la tectónica de placas por parte de la comunidad geológica. Esta aceptación generalizada se organizó sobre la base de un consenso inicial sobre la idea de convección, basándose en cierta medida en el modelo de Hess. Este modelo funcionó a modo de *common ground* sobre el que se gestó el campo controversial que nos interesa abordar.

4.4.2.1.- El consenso abre un campo de investigación próspero

Una de las primeras referencias a la prosperidad de la convección como campo de investigación fue realizada por Tuzo Wilson (1963) respecto del mecanismo impulsor de la tectónica de placas y en relación con el estudio de la Tierra a gran escala:

Las corrientes de CM juegan ahora el papel principal en cada discusión sobre los procesos a gran escala y larga duración que se producen en la Tierra (Wilson, 1963; pp: 52).

A partir de allí, se genera un gran interés en investigar los múltiples aspectos involucrados en la convección, en modelizar la interacción entre el movimiento de las

placas y el interior de la Tierra. Tal es así que en 1962 se creó un proyecto internacional conocido como “Upper Mantle Project”, que contó con el auspicio del *International Council of Scientific Union*. Fue planeado, inicialmente, para desarrollarse durante dos años pero fue prorrogado dos veces y culminó a fines de la década de 1960.

El Proyecto Manto Superior agrupó a una gran cantidad de científicos de diferentes lugares del mundo y fue organizado como un programa internacional de estudios de geofísica, geoquímica y geología relativos al manto superior y a su influencia en el desarrollo de la corteza terrestre (Knopoff, 1969).

La comunidad geológica volcó su atención sobre este mecanismo térmico a partir del cual se suscitaron más interrogantes que certezas y surgió entonces una clara conciencia de los problemas a investigar sobre su funcionamiento:

If the convection hypothesis is accepted as a working hypothesis, other questions can be considered. Is there a turbulent flow superposed on the steady pattern? Is the flow Newtonian to a first approximation? How deep into the mantle does the flow extend? Has it been continuous or discontinuous through the earth's life? Can changes in the pattern of convection be traced through geological time? (Runcorn, 1969, pp: 692)

Al finalizar el proyecto, la *American Geophysical Union* publica un monográfico “The Earth Crust and the Upper Mantle” (Hart, 1969) que da cuenta de las diferentes líneas de investigación desarrolladas a través del proyecto. El índice del libro (ver Anexo) puede considerarse una buena guía de los problemas que se estudiaron a través del proyecto.

Vale la pena destacar que la reunión final del proyecto, *Conferencia de la Tierra Sólida*, se realizó en Buenos Aires, entre el 26 y el 31 de octubre de 1970 y que la FCEN se encontraba entre las instituciones auspiciantes y el Dr. Daniel Valencio uno de sus organizadores (Linares *et al.*, 1972).

Una figura sobresaliente en la conducción del proyecto fue Vladimir Belousov, un ferviente opositor de la deriva continental en los años 1960 que ocupó lugares

destacados en importantes instituciones geológicas internacionales; en especial fue presidente del "Internacional Upper Mantle Committee":

Belousov was the most prominent russian opponent of Drift. He occupied positions of great prestige and authority in the crucial period: Vice-President of the IGY, Head of the Department of Geodynamics attached to the Academy of Sciences in Moscow, President in 1960 of the International Union of Geodesy and Geophysics, Chairman in 1972 of the International Upper Mantle Committee of the IUGG (Le Grand, 1988; pp: 246).

Las conclusiones más importantes surgidas del proyecto indicaban que el manto era heterogéneo en los primeros 700 km de profundidad y que los movimientos interiores del planeta que ocurren en la actualidad también ocurrieron en el pasado geológico.

Among the major results of the Upper Mantle Project, two are especially significant. First, it has been clearly demonstrated that the earth is not radially simetric: important lateral inhomogeneities exist in the uppermost 700 kilometers. Second, it is now clear that larges-scale motions of the upper parts of the earth are taking place now and have taken place in the past. (Knopoff, 1969; Foreword).

En este contexto, lejos de producirse respuestas contundentes, se abrían una serie de interrogantes sobre el detalle de los mecanismos involucrados en el movimiento del interior de la Tierra.

The problem of detailed mechanisms of plate motions (establish specific causal connections between convections currents and the movements of particular plates) has attracted much attention but thus far proposed solutions have not been judged satisfactory (Le Grand, 1988; pp: 248).

En particular, Belousov fue el director editorial del monográfico cuyo prefacio establece que la historia del desarrollo de la corteza terrestre depende de los procesos que ocurren en el manto superior.

We have many reasons to believe that the history of the development of the earth's crust is fundamentally dependent on processes in the upper mantle to a depth not exceeding 1000 km (Belousov, 1969; Preface)

Una parte importante de la comunidad científica creía que la convección estaba confinada al manto superior. En otras palabras, la movilidad estaba acotada y se presuponía que el manto inferior era inmóvil.

Durante la consecución del proyecto se produjeron avances en diferentes áreas geológicas, desde diferentes perspectivas. Cabe mencionar que la sismología recibió una gran parte de los esfuerzos, lo que condujo años más tarde al desarrollo de la tomografía sísmica. Los conocimientos que se produjeron en estos campos de investigación generaban disenso cuando se los intentaba integrar en modelos de un orden de organización mayor, como era la CM. Por ello, las conclusiones que se sacaban estaban en función de qué datos empíricos y qué modelos funcionaban a modo de sustento de estas ideas.

Durante la década de 1970, la investigación del área de geofísica recibió un gran impulso. Se desarrolló gran cantidad de conocimiento alrededor de problemas considerados cruciales, tendientes a resolver ambigüedades surgidas de la tectónica de placas:

(...) resolving residual ambiguities within plate tectonics theory itself: the solving of problems and the gathering of data which has significance only within the context of drift (...) These areas of research have been mostly the province of geophysicists (Le Grand, 1988; pp: 248).

Este impulso se tradujo, en particular, en un crecimiento en el número de publicaciones de las revistas especializadas del área. Por ejemplo, el *Journal of Geophysical Research* duplicó el número de páginas anuales entre 1965 y 1985 y revistas como *Tectonophysics* y *Review of Geophysics and Space Sciences* afianzaron su prestigio. Además, se crearon otras revistas como el *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* y *Tectonics*.

Por otra parte, las respuestas a los problemas que se iban planteando requerían del concurso de diferentes disciplinas. Se trataba de problemas en los que resultaba complejo poner en correspondencia los modelos teóricos con los datos experimentales. Esta situación se prolongó durante mucho tiempo, provocando un desafío permanente

para integrar los datos y las restricciones que las diferentes disciplinas científicas aportaban.

In the past half century, nature and scale of mantle convection has been one of the big puzzles in the Earth Sciences. A major challenge has been to understand, evaluate, and reconcile the range of observations and constrains provided by different scientific disciplines (Albarede & van der Hilst, 1999; pp: 535).

El consenso sobre la convección rápidamente generó la atención de la comunidad geológica abriendo diversas y fructíferas áreas de investigación.

4.4.2.2.- El problema que dio origen al campo controversial: la movilidad del manto inferior

A fines de 1970 y principios de 1980, surge con fuerza una postura que cuestiona que la convección esté confinada al manto superior. A esa altura, buena parte de la comunidad científica había asumido esta idea.

(...) most people have assumed that only the upper mantle, or possibly the upper mantle and transition zone, is involved in plate dynamics (Davies, 1977; pp: 460).

En realidad, la tectónica de placas fue considerada como una prueba irrefutable sobre la ocurrencia de la CM superior pero comenzaron a surgir otros modelos que sugirieron que el manto inferior no era ajeno a la convección.

Se pensó que existía una especie de barrera que impedía que el flujo pasara hacia el manto inferior, lo que llevó a postular otros posibles modelos convectivos.

Los factores que se tomaron en cuenta a la hora de evaluar la existencia de la hipotética barrera tienen orígenes diferentes. Los más importantes fueron: el contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior, las transiciones de fase en la zona de transición, la desaparición de la sismicidad a partir de los 700 km de profundidad y la heterogeneidad química entre ambos mantos (contraste del MORB⁵ con el OIB⁶).

⁵ Mid Ocean Ridge Basalts

⁶ Ocean Island Basalts

La combinación de diferentes hipótesis dio lugar a la generación de varios modelos de convección, pero la discusión más fuerte se centró en si se extendía o no hacia el manto inferior.

In fact, the issue of shallow vs deep mantle convection in the Earth is much debated in the current literature (see, for example: Tozer 1972 and Mc Kenzie & Richter 1976, who argued that convection associated with plate motions does not penetrate below 700 km, and Sammis et al. 1977, O'Connell 1977, and Davies, 1977, who take the opposite view (Schubert, 1979; pp: 290).

En general, las publicaciones que cuestionaron que sólo el manto superior participaba del fenómeno convectivo revisaron las hipótesis y los datos involucrados en tal afirmación. Hemos seleccionado dos artículos, uno de ellos publicado en 1977 por Geoffrey Davies (*Whole mantle convection and plate tectonics*) y el otro por Schubert en 1979 (*Subsolidus convection in the mantle of terrestrial planets*), con la intención de recrear esta situación.

Pensamos que estos artículos son representativos del contexto teórico en el que se gestó el campo controversial. Hemos realizado un análisis detallado de la publicación de Davies de 1977 (Anexo 1: Bonan, 2003) a partir del cual extrajimos una serie de conclusiones que aquí presentaremos.

Ambas publicaciones acuerdan con el modelo de convección global pero difieren en el enfoque general que desarrollan a través de cada artículo. En particular, la publicación de Davies se restringe a la convección en la Tierra mientras que la de Schubert se basa en ésta para avanzar sobre la convección como mecanismo general de enfriamiento planetario.

Trabajaremos sobre los aspectos centrales de la defensa de la convección global a partir del artículo de Davies, luego presentaremos algunos aspectos de la publicación de Schubert que brindan un panorama más amplio de la investigación en el campo.

4.4.2.3.- La participación del manto inferior en la convección: la convección global

Considerar que el manto inferior estaba en movimiento daba lugar a realizar distintas especulaciones. Davies (1977) pensó que el manto inferior se veía afectado por la tectónica de placas y se propuso revisar los datos que llevaron a tal conclusión.

It seems unlikely that the lower mantle is *not* involved in motions related to plate tectonics. The evidence for relating to several alleged obstacles to lower mantle convection is reviewed (Davies, 1977; pp: 459).

Así, Davies revisó los datos principales que sustentaron la confinación de la convección al manto superior. Analizó las diferencias de composición química entre el manto superior y el inferior, evaluó el rol de las transiciones de fase en la zona de transición, la desaparición de la sismicidad con la profundidad y, por último, el contraste de la viscosidad entre el manto superior e inferior.

Sintetizamos brevemente los argumentos que se establecen a partir de los datos que expone Davies y que lo llevan a concluir que la zona de transición no es una barrera para la convección.

i) Diferencias geoquímicas

El análisis se centra en cuestionar la existencia de un gradiente geoquímico concluyendo que el manto es químicamente uniforme. De todos modos, la conclusión no es completamente excluyente.

To summarize, presently available information does not require the mantle to be chemically non-uniform, although this possibility cannot be completely ruled out (Davies, 1977; pp: 462).

Más allá de ello, en general a lo largo del trabajo se supone que el manto es químicamente homogéneo.

ii) El rol de las transiciones de fase

La evaluación del papel de las transiciones de fase en la convección del manto se realiza a través de dos tratamientos diferentes: por un lado, al determinar las condiciones de estabilidad marginal de un fluido al que se le transfiere calor desde

abajo y, por otro, al considerar sus efectos sobre un flujo de velocidad finita. Este último enfoque se aplica a las losas litosféricas descendentes.

La conclusión es que, en apariencia, las transiciones de fase no impedirían el pasaje de materia entre el manto inferior y superior aunque se aclara que las transiciones de fase pueden modificar el patrón del flujo.

(...) it seems that phase transitions will not prevent whole-mantle convection, although they may modify the flow pattern somewhat by preventing some flow paths from penetrating the transition zone (Davies, 1977; pp: 462).

iii) La desaparición de las fuentes de sismicidad

Dos son las características que justifican, desde la perspectiva sísmica, la creencia de que el manto inferior no está involucrado en la dinámica de la tectónica de placas: por un lado, que los terremotos profundos desaparecen en profundidades cercanas a los 700 km y, por otro, el cambio que sufre el esfuerzo al que está sometida la losa descendente entre los primeros 300 km y la zona comprendida entre los 300 y 700 km.

El análisis de los datos lleva a concluir que la distribución de sismicidad no permite distinguir si las losas atraviesan los 700 km de profundidad.

iv) La variación de la viscosidad con la profundidad

La viscosidad juega un papel muy importante en la forma en que ocurre el flujo convectivo. Este concepto adquiere todo su sentido cuando se lo estudia en el contexto del enfoque reológico, a través de las propiedades mecánicas del manto que se infieren a partir de las evidencias geológicas provenientes del rebote postglacial.

El modelo propuesto por el artículo postula la existencia de un flujo profundo para explicar los datos, considerando un manto adiabático y modelizado por un fluido viscoso. Estas características apoyan la posibilidad de que los cambios de fase en la zona de transición no sean una barrera para el flujo en el manto.

La revisión de estos cuatro aspectos empíricos integrados lleva a concluir que al menos habría que considerar la participación del manto inferior en la convección, abriendo la posibilidad de que el manto convecte en su conjunto, como un todo.

The preceding review attempts to demonstrate that whole mantle convection should at least be considered as a viable alternative (Davies, 1977; pp: 467)

Esta publicación (Davies, 1977) sostiene el modelo de convección global poniendo a prueba un modelo numérico, en el que varía el contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior frente a la obtención de posibles patrones de flujo, considerando que la superficie está formada por placas móviles. De allí, se deduce que la viscosidad relativa entre el manto inferior y superior debe ser del orden de 10^{-5} para que la convección quede confinada al manto superior (Ver Figura 5). Vale la pena aclarar que el modelo computacional utilizado es muy limitado en otros aspectos de su formulación (Ver Anexo 1: Bonan, 2003).

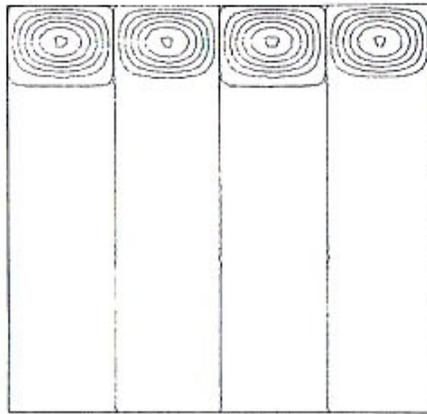


Figure 4. Flow pattern for the case $\nu^{\text{sup}}/\nu^{\text{I}} = 10^{-5}$ of Fig. 2.

Figura 5: Patrón convectivo para el caso en que $\nu^{\text{sup}}/\nu^{\text{inf}} = 10^{-5}$ (Davies, 1977).

El modelo que propuso Davies en 1977 postula que la convección ocurre de dos modos que operan independientemente uno de otro:

- (i) Modo a escala de placa: las placas subductantes conforman el flujo convectivo entrante y alcanzan el manto inferior. Este modo sería el patrón predominante de la convección

- (ii) Modo plumas: las plumas térmicas funcionan a modo de mecanismo de liberación del calor –habían sido propuestas inicialmente en 1971 por Morgan–. Este modo de convección actuaría como un modo secundario.

Por otra parte, el artículo que publica Schubert en 1979, *Subsolidus convection in the mantle of terrestrial planets*, analiza la convección global del manto más allá de su confinación o no al manto superior. Frente a la controversia, se posiciona en acuerdo con la convección global, al igual que Davies (1977), aunque el objetivo de la publicación es discutir el protagonismo de la convección como mecanismo de liberación del calor en la actualidad y en el pasado térmico de los planetas sólidos (Tierra, Mercurio, Venus, Marte, nuestra Luna y los satélites de los planetas exteriores). Es decir, que este artículo discute la convección desde un punto de vista evolutivo y, a la vez, planetario.

Our main purpose in this review is to discuss the possible dominant role of this cooling mechanism in the past and present thermal states of the terrestrial planets (Schubert, 1979; pp: 289).

Si bien el artículo se centra en la convección como mecanismo general de enfriamiento de los planetas sólidos, para el caso de nuestro planeta el modelo presentado a través de esta publicación afirma que la combinación del manto sólido y el mecanismo de tectónica de placas es una evidencia irrefutable para la ocurrencia de la CM.

In the case of our own planet, a solid mantle and a plate tectonic structure together provide incontrovertible evidence of past and present solid state mantle convection (Schubert, 1979; pp: 289).

Por lo tanto, los datos afirmarían que la convección ocurre, al menos, en el manto superior. Según Schubert (1979) la evidencia empírica no alcanzaría para garantizar que el manto inferior participa del proceso. Por ello, se afirma que lo que se puede probar es que la convección abarca al manto superior. El autor considera que no hay pruebas suficientes para demostrar que el manto inferior de la Tierra participa de la

convección y que tampoco es posible demostrar que lo hacen los mantos de los planetas sólidos.

However, plate tectonics is irrefutable proof of subsolidus convection only in the uppermost mantle of the Earth, and just we cannot prove the occurrence of convection in the interiors of the other terrestrial planets, we cannot demonstrate that convection is taking place or has occurred throughout the entirety of the Earth's mantle (Schubert, 1979; pp: 289)

Schubert acuerda con la convección global aunque no pretende que su defensa sea el motor del artículo. Por el contrario, en el desarrollo del artículo se da por supuesta la convección global y se avanza en analizar sus características físicas.

We do not intend to make a question of the existence of whole mantle convection in the Earth and the other terrestrial planets the central theme of this review. Indeed, we have long advocated the importance of whole mantle convection in planetary interiors. Our main purpose here is to discuss the physical aspects of whole mantle convection, assuming that it occurs, and describe how it will be control the thermal evolution of a planet (Schubert, 1979; pp: 292).

En relación con las posibles causas de la participación del manto inferior en la convección, se discute la existencia de la barrera que impediría el flujo convectivo. El autor no cree que el cambio de fase de spinelo a postspinel pueda obstruir el pasaje de materia hacia el manto inferior.

En relación con la modelización del contraste de viscosidad, se cree que las transformaciones de fase pueden ser interpretadas como un cambio abrupto de la viscosidad. Sin embargo, el autor cita la uniformidad de la viscosidad de todo el manto en función de los datos obtenidos del rebote post-glacial, concluyendo que las transiciones de fase, en especial de spinelo, no actúan necesariamente como una barrera reológica para el flujo.

It seems reasonable to conclude, on the basis of the above discussion, that thermodynamically, upper mantle phase changes do not necessarily confine convection to the upper mantle. On the contrary, they may promote whole mantle convection and provide an important drive force for plate motions (Schubert, 1979; pp: 315).

A fines de la década de 1970, los modelos numéricos eran bidimensionales o tridimensionales de simetría radial, e incorporaban la temperatura y la presión como variables reológicamente relevantes, incluso consideraban al manto como un fluido no lineal. Si bien estos modelos aportaron mucha información sobre los aspectos reológicos, existía conciencia en los investigadores acerca de la necesidad de generar modelos que tuvieran en cuenta las alteraciones que se producen, dado que el sistema real no presenta simetría axial.

Even models of axisymmetric convection in spheres and spherical shells would be a welcome addition to the literature, although their stability to nonaxisymmetric disturbances should always be determined (Schubert, 1979; pp: 336)

Los modelos teóricos, su contraparte experimental y los modelos numéricos en relación con la convección presentaban ventajas y desventajas pero, en conjunto, brindaron un panorama amplio sobre la ocurrencia del fenómeno.

Nevertheless, we need to persevere in our attempts to study mantle convection using all the approaches available to us whether theoretical, numerical or experimental (Schubert, 1979; pp: 335).

Durante la publicación Schubert expone diferentes aspectos en relación con la convección global: las características físicas relevantes de los mantos planetarios, en particular los aspectos reológicos, las posibles fuentes de calor, los parámetros adimensionales y su significado (números de *Rayleigh*, *Nusselt*, *Prandtl* y la *disipación*) y los efectos de la convección sobre el estado mecánico y térmico del interior de los planetas (en particular, teniendo en cuenta la historia térmica de la Tierra).

4.4.2.4.- El surgimiento del modelo rival de la convección global: la convección estratificada

La oposición teórica respecto de la localización del sistema convectivo en el manto superior dio lugar a suponer la existencia de una barrera que impide el pasaje del flujo. Esta hipótesis no sólo abrió la posibilidad de que el manto inferior no convecte sino también de que ambos mantos, superior e inferior, lo hagan separadamente. Es

decir, se abrió la posibilidad de que el manto convecte en forma estratificada y esta discusión se prolongó a lo largo del tiempo.

The question about of whether mantle convects as one or two layers has been probably the most vexed and persistent controversy about mantle convection (Davies, 1999; pp: 337).

La cuestión siguió centrada en el pasaje de materia por la discontinuidad de los 660 km pues, en alguna medida, la discusión anterior se centraba en las heterogeneidades que presentaba el manto a través de la comparación del OIB con el MORB.

(...) the present discussion is not about whether the mantle is vertically homogeneous or heterogeneous, it is about the more specific question of whether there is a barrier to flow at a depth of 660 km (Davies, 1999; pp: 338).

El OIB emanado de los puntos calientes y el MORB emanado de las dorsales meso-oceánicas difieren en su composición química e isotópica, lo que podría pensarse como material proveniente de fuentes diferentes, de lugares del manto que no estén conectados entre sí. La discontinuidad de los 660 km daría cuenta de esta separación, abriendo la posibilidad de la ocurrencia de procesos independientes entre el manto superior e inferior. Si asumimos la separación, ¿por qué pensar que el manto inferior está inmóvil? ¿por qué no pensar, además, que el manto inferior también libera calor a través de la convección?

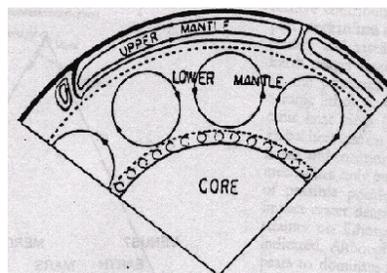


Figura 6: Modelo de convección estratificada

Ritcher y McKenzie (1981) analizaron las causas de la estratificación de la convección a través de simulaciones de laboratorio y modelos numéricos. Su objetivo fue considerar algunas consecuencias de la convección en capas separadas al interior del manto.

The purpose of this paper is to consider some of the consequences of meeting this constraint by assuming that mantle convection is in the form of superimposed layers (Ritcher & McKenzie, 1981; pp: 6133)

La movilidad del manto inferior depende de la variación de la viscosidad con la profundidad. Si el manto inferior fuera mucho más viscoso que el superior, la convección podría quedar confinada al manto superior. Sin embargo, en esta época los estudios acerca del rebote postglacial sugerían un manto viscosamente homogéneo. Además, los estudios sísmicos insinuaban que la losa oceánica subducida no llegaba al manto inferior, pues a esa profundidad cesaban los sismos, abonando la hipótesis de dos capas que convectan en forma separada.

En su desarrollo, Richter y McKenzie, describen los experimentos de laboratorio y los modelos numéricos que resultan de ubicar la convección en dos capas separadas. Los experimentos de laboratorio iluminaron las condiciones bajo las cuales una estratificación química podría persistir en lugar de la mezcla que se produciría con la convección global. Los modelos numéricos dieron lugar a concebir con detalle tanto las propiedades térmicas como el flujo convectivo.

Los resultados de ambos tipos de estudios se integraron para evaluar la potencialidad de las propiedades de la convección estratificada. Surgió como conclusión importante que una pequeña variación de la densidad puede modificar fácilmente el modo de convección, de global a estratificada, pues la variación de la densidad está en relación directa con las transformaciones de fase.

Despite the great tectonic importance of mantle convection is rather easily modified by small degrees of chemical variability whose effect might be further enhanced by phase transformations (Ritcher & McKenzie, 1981; pp: 6141).

En relación con las posibles causas de la convección estratificada, los autores involucraron la variación de elementos químicos, los efectos de su combinación, los cambios de fase y también los efectos de los cambios de fase.

4.4.2.5.- La conformación del campo controversial: galería de modelos

Relevaremos algunos de los modelos de convección que fueron propuestos a partir de la década de 1980. Para ello, tomamos la revisión en retrospectiva que hace Geoffrey Davies en una publicación del año 1992 en la que analiza los modelos de convección alternativos que fueron discutiéndose desde fines de 1970. El relevamiento no tiene por finalidad profundizar en cada propuesta sino apreciar el surgimiento de una diversidad de modelos de convección y, con ello, la ampliación del campo controversial.

Wasserburg & DePaolo propusieron en 1979 un manto dividido por la convección sugiriendo que el manto inferior era primitivo y que las plumas térmicas ascenderían desde la interfase mezclando material del manto superior e inferior, dando cuenta de los datos proporcionados por el análisis del OIB.

Allegre, junto con otros investigadores, en 1980, modificaron este modelo sugiriendo que una fase metálica se segrega en forma continua desde el manto inferior hacia el núcleo.

En 1982, Hofmann & White postularon que el OIB es una fuente primaria de la corteza oceánica, reciclada y modificada por alteraciones de tipo hidrotermales del fondo oceánico. Además, consideraron la posibilidad de que la corteza subducida se acumulara en una capa en el límite entre el núcleo y el manto, hipótesis que, con el tiempo, logró amplia aceptación por parte de la comunidad científica.

En 1981, Davies propone un manto que contiene heterogeneidades de distintas dimensiones. Supone que las heterogeneidades tienen diferentes grados de enriquecimiento y/o agotamiento de ciertos elementos radioactivos. Basaba sus afirmaciones en las proporciones relativas entre los elementos (Nb/U frente a Nb). Además, postula que la fuente de estas heterogeneidades es la actividad continua de la subducción.

Más tarde, en 1984, Davies encuentra evidencias que le permiten postular que la viscosidad aumenta con la profundidad y propone que el hundimiento de la losa oceánica es el mecanismo de producción de las heterogeneidades. Estas ideas darían

lugar a una total estratificación de las heterogeneidades en relación con los elementos traza e isotópicos en función de la profundidad.

Allegré y Turcotte, en 1985, proponen un modelo de manto con dos capas, invocando a la mesosfera como una capa limitante, ubicada inmediatamente encima del manto inferior. En la mesosfera se acumularía corteza continental reciclada y litosfera continental y oceánica.

Allegré junto con otros autores reelaboran el modelo en 1987. Sugieren que la mitad inferior del manto es primitiva a partir de la presencia de ciertos isótopos de gases nobles en la composición de la atmósfera. Proponen la existencia de una capa que se encontraría justo encima de la discontinuidad de los 650 km y que funcionaría a modo de fuente material de origen de la corteza oceánica.

En 1982, Ringwood, y en 1988 junto con Irifune, sugirieron que la litosfera oceánica subducida queda atrapada en la zona de transición en las cercanías de la discontinuidad de los 650 km.

En 1982, Anderson presenta un modelo en el que la corteza oceánica se acumula entre los 220 y los 650 km.

En 1985, Loper publica un artículo en el que postula que la escala a la que se mueven las placas dirige el proceso convectivo y acuerda con la existencia de plumas térmicas que liberarían calor procedente del núcleo, sin ser la contraparte del flujo producido por las placas, es decir, considera que placas y plumas son procesos de convección diferentes.

Silver junto con otros autores proponen, en 1988, un modelo en el que la litosfera subducida penetra transitoriamente el manto inferior, donde aumenta su temperatura y vuelve a ascender hacia el manto superior.

Estos modelos coinciden en algunos puntos y se enfrentan en otros. La interpretación que se hace de los datos genera pequeñas controversias en la formulación de los modelos de CM y promueve también acuerdos parciales entre algunos de ellos.

4.4.2.6.- Los caminos de la controversia en el tiempo

En 1992 Davies, junto con Richards, publica otro artículo que adquiere mucha mayor trascendencia que el presentado en 1977. Esta publicación es citada como referencia de modelo de convección que integra datos geofísicos y geoquímicos relevantes (Condie, 1997).

The figure⁷ is a model for convection in the Earth proposed by Davies and Richards (1992), which accommodates the geophysical and geochemical data presented in this chapter (Condie, 1997; pp: 137)

El nuevo modelo, en general, retoma las hipótesis propuestas en el modelo publicado en el artículo de 1977 –algunas con mayor vigor que otras– y se presenta un amplio rango de evidencias geofísicas y geoquímicas que llevan a discutir la CM en interacción con la dinámica de la tectónica de placas.

El propósito de los autores es realizar una revisión de la evidencia empírica asociada con la convección presente en la literatura.

Thus the paper is not a review in the sense that the term is often understood: it is more a review of the observations than of the literature (Davies & Richards, 1992; pp:152)

Fundamentalmente, el artículo es una revisión de las evidencias experimentales que sustentan y restringen el modelo de convección global. En este sentido, su fortaleza reside en integrar distintos aportes a la construcción de un modelo general, a diferencia de otras propuestas que integran dentro de sí menor cantidad de aspectos relevantes.

A fundamental point of this paper is that a large amount of observational evidence can be used to constrain models of mantle dynamics. Most discussions of mantle models consider or emphasize only a subset of these observations, and many of the models are poorly quantified. (Davies & Richards, 1992; pp: 197)

⁷ ver Figura 7

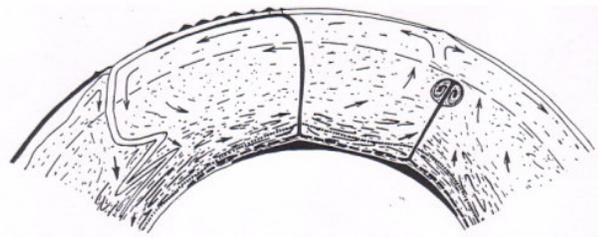
El modelo presentado, al igual que en la publicación anterior, postula que el modo dominante de la convección es el flujo asociado con el modo a escala de placa, siendo las placas parte integral del flujo. El modo plumas es determinado por el ascenso flotacional de las plumas térmicas que surgen de la base del manto inferior, causando los *puntos calientes volcánicos*⁸. Este otro modo de convección, a su vez, se presenta como un modo secundario aunque, en relación con el modelo de 1977, las plumas tienen un rol mucho más definido.

El artículo presenta una gran cantidad de datos tendientes a desestimar que la zona de transición sea una barrera para el flujo. La evidencia más potente surge de la *topografía del fondo oceánico*⁹ y del campo gravitatorio a través de las anomalías del geoide.

El modelo propuesto a través de este artículo ha sido representado por los autores como se muestra en la Figura 7. El flujo a escala de placa penetra el manto en profundidad, las plumas térmicas provienen de la base del manto, la viscosidad aumenta con la profundidad en 2 o 3 órdenes de magnitud –una parte importante de este incremento se acumula en la zona de transición– y las antiguas losas oceánicas se concentran cerca de la base del manto.

It (the model preferred here) features plate-scale flow that penetrates throughout the mantle, plumes coming from a relatively weak thermal boundary layer at the base of the mantle, the viscosity increases by 2-3 orders of magnitude through the depth of the mantle, with the substantial part of that increase being concentrated in the mantle transition zone, a concentration of subducted oceanic crust near the bottom of the mantle (Davies & Richards, 1992; PP: 199).

Figura 7



⁸ Volcanic hotspots

⁹ Bathymetry

Figura 7: Modelo de convección global

Un aporte sustantivo que hace el artículo, cuantitativamente hablando, consiste en señalar que la velocidad de la convección térmica es comparable a la velocidad de las placas. Las placas juegan un papel crucial en la organización de la estructura del flujo mantélico, determinando las principales localizaciones de los flujos ascendentes y descendentes. El *flujo a escala de placa* da cuenta de al menos el 85% del calor perdido por el manto y de la variación del flujo de calor a través de la topografía del fondo oceánico. Esto implica que las placas son una parte integral de la convección, convirtiéndose en la principal *banda térmica limítrofe*¹⁰ del sistema.

Los puntos calientes son centros volcánicos aislados, rodeados de “suaves” elevaciones del fondo oceánico. Se infiere que por debajo subyacen las plumas, estrechas columnas de material del manto que suben por acción de las fuerzas de flotación. Estas elevaciones o panzas asociadas con los puntos calientes restringen el flujo flotacional y el flujo de calor transportado por las plumas, que comprende aproximadamente el 12% del flujo de calor total que emerge de la Tierra.

Además, se sugiere que no hay suficiente evidencia para creer que haya convección a pequeña escala bajo las placas oceánicas, como lo había propuesto Ritchey en 1973 y revisado posteriormente Yuen, Peltier y Schubert, en 1981.

Respecto de la zona de transición, el artículo presenta una variedad de evidencia a favor de la hipótesis que la caracteriza como una zona en la que se producen cambios de fase pero no de composición. Básicamente, se postula como una zona isoquímica. La evidencia más fuerte proviene del análisis de las anomalías del geoide sobre las zonas de subducción y de la falta de topografía del fondo marino que da cuenta de la existencia de flujos ascensionales provenientes de una posible banda térmica limítrofe ubicada en los 660 km.

¹⁰ Thermal Boundary Layer (TBL)

A partir de algunos experimentos de laboratorio, se infirió que la convección podría separarse en dos sistemas convectivos pero los autores señalan que los datos han sido cuestionados.

Some laboratory evidence on the thermal expansion of the silicate perovskite phase inferred to be present in the lower mantle would require a chemical difference between the upper and lower mantles, and imply separate, two-layer convection; the accuracy of these data has been questioned. (Davies & Richards, 1992; pp: 198).

Por otra parte, a fines de 1993, Glatzmaier & Schubert publican en un artículo el análisis de cuatro modelos numéricos tridimensionales. Estos modelos dan cuenta de cuatro modos extremos de convección obtenidos a partir de las posibles combinaciones que surgen de considerar que la viscosidad puede ser constante o estratificada y que la convección, a su vez, puede ser estratificada o global. La intención del artículo es delinear una guía teórica para arrojar luz sobre los posibles estilos de convección al que está sometido el manto.

We present numerical calculations of three-dimensional spherical shell thermal convection for constant viscosity and stratified viscosity models of whole-layer and two-layer mantle convection. These four examples are intended to provide theoretical guidance for determining the style of convection that is occurring in Earth's mantle. (Glatzmaier & Schubert, 1993. pp: 21.969)

El modelo numérico ubica una interfase materialmente impermeable e indeformable a fin de simular la estratificación. Esta interfase se piensa como una banda térmica limítrofe entre las capas superior e inferior a una profundidad coincidente con la discontinuidad sísmica de los 660 km.

Los autores presentan diferentes instantáneas obtenidas a través de los modelos global (Figura 8) y estratificado (Figuras 9 y 10), a partir de un perfil de temperaturas dado para cada caso.

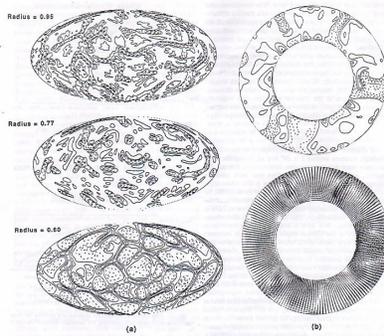


Fig. 2. The whole-layer case. (a) A sequence of the temperature perturbations, relative to the spherically averaged temperature profile in Figure 1, in spheroidal sections (divided in an equal area projection) at radii relative to the outer radius of 0.95, 0.77, and 0.60. Note that the 0.95 case nearly coincides with the convection boundary at 0.50. Solid (dashed) contours represent hot (cold) perturbations. (b) The temperature perturbation and the projected velocity vectors are also plotted in the equatorial plane. All contour plots in this paper have a contour interval of 100 K, and the same scale is used in all plots for the velocity vector lengths.

Figura 8: Convección global

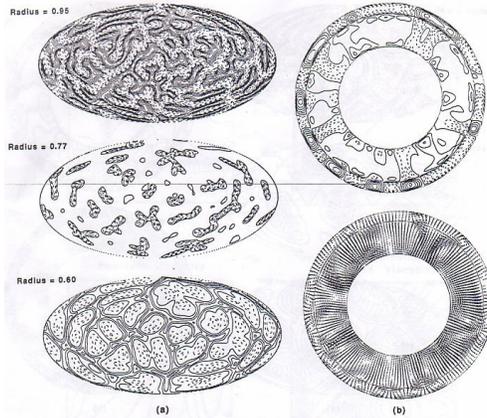


Fig. 3. The constant dynamic viscosity two-layer mantle case. The plots are as described in Figure 2. A dotted line in the equatorial plots at the 670-km depth indicates the location of the impermeable interface.

Figura 9: Convección estratificada

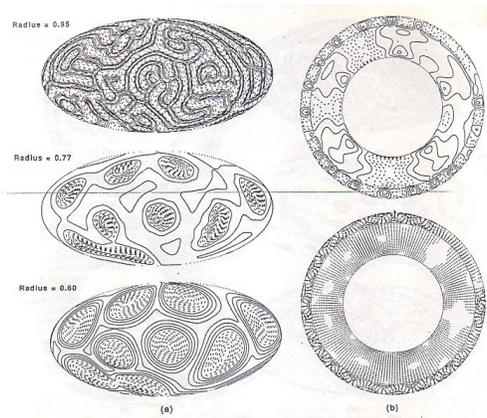


Fig. 4. The discontinuous viscosity two-layer mantle case. The plots are as described in Figure 2.

Figura 10: Convección estratificada

Este artículo retoma una visión evolutiva de la convección pues introduce la variable temporal, es decir, la evolución planetaria a gran escala en la que el proceso de convección como modo de enfriamiento no tiene por qué haber sido constante a lo largo de la historia geológica.

In yet another model the style of convection changes with time, with the mantle sometimes in two layer mode and other times in the whole-layer mode. Clearly, a variety of styles is possible. (Glatzmaier & Schubert, 1993. pp: 21.969)

Esto dio lugar al surgimiento de una variedad de modelos que combinan diferentes posibilidades: estructuras convectivas alojadas en el manto superior que se extienden hacia el manto inferior; la posibilidad de que algunas placas penetren en el manto inferior y otras no e, incluso, que algunas queden detenidas temporalmente en la zona de transición. También se pensó que, como modelo térmico de evolución, la Tierra pudo haber protagonizado períodos de convección global y períodos de convección estratificada.

En realidad, las incertidumbres se materializan en de la zona de transición. Los modelos atribuyeron la discontinuidad sísmica a un cambio de composición química – con el manto inferior más rico en hierro, por ejemplo– o bien a las transiciones de fase. Si la discontinuidad fuera composicional, la densidad aumentaría con la profundidad y con ello quedaría obstruida la convección global. Si la discontinuidad fuera causada por una transición de fase, la zona de transición podría actuar como un inhibidor de la convección global pero no necesariamente como una obstrucción de ésta.

Hasta el momento de la publicación, los modelos numéricos tridimensionales sólo se habían aplicado a la convección global, por ello los autores encontraron que era fundamental analizar el desarrollo de modelos numéricos tridimensionales de convección estratificada.

Our major purpose here is to present a similar set of numerical computations of three-dimensional spherical convection of the two layer mantle style (Glatzmaier & Schubert, 1993; pp: 21970).

Los autores consideran que la convección global es el modelo que representa la actualidad geológica. Sin embargo, dejan abierta la posibilidad de que probablemente ambos modos de convección hayan participado en el pasado geológico.

However it is likely that neither of these end-member models represents the real Earth. (...) convection in the Earth's mantle probably exhibits aspects of both the whole-layer and two-layer modes of convection. (Glatzmaier & Schubert, 1993. pp: 21.975).

El modelo de convección estratificada postula que la discontinuidad de los 660 km es materialmente impermeable, es decir, que las losas subductantes no penetrarían hacia el manto inferior y las plumas que se originan en la capa D" no llegarían hacia el manto superior. Por otra parte, se abre la posibilidad de que exista una banda térmica limítrofe en la discontinuidad de los 660 km que posibilite la formación de las plumas que llegarían a la superficie.

A fin de ejemplificar posibles cambios estructurales producidos a lo largo del tiempo, en función de un modelo convectivo evolutivo, presentamos las siguientes figuras que muestran la evolución del manto entre dos momentos geológicos diferentes.

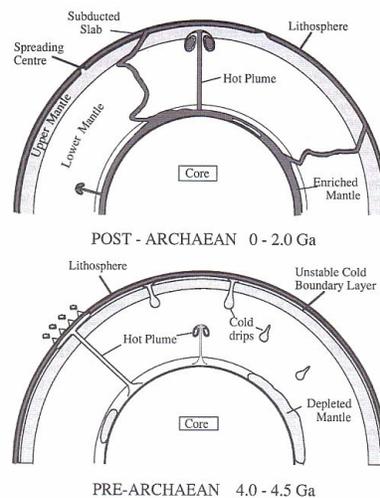


Figure 6.21. Sketches of sections through the mantle showing the postulated convection style dominant in the pre-Archaeon and post-Archaeon mantle. Some of the cold plumes are shown as being continuous, but they may well have formed discontinuous drips in the Archaeon mantle. (Adapted from Campbell and Griffiths, 1992.)

Figura 11: Esquemas de una sección del manto que muestra la evolución del modelo de convección entre el principio y el fin del Precámbrico Arcaico

4.4.2.7.- El desenlace de la controversia: el aporte crucial de la tomografía sísmica

En general, en la década de 1990 la controversia sobre la CM se inclinó hacia la postura de la convección global, en gran medida debido a los avances de la sismica y la informática. Si bien las tomografías sísmicas habían comenzado a desarrollarse a mediados de la década de 1970, adquirieron una precisión considerable recién hacia el final del siglo XX. Su poder de resolución permitió conocer con bastante detalle un mapeo de la trayectoria del flujo convectivo a través del manto.

In the 1990' s, travel time tomography with local basis functions has made several seminal contributions to our understanding of mantle convection because it has enabled the mapping of flow trajectories in unprecedented detail (Karason H., & van der Hilst, R., 2000; pp: 280)

A través de las imágenes sísmicas, se comprobó que muchas losas atraviesan la discontinuidad de los 660 km y llegan al manto profundo, aunque al atravesar la zona de transición sufren gran deformación.

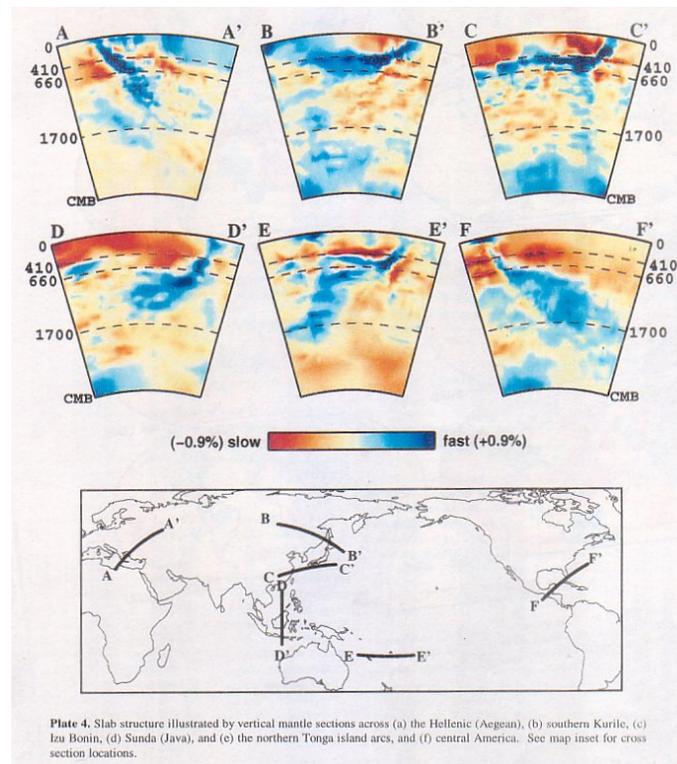


Figura 12: Tomografía sísmica

Las tomografías sísmicas, junto con las restricciones provenientes de la geodinámica computacional, otorgan poca probabilidad de estratificación a la CM en la actualidad geológica.

Seismic imaging and computational geodynamics indicate, however, that this interface is not an effective barrier to mantle flow and suggest that convective circulation occurs at a larger scale (Karason H., & van der Hilst, R., 2000; pp: 278).

En relación con las plumas térmicas, la información aportada por las tomografías sísmicas indican que las mismas surgen de la banda térmica limítrofe ubicada a una profundidad mayor que la discontinuidad de los 660 km.

(...) several studies now suggest that mantle upwellings are continuous over a large depth range, supporting the view that plumes originate at a boundary layer below the 660 km discontinuity .(Karason H., & van der Hilst, R., 2000; pp: 283).

La tomografía sísmica apoyó la hipótesis de la convección global pues de ella se infiere que hay intercambio de materia entre el manto superior e inferior.

4.4.3.- La situación del campo de investigación en la actualidad

Lejos de haberse cerrado la controversia sobre la ocurrencia de la convección aun se encuentra abierta y debido a la cantidad de factores involucrados en ésta, han surgido algunas propuestas alternativas a las clásicas.

Hemos seleccionado algunas de estas propuestas alternativas a los modelos de convección rivales clásicos antes descriptos a fin de ofrecer una idea del estado del arte en la actualidad. La selección no pretende ser representativa de la diversidad de nuevas propuestas, sino que apunta a señalar la actividad actual en relación con el campo de investigación alrededor de la CM. Para ello, trabajamos sobre tres publicaciones (Richards *et al.*, 2000, van der Hilst *et al.*, 2001 y Cwojdzinski, 2004) y una página web (www.mantleplumes.org).

La primera es una introducción actualizada a la relación entre la tectónica de placas y la CM. La segunda es la presentación de una idea de convección intermedia entre la convección global y la estratificada. Luego, a partir de la información

disponible en dicha página web, hacemos una revisión del concepto de pluma térmica, cuya existencia se encuentra en debate actualmente. Por último, la tercera publicación que analizamos propone un modelo sorprendente que permite acomodar algunos datos provenientes de los desajustes que provoca el modelo de convección de las plumas térmicas.

Cuando se aceptó la tectónica de placas, se inició un camino en la evolución del conocimiento acerca de las relaciones entre la tectónica de placas y la CM.

El espesor, la profundidad y el flujo de calor de la litosfera oceánica en función de su edad se describen muy bien a través del modelo de *banda térmica limítrofe*, que postula que la litosfera oceánica es la banda térmica limítrofe superior de la CM.

Normalmente, los puntos calientes son tomados como las evidencias empíricas de las plumas térmicas y, con ello, como material proveniente del manto inferior.

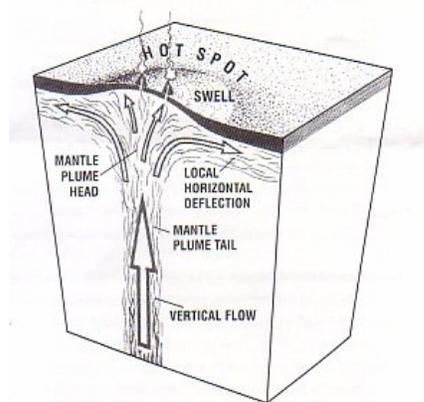


Fig. 6. Schematic model of a typical mantle plume and corresponding hot spot

Figura 13: Esquema de una pluma y un punto caliente

Sin embargo, algunos puntos calientes no encajan del todo en el modelo de la tectónica de placas.

Volcanic hotspots, such as Hawaii, Iceland, and Yellowstone, do not fit at all into the theory of plate tectonics, except as mysterious tracers of plate motions over hotspot sources (Richards, *et al.*, 2000; pp:1).

En general, el tema de las plumas térmicas que provienen del fondo del manto y generan vulcanismo es una hipótesis controvertida como veremos más adelante.

The leading theory, developed along with plate tectonics, is that sites of major intraplate volcanism are due to concentrated hot upwelling plumes from the deep mantle, but this theory remains controversial and has so far evaded definitive tests (Richards, *et al.*, 2000; pp:1).

Durante las dos últimas décadas, los avances más importantes sobre el complejo sistema terrestre se han realizado gracias al avance de la geodinámica computacional que conecta aspectos del MCM con la geofísica, la geoquímica y los datos de origen geológico en general. Los datos de origen geoquímico indican una multiplicidad de reservorios internos que no pueden ser explicados en términos de convección térmica únicamente. Además, las tomografías estarían indicando la existencia de fuertes anomalías en la interfase entre el manto y el núcleo, lo que podría significar la ocurrencia de una dinámica insospechada sobre la que aún no existen investigaciones profundas. La nueva información proviene de estudios de mayor detalle sobre la historia del fondo oceánico, especialmente a partir de las imágenes que otorgan los satélites, los perfiles magnéticos marinos y el refinamiento de los datos sobre la inversión del campo magnético terrestre. Los nuevos datos provenientes de la geodesia espacial (VLBI, SRL, GPS) han aportado conocimiento sobre los distintos tipos de límites que existen entre las placas. La producción de conocimiento de los últimos treinta años no sólo ha modificado la concepción sobre la CM sino también sobre la tectónica de placas. Por otra parte, durante los últimos años se desarrollaron modelos numéricos tridimensionales sobre la convección con la resolución necesaria como para dar cuenta de un número de Rayleigh alto. Los autores afirman que todas estas producciones abren posibilidades fructíferas a la investigación en el área.

These developments hold great potential for inter and multi-disciplinary research in plate tectonics and mantle convection. In recent years, geodynamicist have begun working directly with plate tectonicists to use plate motion models to constrain regional and global model's of the Earth's interior. Most recently, seismic tomography has been used by geodynamicists and plate tectonicists to better understand the evolution of subduction zones, both spatially and temporally, effectively using seismic imaging as an aid in mapping the history of surface plate motions ((Richards *et al.*, 2000; pp: 3)

Para referirnos al estado actual de la discusión sobre la CM resulta ineludible incorporar la variable temporal. Esto significa no restringirse al estado del manto actual, sino hacer una retrospectiva sobre el funcionamiento del planeta en su conjunto. La discusión ha pasado de girar alrededor de la convección global versus estratificada a tratar de develar cómo ocurrió el proceso de evolución térmica a lo largo del tiempo geológico a través de diferentes “instantáneas” convectivas que toman como modelos extremos la convección global o estratificada a partir del pasaje de materia a través de la discontinuidad de los 660 km. Las posibilidades que se abren son muy amplias y son motivo, además, de controversia.

The regime of modern mantle dynamics during the Earth's history have divided the Earth scientist (van der Hilst *et al.*, 2001; pp. 387).

En relación con el manto actual, los geoquímicos sugieren que la discontinuidad de los 660 km separa la convección en manto superior e inferior; en cambio, los argumentos geodinámicos y las inferencias provenientes de la sismología – en función de las imágenes dadas por las tomografías sísmicas– indican que esta discontinuidad es permeable a la penetración de las placas litosféricas. Estos estudios revelaron que la trayectoria del flujo convectivo es compleja y que no todas las placas alcanzan la interfase manto-núcleo; además, se cree que existen ciertas heterogeneidades químicas en las partes más profundas del manto, aunque no hay consenso al respecto.

Our tomographic models suggest the presence of compositional heterogeneity in the deep mantle, but the seismological community has not yet reached consensus on this important issue (van der Hilst *et al.*, 2001; pp. 387).

Todas estas inferencias llevan a anticipar desarrollos más complejos sobre la estructura del manto y su evolución. En este sentido, es posible pensar que, a través del tiempo geológico, la banda limítrofe superior –la litosfera– condicionó los procesos que ocurrieron en la parte superior del manto superior y, probablemente, que éstos ejercieron influencia sobre el manto inferior.

Here we propose an alternative view on the secular evolution of the Earth's mantle in which differential subduction can leave an enriched layer in the deep mantle without requiring a

deep interface or a thermal boundary layer. The depth to which subducted plates sink into the mantle needs be neither uniform nor controlled by a particular interface (van der Hilst *et al.*, 2001; pp. 387).

La controversia sobre la convección se traslada hasta nuestros días, cambiando su identidad. Recordemos que inicialmente se discutió la participación del manto inferior, luego la estratificación del sistema y actualmente la existencia de las plumas térmicas.

Los puntos calientes fueron asociados con las plumas térmicas por primera vez por Morgan, en 1971. Esta forma de convección tendría su origen en el manto profundo. Según este autor, este mecanismo proveería la fuerza que permitiría mover los continentes:

I now propose that these hotspots are manifestations of convection in the lower mantle which provides the motive force for continental drift. In my model there are about twenty deep mantle plumes bringing heat and relatively primordial material up to the asthenosphere and horizontal currents in the asthenosphere (Morgan, 1971; pp: 42).

Desde fines de 2002, muchos aspectos sobre las plumas térmicas no gozan de consenso. La controversia alrededor de esta temática cobró un protagonismo inusitado. Tal es así, que se abrió un sitio de internet (www.mantleplumes.org) en el que se discute la existencia y el rol de las plumas como modo de explicar los puntos calientes o el volcanismo intraplaca, poniendo información actualizada a disposición de estudiantes y especialistas.

The primary objective of *www.mantleplumes.org* is to encourage this discussion by making a broad suite of relevant information easily available to students and specialists in all branches of the Earth Sciences, and lay people (Anderson & Foulger, 2004).

A partir de esta información, hemos realizado una selección de propuestas alrededor de las plumas térmicas a fin de mostrar la diversidad de modelos teóricos que se agruparon bajo esta etiqueta conceptual.

"A plume is an upwelling of hotter stuff from depth that carries a distinctive chemical and isotopic signature." **Godfrey Fitton, October 2004**

“A mantle plume is a localised¹, roughly axisymmetric² upwelling of buoyant³ rock⁴, originating from a boundary layer deep⁵ within the Earth⁶”. **Andy Saunders, March 2004, “Plumes and Plumage” Symposium of the Herdman Society, Dept. Earth Sciences, Liverpool University.** This should be considered in conjunction with the “small print” which is:

1. Localized on a global scale – typically having a conduit diameter of $\sim 10^2$ km, but a head diameter of up to 2×10^3 km.
2. The head may distort as it impacts the base of the lithosphere.
3. They are thermally and/or compositionally buoyant, but probably hotter than the surrounding mantle.
4. Rock, plus melt at higher levels.
5. Unspecified – 660 km or core-mantle boundary are likely candidates.

“An upwelling hot solid body arising from a thermal boundary layer deep in the mantle, a natural and essential feature of bottom-heated convection.” **John Hernlund**

A solid-state, narrow upwelling current in the mantle with a diameter of the order of 100 km and originating from a hot, low-density boundary layer located either above the seismic discontinuity at 660 km depth or near the core-mantle boundary at 2,900 km depth.. **From Hofmann (1997)**

Basalts erupted at oceanic and continental hotspots originate from zones of melting having potential temperatures greater than normal melting and therefore are attributed to plumes of hot material upwelling from deep in the mantle... **Griffiths and Campbell (1990)**

Mantle plumes are buoyant mantle upwellings that are inferred to exist under some volcanic centers. **Davies (1999)**

Mantle plumes are quasi-cylindrical concentrated upwellings of hot mantle rock and they represent a basic form of mantle convection (p.15). **Turcotte and Schubert (2002).**

Puede deducirse que, si bien hay acuerdo en considerar que las plumas térmicas están asociadas con el ascenso de material mantélico desde algún lugar del manto, no existe acuerdo en relación con los fenómenos que las asocian.

Plumes are used in solid Earth sciences to rationalize a variety of phenomena including uplift and breakup of continents, oceanic swells, island chains, large igneous provinces, and unusual basalt chemistry or volume. **Don Anderson, (January 2004).**

En líneas generales, el modelo de tectónica de placas al ser analizado en relación con el MCM da lugar a varias discrepancias (Cwojdzinski, 2004), entre las más importantes encontramos:

- a) la posición inmóvil de las plumas térmicas como forma de asumir el proceso de la CM
- b) la CM versus los datos relacionados con la viscosidad y la existencia de discontinuidades sísmicas globales

- c) posibles desplazamientos horizontales de las placas litosféricas sobre la zona discontinua LVZ que desaparece bajo las raíces continentales
- d) el modelo de crecimiento radial entre las dorsales meso-oceánicas y África
- e) la creciente separación entre los puntos calientes de placas vecinas a lo largo del tiempo
- f) los datos geofísicos que indicarían una entrada considerable de energía y materia desde el núcleo hacia el manto, sin que exista ninguna compensación o intercambio alguno entre los mantos superior e inferior

Según Cwojdzinski (2004) los modelos de convección intentan explicar las imágenes tomográficas a partir de los datos geoquímicos pero con resultados pobres:

New models (multilayered-convection or plate-tectonic hybrid convection model) intend to explain tomographic image with taking into consideration geochemical data but with miserable results (Cwojdzinski, 2004; pp: 817).

En especial, los datos que relacionan los puntos calientes con las hipotéticas plumas térmicas se configuran como fuente de conflictos entre especialistas. Particularmente, una discusión importante se centra en que los puntos calientes se consideran estacionarios en relación con el movimiento de las placas tectónicas y no existe evidencia que indique que hay deformaciones en las plumas térmicas.

En este marco, este autor propone un modelo de Tierra en expansión que según cree ofrece respuestas a las discrepancias y paradojas existentes:

The presented model of the expanding Earth's offers a reasonable solution to these discrepancies and paradoxes (Cwojdzinski, 2004; pp: 817).

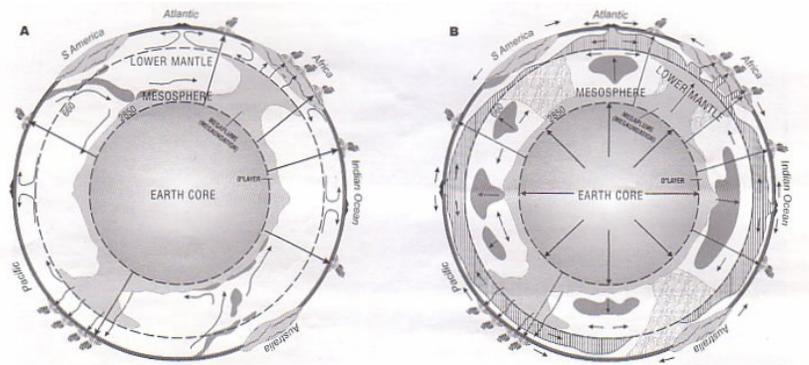


Fig. 12. The internal structure of the Earth and new models of geodynamics: A — contemporary plate-tectonic model of the internal Earth's dynamics (plate-tectonic model of hybridic convection); B — proposed model of the expanding Earth's geodynamics. For explanations see Fig. 9

Figura 14: Modelo de Tierra en expansión

El modelo que se presenta en la figura se basa en datos geofísicos y geoquímicos corrientes y sus características básicas son:

- a) las placas litosféricas están arraigadas en el manto
- b) ninguna celda convectiva opera en el manto
- c) hay transferencia de material y energía desde la interfase manto-núcleo, en forma radial, hacia la superficie planetaria
- d) existen diferentes tipos de flujos ascendentes, es decir, desde diferentes profundidades y de composiciones geoquímicas distintas

El autor es consciente de las dificultades que debe atravesar su modelo en pos de su aceptación, aunque reconoce que hay un interés creciente en éste:

Undoubtedly, the common acceptance of promising expansion model will require true scientific revolution and a change in the way of thinking of geologist and geophysicists. However, there are first signs of growing interest in this theory (Cwojdzinski, 2004; pp: 826).

Hemos seleccionado el modelo propuesto por Cwojdzinski que en principio parece una hipótesis descabellada, pues creemos que es un buen representante del estado del arte del campo controversial en la actualidad. Escapa a los objetivos de nuestro trabajo analizarlo en profundidad, sólo queríamos mostrar que el debate continúa.

A modo de cierre del capítulo

A lo largo de este capítulo hemos intentado recrear la evolución histórica de la idea de CM desde su origen. Como ya hemos advertido, no se trata de un estudio historiográfico sino que la idea era armar un panorama que nos mostrara la evolución disciplinar, que nos posibilitara identificar científicos destacados que hayan participado de la historia de la construcción del MCM. También nos interesó destacar las discusiones principales y el estado del campo en la actualidad.

El recorrido realizado intentó ofrecer una visión sincrética del campo con el fin de contextualizar las descripciones estructurales que haremos de los textos en el capítulo siguiente, como así también de analizar las operaciones subyacentes a la TD realizada en éstos.

Claramente, desde la perspectiva de los campos controversiales que propone Nudler (2002), el campo controversial transita una fase progresiva desde su inicio y ha atravesado, como hemos visto, distintas refocalizaciones.

Capítulo 5: El análisis estructural de los libros de texto

Resumen del capítulo

En este capítulo se realizará de cada libro de texto utilizando el análisis estructural como medio, tal como hemos expresado en el capítulo 3, en el que desarrollamos la metodología de nuestra investigación. Analizaremos cada texto por separado y describiremos cada nivel estructural (macroestructura, superestructura y microestructura). Debido a las diferencias intrínsecas entre los libros de texto, la descripción se ajustará a las características de cada uno. Utilizaremos la denominación L1, L2 y L3 para distinguir entre sí a los libros de texto, tal como la definimos en el capítulo 3 de esta tesis.

Introducción

A partir de las categorías definidas anteriormente haremos una descripción de cada uno de los libros de texto que forman la muestra. Los libros presentan cuerpos estructurales de desarrollo muy diferentes entre sí, lo que condiciona que sus descripciones sigan el mismo hilo conductor no es posible hacer una presentación uniforme de las mismas.

5.1. El análisis estructural de L1

5.1.1 Macroestructura

Realizaremos una descripción de los aspectos semánticos que definen la macroestructura del libro de texto según hemos considerado en el capítulo 4.

a) El Título

El título, *Dynamic Earth. Plates, Plumes and Mantle Convection*, puede traducirse como “Tierra Dinámica. Placas, Plumas y Convección en el Manto. El título hace explícito que se trata de la TCM y, además, adelanta los modos de convección que se proponen en el modelo general que el texto desarrolla. En realidad, el título refiere a la dinámica de la Tierra como concepto y a la convección como proceso.

b) Generalidades

El autor del libro, Geoffrey Davies, es un miembro del grupo de científicos de la Universidad Nacional de Australia que desarrolló gran parte de la síntesis moderna de la dinámica y geoquímica subyacentes a la tectónica global. Es uno de los precursores del modelo de convección global (ver Capítulo 4 de esta tesis). Sus contribuciones científicas incluyen las relaciones de la convección en el manto con las anomalías gravitatorias, la topografía de la superficie terrestre y los procesos que ocurren bajo los puntos calientes.

El libro persigue el objetivo de desarrollar la TCM a partir de concebir cómo se gestó históricamente, en qué familia de modelos se fundamenta, cómo se define el modelo de convección a gran escala y cómo se aplica el modelo a la evolución planetaria.

El libro está dirigido a una amplia audiencia geológica general pero también al público especializado, incluyendo graduados que estudian aspectos generales de geofísica o de la CM en particular, pudiendo servir de texto introductorio, como un resumen del estado del arte de los principales argumentos sobre el tema. Pero también se exhiben apartados de alto vuelo teórico con sus desarrollos matemáticos asociados. El autor advierte la presencia de estos apartados a través de una aclaración en los subtítulos en la que distingue dos niveles diferentes: intermedio y avanzado.

To guide readers, some of the sections are marked *Intermediate* or *Advanced*¹¹. These levels indicate the mathematical level (Davies, 1999; pp: 122).

Las representaciones matemáticas que presenta el texto incluyen, fundamentalmente, análisis matemático multidimensional, álgebra vectorial y ecuaciones diferenciales.

En la introducción del libro Davies hace una referencia concreta al público al que se dirige acerca de la decisión de haber generado estos niveles:

This book is focused on those arguments that derive most directly from observations and the laws of physics, with a minimum of assumption and inference, and that weigh the most strongly in telling us how mantle works. These arguments are developed from a level of mathematics and physics that a first or second year undergraduate should be familiar with, and this should make them accessible not just to geophysicists, but to most of others engaged in the study of geology, in the broad sense. To maximise their accessibility to all geologists, I have tried to present them in terms of simple physical concepts and in words, before moving to more mathematical versions (Davies, 1999; pp: 4).

Es decir, que el texto se puede recorrer con un nivel de matemática y física básicos aunque para penetrar en los detalles habrá que poseer un mayor nivel de formación en estas áreas.

5.1.2. Superestructura

¹¹ Las itálicas son originales del texto.

Haremos una descripción general de cada una de las secciones del libro. Luego, en el apartado siguiente ampliaremos esta información haciendo una descripción general de cada capítulo.

5.1.2.1 Las secciones que estructuran el libro

El libro está formado por cuatro secciones (Origins, Foundations, Essence y Evolution) que describiremos brevemente a continuación.

a) Primera sección (Origins)

La primera sección está formada por tres capítulos, el primero de ellos está dedicado a explicar la racionalidad con la que está hecho el libro. El segundo y el tercero exponen un relato de la emergencia histórica de las teorías de tectónica de placas y convección en el manto.

Durante esta sección el autor presenta las características principales del libro y realiza un recorrido por la historia de la geología, analizando temáticas clásicas sobre la Tierra, como su edad, su calor interno y cómo las rocas pueden deformarse. La presentación histórica culmina en la idea de convección en el manto al momento en el que es aceptada la tectónica de placas.

b) Segunda sección (Foundations)

Esta segunda sección del libro ensambla las observaciones, conceptos y herramientas que se requieren para un desarrollo cuantitativo de la convección en el manto.

Durante el desarrollo de la sección se analizan los datos provenientes de la superficie que restringen la convección en el manto, como así también la estructura y las propiedades del manto. Además, en esta sección se desarrollan los modelos asociados con dos procesos físicos básicos involucrados en la convección, el flujo y la conducción de calor, que se presentan en los capítulos 6 y 7 respectivamente.

c) Tercera sección (Essence)

Esta es la sección principal del libro. Se presenta la convección como un fenómeno general, se analizan las características y propiedades del manto que hacen que la convección en el mismo sea un fenómeno particular, único.

Se desarrolla la convección como fenómeno que involucra el flujo de un material y el transporte de calor. Se analizan el movimiento y la evolución de las placas como parte integral de la convección en el manto.

Se consideran los datos que permiten inferir la forma general de la convección, se identifican los dos modos principales que la componen y se presenta el cuadro general en el que se inserta la convección como fenómeno terrestre.

d) Cuarta sección (Implications)

Durante el desarrollo de esta sección se discuten las principales implicancias de la convección en el manto como mecanismo tectónico directriz de fundamental importancia. Se analizan la química del manto y su evolución térmica, como así también sus consecuencias para los mecanismos tectónicos que operaron en la superficie terrestre en eras pasadas.

5.1.2.2 Descripción general de cada capítulo

a) Capítulo 1 (Introduction)

El primer capítulo es la presentación del libro. Expone los criterios con los que fue concebido el libro, da cuenta de los objetivos, el alcance y la audiencia a la que está dirigido.

b) Capítulo 2 (Emergence)

En éste se relatan algunos pasajes clásicos de la historia de la geología, en especial los que se relacionan con la edad de la Tierra, su calor interno y la forma en la que pueden deformarse las rocas. Se considera central la concepción que postula que el interior de la Tierra está a altas temperaturas por su influencia sobre el desarrollo de la convección en el manto y los procesos geológicos como por el hecho de que uno de los

cálculos de la edad de la Tierra se basó en la escala temporal a la que se iría perdiendo el calor interior.

c) Capítulo 3 (Mobility)

Este capítulo, al igual que el anterior, también es de corte histórico. Se cuenta la evolución de las ideas asociadas con la movilidad del planeta a gran escala. Se relata la historia de la teoría de la deriva continental y su evolución hacia la tectónica de placas, incluyendo en forma complementaria el desarrollo de las ideas sobre la movilidad del manto, por una parte, y el origen y desarrollo de las plumas térmicas, como parte integral de la convección en el manto, por otro.

d) Capítulo 4 (Surface)

Este capítulo se centra fundamentalmente en desarrollar los fenómenos asociados con los datos provenientes de la superficie terrestre que restringen la dinámica del manto. Se focaliza en observaciones que representan de la mejor forma posible la superficie geográfica, en primer lugar la topografía, luego el flujo de calor y, por último, la gravedad. Se resume la geografía dada por la tectónica de placas, cuya interpretación e implicancias están directamente relacionadas con la dinámica del manto. Los datos sobre la variación de la magnitud del campo gravitatorio sobre la superficie de la Tierra producen restricciones sobre las variaciones de densidad de su interior. La topografía de la superficie terrestre y las variaciones geográficas en el rango al que se conduce calor a través de la superficie provee importantes restricciones sobre los procesos dinámicos del interior de la Tierra.

e) Capítulo 5 (Interior)

En este capítulo se realizan tres abordajes diferentes sobre el interior del planeta: su estructura, composición química y estado físico, de la Tierra en general y especialmente del manto. La estructura de la Tierra define el manto, y por lo tanto, la materia en la que se lleva a cabo la convección. También el manto presenta una estructura interna que interesa mostrar. El estado físico y la composición química del manto determinan las propiedades que permiten que convecte y que controlan esta forma de convectar. También se ofrece un resumen sobre la estructura tridimensional, que ha sido desarrollada fundamentalmente en la década de 1990. La estructura interna

de la Tierra se deduce principalmente a partir de los datos sísmicos y la composición se infiere fundamentalmente de tres fuentes: las rocas que aparecen en las partes sobresalientes de la Tierra, las rocas ígneas que se piensa que están formadas de magma derivado del manto y medidas provenientes de experimentos de laboratorio que dan cuenta sobre las propiedades físicas de los minerales y las rocas. Por último, se relevan con cierto detalles cuestiones relativas a los cambios producidos por la presión inducida en un mineral en conjunción con la composición mineralógica y la temperatura

f) Capítulo 6 (Flow)

Durante el desarrollo del capítulo se explica cómo fluye un material, concepción fundamental para explicar la convección en manto. El autor realiza diferentes abordajes sobre esta temática propia de la mecánica de fluidos, incluso los desarrolla con distintos niveles matemáticos de profundización, desde lo más simple hasta algunos aspectos más complejos.

El capítulo comienza introduciendo las ideas de esfuerzo, deformación, tasa de deformación y viscosidad con ejemplos simples pero que permiten que las ideas básicas y sus relaciones sean apreciadas. Se introducen además, en este ejemplo, las ecuaciones básicas del balance de fuerzas y de la conservación de la masa. Estos mismos conceptos se desarrollan luego en un nivel más complejo de matemática (nivel intermedio), lo que brinda la posibilidad de pensar los modelos en dos y tres dimensiones.

Se presentan además, ciertos tipos específicos de flujo, relevantes para la convección en el manto, algunos de forma muy simple y otros un poco más compleja. El capítulo finaliza con dos apartados sobre las propiedades mecánicas del manto y la corteza. El primero de ellos trata sobre cómo los datos del rebote postglacial han sido utilizados para extraer restricciones sobre la VM. Y el segundo, considera la reología de las rocas, incluyendo la fractura frágil -característica de la litosfera- y la dependencia de la viscosidad con la temperatura y su posible dependencia con el esfuerzo (reologías no lineales).

g) Capítulo 7 (Heat)

El capítulo trata, en general, del transporte de calor como parte integral de la convección. Se explica que el calor es transportado de dos formas distintas en el manto:

por conducción y advección, y que el calor es también generado internamente por radioactividad. Se profundiza en una característica clave de la conducción del calor, que vincula la escala de tiempo del enfriamiento por conducción y las escala espacial a la que ocurre este proceso. Este aspecto se desarrolla a través de diferentes caminos y distintos niveles matemáticos.

La teoría de conducción de calor se aplica al enfriamiento de la placa oceánica y una consecuencia clave es el hundimiento del suelo oceánico con la edad. Por otra parte, el rol de los continentes se analiza en forma separada pues la litosfera continental no participa de la subducción.

El fenómeno advectivo se utiliza para deducir una ecuación general que describe la generación de calor y su transporte y, por último, se consideran en forma general las propiedades térmicas de los materiales, incluyendo su dependencia con la presión, que conduce al concepto de gradiente adiabático de temperatura y densidad.

h) Capítulo 8 (Convection)

A través de este capítulo se desarrolla la convección como una clase de flujo fluido que se manifiesta a través de la flotación, que deriva de establecer gradientes horizontales de densidad. En el contexto del manto, las fuentes de estos gradientes de densidad son bandas térmicas limítrofes. La convección ocurre cuando una banda térmica limítrofe se vuelve inestable y comienza a fluir a través del interior del fluido. La flotabilidad que dirige la convección puede ser de origen térmico o composicional. En este capítulo sólo se tratará la de origen térmico. Se describen las fuentes de flotabilidad y se muestra cómo hay una íntima relación entre la convección y la superficie topográfica que produce.

Se muestra cómo la escala de la convección está encapsulada en el número de Rayleigh, por qué la convección ocurre sólo si el fluido es calentado o enfriado suficientemente y cómo el modo de entregar el calor (desde abajo o internamente) gobierna la naturaleza de las bandas térmicas limítrofes. Puede haber dos bandas térmicas limítrofes (una ubicada arriba y otra abajo) o puede haber una única, dependiendo de la forma en la que el fluido es calentado o enfriado.

i) Capítulo 9 (Plates)

A través de este capítulo se analizan algunos comportamientos específicos de la litosfera que reflejan su carácter de sólido rígido. Se pretenden esclarecer dos

aspectos importantes sobre el comportamiento de la litosfera. En primer lugar, que las partes en las que está fracturada la litosfera presentan rangos muy diferentes de formas y tamaños. En segundo lugar, que las placas evolucionan establemente, siguiendo reglas simples, pero también pueden cambiar de repente, si la placa se fractura en dos. Vale la pena destacar que en este capítulo se aborda el modo en el que las placas se mueven y cambian pero no las fuerzas que causan los movimientos y los cambios. Es decir, que se abordan los aspectos cinemáticos y no dinámicos. Este desarrollo servirá de base conceptual para comprender la el modo en el que el manto y las placas se mueven.

j) Capítulo 10 (The plate mode)

El capítulo pretende demostrar que las placas son parte integral de la convección en el manto, siendo la subducción uno de los modos dinámicos de la convección. Las placas son consideradas la banda térmica limítrofe superior que dirige esta forma de convección. Este vínculo entre el movimiento de las placas y un modo de convección restringe la escala de desplazamiento material en el manto: la velocidad de las placas que subducen determina, en alguna medida, la velocidad de transporte material al interior del manto.

En la primera parte del capítulo se presentan una serie de modelos numéricos que ilustran la influencia que tienen las propiedades materiales sobre la forma de convección en el manto: la influencia de las propiedades mecánicas de la litosfera, los efectos del aumento de la viscosidad con la profundidad y el posible rol de las transformaciones de fase. También se estima la cantidad de calor transportado por el sistema manto-placas.

En la segunda parte del capítulo se considera cómo esta concepción de la convección en el manto se acomoda a las restricciones empíricas, especialmente a la topografía de la superficie, al flujo de calor y la estructura interna revelada por las tomografías sísmicas. El capítulo concluye con una síntesis del llamado modo placa, uno de los estilos de convección.

k) Capítulo 11 (The plume mode)

A través de este capítulo se describen las plumas térmicas como ascensos flotacionales del manto que se infiere que existen bajo algunos centros volcánicos. Se examina la evidencia que hace de las plumas térmicas un modo de convección en el manto, dirigido por una banda térmica limítrofe inferior caliente. Se considera la forma

y dinámica de estos ascensos como un modo absolutamente diferente del modo de placa.

I) Capítulo 12 (Synthesis)

En este capítulo se expone cómo se integran en un modelo general los modos de convección en el manto desarrollados en los capítulos 10 y 11, cómo se ensamblan en un contexto coherente y qué implicancias inmediatas se obtienen acerca de cómo el sistema trabaja y cómo no! Este es el capítulo que da lugar a la discusión de modelos alternativos, en particular del modelo de convección estratificada. Sobre el final del capítulo se establecen una serie de argumentos que se suponen aceptados por la comunidad científica o con buenas posibilidades de serlo, argumentos a favor del modelo de convección global.

II) Capítulo 13 (Chemistry)

En primer lugar se presenta un panorama general de las características de la química del manto, los datos claves y los argumentos sobre los que descansa dicho panorama. Se presentan los principales elementos químicos que componen el manto y qué se entiende por elementos traza y la datación isotópica, haciendo referencia al MORB¹², al OIB¹³ y al IAB¹⁴. Además se realizan ciertas conjeturas sobre cómo sería el manto primitivo y cómo se fueron generando las heterogeneidades químicas del manto a partir del cuadro de convección presentado durante el capítulo 12. También se presentan en forma breve algunos procesos de homogeneización del manto. Por último, se señalan algunas consecuencias para la dinámica mantélica desde la perspectiva química.

m) Capítulo 14 (Evolution)

En el transcurso de este capítulo, bajo ciertas suposiciones, se analiza la evolución térmica del manto pensando a la temperatura en función del tiempo o bien la historia térmica del manto. Se considera que hay muchas razones para sospechar que los actuales mecanismos tectónicos no deben haber funcionado en el pasado cuando el

¹² MORB es la sigla que representa a los basaltos eyectados por las dorsales mesooceánicas (Mid ocean ridge basalts)

¹³ OIB es la sigla que representa a los basaltos eyectados por islas oceánicas (Oceanic island basalt)

¹⁴ IAB es la sigla que representa a los basaltos eyectados por los arcos de islas

manto estaba más caliente. Esta cuestión lleva al autor a analizar el calor transportado por la convección en cada uno de sus modos, la radioactividad como fuente de calor y la edad de la Tierra. Se consideran que la pérdida de calor es variable en el tiempo y se presentan diferentes modelos de evolución térmica. Se reflexiona acerca de los efectos de la composición química sobre la flotabilidad de los materiales y sobre la convección, y acerca de la fusión como mecanismo de transporte de calor. Por último se desarrolla un apartado acerca de la evolución tectónica con el que concluye el capítulo.

5.1.3 Microestructura

5.1.3.1 Generalidades

A fin de satisfacer la variedad de lectores a la que está dirigido el libro (ver Macroestructura 5.1), el material es presentado en un estilo narrativo, intercalando apartados avanzados o especializados que se expresan con diferentes niveles de matemática. Cada temática considerada fundamental es primero desarrollada en forma cualitativa, de forma simple. Generalmente, los modelos relevantes para la teoría se pueden apreciar con conocimiento de física básica y estimaciones cuantitativas simples. Cuando se incluyen explicaciones más precisas y se emplea el cálculo avanzado, claramente se identifican como apartados optativos.

Al haber seleccionado como CE la VM y en función de los niveles estructurales anteriores estamos en condiciones de armar el recorrido que nos permitirá describir la microestructura del texto.

Hemos distinguido tres tipos diferentes de secuencias en las que se involucra la VM: supraordinación, subordinación y coordinación (Ver 3.3.1.3.2).

El MCM es concebido por el autor como la superposición de los modos placa y pluma, que se desarrollan en los capítulos 10 y 11, respectivamente, y se integran en un todo coherente en el capítulo 12 (Ver 5.1.2).

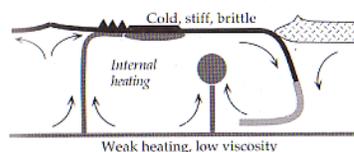


Figura 1: Modelo de Convección

Específicamente, en este capítulo se presenta un esquema general de funcionamiento del MCM y también se hace referencia a los aspectos controvertidos del mismo. La VM como CE nos permite bucear en ambos aspectos, la definición general del modelo y su controversia: la hipótesis de aumento de la VM con la profundidad interviene tanto en la definición del modelo como en la discusión sobre el pasaje de materia en la discontinuidad de los 660 km, uno de los aspectos clave que caracteriza la controversia. Este tema es objeto de análisis aparte (Ver Objetivación, Capítulo 6).

Nos interesa indagar cómo el autor arma la construcción del modelo, en qué basa conceptualmente sus afirmaciones. Para ello, rastreamos y describiremos las citas que hacen referencia a la VM en el planteo de uno de sus modos, el modo placa que es presentado en el Capítulo 10 del libro de texto.

5.1.3.2 Niveles semánticos de relación del concepto estructurante

a) Vínculo conceptual entre la viscosidad del manto y el modo placa de la convección

Sintéticamente, veamos cómo se vincula conceptualmente durante el capítulo de L1 la VM con el modo placa y, con ello, con la teoría de la convección.

Este modo postula que las placas litosféricas son parte integral de la convección y funcionan a modo de banda térmica limítrofe superior del manto. Las placas se consideran rígidas, poseen menor temperatura que el manto y, por ende, su viscosidad es muy alta.

Una placa cuando subduce se hunde en el manto pues al haberse enfriado en la superficie aumenta su densidad y la fuerza gravitatoria la succiona hacia abajo. A medida que la placa se va hundiendo va dirigiendo un flujo que moviliza al manto. Este flujo es resistido por el manto básicamente por dos factores: su viscosidad y las

transiciones de fase asociadas con la zona de transición. Así, las placas en su descenso son resistidas por la VM.

De forma cualitativa lo expuesto en este apartado expresa cuál es la relación semántica entre el MVM y el modo placa del MCM.

b) El manto se modela como un fluido viscoso lineal en el modo placa

Una primera referencia general a la VM se realiza en el primer apartado del capítulo 10, cuando el autor explica cuál es el rol que cumple la litosfera en el flujo a escala de placa (10.1.- The role of the lithosphere).

El manto es considerado, en líneas generales como un fluido a escala de tiempo geológico, más específicamente se modela como un fluido viscoso lineal, dirigiendo al lector, por un lado, al capítulo 6 para ampliar el conocimiento en relación con las características fluidas del manto y, por otro, al capítulo 3:

We have seen in Chapters 3 and 6 that there is good evidence that the hot interior of the mantle behaves like a fluid on geological time scales, and that it seems to be reasonably approximated as a linear viscous fluid (Davies, 1999; pp: 262).

Las citas refieren concretamente a los capítulos 3 y 6, explicitando las relaciones extensionales al interior del libro de texto, indicando que el manto se modela como un fluido viscoso lineal. Veremos luego (Ver 5.1.3.2.2) qué y cómo se enseña acerca de la VM en estos capítulos.

Al momento hemos querido destacar cómo se establecen las relaciones extensionales.

c) La viscosidad del manto como factor de modelización numérica

Los modelos numéricos se utilizan para restringir el flujo del manto en relación con el modo placa. Las hipótesis asumidas por los modelos numéricos se presentan en forma separada en el segundo apéndice del libro (Appendix 2: Specifications of numerical models). Este apéndice presenta los parámetros que definen los modelos numéricos. En particular, la modelización hace explícita la dependencia de

la viscosidad con la temperatura, remitiendo al apartado final del capítulo 6 (6.10 Rheology of rocks) en el que a partir de ciertas consideraciones reológicas se obtiene una ecuación que vincula la variación de la VM con la temperatura (Ecuación 6.10.4).

$$\mu = \mu_r \exp [q_A [(T_m + T_z)/(T + T_z) -1]]$$

dónde μ_r es la viscosidad de referencia, T es la temperatura, q_A es una medida relacionada con la energía de activación a una cierta temperatura de referencia, T_m es una temperatura adimensional máxima (que se obtiene en función del flujo de calor) y T_z es una corrección que se realiza sobre T_m .

El autor presenta los resultados de correr un modelo numérico (10.2 The plate-scale flow) que ilustra la influencia de varios factores sobre la forma en la que se comporta el flujo del manto. El autor desarrolla 5 subapartados en los que se evalúan los resultados de correr el modelo numérico en distintas circunstancias. Se considera a través de ellos cómo influyen: (i) las placas sobre el flujo del manto, (ii) el incremento de viscosidad entre el manto inferior y superior sobre el flujo, (iii) la geometría tridimensional esférica, (iv) el calor transportado por el flujo del modo placa y, en el último subapartado, (v) se resume e integra el conocimiento desarrollado durante los subapartados anteriores.

De éstos, dos subapartados refieren concretamente a la VM: el subapartado 10.2.2 (Influence of high viscosity in the lower mantle) acota la diferencia de viscosidad entre el manto superior e inferior y el autor remite concretamente al capítulo 6 para justificar de dónde sale esta diferencia:

In chapter 6 I described several kinds of evidence that indicate that the viscosity of the deep mantle is significantly higher than that of the shallow mantle, by a factor roughly between 10 and 100 (Davies, 1999; pp: 268).

Haber propuesto que la viscosidad sea elevada para la capa inferior¹⁵ disminuye notablemente la velocidad del flujo cuando éste la alcanza (en un factor de 4

¹⁵ Hablamos concretamente de capas superior e inferior, pues al tratarse de un modelo numérico tales capas simulan al manto superior e inferior, pero no es correcto identificarlas sin más.

aprox.). Concretamente, se pone de manifiesto que la VM es un factor que regula la velocidad de las placas.

En el siguiente subapartado (10.2.3 Influence of spherical, three-dimensional geometry) se hace referencia a la influencia destacada que tiene la viscosidad en los modelos numéricos tridimensionales:

The spherical geometry has turned out to significantly magnify the effect of viscosity layering in the mantle (Davies, 1999; pp:271).

La estratificación de la viscosidad entre ambas capas y, con ello, su incremento con la profundidad se considera uno de los factores que condicionan principalmente el tipo de flujo generado por la subducción de las placas

Although the plates seem to exert the dominant control on the structure of the plate-scale flow, we have quantitatively evaluated two other factors that may significantly influence the flow. These are the inferred increase of viscosity with depth and phase transformations on the transition zone (Davies, 1999; pp: 291).

Sintéticamente, podemos decir que los modelos numéricos son utilizados para evaluar el modo placa y que, para ello, el manto se modela como un fluido viscoso lineal que resiste el flujo generado por las placas. La VM condiciona el modo placa y, por ende, el modelo de convección del manto en general.

d) Ecuaciones que gobiernan el flujo a escala de placa

Durante el desarrollo del apartado 6.6 (6.6 Equations governing viscous fluid flow) se plantean las condiciones para la deducción formal de las ecuaciones que gobiernan el flujo de un fluido viscoso. El cálculo del flujo surge de establecer condiciones de contorno particulares (se considera que el flujo sólo es dirigido por el movimiento de las placas y que no actúan fuerzas interiores) sobre las ecuaciones cuya solución brinda información clave, en particular, sobre el modo placa (6.7 Some simple viscous flow solutions, 6.7.1 Flow between the plates).

La ecuación 6.7.3 manifiesta que el *caudal* es inversamente proporcional a la VM (Ver Figura 2). Es decir que a mayor viscosidad menor volumen de flujo.

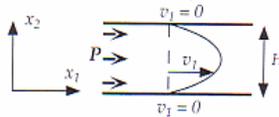


Figure 6.7. Flow between plates driven by a pressure gradient.

Figura 2: Diagrama sobre el flujo entre dos placas

$$Q = \int_0^H v_1 dx_2 = P'H^3/12\mu,$$

dónde Q es el caudal, P' es la presión, H el espesor de la banda y v_1 representa el perfil de velocidades cuyo máximo se ubica en el centro de la banda.

5.1.3.2.2 Subordinación semántica: contexto de sustentación conceptual del concepto estructurante

Hemos visto que la VM es un concepto clave de la convección, lo que motiva que Davies lo incluya como modelo a enseñar en la segunda sección (Foundations) en la que se enseñan los modelos fundamentales que subyacen al MCM. En general, la convección en el manto encierra dentro de sí modelos físicos, de mecánica de fluidos y termodinámica, principalmente. Hay dos capítulos (6.- Flow y 7.- Heat) de corte netamente físico, que desarrollan los modelos básicos que sustentan conceptualmente la teoría. En esta misma sección también se desarrollan otros dos capítulos (4.- Surface y 5.- Interior) de corte más bien geológico que tienden a desarrollar las condiciones materiales sobre las que se aplicarán dichos modelos físicos.

Específicamente, los fundamentos conceptuales de la VM se desarrollan durante el capítulo 6 (Flow). Se postula al manto como un fluido viscoso lineal --o fluido newtoniano--, por lo que el material que lo compone se caracteriza físicamente en función de la viscosidad. El autor hace una mención temprana de la VM en un capítulo histórico --capítulo 3-- pero es en el capítulo 6 en el que se desarrollan una serie de modelos que se relacionan con el flujo, se presentan las características de un fluido viscoso y se modela la VM.

a) Descripción general

Los modelos se presentan con diferentes niveles de formulación, desde un nivel cualitativo hasta un nivel operacional que involucra al análisis diferencial avanzado. Haremos una selección de apartados y subapartados del capítulo 6 con el fin de mostrar los rasgos más sobresalientes del sustento conceptual de la VM que propone el autor.

b) Descripción conceptual de la viscosidad del manto

El modelo que da cuenta de la VM sugiere que el manto en su conjunto se comporta como un fluido newtoniano. Además, postula que el manto superior es aproximadamente 30 veces más viscoso que el manto inferior. Este aumento específico se concentraría en la zona de transición entre el manto superior e inferior y se sustentaría en forma empírica a través del análisis del rebote postglacial y las anomalías del geoide (6.9.3).

Durante el desarrollo del capítulo 6 el autor desarrolla una serie de modelos (esfuerzo, deformación, tasa de deformación, etc.) perteneciente al área conocida como mecánica de fluidos que permiten comprender qué quiere decir, formalmente y con rigor matemático, que el manto se comporta como un fluido viscoso.

Se plantean las ecuaciones que gobiernan el flujo de un fluido viscoso, basadas en la conservación de la masa y el balance de fuerzas¹⁶. Sin embargo, el desarrollo puede seguirse conceptualmente evitando los desarrollos formales, a través de un apartado (6.1 Simple viscous flow) que desarrolla cualitativamente el tema a través de ejemplos y explicaciones sencillas.

La modelización se formula con diferentes niveles de complejidad matemática: desde la manipulación de funciones simples (lineales, homogéneas) en la explicación cualitativa hasta el planteo de ecuaciones diferenciales (6.6 Equations governing viscous fluid flow) y su resolución para dos casos simples (6.7 Some simple viscous flow solutions) pero no casuales, pues refieren a las condiciones de contorno que corresponden a la construcción conceptual de los dos modos de convección en el manto (placa y pluma).

¹⁶ las ecuaciones que gobiernan la convección suponen, además, la conservación de la energía, que se trata en el capítulo siguiente (7.- Heat).

Por otra parte, se plantea la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales para el caso del ascenso flotacional de una esfera, un modelo que subyace al modo pluma (6.8 Rise of a buoyant sphere). Se plantea como problema la descripción del movimiento de una esfera que asciende flotacionalmente a través de un fluido de viscosidad dada. El problema se desarrolla con dos formatos diferentes: a través de una estimación matemática simple (6.8.1 Simple dimensional estimate) y, por otro lado, a través de las ecuaciones diferenciales del balance de fuerzas y de la función de corriente de Stokes.

Sintéticamente, podemos afirmar que se plantean con diferentes niveles de complejidad las secuencias semánticas que dan cuenta de las relaciones intensionales que utiliza el autor para explicar cuál es el sustento conceptual del modelo de la VM. Esta diferenciación permite el acceso de lectores diversos a la construcción del modelo y, con ello, a construcciones cualitativamente diferentes.

c) Análisis microestructural semántico

El autor advierte al lector que desarrollará lo esencial del MV en forma cualitativa, señalando los apartados que, en conjunto, resultan conceptualmente fundamentales y que, por otra parte, son presentados matemáticamente con nivel básico:

The essence of the chapter can be obtained just from the unlabelled sections (6.1, 6.7, 6.8.1, 6.9, 6.10) (Davies, 1999; pp. 122).

Los apartados citados como esenciales por el autor apelan al cálculo diferencial básico para su desarrollo conceptual. En cambio, los apartados intermedios (6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 y 6.8.2) despliegan el cálculo diferencial avanzado, presentando las formulaciones matemáticas, generalmente postuladas originalmente en la mecánica de fluidos.

A fin de conocer estos distintos niveles de complejidad y de no reiterar todo el desarrollo del capítulo, hemos seleccionado los apartados 6.1 y 6.2 para realizar nuestra descripción.

En primer lugar, el apartado 6.1 desarrolla una explicación cualitativa del modelo que describe el comportamiento de un fluido viscoso con un nivel mínimo de matemática. Luego, se desarrollan una serie de apartados en los que se profundizan los conceptos involucrados en dicho comportamiento con un nivel matemático intermedio (6.2 Stress, 6.3, Strain, 6.4 Strain rate y 6.5 Viscosity).

Describiremos el apartado 6.2 de L1 que explica en detalle el esfuerzo (stress) para lo que exhibiremos las representaciones con las que el autor desarrolla este apartado. En los apartados 6.3, 6.4 y 6.5 se desarrollan otros conceptos esenciales (Strain, strain rate y viscosity) que no analizaremos por ser sus desarrollos estructuralmente similares al 6.2. que desarrolla el esfuerzo.

d) Desarrollo del modelo sobre un fluido viscoso simple (nivel elemental)

i) Explicación cualitativa:

Sobre la base del diagrama de la Figura 2, el autor desarrolla una serie de conceptos y relaciones entre ellos, que le permiten explicar qué es un fluido viscoso de un modo simple.

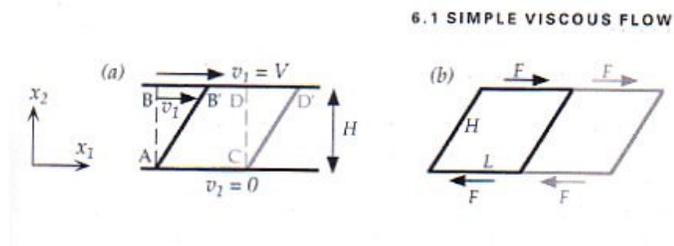


Figura 3: Diagrama de fluido simple viscoso

A través del diagrama de la Figura 3 se muestran los parámetros fundamentales que permiten definir un fluido viscoso y se explican los siguientes conceptos y relaciones:

- 1.- qué es un *fluido* en términos mecánicos
- 2.- cómo se caracterizan los materiales en función de la *deformación* que ocasiona la aplicación de una *fuerza* (elástico, plástico, frágil).
- 3.- cómo se deforman algunos materiales en función del tiempo

- 4.- qué es un *fluido viscoso lineal* o *fluido Newtoniano* (la *tasa de deformación* es proporcional al *esfuerzo aplicado*)
- 5.- que el *esfuerzo* es la *fuerza por unidad de área*
- 6.- cuál es la diferencia entre *esfuerzo* y *presión hidrostática*
- 7.- que la *viscosidad* es la constante de proporcionalidad entre la *tasa de deformación* y el *esfuerzo aplicado*
- 8.- la definición del *Pa s* como unidad de medida de la *viscosidad*
- 9.- los órdenes de magnitud de la viscosidad de materiales conocidos y su comparación con la viscosidad del manto
- 10.- que las fuerzas aplicadas al manto están balanceadas por la resistencia viscosa
- 11.- qué significa que un fluido sea compresible
- 12.- que el manto se considerará un fluido incompresible

Las explicaciones se amplían con ejemplos que no fueron elegidos al azar (agua, miel y el manto) y se introducen a través de éstos los órdenes de magnitud de la viscosidad de los materiales, con el fin de situar el estado de fluidez del manto a gran escala.

ii) Fórmulas utilizadas

La explicación cualitativa se desarrolla a través de las siguientes fórmulas:

Tasa de deformación (s),	$s = V / 2H$
Esfuerzo (τ),	$\tau = F / LW$
Viscosidad (μ)	$\tau = 2\mu s$

El nivel matemático desarrollado es elemental y las referencias remiten al diagrama de la Figura 2.

e) Desarrollo del modelo de esfuerzo (sustento conceptual de un fluido viscoso simple)

Se utiliza el diagrama de la Figura 4 para explicar conceptualmente el desarrollo que se realiza.

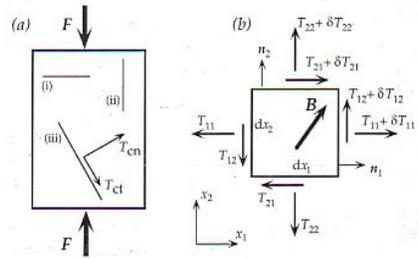


Figura 4: Diagrama para definir el esfuerzo

i) Explicación cualitativa:

En el desarrollo del apartado 6.2 (Stress) se amplía la concepción de esfuerzo dada en el apartado 6.1. (Simple Viscous Flow), en la que se consideró que el esfuerzo es la fuerza por unidad de área. La ampliación semántica se refiere a que:

1. El esfuerzo es fuerza por unidad de *área orientada*
2. El esfuerzo es un *tensor simétrico*
3. La *presión hidrostática* se define como el promedio de las componentes normales del esfuerzo
4. El *esfuerzo deviatórico* es la componente no hidrostática que induce la generación del flujo

ii) Fórmulas utilizadas

Stress representado por el tensor (T_{ij})

Convención de la suma $\sum a_i b_i = a_i b_i$

Delta de Kronecker $\delta_{ij} = 1$ si $i = j$
 $\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$

Ecuaciones de equilibrio mecánico $\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + \mathbf{B}_i = 0$

Presión hidrostática $T_{ij} = -P \delta_{ij} \Rightarrow P = -(T_{11} + T_{22} + T_{33}) / 3$

Esfuerzo deviatórico $\tau_{ij} = T_{ij} - T_{kk} \delta_{ij} / 3 = T_{ij} + P \delta_{ij}$

$$\tau_{ij} \Rightarrow \begin{bmatrix} T_{11} + P & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} + P & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} + P \end{bmatrix}$$

El nivel matemático utilizado en el desarrollo de este apartado puede considerarse como intermedio y las referencias remiten a la Figura 3.

5.1.3.2.3 Coordinación semántica: problemas empíricos asociados con la viscosidad del manto

La VM se contrasta empíricamente con algunos fenómenos, hay un apartado específico (6.9 Viscosity of the mantle), en el que se trabaja sobre las restricciones empíricas que modulan la VM con la profundidad. Este apartado comienza como sigue:

There are a number of observations that indicate that on geological time scales the mantle deforms like a fluid, and these can be used also to deduce something about the relevant rheological properties of the mantle. Usually it is assumed that the mantle is a linear viscous fluid, and the material is characterized in terms of viscosity (Davies, 1999; pp: 157).

Los dos últimos apartados (6.9 Viscosity of the mantle y 6.10 Rheology of rocks) son los proveedores de datos. En el primer caso, los datos provienen de contrastar el MVM (la VM es estratificada, la VM inferior es 30 veces mayor que la del manto superior; el manto es un fluido viscoso que fluye a escala de tiempo geológico, que resiste el descenso de las placas y el ascenso de las plumas) con tres fenómenos: el rebote postglacial, las anomalías del geoide en las zonas de subducción y el movimiento de rotación de la Tierra. El capítulo finaliza con el análisis reológico de las rocas (Rheology of the rocks). Se explican los modelos de los comportamientos reológicos clásicos (frágil, dúctil, y la transición frágil-dúctil) y su relación con la convección en el manto.

a) Contexto introductorio de la “viscosidad del manto”

Una primera mención a la VM se realiza en el capítulo 3 desde la perspectiva histórica, en el apartado 3.2. (Creeping Mantle) en el que se hace referencia a la propiedad del manto de deformarse que, a su vez, tiene sus raíces en considerar a la astenosfera como un fluido a escala de tiempo geológico.

(...) the asthenosphere, below the lithosphere, behaves like a fluid on geological time scales, in spite of being in the solid state (Davies, 1999; pp: 30).

En el texto se señala que este argumento tuvo soporte empírico en el rebote postglacial de la región de Fennoscandia, que fue explicado como:

It was argued by Jamieson in 1865 that this (the rebound of the earth's surface in Fennoscandian region following melting of the glaciation from the last ice age) could be explained by a viscous outflow from under the icecap, with a return flow alter de icecap melted (Davies, 1999; pp:30).

El autor refiere concretamente que en 1930 diferentes investigadores hicieron estimaciones bien fundamentadas sobre la viscosidad de la astenosfera, asumiendo implícitamente el espesor de ésta. Entre ellos, destaca que Haskell en 1937 asumió esencialmente un espesor ilimitado obteniendo para la viscosidad un valor de 1.3×10^{19} Pa s.

b) Los datos provenientes del rebote postglacial

Básicamente el rebote postglacial es un fenómeno que se basa en el ascenso de la superficie terrestre, del orden de algunos milímetros por año, respecto del nivel del mar. Los lugares más conocidos donde se produce el fenómeno son Canadá, Escandinavia y Fennoscandinavia.

Se describe el fenómeno con el siguiente gráfico

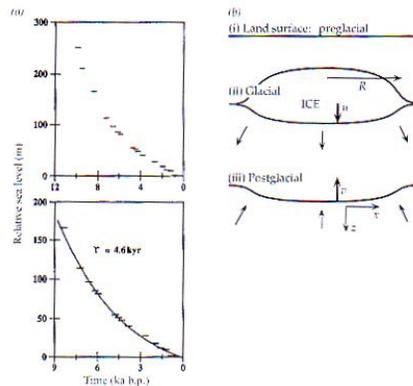


Figura 5: Diagrama y esquema explicativo del rebote postglacial

La evaluación de este fenómeno natural permite deducir la VM. El autor desarrolla dos apartados al respecto: el primero de ellos (6.9.1 Simple rebound estimates) explica el fenómeno utilizando un modelo simple que no involucra el tiempo ni la historia de la superficie de carga, ni los cambios de volumen del océano, ni la elasticidad de la litosfera ni variaciones laterales de la viscosidad, entre otros factores influyentes en el problema.

El autor señala que más allá de las complicaciones que surgen de incorporar estos factores al modelo, se infiere que la VM superior sería 3×10^{20} Pa s y la del manto inferior 7×10^{21} Pa s.

c) Los datos provenientes de las anomalías del geode

Las anomalías del geode surgen de considerar las deformaciones que se producen en las zonas de subducción y se utilizan para restringir los valores que puede tomar la VM en relación con la profundidad, aunque en forma relativa a diferentes profundidades y no de forma absoluta. La idea es que las anomalías de densidad reflejan la presencia de litosfera subducida de alta densidad bajo las zonas de subducción. La variación de densidad también causa desviaciones verticales en la superficie de la Tierra e interfases al interior del manto que, a la vez, contribuyen a perturbar el campo gravitatorio.

A través de un modelo simple se explica cualitativamente cómo depende la perturbación neta del campo gravitatorio a partir de las variaciones de densidad.

I will explain qualitatively the principles involved in this approach, but without going into details or quantitative analysis (Davies, 1999; pp: 163).

El siguiente esquema da cuenta del modelo presentado por el autor

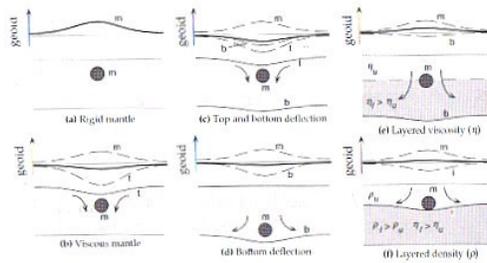


Figura 6: Esquema que representa las anomalías gravitatorias de una losa subductante

Se analizan cualitativamente los seis casos presentados en el diagrama y se arriba a las conclusiones generales a las que llegaron los científicos que investigaron el

tema, siendo la más importante que la VM crece en un factor de 30 en la zona de transición.

d) Los datos provenientes de la reología

En el rango reológico dúctil, la viscosidad o la viscosidad efectiva --en el caso de reologías no lineales—depende fuertemente de la temperatura y de la presión existentes en las profundidades del manto. Depende, además, de la presencia de pequeñas cantidades de agua que puede hacer decrecer la viscosidad en aproximadamente un orden de magnitud.

En general puede decirse que los experimentos en los rangos de presión y temperatura pertinentes son dificultosos o imposibles de realizar, y tanto la escala de tiempo como el rango de deformación de la Tierra son de órdenes de magnitud muy diferentes de los que pueden ser obtenidos en los experimentos, además de que la reología de las rocas es sensible a muchos detalles de su composición y de los minerales que las componen, su estructura y especialmente el tamaño del grano de éstas.

Por ello, el autor hace referencia a la incertidumbre de los estudios reológicos.

There remain great uncertainties about the details of mantle rheology (Davies, 1999; 167).

Se establece como relación básica que la deformación en función de la temperatura $s(T)$ es:

$$s(T) = A (\sigma/G)^n (b/d)^m \exp[-(E^*+PV^*)/RT]$$

Ecuación en la que A es una constante, σ es el esfuerzo, d es el tamaño de grano, P la presión, G es el modulo de elasticidad tangencial (elastic shear modulus), b es la longitud del vector de Burgers relativa a la estructura cristalina (aprox. 0,5nm), R es la constante de los gases, E^* es una energía de activación y V^* es el volumen de activación.

Se conoce poco el efecto de la presión sobre la tasa de deformación porque es difícil reconciliar las restricciones empíricas naturales y las de laboratorio. Las inferencias provenientes del rebote postglacial sugieren que la VM profundo es, al

menos, un orden de magnitud superior que la del manto superior pero probablemente no más que tres órdenes de magnitud.

De acuerdo con las estimaciones provenientes de experimentos de laboratorio puede establecerse que V^* es aprox. 15-20 cm^3/mol para la deformación de la olivina por dislocación y aprox. 5-6 cm^3/mol para la deformación por difusión¹⁷. Considerando una presión de 130 Gpa en la base del manto, el incremento de la viscosidad se predice en 12 órdenes de magnitud en la profundidad del manto. En acuerdo con la evidencia experimental V^* que no podría superar un valor del orden de 2,5 cm^3/mol .

Los experimentos realizados con olivina muestran que la tasa de deformación crece más de un orden de magnitud si la olivina está saturada en agua, pero los efectos de la temperatura y de la presión han sido dejados de lado al caracterizar este comportamiento.

Existe un importante consenso al considerar que la reología del manto pueda ser considerada como lineal. En muchos casos el motivo es la simplificación matemática que esto implica. Además las inferencias que se realizan a partir de las evidencias experimentales dan soporte a esta aproximación. Si por ejemplo, la reología fuera no-lineal durante el rebote postglacial, el flujo del manto tendería a concentrarse en la superficie de la sobrecarga y tendería a desarrollar una panza periférica, como si el manto hubiera estado más comprimido en las cercanías de la superficie que a gran profundidad. Esto no parece suceder aunque las conclusiones provenientes de esta clase de argumentos son susceptibles a la historia de la sobrecarga y a otras complicaciones intrínsecas del rebote postglacial.

Sea o no lineal el régimen reológico asumido, la ecuación $s(T)$ recientemente expuesta resulta sumamente útil pues brinda información relevante cuando se pone en correspondencia con las restricciones provenientes de la base experimental, lo que permite determinar algunas de las constantes, como por ejemplo A y V^* .

¹⁷ Los modelos mecánicos de deformación a escala atómica se conocen como difusión creep y dislocation creep, que nosotros llamaremos deformación por *difusión* o *dislocación*.

You will see in later chapters that there is a broad consistency between inferences from observations, the general linear form of equation 6.10.3¹⁸, and the basic features of mantle convection (Davies, 1999; pp:173).

Para reologías lineales, la viscosidad es simplemente $\mu = \sigma/2s$ y teniendo en cuenta la ecuación anterior es posible escribir a la viscosidad como

$$\mu(T) = \mu_r e^{[(E^* + PV^*)/R] (1/T - 1/Tr)}$$

siendo μ_r la viscosidad a la temperatura de referencia Tr .

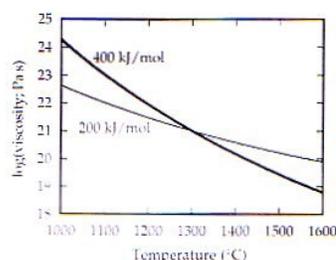


Figura 7: Gráfico cartesiano sobre la variación de la viscosidad con la temperatura.

Esta última ecuación expresa la relación de la viscosidad con la temperatura en reologías lineales y es la que se utiliza en la generación de los modelos numéricos en el apéndice 2 del libro.

5.1.4. Acerca de la descripción estructural de L1

El análisis estructural de L1, a través de sus diferentes niveles, nos permitió caracterizar la propuesta de enseñanza que su autor presenta. El recorrido plasmado a través del CE resultó de suma utilidad pues nos llevó a visibilizar las relaciones semánticas entre el MCM y el MVM, los modelos que lo sustentan y, también, su contraparte empírica, tal como nos lo habíamos propuesto teórica y metodológicamente. Tales relaciones posibilitaron concebir y describir dicho recorte.

El análisis estructural posibilitó, a su vez, realizar una síntesis del libro, las temáticas que aborda, su nivel de desarrollo y su organización interna. Esta síntesis es

¹⁸ Se refiere a la ecuación s(T).

un producto de esta investigación en sí mismo, más allá de que haya sido realizada para luego analizar cómo se opera la TD.

Vale la pena destacar que el recorrido y la descripción de L1 se ajustaron a sus características estructurales y en lo que a nuestra metodología de trabajo se refiere, nos habilitó un modo general de realizar el análisis estructural.

5.2. Análisis estructural de L2

5.2.1 Macroestructura

a) Título

El título del texto, *The Earth's Mantle. Composition, structure and evolution*, puede traducirse como “El manto terrestre. Composición, estructura y evolución”. La TCM terrestre está implícita.

b) Generalidades

El texto es una revisión académica realizada por científicos especialistas de diferentes áreas en relación con la geodinámica que involucra los procesos que ocurren en el manto terrestre desde una perspectiva evolutiva. El editor organiza los capítulos en sesiones que dan cuenta del enfoque general del texto.

La meta que persigue el editor es producir una actualización temática, a partir de la producción de un conjunto de especialistas de la Universidad Nacional de Australia, que realizan una revisión de la investigación acerca de la composición, las estructuras y la evolución del manto terrestre:

It has been our goal in assembling this volume to produce an overview of the composition, structures, and the evolution of the Earth's mantle that will be authoritative, up-to-date, and forward-looking, yet thoroughly readable. It is our hope that it will prove useful to all those interested in the Earth mantle and its workings... (Jackson, 1998: Preface, pp: xxi).

En relación con el enfoque dado a la enseñanza, el libro está dirigido tanto a estudiantes graduados que comienzan a profundizar en esta temática como así también a investigadores experimentados:

... from beginning graduate students to experienced researchers (Jackson, 1998: Preface, pp: xxi).

Cada capítulo es una actualización (1998) del estado del arte de diferentes campos y el texto pretende ser una coordinación e integración de los campos de investigación involucrados en la geodinámica en general.

El editor del libro, Ian Jackson, y los autores de cada capítulo forman parte del grupo de científicos de la Escuela de Investigación de la Universidad Nacional de Australia (Research School of Earth Sciences at Nacional University) y colaboradores que participan de la institución.

En relación con el contexto institucional, se describen los resultados de más de dos décadas de investigaciones del grupo de científicos de la *Research School of Earth Sciences* (RSES) de la *Australian Nacional University* dedicados a investigar e integrar diversos aspectos de la evolución planetaria a gran escala, desde diferentes perspectivas disciplinares. Esta escuela investiga diferentes áreas desde hace más de dos décadas: dinámica geofísica de fluidos, génesis de depósitos minerales, geoquímica ambiental, física de minerales y rocas, y geoquímica de los gases nobles, y sus posibles articulaciones.

En relación con el enfoque que presenta el texto, los procesos que ocurren en el manto juegan un rol clave a nivel planetario porque el manto funciona a modo de interfase entre la corteza –y con ello la parte externa del planeta— y el interior --el núcleo--. El objetivo último del texto es interpretar la evolución planetaria a gran escala desde su origen hace 4600 Ma. La convección se destaca como proceso porque regula el enfriamiento del interior de la Tierra. El enfoque del texto no es centrarse en la convección sino suponerla para desarrollar una serie de monográficos sobre temáticas específicas, interrelacionadas entre sí.

El texto desarrolla una serie de estudios monográficos, ligados entre sí temáticamente, que exponen aspectos centrales de la evolución planetaria, en general y, del manto, en particular. En primer lugar, se trata de visualizar al planeta desde una perspectiva evolutiva composicional, en el sentido de reconstruir la historia geológica de la formación y evolución del planeta a gran escala a partir de datos de distintos orígenes. Luego, se analiza la dinámica y evolución del manto terrestre, bajo las hipótesis del modelo de convección global. Por último, se consideran las condiciones del manto actual en relación con su estructura y comportamiento dinámico.

5.2.2 Superestructura

Al igual que en L1, haremos una descripción general de cada sección que estructura el texto para luego describir cada capítulo.

5.2.2.1 Secciones que estructuran el libro

a) Primera sección (Accretion and Differentiation of the Earth)

La primera sección está formada por tres capítulos, el primero de ellos está dedicado a explicar los procesos de acreción y formación del núcleo a partir de la composición de los silicatos terrestres. Luego, se aborda el proceso de diferenciación inicial de la Tierra, desde una perspectiva isotópica. La sección culmina con un estudio sobre las restricciones sobre las hipótesis de origen y evolución de la atmósfera, la corteza el manto y el núcleo.

b) Segunda sección (Dynamics and Evolution of the Earth's Mantle)

Esta sección comienza con un abordaje de la dinámica del manto, a través de la identificación y el estudio de varios fenómenos físicos y dinámicos. Luego, se desarrolla un cuadro general de cómo funciona la convección en el manto y cómo fue su evolución geológica. Además se analiza la estructura química del manto a partir del análisis de los productos de las plumas mantélicas. La sección cierra con una descripción de estudios experimentales sobre la posible composición química del manto y las aplicaciones que dichos estudios pueden tener.

c) Tercera sección (Structure and Mechanical Behavior of the Modern Mantle)

El desarrollo de la última sección se inicia con el análisis de la estructura tridimensional del manto a partir de las tomografías sísmicas para luego interpretarlos a través de estudios experimentales de sismología, petrología y física de los minerales y las rocas del manto. Luego, se analiza la VM a partir de las inferencias que surgen de analizar el rebote postglacial. El último capítulo de la sección desarrolla los aspectos reológicos del manto a partir de estudios de laboratorio sobre la deformación de los materiales y las transiciones de fase que ocurren en la zona de transición.

5.2.2.2 Descripción general de cada capítulo

Se describirá someramente cada capítulo. Recordemos que cada capítulo es un monográfico temático, escrito por diferentes autores. Haremos referencia a la autoría de cada uno de ellos.

a) Capítulo 1 (Composition of the Silicate Earth: Implications for Accretion and Core Formation)

Hugh St. O'Neill and Herbert Palme

El capítulo comienza con una introducción sobre la formación del sistema solar y los procesos de acreción y diferenciación subyacentes a su formación. Se analizan distintos tipos de meteoritos como así también la composición de los silicatos terrestres y su implicancia en el proceso de acreción. Además, se analiza la formación del núcleo a partir de evidencias geoquímicas y se considera la variable temporal en su formación. Sobre el final del capítulo, se postulan posibles composiciones del núcleo para concluir con una síntesis que presenta el modelo de formación y acreción del núcleo terrestre.

b) Capítulo 2 (Early Differentiation of the Earth: An Isotopic Perspective)

Malcolm T. McCulloch y Victoria C. Bennett

Durante el desarrollo del capítulo se analiza cómo a partir de la sistemática isotópica, particularmente sobre las composiciones de Pb y Sr que se preservan en muestras antiguas, puede ser usada para restringir la escala de tiempo de acreción de la Tierra en general, y de formación de su núcleo, en particular. Luego, se discuten las

restricciones sobre la formación y evolución de la corteza continental y el manto superior a través del análisis sistemático del isótopo Sm- Nd en rocas de la era Arcaica.

c) Capítulo 3 (Primordial Solar Noble-Gas Component in the Earth: Consequences for the Origin and Evolution of the Earth and Its Atmosphere)

Ian McDougall and Masahiko Honda

En el desarrollo de este capítulo se describe la evidencia empírica en relación con los gases nobles primordiales existentes en la Tierra, principalmente de estudios de muestras que se considera que derivan del manto pero a la luz de los estudios sobre gases nobles asociados con meteoritos, de muestras extraídas de la luna y del sol. Además, se revisan la composición y abundancia de gases nobles pesados de la Tierra, en un intento de mejorar la comprensión del modelo sobre el origen y evolución de nuestro planeta y su atmósfera.

d) Capítulo 4 (Understanding Mantle Dynamics through Mathematical Models and Laboratory Experiments)

R. Griffiths y J. Turner

En este capítulo se propone identificar y analizar una serie de fenómenos físicos y dinámicos que ocurren en el manto. En especial, se discute la fuerte influencia de la dinámica de fluidos, tanto teórica como experimental, en la comprensión de los fenómenos de la Tierra. Se abordan las deducciones que surgen de aplicar los modelos físicos a la Tierra en combinación con los datos provenientes de su superficie. Esta acción define el enfoque con el que se desarrolla el capítulo, operando a modo de sustento del MCM y de la evolución de la Tierra a gran escala.

e) Capítulo 5 (Plate, Plumes, Mantle Convection, and Mantle Evolution)

Geoffrey Davies

El capítulo presenta el MCM desde la perspectiva de la convección global. Desarrolla sintéticamente los modos placa y pluma. Analiza, además, las evidencias empíricas más importantes que justifican ambos modos del modelo de convección. Por otra parte, se discute la posibilidad de la existencia de una barrera en los 660 km de

profundidad y se consideran otras posibles estratificaciones y heterogeneidades. El capítulo cierra con una exposición acerca de la evolución térmica del manto y la evolución tectónica de la Tierra.

f) Capítulo 6 (The Mantle's Chemical Structure: Insights from the Melting Products of Mantle Plumes)

I. Campbell

El capítulo procura desentrañar la estructura química del manto profundo a fin de entender la dinámica de las plumas térmicas. Se analizan los materiales que son considerados como muestras de la banda térmica limítrofe en la que se generan los ascensos térmicos de las plumas. Se analizan, además, las hipótesis sobre el origen de las derrames basálticos¹⁹ y se discute la profundidad de origen de las plumas térmicas -- la interfase manto-núcleo o la interfase manto superior-manto inferior--.

g) Capítulo 7 (Pyrolite: A Ringwood Concept and Its Current Expression)

David Green y Trevor Fallon

El propósito del capítulo es describir los estudios experimentales sobre la composición de la pirolita, considerados sumamente relevantes para comprender la dinámica de la Tierra. El capítulo comienza con la definición conceptual de la pirolita en su contexto histórico para luego presentar una serie de estudios experimentales que han dado lugar a postular diferentes composiciones de ésta. También se analizan las restricciones petrológicas provenientes de la génesis magmática en relación con el concepto de pirolita y los hallazgos asociados con los estudios experimentales.

h) Capítulo 8 (Seismic Structure of the Mantle: From subduction Zone to Craton)

B. Kennett y R. van der Hilst

El capítulo comienza con introducción sobre las técnicas de introspección del interior de la Tierra que surgen de las tomografías sísmicas a partir de un recorrido de su evolución histórica. Se analizan la estructura sísmica del manto, en general, y su

¹⁹ Flood basalts

estructura radial, en especial, señalando las diferencias generales entre el manto superior y la zona de transición, por un lado, y el manto superior, por otro. Se muestra, además, un detalle de la estructura tridimensional del manto, tanto de las zonas de subducción como de las estructuras bajo las regiones continentales. Vale la pena destacar que se discute en profundidad la información proveniente de las tomografías sísmicas que indican que las losas subductantes penetrarían la discontinuidad de los 660 km.

i) Capítulo 9 (Composition and Temperature of the Earth's Mantle: Seismological Models Interpreted through Experimental Studies of Earth Materials)

Ian Jackson y Sally Rigden

En la primera parte del capítulo se desarrollan los fundamentos necesarios para analizar la elasticidad, la composición y la temperatura del manto y se integran para sintetizar el progreso de las últimas décadas en los campos de la sismología, la petrología experimental, y la física de rocas y minerales. Luego, en la segunda parte del capítulo, los fundamentos desarrollados se aplican a la interpretación de determinados aspectos de la estructura sísmica del manto superior, la zona de transición y el manto inferior. Sobre el final del capítulo se intenta sintetizar los modelos de elasticidad, composición y temperatura del manto y de identificar las actuales fronteras del conocimiento científico sobre estas temáticas.

j) Capítulo 10 (The Viscosity of the Mantle: Evidence from Analyses of Glacial-Rebound Phenomena)

Kurt Lambeck and Paul Johnston

El capítulo comienza con una introducción en la que se presenta el problema del rebote postglacial en relación con el contexto general de la Tierra y del manto, en especial, desarrollando incluso un recorrido histórico de su investigación y sus consecuencias para el MCM. El capítulo desarrolla formal y minuciosamente el modelo que da cuenta de las alteraciones que se producen por una sobrecarga en la superficie terrestre. Se plantean los modelos de geometría esférica asociados con la deformación de la Tierra a partir de su sobrecarga superficial, las ecuaciones del nivel del mar y los cambios que se generan en el campo gravitatorio. Se interpretan los datos que emergen de este enfoque en relación con la VM.

k) Capítulo 11 (Mantle Rheology: Insights from Laboratory Studies of Deformation and Phase Transition)

Martin Drury and John Fitz Gerald

Durante el desarrollo del capítulo se considera el comportamiento mecánico de los materiales que se someten a grandes presiones y temperaturas, profundizando en las diferencias entre el manto superior, el manto inferior y la zona de transición. Se revisan, además, las transformaciones de fase que ocurren en la zona de transición y sus consecuencias mecánicas. El capítulo cierra con una perspectiva amplia sobre futuros desarrollos en este campo.

5.2.3 Microestructura

El libro se caracteriza por ser una selección estructurada de capítulos unitarios, escritos por diferentes autores, como ya hemos visto. Cada capítulo es una unidad estructural en sí, con su estructura particular, diferente en cada caso. Su criterio de desarrollo es la presentación de la producción científica relativa a una determinada temática que involucra al manto desde alguna perspectiva evolutiva. El contexto institucional de pertenencia de los autores y este enfoque monográfico determinan fuertemente su concepción.

Tal como hemos hecho con L1 distinguimos tres tipos diferentes de secuencias en las que se involucra la VM: supraordinación, subordinación y coordinación.

Sabemos que el modelo que asume el texto es el de convección global porque Davies es el autor del capítulo que lo presenta. Es decir, que sabemos (Ver 5.1) cuál es el modelo y dado que se trata de un contexto diferente, es decir, otro libro de texto, nos interesa indagar especialmente cómo el autor arma la construcción del modelo, en qué basa, esta vez, conceptualmente sus afirmaciones y, más allá de la propuesta didáctica de que se trate, sabemos cuál es la postura histórica de Davies en relación con la controversia.

En lo que a la Supraordenación se refiere, rastreamos y describiremos las citas que hacen referencia a la VM en el planteo del MCM a través del capítulo 5 (Chapter 5: Plates, Plumes, Mantle Convection, and Mantle Evolution), y más especialmente sobre su influencia conceptual en el modo placa, que es el modo de convección que hemos seleccionado para el análisis – tal como hemos hecho con L1--.

5.2.3.2 Niveles semánticos de relación de la viscosidad del manto

5.2.3.2.1 Supraordinación semántica: vínculos conceptuales entre el concepto estructurante y el modelo de convección

a) Introducción

A partir de las características descritas en los niveles estructurales anteriores sabemos que el texto defiende el modelo de convección global que se desarrolla en el capítulo 5, cuyo autor es Geoffrey Davies. Describiremos qué contenidos se desarrollan para presentar el modelo en este capítulo. Naturalmente, por la estructura del libro en su conjunto, en otros capítulos se amplían ciertos modelos conexos con el MCM expuesto.

Haremos, en primera instancia, una descripción cualitativa de la concepción que se aborda, luego describiremos su estructura interna para luego situar dónde se desarrolla el CE que estructura nuestro análisis.

b) El modelo de convección que postula el libro de texto en su conjunto

Nos interesa, particularmente, saber cómo el editor introduce en el prefacio el modelo de convección que se asumirá en el libro:

All of these inferences²⁰ are consistent with a model of whole-mantle convection in which old cold slabs descend well into the lower mantle, though at speeds substantially less than those for the upper mantle, because of the higher viscosity. In this scenario, plumes rise from the thermal boundary layer at the base of the mantle, with narrow conduits or tails feeding large mushroom-shaped heads and grow by entrainment of surrounding mantle (Preface: Jackson, 1998; pp: xxiv).

²⁰ Se refiere a la inferencias que se hacen en el prólogo frente al cuadro general de hipótesis generales que asume el texto en relación con los contenidos a desarrollar.

El modelo de convección global se presenta en el capítulo 5 (Plates, Plumas Mantle Convection and Mantle Evolution). El énfasis del capítulo está puesto en conectar la teoría del comportamiento dinámico del manto con los datos y el desarrollo del cuadro general del proceso convectivo.

En este capítulo, Davies presenta una síntesis de su modelo y fundamenta algunas de sus hipótesis a través de diferentes citas, algunas de las cuáles se refieren internamente al texto. Describiremos la estructura de este capítulo que presenta el modelo de convección. Además, consideraremos cuáles son las relaciones extensionales expuestas por el autor y el modo en el que las comunica a su audiencia.

c) La descripción cualitativa del capítulo que desarrolla el modelo de convección en el manto

El editor presenta el modelo de convección en el manto en el capítulo 5 (Chapter 5: Plates, Plumes, Mantle Convection, and Mantle Evolution), de autoría de Davies. Allí se muestra al sistema convectivo separado en dos acciones relativamente independientes, dirigidas por bandas térmicas limítrofes diferentes, las placas como banda térmica limítrofe superior y la capa D'' como banda inferior. Seguramente las placas que subducen y llegan a la capa D'' influirán de algún modo la ocurrencia de las plumas las que, a su vez, influirán de algún modo a la litosfera, y por ende a las placas que subducen, pero no se tienen en cuenta estas diferencias, es decir, se consideran independientes.

Las placas se asumen como parte integral de la convección y funcionan a modo de banda térmica limítrofe superior del manto dando lugar al ciclo de creación, enfriamiento, subducción y recalentamiento de las placas. Las placas conforman el modo principal de convección mientras que las plumas se configuran como un modo secundario.

Se discute cómo la zona de transición puede condicionar la forma de la convección (global o estratificada), interpretándola como una posible barrera para el flujo convectivo, a través de los efectos de las transformaciones de fase en interacción con los efectos geoquímicos flotacionales que determinan la forma del flujo.

Se asocia la existencia de la barrera desde una perspectiva evolutiva, minimizando la discusión acerca de la estratificación de la convección en el presente geológico. El accionar de la barrera es interpretado en función del tiempo geológico, sugiriendo la posibilidad de haber funcionado ocasional o continuamente en el pasado histórico del planeta.

En relación con el presente geológico, se considera que algunas placas y plumas pueden no penetrar la zona de transición en lo inmediato pero que probablemente lo hagan en una escala de tiempo del orden de 10^8 años.

Se hace hincapié en que las placas son una parte integral de la convección en el manto, que funcionan a modo de banda térmica limítrofe que dirige el principal modo de convección.

El título del capítulo hace referencia al modo en el que el autor concibe el modelo: placas, plumas, convección y evolución del manto.

El capítulo comienza con una introducción (5.1. Introduction) en la que se presenta un panorama general de la convección a escala planetaria y se presenta como un proceso que varía con el transcurso del tiempo.

El autor persigue el objetivo de resumir los principales procesos relativos al manto y su evolución:

The purpose of this chapter is to summarize the main arguments that have led to the foregoing conception of the present day mantle and to suggest some implications for the mantle's thermal and chemical evolution and the tectonic evolution of the Earth (Davies, en Jackson, 1998; pp: 229).

Se cita una publicación (Davies & Richards, 1992, que hemos analizado en el capítulo 4 de esta tesis) como referencia ampliatoria que desarrolla el sustento conceptual sobre el que se descansa la propuesta que se postula a través de este capítulo del libro.

A much more detailed account of the arguments concerning the present day mantle has been given by Davies and Richards (1992), but because the concern there was to address all of the many issues that had been raised, perhaps the simplicity of the main arguments was not so apparent in that paper (Davies, en Jackson, 1998; pp: 229).

El siguiente apartado (5.2. Convection) desarrolla la convección como fenómeno térmico en general distinguiendo distintos tipos de convección y sugiriendo que cada banda térmica limítrofe dirige un tipo de convección diferente, prefigurando la independencia de cada modo de convección (placas y plumas). Davies señala que generalmente los libros de texto presentan la convección considerando que ambas bandas térmicas dan cuenta del mismo patrón convectivo y no que se trata de dos procesos convectivos independientes.

El autor presenta tres diagramas (ver Figura 8) ilustrando esta situación. Notemos que el último de ellos coincide con el diagrama de la Figura 1, figura que proviene del capítulo 12 de L1.

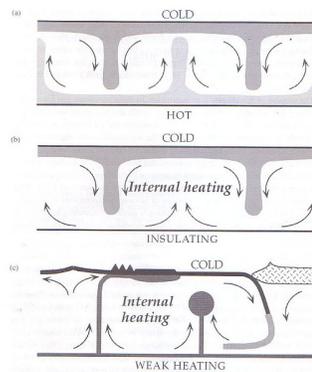


Figura 8: Esquemas sobre distintos tipos de convección

Luego el autor desarrolla un apartado (5.3. Lithosphere) en el que se analizan las propiedades mecánicas de la litosfera y de su característica de estar separada en placas rígidas móviles. También se trabaja, aunque muy superficialmente, sobre los posibles comportamientos reológicos que presenta la litosfera.

El siguiente apartado (5.4. Plate-scale flow) desarrolla en general el modo placa de la convección y el próximo (5.5. Plumes) presenta también en líneas generales el otro modo de convección propuesto por el autor, el modo pluma.

El autor continúa con un apartado en que se presentan las evidencias empíricas del modo placa de convección (5.6. Signatures of Plate-Scale Flow) que incluye dos subapartados (5.6.1. Mid-Ocean Ridge Topography y 5.6.2. Heat Flow through the Seafloor). También presenta un apartado específico para exhibir las evidencias empíricas que apoyan la hipótesis del modo pluma de convección (5.7. Plume Signatures). Este apartado, a su vez, se estructura en dos subapartados (5.7.1. *Plume Topography* y 5.7.2. *Plume Heat Flow*), uno en relación con las evidencias provenientes de la topografía y, el otro, en relación con el flujo de calor.

El siguiente apartado (5.8. A barrier at a depth of 660 km?) desarrolla la temática asociada con la existencia de una posible barrera que impide el pasaje de materia en la discontinuidad de los 660 km. En este punto el autor desarrolla las cuestiones que considera de fundamental importancia (5.8.1. The Topography Constraint, 5.8.2. Seismic Tomography y 5.8.3. Numerical Modeling) para defender el modelo de convección global. La conjunción de estas cuestiones se trata durante el apartado siguiente (5.8.4. Summary).

Otras formas de estratificación y heterogeneidad (5.9. Other Internal Layering and Heterogeneity) son señaladas por el autor. Específicamente, trata de la región D'', la estratificación viscosa, tema que nos ocupa y que describiremos más adelante, y la estratificación y heterogeneidad química (5.9.1. The Bottom of the Mantle (D'' Region), 5.9.2. Viscosity Stratification y 5.9.3. Chemical Stratification and Heterogeneity).

Por último, el capítulo cierra con dos apartados (5.10. Thermal Evolution of the Mantle y 5.11. Tectonic Evolution of the Mantle) que involucran al modelo de convección y que tratan de la evolución del planeta a gran escala.

d) La descripción conceptual de la viscosidad del manto

La VM se explica con distintos niveles de generalidad durante el capítulo 5 de L2.

Davies distingue tres niveles: un nivel general que se desarrolla en la introducción del capítulo, un nivel medio que se expresa a través de una relación extensional general sobre la que no se profundiza, sólo se declara. Y el nivel siguiente es en el que la VM toma el lugar de concepto relevante en la concepción del MCM, especialmente por ser un factor determinante de definición de los modelos numéricos. Por último, al ser la VM un modelo en sí mismo es presentado especialmente en un apartado (5.9.2. Viscosity Stratification).

Describiremos someramente cómo es cada uno de estos niveles:

i) Nivel general de desarrollo de la VM

En la introducción (5.1. Introduction) hay una mención implícita a la VM a través de su centralidad en la reología y la influencia de ésta en la participación de las placas en la convección.

The plates are an integral part of mantle convection, being the main driving thermal boundary layer. The surface pattern of this convection, that is, the geometry of the plates, is not like that in “normal” convecting fluids, because it is controlled by the essentially brittle rheology of the lithosphere, rather than by the ductile rheology of the underling mantle (Davies, en Jackson, 1998; pp: 228).

El control que ejerce la reología se refiere a la relación entre el esfuerzo y la deformación, que en el caso de un fluido viscoso es una relación lineal. El manto es modelado como un fluido viscoso como medio material por el que atraviesan, en particular, las placas en su descenso. El patrón superficial que muestran las placas es controlado por la reología de la litosfera.

ii) Nivel medio de desarrollo de la VM

Específicamente se hace una referencia concreta sobre la viscosidad cuando se presentan las características de los modelos numéricos (5.8.3. Numerical Modelling). Se considera la posibilidad de que la viscosidad sea constante o bien que varíe con la temperatura y, con ello, con la profundidad. Davies utiliza dos representaciones diferentes para ilustrar esta situación (ver Figura 9 y Figura 10).

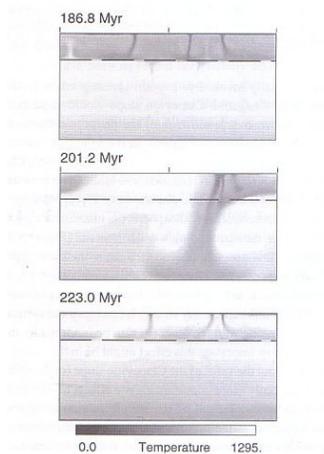


Figura 9: Simulación numérica del MCM con un MV constante

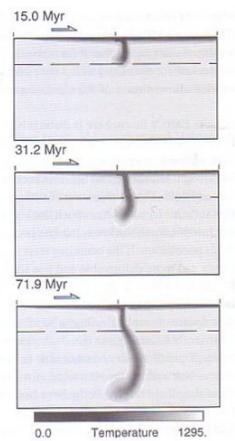


Figura 10: Simulación numérica del MCM con un MV estratificada

Concluye aseverando que si el modelo de viscosidad es variable no se produce estratificación. En cambio, si la viscosidad es constante, si se produce.

iii) Nivel específico de desarrollo de la VM

Un desarrollo un poco más profundo sobre el rol de la VM se realiza cuando el autor escribe el apartado dedicado a la estratificación viscosa (5.9.2. Viscosity Stratification), apartado cuya existencia apoya la hipótesis de convección global.

El apartado sugiere que los modelos sobre el rebote postglacial y el campo gravitatorio sobre las zonas de subducción indican que la VM crece con la profundidad.

Se considera que la VM toma un valor del orden de 10^{21} Pa.s, siendo éste un valor consistente con el modelo que postula que la viscosidad crece, de aproximadamente 3×10^{20} Pa.s en el manto superior, a 6×10^{21} Pa.s en el manto medio, (entre los 700 y los 2000 km de profundidad). Se considera que la VM inferior, en profundidades entre los 2000 y los 3000 km, toma valores del orden de los 10^{22} Pa.s.

La información brindada en este apartado cita, por un lado al capítulo 10 del mismo libro (Capítulo 10, *The viscosity of the mantle: Evidence from Analyses of Glacial Rebound Phenomena*) y, por otro, ciertas publicaciones científicas sobre las que se sustentan los datos sobre la VM.

5.2.3.2.2 Subordinación semántica: contexto de sustentación conceptual de la viscosidad del manto

Este apartado de nuestra descripción estructural del texto de Jackson pretende describir qué modelos presentan los autores para enseñar la VM. Los (sub)modelos que sustentan el desarrollo de la VM como modelo general son, específicamente modelos físicos aplicados al entorno de la Tierra, en particular modelos de mecánica de fluidos y termodinámicos. Este libro de texto no persigue como objetivo enseñar estos modelos básicos. No olvidemos, como ya hemos visto en la macroestructura (Ver 5.2.1) de L2, que el libro está dirigido a especialistas y no tanto a estudiantes en formación, son 11 monográficos que suponen que el lector tiene conocimientos de física y de las Ciencias de la Tierra. En particular, no es su finalidad enseñar los modelos de mecánica de fluidos que sustentan el MVM. De hecho, en ningún capítulo se enseñan este tipo de. Por ello, no es posible analizar la enseñanza de los modelos que subyacen a la definición de la VM.

Sin embargo, el libro editado por Ian Jackson presenta un capítulo relacionado específicamente con la VM (Chapter 10: The Viscosity the Mantle: Evidence from Analyses of Glacial-Rebound Phenomena, cuyos autores son Kurt Lambeck y Paul Johnston) pero éste se enfoca sobre el rebote post-glacial. Las relaciones que vinculan a la VM con el rebote post-glacial pueden enmarcarse en el nivel semántico que hemos denominado coordinación semántica, que desarrollaremos a continuación.

5.2.3.2.3 Coordinación semántica: problemas empíricos asociados con la viscosidad del manto

En este apartado describiremos los datos provenientes del postglacial, que se exhiben en el capítulo 10 (Chapter 10: The Viscosity the Mantle: Evidence from Analyses of Glacial-Rebound Phenomena), que podemos traducir como La VM: evidencias provenientes del rebote postglacial. Los datos provenientes de la reología se tratan en un capítulo específico (Chapter 11: Mantle Reology: Insights from Laboratory Studies of Deformation and Phase Transition) cuyo su análisis supera ampliamente nuestros objetivos. En lo que sigue sólo nos avocaremos a analizar los datos provenientes del rebote postglacial.

El enfoque del capítulo 10 se centra en la VM desde la perspectiva de la Tierra como un todo, a escala global. Se intenta dar cuenta del valor cuantitativo de la VM a través del rebote postglacial.

Glacial rebound is the most appropriate phenomenon available for estimating this property at timescales approaching those characteristic of mantle convection (Lambeck y Johnston, en Jackson, 1998; pp: 465).

En la introducción del capítulo se hace referencia al contexto geofísico en el que se inserta el rebote postglacial como problema científico, enmarcando la VM en función de la respuesta viscosa a gran escala frente a la aplicación de un esfuerzo localizado. Se alude a datos geofísicos que indican que el esfuerzo y la deformación del planeta como un todo, no están en fase y se destaca la importancia de la viscosidad en relación con la evolución de la Tierra, en especial, de los regímenes térmico y tectónico. También se advierte sobre la incertidumbre de la estimación del valor de la viscosidad, en especial en lo que se refiere a su dependencia con la profundidad y su variación lateral.

Los autores sitúan el rebote postglacial entre una serie de fenómenos que generan distintas respuestas de la Tierra, abarcando diferentes escalas espaciales y temporales. Por ejemplo, las vibraciones sísmicas pueden ser del orden de 10^4 años mientras que el rebote postglacial puede ubicarse entre los 10^3 y 10^5 años.

Se utiliza una representación del espectro de posibles procesos de deformación de la Tierra y su respuesta (ver Figura 11) que brinda un pantallazo de los diferentes fenómenos y sus períodos de ocurrencia. Esto nos lleva a situar el rebote postglacial en su complejidad pues la ocurrencia de los fenómenos se superpone.

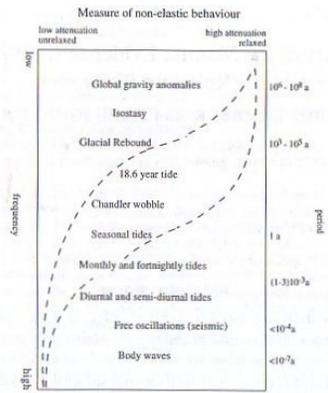


Figura 11: Espectro esquemático de procesos de deformación terrestre a diferentes escalas

A altas frecuencias (10^{-4} años o tiempos menores) la respuesta es esencialmente elástica, mientras que a bajas frecuencias (del orden de 10^7 años o mayores aún) la respuesta es fluida. Poco se sabe en relación con los procesos cuyos períodos están comprendidos entre estos dos extremos del espectro:

The nature of the response function between these two limits is, however, essentially unknown, and its determination remains a major objective of geophysical research (Jackson, 1998: pp: 462).

Se presenta el problema geofísico general que responde a considerar cómo es la deformación D que se produce frente a la aplicación de una fuerza F , considerando que la deformación puede estar representada por diferentes parámetros, variables involucradas en la ocurrencia de los distintos fenómenos. Si la fuerza aplicada es conocida es posible calcular la respuesta de la Tierra R en relación con el tiempo y la escala espacial.

La función puede adoptar una forma muy compleja si se integran diferentes fenómenos pues ocurren además a diferentes escalas de espacio y tiempo. Por ello, la consideración de un fenómeno particular en forma aislada

involucra parámetros que describen la deformación característica de la aplicación de una fuerza particular y su respuesta.

En el desarrollo del capítulo se infiere la VM a partir del cambio de la forma de la Tierra y del campo gravitatorio a partir de la formación y el deshielo de los glaciares.

Llegados a esta altura haremos una advertencia: el contenido conceptual del capítulo excede largamente el conocimiento que hemos definido como conocimiento de referencia de nuestro análisis. Es decir, nuestro modelo de referencia es sólo el de la convección en el manto, para cuyo análisis microestructural utilizamos la VM como CE, lo que nos habilita a vincular los niveles de supraordenación, subordinación y coordinación, mientras que el texto desarrolla con profundidad el modelo que se utiliza para abordar los datos provenientes del rebote postglacial.

El rebote postglacial es un fenómeno que informa, que brinda datos acerca de la VM. Por ende, el rebote postglacial es uno de los posibles fenómenos fuente cuya coordinación con el modelo *teórico* de la VM aporta información al MCM (otro fenómeno fuente es, por ejemplo, el asociado con las anomalías del geoide sobre las zonas de subducción).

Cada uno de estos fenómenos obedece al planteo de una serie de modelos que se *importan* desde distintas disciplinas. La especificidad de la construcción teórica del modelo del rebote postglacial excede los límites de nuestro estudio. De todos modos, a fin de conocer algunos detalles del nivel de los monográficos – que por otra parte, son disímiles— esbozaremos una descripción cualitativa de qué se enseña y con qué nivel matemático se lo hace.

El modelo del rebote postglacial propone analogar la Tierra a una esfera de densidad ρ que se encuentra afectada por su potencial gravitacional asociado Ψ . El hielo glacial se representa por una carga superficial localizada sobre la esfera.

Se plantean las ecuaciones que gobiernan la deformación de la esfera describiendo la relación entre la densidad y el potencial gravitatorio, por un lado, y las condiciones de continuidad material, por otro.

Los cambios producidos a larga escala por la carga postglacial ocurren en tiempos del orden de los miles de años, por lo que deben tenerse en cuenta los efectos de rotación y aceleración de la Tierra que modifican su inercia.

Se asume que la Tierra es una esfera se encuentra inicialmente en un estado de equilibrio hidrostático. Se expresan las ecuaciones en términos de cambios incrementales en la deformación y el esfuerzo. Se plantea el *Lagrangiano* del sistema definido, el que da origen a tres ecuaciones:

$$\nabla \cdot \tau^{(\delta)} \pm \nabla(\rho^{(0)} u \cdot \nabla \Psi^{(0)}) \pm \rho^{(\Delta)} \nabla \Psi^{(0)} \pm \rho^{(0)} \nabla \Psi^{(\Delta)} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla^{(2)} \Psi^{(\Delta)} = -4\pi G \rho^{(\Delta)} \quad (2)$$

$$\rho^{(\Delta)} = -\nabla \cdot (\rho^{(0)} u) \quad (3)$$

Siendo u el desplazamiento, Ψ el potencial gravitatorio, τ el tensor de esfuerzo, ρ la densidad y G la constante de gravitación universal. El superíndice (0) se refiere al estado inicial del sistema, (δ) a incrementos de masa y (Δ) refiere a incrementos locales.

La primera ecuación describe el balance de fuerzas provenientes de diferentes gradientes espaciales: el primer término está asociado con el esfuerzo, el siguiente con la deformación de la Tierra, el tercero con los cambios en el potencial gravitatorio debido a la variación de densidad y el, último término, está asociado con el campo gravitatorio. La segunda ecuación describe la variación del potencial gravitatorio, producto de los cambios de densidad. La tercera ecuación hace referencia a la conservación de la masa.

Se utiliza la relación constitutiva que se establece entre el incremento del esfuerzo y el incremento de la deformación, que está condicionada porque la frecuencia del rebote postglacial. Las consideraciones que se realizan llevan a pensar que admite comportamientos elásticos y viscosos. Los autores postulan una ecuación constitutiva cuya expresión es la siguiente:

$$\dot{\tau}_{ij}^{(\delta)} + \frac{\mu}{\eta} (\tau_{ij}^{(\delta)} - \frac{1}{3} \tau_{kk}^{(\delta)} \delta_{ij}) = (k - \frac{2}{3} \mu) \dot{\epsilon}_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \dot{\epsilon}_{ij}$$

siendo η la viscosidad cinemática, μ el módulo de elasticidad, κ el módulo que da cuenta de la variación del volumen en relación con los cambios de presión y δ_{ij} es el delta de Kronecker.

La ecuación representa un material que responde como un fluido que a altas frecuencias responde elásticamente y a bajas fluye como un fluido viscoso.

Una vez presentado el modelo, se establecen las condiciones de contorno en un apartado especial (10.2.1.3. Boundary Conditions) en el que se explicitan qué aproximaciones se realizan aunque esencialmente se refieren a las condiciones materiales (estructura y composición) que presenta la Tierra.

Si se establece que la Tierra inicialmente presentaba simetría esférica se simplifican las ecuaciones, lo que lleva a los autores a plantear las ecuaciones en coordenadas esféricas, utilizando armónicos esféricos.

Las soluciones para medios elásticos no se desarrollan y se exhiben las citas bibliográficas de los científicos que las desarrollaron. En cambio, dado que el rebote postglacial puede aproximarse a las soluciones viscoelásticas, en un apartado especial (10.2.1.6. Viscoelastic Solutions: Laplace-Transform Methods) se transforma el problema viscoelástico a un problema elástico equivalente aplicando la transformada de Laplace, cuya inversión permite obtener la solución analítica propuesta para el rebote postglacial.

Los autores introducen la ecuación que da cuenta del nivel del mar a fin de obtener soluciones realistas para el rebote postglacial, la descripción de la carga y los cambios producidos sobre el potencial gravitatorio. Se analizan los cambios en el nivel del mar de origen glacio-isostático, considerando su variación espacial, los requisitos para la solución del problema y la separación de variables. Antes de desarrollar las conclusiones se analizan los cambios en el potencial gravitatorio terrestre.

Las conclusiones que se presentan se basan en la evidencia referida al cambio del nivel del mar a lo largo de los márgenes continentales concluyendo que la VM exhibe una dependencia considerable con la profundidad.

Este modelo de dependencia de la VM con la profundidad es el que funciona a modo de insumo del modelo de convección global y se basa en tres cuestiones a saber:

- 1) el análisis del rebote postglacial en Gran Bretaña, cuyos datos restringen especialmente la estructura del manto superior.
- 2) un análisis preliminar del rebote postglacial en Fenoscandia
- 3) el análisis del cambio del nivel del mar en la región australiana.

Las conclusiones más robustas de esta solución son que en promedio el manto inferior presenta una viscosidad mayor que el manto superior en un factor del orden de 20 o 30 y que la VM superior varía lateralmente.

Si bien nosotros no hemos desarrollado con profundidad el aparato conceptual presentado por los autores, se percibe que a partir de este monográfico es posible sumergirse en el campo de investigación sobre esta temática, un objetivo muypreciado para introducir a un investigador novel en el tema.

5.3. El análisis estructural de L3

5.3.1 Macroestructura

a) El título

“Mantle Convection in the Earth and Planets” puede traducirse como “Convección mantélica en la Tierra y los planetas”. Se hace explícito que la convección en el manto es materia de estudio del libro aunque sin embargo no se restringe a la Tierra sino que se amplía hacia otros planetas de nuestro Sistema Solar.

b) Generalidades

El libro de texto es definido por sus autores en el prefacio como una monografía de investigación:

This book is primarily intended as a research monograph (Schubert *et al.*, 2001; Preface, pp: xiii).

El libro en su conjunto da cuenta de todos los aspectos de la convección en el manto terrestre, en los planetas y en algunos satélites. Sitúa la convección como el proceso más importante que ocurre en el manto, el que fija el ritmo evolutivo de la Tierra como un todo.

El libro está dirigido a estudiantes de postgrado de cursos de geofísica avanzada o física planetaria o bien como una referencia suplementaria de nivel de pregrado. Los autores sugieren el texto, también, como una revisión destinada a especialistas de otras áreas de las ciencias de la Tierra y/o planetarias (sismólogos, físicos tectónicos, geoquímicos, entre otros).

Los autores pertenecen a tres universidades diferentes de los EEUU. Son investigadores meritorios en geofísica, todos son miembros de la *American Geophysical Union*. Gerald Schubert y Donald Turcotte son autores de un clásico libro (Geodynamics) cuya primera edición (1982) iluminó diversos aspectos geológicos, geofísicos y geoquímicos a través de una síntesis alrededor de la tectónica de placas, sistematizando la enseñanza de aspectos disímiles unificados, muchos de los cuales se relacionan con aspectos geológicos de la mecánica de fluidos.

El libro se compone de 15 capítulos organizados en una única sección. A través de un índice temático y de un listado de publicaciones considerado literatura

relevante, facilita el acceso a los diferentes aspectos del estudio de la convección en el manto. Hay muchísimas ilustraciones, algunas en colores, provenientes de modelos numéricos sobre la convección y experimentos de laboratorio, entre otras.

A lo largo del texto se plantean una serie de preguntas intercaladas entre títulos y subtítulos al interior de los distintos capítulos. Estas preguntas tienden a presentar distintas problemáticas ligadas entre sí y a través de la convección en el manto. Algunas de estas preguntas persiguen el fin de presentar cuestiones abiertas o bien futuras líneas de investigación alrededor de variadas temáticas, muchas de las cuáles permanecen inexploradas.

A lo largo del texto se desarrolla esencialmente la TCM, principalmente en la Tierra pero teniendo por horizonte general al sistema planetario. Los autores arman su recorrido introduciendo al lector a través de un capítulo histórico que desemboca en la tectónica de placas, teoría que luego se desarrolla conceptualmente y sobre la cual se explicitan las relaciones conceptuales que la conectan con la convección en el manto. Al abordar la Tierra como un todo describen la estructura radial de la Tierra y sus heterogeneidades laterales, en especial a partir de los datos aportados por las tomografías sísmicas. El panorama de la Tierra se completa con los modelos térmicos y los mecanismos responsables del comportamiento viscoso del manto. El planteo de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento fluido es presentado en un capítulo especial y con bastante detalle. Se desarrollan, por una parte, algunas soluciones aproximadas que brindan los rasgos básicos del proceso convectivo y, por otra, se estudian los resultados obtenidos de los modelos numéricos. Se aborda separadamente la teoría de las plumas térmicas, dando un panorama del comportamiento de conjunto del planeta, una especie de instantánea del funcionamiento conjunto. Llegado a este punto, los autores desarrollan la perspectiva evolutiva y brindan un panorama geoquímico, a través de la historia térmica de la Tierra y la convección como mecanismo de enfriamiento planetario a gran escala. Sobre el final desarrollan una síntesis de la TCM que integra el conocimiento abordado a través de los capítulos anteriores.

5.3.2. Superestructura

5.3.2.1 Las secciones que estructuran el libro

El libro no se divide en secciones sino que se trata de una sucesión de 15 capítulos.

5.3.2.2 La descripción general de cada capítulo

Describiremos brevemente cada capítulo que presenta el libro, como hemos hecho con L1 y L2.

a) Capítulo 1 (Historical Background)

El capítulo desarrolla un recorrido histórico sobre la convección acudiendo al origen de las ideas relacionadas con ésta que surgieron a mediados del siglo XIX, como así también sobre las ideas acerca de la deriva continental. Los autores relevan los primeros estudios cuantitativos sobre la convección en el manto y la influencia del paleomagnetismo en el desarrollo de esta teoría. El capítulo concluye con el surgimiento de los conceptos de expansión del suelo oceánico y subducción.

b) Capítulo 2 (Plate Tectonics)

El capítulo presenta un desarrollo histórico, que continua al presentado en el capítulo anterior. Toma como punto de partida el consenso logrado alrededor de la tectónica de placas y su relación con la convección en el manto. Se destaca que, en 1967, Turcotte y Oxburgh desarrollaron la teoría de las bandas térmicas limítrofes y se la aplicaron al manto. Se desarrollan cualitativamente los procesos que integran la tectónica de placas. Se caracteriza a la litosfera desde tres perspectivas diferentes : mecánica, térmica y elástica. Se describen los márgenes acrecionales (dorsales meso-oceánicas), las fallas transformantes, la subducción y los puntos calientes asociados con la plumas térmicas. Se distinguen los continentes del suelo oceánico, se alude a su formación y se caracteriza el movimiento de las placas. Por último, se busca explicar qué fuerzas dirigen el movimiento de las placas y el ciclo de Wilson a lo largo de la evolución del planeta.

c) Capítulo 3 (Structure and composition of the mantle)

El capítulo es una revisión sobre la estructura y la composición del manto en relación con el estilo posible de convección y, a su vez, cómo determina éste dichas estructura y composición. Se analiza en primer término la estructura en su conjunto para luego desarrollar con algún detalle la descripción de la corteza –oceánica y continental-, el manto superior, la zona de transición, el manto inferior, la capa D” y el núcleo. Por último, se presentan posibles heterogeneidades laterales a través del análisis de la estructura tridimensional del manto.

d) Capítulo 4 (Mantle Temperatures and Thermodynamic Properties)

En este capítulo se relacionan, por un lado, los procesos de transferencia del calor (conducción – convección) con sus fuentes y, por otro, la temperatura implicada en los procesos subyacentes a la convección, en especial de los datos disponibles (dorsales oceánicas, flujo de calor superficial, la fusión parcial y la zona de baja velocidad de las ondas sísmicas, entre otros fenómenos). Por último, se analizan algunos parámetros termodinámicos (conductividad y difusión térmica, calor específico, expansión térmica, especialmente).

e) Capítulo 5 (Viscosity of the mantle)

Se describe inicialmente un panorama general de los aspectos que determinan el MVM (la isostasia, la viscoelasticidad, el rebote glacial, el geoide, la rotación terrestre y los resultados de los experimentos de laboratorio). Luego se estudian estos temas con cierto detalle: el ajuste isostático y algunos fenómenos relacionados con la VM (cambios en la duración del día terrestre, deriva polar, respuesta de cargas internas, etc.). Además, los autores presentan algunos procesos físicos que dan cuenta de las heterogeneidades de la estructura viscosa a través de la física de los procesos microscópicos y el cambio de escala temporal. Por último, se presentan posibles formas funcionales de la VM.

f) Capítulo 6 (Basic Equations)

Este capítulo se refiere exclusivamente al planteo de una serie de ecuaciones del campo de la física, especialmente de la mecánica de fluidos y, en general, de otras áreas útiles al desarrollo de la convección en el manto.

Se analiza la conservación de la masa, del momento y de la energía de un fluido continuo, para luego plantear una ecuación de estado. Las ecuaciones se plantean en coordenadas cartesianas, cilíndricas y esféricas.

g) Capítulo 7 (Linear Stability)

En este capítulo se analiza cómo comienza el proceso de convección, cómo se produce la desestabilización que conduce a la convección, explicando cómo se transfiere calor a la vez que se produce el movimiento material.

Se modela el comienzo de la convección como un problema en el que hay transferencia de calor en el seno de un líquido que se encuentra en un estado de estabilidad básico inmóvil (transferencia por radiación o conducción). Se analiza qué ocurre si se somete al líquido a una perturbación de la temperatura o de la velocidad, se determinan cuáles son las condiciones bajo las cuales las perturbaciones decaen o se amplifican. Se retoman y se resignifican las ecuaciones básicas de conservación de la masa, el momento y la energía. Se analizan soluciones planas y esféricas del problema planteado.

h) Capítulo 8 (Approximate Solutions)

Se encaran en este capítulo las ecuaciones que gobiernan los problemas de convección térmica, que resultan ser de una complejidad tal que no es posible hallar sus soluciones analíticas. Las soluciones presentadas durante este capítulo consideran los términos no lineales, a diferencia del capítulo anterior en el que eran despreciados, haciendo ciertas aproximaciones en relación con las condiciones de contorno de los problemas de convección que se estudian. Se configuran las ecuaciones de Lorentz a partir de la consideración de los términos de orden menor, cuya solución conduce a la desestabilización del sistema de estudio, dando lugar a un sistema caótico. Es decir, que durante el desarrollo del capítulo se pretende analizar las condiciones bajo las cuales el manto se vuelve un sistema caótico.

i) Capítulo 9 (Calculations of Convection in Two Dimensions)

La convección es un proceso tridimensional cuya modelización numérica exige la resolución de las ecuaciones presentadas durante los capítulos anteriores. Tal como expresaron los autores durante el capítulo anterior, la resolución de tal sistema se

puede basar en algún tipo de aproximación analítica o bien en la modelización numérica, proceso cuyo éxito está asociado con la capacidad de las computadoras al procesar el sistema de ecuaciones. Este último aspecto determina las limitaciones de la tridimensionalidad de los modelos. Por ello, suelen estudiarse modelos bidimensionales en los que se relevan diferentes aspectos parciales del fenómeno convectivo.

A través del desarrollo del capítulo los autores explican cómo se comporta el manto cuando convecta, desde la mirada de la mecánica de los fluidos. Se describen los resultados de correr diferentes modelos numéricos bidimensionales que dan cuenta de diferentes aspectos de la convección. Se inicia con el tratamiento de la convección suponiéndola constante en el tiempo y considerando *números de Rayleigh* elevados. Luego, se estudia cómo influyen las fuentes internas de calor y su dependencia temporal, los efectos de poseer una banda térmica limítrofe formada por placas rígidas -a diferencia de la convección en los fluidos--, el rol de los cambios de fase y de los cambios químicos, los efectos de la temperatura y la presión en la viscosidad, la influencia de la temperatura en la viscosidad en relación con el movimiento de las losas oceánicas, la interacción de las plumas térmicas con el cambio de fase endotérmico, las viscosidades no lineales o no newtonianas, la dependencia de los factores termodinámicos y de las propiedades del transporte material con la profundidad, la influencia de la compresibilidad y la disipación viscosa, la influencia de los continentes, la ocurrencia de convección al interior de la capa D”.

j) Capítulo 10 (Numerical Models of Three-dimensional Convection)

Los modelos bidimensionales son útiles para explorar procesos complejos y efectos no lineales del comportamiento material. Pero éstos no pueden simular la forma en la que ocurre la convección cuya tridimensionalidad es un factor sumamente relevante, pues las principales características (losas planas, plumas cilíndricas y movimientos toroidales, entre los más importantes). Se evalúan modelos tridimensionales de geometría plana y esférica. Durante el desarrollo del capítulo se exhiben representaciones gráficas de diferentes modelos tridimensionales y se analizan los modelos de convección global y estratificada, como así también el efecto de posibles avalanchas en el interior del manto, la dependencia de la viscosidad con la profundidad, de la compresibilidad con la transferencia de energía, el comportamiento reológico de

las placas y, por último se presentan modelos tridimensionales de convección bajo las dorsales mesoocéánicas y los continentes.

k) Capítulo 11 (Hot Spots and Mantle Plumes)

Durante el desarrollo del capítulo los autores presentan la idea de “punto caliente”, caracterizándolo, dando lugar a distintas interpretaciones al respecto y dando un panorama de su ubicación teórica. Se asocia la existencia de las plumas térmicas con los puntos calientes pero se señalan las limitaciones de esta correspondencia.

Se estudian las características más importantes de los puntos calientes (hot spots tracks, hot spots swells, hot spots basalts, etc.) Además, se encara el proceso de formación de las plumas térmicas y sus características más importantes.

l) Capítulo 12 (Chemical Geodynamics)

En este capítulo se discuten las familias de isótopos radioactivos que se encuentran en las rocas volcánicas, su proporción relativa en la atmósfera y sus influencias sobre la convección en el manto. Para ello, los autores presentan un relevamiento somero de los reservorios geoquímicos (núcleo, manto, corteza oceánica, corteza continental, océanos y atmósfera) y discuten modelos simples de evolución geoquímica planetaria. Se desarrollan los sistemas isotópicos U/Th/Pb y He/Ar/Xe y se presentan los resultados más sobresalientes de la sistemática isotópica.

ll) Capítulo 13 (Thermal History of the Earth)

El desarrollo del capítulo considera a la convección en el manto como el principal mecanismo a través del cual se remueve el calor acumulado en el interior. Se introduce la evolución térmica del planeta como consecuencia del balance entre las fuentes de energía interna que producen calor y su remoción a través de la convección. Durante el desarrollo del capítulo los autores consideran diferentes modelos de evolución térmica de la Tierra, desde un modelo simple hasta otros de mayor complejidad. Se analizan los modelos de convección estratificada en relación con la evolución térmica de la Tierra entre otros fenómenos relevantes.

m) Capítulo 14 (Convection in the Interiors of Solid Planets and Moons)

A través de este capítulo se discute el rol de la convección en el sistema solar, en general, y en los planetas sólidos, en particular. Se considera la convección en el

manto no sólo como el mecanismo que controla el enfriamiento de la Tierra, sino que también regula la evolución térmica de los demás planetas interiores del sistema solar (Mercurio, Venus y Marte, la Luna y los satélites de los planetas exteriores). Se destaca que la Tierra es el único planeta en el que la convección ocurre asociada con la tectónica de placas (en apariencia los otros planetas no poseen placas móviles en su superficie). La posible ocurrencia de la convección en el interior de estos planetas se basa en que la concentración de fuentes de calor radioactivas en su interior debe transferir su calor interno hacia la superficie. El capítulo desarrolla con cierto detalle la situación para Venus, Marte, la Luna, Io, Mercurio, Europa, Ganímedes y Calisto.

n) Capítulo 15 (Nature of Convection in the Mantle)

En el desarrollo de este capítulo se ofrece una síntesis sobre la convección en el manto a partir de: una amplia gama de evidencias de diversos orígenes (geológicas, geofísicas y geoquímicas), datos de las propiedades materiales provenientes de experimentos de laboratorio y modelos numéricos, además de la teoría de la convección térmica.

Se estudian las formas de descenso y ascenso de material a través del interior del manto, remitiendo a las bandas térmicas limítrofes, la circulación general y la dependencia con el tiempo. Además se analizan los algunos efectos especiales en la convección (las transformaciones de fase del estado sólido, la variación de la viscosidad con la temperatura, la presión y la profundidad, entre otros). Por último, se desarrollan algunos aspectos en relación con las placas y los continentes y se ofrece un pantallazo comparativo de los posibles modos de convección de los distintos planetas.

5.3.3 Microestructura

5.3.3.1 Generalidades

Hemos visto a través de la macroestructura y la superestructura que el libro no posee secciones, es un continuo de capítulos que se suceden unos a otros. Una característica particular que atraviesa a todos los capítulos es que los autores intercalan preguntas a medida que se va desarrollando el texto. Algunas veces las preguntas se ubican al comienzo de un apartado pero otras entre párrafos, más allá de la separación

natural que hay entre los distintos apartados. Las preguntas se destacan a través de un recuadro que las enmarca como modo de presentación. Un listado completo de estas preguntas aparece luego de la introducción del último capítulo en una tabla (ver Anexo de Figuras: Table 15.1 Major questions Concerning Mantle Convection). La numeración de las preguntas permite ubicar en qué capítulo del libro se encuentran desarrolladas y, por consiguiente, dónde hallar sus respuestas “ampliadas”.

El texto cuenta, además, con un índice temático muy completo, una lista extensa de referencias bibliográficas relevantes sobre las temáticas que se desarrollan a lo largo del libro, una tabla de variables que brinda información relevante para su identificación (símbolo utilizado para denominar la variable, su unidad de medida, su definición, la ecuación en la que aparece y la página) y una gran variedad de ilustraciones – muchas de ellas a color.

Los procesos son explicados cualitativamente pero también se presentan desarrollos formales profundos en la formulación de los modelos, los sistemas de ecuaciones relacionados con éstos y sus posibles formas de resolución.

Al haber seleccionado como CE la VM y en función de los niveles estructurales anteriores estamos en condiciones de armar el recorrido que nos permitirá describir la microestructura de L3.

Analizaremos el capítulo 15 (Chapter 15: Nature of Convection in the Mantle) por ser el que presenta el panorama global sobre la TCM y allí buscaremos las relaciones extensionales que conectan al modelo general con la VM. Elegimos como de buscar estas relaciones extensionales abordar la tabla de preguntas que se presenta en el capítulo 15. Seleccionaremos preguntas que involucran la VM, buscando su respuesta en el capítulo 15, por un lado, y respuestas que refieren a otros capítulos específicos en los que se amplía o desarrolla la temática, por otro.

5.3.3.2 Niveles semánticos de relación de la viscosidad del manto

5.3.3.2.1 Supraordinación semántica: vínculos conceptuales del concepto estructurante con el modelo de convección

a) Vínculo conceptual entre el concepto estructurante y el modelo de convección

El capítulo 15 presenta una perspectiva teórica integrada sobre el MCM. Este capítulo se organiza sobre la base un listado de preguntas que los autores consideran fundamentales.

Throughout this book we have listed major questions concerning mantle convection and the many related subjects we have considered. A summary of these questions is provided in Table 15.1 (Schubert *et al.*, 2001; pp: 767)

Tal como adelantáramos trabajaremos sobre las preguntas que vinculan el MCM con la VM. En primer lugar, haremos una selección de las preguntas relevantes y luego desarrollaremos la respuesta a cada pregunta desde la perspectiva que despliegan los autores en el capítulo 15:

5.1 Is there a low-viscosity asthenosphere beneath some plates? What is the viscosity of the asthenospheric material?

5.4 What is the difference between the viscosity of the upper mantle and the viscosity of the lower mantle?

5.7 Does the mantle behave like a Newtonian or a non-Newtonian fluid on geological time scales?

5.8 Are there changes in viscosity associated with the solid-solid phase changes in the transition zone?

9.11 How is mantle convection influenced by the power-law viscosity of rocks?

9.13 What are the effects of viscous heating on mantle dynamics?

10.8 Is an increase of viscosity with depth responsible for the long-wavelength dominance of the Earth's geoid and mantle seismic velocity heterogeneity?

10.10 How important is viscous heating in the Earth's mantle?

Vale la pena destacar que varias preguntas no aluden directamente a la VM pero las temáticas que abordan están íntimamente relacionadas con ésta o bien dan lugar a pensar que están vinculadas aunque a veces no sea el caso. Describiremos las respuestas que se dan en este capítulo a cada una de las preguntas seleccionadas y las referencias que las conectan con el resto del libro.

5.1 Is there a low-viscosity asthenosphere beneath some plates? What is the viscosity of the asthenospheric material?

Esta pregunta se desarrolla en el apartado 15.5 (The General Circulation) a través del cual se concibe la convección como proceso. Desde esta perspectiva, los ascensos y descensos flotacionales, y las estructuras de las bandas térmicas limítrofes se combinan en la forma general de circulación que ocurre en el manto y sobre la que se postula que tiene componentes profundas y componentes superficiales, cada tipo con sus características particulares en relación con las condiciones dinámicas que le afectan en el lugar del manto en el que ocurran.

En lo que a circulación superficial se refiere, la existencia de la astenosfera o del llamado *canal de baja viscosidad*, se explica en función del flujo que emana de las dorsales meso-oceánicas, bajo las que se concentrarían los movimientos verticales, a unos 200 o 300 km de profundidad.

Se hace hincapié en que la convección no ocurre en forma de celda, es decir, a través de la asociación de un flujo descendente con un flujo ascendente en la circulación. Se postula que el origen del material emanado por las dorsales proviene de los primeros 200 o 300 km del manto, que no está vinculado con el descenso de las placas que, en principio, alcanzarían profundidades mayores. Los autores justifican esta última afirmación en función de las tomografías sísmicas.

The existence of the low-viscosity asthenosphere beneath the lithosphere explains how ridge imposed upwellings can be largely confined to the upper few hundred kilometers of the mantle (Question 5.1). The return flow to the ridge does not consist of closed cells in the upper mantle and does not directly involve the descending slabs, which penetrate to greater depths (Schubert *et al.*, 2001; pp: 784).

5.4 What is the difference between the viscosity of the upper mantle and the viscosity of the lower mantle?

Esta pregunta se sitúa en el (sub)apartado 15.7.2 (Variable viscosity: Temperature, Pressure, Depth, dependiente a su vez del apartado 15.7 Special Effects in Mantle Convection).

Los autores hacen referencia a que un aumento de la VM inferior respecto del manto superior afectaría el descenso y la deformación de las losas subductantes. Si el incremento de viscosidad entre el manto superior e inferior fuera grande, la convección sería menos eficiente como mecanismo que permitiría mezclar composicionalmente el manto, lo que implica la existencia de reservas de manto primitivo que perdurarían a lo largo del tiempo. Además, un gran incremento en la viscosidad influiría sobre la relativa inmovilidad de las plumas térmicas.

Por otra parte, a la hora de fijar postura en relación con la diferencia entre la VM superior e inferior, los autores hacen referencia a que existe consenso en la comunidad científica en asignar una mayor viscosidad al manto inferior aunque también señalan que el consenso se quiebra a la hora de cuantificar la diferencia. Estas desavenencias se fundarían en las diferencias de los datos provenientes del rebote postglacial y las anomalías del geoide.

The present consensus about mantle viscosity is that the lower mantle is more viscous than the upper mantle, but the amount of the increase and other details about the variation of mantle viscosity with depth are uncertain (Question 5.4), (Schubert *et al.*, 2001; pp: 789).

Claramente, se presenta como poco establecida la diferencia de viscosidad entre ambos mantos, aunque si indagamos un poco más profundamente a lo largo del texto vemos que los autores acotan la diferencia de viscosidad entre el manto superior e inferior entre 3 y 30 veces:

(...) it is possible to draw some conclusions. First, the upper mantle is less viscous than the lower mantle, on average. The difference in average viscosity may only be a factor of 3, or alternatively it may be as much as 30. In either case the difference is substantial for mantle convection processes (Schubert, et al., 2001; pp: 240).

Los autores advierten, además, sobre la relevancia de la VM para la convección.

5.7 Does the mantle behave like a Newtonian or a non-Newtonian fluid on geological time scales?

Esta pregunta plantea cómo es el comportamiento viscoso del manto a escala de tiempo geológico. La respuesta a esta cuestión se desarrolla en el apartado 15.7.3. (Nonlinear Viscosity), en el que se relaciona la VM con los mecanismos de deformación intracristalina (diffusion creep y dislocation creep). Si se trata del mecanismo de difusión el régimen será lineal y, en el otro caso, el régimen será no-lineal.

An important question is whether the mantle viscosity is Newtonian (linear) or non-Newtonian (nonlinear) Question 5.7. This is directly related to the question of whether the dominant mechanism for solid-state creep in the mantle is diffusion creep or dislocation creep (Schubert *et al.*, 2001; pp: 789).

Se citan los datos que sustentan una y otra hipótesis: los provenientes del rebote postglacial apoyan la hipótesis de una reología lineal. En cambio, los experimentos de laboratorio sugieren que se trata de una reología no lineal. Es decir, que la pregunta no presenta una respuesta contundente sino que se muestran las posibilidades de un comportamiento u otro en función de los datos.

También los autores citan la dependencia de la viscosidad con la temperatura y la presión en relación con los modelos numéricos aunque no brindan una conclusión contundente sobre la influencia de estos factores en el MVM.

5.8 Are there changes in viscosity associated with the solid-solid phase changes in the transition zone?

Esta pregunta asocia las variaciones de viscosidad con los cambios de fase que ocurren en la zona de transición. Un apartado particular, el 15.7.1 (Solid-state Phase Transformations) trabaja sobre el tema. Concretamente, la pregunta apunta a relacionar el cambio de fase endotérmico de espinela a perovskita con la variación de la viscosidad que se postula que existe entre el manto superior e inferior.

El incremento de VM inferior puede producirse en profundidades cercanas a los 660 km, debido a la distorsión que se produce cuando la losa subduce, lo que se traduce en la posibilidad de que no sólo la naturaleza endotérmica de los cambios de fase tenga influencia sobre los cambios de viscosidad.

A viscosity increase from the upper mantle to the lower mantle could also account for slab distortion around 660km depth so it is not certain that the endothermic nature of spinel-perovskite phase change is the entire explanation of the seismic observations (Schubert *et al.*, 2001; pp788).

Es decir, que se señala a la temperatura como una variable que permite explicar los datos.

9.11 How is mantle convection influenced by the power-law viscosity of rocks?

La pregunta apunta a considerar cómo afecta al MCM la influencia del esfuerzo cuando se modela la VM como una función *no lineal*, cuestión ésta que se desarrolla en el apartado 15.7.3 (Nonlinear Viscosity). En éste se evalúa cómo influyen, simultáneamente, la temperatura, la presión y el esfuerzo en el modelo de la VM. El efecto del esfuerzo es moderar la influencia que ejercen la temperatura y la presión.

Two-dimensional Cartesian models of convection with non-Newtonian viscosity emphasize the importance of simultaneously accounting for the dependence of viscosity on temperature and pressure when assessing effects of the stress dependence of viscosity on convection (Question 9.11), (Schubert *et al.*, 2001; pp: 789).

9.13 What are the effects of viscous heating on mantle dynamics?

Esta pregunta está relacionada con la viscosidad pero no específicamente con el MVM sino que se trata de un proceso local, la disipación viscosa. Su influencia se acota a estructuras de pequeña escala. En especial, la disipación viscosa ocurre en la banda térmica límite superior del manto, donde las plumas encuentran un tope, modificando la viscosidad local. Este proceso influye en la determinación del espesor de la litosfera. Esta pregunta se responde en el apartado 15.7.5 (Viscous Dissipation).

10.8 Is an increase of viscosity with depth responsible for the long-wavelength dominance of the Earth's geoid and mantle seismic velocity heterogeneity?

Esta pregunta, al igual que la 5.4 y 5.8, se responde en el apartado 15.7.2 (Variable Viscosity: Temperature, Pressure, Depth) haciendo referencia al rebote postglacial como modo de justificar un aumento de la viscosidad cuando se pasa del manto superior al inferior.

Studies of postglacial rebound data tend to indicate some viscosity increase with depth in the mantle. Whereas inversions of geoid data favor a larger increase (Question 10.8), (Schubert *et al.*, 2001; pp: 789).

En cambio, se atribuye a las anomalías del geoide la justificación de un gran aumento de la viscosidad con la profundidad.

10.10 How important is viscous heating in the Earth's mantle?

Esta pregunta, al igual que la 9.13 se refiere al proceso de disipación viscosa y su respuesta se ubica en el apartado 15.1 (Introduction). La respuesta refiere a los procesos locales asociados con las fuentes de calor de la Tierra.

Locally, heating due to viscous dissipation may be important (Question 10.10.) (Schubert *et al.*, 2001; pp: 772).

En especial, la radioactividad como fuente de calor modifica la viscosidad en forma local a través de la disipación viscosa, un fenómeno de otro orden de magnitud espacial que el asociado con la dinámica del manto en su conjunto.

b) Relaciones extensionales entre el modelo de convección en el manto y la viscosidad del manto

La selección de preguntas y respuestas desarrolladas en el apartado anterior se estructuran entre sí a través de la relación conceptual entre la VM y el MCM. Veamos cómo se

La primer pregunta refiere a la viscosidad de la astenosfera (5.1 *Is there a low-viscosity asthenosphere beneath some plates? What is the viscosity of the asthenospheric material?*). La astenosfera es pensada por los autores como un canal de baja viscosidad, debajo del cual se supone que se produce un aumento importante de la misma. La existencia de la astenosfera lleva a inferir que la respuesta de la litosfera frente al rebote postglacial es muy diferente si se piensa en este canal de baja viscosidad o en un manto con una viscosidad aproximadamente uniforme.

Las preguntas 5.4, 5.7 y 9.11 (5.4 *What is the difference between the viscosity of the upper mantle and the viscosity of the lower mantle?*, 5.7 *Does the mantle behave like a Newtonian or a non-Newtonian fluid on geological time scales?* y 9.11 *How is mantle convection influenced by the power-law viscosity of rocks?*) explicitan algunas cuestiones capitales que influyen sobre el MCM: en primer lugar, establecer la diferencia entre la VM superior e inferior; en segundo, evaluar la relación entre el esfuerzo y la deformación a largo plazo, es decir, si se trata o no de un fluido viscoso a escala de tiempo geológico. Por último, evaluar la influencia de la presión, la temperatura y el esfuerzo en el MVM.

La pregunta 10.8 (*Is an increase of viscosity with depth responsible for the long-wavelength dominance of the Earth's geoid and mantle seismic velocity heterogeneity?*) vincula el MVM con otros fenómenos geológicos que hacen de soporte empírico al modelo de convección (el rebote post-glacial y las anomalías del geoide).

Se postula un MVM a gran escala del que venimos ocupándonos pero sin embargo, la viscosidad se involucra en otros modelos que dan cuenta de otros fenómenos. Entre ellos, los autores consideran el modelo de disipación viscosa. En la pregunta 9.13 (*What are the effects of viscous heating on mantle dynamics?*) los autores se ocupan de un fenómeno que involucra a la viscosidad en un entorno específico, una interfase, por ejemplo.

El MVM al que adhieren los autores es estratificado, manto superior e inferior una diferencia del orden de 30 entre sus viscosidades. Asumen que éste podría ser un valor máximo ubicando dicha diferencia de viscosidad entre 3 y 30 veces. No se identifica un único valor, se presentan diferentes modelos que se justifican desde perspectivas empíricas diferentes. En el texto se publica una tabla, que reproducimos en la Figura 12, que muestra los valores que diferentes investigadores ponderan sobre este tema.

Table 5.2. *Two-layer Mantle Viscosity Models*

Data	Lithosphere Thickness (km)	Upper Mantle Viscosity (Pa s)	Lower Mantle Viscosity (Pa s)
Postglacial rebound ¹	120	1×10^{21}	4.5×10^{21}
Geoid ²	100	2×10^{19}	6×10^{21}
Geoid and plate velocities ³	100	2.6×10^{20}	1.3×10^{22}
Continental margins ⁴	75	2×10^{20}	7.5×10^{21}
Ocean Islands ⁵	50	1×10^{20}	1×10^{22}

¹Mitrovica and Peltier (1991), ²Hager and Richards (1989), ³Ricard and Vigny (1989), ⁴Lambeck and Nakada (1990), ⁵Nakada and Lambeck (1989).

Figura 12: Valores de la viscosidad del manto superior y manto inferior propuestos por diferentes autores.

Los valores de la tabla responden a diferentes autores y a diferentes fenómenos que arrojan distintos datos.

5.1.3.3 Subordinación semántica: contexto de sustentación conceptual de la viscosidad del manto

Los autores manifiestan la centralidad de la VM en el modelo de convección definiendo un capítulo dedicado al tema. Se trata del capítulo 5 (Viscosity of the Mantle). Además, aunque en forma un poco solapada, durante el desarrollo del capítulo 6 (Basic Equations) se plantean los aspectos formales del MVM a partir del planteo de las ecuaciones que se asocian con dicho modelo. Además, existen referencias explícitas que invitan al lector a transitar el soporte matemático en el capítulo 6.

El capítulo 5 plantea el análisis de fenómenos y procesos que permiten inferir la VM. Se inicia con una introducción que resume los factores que brindan información

sobre la construcción del MVM. Algunos de ellos los desarrollamos bajo la subordinación semántica, los que refieren a la construcción de los modelos teóricos seleccionados por los autores que subyacen al MVM. Haremos una breve descripción del capítulo a través de su estructura.

Se presenta un primer apartado (5.1 Introduction) que, a su vez, desarrolla 6 subapartados en los que se presenta un panorama teórico y empírico general que aportan a la construcción del MVM (5.1.1 Isostasy and Flow, 5.1.2 Viscoelasticity, 5.1.3 Postglacial Rebound, 5.1.4 Mantle Viscosity and the Geoid, 5.1.5 Mantle Viscosity and Earth Rotation, 5.1.6 Laboratory Experiments). Luego se trabaja sobre los ajustes isostáticos globales (5.2 Global Isostatic Adjustment) en el que se desarrollan distintos modelos que dan cuenta la deformación del manto por efecto de una carga superficial (5.2.1 Deformation of the Whole Mantle by a Surface Load). Por una parte, se explican los modelos plano y esférico (5.2.1.1 Half-space Model, 5.2.1.2 Spherical Shell Model) y, por otra, el tiempo de relajación postglacial y los valores que se infieren a partir de éstos sobre la VM (5.2.1.3 Postglacial Relaxation Time and Inferred Mantle Viscosity). Además, bajo la órbita de los ajustes globales isostáticos se describen los datos provenientes de la historia de la glaciación y el cambio del nivel del mar (5.2.2 Ice Load Histories and Postglacial Sea Levels) como así también las evidencias que sugieren la existencia de la astenósfera como un canal de baja viscosidad (5.2.3 Evidence for a Low-viscosity Channel). Los apartados siguientes (5.3 Changes in the Length of Day, 5.4 True Polar Wander, 5.5 Response to Internal Loads, 5.6 Incorporation of Surface Plate Motion, 5.7 Application of Inverse Methods, 5.8 Summary of Radial Viscosity Structure, 5.9 Physics of Mantle Creep y 5.10 Viscosity Functions) desarrollan con mayor nivel de profundidad los fenómenos y procesos descritos en la introducción.

El capítulo 6 desarrolla formulo de nivel medio y avanzado que representa los diferentes aspectos formales del MVM. Así, los modelos se presentan con diferentes niveles de formulación, desde un nivel cualitativo hasta un nivel operacional avanzado.

Haremos una selección de apartados y subapartados de los capítulos 5 y 6 en función de mostrar los rasgos más sobresalientes del sustento conceptual de la VM que proponen los autores.

b) Descripción conceptual de la viscosidad del manto

El enfoque que proponen los autores para abordar el MVM no desarrolla los modelos físicos subyacentes sino que parte de suponer que se conocen los conceptos básicos de la mecánica de fluidos. Así, se desarrolla un modelo viscoelástico simple. Los autores presentan un modelo general del comportamiento del flujo del manto que lo aproxima a un fluido viscoso a escala de tiempo geológico y como un sólido elástico a escalas temporales menores.

We first consider a simple model for a material that behaves as an elastic solid on short time scales and as a fluid on long times scales (Schubert *et al.*, 2001; pp: 212).

Los autores analizan el modelo físico que da cuenta del comportamiento de un sólido elástico. Este planteo presupone que el manto se comporta como un fluido viscoso lineal aunque también abre la posibilidad de que no responda a este modelo sino que presente una reología no lineal

Los autores describen cualitativamente y con suficiente detalle la física de los mecanismos de deformación de los sólidos cristalinos (5.9 Physics of Mantle Creep) que se supone que fluyen muy pero muy lentamente. Se exponen los mecanismos de deformación cristalina conocidos como difusión y dislocación. Cada uno de ellos se concibe a través de una explicación cualitativa sustentada en un esquema que ilustra los mecanismos en un cristal.

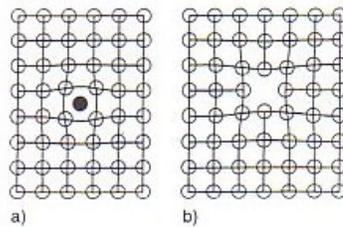


Figura 13: Esquema de defectos de los cristales (un átomo extra o una vacancia)

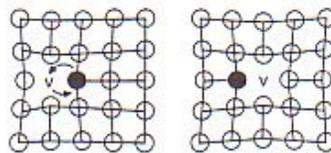


Figura 14: Esquema del movimiento de una vacancia

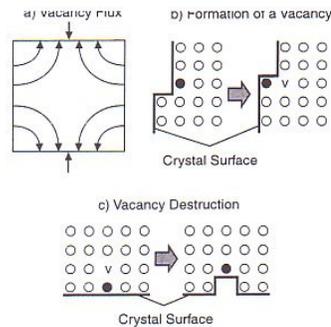


Figura 15: Esquema del mecanismo de deformación por difusión

El modelo de sólido elástico se explica matemáticamente, como describiremos a continuación.

Se propone una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación

$$e_0 = \frac{\tau}{E}$$

Siendo e la deformación, τ el esfuerzo y E el módulo de Young

Se asume que el fluido se comporta como un fluido Newtoniano y se plantea la relación reológica fundamental que involucra a la viscosidad (μ).

$$\frac{1}{E} \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{2\mu} \tau = \frac{de}{dt}$$

Si la reología es no lineal, la relación entre el esfuerzo y la deformación:

$$\frac{de}{dt} = A \tau^n$$

siendo A la constante reológica. Si $n = 1$ se trata de un fluido viscoso. Existen mecanismos alternativos para el comportamiento fluido de un sólido cristalino si se aproxima $n \sim 3$.

Respecto de los mecanismos cristalinos de deformación sólo consideraremos el caso de la difusión, cuyo coeficiente D se expresa como

$$D = D_0 e^{\left[\frac{-(E^* + pV^*)}{RT} \right]}$$

dónde E^* es la energía de activación por mol, V^* es el volumen de activación por mol, R es la constante universal de los gases y D_0 es un factor que da cuenta de la frecuencia. La energía de activación E^* es la suma de la energía de formación de una vacancia y la energía que previene la migración de un átomo de una vacancia adyacente, y el término pV^* tiene en cuenta el efecto de la presión en reducir el número de vacancias y el incremento de la energía que previene dicha migración. La dependencia exponencial de la temperatura se apoya en la distribución estadística de Maxwell-Boltzman de energías atómicas.

Por otra parte (5.10 Viscosity Functions), se extienden al espacio tridimensional las formas funcionales de la viscosidad para ambos tipos de deformación. Para ello se plantea la relación entre la tasa de deformación (\dot{e}_{ij}) y el esfuerzo deviatorico (τ_{ij}). Seguimos el mismo criterio de selección del mecanismo de difusión para exponer el formuleo que proponen los autores.

$$\dot{e}_{ij} = \frac{1}{B} \left(\frac{\tau}{\mu} \right)^{n-1} e^{\left(-\frac{E^* + pV}{RT} \right) \sigma_{ij}}$$

$$\text{siendo } B = \left(\frac{A}{\mu} \right)^{-1} \left(\frac{b}{d} \right)^{-1}$$

El último de los capítulos introductorios (6. Basic Equations) es el que remite a la estructura formal del MVM. En éste se desarrollan las ecuaciones físicas básicas de los aspectos más relevantes y generales de la convección en el manto a partir de las siguientes figuras.

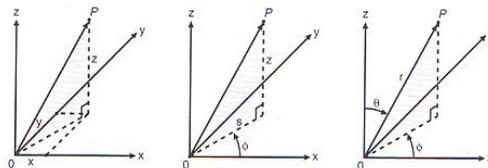


Figura 16: Gráficos de coordenadas cartesianas, esféricas y cilíndricas

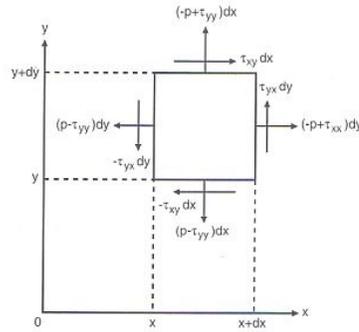


Figura 17: Diagrama de fuerzas que actúan en el plano xy

Los autores presentan las ecuaciones que surgen de planteos básicos de los modelos físicos (la conservación de la masa, del momento y de la energía, por ejemplo), utilizando diferentes coordenadas (cartesianas, esféricas y cilíndricas) con nivel matemático de referencia que podemos evaluar como próximo al cálculo diferencial avanzado. Los autores presuponen que los lectores tienen conocimientos básicos de mecánica clásica, mecánica de fluidos y termodinámica. En especial, el flujo se describe a partir de ecuaciones básicas que los autores remiten a buscar en un clásico libro de mecánica de fluidos, en el que se enseñan las ecuaciones diferenciales del flujo en medios continuos.

In order to solve problems in fluid mechanics, it is necessary to solve the applicable continuum partial differential equations. For details of the derivations of the basic equations the reader is referred to Batchelor (1967) (Schubert *et al.*, 2001; pp: 251).

Se plantea el balance de fuerzas sobre un elemento de volumen de un fluido a fin de establecer la ecuación de la conservación del momento a partir de la segunda ley de Newton.

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i$$

x_i vector posición, t tiempo, ρ densidad del fluido, u_i velocidad del fluido, p presión, τ_{ij} esfuerzo deviatórico (tensor), dA_i área infinitesimal y $p dA_i$ fuerza asociada con la presión

En el desarrollo de este apartado (6.4 Conservation of Momentum) se explica que las fuerzas asociadas con el esfuerzo deviatorico son fuerzas por unidad de área; las que actúan paralelas a la superficie se conocen como esfuerzo de cizalla.

Simbólicamente:

τ_{xx} y τ_{yy} son las componentes del esfuerzo deviatorico normal

τ_{xy} y τ_{yx} son las componentes del esfuerzo deviatorico de cizalla

La fuerza que actúa sobre una superficie infinitesimal dA_j se calcula como $\tau_{ij}dA_j$

Además, se hace referencia a la simetría del tensor, es decir que

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}$$

Por último se desarrollan las ecuaciones para cada dimensión.

$$\rho\left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\tau_{xy}}{\partial y}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\tau_{xy}}{\partial x} + \rho g$$

Tal como surge de observar el gráfico (Ver Figura 6.2) se trabaja en dos dimensiones pero se establece que en un apartado posterior (6.14) se generaliza la ecuación a tres dimensiones y en coordenadas cartesianas, esféricas y cilíndricas.

5.3.3.2.3 Coordinación semántica: problemas empíricos asociados con la viscosidad del manto

a) Contexto introductorio del modelo del rebote postglacial

Durante el capítulo 5 se desarrollan una serie de apartados y subapartados en los que los autores analizan el problema general de ajustes isostáticos (5.2 Global Isostatic Adjustment) a partir de revisar los cambios de nivel del mar asociados con los períodos de glaciación y deglaciación que ocurrieron en los últimos dos millones de años.

Por otra parte, (5.3 Changes in the Length of Day) se analizan los procesos que cambian el momento de inercia del planeta en el tiempo debido a la redistribución del agua en los procesos de glaciación y deglaciación. Los cambios en la distribución de la masa modifican el spin de la Tierra, lo que interfiere en la duración del día terrestre. Otro ajuste, además de la longitud del día, se produce en la orientación del eje de rotación de la Tierra, tema que se desarrolla en un apartado especial (5.4 True Polar Wander).

Se presenta, además, otro método experimental de determinación de la VM (5.5 Response to Internal Loads), evaluando la deformación de la superficie terrestre frente a la existencia de una anomalía en la densidad en el manto. Se consideran un modelo estático y dos modelos dinámicos que difieren en la estratificación de la densidad.

Se estudia la influencia de la movilidad de las placas en los modelos de VM con densidad estratificada (5.6 Incorporation of Surface Plate Motion). También se aplica un método específico, el *método inverso*, a fin de ajustar los datos existentes en varios estudios sobre la VM (5.7 Application of Inverse Methods), con la intención de generar posibles funciones que den cuenta de la VM, concluyendo que en todos los modelos la viscosidad en la zona de transición es baja y crece entre los 660 y los 1200 km de profundidad.

El MVM se caracteriza (5.8 Summary of Radial Viscosity Structure) por postular que en promedio la diferencia entre la VM superior y la del manto inferior oscila entre 3 y 30. Es decir, que la viscosidad del manto inferior es al menos 3 veces mayor que la del superior y, a lo sumo, podría ser 30 veces mayor. Los extremos de esta acotación de la VM producen modelos de convección muy diferentes, como ya hemos visto.

Siguiendo la línea de análisis de los libros anteriores describiremos qué se enseña en relación con el fenómeno conocido como rebote postglacial.

b) Descripción conceptual del modelo de rebote postglacial

Los autores del texto desarrollan este modelo en el marco del apartado general de ajustes isostáticos (5.2 Global Isostatic Adjustment) que refiere a las deformaciones sobre la superficie terrestre producidas por una sobrecarga que actúa un determinado tiempo. El modo en que la superficie cambia de forma dependerá del tiempo durante el que actúe la sobrecarga y de la historia de su distribución espacial, pero también de la VM.

En este esquema, (ver Figura 18) se explica el rebote postglacial como fenómeno que aporta datos sobre la VM, se desarrolla como un subapartado especial (5.2.1. Deformation of the Whole Mantle by a Surface Load) en el que se analiza la reconstrucción de la historia de las cargas de hielo de los glaciares y los cambios en el nivel del mar (5.2.2 Ice Load Histories and Postglacial Sea Levels). También se explicitan las evidencias que dan lugar a pensar en la astenosfera como un canal de baja viscosidad (5.2.3 Evidence for a Low-viscosity Asthenosphere Channel).

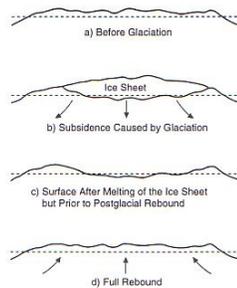


Figura 18: Esquema sobre el rebote postglacial

De los tres subtítulos que desarrollan los autores (5.2.1.1 *Half-space Model*, 5.2.1.2 *Spherical Shell Model* y 5.2.1.3 *Postglacial Relaxation Time and Inferred Mantle Viscosity*) trabajaremos sobre el que considera la deformación del manto, tomando su viscosidad constante y pensando que cualquiera de las dimensiones (alto, ancho y largo) del glacial es pequeña frente al radio terrestre y, con ello, resulta apropiado considerar el flujo en un semi-espacio infinito de características viscosas.

El modelo considera el proceso de subsidencia y el rebote relativo a la carga y descarga de una masa de hielo, que se supone removida instantáneamente dando lugar a un desplazamiento periódico de la masa cortical. Se supone que el interior es un fluido

muy viscoso e incompresible y que se puede despreciar la inercia. A través de un desarrollo matemático se obtiene una relación que vincula el tiempo de relajación del sistema con la VM. Este vínculo en términos empíricos se establece a partir de los datos del rebote postglacial de Fennoscandia y Laurentia, datos que se explicitan más adelante en el texto (5.2.1.3 Postglacial Relaxation and Inferred Mantle Viscosity) pero no describiremos.

Las fórmulas utilizadas para describir los procesos se explican a continuación.

El proceso de subsidencia y rebote relativo a la carga y descarga de una masa de hielo, que se supone que es removida instantáneamente (en $t = 0$), da lugar a un desplazamiento periódico de la masa ω_m

$$\omega_m = \omega_{m0} \cos 2\pi x / \lambda, \quad \text{siendo } \lambda \text{ la longitud de onda y } \omega_m \ll \lambda$$

A partir del proceso esquematizado (Figura 16) se plantean las ecuaciones que gobiernan el flujo en dos dimensiones.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} &= 0 \\ 0 &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \\ 0 &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right) \end{aligned}$$

siendo p la presión, u_x y u_y las componentes horizontal y vertical de la velocidad respectivamente. Los autores remiten al capítulo 6 a fin de introducir condiciones sobre estas ecuaciones e introducir la función de corriente Ψ .

A full derivation of these equations is given in Chapter 6 (see (6.2.6) and (6.5.9)).
With the introduction of the stream function (6.3.2)... (Schubert *et al.*, 2001; pp: 218).

Se obtiene, entonces, la siguiente ecuación:

$$0 = \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \psi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \psi}{\partial y^4} = \nabla^4 \psi$$

Se adjudican al sistema planteado las condiciones de contorno particulares que impone el rebote postglacial y se resuelven algebraicamente las ecuaciones obteniéndose una ecuación que vincula el tiempo de relajación del sistema con la VM.

$$\tau_r = \frac{4\pi\mu}{\rho g \lambda} = \frac{4\pi\nu}{g \lambda}$$

La resolución de la ecuación diferencial utiliza las condiciones de contorno y ciertos pasajes algebraicos, algunos de los cuales remiten al capítulo 6.

El capítulo 6 desarrolla las ecuaciones básicas relacionadas con los distintos aspectos físicos del manto. Describiremos las referencias concretas que remiten al capítulo 6 desde este apartado que analizamos (5.2.1 Deformation of the Whole Mantle by a Surface Load, en particular el modelo *plano* 5.2.1.1 Half-space Model). Concretamente se citan las ecuaciones (6.2.6), (6.3.2), (6.5.9) y (6.15. 2).

La ecuación 6.2.6 proviene de las ecuaciones de conservación de la masa, que se desarrollan en un apartado particular (6.2 Conservation of Mass). Se plantean las ecuaciones que dan cuenta de la conservación de la masa o de continuidad en coordenadas cartesianas, esféricas y cilíndricas con la ayuda del gráfico 6.1 (ver Figura 14)

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

(en coordenadas cartesianas)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho u_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho \sin \theta u_\theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} (\rho u_\phi) = 0$$

(en coordenadas esféricas)

siendo (u_r, u_θ, u_ϕ) las componentes de la velocidad en las direcciones (r, θ, Φ) .

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z) + \frac{1}{s \partial s} (\rho u_s) + \frac{1}{s} \frac{\partial}{\partial \phi} (\rho u_\theta) = 0$$

(en coordenadas cilíndricas)

siendo (u_s, u_z, u_ϕ) las componentes de la velocidad en las direcciones (s, z, Φ) .

También se hace referencia a la fórmula 6.32 que vincula a la función de corriente con la velocidad:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0$$

siendo $\Psi(x, y)$ tal que $u_x \equiv \frac{\partial \Psi}{\partial y}$ y $u_y \equiv -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$

Las restantes ecuaciones que se citan (6.5.9 y 6.15.2) se relacionan con las ecuaciones de Navier-Stokes que consideran un campo de velocidades en la cercanía de un punto en un fluido tanto en coordenadas cartesianas como en cilíndricas.

A modo de cierre del capítulo

En este capítulo hemos intentado describir qué se enseña sobre la TCM en los de textos de educación universitaria superior. El CE guió el armado del recorrido estructural, a través de los diferentes niveles definidos en los capítulos 2 (en forma teórica) y 3 (en forma metodológica). De este modo, hemos logrado profundizar una temática (la VM) para indagar qué enseñan los libros de texto acerca de ella.

Como hemos visto, cada libro ofrece una perspectiva diferente, tanto en lo que al enfoque se refiere como al nivel de profundidad. En este sentido, hemos visto que la perspectiva matemática es determinante del nivel y que los textos asumen diferentes formas de encararla.

En lo que a la enseñanza específica del modelo de convección, L1 puede considerarse como un texto que presenta una construcción progresiva y pormenorizada del MC global. Si bien es posible acceder al capítulo que presenta el modelo (capítulo 12), su tránsito explicita referencias que remiten a los otros capítulos. El capítulo 12 puede ser encarado sin recurrir a los desarrollos anteriores pues presenta una perspectiva descriptiva. Sin embargo, para lograr una comprensión del modelo es posible seguir las citas del capítulo (relaciones extensionales) que conducen a ampliar la información.

Además, en algunas temáticas, es posible lograr una introspección aun más profunda, situación que es señalada por el autor de L1 con los apartados que denomina intermedio o avanzado.

L2 presenta el MCM en un capítulo que podríamos pensar como una unidad, con principio y fin. Esta modalidad de independencia de este capítulo responde a la estructura de edición que propone Jackson, su editor. En este sentido, el capítulo 5 desarrolla de forma descriptiva y elemental (conocimientos de geología y física generales) el modelo en su conjunto, incluyendo su controversia y la perspectiva evolutiva. Para profundizar en el modelo a través del CE fue necesario acudir a otro capítulo, el capítulo 10, que desarrolla el MVM desde la perspectiva del rebote postglacial que, como hemos visto, adquiere mucho vuelo teórico, con un nivel avanzado de matemática. Los modelos que subyacen a la construcción del MVM no se abordan en L2 por lo que es posible considerar que este texto en su conjunto es de nivel avanzado.

En lo que a L3 se refiere, el MCM se enseña integradamente en el último capítulo del libro. Se plantea el modelo haciendo referencia a las cuestiones consideradas cruciales por sus autores (a través del listado de preguntas) las que son respondidas a lo largo de este capítulo pero también se ofrecen referencias a otros capítulos del libro. L3, al igual que L1, ofrece una construcción pormenorizada del modelo, pero con un enfoque totalmente diferente del de L1. L3, incluso, separó los desarrollos matemáticos avanzados en un capítulo especial (el capítulo 6). Respecto de la enseñanza del MVM, también se presenta un capítulo separado que lo desarrolla (el capítulo 5). Este capítulo permite profundizar algunos aspectos a través de citas que remiten al capítulo 6, que presenta los desarrollos matemáticos de nivel avanzado. L3 no enseña los modelos físicos que subyacen a la definición del MVM sino que remite a bibliografía específica para ello.

Capítulo 6: Análisis de los mecanismos subyacentes a la transposición didáctica

Resumen del capítulo

En este capítulo abordaremos el análisis de los procesos de objetivación y publicidad que subyacen a la TD que realizan los libros de texto que forman nuestra muestra. El análisis de la objetivación y la publicidad se realizará para cada uno de ellos siguiendo el mismo orden desarrollado en el capítulo anterior.

Introducción

El capítulo 5 persigue el objetivo de presentar una descripción del proceso de desincretización que propone cada libro de texto, a través de óptica definida según nuestras prescripciones metodológicas. La descripción pretende exhibir la organización conceptual que se propone al lector. La estructura de nuestro análisis se materializa a través del CE. Respecto de las operaciones subyacentes a la TD que forman parte de nuestro horizonte analítico, nos resta analizar cómo realiza cada propuesta de enseñanza los procesos de objetivación y publicidad de la TCM.

6.1 Análisis del proceso de objetivación

Analizaremos el proceso de objetivación a través de una selección de citas. Dicha selección responde a las relaciones extensionales que establece el libro de texto en relación con la controversia principal alrededor de la CM, pues es en este terreno en el que el proceso de objetivación se pone fuertemente a prueba.

En general, nos interesa rescatar qué dicen en forma explícita los autores de los libros de texto sobre la controversia y qué valor otorgan a sus afirmaciones. Para ello, por un lado, seleccionaremos aquellos párrafos de los libros que la expliciten directa e indirectamente. Es decir, buscaremos también los datos relativos a la VM que inclinen el MCM hacia una postura u otra (convección global o estratificada). Se explorará qué se transmite conceptualmente de la publicación científica al libro de texto, qué se deposita en esa cita que hace el libro respecto de tal publicación científica, con el fin de explicitar al lector de este informe qué se transfiere desde el ámbito científico hacia el ámbito didáctico.

El proceso de objetivación debe indagarse a la luz de la reconstrucción histórica que hemos realizado del campo. Las publicaciones seleccionadas para su análisis son parte de las utilizadas en el capítulo 4 de esta tesis.

Hay dos clases de relaciones extensionales que se ponen de manifiesto a través de las citas explícitas en el texto: las que hacen referencia al interior de éste o las que hacen referencia a textos o publicaciones (externas al texto). Podemos decir que, en parte, fueron las citas del texto las que guiaron nuestro diseño en la construcción de la

evolución histórica del modelo de convección y su campo controversial. Como dijimos a la hora de desarrollar el capítulo 4 de esta tesis doctoral: hemos seleccionado una serie de publicaciones a fin de realizar una reconstrucción de cómo evolucionó el modelo de convección en el manto y su campo controversial asociado pero sin pretender con ello hacer un estudio histórico propiamente dicho. Siempre nuestro objetivo fue recrear el contexto de producción de la teoría de convección en el manto y, por ende, fue necesario rastrear sus orígenes.

6.1.1. Análisis de la objetivación plasmada en L1

Para trabajar sobre la objetivación que realiza Davies en su libro de 1999 tomaremos como referentes, especialmente, sus publicaciones científicas de 1977 y 1992 en esta última junto con Richards (ver 4.4.2.3.) De ellos extraeremos las citas que consideremos representativas de las ideas que el autor del libro transmite a la audiencia de modo de poner en tela de análisis su objetividad.

En primer lugar, en el capítulo introductorio (Introduction), el autor aclara que durante el desarrollo del texto explicitará su propia opinión en relación con las controversias.

Where there are controversies about mantle convection I give my own assessment, but I have tried to set these assessments separate from the presentation of principles, main observations and direct inferences (Davies, 1999; pp:3).

En esta frase el autor pone de manifiesto que él está comprometido con las ideas que expone, lo que de alguna manera informa sobre su rol activo frente a la controversia que nos ocupa. Es decir, que el cuadro general sobre la CM que presentará es su versión sobre cómo ocurre el fenómeno. Esta explicitación puede interpretarse como una especie de advertencia al lector, pues como veremos más adelante, en ocasiones en las que el autor afirma una hipótesis involucrada en la controversia suele sustentarse en una publicación de su propia autoría.

Sin embargo, Davies es prudente en relación con sus ideas depositando su validez en el transcurso del tiempo.

Whether my judgment is correct, that the main ideas presented here will become and remain broadly accepted, is something that only the passage of time will reveal. Scientific consensus on major ideas only arises from a prolonged period of examination and testing. There can be no simple proof of their correctness (Davies, 1999: pp:4).

La defensa de su postura científica en relación con el modelo de convección global se pone de manifiesto cuando el autor afirma que al momento de la publicación:

I believe the model of mantle dynamics presented here is the most useful available at present (Davies, 1999; pp:5).

Por otra parte, en los primeros párrafos del capítulo 12 Davies hace alusión a la existencia de un campo controversial en alrededor de TCM. Más allá de que Davies no habla de campo controversial en sí, hace referencia a un conjunto de modelos que difieren entre sí y realza la relevancia de la posible estratificación de la convección nombrándola como la controversia principal.

It is also an appropriate place to discuss alternative views. Some of these are in direct opposition to the picture developed here, such as that the mantle is divided into two layers that convect separately. Others are different ways of looking at the system that have been used in the long debate. Some of these carve the total system up in a different way. Some are complementary and useful for bringing out particular aspects, while others are unprofitable or potentially misleading (Davies, 1999; pp: 324).

El autor manifiesta que se trata de un campo controversial, explicitando la relevancia de la controversia que nos ocupa en esta tesis. Incluso, una páginas más adelante desarrolla un apartado específico dedicado a esta controversia (12.3 Layered Mantle Convection) en el que profundiza la discusión teórica entre los modelos en controversia y precisa la relevancia de esta controversia en relación con el campo controversial.

The question of whether the mantle convects as one or two layers has been probable the most vexed and persistent controversy about mantle convection. However I have deferred discussion of it until now for three reasons. First and most important, the fundamental concepts of mantle convection can be developed without needing to address this question. Second is my own judgment as to the relative strength of the arguments. Third, I wanted to develop the

specific picture of mantle convection in what seemed a natural way, without undue interruption (Davies, 1999; pp: 337).

En esta cita se devela un aspecto importante de la TD que crea este autor pues afirma que la trama conceptual es construida a través del libro de texto más allá de los aspectos controvertidos. La existencia de la controversia es explícita en el texto al igual que la postura del autor frente a ésta con lo que justifica haber compuesto un panorama de este modelo según su buen saber y entender, siendo que de todos modos se enseña el sustento conceptual de la TCM.

Tal como hemos visto en el capítulo 4 de esta tesis, la controversia sobre la estratificación surgió a partir de imaginar la movilidad del manto inferior en relación con el alcance del mecanismo de convección y, además, supimos que la estratificación de la convección se evalúa a través del pasaje de materia entre el manto superior e inferior, cuestión esta que Davies explicita cuando se refiere abiertamente a la controversia.

The major debate has been specifically about whether or not the mantle flows through the boundary between the upper mantle and the lower mantle at 660 km depth (...) it is about the more specific question of whether there is a barrier to flow at a depth of 660 km (Davies, 1999; pp: 338).

Sabemos que Davies desde su publicación de 1977 sostiene que, en primer lugar el manto inferior participa de la convección y más específicamente (ver 4.3.2.3 y 4.3.2.4) que el pasaje de materia entre el manto superior e inferior depende de diferentes factores. De ellos, tal como venimos haciendo, tomamos a la VM, con el fin de descubrir qué modelo adopta el autor y qué implica esta elección respecto de la controversia.

Veamos cómo el autor manifiesta la relevancia del MVM en relación con la controversia a través de una cita externa al texto y una interna.

Richards and Hager²¹ demonstrated that models in which flow passes through the mantle transition zone and in which the viscosity increases by a factor of about 30 through the transition zone were consistent with the observations. Models with a density barrier in the transition zone do not yield sufficient amplitude and models without the viscosity increase yield the wrong sign. A more detailed qualitative explanation is given in Section 6.9.3 (Davies, 1999; pp: 339).

El autor pone de manifiesto el lugar preponderante que ocupa la viscosidad del manto y su relación con el pasaje de materia a través de la zona de transición. Es más, el autor apoya la hipótesis de un crecimiento de la viscosidad con cierta precisión (30 veces) justificando esta hipótesis en función de los datos. Otra cuestión de importancia es la explicitación del apartado 6.9.3 del libro en el que se desarrollan los argumentos que sustentan sus hipótesis y que hemos analizado especialmente en el capítulo 5 de esta tesis (ver 5.1.3.2.3)

La hipótesis de crecimiento de la viscosidad en la zona de transición es parte de la publicación conjunta con Richards del año 1992. Recordemos (ver 4.4.2.6) que la publicación de 1992 es una de las publicaciones principales a través de las cuales Davies da a conocer su modelo de convección global en oposición al modelo de convección estratificada.

El lector que enfrenta el texto por primera vez probablemente no sepa que su autor es un científico activo frente a la controversia, es decir, que ha tomado parte en el recorrido histórico de construcción de la teoría de convección en el manto. Pero nosotros sabemos que Davies es uno de los defensores de la hipótesis de la convección global y su decisión de escribir este libro está relacionada con su apreciación del estado del arte de la teoría, que en particular es favorable a su postura.

My decision to write this book arose from my judgement that the broad picture of how mantle convection works was becoming reasonably settled. There are many secondary aspects that remain to be clarified (Davies, 1999; pp: 3).

²¹ Richard and Hager (1988). The earth's geoid and the large-scale structure of mantle convection, in : *Physics of the Planets*, S. K. Runcorn, ed., Wiley, New York, 247-72.

Claramente puede apreciarse que la cita anterior carga positivamente el valor sobre el modelo de convección global, que es el que presenta el autor como válido en este libro y si bien hay aspectos por clarificar, éstos son secundarios.

Otra forma en la que se carga valor positivo sobre el modelo de convección global es a través del pasaje de materia por la zona de transición

On the basis of material properties it is thus far from clear at present that vertical flow would be interrupted by any of the effects of phase transformations, though the possibility remains in principle. Numerical models (Sections 10.5 and 11.4) have shown that although a strong phase transformation effect might block vertical flow, at least temporarily, both plates and plumes are likely to penetrate a phase transformation for plausible values of the thermodynamic parameters of the transformation (Davies, 1999; pp: 339).

Si las placas o las plumas se detienen a la hora de atravesar la zona de transición, se detienen temporalmente, es decir, que a la larga habrá pasaje de materia entre el manto superior e inferior, hipótesis que favorece a la convección global.

Hay muchos pasajes en los que se pone el valor en los argumentos o hipótesis que afirman la convección global que, como bien sabemos, es sumamente coherente con la postura del autor frente a la controversia.

El modelo de convección es presentado en el capítulo 12. Sin embargo, los modos básicos que conforman los mecanismos convectivos han sido desarrollados en los capítulos 10 y 11. Nos interesa saber en cómo justificó Davies su planteo MCM. En nuestra descripción estructural, hemos analizado el modo placa (ver 5.1.3.2.1.1), que se desarrolla en el capítulo 10 (Chapter 10: The plate mode) del libro.

El capítulo comienza del siguiente modo:

It is the thesis of this chapter that the plates are part of one recognizable mode of mantle convection, driven by the top thermal boundary layer of the mantle (Davies, 1999; pp: 261).

Sólo Davies llama de esta forma (*plate mode*) a la interacción entre las placas y el manto. Como veremos más adelante, otros autores presentan este mismo aspecto de la convección global sin hacer referencia a un modo de convección llamado placa. Incluso, más adelante en el texto dice:

It is therefore useful to identify explicitly two modes of mantle convection: the *plate mode* and the *plume mode*. I have previously also referred to the plate mode as the *plate-scale flow* (1) (Davies, 1999; pp: 261).

El autor comienza diciendo que la tesis del capítulo es que las placas son parte de la convección y que a esta forma de convección la denominó anteriormente con un nombre parecido. Ahora la llama *plate mode* y antes la llamó *plate scale flow*. La cita del autor, que hemos simbolizado como (1) es la publicación Davies y Richards (1992), que hemos analizado durante el capítulo 4 (ver 4.4.2.6.).

Es decir, que alude a la publicación de 1992, un artículo publicado en el *The Journal of Geology*²² que consta de 55 páginas y se defiende el modelo de convección global, tal como hemos revisado en el capítulo 4 de esta tesis (ver 4.4.2.6).

Cuando analizamos los vínculos entre el MVM y el MCM (5.1.3.2.1) nos abocamos a analizar la parte del modelo que se vincula con las placas (5.1.3.2.1.1) y vimos que la discusión controversial se desplaza a acotar el contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior. Davies asevera que el manto inferior es 30 veces más viscoso que el manto superior a partir de los datos provenientes del rebote postglacial y las anomalías del geoide (ver 5.1.3.2.3).

En su libro de texto Davies (1999) cuando se analiza la viscosidad del manto como un factor de modelización numérica (5.1.3.2.1.3) cita específicamente su publicación de 1977 (ver 4.4.2.3), en la que estudia la variación de la viscosidad con la

²² Se trata de una publicación científica tradicional en cuya página web dice sobre sí: “Since its inception in 1893, *The Journal of Geology* has been devoted to the study of geological principles and is currently publishing research and theory in geophysics, geochemistry, sedimentology, geomorphology, petrology, plate tectonics, volcanology, structural geology, mineralogy, and planetary sciences. Contents range from work on the composition of the lunar interior to computer modeling of fossil development.” (<http://www.journals.uchicago.edu/JG/brief.html>)

profundidad. Esta publicación de 1977 se cita dos veces en el texto, en el capítulo 10 (Chapter 10: The Plate Mode) y en el capítulo 12 (Chapter 12: Synthesis) con el fin de justificar el aumento de la viscosidad con la profundidad.

Específicamente en el primer apartado del capítulo 12 (12.1 The mantle as a dynamical system) se revisan cuestiones fundamentales que hacen a la dinámica mantélica²³, entre ellas, la idea de un canal de baja viscosidad debajo de la litosfera sobre la que deslizarían las placas (12.1.6 A decoupling layer?). Esta idea tiene origen en el surgimiento de la tectónica de placas y es una parte importante de lo que se discute en el artículo que publica Davies en 1977, tal como ya hemos visto (4.3.2.3.). Nos detenemos entonces, a analizar en qué contexto se hace esta cita.

Una cuestión que marca la postulación de esta capa de baja viscosidad es la velocidad de las placas, que se relaciona de forma directa sobre las fuerzas que actúan sobre ellas. La otra cuestión que sostiene la existencia de la capa de baja viscosidad es que puede estratificar la convección.

In any case, it was shown early on that²⁴ a low viscosity layer of the order of 100 km thick does not decouple motions above and below it very efficiently unless its viscosity is three or more orders of magnitude lower than the adjacent mantle (5)²⁵ (Davies, 1999; pp: 330).

La conclusión importante que descansa en esta cita es que esta capa es del orden de los 100 km de espesor y que no estratifica la convección a menos que su viscosidad sea tres o más órdenes magnitud menor que la del manto inferior.

No olvidemos que el objetivo fundamental de la publicación de 1977 es evaluar cuáles soeran las condiciones que excluyen al manto inferior de la convección. En aquel momento el consenso de la comunidad alrededor de la convección era confinarla al manto superior. Esta controversia es anterior a la controversia sobre la convección global o estratificada, como ya hemos visto en el capítulo 4 de esta tesis. En relación con el modelo de viscosidad, la publicación de 1977 muestra que el contraste

²³ 12.1.1 Heat transport and heat generation; 12.1.2 Role of the plates: a driving boundary layer; 12.1.3 Passive upwelling at ridges; 12.1.4 Plate shapes and kinematics; 12.1.5 Forces on plates; 12.1.6 A decoupling layer?; 12.1.7 Plume driving forces?.

²⁴ Se refiere al capítulo 8 del libro.

²⁵ (5) esta referencia indica que se trata de la publicación de Davies (1977).

de viscosidad entre manto superior e inferior debía ser 10^5 para excluir al manto inferior de la convección.

En el capítulo 10 (The plate mode) del libro de Davies hay un apartado (10.2 The plate-scale flow) que muestra el resultado de trabajar con modelos numéricos que dan cuenta de diferentes aspectos del modo de convección que compromete a las placas. Específicamente uno de ellos refiere a la influencia de la alta viscosidad del manto inferior (10.2.2 Influence of high viscosity in the lower mantle).

En la publicación de 1977, tal como lo hemos referido anteriormente (5.1.3.2.1.3), se desarrollan los argumentos que llevan a concluir que la viscosidad del manto inferior es significativamente mayor que la del manto superior y se calcula que la diferencia oscila en un factor que va entre 10 y 100.

El planteo del aumento de la viscosidad del manto inferior en relación con el manto superior trae aparejado el aumento de la longitud de la escala horizontal del flujo:

This high viscosity layer has an effect analogous to that of a stiff upper boundary layer (Figure 10.1): it tends to increase the horizontal length scale of flow (Davies, 1999; pp: 268).

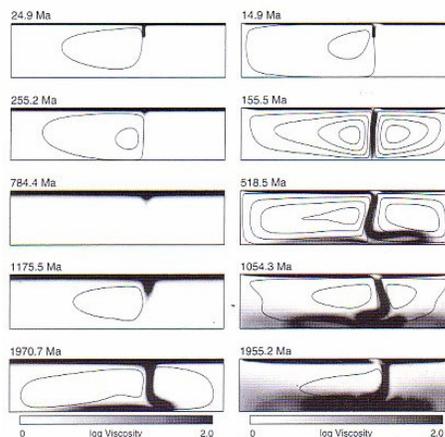


Figura 1: Imagen de dos secuencias de convección obtenida a través de modelos numéricos

Vale la pena aclarar que Davies en su libro no pone en tela de juicio la existencia de una capa de baja viscosidad sino que el sistema convectivo pueda estratificarse. Se aclara además, esto explícitamente antes de terminar el apartado:

The question here is not whether such a minimum exist, but whether it is so pronounced that it has a major effect on the geometrical form of mantle flow. The evidence for substantial decoupling is doubtful (Davies, 1999; pp: 330).

El capítulo 12 (Synthesis) de II explicita el rol del MVM en el modelo general de funcionamiento de la Tierra y, además, integra y presenta el modelo de convección global tal cual lo concibe el autor. A la hora de justificar y ampliar la hipótesis de aumento de la viscosidad con la profundidad en el manto, hace referencia a su publicación de 1977. El modelo que en ésta se presenta es pionero al involucrar al manto inferior en el modelo de convección y otorga una gran importancia a la viscosidad del manto a la hora de evaluar la participación del manto inferior en la convección, confirmando la centralidad de la viscosidad del manto como CE.

La publicación de Davies y Richards de 1992 presenta un modelo de convección que tiene sus raíces en el artículo de 1977 pero se trata de un modelo más completo que, incluso, incorpora el desarrollo de las plumas térmicas. En relación con la viscosidad del manto, esta publicación, respecto de la de 1977, profundiza el análisis del contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior.

Pero en lo que a la viscosidad del manto refiere el texto en 1999 descansa, en gran parte, en la publicación de 1977 y no en la de 1992.

The upper layer acts as a lubricating layer that allows the flow in the lower layer to reach a large scale before the penalty of viscous dissipation in the upper horizontal flow outweighs the benefit of lower strain rates in the lower layer. This lubrication is the second effect. The combined effect of the viscosity layering has been known for some time from two-dimensional models (Davies, 1977) (Davies, 1999; pp: 270).

Veremos más adelante, que si bien se acepta la variación de la viscosidad con la profundidad por la mayor parte de la comunidad de geofísicos, no hay tal acuerdo en relación con las diferencias o el contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior.

Durante el desarrollo del capítulo 4 hemos analizado distintas cuestiones en relación con esta publicación de 1977: por un lado, su lugar en la historia reciente de la geología. Es decir, qué modelo de convección se oponía al que la confinaba al manto superior. El artículo se denomina “Whole Mantle Convection and Plate Tectonics”, que en aquel momento histórico era una propuesta de convección global en la que se analizaba con cierta profundidad la variación de la viscosidad relativa y los patrones convectivos a través de modelos numéricos bidimensionales (Bonan, 2003).

Esta publicación comienza de la siguiente forma:

It seems unlikely that the lower mantle is *not* involved in motions related to plate tectonics. The evidence relating to several alleged obstacles to lower-mantle convection is reviewed (Davies, 1977; pp: 459).

La publicación de Davies en 1977 revisaba los argumentos que confinaban la convección al manto superior, lo que pone de relieve su antigüedad en la investigación de esta temática y su compromiso con la hipótesis de convección global.

El artículo se centra en la relación entre la convección y las placas y, aunque se manifiesta explícitamente a favor de la hipótesis de la existencia de plumas sólo son sugeridas y no explícitamente desarrolladas con el mismo énfasis con el que se trabaja la relación de la convección con las placas.

Narrow ascending thermal plumes could probable be incorporated into this model (Davies, 1977; pp: 460).

La viscosidad del manto es uno de los modelos que interfiere fuertemente en los posibles patrones de convección y este artículo es pionero en darle una importancia capital a esta temática (Bonan, 2003).

Davies “simpatizó” siempre con un manto cuya viscosidad aumentara con la profundidad. En 1977 desarrolla estos modelos numéricos en los que evalúa las diferencias relativas de viscosidad entre manto superior e inferior y, en 1992, junto con Richards, proponen cuantitativamente esta diferencia, a partir de la publicación de

Richards & Hager (1988), nombrada recientemente. Concretamente en el libro se cita dicha publicación de la siguiente manera:

Richards and Hager demonstrated that models in which flow passes through the mantle transition zone and in which the viscosity increases by a factor of about 30 through the transition zone were consistent with the observations. Models with a density barrier in the transition zone do not yield sufficient amplitude and models without the viscosity increase yield the wrong sign. A more detailed qualitative explanation is given in Section 6.9.3 (pp: 339).

Si nos dirigimos a la sección 6.9.3 vemos que se trabaja con el modelo que proponen Richards y Hager en 1984 según se cita y también se desarrolla en Davies y Richards (1992). Este modelo es el que permite establecer la diferencia cuantitativa de viscosidad entre manto superior e inferior. Reproducimos a continuación los esquemas publicados por Davies en 1992 y en 1999.

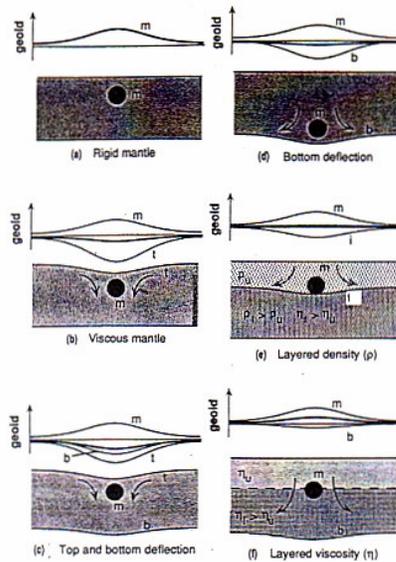


Figura 2: Esquema de diferentes modelos de atracción gravitacional de una masa con mayor densidad relativa (Davies, 1992).

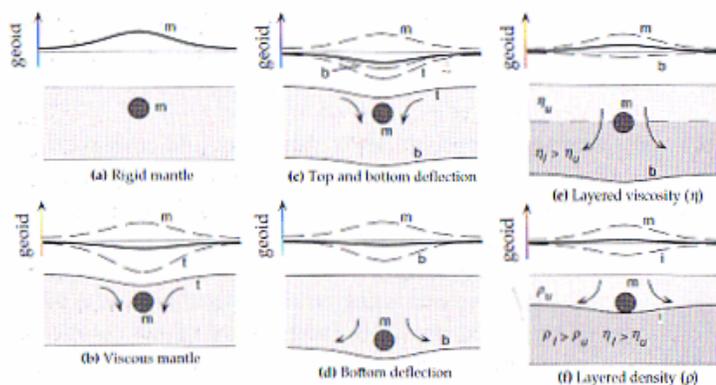


Figura 3: Esquema de diferentes modelos de atracción gravitacional de una masa con mayor densidad relativa (Davies, 1999).

El modelo trata de cómo una anomalía de densidad, que respecto de su entorno posee un exceso de masa m , es atraída gravitacionalmente generando una alteración sobre el geode. Según el modelo reológico de manto que se adopte, se obtendrán diferentes resultados en función de los sectores de manto que se involucren en el proceso. Como puede apreciarse en el diagrama el modelo explica cómo es la forma del geode en relación con la anomalía para distintas condiciones reológicas del manto.

La forma de la explicación en una y otra publicación coincide, esencialmente. Pueden señalarse como diferencias importantes:

- El texto de 1992 no explicita que la diferencia relativa de viscosidad entre ambos mantos sea de 30 sino que la acota entre 10 y 100
 (...) viscous layering gave the right sign and amplitude if a viscosity increase by a factor between 10 and 100 occurs in the transition zone (Davies & Richards, 1992; pp: 168).
- Ninguno de los textos realiza un análisis cuantitativo aunque el texto de 1992 hace referencia a los armónicos esféricos que se originan de considerar las perturbaciones del campo gravitatorio en la superficie de la Tierra, considerada ésta como una esfera hidrostática rotante, pero se trata sólo de una mención.
- En la publicación de 1992, cuando concluye el apartado sobre las anomalías del geode se expresa que sólo el modelo de convección global, que presenta un aumento sustancial de la viscosidad en la

zona de transición, es consistente con las anomalías que presenta el geoide en las zonas de subducción.

(...) this type of model cannot be ruled out, only whole mantle model, with a significant viscosity increase in the transition zone, is consistent with the observed geoid anomalies over subduction zones (Davies & Richards, 1992; pp: 169).

A través de nuestro CE hemos comparado las publicaciones de Davies de 1977, 1992 y 1999. Es posible reconstruir que en 1977 los estudios mostraban que las condiciones de exclusión del manto inferior sobre la convección eran sumamente extremas, poco probables de ocurrir. En el artículo de 1992, en cambio, avanza sobre un modelo más específico sobre la viscosidad del manto acotando el valor de la diferencia de viscosidad entre el manto superior e inferior a partir de las anomalías del geoide como hemos visto, entre otros modelos. En esta publicación presenta datos cuantitativos que apoyan la hipótesis de convección global y es la que se cita en L1.

6.1.2. Análisis de la objetivación plasmada en L2

L2 consta de 11 capítulos que se desarrollan alrededor de la composición, funcionamiento y evolución del manto. Hemos visto también que se trata de una serie de monográficos agrupados en tres secciones y que sus autores pertenecen a una prestigiosa escuela de geofísica de la Universidad Nacional de Australia (ANU). Es interesante conocer algunos detalles sobre esta compilación que hacen al proceso de objetivación que se desarrolla en la concepción del libro.

El libro tiene una dedicatoria muy significativa:

It is with a real sense of loss that his colleagues in the Research School of Earth Sciences at the Australian National University dedicate this volume to his memory (Jackson, 1998; pp: xix).

Pero... ¿por qué nos interesamos en este detalle? Ringwood formó parte de la primera generación de académicos que se doctoraron en Australia y luego de realizar un

pos-doctorado en el extranjero (Harvard University), en 1959, ocupó un lugar destacado en el Departamento de Geofísica de la ANU:

Ted joined the Department of Geophysics at the ANU as a Senior Research Fellow in 1959. His rapidly growing stature was recognized through his appointment in 1963 as Personal Professor, and in 1967 as Professor of Geochemistry, a position he filled with distinction until his premature death in 1993. (Jackson, 1998; pp: xviii)

Además, Ringwood fue uno de los científicos que creó la *Research School of Earth Sciences* que desarrolló en forma coordinada diversas áreas de investigación asociadas con los procesos planetarios a gran escala. Los autores de este monográfico pertenecen a esta prestigiosa escuela.

Ted Ringwood argued the ultimately successful case for the formation of a new Research School of Earth Sciences (RSES). The new school's mandate was to expand into carefully selected new areas such as geophysical fluid dynamics, orogenesis, and environmental geochemistry (Jackson, 1998; pp: xix).

La selección y coordinación de estas áreas dio lugar a la formación de un entramado disciplinar sobre los procesos planetarios a gran escala, en los que la CM puede pensarse como una parte importante. El modelo convectivo que se desarrolla en el libro de texto corresponde al que presenta Davies (capítulo 5) que es uno de los miembros de la RSES.

Incluso en el desarrollo del prefacio, en primer lugar, se da un alegato a favor del modelo de convección global en relación con la controversia para luego presentar un recorrido general del modelo de convección aceptado por el editor del monográfico.

Microphysical rheological models for the deep mantle, based on extrapolation of experimentally determined flow laws for analogue materials, are most readily reconciled with those derived from analyses of glacial rebound phenomena within a whole-mantle convection scenario in which there are no mid-mantle thermal boundary layers.

All of these inferences are consistent with a model of whole-mantle convection in which old cold slabs descend well into the lower mantle, though at speeds substantially less than those for the upper mantle, because of the higher viscosity. In this scenario, plumes rise from the

thermal boundary layer at the base of the mantle, with narrow conduits or tails feeding large mushroom-shaped heads that grow by entrainment of surrounding mantle. (Jackson, 1998; pp: xxiv).

El proceso de objetivación llevado a cabo coincide, por lo tanto, ideológicamente con el analizado en el libro de Davies. No podemos dejar pasar que el capítulo 5 (Plates, Plumas, Mantle Convection and Mantle Dynamics) es de la autoría de Davies y que su selección como capítulo que presenta la convección consolida la postura teórica que defiende la convección global como teoría.

En el prefacio además, se explicitan algunas cuestiones sobre la controversia que nos ocupa. Por un lado, la decisión del editor de que el libro en su conjunto muestre los aspectos controvertidos, es decir, las discusiones que se suscitan y, por otro, la explicitación de la postura que asume el texto en su conjunto respecto de la controversia principal, objeto de nuestro análisis.

This unifying view of the composition, structure, and dynamics of the modern mantle is a persistent theme throughout much of this volume. However, there remain substantial areas of uncertainty and controversy, which are also addressed. Some of the areas of residual uncertainty have already been mentioned in the preceding summary. (Jackson, 1988; Preface, pp: xxiv).

Este párrafo expresa concretamente la intención del editor de mostrar los agujeros del entramado conceptual en relación con las incertidumbres, los aspectos desconocidos o poco estudiados y las controversias en general, más aun si se tiene en cuenta que la composición, estructura y dinámica del manto son amplísimos campos de investigación.

Por otra parte, en el mismo prefacio el editor también explicita su postura en relación con el modelo de convección estratificada, además de naturalizar el modelo de viscosidad propuesto para el manto, veamos:

(...) However, strict layering is difficult to reconcile with the wide range of geophysical evidence summarized earlier. Nevertheless, it remains to be demonstrated conclusively that whole-mantle convection in a mantle with depth-dependent viscosity is compatible with the survival of chemically and isotopically distinct materials for timescales on the order of billion years (Jackson, 1988; Preface, pp: xxiv-xxv).

En el párrafo anterior subyace la discusión de la homogeneidad de la composición química entre el manto superior e inferior. No es la intención aquí justificar estos detalles pero si poner de manifiesto qué anuncia el editor en el prefacio, que hará a lo largo del texto en relación con las controversias. También en este sentido, otra forma de tomar postura frente a la controversia es relevando el modelo que se asumirá en el libro de texto:

Convection within the Earth's present-day mantle is also becoming increasingly well understood as the superposition of two main modes. The dominant plate scale flow is driven mainly by the gravitational instability of the cold, stiff upper thermal boundary layer or lithosphere. Plumes represent the second, subsidiary mode of mantle convection, arising from instabilities in a bottom-heated lower thermal boundary layer. The dynamics of both the plate-scale and plume-related flows are becoming increasingly accessible to study through a combination of laboratory experiments and numerical modeling, although complete three-dimensional calculations, with realistic Rayleigh numbers and appropriate temperature- and depth-dependent rheologies that incorporate the complicating effects of phase transformations, melting, and chemical differentiation, remain to be performed.

(...) Strong compositional layering, with its implications of an additional pair of thermal boundary layers in the mid-mantle, separating convection above and below, not only is not required but also would be difficult to reconcile with the radial velocity models (Preface. Jackson, 1998; pp: xxiii).

Estas ideas que asume discursivamente el editor frente a la controversia son coherentes con las que relevamos y discutimos durante en el análisis de L1 (ver 6.1.1) y nos permiten afirmar que el texto asume la postura de convección global.

La estructura de este libro de texto, la postura asumida por el editor y la participación de Davies en la autoría del capítulo que presenta el MCM conducen a considerar que el proceso de objetivación no debe diferir mucho del ya analizado para L1. El editor compila los monográficos postulando el modelo de Davies como MCM por lo que no encontramos necesario pasar por el proceso de análisis de citas utilizadas.

6.1.3. Análisis de la objetivación plasmada en L3

Los autores de este libro de texto son prestigiosos científicos que pertenecen a la tradición geológica americana. Dos de ellos, Gerald Schubert y Donald Turcotte, son autores de un libro de geodinámica clásico, cuya primera publicación data de 1967. En éste se explican los modelos geológicos y los modelos físicos que subyacen a la definición de los modelos convectivos.

Además, Schubert y Turcotte son científicos muy reconocidos que se dedican a investigar la geodinámica interna de la Tierra desde la aceptación de la tectónica de placas. Sus primeras publicaciones pueden localizarse a mediados de los sesenta del siglo XX. Incluso, hemos analizado en el capítulo 4 de esta tesis algunos artículos de Schubert junto con otros que nos permitieron reconstruir parcialmente cómo fueron las discusiones de los científicos sobre el modelo de convección en el manto. Estos artículos, desde ya que aportan conocimiento al proceso de objetivación por lo tanto serán parte de este análisis del texto.

Rastreamos por el libro las menciones explícitas e implícitas sobre la controversia que nos ocupa y seguimos el mismo esquema utilizado para analizar L1.

En el prefacio del libro los autores hacen referencia a la decisión de estructurar el libro en base a una serie de preguntas que se focalizan en las discusiones existentes:

We highlight major unanswered questions throughout the text, to focus the discussion and suggest avenues of future research (Schubert, *et al.*, 2001; pp: xiii).

Y también señalan que es en el capítulo 15 que se presentan las discusiones más sobresalientes.

The results presented in this book are summarized in Chapter 15. Throughout the book questions are included in the text to highlight and focus the discussion. Some of these questions have generally accepted answers whereas other answers remain controversial. The discussion given in Chapter 15 addresses the answers or lack of answers, to these questions (Schubert, *et al.*, 2001; pp: xv).

Los autores expresan claramente que aparecen conflictos entre los modelos o bien la existencia de campos poco desarrollados sobre la convección.

Many aspects of the picture remain somewhat blurred, even some of the major ones (pp: 767).

Esto no se restringe a la controversia a la que nos hemos dedicado durante nuestro estudio sino que al tratarse de un campo de investigación a gran escala se trabaja sobre el desarrollo de una multiplicidad de modelos conexos, con lo que ello implica. En especial, la puesta en correspondencia de los modelos con los datos dificulta enormemente la investigación. Sin embargo, hay una referencia a un consenso importante y a la existencia de un campo de investigación en plena actividad.

For some of the questions we have provided definitive answers, for others the answers are either uncertain or completely unknown (pp: 767).

Es decir, que los autores explican a sus lectores que hay un conocimiento común consensuado pero que hay campos aun inexplorados y que hay modelos que están siendo discutidos. Y que además, la controversia de nuestro interés es mostrada como principal entre las discusiones:

Major aspects of mantle convection have remained controversial since the idea was first introduced. Most notable is the controversy concerning layered versus whole mantle convection. (pp: 773)

Y además de otorgarle protagonismo a esta controversia relatan sintéticamente cómo ha ido evolucionando la controversia a lo largo del tiempo:

As the subject has developed, the prevailing opinion has oscillated between these two rather extreme hypotheses. The initial assumption was that the whole mantle is a single convecting system. This view changed with the observation that the subduction zone seismicity terminates at 660 km, which was taken as evidence for layered mantle convection. Recently the pendulum of opinion has swung back, mostly because of seismic tomographic images beneath convergent plate boundaries, which are now interpreted to mean that some form of mantle convection occurs. But it must be noted that geochemical constrains preclude a mantle that has been well mixed by convection. It has also been suggested that a barrier to convection within the lower mantle is consistent with both seismic tomographic and geochemical constrains (pp: 774).

La cita anterior otorga mayor corrección a la hipótesis de convección global. Sin embargo, deposita esta corrección sobre un movimiento pendular, que si bien reconoce que en la actualidad la opinión se volcó hacia la convección global deja abierta la posibilidad de volver a la hipótesis anterior ya que el movimiento pendular no queda detenido en una posición sino que sigue el movimiento. Podemos concluir que la defensa del modelo de convección global, al menos, no es contundente por parte de estos autores, a diferencia de las expresiones de Davies (1999) que hemos analizado anteriormente.

Indagaremos cómo se manifiestan los autores de L3 en relación con el modelo de viscosidad del manto y su relación con la controversia convección global vs. convección estratificada. Para ello, acudimos a la publicación de Glatzmaier y Schubert de 1993 citada en L3 y que ya hemos analizado en el capítulo 4 de esta tesis (ver 4.4.2.6).

No podemos dejar pasar que Turcotte fue partidario de la convección estratificada (ver 3.3.2.5.). Hay una cita muy significativa en el artículo que refiere a ello:

This paper is dedicated to Donald Turcotte, one of the early proponents and investigators of mantle convection, on the occasion of his 60th birthday. Though not a committed advocate of a particular style of mantle convection, his writings reveal some preference for the two-layer style of convection (Glatzmaier & Schubert, 1993; pp: 21970).

En su introducción el artículo de 1993 presenta la controversia citando bibliografía sobre uno y otro modelo:

Two opposite views about the style of mantle convection. Two opposite views are that the mantle convects as a single layer (Schubert, 1979) and that the mantle convects as two distinct layers separated by the 660- km discontinuity (Ritcher and Mc Kenzie, 1981)²⁶. (Glatzmaier & Turcotte, 1993; pp: 21969).

²⁶ Vale la pena destacar que ésta fue la cita que nos llevó a seleccionar los artículos de Schubert (1979) y Ritcher y Mc Kenzie (1981) que hemos utilizado durante el capítulo 4 (ver 4.4.2) para reconstruir el origen de la controversia principal del campo controversial asociado con la convección en el manto.

Las publicaciones citadas fueron de fundamental importancia en nuestra reconstrucción del campo pues brindan información sobre el inicio del campo controversial, como hemos visto a través del capítulo 4 de esta tesis.

En la introducción del artículo de Glatzmaier y Schubert se presentan posibles modelos de convección y se deja abierta la posibilidad de su ocurrencia episódica a lo largo del tiempo:

In yet another model the style of mantle convection changes with time, with the mantle sometimes in the two layer mode and other times in the whole-layer mode (Glatzmaier & Turcotte, 1993; pp: 21969).

Otro dato interesante sobre esta publicación es que su propósito principal es evaluar, a través de modelos numéricos tridimensionales, el modelo de convección estratificada:

Our major purpose here is to present a similar set of numerical computations of the three-dimensional spherical convection of the two-layer mantle style (Glatzmaier & Schubert, 1993; pp: 21970)

Esta publicación revela que tanto Turcotte como Schubert fueron científicos que de alguna manera estuvieron comprometidos con el modelo de convección estratificada. Nos interesa ver si esto se manifiesta en el texto que escriben junto con Olson (Schubert *et al.*, 2001).

Pero ¿qué se dice explícitamente en L3 acerca de la controversia principal? Recordemos que una forma de recorrer el libro es través de la serie de preguntas (ver 5.3.3). Éstas se van respondiendo a lo largo del libro y también en forma sintética durante el desarrollo del capítulo 15.

Nos interesa saber qué preguntas, en primer lugar, refieren en forma directa a la controversia y, en segundo, qué postura toman los autores frente a ésta. Presentamos aquí algunas preguntas que dan cuenta directa o indirectamente de la controversia entre modelos:

- 2.4 What is the fate of descending slabs?
- 2.5 Do slabs cross 660 km depth sink all the way to the core-mantle boundary or do they come to rest at some shallower depth?
- 2.9 Are there plumes in the mantle beneath hot spots, and if so, from what depth(s) do they originate?
- 2.13 What are the forces that drive plate tectonics?
- 3.4 What is the nature of the 660 km seismic discontinuity?
- 3.5 Is the composition of the lower mantle different from that of the upper mantle?
- 3.10 How deep do the upwellings beneath mid-ocean ridges extend into the mantle? What are the implications for the passivity of mid-ocean ridges?
- 3.11 Do subducted slabs penetrate into the lower mantle?
- 3.12 Do some subducted slabs sink all the way to the core-mantle boundary?
- 4.12 What is the cause of deep earthquakes?
- 4.13 How do the major phase transitions between 410 and 660 km depth influence the style of mantle convection?
- 5.1 Is there a low viscosity asthenosphere beneath some plates? What is the viscosity of the asthenospheric material?
- 5.3 What is the dynamical topography associated with mantle convection?
- 5.4 What is the difference between viscosity of the upper mantle and the viscosity of the lower mantle?
- 10.5 Is mantle convection in the Earth partially layered by effects of the 660 km phase change?
- 10.9 Was the Earth's mantle divided into separately convecting upper and lower layers early in the Earth's evolution?
- 13.6 Did layered mantle convection ever occur in the Earth's thermal history?

Nos interesa capitalizar las citas que manifiestan qué postura asume el texto frente a la controversia y para ello seleccionaremos algunas preguntas cuyas respuestas hablen sobre la opinión de los autores sobre uno u otro modelo. Trabajaremos sobre el

pasaje de materia en la zona de transición tanto para las placas que descienden y como para plumas que ascienden.

La pregunta 2.5 alude al pasaje de materia a través de la zona de transición, en este caso de las placas descendentes. En el capítulo 15 esta pregunta se responde de la siguiente manera:

One major question is the depth of penetration of descending slab material (Questions 2.5, 3.11, 3.12). As seen in Figure 15.2, and the images in Chapter 3, mantle seismic tomography is equivocal on this question. In some places the images provide strong evidence that some slabs stall at the 660 km seismic discontinuity, while beneath other convergent margins the slab material appears to penetrate into the lower mantle. But even in these zones, the behavior of the slab material does not appear to conform to a simple steady-state downwelling (Schubert *et al.*, 2001; pp: 774-6).

Esta respuesta tiene que ver con la información que aporta la tomografía sísmica que los autores tildan de ambiguas, lo que pone en duda que ésta represente un método confiable para responder esta pregunta. Luego, las fuertes evidencias son para las placas detenidas y si éstas penetran sólo lo hacen aparentemente.

Estos argumentos ubican a los autores más cerca del modelo de convección estratificada, consideremos la respuesta que se brinda sobre esta cuestión en el capítulo 2 de L3:

Indeed, surveys of all the pertinent seismic evidence (Lay, 1994^a, b, c) come to the conclusion that some slabs penetrate through the transition zone into the lower mantle, while others do not. (Schubert *et al.*, 2001; pp: 35).

La conclusión que se muestra en la cita anterior es que si bien algunas placas atraviesan otras no lo hacen, quedando detenidas.

Por otra parte, en relación con la generación de las plumas térmicas en la base del manto, el argumento que se utiliza a la hora de presentar el modelo de convección global, asume que las plumas atraviesan mientras ascienden la discontinuidad de los 660

km. Veamos la respuesta que se le da a la pregunta 2.9 (2.9 Are there plumes in the mantle beneath hot spots, and if so, from what depth(s) do they originate?) durante el capítulo 15, en un apartado específico (15.3.2 Mantle Plumes):

We now turn to the second generally accepted form of mantle upwelling, mantle plumes beneath volcanic hot spots. Seismic evidence for the existence of mantle plumes is beginning to emerge, but remains fragmentary. Most of the ideas about mantle plumes derive from the widespread and long-held interpretation that many hot spots are the surface expressions of mantle plumes (Question 11.1). Theory and numerical models of convection indicate that mantle plumes originate from instabilities of a thermal boundary layer at the base of the lower mantle, the base of the upper mantle, or both (Questions 2.9, 11.4). (Schubert *et al.*, 2001; pp: 780).

Se hace mención a las conclusiones provenientes de estudios de orígenes distintos; respecto de los sísmicos no se les otorga mucho valor pues se los menciona como estudios preliminares que recién comienzan. Y tanto en relación con los modelos teóricos como con los numéricos se abona la idea de que las plumas pueden surgir del manto inferior pero también del manto superior, lo que habilita la posibilidad de estratificar la convección.

Para que haya convección estratificada es condición necesaria que no haya intercambio de materia entre los mantos superior e inferior. Los autores dejan abierta la posibilidad de que esto suceda a través de placas que son detenidas en la zona de transición y plumas que surgen desde la base del manto superior. Ambos procesos se consideran convección en el manto superior.

Los autores consideran que la zona de transición pudo haber actuado como una especie de filtro en algunas zonas particulares del planeta y en distintos momentos de su evolución. En este sentido, los modelos de convección global y estratificada son dos extremos de una gama de modelos intermedios que se van sucediendo en el tiempo, evolucionando hacia su estado actual que, se cree que atraviesa por un período de convección global.

Figure 15.2 show such a schematic, based on the presumption of some form of convection through the whole mantle, but with the transition zone acting as a partial filter. We

emphasize this is just a schematic of what is in reality a highly time variable flow pattern with multiple spatial scales of motion present simultaneously. (Scubert, *et al.*, 2001; pp: 786).

Esta cita es muy gráfica en lo que a la postura de los autores se refiere respecto de la controversia, considerando que la zona de transición actúa como filtro parcial. Esta postura se diluye a través de la evolución temporal y espacial, dando lugar a concebir la convección estratificada como modo de convección posible de ocurrir en algún lugar y en algún momento de la evolución del planeta.

Esta posibilidad de estratificar la convección es analizada como proceso por los autores en un apartado específico (10. 6 Two-layer Convection) pues consideran que más allá de vigencia geológica actual el modelo estratificado es valioso en sí mismo.

In addition to its possible relevance to convection in the early Earth, two-layer convection is of intrinsic interest as an end-member case in the spectrum of mantle convection models between whole-mantle convection and two-layer mantle convection (Scubert, *et al.*, 2001; pp: 474).

Específicamente, en este apartado se evalúan modelos numéricos tridimensionales estratificados. Si bien en el desarrollo del apartado se reconoce la validez de la hipótesis de convección global, se realza la potencia de analizar la convección estratificada como modo posible de convección y se sigue la publicación de Glatzmaier y Schubert de 1993.

The three-dimensional layered convection model we discuss here is by Galtzmaier and Schubert (1993). (Schubert *et al.*, 2001; pp: 474).

En el apartado 10.6 (Two layer convection) se transfiere parte del desarrollo de la publicación de 1993. Reproducimos a continuación las figuras del artículo que funcionan a modo referencia de L3.

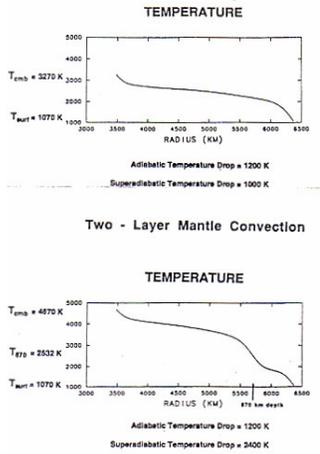


Figura 3: Gráfico de la temperatura en función de la profundidad (Glatzmaier y Schubert, 1993).

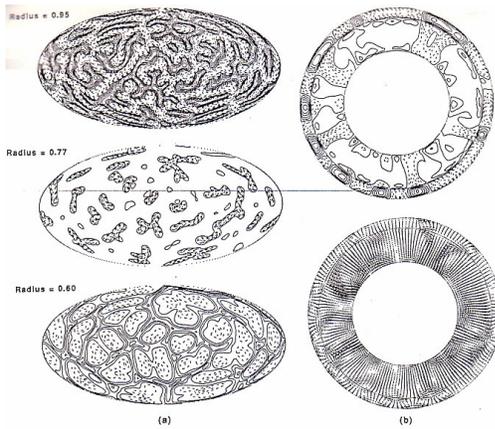


Figura 4: Imagen de anomalías de temperatura en la convección estratificada (Glatzmaier y Schubert, 1993).

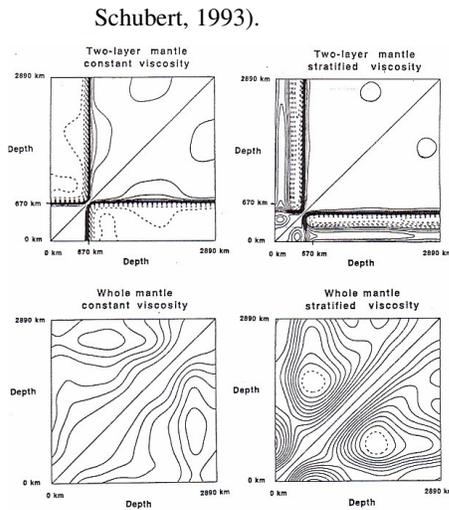


Figura 5: Funciones de correlación (Glatzmaier y Schubert, 1993).

El artículo científico desarrolla ambos modelos de convección en cambio en el libro sólo se transfiere la información relativa a la convección estratificada (Ver Figuras 10.47, 10.48 y 10.49 del Anexo de Figuras de L3). Si se comparan las figuras provenientes de ambas publicaciones puede percibirse el sesgo que hacen los autores del texto. Las figuras son, además, manipuladas en el sentido de que no coinciden plenamente las que se presentan en ambas publicaciones.

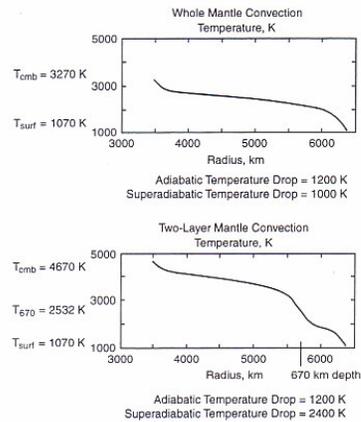


Figura 6: Gráfico de la temperatura en función de la profundidad (Schubert *et al.*, 2001).

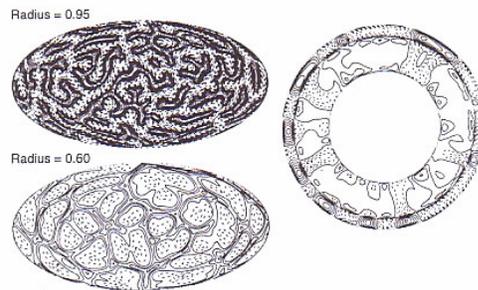


Figura 7: Imagen de anomalías de temperatura en la convección estratificada (Schubert *et al.*, 2001).

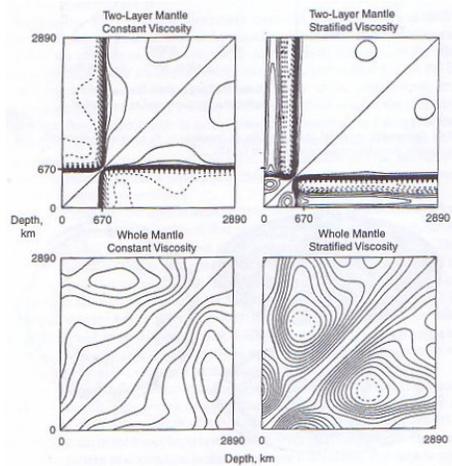


Figura 8: Funciones de correlación (Schubert *et al.*, 2001).

En el desarrollo del artículo y también libro de texto, se evalúa la convección estratificada en relación con dos hipótesis sobre la viscosidad del manto: que sea constante, es decir, que sea la misma entre el manto superior y el inferior o bien que la viscosidad del manto inferior sea 30 veces mayor que la del superior.

En este sentido, en el texto la pregunta 5.4 (What is the difference between the viscosity of the upper mantle and the viscosity of the lower mantle?) plantea explícitamente la diferencia que se estima entre la viscosidad del manto superior e inferior y que según vimos durante el capítulo 5 la viscosidad de ambos mantos difiere en un factor de tres, y en un caso extremo del orden de 30.

Siendo la viscosidad del manto un factor crucial a la hora de definir el pasaje de materia en la zona de transición, veamos cómo se responde esta pregunta:

The differences among the various viscosity models in table 5.2 and in Figures 5.13-5.15 reflect inconsistencies among the methods of inferring viscosity, lack of resolving power in the data and, in addition, the possibility of lateral viscosity variations in the mantle. Even with these complications, it is possible to draw some general conclusions. First, the upper mantle is less viscous than the lower mantle, on average. The difference in average viscosity may only be a factor of 3, or alternatively it may be as much as 30. In either case the difference is substantial for mantle convection processes (Schubert, et al., 2001; pp: 240).

En L3 se considera que un valor admisible del contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior es 3 en lugar de 30 como postula Davies. Un aumento de 30

sería una especie de cota superior que se corresponde con aquellos modelos arrojados por los modelos tomográficos:

The results of this section show that two layer convection does not provide a good model for convection in the Earth's mantle (Schubert *et al.*, 2001; pp: 477).

Síntesis comparativa sobre la objetivación

Hemos visto que los textos analizados responden a dos escuelas diferentes. Hemos profundizado en los aspectos concernientes a la VM por ser el CE que organiza nuestro análisis. Podemos concluir que L1 y L2 sostienen una diferencia de viscosidad entre ambos mantos de un factor de 30, lo que apoya la convección global. En cambio, para L3 la diferencia de viscosidad es a lo sumo de 30, dando lugar a posibles zonas de estratificación de la CM. Otro dato significativo al respecto, es que en L3 se publica concretamente un apartado que desarrolla la convección estratificada.

6.2 Análisis del proceso de Publicidad

Utilizamos nuestra descripción estructural de los textos para rastrear qué representaciones utiliza cada libro de texto. Luego de relevar las representaciones generamos 9 categorías en las que clasificarlas. En realidad 7, el nivel matemático lo discriminamos en tres subniveles (simple, intermedio y avanzado). Abajo sigue una descripción escueta de estas categorías. Una descripción más detallada surgirá del contacto del lector con tales representaciones pues, por un lado, han sido utilizadas durante el desarrollo del capítulo anterior de la tesis y, por otro, adjuntamos un anexo de imágenes que exhibe las figuras que forman parte del análisis de la publicidad.

- Nivel matemático simple (operaciones elementales en R)
- Nivel matemático intermedio (operaciones con cálculo diferencial elemental)
- Nivel matemático avanzado (operaciones con cálculo diferencial avanzado)
- Explicación cualitativa (secuencia de preposiciones que describen y/o explican un hecho o fenómeno)
- Esquema (gráfico que representa una situación simbólicamente)
- Imagen (representación producida por un aparato o mecanismo que interpreta un determinado fenómeno)

- Tabla (organización de datos relacionados dispuestos en una tabla)
- Gráfico cartesiano
- Diagrama (dibujo geométrico que representa una situación o fenómeno)

En forma anexa (ver Anexo de Figuras) se presentan todas las representaciones que utilizan los textos en los capítulos seleccionados para su análisis.

Obviamente, en la macroestructura de todos los textos hay una referencia concreta a la convección del manto, pues ésta era una de las condiciones de la selección de la muestra. En la macroestructura de dos de los textos (L1 y L3) la CM es explícita mientras que L2 es implícita y como ya hemos visto, se desarrolla en un capítulo especial del texto. Esto nos lleva directamente a trabajar sobre la superestructura: ¿qué conexiones conceptuales se generan para explicar la coherencia entre los modelos? Luego indagar qué ofrece la microestructura, la explicación más fina, qué representaciones de la modelización se muestran, se hacen públicas.

6.2.1 Análisis de la publicidad plasmada en L1

Macroestructura

Ya el título de la obra (Plates, Plumes and Mantle Convection) menciona explícitamente que el modelo de convección en el manto es parte central de ésta, se hace público el modelo a través del título.

Superestructura

El texto se subdivide en cuatro secciones que aluden a los orígenes, los fundamentos, la esencia y las implicancias de la CM. El modelo se desarrolla en el capítulo 12 de la sección que refiere a la esencia de la teoría. En realidad, el capítulo 12 es el que culmina el desarrollo de la tercera sección (**Part 3: Essence, Chapters: 8. Convection, 9. Plates, 10. The Plate Mode, 11. The Plume Mode y 12. Synthesis**) y conduce a una síntesis de la teoría. La síntesis es la puesta en correspondencia semántica de otros dos modelos, los modos placa y pluma, modelos de convección que ocurren con bastante independencia uno de otro.

La superestructura propuesta por el libro conduce a comenzar con los orígenes históricos de la teoría (Origins), luego, explicar los (sub)modelos que fundamentan los modos placa y pluma, desarrollarlos (Foundations), hacer una síntesis de la teoría (Essence) integrando los modelos de los capítulos anteriores en un único modelo y, por último, analizar las implicancias de este modelo desde la perspectiva química, por un lado y evolutiva, por otro (Implications).

Nos centramos en el capítulo 12 que presenta la síntesis y a través del MVM analizamos las representaciones que se utilizan para comunicarlo a través del texto. Tal es así que profundizamos en uno de sus modelos, el modo placa de convección. Por ello, iremos al capítulo 10 en el que éste se desarrolla y por último, a fin de analizar en mayor profundidad algún aspecto del modo placa, nos dirigimos al capítulo 6 en el que se desarrolla el MVM. Nuestro análisis se centra en dos capítulos de la tercera sección (Essence) el 12 y el 10, es el 12 el que envía al lector al capítulo 10 a través de las citas. Y una vez en el 10, las citas envían al lector al capítulo 6, para conocer los fundamentos asociados con nuestro CE. Para saber qué se explica y con qué representaciones se lo hace bucaremos a través de la microestructura en estos capítulos.

Microestructura

Haremos una descripción general de cómo opera la publicidad en los tres subniveles que componen la microestructura, qué representaciones utiliza el autor para comunicar la construcción del MCM. Exhibiremos un cuadro que permita sintetizar qué representaciones se usaron para desarrollar los tres subniveles y, con ello, los públicos a los que se dirige el texto.

6.2.3.1 Supraordenación

a) Publicidad del MCM: nivel descriptivo

El capítulo 12 (Synthesis) presenta el MCM, el funcionamiento del modelo a través de un esquema general (Ver Anexo, L1, fig. 12.1) y una explicación cualitativa (ver 5.1.3.), es una especie de presentación de conjunto del MCM. Se desarrollan descriptivamente, además, problemas teóricos y empíricos que enfrenta el MCM en relación con otros modelos.

Las citas que sustentan las proposiciones semánticas remiten al lector al interior del libro de texto. Son las citas que vinculan al MCM con otros modelos posibilitando el acceso a su construcción, conectando las partes en el libro de texto. Las citas proponen ampliar una proposición o justificarla conectando explícitamente al MCM con otros capítulos y apartados del texto pero también con publicaciones externas a éste.

El capítulo 12 presenta el MCM con diferentes representaciones:

Descripción cualitativa

12.1 Esquema (Convección)

12.2 Imagen (satelital Topografía del fondo oceánico)

12.3 Imagen (Anomalías de la topografía oceánica)

12.4 Esquema (Evolución del manto durante el período cretácico)

12.5 Gráfico cartesiano (Perfil topográfico)

12.6 Imagen (Simulación numérica)

12.7 a Gráfico cartesiano (Perfil topográfico)

12.7.b Gráfico cartesiano (Perfil topográfico)

12.8 a Imagen (Simulación numérica)

12.8.b Gráfico cartesiano (Perfil topográfico)

		Capítulo 12	
Nivel matemático	Simple	X	
	Medio		
	Avanzado		
Explicación cualitativa		X	
Esquema		2	
Imagen		4	
Tabla			
Gráfico cartesiano		4	
Diagrama			

b) Publicidad del MCM: nivel explicativo

Las relaciones entre el MCM y otros modelos presentes en el texto se erigen alrededor de los modos de convección que se presentan y fundamentan en los capítulos 10 y 11 (Chapter 10: The Plate Mode y Chapter 11: The Plume Mode). Nuestro análisis se realizó sobre el capítulo 10, que desarrolla el modo placa, tal como hemos visto (ver 5.1.3.2.1.1), en especial lo indagamos a través del rol que juega el MVM en este modo de convección.

El MVM está presente en el desarrollo general de todo el capítulo 10 que se desarrolla en forma *cuasi* cualitativa porque sólo dos veces se utilizan fórmulas matemáticas básicas. Si bien nuestra descripción estructural de este capítulo es acotada creemos que para tener una idea más cabal de su desarrollo general describiremos todas las representaciones que aparecen, pues el MVM explicita o implícitamente permea toda su estructura y esto se manifiesta a través de dichas representaciones.

Se utilizan las siguientes representaciones:

Descripción cualitativa

Nivel matemático simple

10.1 Imagen (Simulación numérica)

10.2 Imagen (Simulación numérica)

10.3 Imagen (Simulación numérica)

10.4a Imagen (Simulación numérica)

10.4b Imagen (Simulación numérica)

10.4c Gráfico cartesiano (Flujo vs escala horizontal)

10.4d Gráfico cartesiano (Flujo vs escala horizontal)

10.5 Imagen (Simulación numérica)

10.1T Tabla

10.6 Imagen (Simulación numérica)

10.7 Imagen (Simulación numérica)

10.8a Gráfico cartesiano (Perfil topográfico)

10.8b Imagen (Simulación numérica)

10.9a Gráfico cartesiano (Perfil topográfico)

10.9b Imagen (Simulación numérica)

10.9c Gráfico cartesiano (Perfil topográfico)

10.9d Imagen (Simulación numérica)

10.10 Gráfico cartesiano (Flujo de calor vs distancia)

10.11 Imagen (Simulación numérica)

10.12 Imagen (Simulación numérica)

10.13 Imagen (Simulación numérica)

c) Publicidad de la controversia principal

Por el sentido epistemológico de esta tesis, nos interesa especialmente ver cómo se filtra la controversia en el texto a través de nuestro concepto estructurante. Hay dos menciones que conectan la controversia con el MVM: una general cuando se la introduce (12.3 Layered mantle convection):

There is also quite strong evidence for substantial variation of viscosity with depth, as discussed in Chapter 6. (pp: 338).

Y otra cita en el apartado 12.3.1 (Review of the evidence) en el que se revisan las evidencias para justificar el modelo de viscosidad elegido:

Another argument was presented by Richards and Hager (23)²⁷, based on the occurrence of positive geoid and gravity anomalies over subduction zones (see Figure 4.9 and Section 6.9.3). (pp: 338).

La cita apoya la hipótesis que sostiene que la viscosidad varía con la temperatura, en vez de ser constante. Conociendo la trama del capítulo 6 (6.9.3 Subduction zone geoids) podemos afirmar que esta variación es del orden de 30 como postulan Richards and Hager:

Analyses by Richards, Hager and coworkers yielded three important conclusions. The first is that there is an increase in mantle viscosity with depth, located roughly within the transition zone, by a factor between 10 and 100, with a preferred value of about 30 (pp: 165).

Una conclusión importante es que la controversia, a través del CE, solapadamente se traslada al capítulo 6, en el que se explica la construcción del MVM,

²⁷ M. A. Richards and B. H. Hager, The earth's geoid and large-scale structure of mantle convection, in: *Physics of the Planets*, S.K. Runcorn, ed. Wiley, New York, 247-272, 1988.

pero utilizando modelos que postulan que la viscosidad varía con la profundidad, lo que indirectamente apoya la hipótesis a favor de la convección global.

		Capítulo 10	
Nivel matemático	Simple		X
	Medio		
	Avanzado		
Explicación cualitativa		X	
Esquema			
Imagen		14	
Tabla		1	
Gráfico cartesiano		6	
Diagrama			

6.2.3.2 Subordinación

a) Publicidad del sustento conceptual

El MVM es introducido en el texto en la primera sección (*Part 1: Origins*) en la que el autor lo introduce a través un capítulo de corte histórico (Chapter 3), en el que se alude al rebote postglacial (ver 5.1.3.2.1.2 y 5.1.3.3).

En la segunda sección (*Part 2: Foundations*), específicamente en el capítulo 6, se hace una primera presentación cualitativa de los factores que intervienen en la definición del MVM utilizando analogías y comportamientos materiales conocidos, sin precisar con mayor rigurosidad *cómo* se estudia el comportamiento de los materiales en detalle (ver 5.1.3.1., en especial: 5.1.3.3.1), que se desarrolla más adelante en este mismo capítulo. Entre los conceptos fundamentales que permiten comprender qué es la viscosidad, en particular del manto, se encuentra el *esfuerzo*. Se trata de un modelo de origen físico que se explica en forma muy simple en este primer apartado (6.1 *Simple viscous flow*) y que luego se retoma con mayor detalle en el apartado siguiente (6.2 *Stress*).

El modelo que da cuenta del esfuerzo (ME) se desarrolla de forma similar a otros modelos que forman parte de una secuencia que sustenta el abordaje geológico estructural (6.2 Stress, 6.3, Strain, 6.4 Strain rate y 6.5 Viscosity), que posibilita el estudio del flujo de un material, en especial el del manto.

Hay un primer apartado (6.1 Simple Viscous Flow) que presenta un panorama descriptivo sobre qué es un fluido en términos mecánicos, con lenguaje conceptual accesible y referencias generales que no dan cuenta de los comportamientos mecánicos de detalle. Éstos se desarrollan en los apartados siguientes.

To guide readers, some of the sections are marked Intermediate or Advanced. These levels indicate the mathematical level. The essence of the chapter can be obtained just from the unlabelled sections (6.1, 6.7, 6.81, 6.9, 6.10). The important concepts and results are presented in those sections with minimal mathematics.

Hemos visto (ver 5.1.3.2.2) que el primer apartado devela qué parámetros se utilizan para presentar el modelo de un fluido newtoniano cualitativamente en una dimensión. Luego, en los siguientes apartados se desarrolla cada uno de estos parámetros por separado. Estos apartados desarrollan la explicación del esfuerzo, la deformación, la tasa de deformación y la viscosidad remitiéndose a la mecánica de fluidos, profundizando disciplinarmente.

Recordemos que cuando tratamos sobre las características generales de L1 a través de su macroestructura (ver 5.1.1.) notamos que el autor selecciona niveles de matematización diferentes (*Intermediate* y *Advanced*) y explicita que estos niveles de corte más matemáticos no son estrictamente necesarios para comprender el fenómeno (ver 5.1.1.2) aunque sí para profundizar su análisis.

Se explica el modelo de esfuerzo en un plano y luego se generaliza al espacio tridimensional a la vez que se introduce una notación que facilita las expresiones vectoriales y tensoriales. Este desarrollo se enmarca en el nivel que el autor denomina *intermedio*. Vale la pena notar que el desarrollo de nivel *avanzado* se utiliza al plantear algunas formas económicas de las ecuaciones de flujo (6.6.4 *Stream function and force*

balance in cylindrical coordinates) y la solución de las ecuaciones antedichas para una esfera sólida que asciende en un fluido viscoso (6.8.2 *Flow solution*). Ambos apartados presentan un modo riguroso de análisis pero son soluciones particulares de casos más generales, soluciones que se “ajustan” a los problemas de los que se quiere dar cuenta.

Since my focus here is on presenting the central physical arguments in the most direct possible way, rather than on mathematical elaborations, I give only an abbreviated development here, fuller treatments being available elsewhere {2,3} (Davies, 1999; pp: 145).

La enseñanza rigurosa de los modelos físicos se deposita en un texto clásico de dinámica de fluidos: Batchelor, *An introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, (1967), y también en textos especializados que incluyen publicaciones científicas en los que se exhiben estas soluciones, esta forma de conectar los modelos físicos a los marcos condicionales de la Tierra.

b) Representaciones utilizadas

El capítulo 6 presenta el MVM con diferentes representaciones. Antes de encararlas en su totalidad nos centraremos en los apartados que hemos analizado en detalle durante el capítulo 5 de esta tesis (ver....). Veremos cómo explica un concepto físico, con qué representaciones se lo hace y cómo se lo utiliza en el MVM.

(i) Descripción básica del modelo de fluido viscoso

6.1 Simple viscous flow

Descripción cualitativa

Nivel matemático básico

6.1 Diagrama (Fluido viscoso)

Capítulo 6	Modelo básico de fluido viscoso
Nivel matemático	
Simple	X
Medio	
Avanzado	
Explicación cualitativa	X

Esquema	
Imagen	
Tabla	
Gráfico cartesiano	
Diagrama	1

(ii) Descripción del esfuerzo como modelo físico subsumido en el modelo de fluido viscoso

6.2 Stress

Descripción cualitativa

Nivel matemático Medio

6.2a Diagrama (Transmisión de fuerzas a través de un material)

6.2b Diagrama (Componentes del esfuerzo)

Capítulo 6	Modelo físico subsumido
Nivel matemático	
Simple	
Medio	X
Avanzado	
Explicación cualitativa	X
Mapa	
Esquema	
Imagen	
Tabla	
Gráfico cartesiano	
Diagrama	2

6.2.3.3 Coordinación

a) Generalidades

Se desarrolla cualitativamente la idea de que a escala de tiempo geológico el manto se deforma como un fluido viscoso. El rebote postglacial y las anomalías del

geoide son los fenómenos que clásicamente funcionan como referentes a la hora de evaluar el modelo de fluido que se postula.

El autor presenta un esquema explicativo sobre el rebote postglacial. La explicación se basa en la resolución de una ecuación diferencial clásica. Luego se resuelve una situación de una complejidad matemática un poco mayor al considerar que la superficie terrestre se ve perturbada por un movimiento armónico simple. Por último se presentan estimaciones recientes sobre el rebote postglacial.

En relación con las anomalías del geoide el texto modela las placas subducidas como una masa de alta densidad que penetra en el manto, considerando que la variación de densidad también causa desviaciones verticales en la superficie de la Tierra y en las interfases interiores del manto que, a la vez, contribuyen perturbar el campo gravitatorio.

Este abordaje del problema se atribuye especialmente a Richards y Hager y se presenta, además, en la publicación de Davies & Richards (1992) que analizamos en el capítulo 3 de esta tesis.

b) Representaciones utilizadas

Analizamos las representaciones que se utilizan para desarrollar el apartado 6.9: Viscosity of the mantle

Nivel matemático Medio

Explicación cualitativa

6.12 a Gráfico cartesiano (Cambios en el nivel del mar)

6.12 b Esquema (Secuencia de deformación debido a glaciación)

6.13 Gráfico cartesiano (Variación del nivel del mar)

6.14 Esquema (Posibles modelos de deformación del geoide)

Capítulo 6	Aspectos empíricos
Fórmuleo	
Simple	X

	Medio		X	
	Avanzado			
Explicación cualitativa		X		
Esquema		2		
Imagen				
Tabla				
Gráfico cartesiano		2		
Diagrama				

Hasta aquí hemos relevado qué representaciones se utilizan según las categorías microestructurales definidas en forma separada. Resulta interesante relevar todas las representaciones del capítulo 6 para así ver diferentes cosas, el peso relativo de las representaciones usadas en nuestros análisis y qué tipo de representaciones se utilizan para desarrollar los fundamentos del MCM, en general.

Explicación cualitativa

Nivel matemático (Todos los niveles)

6.1 Diagrama (Fluido viscoso)

6.2a Diagrama (Transmisión de fuerzas a través de un material)

6.2b Diagrama (Componentes del esfuerzo)

6.3 Diagrama (Diferencias entre desplazamiento y deformación)

6.4 Diagrama (Flujo entrante y saliente)

6.5 Diagrama (Definición de la función de corriente)

6.6 Diagrama (Coordenadas cilíndricas)

6.7 Diagrama (Flujo en un gradiente de presión)

6.8 Diagrama (Balance de fuerzas en un fluido viscoso)

6.9 Diagrama (Velocidad de una esfera en ascenso flotacional)

6.10 Diagrama (Ascenso flotacional de una esfera en coordenadas esféricas y cilíndricas)

6.11 Diagrama (Componentes del esfuerzo en una superficie esférica)

6.12 a Gráfico cartesiano (Cambios en el nivel del mar)

6.12 b Esquema (Secuencia de deformación debido a glaciación)

6.13 Gráfico cartesiano (Variación del nivel del mar)

6.14 Esquema (Posibles modelos de deformación del geoide)

6.15 Diagrama (Relaciones entre las componentes normal y de cizalla del esfuerzo)

6.16 Diagrama (Círculo de Morh)

6.17 Diagrama (Distintos tipos de fallas: normal, inversa y transformante)

6.18 Gráfico cartesiano (Variación de la viscosidad con la temperatura)

		Capítulo 6
Fórmuleo	Simple	X
	Medio	X
	Avanzado	X
Explicación cualitativa	X	
Mapa		
Esquema	2	
Imagen		
Tabla		
Gráfico cartesiano	3	
Diagrama	15	

6.2.1.4 Conclusiones parciales

Las tablas hasta aquí presentadas ofrecen información parcial sobre cuántas y qué tipo de representaciones se utilizan para desarrollar diferentes aspectos del MCM a través de nuestro abordaje microestructural. Encontramos interesante componer en una única tabla toda esta información para así compararla y poder establecer algunas conclusiones parciales.

		Cap. 12	Cap.10	Cap. 6	MFV	ME	Datos
Fórmuleo	Simple	X	X	X	X	X	X
	Medio			X		X	X
	Avanzado			X			

Explicación cualitativa	X	X	X	X	X	X
Esquema	2		2			2
Imagen	4	14				2
Tabla		1				
Gráfico cartesiano	4	6	3			2
Diagrama			15	1	2	

Tanto el capítulo 12 como el 10 presentan los modelos con explicaciones discursivas conceptuales casi sin acudir a la matemática, en general. Hay una única fórmula de nivel básico en todo el capítulo. Se ofrecen argumentaciones y justificaciones a través de citas que conectan con otras partes del libro (sección, capítulo o figura) u otras publicaciones externas en general. Se brinda una visión de conjunto con algunas imágenes, gráficos y esquemas y se señala un recorrido que posibilita profundizar en cada aspecto de la temática.

El capítulo 12 presenta una síntesis conceptual del MCM. Las representaciones presentes son 4 imágenes, 4 gráficos cartesianos y 2 esquemas. A este capítulo se accede con conocimientos de geología general, física general y matemática básica.

Si se ingresa al texto por este capítulo se pueden desarrollar posibles recorridos que permiten ampliar la información. Este *ampliar* puede implicar conocer un dato o un modelo o también justificar la procedencia de un determinado resultado.

En el capítulo 12 se apoya la hipótesis que postula un manto inferior con una viscosidad 30 veces mayor que la del manto inferior, argumento que favorece que la convección sea global en vez de estratificada. Pero también en este capítulo se explicita la existencia de la controversia objeto de nuestro análisis.

Puede deducirse que en el desarrollo del capítulo 12 se hacen públicas varias cuestiones unas de orden epistemológico o metadiscursivo y otras de índole conceptual. En el plano epistemológico, el autor presenta la convección global modelo *oficial* del texto aunque también hace pública la existencia del campo controversial. En el plano

conceptual, se justifica y argumenta sobre esta elección conduciendo al lector a otras instancias textuales a través de las citas internas y externas del texto. En especial, en nuestro recorrido, para justificar su hipótesis sobre la diferencia de viscosidad entre los mantos superior e inferior, se conduce al capítulo 10, por un lado, y al 6, por otro. Conceptualmente, se hace pública qué incidencia tiene el MVM en el modo placa.

El capítulo 12 muestra la dinámica general del planeta a través de la CM. El autor muestra la existencia del campo controversial en este mismo capítulo. Entre estos aspectos polémicos se encuentra el contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior con el que hemos develado qué hipótesis se sostiene y a partir de qué citas. Vale la pena señalar un detalle: el apartado 6.9.3 (Subduction zone geoids) justifica dicho contraste en publicaciones de Hager, entre las que figura una en la que trabaja con Richards. Recordemos que Richards es coautor de Davies en la publicación de 1992, en la que se presenta y desarrolla la propuesta de convección global. En ésta se encuentra el mismo gráfico y el análisis de los mismos casos que se exhiben en el libro, aunque en la publicación con un poco más de detalle, como ya hemos visto. Hager y Richards.

Cuando se comparan los tipos de representaciones que ofrece cada capítulo de los analizados se percibe que en el capítulo 12 se desarrolla con matemática básica, algunos gráficos e imágenes y el 10 se desarrolla con un mayor número de imágenes, que resultan ser un medio gráfico muy sintético de presentar información. En contraste, en el capítulo 6 no se presentan imágenes pero se incluye un gran número de diagramas para explicar los modelos físicos²⁸. Es posible acceder en este capítulo al MV de manera elemental (6.1 Simple Viscous Flow), con explicaciones cualitativas, como se ve en el cuadro. A medida que se profundiza el modelo aumenta su nivel matemático, como se ve en el cuadro que desarrolla el modelo de esfuerzo, cuya comprensión involucra poder resolver las soluciones de las ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso, que incluye trabajar con el nivel matemático que hemos denominado avanzado.

Tanto en el capítulo 12 como en el 10 se propone al lector conocer, a través de una cita, el detalle de la justificación de la hipótesis que postula un contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior de 30 a través del apartado 6.9.3. Para

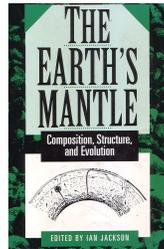
²⁸ La comprensión profunda de estos modelos requiere, en el ámbito de la FCEN haber alcanzado asignaturas como Física IV, Mecánica Clásica y Mecánica de Fluidos.

acceder al capítulo 10 (Chapter 10: The plate mode) hace falta el mismo nivel de conocimiento que para el 12 (Chapter 12: Synthesis) pero, en cambio, para el 6 (Chapter 6: Flow) hace falta mayor conocimiento de matemática, física, geología y geofísica, para lograr una comprensión profunda. Las representaciones matemáticas que presenta el texto incluyen, fundamentalmente, integrales en varias dimensiones, álgebra vectorial (operadores) y ecuaciones diferenciales. La formación matemática necesaria para acceder a estas representaciones implica haber transitado varios niveles de matemática universitarios²⁹. Claramente, esta necesidad de conocimiento matemático para interpretar este tipo de representación ejerce un fuerte factor de selección del público al que se dirige el texto.

6.2.2 Análisis de la publicidad plasmada en L2

6.2.2.1 Macroestructura

La publicidad del MCM a través de la macroestructura es implícita aunque en la portada del libro exhibe el esquema de la convección global, el mismo que se publica por primera vez en el artículo de Davies y Richards de 1992. Es decir, que se explicita no sólo que el libro trata de la convección sino que además postula el modelo de convección global.



6.2.2.2 Superestructura

El texto se subdivide en tres secciones. El MCM se desarrolla en el capítulo 5 (Plates, Plumes, Mantle Convection and Mantle Evolution) que presenta una síntesis de

²⁹ En el caso de la FCEN en la UBA el nivel de matemática necesario para comprender el aporte de estas representaciones implica haber alcanzado el nivel que brindan materias como Matemática 4 y Cálculo Numérico que dicta el Departamento de Matemática, que son obligatorias para la formación de un físico pero no de un geólogo

la teoría. Este capítulo forma parte de la segunda sección (Dynamics and Evolution of the Earth's Mantle) y recordamos que su autor es Geoffrey Davies.

Ya en el prefacio el compilador establece el modelo de CM que se sostiene a lo largo del texto.

All of these inferences are consistent with a model of whole-mantle convection in which old cold slabs descend well into the lower mantle, because of the higher viscosity. In this scenario, plumes rise from the thermal boundary layer at the base of the mantle, with narrow conduits or tails feeding large mushroom-shaped heads that grow by surrounding mantle (Jackson; pp: xxiv).

También en el prefacio se establece la centralidad que poseen los datos que provienen de evaluar la VM para apoyar la convección global.

Microphysical rheological models for the deep mantle, based on extrapolation of experimentally determined flow laws for analogue materials, are most readily reconciled with those for derived from analyses of glacial-rebound phenomena within a whole-mantle convection scenario in which there are no mid-mantle thermal boundary layers (Jackson; pp: xxiv).

Una característica general de la superestructura es que su subdivisión en secciones señala tres líneas principales de investigación que se llevan adelante en *Research School of Science*, una relativa al proceso de formación de la Tierra (Part 1: Accretion and Differentiation of the Earth), otra en relación con la dinámica y la evolución del manto terrestre (Part 2: Dynamics and Evolution of the Earth Mantle) y una última que refiere a la estructura y al comportamiento mecánico del manto moderno (Part 3: Structure and Mechanical Behaviour of the Modern Mantle).

La secuencia de partes y capítulos responde a la integración de diferentes perspectivas que se presentan con un orden semántico coherente y se complementan entre sí para ofrecer una visión global de la dinámica planetaria desde una perspectiva evolutiva. Sin embargo, cada capítulo se puede abordar en forma aislada para profundizar una determinada temática. En este sentido, cada capítulo es una especie de monográfico sobre el tema que desarrolla.

Nuestro análisis se centro en dos capítulos, el 5 (Chapter 5: Plates, Plumes, Mantle Convection and Mantle Evolution) que presenta el modelo general de CM y el 10 (Chapter 10: The Viscosity of the Mantle from Analyses of Glacial-Rebound Phenomena) que estudia la viscosidad del manto a partir del rebote postglacial.

Según vimos el capítulo 5 se ubica junto con otros en la segunda parte o sección del libro. En éste se presenta un panorama de conjunto de la convección global. Y el capítulo 10, ubicado en la tercera sección, considera un análisis detallado de la construcción de los datos asociados a la VM en función del rebote post-glacial.

6.2.2.3 Microestructura

Haremos una descripción general de cómo opera la publicidad en dos de los tres subniveles que componen la microestructura dado que, como ya hemos señalado, este texto se destina a estudiantes avanzados, no se enseñan modelos físicos considerados básicos para las formulaciones que se proponen. Esto motivó que no hayamos analizado la subordinación semántica relativa a este libro de texto. Haremos el análisis de la publicidad en relación con la supraordenación semántica (capítulo 5) y la coordinación semántica (capítulo 10), relevando qué representaciones utilizan para enseñar los modelos científicos. Exhibiremos un cuadro que permita sintetizar qué representaciones se usaron para desarrollar los subniveles y, con ello, los públicos a los que se dirige el texto.

6.2.2.3.1 Supraordenación

a) Publicidad del MCM

Exploraremos qué cuestiones se hacen públicas al interior del modelo a través del CE, la VM. En el desarrollo del capítulo 5 se hace una mención temprana de la VM en su introducción. Luego, se acude a su pertenencia en la definición de los modelos numéricos que permiten simular el comportamiento del manto. También se desarrolla un subapartado especial (5.9.2. Viscosity Stratification) en el que se modela el contraste de la viscosidad entre el manto superior e inferior a partir de los datos provenientes del rebote postglacial y las anomalías del geoide.

En general, se trata de un capítulo de tipo descriptivo explicativo que se desarrolla con matemática básica y diferentes tipos de representaciones, las que describiremos a continuación:

El capítulo 5 presenta el MCM con diferentes representaciones:

Descripción cualitativa

Nivel matemático simple

5.1 Esquema (Distintos tipos de convección; a, b y c)

5.2 Esquema (Topografías asociadas con los modos de convección placa y pluma; a y b)

5.3 Esquema (Desviación de la litosfera subducida)

5.4 Imagen (Simulación numérica)

5.5 Imagen (Simulación numérica)

5.6 Gráfico Cartesiano (Evolución térmica del manto; a, temperatura vs. tiempo, b, flujo de calor vs. tiempo)

5.7 Gráfico Cartesiano (Evolución térmica del manto; a, temperatura vs. tiempo, b, flujo de calor vs. tiempo)

5.8 Esquema (Distintos modelos tectónicos; a y b)

		Capítulo 5
Nivel matemático	Simple	X
	Medio	
	Avanzado	
Explicación cualitativa		X
Mapa		
Esquema		8
Imagen		2
Tabla		
Gráfico cartesiano		4
Diagrama		

b) Publicidad de la controversia

En el desarrollo del capítulo 5 hay un apartado que analiza las evidencias que justifican que la convección no se separe en dos sistemas separados aludiendo a la existencia de una posible barrera de paso del flujo en discontinuidad de los 660 km. (5.8 A Barrier at a Depth of 660 km?). En este apartado se desarrollan tres clases de evidencias que sustentan que no existe tal barrera y se dirige al lector al artículo que publicaron Davies y Richards en 1992. La cita concretamente dice:

There has been some question whether or not the mantle is divided into two separately convecting layers at a depth of 660 km., where seismic wavespeeds and density increase discontinuously. We shall examine three kinds of evidence: seafloor tomography, and numerical modelling. Many other arguments, including an important argument from the gravity field, were discussed by Davies and Richards (1992), and they judged there that the evidence either supports the conclusion suggested here or is not inconsistent with (Davies, 1998; pp: 239).

Esta cita es muy significativa pues hace referencia concreta a la controversia y además, brinda información sobre los aspectos a desarrollar al interior del capítulo y de una publicación clave de Davies y Richards de 1992, como hemos visto a través de la sincretización, en la que se presentan las características del MCM global y su relación con los datos.

Hay una mención explícita al MVM cuando se refiere a la información que aportan los modelos numéricos, pues se consideran los resultados de evaluar un manto con viscosidad constante o variable, que generalmente se estudia como una estratificación viscosa o contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior. En especial, en el apartado 5.9.2 (Viscosity Stratification) se explicita la relación de dicho contraste con otras publicaciones que permiten ampliar el tema y, además, se dirige al lector al capítulo 10. Veamos cómo se dice:

Modelling of both post-glacial rebound (Mitrovica, 1996; Lambeck y Johnston, Chapter 10, this volume) and the gravity field over subduction zones (Richards and Hager, 1988) indicates that the viscosity of the mantle increases with depth (Davies, 1998; pp: 246).

En esta cita se pone de relieve que a través del capítulo 10 del libro se desarrolla el modelo que vincula al rebote postglacial con la VM y que, además, está en concordancia con el modelo que él mismo desarrolla. También se referencia a la

publicación de Richards y Hager de 1988 a la que también se refiere en las publicaciones de Davies de 1992 y 1999. Incluso, en estas dos últimas, se publica el esquema que originalmente publican Richards y Hager en 1988.

6.2.2.3.2 Coordinación

Limitaremos nuestro análisis al relevamiento del tipo de representaciones que utilizan para desarrollar la VM a través del capítulo 10 (Chapter 10: Viscosity of the Mantle: Evidence from Analyses of Glacial-Rebound Phenomena (Lambeck & Johnston)).

Nivel matemático: Avanzado

Explicación cualitativa

10.1 Esquema (Espectro de procesos de deformación terrestre)

10.2 Gráficos Cartesianos (a, b, c y d, casos diferentes datos y predicciones respecto de los niveles del mar vs. del tiempo)

10.3 Esquema (Variación del nivel del mar; a, b y c, casos diferentes)

10.4 Gráficos cartesianos (nivel del mar relativo vs. a: longitud, b y c: tiempo)

10.5 Esquema (Variación del nivel del mar; a y b, casos diferentes)

10.6 Gráficos cartesianos (nivel del mar vs. tiempo; 11 casos diferentes)

10.7 Gráfico cartesiano (Viscosidad relativa, manto superior vs. manto inferior)

10.8 Gráfico cartesiano (grosor de la litosfera vs. viscosidad del manto superior)

10.9 Gráfico cartesiano (Geometría orbital para satélite terrestre cercano)

Tabla 10.1 (Parámetros orbitales)

10.10 Gráficos cartesianos (Viscosidad relativa; tres casos diferentes)

10.11 Gráficos cartesianos (Viscosidad relativa; dos casos diferentes)

10.12 Esquema (Espectro de la viscosidad en relación con la profundidad)

Capítulo 10	Aspectos empíricos				
Nivel matemático					
<table border="1"> <tr> <td>Simple</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Medio</td> <td></td> </tr> </table>	Simple		Medio		
Simple					
Medio					

	Avanzado		X
Explicación cualitativa		X	
Esquema		7	
Imagen		0	
Tabla		1	
Gráfico cartesiano		26	
Diagrama			

		Cap. 5	Cap. 10
Nivel matemático			
	Simple	X	
	Medio		
	Avanzado		X
Explicación cualitativa		X	X
Esquema		4	7
Imagen		2	
Tabla			1
Gráfico cartesiano		2	26

6.2.2.4 Conclusiones parciales

El libro presenta 11 monográficos que brindan un modo de penetrar en diferentes aspectos de la evolución del manto terrestre a lo largo del tiempo geológico. Su propuesta se estructura a través de la evolución planetaria destacando el rol clave que juega el manto en ella.

El capítulo 5 puede caracterizarse como accesible a un público general, ya que la teoría de CM se presenta cualitativamente ofreciendo un panorama general, como ya hemos descrito. Se utilizan algunas representaciones que ayudan a generar una imagen general del funcionamiento del manto terrestre y su evolución en el tiempo. En este capítulo se explicita la publicación de 1992 de Davies como reveladora de la justificación de múltiples aspectos involucrados en la CM. Además, se hacen explícitas las citas que permiten rastrear el MVM, las publicaciones sobre las que se afirma el

autor, y con ello, el compilador, para sostener un MVM que favorece, como hemos constatado, al MCM global. A través de estas citas se devela el trabajo conjunto de investigadores en temas de mutuo interés y cómo éstos se utilizan de sustento para justificar las explicaciones que se ofrecen en el entramado del libro de texto. Particularmente se dirige al lector al capítulo 10 para justificar su elección del valor del contraste de la viscosidad entre el manto superior e inferior.

En relación con MVM, el capítulo 10 supone que el lector está habituado a manejar un nivel matemático avanzado. No se desarrollan los modelos físicos y reológicos elementales que permitan acceder a la especificidad conceptual que se propone. La relevancia de evaluar la VM y el contraste de viscosidad entre ambos mantos es un modo de comparar los hechos del mundo con los modelos teóricos y, a su vez, presentar una construcción conceptual coherente al interior de un fenómeno (el rebote postglacial) y, con ello, la coherencia de los modelos implicados que, en especial, sus aparatos formales se hacen públicos a través de este capítulo.

Respecto de las representaciones con las que se aborda la VM, en especial en lo que al rebote postglacial se refiere, se utilizan varias representaciones que exhiben compactos de información en relación con la puesta en correspondencia de los modelos con los datos. La falta de desarrollo de los modelos físicos y el nivel avanzado de matemática que propone el capítulo 10 claramente indican que se trata de una enseñanza específica pero también se utilizan diferentes representaciones que ofrecen otra forma de interpretar el tema.

En relación con la publicidad de la controversia, un dato interesante a nuestros ojos es que el esquema de la publicación de Davies y Richards (1992) se utiliza como ilustración de la portada del libro que compila Jackson. Claramente, este libro es una publicación que presenta la producción científica de una institución (*Research School of Earth Science*) que cuenta con una tradición ya establecida y sostiene al modelo de convección global.

En general en el libro se hace hincapié a la evolución planetaria y no se da un lugar muy trascendente a la controversia pues, como hemos visto a través de la sincretización, la perspectiva planetaria, por un lado y, la evolutiva, por otro, ponen un

poco al costado esta discusión. Sin embargo, su falta de protagonismo está en tensión con su posible ocultamiento y normativización a través de la postura *cuasi* hegemónica que presenta el libro.

6.2.3 Análisis de la publicidad plasmada en L3

6.2.3.1 Macroestructura

La mención a la convección en el manto es explícita en el título del libro pero se señala también la centralidad del enfoque planetario.

6.2.3.2 Superestructura

El texto no se subdivide en secciones. El MCM se desarrolla en el capítulo 15 (Chapter 15: Nature of Convection in the Mantle), el último del texto y presenta una síntesis de la teoría. Trabajaremos sobre este capítulo y a través del MVM analizaremos las representaciones que se utilizan para comunicarlo en el libro de texto.

Una característica general de la superestructura es que se presenta una única secuencia explicativa que desemboca en la naturaleza del MCM y que no se diferencian dos modos de convección en ella, a diferencia de la propuesta de los otros libros que hemos analizado.

Guiados por el MVM iniciamos un recorrido a través de la estructura. Relevamos la centralidad de la VM ya que uno de los capítulos de L3 se dedica al tema (Chapter 5: Viscosity of the Mantle) que, desde la perspectiva de la sucesión de capítulos del texto, puede situarse como el anteúltimo de los capítulos que dan cuenta de las condiciones materiales y los procesos básicos que ocurren en la Tierra a gran escala (Plate Tectonics, Structure and Composition of the Mantle, Mantle Temperatures and Thermodynamic Properties y Viscosity of the Mantle y Basic Equations).

El capítulo dedicado a los desarrollos formales de los modelos que subyacen a la concepción del MCM incluye el planteo de las ecuaciones inherentes al MVM. Por ello, este capítulo 5 puede *complementarse* con el capítulo 6 porque en éste se presenta con todo rigor el lenguaje simbólico de la física, en el que se asientan los modelos geofísicos subyacentes al MVM y, por ende, al MCM.

6.2.3.3 Microestructura

Seguiremos la misma metodología que utilizamos con L1 y L2, describiendo cómo opera la publicidad en los tres subniveles que componen la microestructura, qué representaciones utiliza el autor para comunicar la construcción del MCM. También exhibiremos un cuadro que permita sintetizar qué representaciones se usaron para desarrollar los tres subniveles y, con ello, los públicos a los que se dirige el texto.

6.2.3.3.1 Supraordenación

a) Publicidad del MCM

Retomaremos nuestra descripción de la microestructura realizada anteriormente. Hemos analizado la estructura de este texto a partir de una serie de preguntas que vinculan al MCM con la VM.

En el primer capítulo (Historical Background) se ubica una pregunta (Why does solid mantle rock behave like a fluid?) que refiere implícitamente al MVM y hay, además, una referencia histórica a las primeras formulaciones sobre el rebote postglacial. Se trata de un relato histórico en el que no se explican los hechos sino que más bien se describen.

En cambio, el capítulo 15 (Nature of Mantle Convection) presenta, en general, respuestas cualitativas, utilizando únicamente dos representaciones complementarias a la explicación. Las representaciones son imágenes provenientes de la tomografía sísmica.

En la introducción de este capítulo se exhiben el conjunto de 160 preguntas que orientan al lector a través de su numeración, que brinda información sobre el capítulo en el que se desarrolla la respuesta. La estructura del capítulo 15 consta de una serie de apartados y sub-apartados que organizan el relato y entre ellos se intercalan referencias sobre las preguntas que dicho relato va respondiendo.

Algunos subtítulos del capítulo 15 refiere explícitamente a la viscosidad del manto. En el apartado 15.7 (Special effects in mantle convection) se dedica un subapartado especial a la influencia de la temperatura , la presión y la profundidad en la viscosidad (15.7.2 Variable viscosity: temperature, pressure, depth) y otro subapartado que refiere a la viscosidad no lineal (15.7.3 Nonlinear viscosity).

Todas estas menciones tienen injerencia sobre el modelo de VM, realzan su importancia respecto de la CM, por un lado, e informan sobre su ampliación o justificación en otras partes del libro de texto.

El capítulo 15 presenta el MCM con diferentes representaciones:

Descripción cualitativa

15.1 Imagen (Tomografía sísmica)

15.2 Imagen (Tomografía sísmica)

		Capítulo 15
Fórmuleo	Simple	
	Medio	
	Avanzado	
Explicación cualitativa		X
Mapa		
Esquema		
Imagen		2
Tabla (Preguntas)		1
Gráfico cartesiano		
Diagrama		

b) Publicidad de la controversia principal

En el desarrollo del capítulo 15, tanto en la introducción (5.1 Introduction) como en el apartado que se dedica específicamente a la viscosidad (15.7.2 Variable viscosity: temperature, pressure, depth), se hace mención explícita a la participación de la VM en la controversia que nos ocupa. En especial, se sugiere al lector dirigirse al

apartado 5.8 (Summary of Radial Viscosity Structure) en el que se evalúa la diferencia de viscosidad entre el manto superior e inferior, factor determinante para el MCM.

Se hace referencia a la importancia de la VM en la convección y se afirma que no existe un acuerdo contundente sobre este modelo:

The present consensus about mantle viscosity is that the lower mantle is more viscous than the upper mantle, but the amount of the increase and other details about the variation of mantle viscosity with depth are uncertain (Schubert *et al*, 2001; pp: 789).

Además, se presenta de manera sintética el aporte de los datos provenientes del rebote postglacial y de las anomalías del geode:

Studies using postglacial rebound data tend to indicate some viscosity increase with depth in the mantle, whereas inversions of geoid data favor a larger increase (Schubert *et al*, 2001; pp: 789).

Claramente, los autores presentan los nexos que unen a la VM y el MCM, especialmente en lo que respecta a la controversia.

Un aspecto interesante en relación con la publicidad de la existencia de la controversia es que se destina un apartado general a desarrollar el modelo de convección estratificada (10.6 Two-layer convection), haciendo mención explícita al artículo que publican Glatzmaier y Schubert en 1993.

The three dimensional layered mantle convection we discuss here is by Glatzmaier y Schubert (1993), (Schubert *et al*, 2001; pp: 474).

Al menos en L3 existe un apartado que desarrolla la convección estratificada. En cambio en L1 y L2 sólo se objeta este tipo de modelo de convección y no se desarrolla.

La perspectiva que brinda esta publicación (y que nosotros ya hemos analizado a través de la desincretización) no sólo es la que ilumina la presentación del modelo

controvertido sino que además, se publican en el libro parte de las representaciones (Fig. 10.47, Fig. 10.48. y 10.49) que publican Glatzmaier y Schubert en 1993.

En forma sintética puede concluirse que los aspectos controversiales se presentan en el desarrollo del modelo general de convección, se relaja el valor del contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior, que favorece la convección estratificada, y se explicitan sus condiciones de ocurrencia.

La mirada hacia atrás en la producción de Schubert, la reconocida simpatía de Turcotte sobre la convección estratificada y la aparición explícita del modelo de convección estratificada en un apartado concreto del libro nos permite concluir que se reivindica este modelo en relación con la controversia. La pertenencia histórica de los autores a la escuela que defendió este modelo da lugar a su presentación formal, al menos, como incluso se justifican, se trata de presentar un extremo posible de convección que puede asociarse a etapas tempranas de la evolución de la Tierra.

In addition to its possible relevance to convection in the early Earth, two layer convection is of intrinsic interest as an end member case in the spectrum of mantle convection models between whole mantle convection and two layer mantle convection (Schubert *et al.*, 2001; pp: 474).

6.2.3.3.2 Subordinación

a) Publicidad del sustento conceptual

El MVM se presenta, como ya hemos anticipado, en un capítulo especial (Chapter 5: Viscosity of the mantle) y se complementa con el formalismo matemático que lo sustenta en el capítulo siguiente (Chapter 6: Basic Equations).

Más allá de los aspectos específicos de sustento del MCM en relación con la viscosidad, encontramos relevante analizar todas las representaciones utilizadas por los autores para desarrollar el tema. Ya hemos visto que los autores depositan los aspectos de enseñanza relacionados con la mecánica de fluidos en otro texto de autoría de Turcotte y Schubert (1982).

b) Representaciones utilizadas

Como ya hemos descrito anteriormente el capítulo 5 (Viscosity of the mantle) desarrolla la VM en uno de los capítulos que hemos considerado introductorio. El capítulo 5 se desarrolla considerando ciertos conocimientos previos de la mecánica de fluidos, como ya hemos señalado, usa una gran variedad de representaciones y un nivel matemático medio.

Se utilizan las siguientes representaciones:

Descripción cualitativa

Nivel matemático medio

5.1 Imagen (Foto de las líneas de costa de Suecia)

5.2 Esquema (cronológico de la deglaciación de Laurentia y Fenoscandinavia)

5.3 Imagen (Esquema explicativo del rebote postglacial)

5.1 Tabla (Datos sobre el rebote postglacial)

5.4 Gráfico cartesiano (Levantamiento en función del tiempo)

5.5 Esquema (Emergencia y subsidencia de la costa este de los EEUU)

5.6 Gráficos cartesianos (Nivel relativo del mar en función del tiempo, a, b, c y d, de distintos lugares)

5.7 Diagrama (Ilustración de la respuesta de la superficie a la deglaciación con dos modelos de viscosidad del manto diferentes).

5.8 Diagrama (Respuesta de la superficie en relación con la suba del nivel del mar)

5.9 Esquema (Deriva polar)

5.10 Diagrama (Anomalías del geoide)

5.11 Imagen (Comparación –entre a y b—del geoide y simulaciones numéricas)

5.12 Diagrama (Deformaciones de la superficie producidas por un flujo en un medio equiviscoso)

Tabla 5.3 (Contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior)

5.13 Gráfico cartesiano (Profundidad en función de la viscosidad relativa)

5.14 Gráfico cartesiano (Profundidad en función de la viscosidad relativa)

5.15 Gráfico cartesiano (Profundidad en función de la viscosidad relativa)

5.16 Esquema (punto defectuoso de una estructura cristalina (a) por un átomo extra y (b) por una vacancia)

- 5.17 Esquema (ilustración del movimiento de una vacancia)
- 5.18 Esquema (Mecanismo de difusión, a, b y c, tres casos diferentes)
- 5.19 Esquema (Geometría del mecanismo de dislocación; a, b y c, tres casos diferentes)
- 5.20 Esquema (límites dislocados de un cristal en la red cristalina)
- 5.21 Esquema (Geometrías cristalina de dislocación; a, b, c, d, f y g, seis casos diferentes)
- 5.22 Esquema (Geometría cristalina de dislocación; a y b, dos casos diferentes)
- 5.23 Gráfico cartesiano (Tamaño del grano vs. esfuerzo deviatorico)
- Tabla 5.3 (Parámetros estándar para los mecanismos de difusión y dislocación)
- 5.24 Gráfico cartesiano (esfuerzo deviatorico vs. temperatura)
- 5.25 Gráfico cartesiano (viscosidad vs. temperatura)

		Capítulo 5	
Nivel matemático	Simple		
	Medio		X
	Avanzado		
Explicación cualitativa		X	
Esquema		22	
Imagen		3	
Tabla		3	
Gráfico cartesiano		11	
Diagrama		4	

El capítulo 6 (Basic equations) se desarrolla el formalismo matemático según hemos descrito a través del análisis estructural. Sólo se utilizan dos esquemas para representar los sistemas sobre los que se aplican las ecuaciones. El nivel matemático general del capítulo es avanzado.

Se utilizan las siguientes representaciones:

Figura 6.1 Gráfico cartesiano (sistemas de coordenadas; a, b y c, cartesianas, esféricas y cilíndricas)

Figura 6.2 Gráfico cartesiano (diagrama de fuerzas)

		Capítulo 6
Nivel matemático	Simple	
	Medio	
	Avanzado	X
Explicación cualitativa		X
Esquema		2
Imagen		
Tabla		
Gráfico cartesiano		
Diagrama		

		Cap. 15	Cap.5	Cap. 6
Fórmuleo	Simple			
	Medio		X	
	Avanzado			X
Explicación cualitativa		X	X	X
Esquema			21	2
Imagen		2	3	
Tabla			3	
Diagrama			4	
Gráfico cartesiano			6	

Puede verse a través del cuadro de comparación que el capítulo que presenta el modelo (Chapter 15: Nature of mantle convection) es un capítulo discursivo en el que se explica el modelo cualitativamente. En cambio, la explicación del MVM (Chapter 5: Viscosity of the mantle) subyacente a la convección se desarrolla con un nivel de matemática medio y con gran cantidad de representaciones, entre ellas, muchos

esquemas. En el capítulo 6 (Chapter 6: Basic equations) se desarrollan las ecuaciones de nivel matemático avanzado que permite profundizar en el MVM.

6.2.3.3 Coordinación

a) Generalidades

Durante el desarrollo del apartado 5.1.3.4 de esta tesis (Coordinación semántica: problemas empíricos asociados con la viscosidad del manto) abordamos la descripción del capítulo 5 (Chapter 5: Viscosity of the mantle) en el que se hace referencia concreta al rebote postglacial a través una mención de tipo cualitativa en la introducción (5.1) y de un desarrollo más pormenorizado a través del apartado dedicado a los ajustes isostáticos globales. En el capítulo se utiliza un esquema básico para plantear el problema desde una perspectiva física y se plantea un nivel medio de operacionalidad matemática.

b) Representaciones utilizadas

Las representaciones que se utilizan en la introducción son una descripción cualitativa y una foto que incluiremos en el listado general de representaciones que se utilizan para enseñar este fenómeno. En cambio, en el apartado 5.2 (Global Isostatic Adjustment) se utilizan, además de la explicación cualitativa, fórmulas y otro tipo de representaciones que describiremos mediante un cuadro. Además, como ya hemos visto en el capítulo 6 se profundiza en el nivel formal matemático, alcanzando el nivel avanzado.

Aspectos empíricos	Capítulo 5	Capítulo 6
Nivel matemático		
Simple		
Medio	X	
Avanzado		X
Explicación cualitativa	X	X
Esquema	2	2
Imagen	2	
Tabla	1	
Gráfico cartesiano	5	

Diagrama		
----------	--	--

6.2.3.4 Conclusiones parciales

En general, puede verse a través del cuadro comparativo que el MCM se desarrolla en forma cualitativa y que se utilizan escasas representaciones para ello. El capítulo que desarrolla el MVM utiliza gran cantidad de representaciones como hemos visto y la comprensión matemática del modelo se desarrolla en el capítulo 6, en el que se utilizan pocas representaciones.

	Cap. 15	Cap.5	Cap. 6	Datos
Fórmuleo				
Simple		X		X
Medio				X
Avanzado			X	
Explicación cualitativa	X	X	X	X
Esquema		21	2	4
Imagen	2	4		1
Tabla	1 (Preguntas)	3		1
Gráfico cartesiano		11		5
Diagrama		4		

El MCM que postulan Schubert, Turcotte y Olson en su libro, se desarrolla cualitativamente durante el capítulo 15 (Synthesis). El capítulo, tal como su título lo indica, presenta una síntesis conceptual de la teoría de convección en el manto. A través de las preguntas y sus respuestas se abre la posibilidad de acceder a otros capítulos y párrafos en los que se amplían las temáticas que se exponen. El capítulo no explicita citas externas al texto. Inicialmente, se presenta el modelo al interior de la Tierra pero se culmina ampliando la convección como mecanismo planetario general. En lo que la Tierra se refiere, se acepta la convección global en relación con las tomografías sísmicas que develaron el pasaje de las losas hacia el manto inferior pero no se descarta la convección a pequeña escala, en especial, el surgimiento de plumas térmicas desde la

base del manto superior. Respecto de la relevancia de la controversia, se le resta importancia por dos cuestiones: a la luz de la singularidad que implica el momento geológico actual desde una perspectiva planetaria evolutiva y, además, por proponer explícitamente el estudio de la convección estratificada reproduciendo parte del artículo de Glatzmaier y Schubert de 1993.

Si se ingresa al texto por el capítulo 15 se pueden desarrollar posibles recorridos que permiten ampliar la información, especialmente a través del listado de preguntas y la ubicación de sus respuestas, ya sea al interior del capítulo en forma resumida o bien ubicando tal pregunta en su capítulo respectivo, pues no olvidemos que la caracterización numérica de éstas responde a su ubicación en un capítulo particular.

El capítulo 15 es de tipo explicativo y sólo se utilizan dos imágenes. A este capítulo se accede con conocimientos de geología general y física general.

Respecto del recorrido armado a través del CE, se estima que el contraste de viscosidad entre los mantos superior e inferior se encuentra entre 3 y 30, considerando la posibilidad de un contraste que favorece la ocurrencia de la convección estratificada. A través de las referencias que ofrecen las preguntas y sus respuestas se dirige al lector al capítulo 5 y, a través de éste, al capítulo 6 en el que se desarrolla el formalismo matemático. Para acceder al capítulo 5 hacen falta conocimientos de física, en especial de mecánica de fluidos y manejar un nivel intermedio de matemática. Este texto no desarrolla los modelos básicos que permiten construir el MVM.

Capítulo 7: Reflexiones e implicancias

Resumen del capítulo

En este capítulo pretendemos reflexionar sobre cómo opera la primera TD de la TCM. En primera instancia, presentaremos algunas conclusiones que emergen del análisis de las operaciones subyacentes a la TD y sobre ciertas relaciones que éstas establecen entre sí. Luego, estableceremos algunas conclusiones generales sobre nuestra investigación. Y, por último, abordaremos sus alcances y posibles estudios posteriores que pueden realizarse a partir de ella.

Los capítulos 4, 5 y 6 de esta tesis expresan cómo operan las operaciones subyacentes a la TD que hemos seleccionado y analizado separadamente. Sin embargo, durante el proceso de investigación permanentemente fuimos de las partes al todo y del todo a las partes. Resultó determinante realizar simultáneamente la indagación bibliográfica relativa a la reconstrucción histórica, el abordaje de los textos que analizamos y, además, la formación académica brindada por la FCEN. El dominio conceptual del campo fue una condición necesaria para analizar la TD; funcionó a modo de vehículo de análisis para abordar las operaciones subyacentes a ésta. Por ello, a fin de lograr profundidad fue necesario aumentar la especificidad del abordaje aunque de sólo un aspecto de la CM, la VM y esto, a su vez, nos habilitó a analizar las operaciones subyacentes a la TD, sobre las que expondremos algunas conclusiones que surgen de

comparar las propuestas de enseñanza analizadas. Éstas brindan una síntesis de las respuestas que nos hicimos sobre las grandes preguntas de nuestra investigación: ¿qué se enseña sobre la TCM? ¿y sobre el campo controversial? ¿cómo se enseña al respecto?. Estamos en condiciones de ofrecer algunas respuestas de índole explicativa que surgen de valorar el proceso en su conjunto.

7.1 Reflexiones emergentes del análisis de las operaciones subyacentes a la TD

El enfoque dado a nuestra investigación nos condujo a analizar tres de las operaciones subyacentes a la TD que define Chevallard (1997), la desincretización, la objetivación y la publicidad, sobre las que pretendemos realizar algunas reflexiones.

7.1.1. Reflexiones sobre el proceso de desincretización

El proceso de desincretización que realiza cada uno de los libros de texto analizados ha sido descrito a través de la estructura textual que evidenció la organización de cada libro. Sin embargo, el análisis disciplinar específico al interior de la desincretización necesitó adoptar como referente la ciencia sincretizada. Nos referimos al análisis disciplinar en términos de tramas conceptuales asociadas con dominios específicos. Este análisis posee un interés intrínseco pues pone sobre el tapete la selección y secuenciación de los contenidos específicos que se involucran en la construcción de un modelo, en particular en este estudio, la CM. Los resultados que pueden surgir de este análisis son determinantes para los demás niveles educativos. El análisis disciplinar de la desincretización permite abordar problemas didácticos centrados en los contenidos disciplinares y, con ello, en cuestiones multi e interdisciplinares y su relación con las disciplinas básicas.

La desincretización que realiza cada libro de texto conlleva la estrategia de desconocer las relaciones de un concepto con otros, posibilitando el acceso escalonado hacia la complejidad de un determinado modelo pero también ocultando adrede manifestaciones definitorias de aquel concepto, supresiones que conducen a preguntas, por ejemplo, del tipo de ¿qué aporta el formalismo matemático a la intelección del modelo? o ¿qué representaciones son más efectivas para comunicar las diferentes aristas del modelo? La visión sincrética del modelo y su profundización al interior de alguno de sus aspectos posibilitó el acceso a una multiplicidad de relaciones conceptuales que protagoniza el CE, confirmando su jerarquía conceptual y dando lugar a profundizar en la red disciplinar y así visibilizar las relaciones que la desincretización oculta.

Otra acción ficticia que ocurre irremediamente con la desincretización es que, a la vez que se enseña, se crea una representación acumulativa de los modelos.

Nuestro trabajo de indagación histórica nos contactó con las idas y vueltas propias de la construcción del MCM, qué y cómo se discutió conceptualmente, cómo se contrastó con los datos, a la luz de qué modelos se interpretan éstos. Pusimos especial atención a "qué se hace explícito" para el lector a través del libro de texto y podemos concluir que los expertos en esta área detectan, a través de las citas, qué modelos se ponen en juego y qué datos los sustentan, pero esta información permanece oculta para los novatos, dando lugar a una construcción lineal y acumulativa de los modelos.

Estos aspectos de la desincretización en los libros de texto habilitan la construcción sincrónica y solapada de representaciones epistemológicas que, en su gran parte, no difieren de las llamadas concepciones epistemológicas ingenuas (Bonan, 2006). Consideramos que rescatar modelos perimidos de las publicaciones científicas históricas puede resultar un buen recurso didáctico para promover la actividad cognitiva de modelar y crear una imagen menos lineal de la actividad científica (Bonan, 2004; Bonan, 2002). El rescate del pasado conceptual puede ser guiado por quien tiene acceso cognitivo a la bibliografía de un área de investigación, es decir, un especialista o un docente que enseña la temática.

La identificación de las publicaciones citadas por los textos a través de la descripción estructural nos permitió un recorrido posible para reconstruir la historia reciente de la CM, que cuenta con escasísimos antecedentes históricos y epistemológicos. La sincretización del campo, a su vez, nos permitió a analizar, especialmente, el proceso de objetivación. Fue a partir de identificar a los autores de los libros en la historia reciente del campo que pudimos conocer su pertenencia a distintas escuelas o corrientes de pensamiento en la comunidad científica.

Respecto de las diferencias entre la desincretización que realiza cada libro de texto, dos de ellos (L1 y L3) presentan una continuidad discursiva en el hilado de sus capítulos. Éstos, además, poseen capítulos históricos cuyo análisis queda fuera de nuestro alcance aunque, dicho sea de paso, han sido valiosos al aportar datos que nos conectaron con la historia asociada con la evolución del MCM. El enfoque de los capítulos históricos de ambos textos no escapa a una secuenciación lineal de la historia de la ciencia. En especial, vimos que se hace mención a la historia reciente del campo pero implícitamente, a través de las citas a publicaciones clave que develan aspectos

diversos de la construcción histórica del campo de investigación. De todos modos, la desincretización, en sí misma, invisibiliza las relaciones conceptuales y los obstáculos históricos asociados con la construcción conceptual. El otro texto, L2, presenta un grupo de monográficos que se clasifican en secciones, si bien mantienen una coherencia de consecución respecto de su inclusión en una sección y su ubicación relativa dentro de la misma, son unidades separadas, con un inicio y un fin en sí mismos. Cada capítulo es una puesta al día del tema que desarrolla y, en algunos de ellos, hay menciones someras a la historia de la construcción del conocimiento que se expone. La información sobre el entorno institucional en el que se genera este libro es un dato que aporta a la comprensión de los criterios de su desincretización. Nuestro estudio condujo a visibilizar esta escuela de investigación y sus propuestas de enseñanza, L1 presenta una construcción pormenorizada del MCM y L2 una serie de estudios separados sobre las líneas de investigación complementarias que hacen a la construcción de dicho modelo.

El análisis estructural armado a través del CE nos permitió conocer qué enfoque y nivel de enseñanza propone cada libro de texto, cuestión que abordamos a través de la relación entre el MVM y el MCM. Esta relación iluminó especialmente el proceso de desincretización realizado por los autores porque cada propuesta de enseñanza exhibe qué aspectos de esta relación se muestran, con qué representaciones se lo hace y determina qué lugar ocupa la enseñanza de la construcción del MVM.

En L1 se presenta la VM en uno de los capítulos de la primera sección (Part 1; Origins; Chapter 3: Mobility) a través de una referencia superficial al rebote postglacial. Luego, en el capítulo 6 en la segunda sección (Part 2: Foundations; Chapter 6: Flow), se desarrollan los fundamentos que subyacen a la definición de la VM y se desarrollan ciertos modelos físicos específicos que, más adelante, en los capítulos 10, 11 y 12, (Part 3: Essence; Chapter 10: The Plate Mode, Chapter 11: The Plume Mode y Chapter 12: Synthesis) permiten vincular la VM con el MCM.

L2 presenta, de forma general, la participación de la VM en el MCM en el capítulo 5 perteneciente a la segunda sección del texto (Part 2: Dynamics and Evolution of the Earth's Mantle; Chapter 5: Plates, Plumes, Mantle Convection and Mantle Evolution) en el que se expone el MCM "oficial" de la compilación. Pero además, se desarrollan dos capítulos en la tercera sección del libro (Part 3: Structure and

Mechanical Behaviour of the Modern Mantle; Chapter 10: The Viscosity of the Mantle from Analysis of Glacial Rebound Phenomena y Chapter 11: Mantle Rheology: Insights from Laboratory Studies of Deformation and Phase Transition) asociados con la viscosidad del manto y la reología del manto, los que presentan sus contenidos con muy alto nivel disciplinar. El capítulo 5 es de fácil acceso mientras que el 10 y el 11 están dirigidos a la formación de especialistas en dichas temáticas.

L3 promueve una visión cualitativa general de la VM y de los mecanismos reológicos microscópicos en su capítulo 5 (Chapter 5: Viscosity of the Mantle) y, en el capítulo 6 (Chapter 6: Basic Equations), se exhiben los desarrollos cuantitativos. En el capítulo 15 (Chapter 15: Nature of Mantle Convection) se hace referencia cualitativa a la participación de la VM, pero a través de las citas que refieren a las relaciones extensionales se traza el recorrido que permite profundizar sobre esta temática. L3 separa en un capítulo aparte los desarrollos matemáticos, que son evocados desde diferentes lugares del libro.

Por último, quisiéramos destacar que el movimiento de sincretización-desincretización realizado a través de este estudio resultó de suma importancia para la investigación como un todo pues dio lugar a sucesivas resignificaciones del análisis de los textos y de la TD.

7.1.2. Reflexiones sobre el proceso de Objetivación

El proceso de objetivación nos condujo a trabajar sobre el campo controversial, especialmente en la controversia principal. Para ello, seleccionamos una serie de publicaciones científicas que los autores de los libros de texto citan cuando abordan dicha controversia. Este trabajo nos abrió el camino para acceder a su participación en la generación de conocimiento sobre el campo y, por lo tanto, a conocer la evolución de sus posturas a lo largo del tiempo.

A medida que fuimos indagando la pertenencia institucional de los autores y seleccionando las publicaciones clave que citaban en sus textos comprobamos que los autores eran científicos activos frente a la controversia que nos ocupa.

Hemos agrupado a L1 con L2 frente a la objetivación. Esta decisión se basó en que L2 siendo una compilación de 11 monográficos concedió la explicación del MCM a Davies, el autor de L1. Además, los autores de los capítulos de la compilación pertenecen a la *Research School of Earth Sciences*. Davies es un científico generalista que integra diferentes modelos y datos relativos al MCM. Por ello, hemos elegido a L1 para analizar el proceso de objetivación de ambos, L1 y L2, ya que Davies es quién presenta “el” MCM a través de uno de los monográficos de L2 y desarrolla con más detalle el MCM en el libro de su autoría.

Respecto de la postura histórica de los autores de L3 y su transferencia al libro de texto, hemos comprobado que existe una especie de conversión ideológica frente a la controversia pues los autores reconocen que probablemente en la actualidad geológica la convección sea global pero presentan la convección estratificada como posible, aunque más no sea marginalmente en algunos sectores de la Tierra en la actualidad geológica. Al dejar abierta la posibilidad de existencia de una banda térmica limítrofe en la discontinuidad de los 660 Km. los autores de L3 otorgan cierta probabilidad de ocurrencia de la estratificación de la CM.

La objetivación que realizan los libros de texto resultó factible de ser analizada a la luz de la sincretización del campo. Nuestro análisis se limitó a los aspectos concernientes a la VM pero fueron suficientes para evaluarla pues según los valores que se le asignen, la convección será global o estratificada. La relación entre ambas controversias es la siguiente: si el contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior se encuentra entre 3 y 30, la convección tiende a estratificarse. En cambio, si se encuentra entre 30 y 100, tiende a ser global. Estos datos y la postura histórica de los autores como científicos son los referentes que nos habilitan a examinar el proceso de objetivación.

La existencia del campo controversial asociado con la TCM y la participación de la comunidad científica no es un contenido explícito de enseñanza en los libros de texto. Sin embargo, se deja traslucir la existencia de la controversia principal pero no se explicita la variedad de modelos que se propusieron a lo largo de la historia reciente de las Ciencias de la Tierra sino que muestran los antecedentes inmediatos de dichos modelos extremos. Las discusiones científicas acerca de las propuestas que integran

aspectos parciales de varios modelos se encuentran en las publicaciones científicas en las que son discutidos. Los libros de texto sólo dejan filtrar la existencia de la controversia principal pero la noción de campo controversial queda oculta. Desde ya que si se *hila fino*, tal cual lo hemos hecho nosotros, es posible entrever desavenencias parciales y más aún cuando a medida que se transitan los textos es inevitable compararlos y, con ello, ir sacando conclusiones. De forma consciente, los autores no explicitan controversias secundarias pero dejan indicios que permiten guiar su reconstrucción histórica.

El proceso de objetivación que se realiza a través de los libros de texto se encuentra influenciado por la pertenencia de sus autores a una determinada tradición científica. El nivel educativo objeto de nuestro análisis conlleva la particularidad de que los autores de los libros de texto deben ser científicos activos del campo y, por ello, siempre tienen alguna clase de compromiso teórico frente a los aspectos controvertidos. Nuestro estudio mostró que éstos, a su vez, se transfieren a los libros de texto. Por lo tanto, en este nivel, al menos parcialmente, la objetivación se quiebra.

7.1.3. Reflexiones sobre el proceso de Publicidad

El análisis de la publicidad de cada texto nos brindó la oportunidad de apreciar cómo cada uno de ellos encara la enseñanza del MCM y qué representaciones se utiliza para ello. A través del MVM penetramos en la estructura de cada texto con el fin de indagar cómo se enseña un modelo subordinado al MCM y, también, con qué representaciones se lo hace. Además, nos interesó conocer qué posición tomaron los autores en relación con la publicidad del campo controversial y si hacen pública la existencia de la controversia principal y cómo lo hacen.

Todos los textos exponen el MCM a través de un capítulo especial, en el caso de L1 se lo caracteriza como una síntesis. L2 presenta una panorámica del modelo a través de un capítulo. Y L3 presenta en su último capítulo el MCM en el contexto de la Tierra, extendiéndolo luego a la evolución planetaria a gran escala.

En general, los tres textos describen el MCM en forma cualitativa dando pistas, a través de su desarrollo, para penetrar en los (sub)modelos implicados en el interior de cada texto. Los textos desarrollan diferentes modelos con distintos niveles de

formulación, tal como hemos visto. En relación con las relaciones extensionales, dos de los textos, L1 y L2 incluyen citas que conducen a publicaciones externas relativas al MCM. L3 sólo hace referencias al interior del texto mediante el listado de preguntas. Los tres textos sustentan la explicación del MCM con un nivel elemental de matemática. Por la estructura que caracteriza a cada uno puede concluirse que L1 y L3 lo asumen como un capítulo integrador de todo el texto. En cambio L2, lo presenta como un monográfico general que se ubica en la segunda parte del texto. Vale la pena destacar que este capítulo es accesible con conocimientos básicos de matemática y generales de geología y física.

L3 es el que utiliza menos representaciones complementarias a la explicación para desarrollar el capítulo que desarrolla el MCM, sólo utiliza una tabla con el listado de preguntas y dos imágenes. L1 y L2 utilizan diferentes representaciones para desarrollar este capítulo, pero en número y tipo son similares. Recordemos que ambos capítulos de presentación en L1 y L2 son de autoría de Davies y que es quien deconstruye el MCM de acuerdo al enfoque de cada una de estas propuestas didácticas.

La tabla de preguntas que presenta L3 es una representación que brinda mucha información pues, tal como hemos visto, refiere a preguntas cruciales sobre la naturaleza del MCM. Las preguntas incluyen información adicional en relación con su numeración, lo que conecta al capítulo 15 (Chapter 15: Nature of Mantle Convection) con el resto del libro y, con ello, con los aspectos conceptuales sobre los que se asienta la reconstrucción didáctica del MCM que ofrece L3.

Los tres libros presentan enfoques diferentes para desarrollar el MCM:

L1 genera una síntesis del modelo. Si el libro se transita en forma secuencial, el capítulo 12 (Chapter 12: Synthesis) integra los desarrollos parciales realizados en los capítulos precedentes, especialmente el 10 (Chapter 10: The Plate Mode) y el 11 (Chapter 11: The Plume Mode) enfocando al manto como un sistema dinámico. A lo largo del capítulo se presenta el modelo, las evidencias que lo sustentan, un sesgo del campo controversial en el que se incluye la controversia que nos ocupa y se describen levemente otras. Por último, se brinda un pantallazo de los puntos más sobresalientes del modelo y su contraparte empírica.

L2, en cambio, presenta un monográfico sobre el tema que puede considerarse una unidad con autonomía respecto del resto del texto. Si bien hay referencias a otros capítulos, los apartados y los subapartados del capítulo 5 (Chapter 5: Plates, Plumes, Mantle Convection and Mantle Evolution) dan un panorama del MCM desarrollando los modos placa y pluma, sus contrapartes empíricas, la controversia principal y anomalías menores del modelo. El capítulo concluye con la inclusión del MCM en una perspectiva evolutiva de los procesos que pudo haber protagonizado el manto a lo largo de su historia térmica y tectónica.

L3, por último, presenta en el capítulo 15 (Chapter 15: Nature of Mantle Convection) un abordaje que compone las formas de ascenso y descenso de material desde y al interior de la Tierra y lo relaciona con las bandas térmicas limítrofes de modo de componer un sistema dinámico que explique la circulación general. Se analiza su dependencia con el tiempo y ciertos efectos difíciles de incorporar a las modelizaciones debido a la complejidad de su formulación. El capítulo culmina con la extensión del MCM al resto de los planetas sólidos de nuestro sistema solar. L3 realiza una presentación dispersa del modelo, pues más que afirmar la convección global considera la emergencia y el ingreso de material al interior del manto y los procesos que de ello se desencadenan, explicitando las limitaciones de los modelos y las discusiones emergentes de algunos de sus aspectos, como ya hemos visto.

Comparando los capítulos que desarrollan el MCM de cada texto pensamos que el más básico y completo es el que presenta L2, en especial por la secuencia que arma y su inclusión en una perspectiva más amplia del planeta en su conjunto a lo largo del tiempo. En este sentido, L1 presenta una síntesis del modelo y sus posibles problemas de funcionamiento. Y L3 compone un panorama general de la circulación material en el manto en el que se abordan diferentes modos de circulación y su dependencia con el tiempo extendiendo algunos de los modelos al funcionamiento de los planetas sólidos del sistema terrestre.

L1 posibilita realizar una construcción pormenorizada y acumulativa del MCM. L3 presenta las herramientas de construcción por separado (modelos geológicos básicos, modelos numéricos bi y tridimensionales, ecuaciones, etc.) de modo de armar

un sustento autónomo de las partes que componen el modelo y, también, la extensión del modelo como mecanismo planetario. L2 expone una síntesis descriptiva del MCM. Las explicaciones que subyacen a dicha descripción se profundizan en otros capítulos del libro.

El nivel de desarrollo del MVM que cada texto asume es crucial para develar los recursos cognitivos que debe poseer el público al que cada texto está dirigido y su posible inclusión como bibliografía en diferentes contextos de enseñanza. Las representaciones que se utilizan para desarrollar el MVM informan sobre qué y cómo se profundiza sobre un aspecto particular en cada libro de texto.

Dependiendo del texto, se asumirá o no la enseñanza de los modelos que, a su vez, subyacen a la definición del MVM. L1 brinda una construcción pormenorizada del MVM acudiendo a modelos básicos (y no tanto!) para resolver ciertos problemas físicos teóricos que se involucran en los modos placa y pluma de convección que propone. El detalle de esta construcción se pone de manifiesto a través del número y tipo de representaciones que se utilizan. En especial, se desarrollan tres niveles bien diferenciados de enseñanza signados por el nivel matemático que utiliza cada uno de ellos. El modelo general se explica en forma cualitativa y luego se brinda la posibilidad de profundizar en su construcción a través de los niveles matemáticos medios y avanzados que el texto propone. En relación con los datos, el capítulo 6 (Chapter 6: Flow) se desarrolla con un nivel matemático medio y dos representaciones adicionales.

L2 no desarrolla un capítulo destinado a explicar los modelos que subyacen al MVM, es un dato que aparece intermitentemente en todo el libro pero no se enseña su construcción disciplinar. Este libro ofrece una explicación pormenorizada del rebote postglacial cuya formulación es de nivel avanzado y se accede a ella con conocimientos de mecánica de fluidos, entre otros.

En lo que se refiere a L3, el capítulo 5 (Chapter 5: Viscosity of the Mantle) desarrolla el MVM intercalando aspectos teóricos y empíricos, como ya hemos visto, sin necesidad de distinguirlos se puede apreciar que el capítulo en sí no desarrolla los modelos físicos básicos que subyacen al MVM sino que recomienda bibliografía específica para acceder a ellos. En general, el capítulo 5 de L3 se desarrolla con nivel

matemático medio, pero brinda la posibilidad de acceder a los desarrollos formales del nivel avanzado a través del capítulo 6. En este sentido, L3 asume una organización particular pues presenta los desarrollos matemáticos por separado.

En relación con la publicidad sobre la controversia principal, mientras que L1 y L2 justifican las evidencias que afirman la convección global y derriban uno a uno los argumentos a favor de la convección estratificada, L3 deja abierta la posibilidad de la ocurrencia de convección estratificada en algunas zonas remanentes del manto y, además, desarrolla un apartado específico relativo a la convección estratificada destacando su relevancia.

L3 permite acceder a explicaciones de nivel intermedio y avanzado de complejidad, a la vez que incluye en su explicación muchas representaciones diferentes. L3 edita una gran cantidad de figuras en color, característica que potencia su utilidad. En el capítulo 15 (Chapter 15: Nature of Mantle Convection) se utilizan sólo dos representaciones en color y en el 5 (Chapter 15: Viscosity of the Mantle) no se utiliza ninguna. En su mayor parte corresponden a imágenes planetarias (localización de los focos de terremotos, división en placas de la superficie terrestre, topografía, etc.), fotografías de experimentos de laboratorio, modelos computacionales, tomografías sísmicas, entre las más destacadas.

La conjunción de las publicaciones científicas utilizadas como fuentes, la descripción de la estructura textual de los libros y las representaciones que utilizan resultó ser un buen camino para evaluar los aspectos de la ciencia que los libros hacen públicos. Hemos visto, que dependiendo del caso se desarrollan explicaciones que se sustentan e, incluso, se reproducen de las publicaciones científicas.

7.2. Conclusiones generales

Algunas conclusiones de índole explicativa surgen de reflexionar sobre la interacción del conocimiento que se expone en los capítulos 4, 5 y 6. Entre ellas, algunas refieren a la metodología utilizada y otras son de tipo teórico.

Respecto de las conclusiones de origen metodológico pensamos que la muestra

resultó ser representativa dado que dos de los libros pertenecen a la escuela que históricamente defendió la convección global y el otro libro responde a la otra escuela, la que sostuvo la convección estratificada.

En relación con el análisis estructural de van Dijk, creemos que resultó un buen marco teórico ya que el método de intervención diseñado en base a éste, resultó ser potente para explorar y describir los libros de texto, reconstruir la evolución del campo de investigación y develar cuestiones que, generalmente, suelen quedar ocultas. Además, la creación de las categorías microestructurales dio lugar a generar una manera ordenada de abordar los aspectos teóricos y empíricos de la ciencia, y su puesta en correspondencia.

En especial, resultó particularmente útil la noción de relación extensional, a través de la cual generamos los recorridos al interior de cada texto, para su descripción estructural, y, hacia el exterior de cada texto, con el fin de reconstruir la evolución histórica del dominio de investigación asociado con el MCM. Este método de introspección se instrumentó a través de las citas que hacen los autores en los libros de texto. De ellas, las citas que remiten al interior del texto explicitan la decisión de los autores de volver objeto de enseñanza una determinada cuestión y, por tanto, ampliarla. Las citas que remiten a publicaciones externas habilitaron una forma de realizar la reconstrucción histórica del campo, a través de una selección de publicaciones científicas conceptualmente destacadas. A partir de éstas se seleccionaron otras publicaciones que nos habilitaron recorridos conceptuales del pasado, que involucraban a los autores de los libros de texto que ya, en aquel entonces, eran científicos activos del campo. Este abordaje nos llevó a visibilizar las escuelas a las que pertenecían y los modelos que se sucedieron en el tiempo. Esta forma de introspección es de fácil acceso para quienes dominan o enseñan un área de conocimiento científico de alta especificidad.

A través de la reconstrucción de la evolución del campo controversial develamos que la VM es uno de los factores que se pone en juego para definir por uno u otro modelo frente a la controversia analizada, lo que confirma su centralidad en este campo disciplinar y reafirma su condición de CE. En especial, a través de éste encontramos la relación entre la controversia principal (Convección global vs.

Convección estratificada) y una subsidiaria (MVM), confirmando la utilidad del concepto de campo controversial en nuestra investigación.

Una conclusión a la que arribamos después de realizar este estudio es que los libros de texto seleccionados representan muy bien a lo que hemos dado en llamar la PTD. Esto se debe, fundamentalmente, a que sus autores son científicos activos del campo y asumen la tarea de transformar los modelos científicos en modelos didácticos. Los autores extraen los modelos del ámbito científico para insertarlos en el ámbito didáctico, con fines de enseñanza, pensando en la formación de los estudiantes de diferentes especialidades.

Los modelos didácticos propuestos por los libros analizados adoptan diversos enfoques, niveles y representaciones y, en algunas ocasiones, reproducen total o parcialmente algún desarrollo proveniente de publicaciones científicas destacadas. La comparación de los discursos científico y didáctico se realizó comparando qué hace explícito el texto y qué la publicación, lo que nos condujo a concluir que, a diferencia de lo que ocurre con la TD de otros niveles, en ocasiones, la primera TD no pierde fidelidad conceptual.

Por otro lado, podemos afirmar que el discurso científico se transforma cuando opera la TD, se reorganiza utilizando diferentes representaciones. Esta reorganización discursiva nos parece inherente a la TD más allá del nivel en el que opere. La selección de representaciones a utilizar estará en función del nivel y del enfoque de la enseñanza.

Los libros analizados (L1, L2 y L3) están concebidos con objetivos de formación diferentes. Sin embargo, los tres enseñan procedimientos, técnicas operatorias, vocabulario específico, una variedad de representaciones, aunque con diferente nivel de profundidad: L1 puede considerarse básico, L3 intermedio y L2 avanzado, en líneas generales. Existen diferencias entre ellos, además, en su organización estructural, más allá de su nivel.

Cuando esta investigación comenzó nos hicimos grandes preguntas sobre la enseñanza de la TCM, específicamente: qué se enseña sobre esta teoría y cómo se lo hace. Cuando supimos que esta teoría era un campo activo de investigación en la

actualidad y que, además, estaba en controversia, también nos preguntamos si ésta se enseña y cómo se lo hace. También, decidimos conocer la evolución histórica de este campo de investigación, en especial, desde la tectónica de placas hasta nuestros días. Estamos en condiciones de ofrecer algunas respuestas a estos interrogantes, los que dan cuenta de los objetivos que nos habíamos planteado en aquel momento y que se presentaron en el primer capítulo de esta tesis.

En relación con qué se enseña acerca de la TCM, el capítulo 5 de esta tesis presenta una síntesis de ello; claramente, este es un resultado de tipo descriptivo. Y el capítulo 6 informa cómo se enseña, con qué representaciones y con qué nivel. Una síntesis de ello ha sido desarrollada recientemente (VER).

Respecto de qué se enseña acerca de la controversia concluimos que se hace explícita cuando se enseñan aspectos de la teoría en los que se involucra y, por tanto, se exhiben justificaciones y representaciones en relación con las hipótesis controvertidas. Estas conclusiones surgen de trabajar con el CE. A través de éste reconstruimos parte del campo controversial, es decir, la relación entre dos controversias, la controversia principal (global vs. estratificada) y la que involucra al CE (contraste de viscosidad entre el manto superior e inferior). El capítulo 4 presenta una reseña de la evolución histórica del campo de investigación, en la que se exponen los modelos en controversia y la evolución de su discusión a lo largo del tiempo hasta nuestros días. En especial, en el capítulo 6, se analiza qué se hace explícito sobre estas controversias, cuál es la relación que se establece entre ellas y con qué representaciones se las muestra, en las publicaciones y en los libros de texto. Es decir, qué se enseña sobre las controversias y cómo se lo hace.

7.3. Alcance de nuestro estudio y estudios posteriores

El trabajo realizado a través de esta investigación plantea nuevos interrogantes al interior de la Didáctica de las Ciencias que pueden resultar en líneas fecundas de investigación. Las temáticas que proponemos como futuras líneas de investigación surgen, en realidad de los alcances de nuestro trabajo.

Cuando evocamos la primera TD, necesariamente hicimos un recorte disciplinar

de alta especificidad, dando lugar a cuestionar qué conclusiones son propias de dicho recorte y, entonces, qué realmente puede generalizarse de este estudio al interior de la Didáctica de las Ciencias. Una investigación que cambie el recorte conceptual y se centre en otra área de las Ciencias Naturales podría ser una línea fructífera de análisis. En este sentido, el diseño metodológico realizado para este estudio puede aplicarse a otra área de conocimiento, brindando la posibilidad de reflexionar acerca de las cuestiones inherentes a la primera TD que van más allá de los contenidos específicos.

Analizada la primera TD de este campo disciplinar se desprende, a nuestro juicio, otro problema interesante de indagar: cómo operan las sucesivas TD que descienden por el sistema educativo. La indagación acerca de la sucesión de TD que operan --desde la primera TD hasta el nivel de enseñanza básica-- es, también, una temática interesante de análisis sobre la que no existen antecedentes. Una investigación de estas características sería, además, un aporte importante a nivel curricular.

Es inherente a la TD la estrategia de desconocer las relaciones de un concepto con otros para posibilitar el acceso escalonado hacia la complejidad de un determinado modelo. Esta acción da lugar al ocultamiento intencional de aspectos que definen aquel concepto, generando un vacío ficticio a su alrededor. En nuestro estudio sólo hemos abordado aspectos descriptivos de las relaciones que establece el CE con otros conceptos y modelos. En términos de relaciones conceptuales (y, con ello de recortes disciplinares) y de tipos y niveles de representaciones, se torna especialmente interesante el análisis curricular de las asignaturas universitarias en las que se implica un CE. Este tipo de estudios implica encarar el análisis curricular a la luz del análisis disciplinar. Este aspecto cada vez cobra mayor interés en el ámbito de la didáctica universitaria por su implicancia en la estructura curricular de las carreras de grado y postgrado.

Hemos asociado los libros de texto con la TD dejando totalmente fuera la enseñanza en contextos institucionales. La investigación de la enseñanza en las aulas refiere al análisis de las operaciones subyacentes a la TD que nosotros no hemos analizado: la programabilidad de la adquisición del conocimiento científico y la acreditación social de los aprendizajes. Este tipo de estudios puede ser utilizado como insumo para la mejora de la enseñanza en todos los niveles del sistema educativo.

Bibliografía

Adúriz-Bravo, A. (2001). *Integración de la epistemología en la formación del profesorado de ciencias*. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona.

Adúriz Bravo, A., (1999). *Análisis de teoría y de campo para la construcción de un análisis epistemológico de la Didáctica de las Ciencias*. Tesis de Maestría en Didáctica de las Ciencias, Universidad Autónoma de Barcelona.

A. Adúriz-Bravo, L. Galagovsky, E. Meinardi, L. G. Galli y L. Bonan (2003) (a). *Interacción entre formación e investigación en el profesorado: representaciones de los aspirantes a profesores de ciencias naturales acerca de los ejes problemáticos de la didáctica*. III Congreso Nacional y I Internacional de Investigación Educativa.

Adúriz-Bravo, A. y Bonan, L. (2006). Modelos y analogías en la enseñanza de la física. En **Enseñar Ciencias en el Nuevo Milenio**, Quintanilla, M. y Adúriz-Bravo, A. Editores. Santiago: Ediciones Universidad Católica de Chile.

Adúriz-Bravo, A. y Bonan, L. (2003). Modelos y analogías en la enseñanza de la física. Directrices para una planificación didáctica sobre modelos atómicos. *XIII Reunión Nacional de Educación en Física*. Río Cuarto, Argentina

Adúriz Bravo, A., Izquierdo, M. y Estany, A., (2002). Una propuesta para estructurar la enseñanza de la filosofía de las ciencias en la formación. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(3), 465-476.

Adúriz-Bravo, A., Bonan, L., Meinardi, E., Morales, L. y Galagovsky, L. (2001). El concepto de *modelo* en la enseñanza de la física. Una revisión epistemológica, didáctica y retórica. *XII Reunión Nacional de Educación en Física*. San Martín, Argentina.

Adúriz-Bravo, A. y Galagovsky, L. (1997). Modelos científicos y modelos didácticos en la enseñanza de las ciencias naturales. Parte 1: Consideraciones teóricas. *X Reunión Nacional de Educación en Física*. Mar del Plata, Argentina.

Adúriz-Bravo, A., Morales, L. y Galagovsky, L. (1997). Modelos científicos y modelos didácticos en la enseñanza de las ciencias naturales. Parte 2: Un ejemplo sobre modelos atómicos. *X Reunión Nacional de Educación en Física*. Mar del Plata, Argentina.

Adúriz-Bravo, A., Morales, L., Galagovsky, L. y Bonan, L. (1997). Problemas con el concepto de 'modelo' en la enseñanza de la física. *82da Reunión Nacional de Física de la Asociación Física Argentina*. San Luis, Argentina

Álvarez, R., (1996). Las controversias científicas. Sus implicaciones didácticas y su utilidad mediante un ejemplo: la controversia sobre la edad de la tierra. *Alambique. Didáctica de las ciencias experimentales*, 8: 63-69. Graó Educación.

Albarède, F. & van der Hilst, R., (1999). New Mantle Convection Model May Reconcile Conflicting Evidence. *Eos*, vol. 80, N° 45, pp. 535-539.

American Geological Institute (2001). **Earth System Science in the Community. Earth's Dynamic Geosphere.** New York.

Anderson, D. & Foulger, G. (2004). www.mantleplumes.org.

Anguita, F., (1996). La evolución de la Tectónica de Placas: el nuevo interior de la Tierra. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 3(3), 137-148.

Anguita, F., (1993). La teoría General de los Sistemas y las Ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*, 1(2), 87-89.

Arcà, M., Guidoni, P. y Mazzoli, P., (1990). **Enseñar ciencia. Cómo empezar: reflexiones para una educación científica de base.** (Paidós: Barcelona).

Arnold, P., Sarge, A. and Worrall, L. (1995) Children's knowledge of the Earth's shape and its gravitational field. *International Journal of Science Education*, 17(5), 635-641.

ASTER N° 20, (1995). Représentations et obstacles en géologie.

ASTER N° 20, (1995). Enseignement de la géologie.

Astolfi, J. (1993). Los obstáculos para el aprendizaje de conceptos de ciencias: la forma de franquearlos didácticamente. En Diez años de investigación e innovación en enseñanza de las ciencias. *CIDE*, 289-306.

Ault, C. (1998). Criteria of excellence for geological inquiry: the necessity of ambiguity. *Journal of Research in Science Teaching*, Vol. 35 189-212.

Azcárate, C., Espinet, M., Izquierdo, M. y Sanmartí, N. (1992). El papel de la Didáctica de las Ciencias Experimentales y de la Didáctica de la Matemática en el Curriculum de Formación del Profesorado. *Actas del Simposium sobre Pedagogía y Didácticas Específicas*, Universidad de Santiago de Compostela.

Bachelard, G. (1938). **La formation de l'esprit scientifique.** París : Vrin (Trad. al cast. *La formación del espíritu científico*, 1983, México: Siglo XXI)

Barrachina, R., (2002). La controversia sobre el problema de la radiación del cuerpo negro. *Revista Patagónica de Filosofía*. 3(1) 23-46

Beall, H. y Trimbur, J. (1999). How to read a scientific article. Writing summaries and critiques. En **Communicating Science.** (Skanlon, E, Hill, R. y Junker, K eds.) London: Routledge.

Bonan, L., (2006). La historia reciente de las Ciencias de la Tierra como estrategia de enseñanza para afrontar las representaciones epistemológicas ingenuas. Publicado en actas del *XIV Simposio de Enseñanza de la Geología*. Universidad de Aveiro, Portugal. 24 a 29 de julio.

Bonan, L., (2005). Cómo se define un problema de investigación en Didáctica de las Ciencias Naturales. Panelista invitada en las *Primeras Jornadas Nacionales en*

Didácticas Específicas. Escuela de Humanidades. Centro de Didácticas Específicas. UNSAM. Buenos Aires, 3 de noviembre.

Bonan, L., Praia, J. y Sellés Martínez, J. (2004). "Las controversias como mecanismo científico a desarrollar en las clases de ciencias. Un ejemplo proveniente del estudio de la dinámica terrestre". Publicado en actas del *XIII Simposio de Enseñanza de la Geología*. Alicante, julio de 2004.

Bonan, L., (2003). *Modelos Teóricos de Convección en el Manto. Análisis de su Evolución Disciplinar*. Documento inédito elaborado en el marco de la materia "Geofísica de la tierra Sólida". Dto. de Geología, FCEyN, UBA. Buenos Aires, diciembre de 2003.

Bonan, L., Praia, J. y Sellés Martínez, J., (2003). Consenso y Controversia alrededor de la Teoría de Convección en el Manto ¿Qué se enseña? *Primer Congreso Latinoamericano de Enseñanza de las Geociencias*. La Habana, febrero de 2003.

Bonan, L. (2002). Evolución del modelo de convección en el manto terrestre: Fundamentos conceptuales que estructuran su análisis didáctico. Publicado en actas del *XII Simposio sobre Enseñanza de la Geología*. Girona, julio de 2002.

Bonan, L., Galagovsky, L. y Sellés Marínez, J., (2001). Análisis didáctico integrado: el caso del Interior de la Tierra. *VI Congreso Internacional sobre Investigación en la Didáctica de las Ciencias*, Barcelona, setiembre de 2001.

Bonan, L. (2000). Los libros de texto: su rol en la enseñanza y el aprendizaje. Memoria de oposición. Concurso Regular de Jefe de Trabajos Prácticos de la materia Didáctica Especial y Práctica de la Enseñanza, CEFIEC, FCEyN, mimeo, Universidad de Buenos Aires.

Bonan, L. (1996). "Algunos puntos de contacto entre las ideas de los estudiantes y la evolución histórica del pensamiento científico a través de las Teorías del Ímpetus". Trabajo inédito, Universidad de Buenos Aires.

Brusi, D., (2001). **Investigando las Ciencias de la Tierra: Estructura de la Tierra y Tectónica de Placas**. AEPECT: Serie de Cuadernos Didácticos. Girona: Universidad de Girona.

Brusi, D., Pallí, L. y Mas, J. (1994) El espacio y el tiempo en Geología. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. Número Extra.

Buendía Eisman, L. y Colás Bravo, M. (1994), **Investigación Educativa**. (Ediciones Alfar: Sevilla).

Cachapuz, A., Praia, J., Gil Pérez, D., Carrascosa, J y Terrades, F. (en prensa). A Emergência da Didáctica como Campo Específico de Conhecimento. *Revista Portuguesa de Educação*.

Camilloni, A. (1998). Constructivismo y educación, en Carretero, M., Castorina, J. y Baquero, R. (eds.). **Debates constructivistas**. Buenos Aires: Aique.

Campanario, J. (1999). La ciencia que no enseñamos. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(3), 397-410.

Campanario, J. y Moya, A., (1999). ¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas. *Enseñanza de las Ciencias*, 17(2), 170-192.

Castorina, J. (1998). Los problemas conceptuales del constructivismo y sus relaciones con la educación, en Carretero, M., Castorina, J. y Baquero, R. (eds.) *Debates constructivistas*. (Buenos Aires: Aique.)

Chevallard, Y., (1991). **La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné** (Traduc. al castellano: La transposición didáctica. Del saber sabio al saber enseñado, 1997, Aique: Buenos Aires).

Condie, K. (1997). *Plate tectonics and crust evolution*. Great Britain: The Bath Press.

Cudmani, L. y Salinas, J. (2004). ¿Es importante la epistemología de las ciencias en la Formación de investigadores y de profesores en Física? *Enseñanza de las Ciencias*, 22(3), 455-462.

Cwojdzinski, S. (2004). Mantle plumes and dynamics of the Earth interior –towards a new model. *Geological Review*, vol. 52, N° 8/2.

Davies G., (1999). **Dynamic Earth. Plates, Plumes and Mantle Convection**. Cambridge University Press: Cambridge.

Davies (1977). Whole mantle convection and plate tectonics. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, Vol 49, 459-486.

Davies & Richards (1992). Mantle convection. *Journal of Geology Vol. 100*, 151-206.

Davini, M., (1996). Conflictos en la evolución de la didáctica. La demarcación de la didáctica general y las didácticas específicas. En **Corrientes didácticas contemporáneas**. (Buenos Aires: Paidós).

Del Carmen, L. y Jiménez Aleixandre, M. (1997). Los libros de texto: un recurso flexible. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*, Vol. 11, 5-14.

Duschl, R., (1997). **Renovar la enseñanza de las ciencias. Importancia de las teorías y su desarrollo**. (Madrid: Narcea)

Echeverría, J. (1995). *Filosofía de la ciencia*. Madrid: Akal.

- Espinet, M., 1999. *Memoria del Proyecto Docente*. Documento inédito
Universitat Autònoma de Barcelona.
- FRIGERIO, G., 1991. **Curriculum presente, ciencia ausente** (Buenos Aires, Miño y Dávila)
- Frodeman, R. (1995). Geological reasoning: Geology as an interpretative and historical science. *Geological Society of America Bulletin*, 107 (8), 960-968.
- Gagliardi, R. (1986). Los conceptos estructurales en el aprendizaje por investigación. La historia de las ciencias: una herramienta para la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 4(1), pp. 30-35.
- Galagovsky, L., Adúriz-Bravo, A., Bonan, L. y Morales, L. (1997). Inventando el átomo: modelos y analogías para la estructura de la materia. *X Reunión Nacional de Educación en Física*. Mar del Plata, Argentina.
- Galagovsky, L, Adúriz-Bravo, A. y Bonan, L. (1998) ¿Didáctica de las ciencias naturales o didáctica de las disciplinas? *Jornadas de Desarrollo en Docencia Universitaria* Expocátedra. Buenos Aires, julio de 1998.
- Galagovsky, L. y Adúriz Bravo, A. (2001). Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales. El concepto de Modelo Didáctico Analógico. *Enseñanza de las Ciencias*. 19 (2), 231-242.
- Galagovsky, L. (1996). **Redes conceptuales. Aprendizaje, comunicación y memoria**, (Buenos Aires: Lugar Editorial)
- García Cruz, M. (1996). La Historia de la Geología como hilo conductor de una unidad didáctica: tectónica de placas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 6(3) 211-216.
- Giere, R. (1999). Didáctica de la ciencia basada en el agente. Roles para la filosofía de la ciencia y las ciencias cognitivas. En Izquierdo (ed.) Aportación de un modelo cognitivo de ciencia a la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*. Número Extra.
- Giere, R., (1992). **La explicación de la ciencia. Un acercamiento cognoscitivo**. (México: Consejo Nacional de ciencia y tecnología)
- Gil, D., Fernández, I., Vilches, Cachapuz, A., Praia, J. A., Valdés, P., & Salinas, J., (2005). Questioning and Overcoming Distorted Views of Science: An Essential Requisite for the Renewal of Science Education. In: *The Nature of Science in Science Educational: rationales and strategies*. McComas, W. (Ed.). Kluwer Academic Publishers (in press).
- Gil Pérez, D., (1994). Contribución de la historia y de la filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación. *Enseñanza de las Ciencias*, 11 (2), 197-212.

- Glatzmaier, G. A. & Schubert, G. (1993). Three-dimensional spherical models of layered and whole mantle convection. *J. Geophys. Res.* 98, 21969-76.
- Gobert, J., (2001). A typology of causal models for plate tectonics: Inferencial power and barriers to understanding. *International Journal of Science Education*, Vol. 22 (9), 937-977.
- Gohau, G. (1995). Traquer les obstacles épistémologiques à travers les lapsus d'élèves et d'écrivains. *ASTER*, 20, 21-42.
- Grosbois, M., Ricco, G. y Sirota, R. (1992). **Du laboratoire a la classe le parcours du savoir. Etude de la transposition didactique du concept de respiration.** Centre National de la Recherche Scientifique, ADAPT, París : 1992.
- Holmes, A. (1973). **Geología Física.** Ediciones Omega (edición original en inglés de 1944)
- Izquierdo, M., Espinet, M., García, M., Pujol, R. y Sanmartí, N. (1999). Caracterización y fundamentación de la ciencia escolar. *Enseñanza de las Ciencias.* Aportación de un modelo cognitivo de ciencia a la enseñanza de las ciencias, Número Extra.
- Jacoby, W. (2001). Successes and failures in geodynamics: from past to future. *Journal of Geodynamics.* 32, 3-27.
- Jiménez, J., Hoces Prieto, R. y Perales, F.(1997) Análisis de los modelos y los grafismos utilizados en los libros de texto. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*,(11), 75-85.
- Jiménez M. y Sanmartí N. (1997). “¿Qué ciencia enseñar?: objetivos y contenidos en la Educación Secundaria”, en **La enseñanza y el aprendizaje de las ciencias de la naturaleza en la educación secundaria**, del Carmen coord. Barcelona: Horsori.
- Joshua, S. y Dupin. J. (1993). **Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques.** París: PUF
- Karason H., & van der Hilst, R., (2000). Constrains on Mantle Convection from Seismic Tomography. In *The History and Dynamics of Global Plate Motions. Geophysical Monograph 121. American Geophysical Union*, 277-288.
- Knopoff, L., 1969. En **The Earth's Crust and the Upper Mantle.** Hart, P. Editor: Washington: American Geophysical Union.
- Kuhn, T. (1977). **The Essential Tension. Selected Studies in Scientific Tradition and Change.** Chicago: University of Chicago Press. (Trad. al español: La Tensión Esencial (1982). México: Fondo de Cultura Económica)
- Kuhn, T. (1971). **La estructura de las revoluciones científicas** (México: Fondo de Cultura Económica).

- Latorre, A., Arnal, J. y del Rincón, D., (1996). **Bases Metodológicas de la Investigación Educativa**. Barcelona: Nurtado Ediciones.
- Le Grand, H. (1988). **Drifting continents and shifting theories**. Cambridge University Press: Cambridge.
- Lombardi, O., (1998). La noción de modelo en ciencias. *Educación en Ciencias*, 2(4), 5-17.
- Lombardi, O., (2002). Irreversibilidad: origen y vigencia de una controversia. *Revista Patagónica de Filosofía*, 3(1), 46-73.
- Marques, L. (1998). De la distribución de los continentes a la tectónica de placas: concepciones de los alumnos. *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales*. 18:7-17.
- Marques, L. y Thompson, D. (1997). Misconceptions and conceptual changes concerning continental drift and plate tectonics among portuguese students aged 16-17. *Research in Science and Technological Education*, 15(2): 192-222.
- Marques, L. y Praia, J., (2006). As Teorias Científicas na abordagem da Tectónica Global: compreensão de um percurso histórico. In: **A História da Geologia na Educação Científica**. Edições ASA. Porto.
- Meinardi, E., Revel Chion, A., Adúriz-Bravo, A., Godoy, E., Iglesias, M. y Bonan, L., (2006). La Educación para la Salud Sexual: vínculos entre la investigación, las aulas y el currículo. *V Congreso Iberoamericano de Educación Ambiental*. Joinville, 5-8 de abril.
- Meinardi, E., Adúriz Bravo, A., Bonan, L. y Morales, L (2002). El modelo de ciencia escolar. Una propuesta de la didáctica de las ciencias naturales para articular la normativa educacional y la realidad del aula. *Revista Enseñanza de la Física* **15**(1), 13-21.
- Ministério da Educação de Portugal (2002). Coleção Temas de Investigação: **Ciência, Educação em Ciência e Ensino das Ciências**. (Eds. Cachapuz, J., Praia, J. e Jorge, M.). Lisboa.
- Morgan, W. (1971). Convection Plumes in the lower mantle. *Nature*, vol. 230, 42-46.
- Muir Wood, R., (1985). **The Dark side of the Earth**. London: Allen & Unwin.
- Nudler, O. (2002). Campos controversiales: hacia un modelo de su estructura y dinámica. *Revista Patagónica de Filosofía*, 3(1), 9-21.
- Nussbaum, J. (1985). The earth as a cosmic body. In: Driver, R., Guesne, E. & Tiberghien, A. (eds). **Children's ideas in science**, p. 170-192. Keynes: Open University Press

- Oliva, J. (2005). Sobre el estado actual de la revista *Enseñanza de las Ciencias* y algunas propuestas de futuro. *Enseñanza de las Ciencias*, 23(1), 123-132.
- Paschoale, C., (1990). Uma abordagem semiótica para a Geologia e o conto policial. O conhecimento geológico na América Latina: questões de história e teoria. Actas del I Colóquio Brasileiro de Historia e Teoria do Conhecimento Geologico, Universidade Estadual de Campinas.
- Pedrinaci, E. (2001). **Los procesos geológicos internos**. Madrid: Síntesis.
- Pedrinaci, E., Jaen, M. y Brusi, D. (2004). ¿Qué ha cambiado en la didáctica de la geología en las dos últimas décadas? *Alambique* (41) 42-53.
- Pedrinaci E. y Berjillos, P. (1994). El concepto de tiempo geológico: orientaciones para su tratamiento en la educación secundaria. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 2(1), 240-251.
- Pedrinaci, E., (1998a). La dinámica interna de la Tierra: un aprendizaje complejo. *Alambique* (18), 5-6.
- Pedrinaci, E., (1998b). Procesos geológicos internos: entre el fijismo y la Tierra como sistema. *Alambique* (18), 7-17.
- Piaget, J. y Garcia, R. (1980). **Psicogénesis e Historia de la Ciencia**. (México: Siglo Veintiuno Editores)
- Porlán, R. (1998). Pasado, presente y futuro de la Didáctica de las Ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 16(1), 175-185.
- Porlán, R. (1997). Conocimiento profesional y epistemología de los profesores I: Teorías, métodos e instrumentos. *Enseñanza de las Ciencias*, 15(2), 155-171.
- Praia, J. (1999). Relatório da disciplina de Didáctica da Geologia. Documento inédito. pp.172. Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Porto. Portugal.
- Praia, J. (1995). Formação de Professores no Ensino da Geologia: contributos para uma Didáctica fundamentada na epistemologia das Ciências. O caso da Deriva Continental. Tesis de Doctorado. Universidade de Aveiro.
- Praia, J., Cachapuz, A., & Gil-Pérez, D., (2002) (a). Problema, Teoria e Observação em Ciência: para uma reorientação epistemológica da Educação em Ciência. *Ciência & Educação*, 8 (1), 127-145.
- Praia, J., Cachapuz, A. & Gil-Pérez, D., (2002) (b). A Hipótese e a Experiência Científica em Educação em Ciência: contributos para uma reorientação epistemológica. *Ciência & Educação*, 8 (2), 253-262.

Praia, J. y Cachapuz, A. (1997). Prácticas de Profesores de Ciências: sua análise à luz de novas orientações epistemológico-didáticas. V *Congreso Internacional sobre Investigación en la Didáctica de las Ciencias*, Murcia.

Richards, M., Gordon, R. & van der Hilst, R. (2000). Introduction: Plate Tectonics and Mantle Convection. Three Decades Later. The history and Dynamics of Global Motions. *American Geophysical Union, Monograph 121*, 1-4.

Ritcher, F. & McKenzie, D. (1981). On some consequences and possible causes of layered mantle convection. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No B7, 6133-6142.

Ross, K y Shuell, T. (1993). Children's beliefs about earthquakes. *Science Education*, 77(2): 191-205.

Rowland, F. (1999). Scientists in communication. En **Communicating Science**. (Skanton, E, Hill, R. y Junker, K eds.) London: Routledge.

Runcorn, S. (1969). Convection in the mantle. En **The Earth's Crust and the Upper Mantle**. Hart (Ed). Washington: American Geophysical Union.

Samaja, J (1997). **Epistemología y Metodología. Elementos para una teoría de la investigación científica**. Buenos Aires, EUDEBA.

Saltiel, E. y Viennot, L (1985). ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes? *Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), 137-144.

Sanmartí, N. e Izquierdo, M., (1997). Reflexiones en torno a un modelo de ciencia escolar. *Investigación en la escuela*, 32, 51-62.

Sanmartí, N. y Azcárate, C. (1997). Reflexiones en torno a la línea editorial de la Revista Enseñanza de las Ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 1997, 15(1).

Schoon, K. (1992); Students' alternative conceptions of Earth and Space. *Journal of Geological Education*, 40: 209-214.

Schubert G. (1979) Subsolidus convection in the mantles of terrestrial planets. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 7, 289-342.

Schubert, G., Turcotte, D. & Olson, P. (2001). **Mantle Convection in the Earth and Planets**. Cambridge: Cambridge University Press.

Sequeiros, L. y Anguita, F. (2003). Nuevos saberes y nuevos paradigmas en Geología. Historia de las nuevas propuestas en las Ciencias de la Tierra en España entre 1978 y 2003. *Llull, Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas*. Vol. 26, 279-307.

Sellés, J. y Bonan L. (2000). Problemas de enseñanza-aprendizaje del tema mecanismos focales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 8(1), 54-61.

Sharp, J. Mackintosh, M. & Seedhouse, P. (1995). Some comments on children's ideas about earth structure, volcanoes, earthquakes and plates. *Teaching Earth Sciences*, 20: 28-31.

Smith, M. (1995). O interior da Terra. En **Trabalhando coas Ciencias da Terra**. Brañas Pérez, M., González A. y Jiménez Alexandre, M. Santiago de Compostela: ICE.

Thagard, P. (1992). **Conceptual Revolutions**. New Jersey: Princeton University Press.

Thompson, D., Praia, J. & Marques, L., (2000). The Importance of History and Epistemology in the Designing of Earth Science Curriculum Materials for General Science Education. *Research in Science & Technological Education*, 18(1), 45-62.

Tizón, C. M., López Penelas, M., Castedo A, Álvarez, A. y De Veja, P. (1998). El concepto de placa litosférica : Propuesta de una secuencia de actividades para la enseñanza-aprendizaje de la Tectónica de Placas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 6(2), 154-159.

Turcotte & Schubert (1982). **Geodynamics: Applications of Continuum Physics to Geological Problems**. John Wiley, New York: 450p.

Valenzuela, F., Alvarado, P. y Malberti, A., (2003). Una propuesta didáctica para conocer la estructura interna de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. Vol 11(1), 54-59.

Uyeda, S. (1980). **La nueva concepción de la Tierra**. Blume: Barcelona

van der Hilst, R., Albaréde, F. & Kárason, H., (2001). *On the nature of mantle convection: new views and constraints from seismic imaging and geochemistry*. Eleventh Annual V. N. Goldschmidt Conference. Norfolk: September 2001.

Van dijk, T. (1978). **La ciencia del texto** (tit. orig. en holandés *Tekstwetenschap. Een interdisciplinair inleiding*. Hurpesa: Het Spectrum) Barcelona: Paidós.

Verret, M. (1975). **Le temps des études**. Paris : Libraire Honoré Champion.

Viennot, L. (1979). **Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire**. Paris: Hermann.

Wilson, T. (1965). Deriva continental. Madrid: Blume Ediciones (Edición original en inglés: *Scientific American* Continental Drift. April 1973).

Yuen, D., Peltier, W. y Schubert, G. (1981). On the existence of a second scale of convection in the upper mantle. *Geophys. J.R. astr. Soc.*(171-190).

Anexo de Publicaciones

Anexo de Imágenes

The Earth Crust and the Upper Mantle

Índice Temático

Contents	
Foreword	v
Preface	vii
1. Composition	
Composition and Evolution of the Upper Mantle	A. E. RINGWOOD 1
Density and Composition of the Upper Mantle: First Approximation as an Olivine Layer	FRANCIS BIRCH 18
Chemical Composition of the Earth's Crust ..	A. B. RONOY AND A. A. YAROSHEVSKY 37
Isotope Geochemistry of Crust-Mantle Processes	STANLEY R. HART 58
2. Heat Flow	
Thermal History of the Earth	E. A. LUBIMOVA 63
Heat Flow in North America	GENE SIMMONS AND ROBERT F. ROY 78
Heat Flow Map of Eurasia	E. A. LUBIMOVA AND B. G. POLYAK 82
Heat Flow in Oceanic Regions	R. P. VON HERZEN AND W. H. K. LEE 88
Terrestrial Heat Flow in Volcanic Areas	KI-ITI HORAI AND SEIYA UYEDA 95
3. Seismology	
Seismology and Upper Mantle Investigations	A. R. RITSEMA 110
Seismicity of the Earth	SETUMI MIYAMURA 115
Tectonic Activity in North America as Indicated by Earthquakes	GEORGE P. WOOLLARD 125
Seismicity of Continental Asia and the Region of the Sea of Okhotsk, 1953-1965	E. F. SAVARENSKY AND N. V. GOLUBEVA 134
Seismicity of the European Area	VÍT KÁRNÍK 139
Seismicity of Southeast Australia	J. C. JAEGER AND LESLEY READ 145
Seismicity of the Mid-Oceanic Ridge System	LYNN R. SYKES 148
Worldwide Earthquake Mechanism	ANNE B. STEVENS 153
Mechanism of Earthquakes in and near Japan and Related Problems	MASAJI ICHIKAWA 160
The Field of Elastic Stresses Associated with Earthquakes	L. M. BALAKINA, L. A. MISHARINA, E. I. SHIROKOVA, AND A. V. VVEDENSKAYA 166
Zero Frequency Seismology	FRANK PRESS 171
Prediction of Earthquakes	TAKAHIRO HAGIWARA 174
Explosion Seismology: Introduction	I. P. KOSMINSKAYA 177

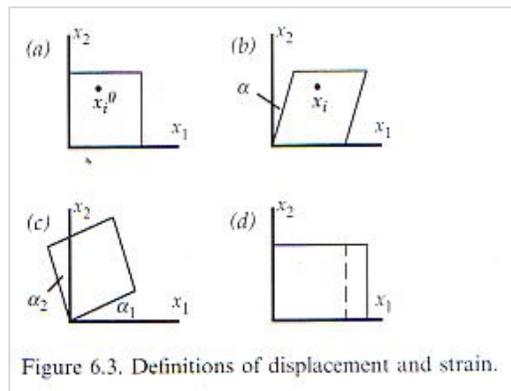
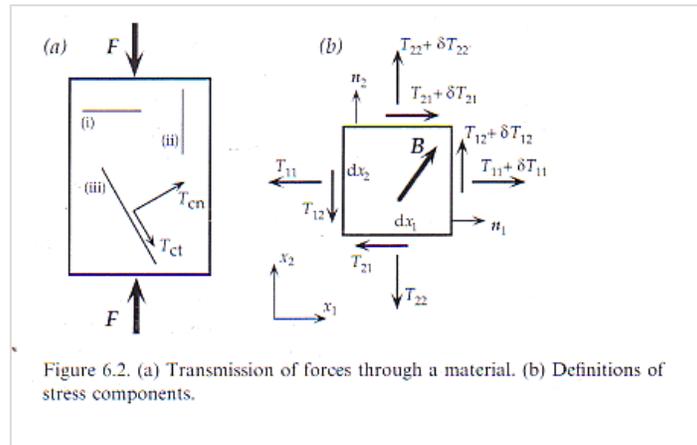
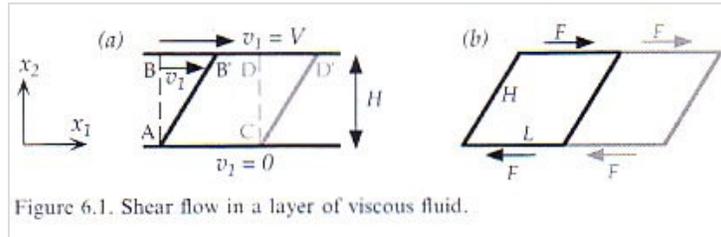
Explosion Seismic Studies in Western Europe	H. GLOSS	178
Seismic Crustal Studies in Southeastern Europe	V. B. SOLLOGUB	189
Explosion Seismology in the USSR I. P. KOSMINSKAYA, N. A. BELYAEVSKY, AND I. S. VOLVOVSKY		195
Explosion Seismic Studies in North America JOHN H. HEALY AND DAVID H. WARREN		208
Seismic Model of the Atlantic Ocean	JOHN EWING	220
Explosion Seismic Refraction Studies of the Crust and Upper Mantle in the Pacific and Indian Oceans	GEORGE G. SHOR, JR., AND RUSSELL W. RAITT	225
Surface Waves and Crustal Structure	JAMES N. BRUNE	230
Regional Variations of P-Wave Velocity in the Upper Mantle beneath North America	EUGENE HERRIN	242
Upper Mantle Structure and Velocity Distribution in Eurasia	JIRI VANEK	246
Anisotropy of the Upper Mantle	RUSSELL W. RAITT	250
Seismic Surface-Wave Data on the Upper Mantle	JAMES DORMAN	257
Higher-Mode Surface Waves	Z. ALTERMAN	265
Attenuation of Seismic Waves in the Mantle	LEON KNOPOFF	273
Seismic Models of the Upper Mantle	JIRI VANEK	276
Earthquakes and Tectonics	B. A. PETRUSHEVSKY	279
 4. Gravity		
Standardization of Gravity Measurements	GEORGE P. WOOLLARD	283
Figure of the Earth and Mass Anomalies Defined by Satellite Orbital Perturbations M. A. KHAN		293
Gravity Anomalies as a Function of Elevation: Some Results in Western Europe S. CORON		304
The Relation between the Earth's Crust, Surface Relief, and Gravity Field in the USSR	R. M. DEMENITSKAYA AND N. A. BELYAEVSKY	312
Regional Variations in Gravity	GEORGE P. WOOLLARD	320
Gravity Field over the Atlantic Ocean ..	MANIK TALWANI AND XAVIER LE PICHON	341
Gravity and Its Relation to Topography and Geology in the Pacific Ocean PETER DEHLINGER		352
Gravity Anomalies over Volcanic Regions	ALEXANDER MALAIHOFF	364
Recent Movements of the Earth's Crust and Isostatic Compensation E. V. ARTYUSHKOV AND YU. A. MESCHERIKOV		379
 5. Magnetism		
Reduction of Geomagnetic Data and Interpretation of Anomalies TAKESI NAGATA		391

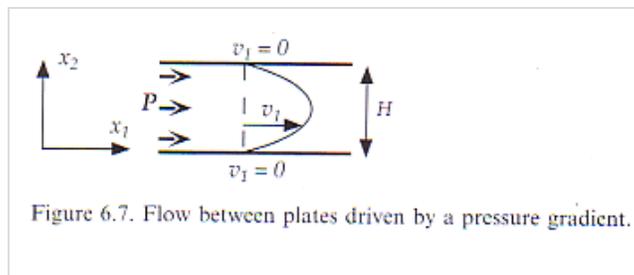
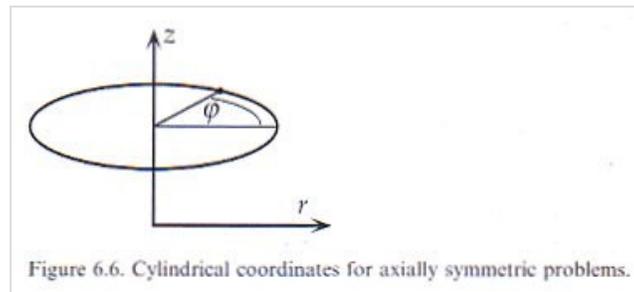
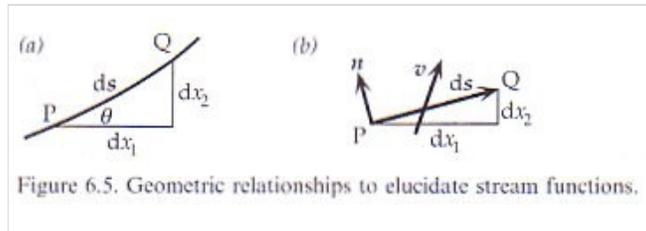
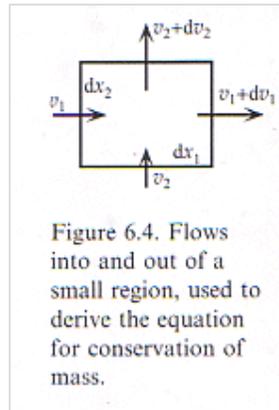
The Relation of Magnetic Anomalies to Topography and Geologic Features in Europe	A. HAHN AND A. ZITZMANN	399
Aeromagnetic Investigations of the Earth's Crust in the United States	ISIDORE ZIETZ	404
Relation of Magnetic Anomalies to Topography and Geology in the USSR	TATIANA SIMONENKO	415
Magnetic Intensity Field in the Pacific	VICTOR VACQUIER	422
Geomagnetic Studies in the Atlantic Ocean	J. R. HEITZLER	430
Magnetic Studies over Volcanoes	ALEXANDER MALAHOFF	436
The Paleomagnetic Vector Field	S. K. RUNCORN	447
Magnetic Anomalies and Crustal Structure	NED A. OSTENSO	457
Conductivity Anomaly of the Upper Mantle	TSUNEJI RIKITAKE	463
Magnetotelluric Studies of the Electrical Conductivity Structure of the Crust and Upper Mantle	T. R. MADDEN AND C. M. SWIFT, JR.	469
 6. Magmatism and Metamorphism		
The Ultramafic Belts	PETER J. WYLLIE	480
Batholiths and their Orogenic Setting	AHTI SIMONEN	483
The Origin of Basalt Magmas	D. H. GREEN AND A. E. RINGWOOD	489
Plateau Basalts	HISASHI KUNO	495
Andesitic and Rhyolitic Volcanism of Orogenic Belts ...	ALEXANDER R. MCBIRNEY	501
Mafic and Ultramafic Inclusions in Basaltic Rocks and the Nature of the Upper Mantle	HISASHI KUNO	507
Petrology of the Precambrian Basement Complex	K. R. MEHNERT	513
Age Relationships of the Precambrian Basement Rock Complex	HISASHI KUNO	519
Metamorphism and Its Relation to Depth	AKIHO MIYASHIRO	519
 7. Tectonics		
Crustal Movements and Tectonic Structure of Continents	V. E. KHAIN AND M. V. MURATOV	523
Continental Rifts	V. V. BELOUSSOV	539
Wrench (Transcurrent) Fault Systems	H. W. WELLMAN	544
Continental Margins	CHARLES L. DRAKE	549
The Crust and Upper Mantle beneath the Sea	PETER R. VOGT, ERIC D. SCHNEIDER, AND G. LEONARD JOHNSON	556
 8. Experimental and Theoretical Geophysics		
The Electrical Conductivity of the Mantle	D. C. TOZER	618

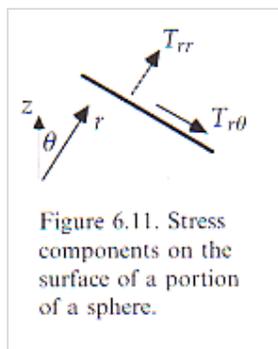
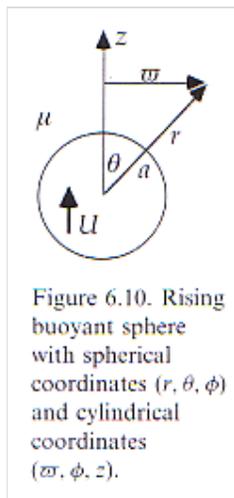
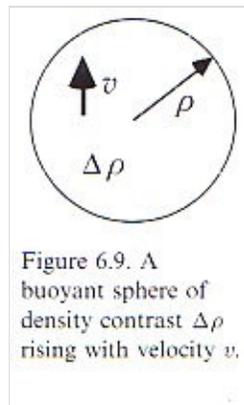
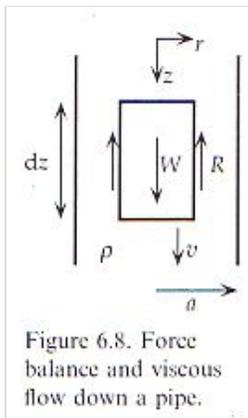
Heat Conductivity in the Mantle	SYDNEY P. CLARK, JR.	622
Magnetic Properties of Rocks	JOHN VERHOOGEN	627
Phase Equilibrium Studies Relevant to Upper Mantle Petrology ..	M. J. O'HARA	634
Phase Transitions	A. E. RINGWOOD AND D. H. GREEN	637
Equation of State at High Pressure	V. N. ZHARKOV AND V. A. KALININ	650
The Mohorovicic Discontinuity	D. P. MCKENZIE	660
Low-Velocity Layers in the Upper Mantle ..	V. A. MAGNITSKY AND V. N. ZHARKOV	664
The Transitional Layer in the Mantle	V. A. MAGNITSKY	676
9. Special Problems		
Continental Drift and Convection	LEON KNOPOFF	683
Problem of Convection in the Earth's Mantle	E. N. LYUSTIKH	689
Convection in the Mantle	S. K. RUNCORN	692
Interrelations between the Earth's Crust and Upper Mantle ..	V. V. BELOUSSOV	698
Author Index		713
Subject Index		726

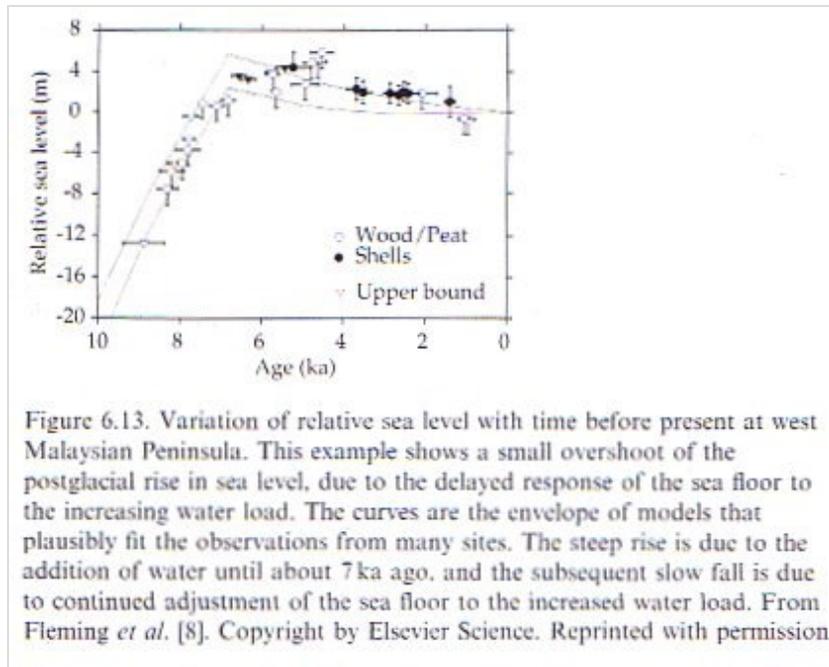
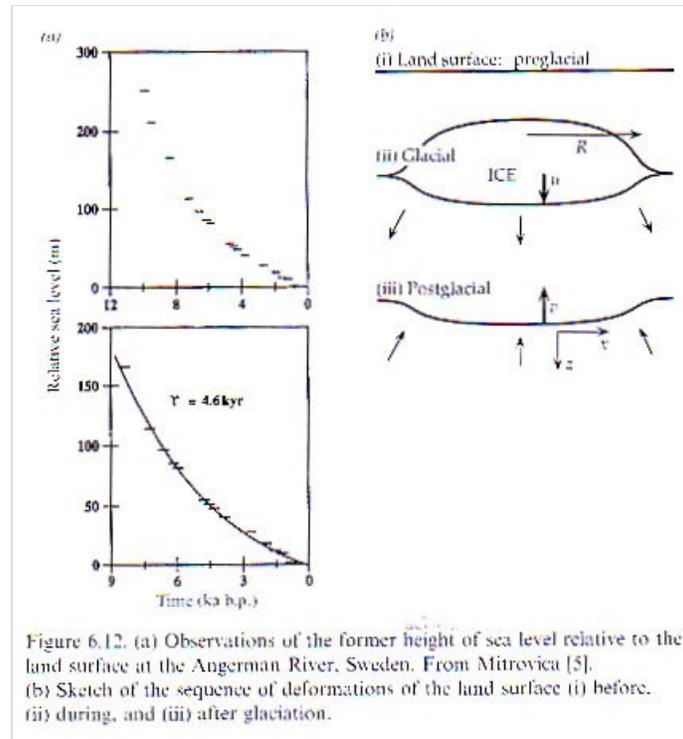
L1: Dynamic Earth. Plates, Plumes and Mantle Convection

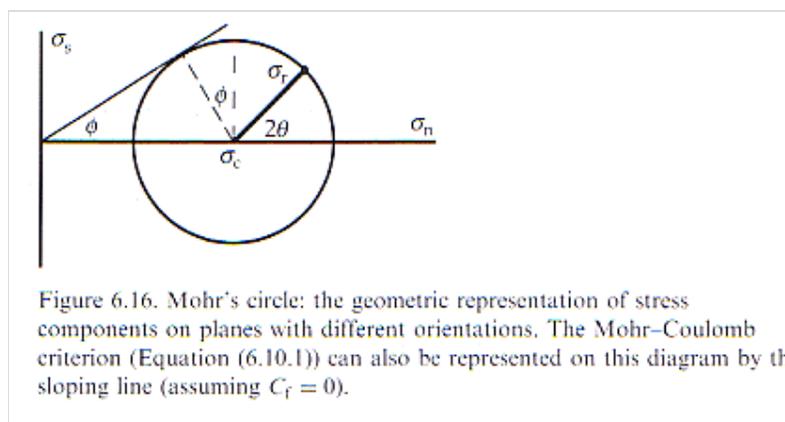
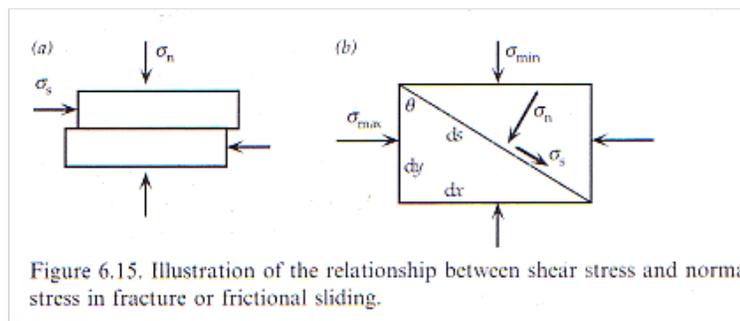
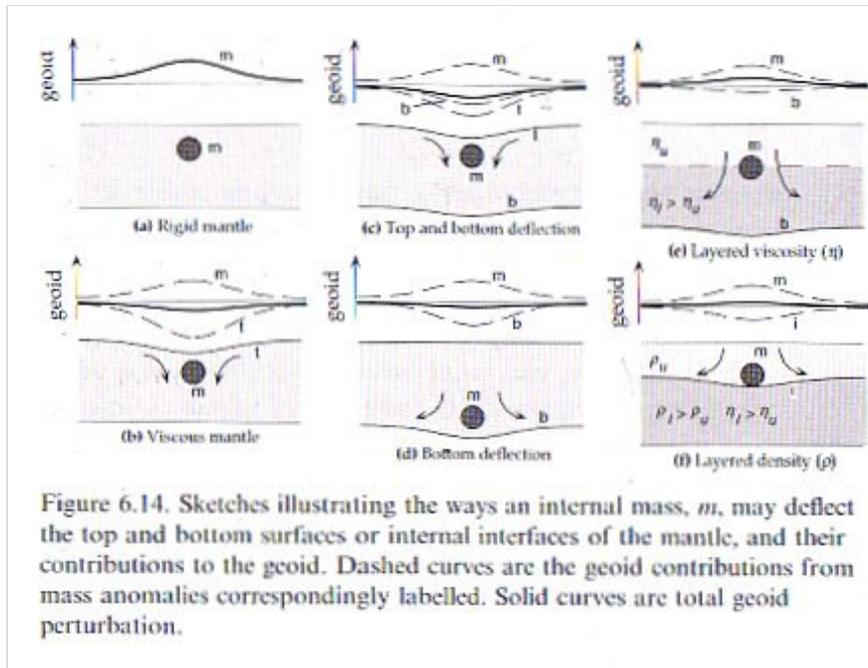
Imágenes del Capítulo 6.

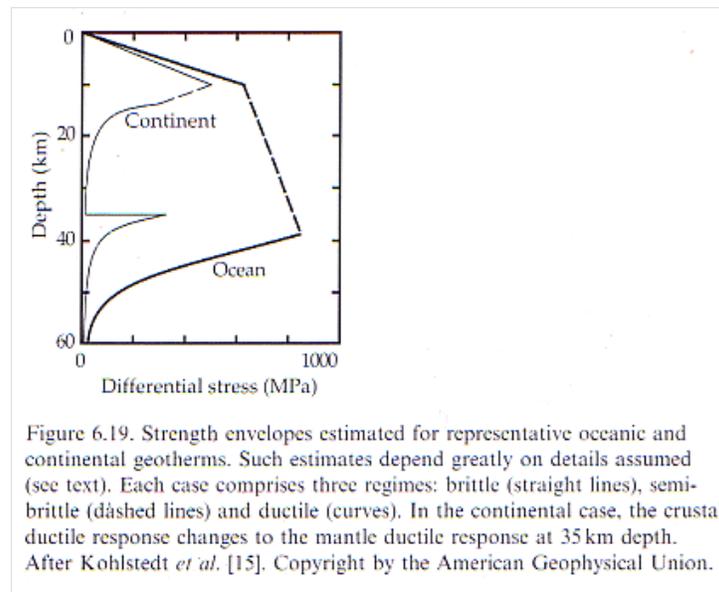
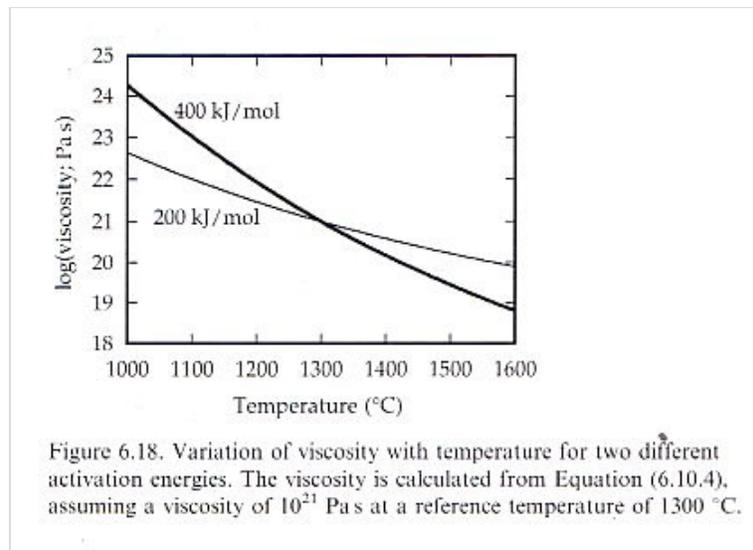
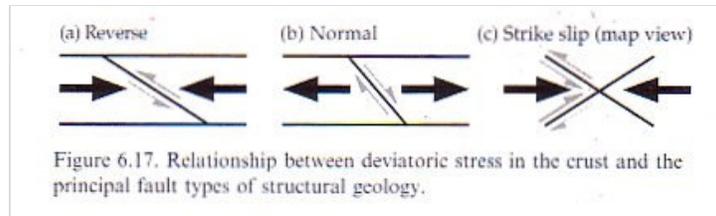




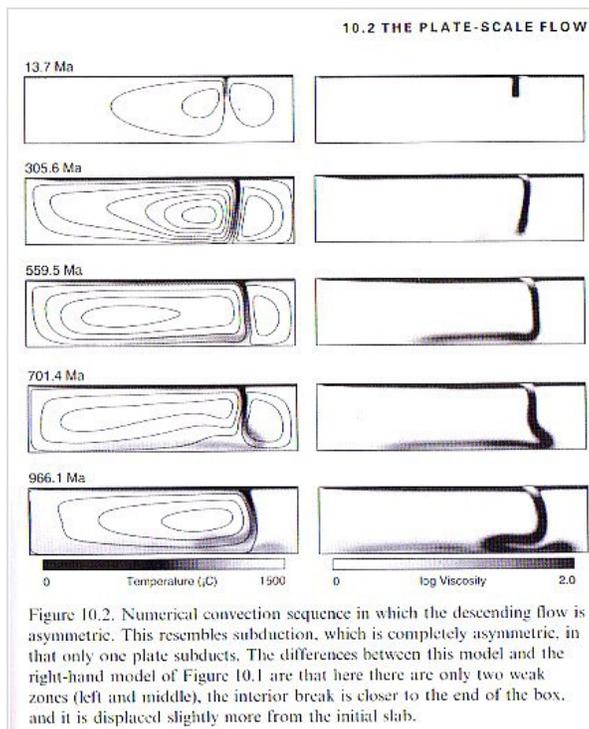
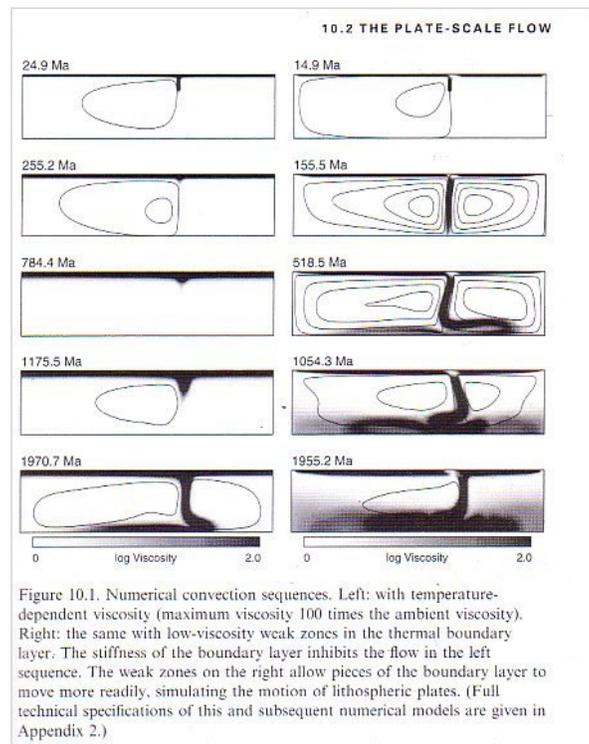








Imágenes del Capítulo 10



10.2 THE PLATE-SCALE FLOW

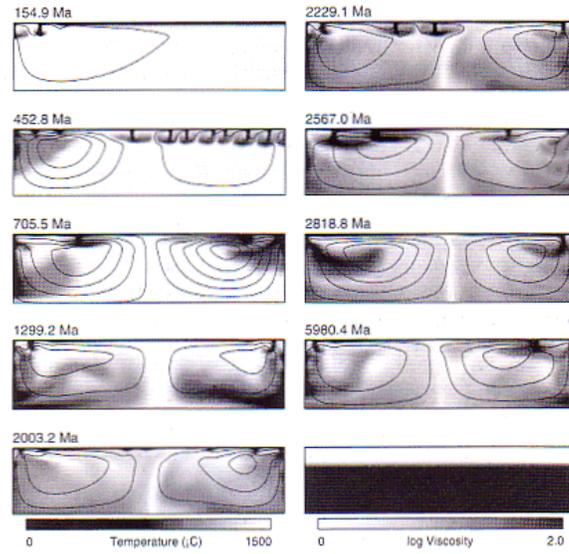


Figure 10.3. Convection sequence with layered viscosity and internal heating. The fluid in the lower part of the box has viscosity 100 times that in the upper part (lower right panel).

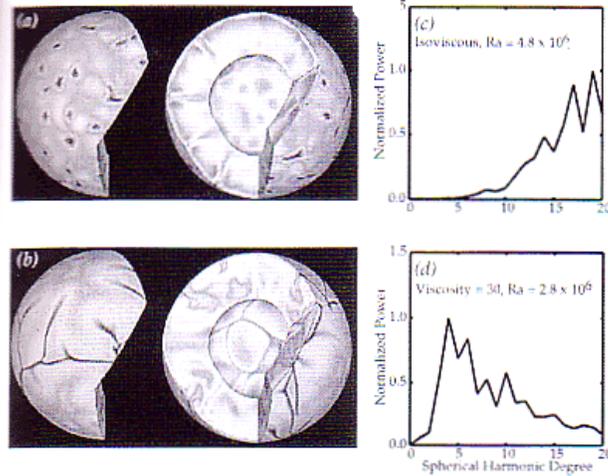
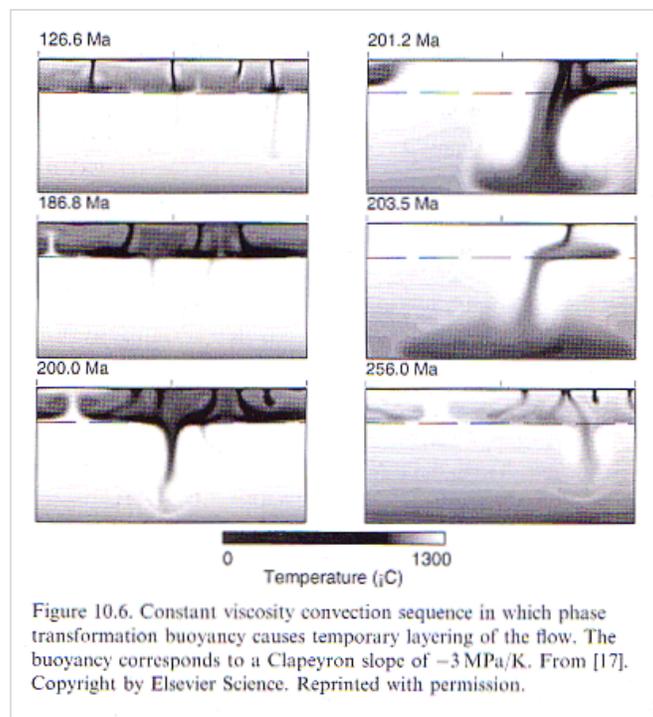
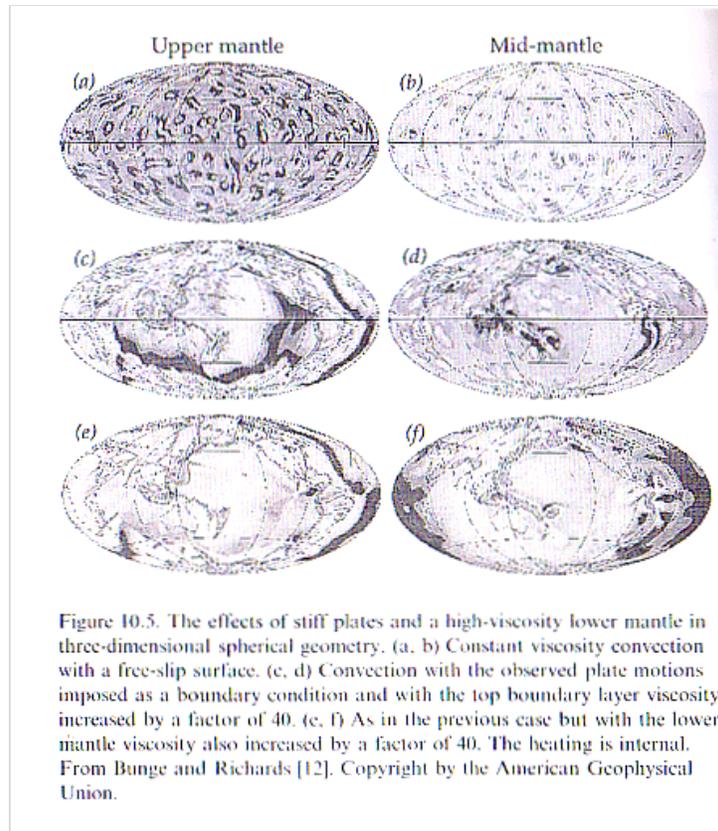
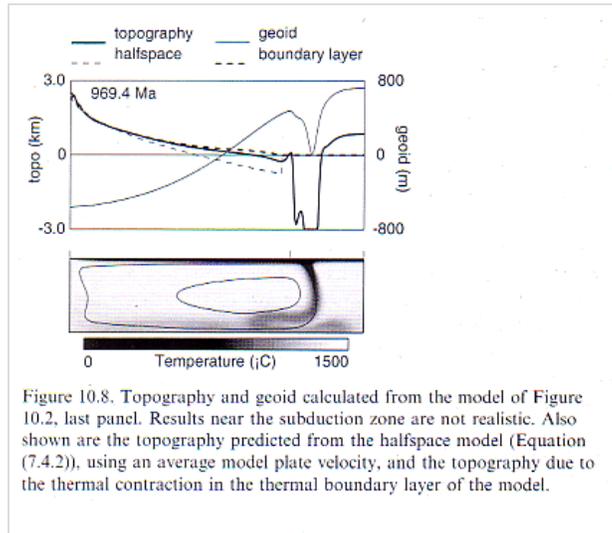
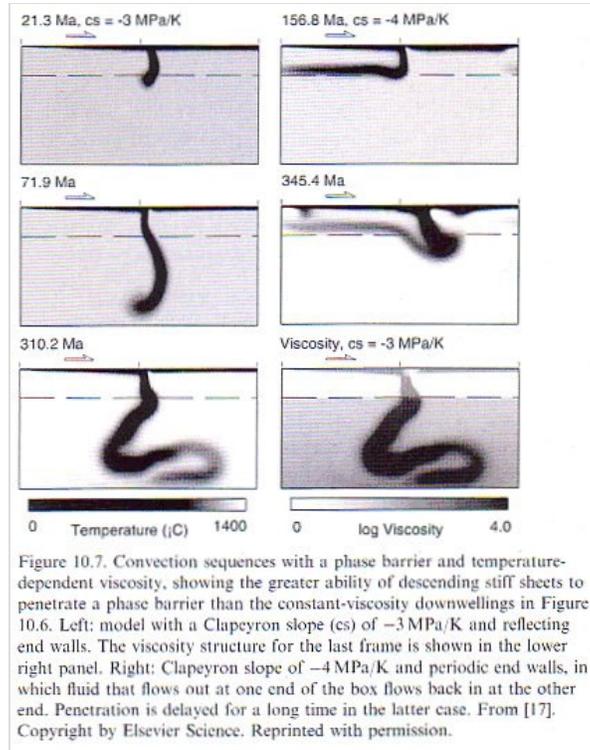
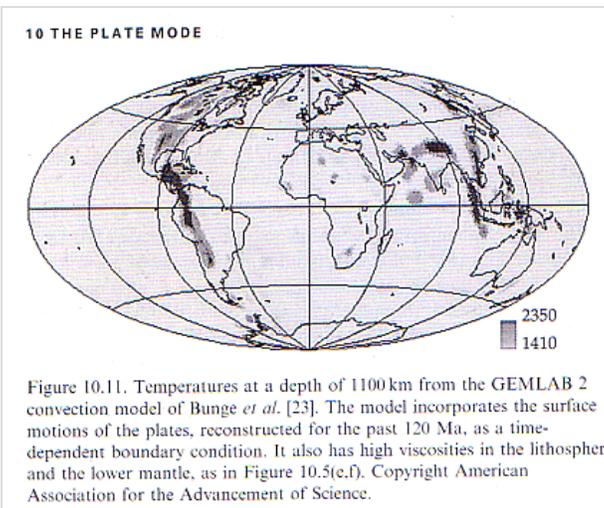
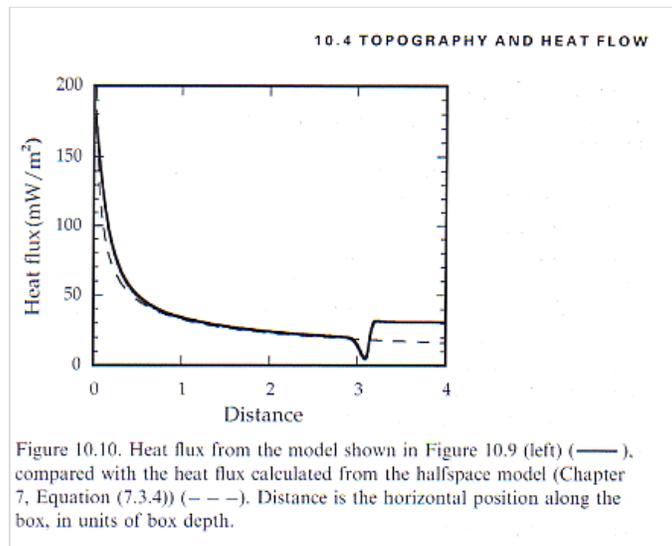
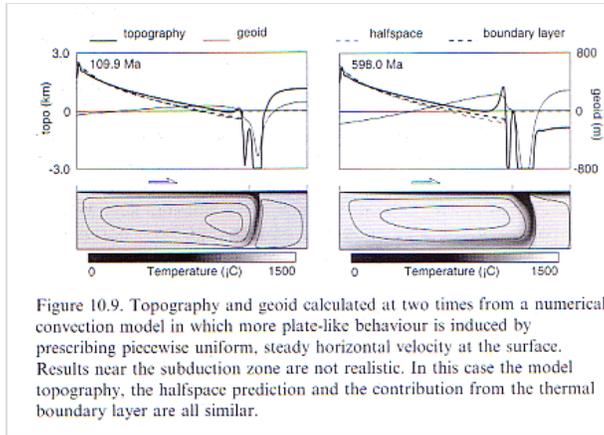


Figure 10.4. The effect in spherical geometry of viscosity that increases with depth. The top model (a) has constant viscosity, while in the bottom model (b) the viscosity increases by a factor of 30 at a depth of 670 km. The spherical harmonic power spectra (c, d) reveal the larger horizontal scale of the flow in model (b) compared with (a), which can also be seen in the surface patterns of (a) and (b). The models are incompressible with internal heating. From Bunge *et al.* [11]. Reprinted from *Nature* with permission. Copyright Macmillan Magazines Ltd.







10 THE PLATE MODE

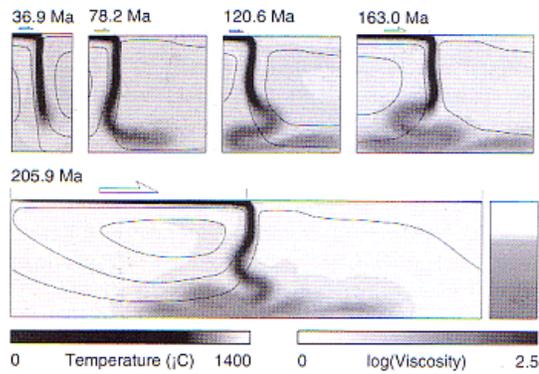


Figure 10.12. Frames from a convection model simulating subduction of an oceanic plate into mantle viscosity that increases with depth. The viscosity steps by a factor of 10 at a depth of 700 km, and it also has a smooth exponential increase with depth by a further factor of 10. Thus the bottom viscosity is 100 times the viscosity just below the lithosphere. The small panel at the lower right shows the viscosity variation with depth. The viscosity is also strongly temperature-dependent, with a maximum value 300 times the ambient value. The full computational box is shown only in the last frame (at 205.9 Ma). Only the central segment of the box is shown in the earlier frames.

10.5 COMPARISONS WITH SEISMIC TOMOGRAPHY

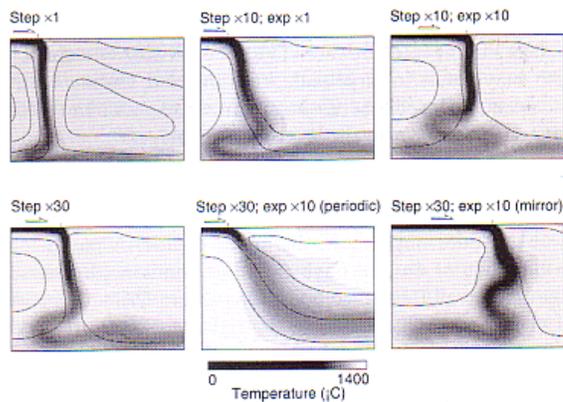


Figure 10.13. Frames from a series of convection models like that of Figure 10.12, with different variations of viscosity with depth. The cases are labelled with the magnitude of the viscosity step at 700 km and the magnitude of the superimposed smooth exponential increase, if any. The top left frame has no depth dependence. End boundary conditions are periodic, except in the lower right frame, which has no-flow ('mirror') end walls.

Imágenes del Capítulo 12

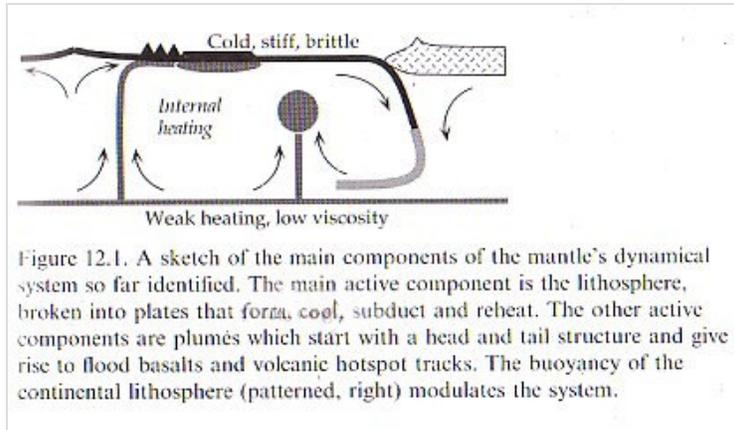


Figure 12.2. Topography of the sea floor near the Eltanin fracture zone in the south-east Pacific (compare with the global map, Figure 4.3). The East Pacific Rise is clearly offset by the Eltanin transform fault, with no indication of rise topography extending across the fault. This is explained if the rise topography is due entirely to near-surface cooling with no contribution from a putative buoyant upwelling under the rise.

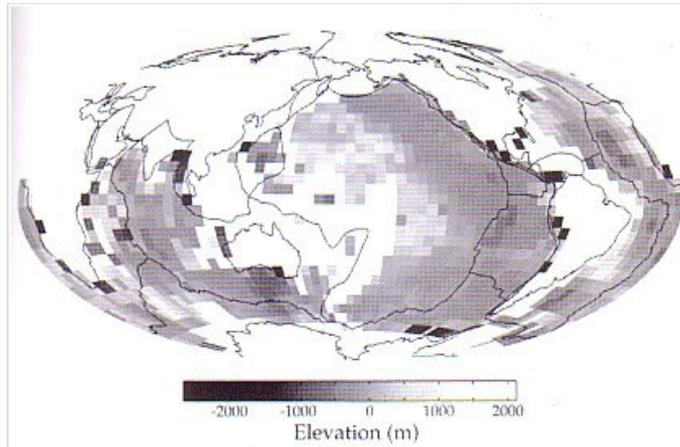


Figure 12.3. Anomalous seafloor topography. An age correction (Equation (12.3.1) with $b = 320 \text{ m/Ma}^{1/2}$) and a correction for crustal thickness using the $5^\circ \times 5^\circ$ grid of Mooney *et al.* [11] have been removed. Figure courtesy of S. V. Panasyuk, Harvard University [10].

12.2 OTHER OBSERVABLE EFFECTS



Figure 12.4. Sketches of the possible evolution of the Pacific mantle during the Cretaceous period, about 100 Ma ago. After [9]. Copyright by the American Geophysical Union.

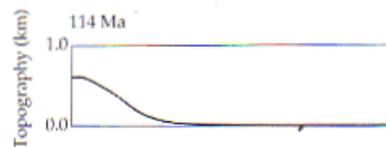
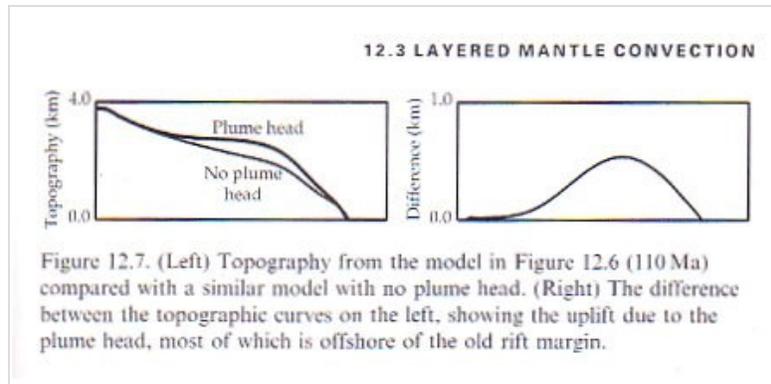
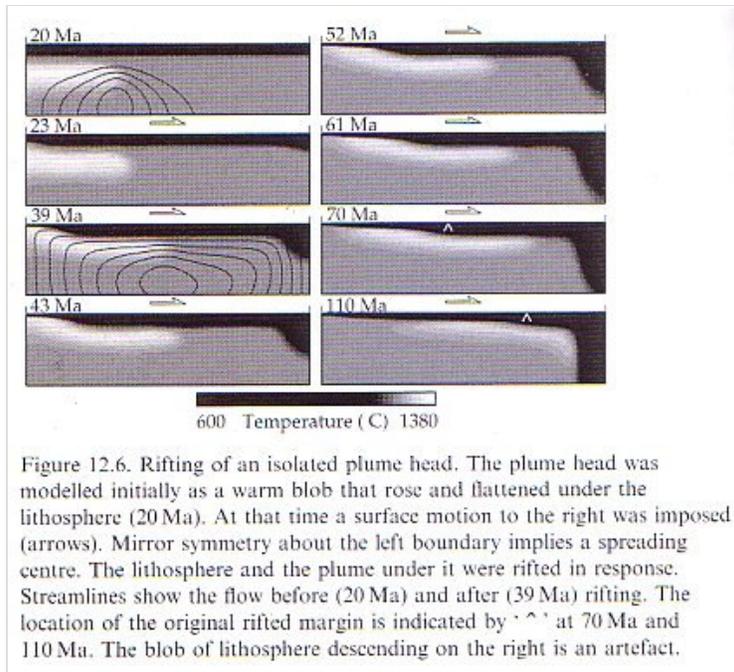
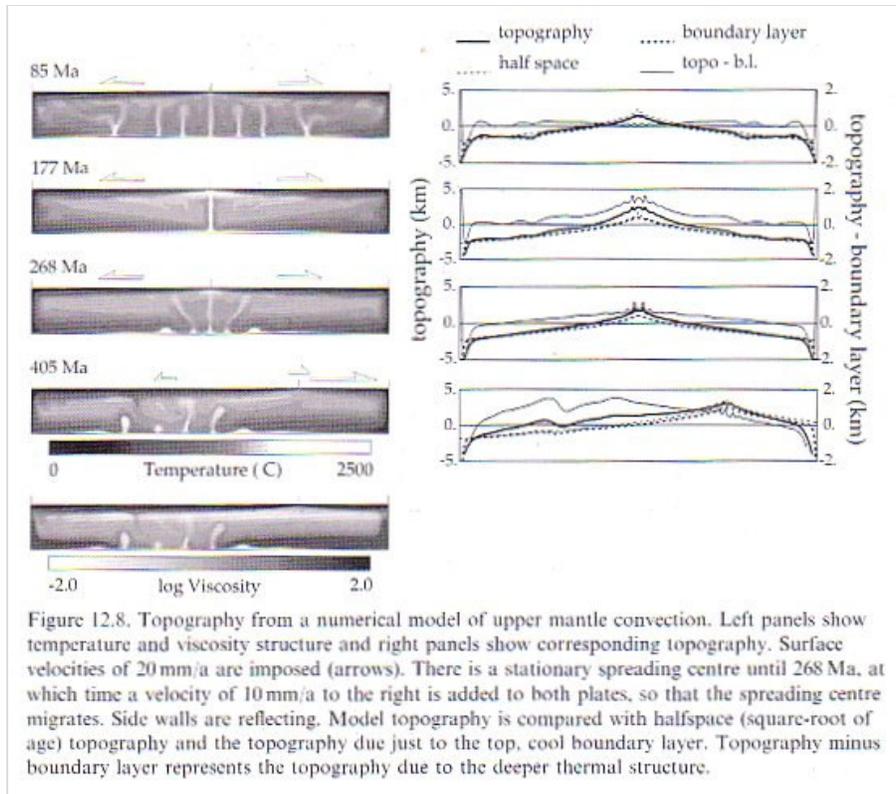


Figure 12.5. Topography generated by the plume head of Figure 11.10. The profile is from the plume axis (left) to a radius of 3000 km (right).



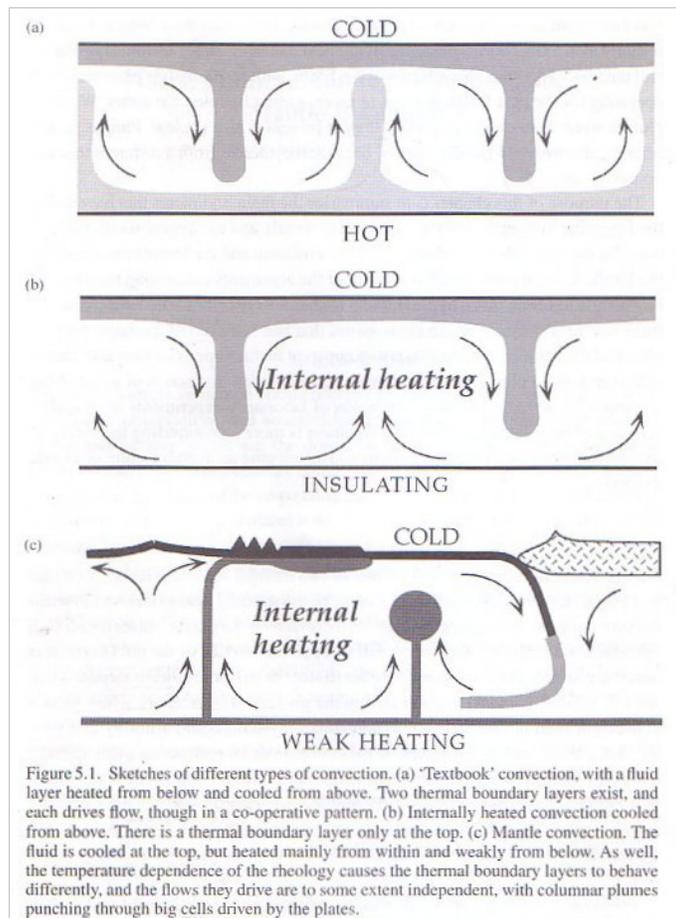


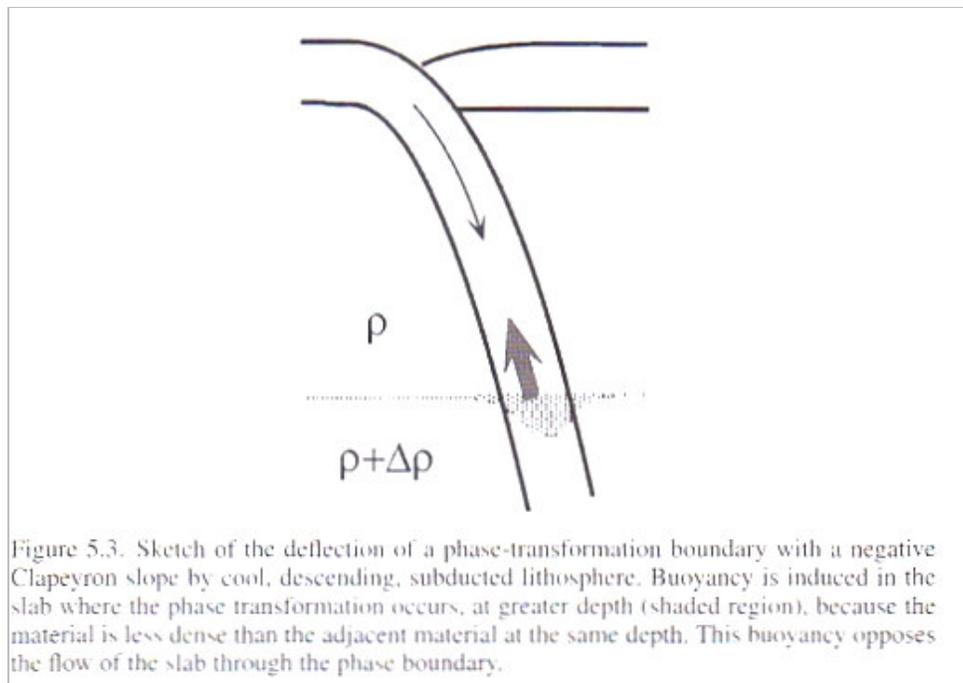
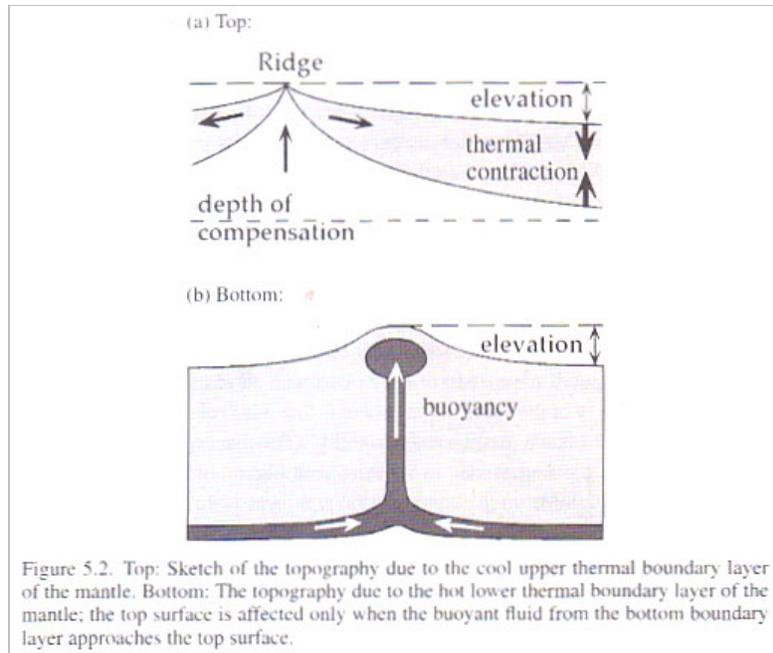
10 The plate mode	261
10.1 The role of the lithosphere	262
10.2 The plate-scale flow	264
10.2.1 Influence of plates on mantle flow	264
10.2.2 Influence of high viscosity in the lower mantle	268
10.2.3 Influence of spherical, three-dimensional geometry	270
10.2.4 Heat transported by plate-scale flow	273
10.2.5 Summary	275
10.3 Effect of phase transformations	275
10.4 Topography and heat flow	278
10.4.1 Topography from numerical models	279

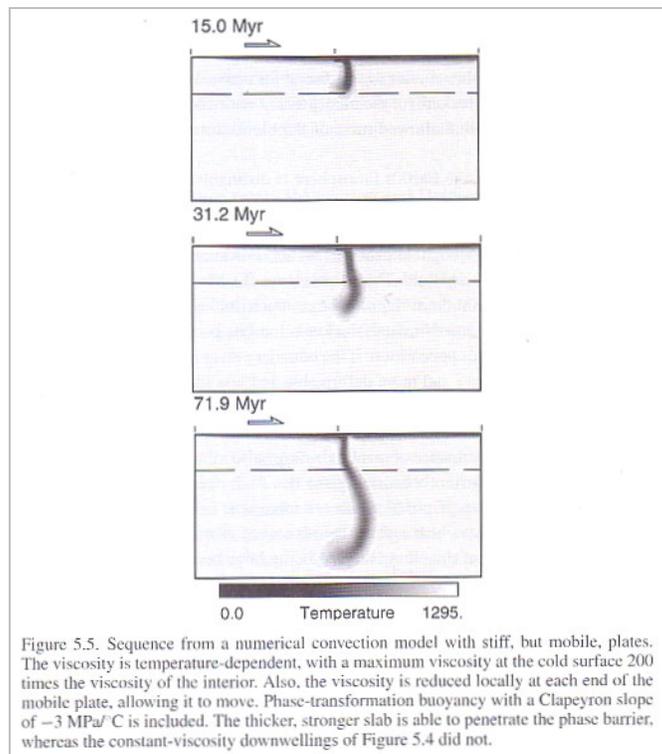
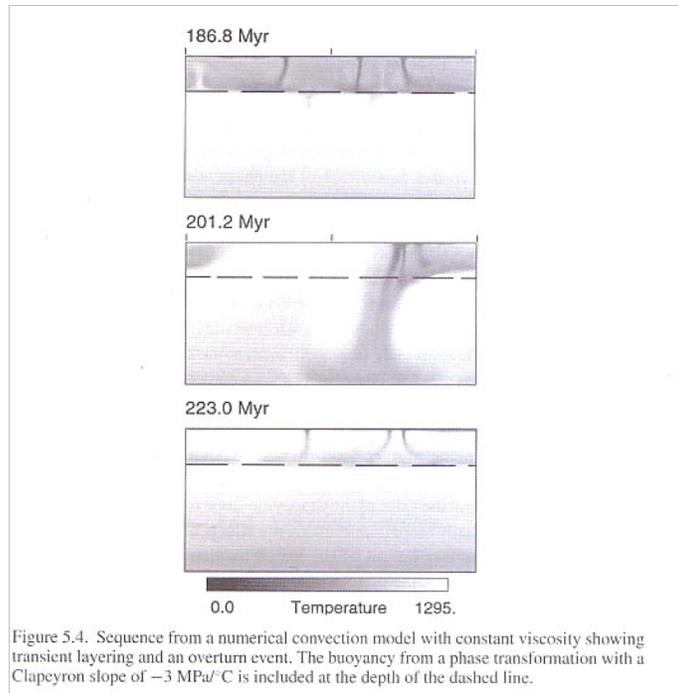
12 Synthesis	324
12.1 The mantle as a dynamical system	324
12.1.1 <i>Heat transport and heat generation</i>	325
12.1.2 <i>Role of the plates: a driving boundary layer</i>	326
12.1.3 <i>Passive upwelling at ridges</i>	326
12.1.4 <i>Plate shapes and kinematics</i>	328
12.1.5 <i>Forces on plates</i>	328
12.1.6 <i>A decoupling layer?</i>	330
12.1.7 <i>Plume driving forces?</i>	330
12.2 Other observable effects	331
12.2.1 <i>Superswells and Cretaceous volcanism</i>	331
12.2.2 <i>Plume head topography</i>	335
12.3 Layered mantle convection	337
12.3.1 <i>Review of evidence</i>	338
12.3.2 <i>The topographic constraint</i>	339
12.3.3 <i>A numerical test</i>	341
12.4 Some alternative interpretations	343
12.4.1 <i>'Flattening' of the old sea floor</i>	343
12.4.2 <i>Small-scale convection</i>	345
12.5 A stocktaking	347

L2: The Earth's Mantle. Composition, Structure, and Evolution

Imágenes del Capítulo 5







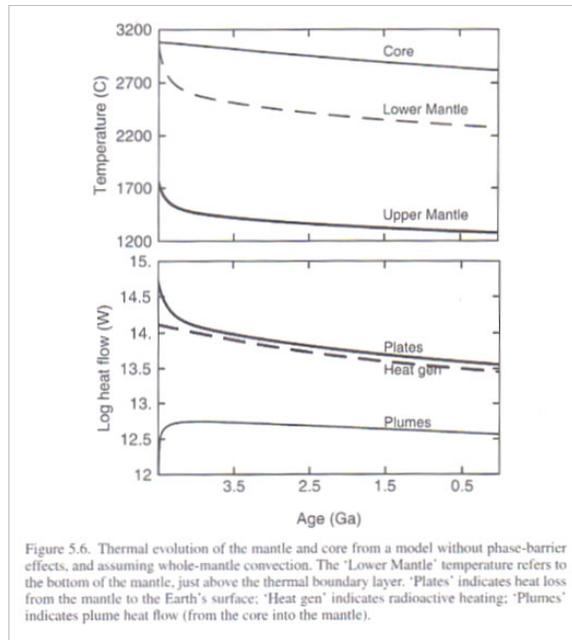


Figure 5.6. Thermal evolution of the mantle and core from a model without phase-barrier effects, and assuming whole-mantle convection. The 'Lower Mantle' temperature refers to the bottom of the mantle, just above the thermal boundary layer. 'Plates' indicates heat loss from the mantle to the Earth's surface; 'Heat gen' indicates radioactive heating; 'Plumes' indicates plume heat flow (from the core into the mantle).

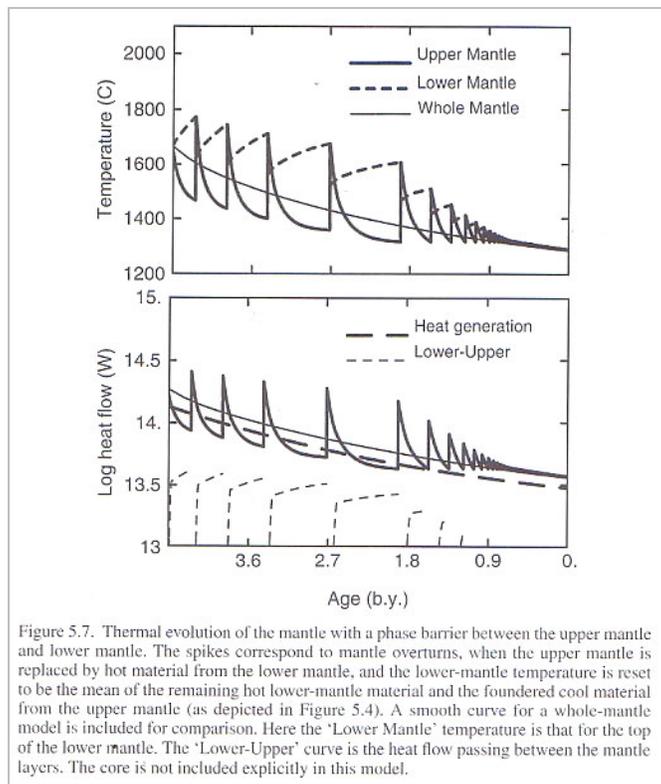
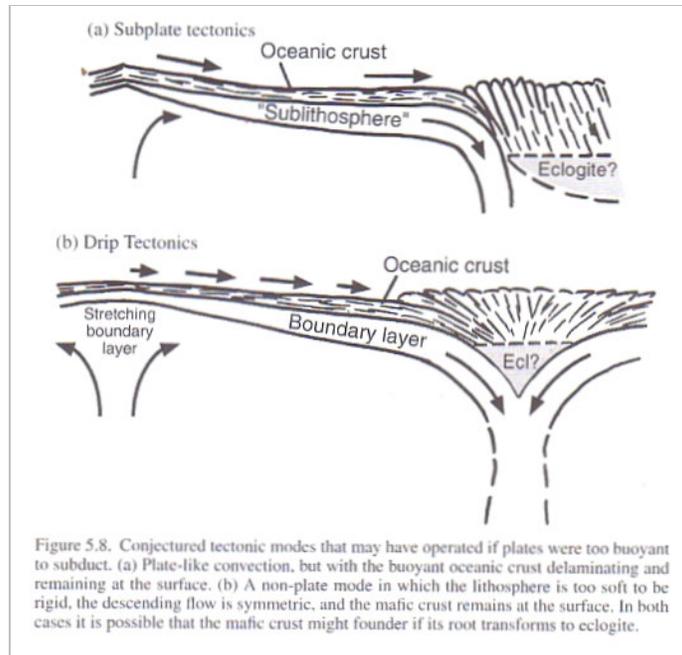
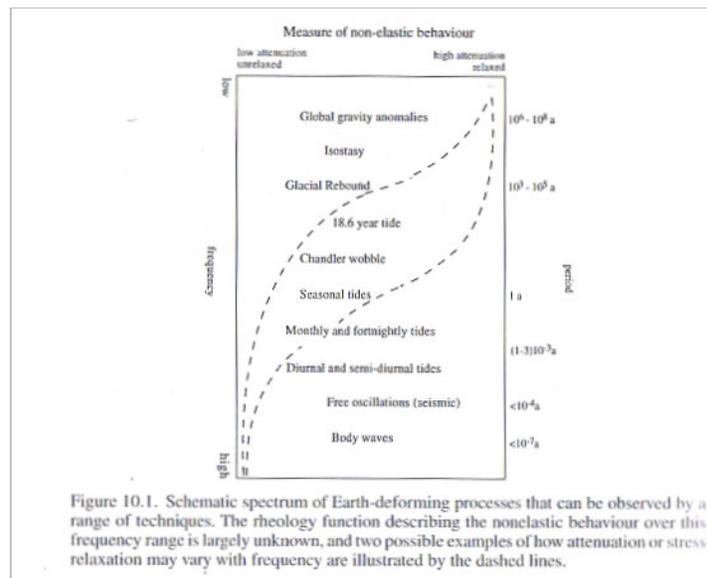
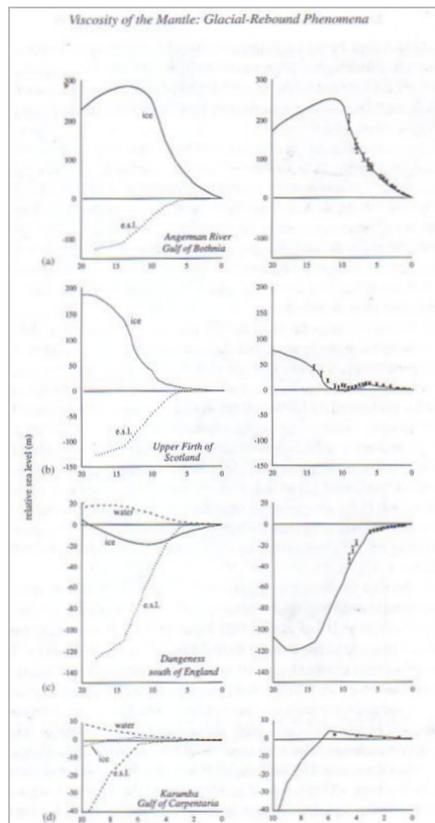
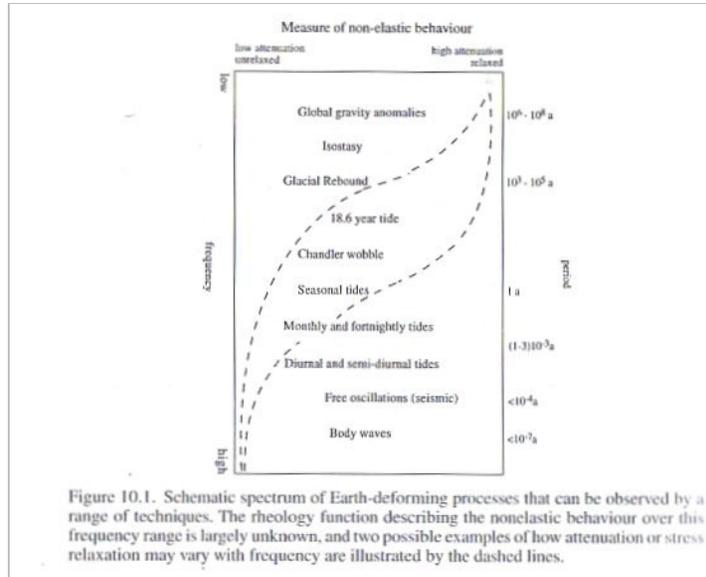


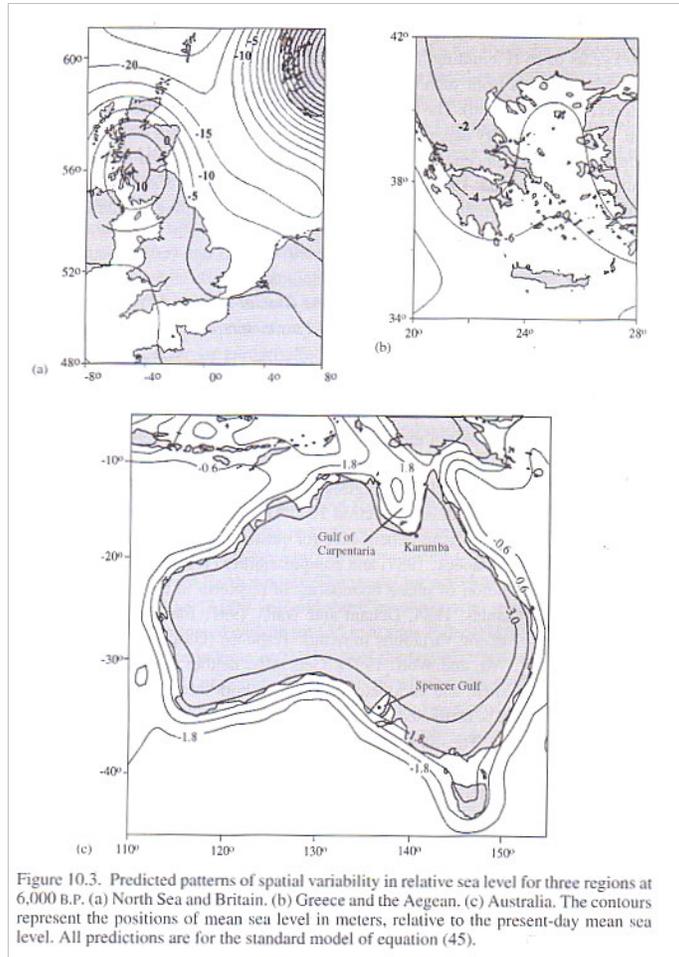
Figure 5.7. Thermal evolution of the mantle with a phase barrier between the upper mantle and lower mantle. The spikes correspond to mantle overturns, when the upper mantle is replaced by hot material from the lower mantle, and the lower-mantle temperature is reset to be the mean of the remaining hot lower-mantle material and the founded cool material from the upper mantle (as depicted in Figure 5.4). A smooth curve for a whole-mantle model is included for comparison. Here the 'Lower Mantle' temperature is that for the top of the lower mantle. The 'Lower-Upper' curve is the heat flow passing between the mantle layers. The core is not included explicitly in this model.

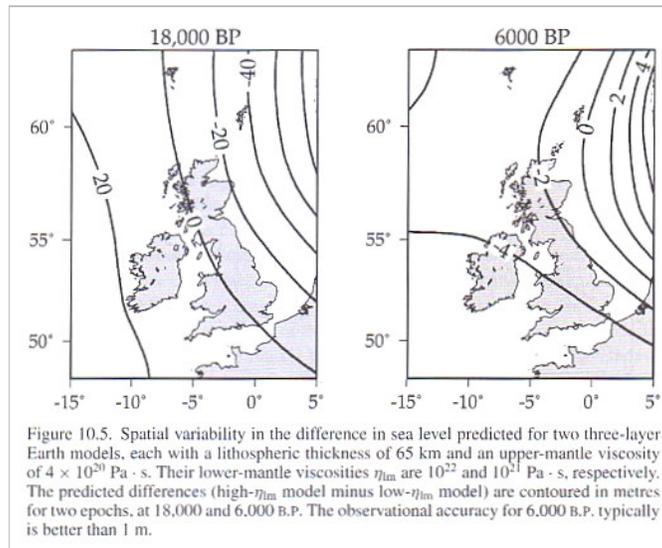
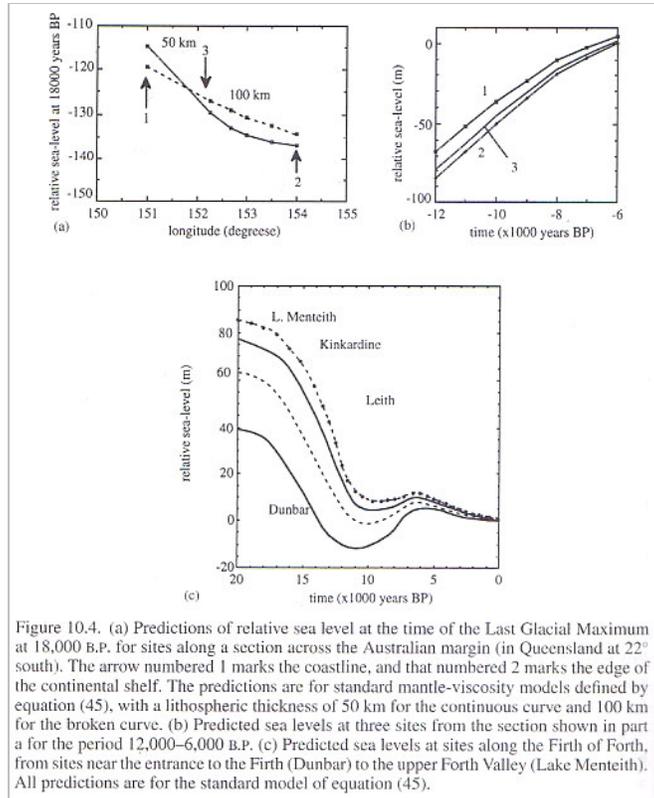


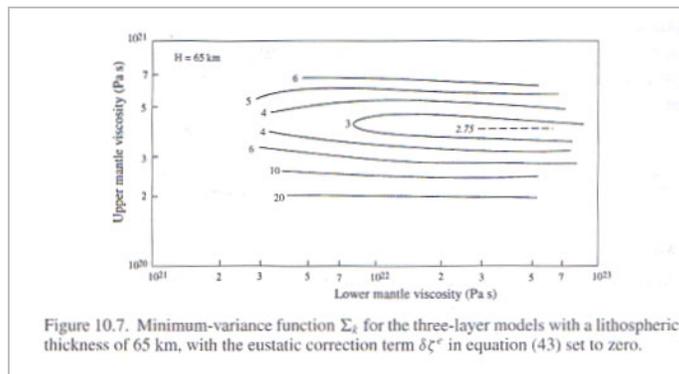
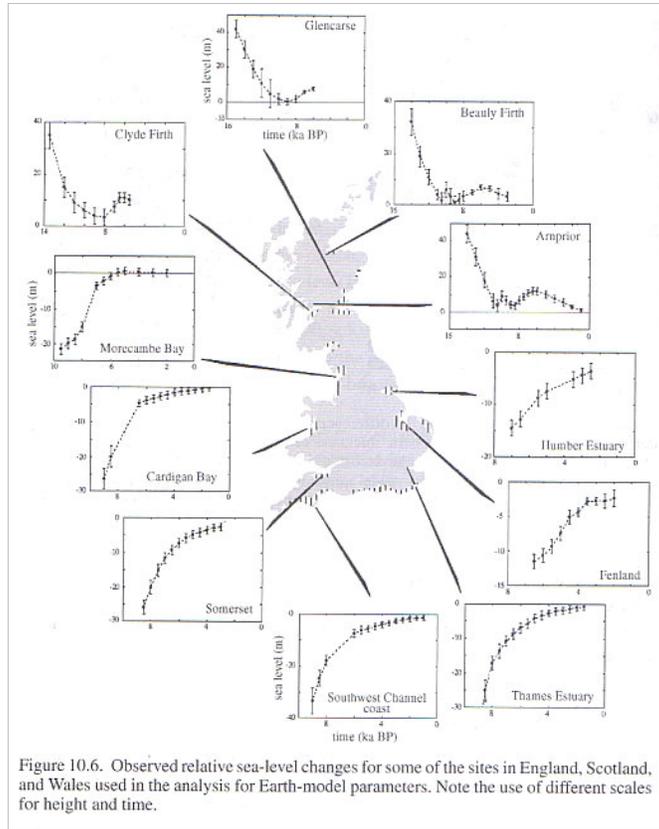
Imágenes del Capítulo 10

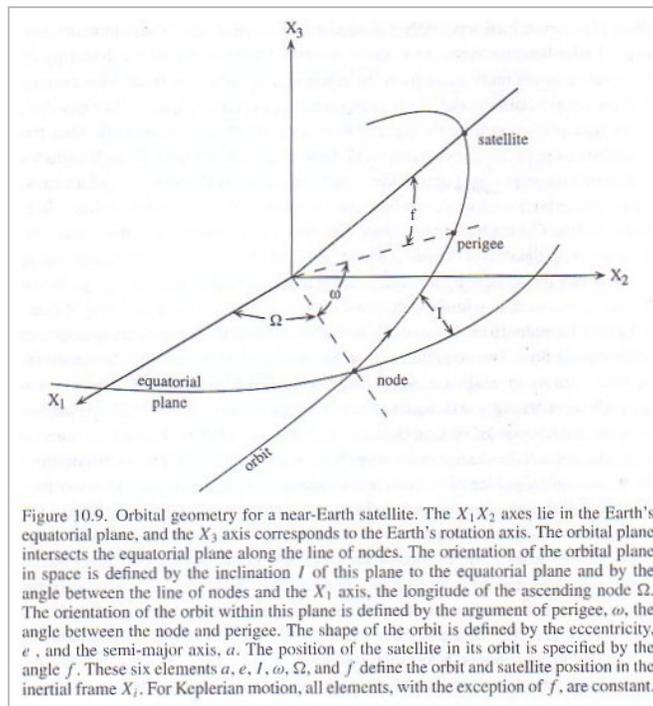
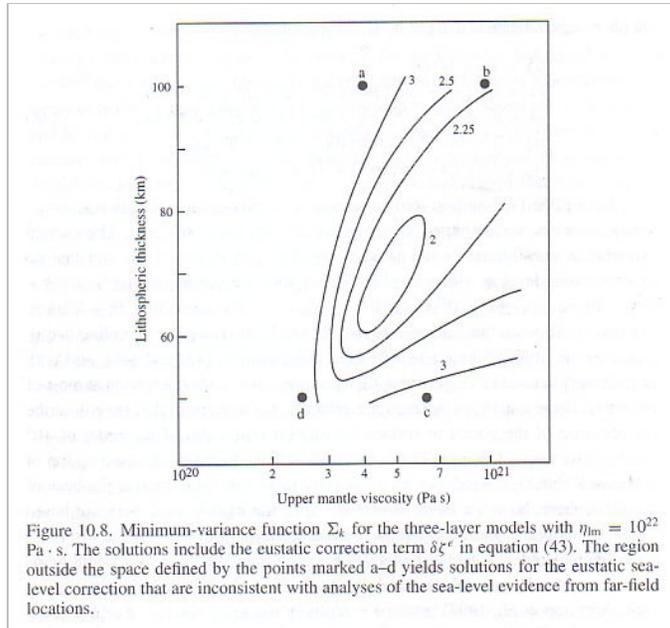












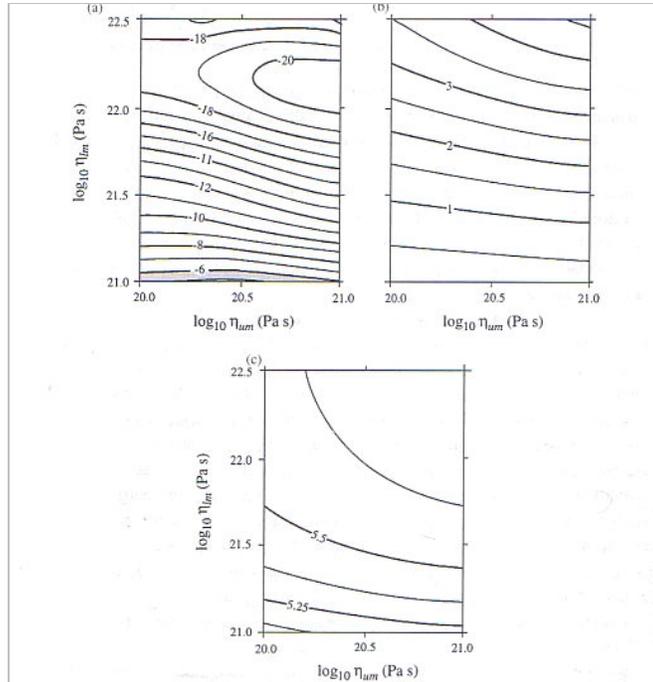


Figure 10.10. Predictions of the acceleration (units of 10^{-23} s^{-2}) of the node $\bar{\Omega}$ for the LAGEOS orbit as a function of mantle viscosity due to (a) the late Pleistocene and early Holocene glacial cycles, with no deglaciation after 6,000 B.P., (b) uniform melting of continent-based ice for the past 6,000 years in Antarctica and Greenland, in the ratio 2 : 1, such that the eustatic sea-level rise has been 0.5 mm/yr for that period, (c) uniform melting of polar ice at a rate of 0.5 mm/yr for the past 50 years, with contributions from both hemispheres, in the same ratio as in part b.

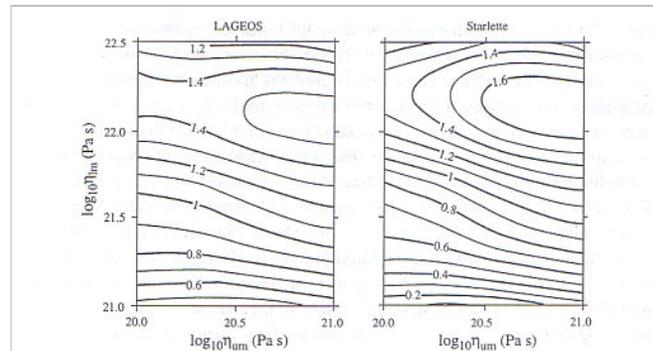
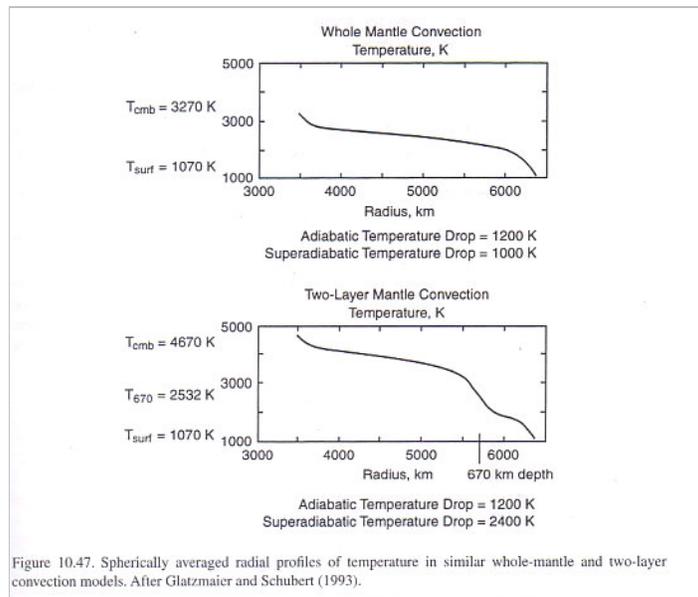
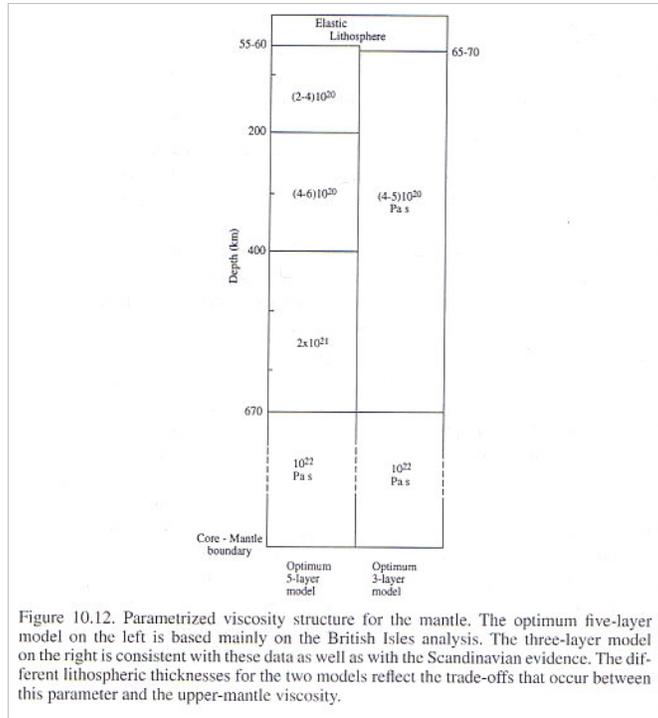


Figure 10.11. Predicted rates of present-day sea-level change (mm/yr) as functions of upper- and lower-mantle viscosities inferred from the observed accelerations of the nodes of the satellites LAGEOS and Starlette. (These predictions include the 0.5 mm/yr from the late Holocene melting.) For the preferred upper-mantle viscosity of $4\text{--}5 \times 10^{20} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ and a lower-mantle viscosity of $10^{22} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, both datasets indicate a consistent recent sea-level rise of about 1.5 mm/yr.



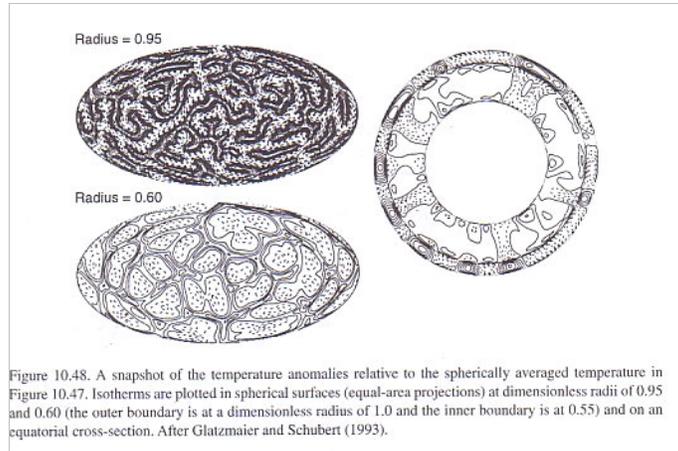


Figure 10.48. A snapshot of the temperature anomalies relative to the spherically averaged temperature in Figure 10.47. Isotherms are plotted in spherical surfaces (equal-area projections) at dimensionless radii of 0.95 and 0.60 (the outer boundary is at a dimensionless radius of 1.0 and the inner boundary is at 0.55) and on an equatorial cross-section. After Glatzmaier and Schubert (1993).

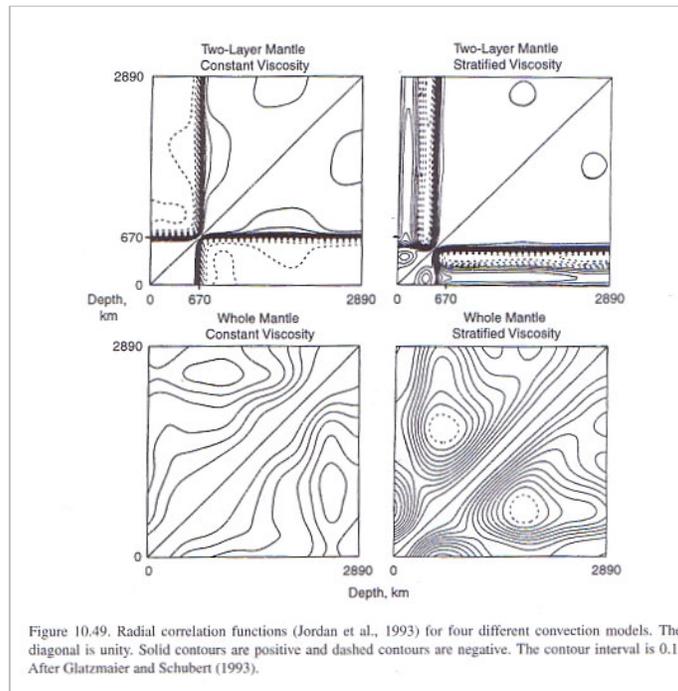


Figure 10.49. Radial correlation functions (Jordan et al., 1993) for four different convection models. The diagonal is unity. Solid contours are positive and dashed contours are negative. The contour interval is 0.1. After Glatzmaier and Schubert (1993).

Table 10.1. *Orbital parameters for LAGEOS 1 and Starlette*

Property	LAGEOS	Starlette
Semi-major axis (km)	12,270	7,340
Eccentricity	0.004	0.021
Inclination (degrees)	109.9	49.8
$\dot{\Omega}$ (rad · s ⁻¹)	6.929×10^{-8}	-7.965×10^{-7}
$\ddot{\Omega}$ (rad · s ⁻²)	$-5.3 \pm 0.6 \times 10^{-23}$	$6.8 \pm 0.7 \times 10^{-22}$
\dot{N}_2 (s ⁻¹)	-1.425×10^{-4}	1.639×10^{-3}
\dot{N}_4 (s ⁻¹)	-7.083×10^{-5}	8.680×10^{-5}
\dot{N}_6 (s ⁻¹)	-1.823×10^{-5}	-1.459×10^{-3}
\dot{N}_8 (s ⁻¹)	-1.547×10^{-6}	-4.482×10^{-4}

L3: Mantle Convection in the Earth and Planets

Imágenes del Capítulo 5

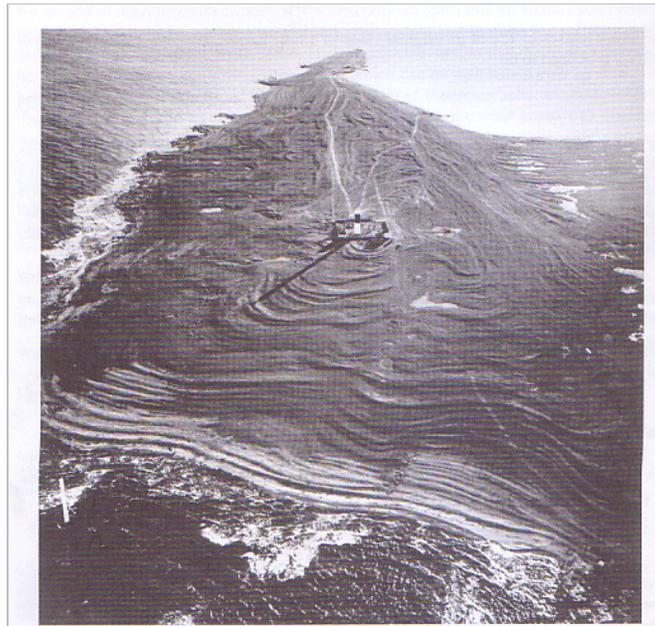


Figure 5.1. Elevated shorelines on Östergransholm, Eastern Gotland, Sweden. Photographer and copyright holder, Arne Philip, Visby, Sweden; courtesy IGCP Project Ecostratigraphy.

5.2 Global Isostatic Adjustment

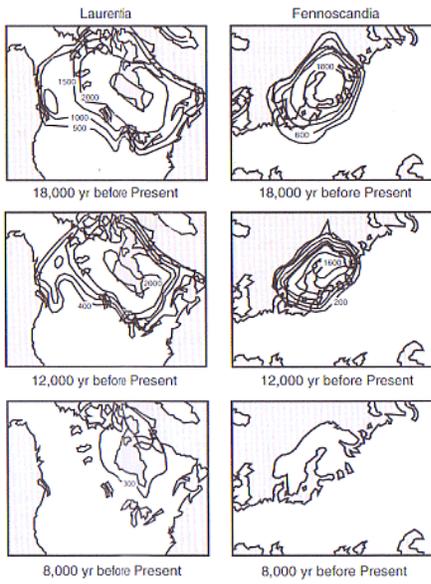


Figure 5.2. Deglaciation chronology for Laurentia (left) and Fennoscandia (right) from Wu and Peltier (1982).

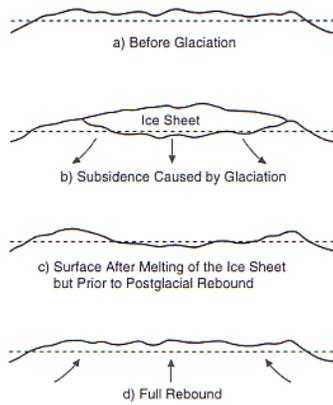


Figure 5.3. Subsidence due to glaciation and the subsequent postglacial rebound.

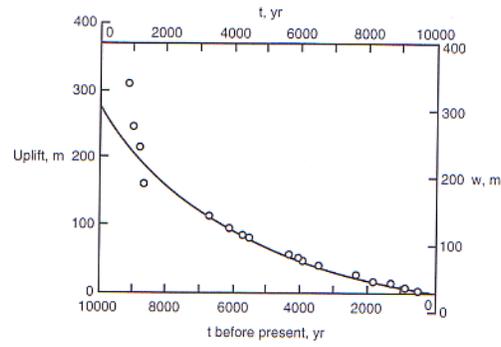


Figure 5.4. Uplift of the mouth of the Angerman River, Sweden, as a function of time before the present compared with the exponential relaxation model (5.2.31) for $w_{m0} = 300$ m less 30 m of uplift yet to occur, $\tau_r = 4,400$ yr, and an initiation of the uplift 10,000 yr ago.

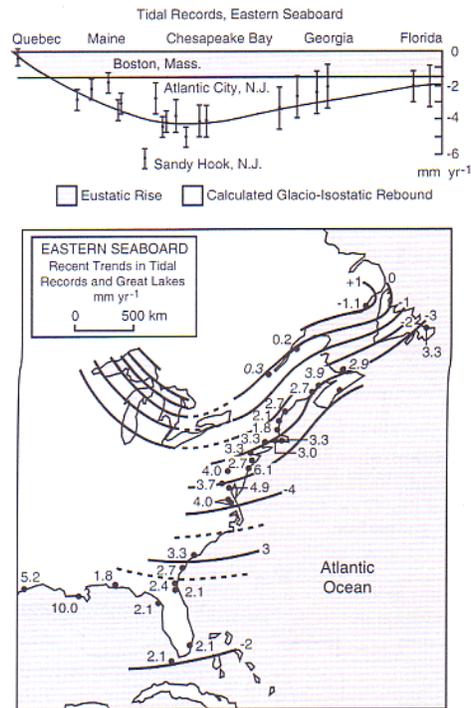
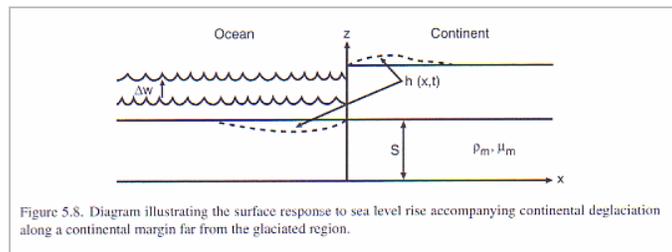
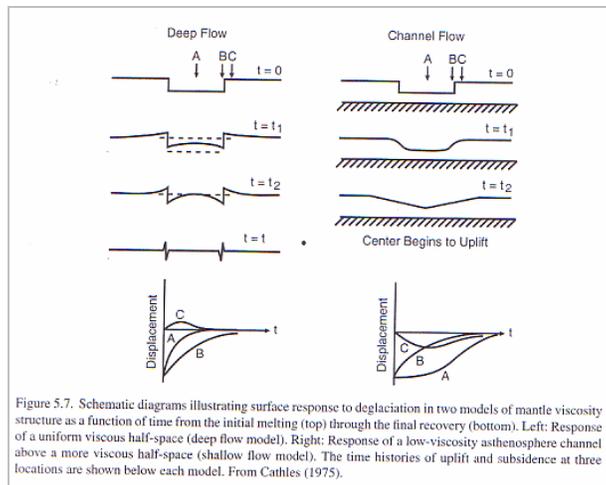
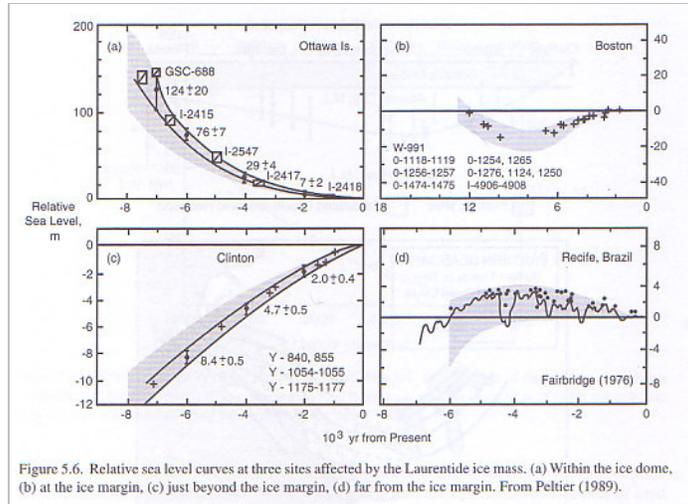


Figure 5.5. Present-day rates of submergence and emergence along the east coast of North America as inferred by Walcott (1972a). Contours are smoothed fits to data points.



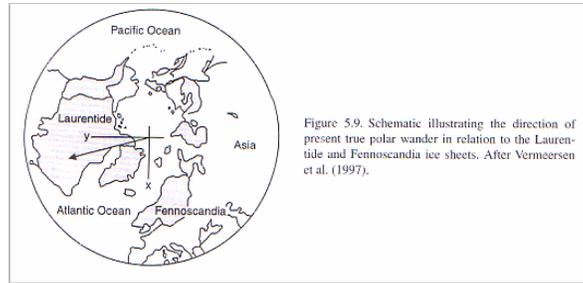


Figure 5.9. Schematic illustrating the direction of present true polar wander in relation to the Laurentide and Fennoscandia ice sheets. After Vermeersen et al. (1997).

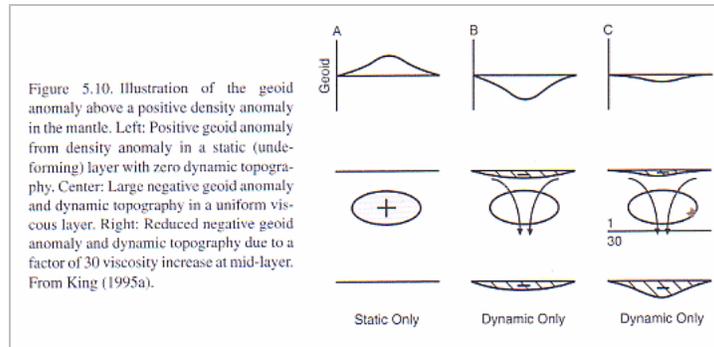


Figure 5.10. Illustration of the geoid anomaly above a positive density anomaly in the mantle. Left: Positive geoid anomaly from density anomaly in a static (undeforming) layer with zero dynamic topography. Center: Large negative geoid anomaly and dynamic topography in a uniform viscous layer. Right: Reduced negative geoid anomaly and dynamic topography due to a factor of 30 viscosity increase at mid-layer. From King (1995a).

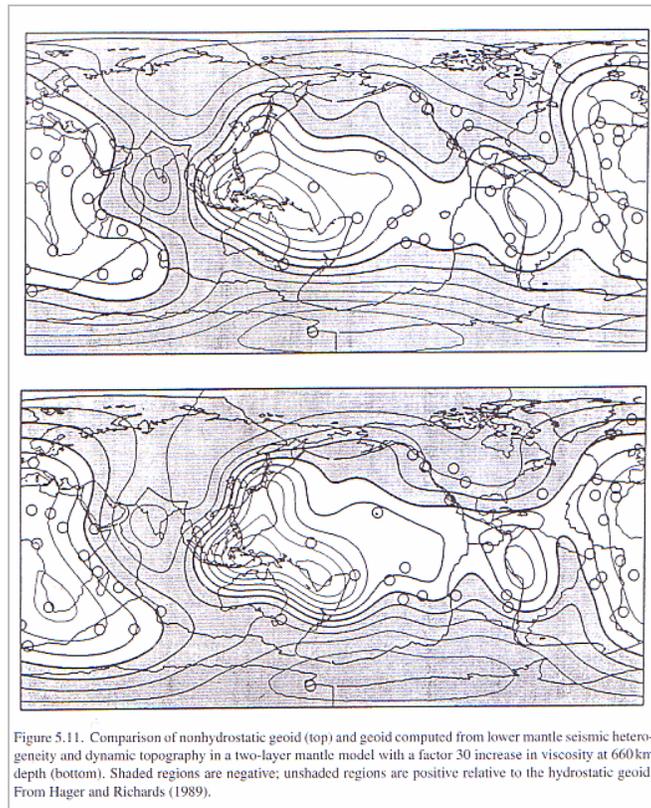
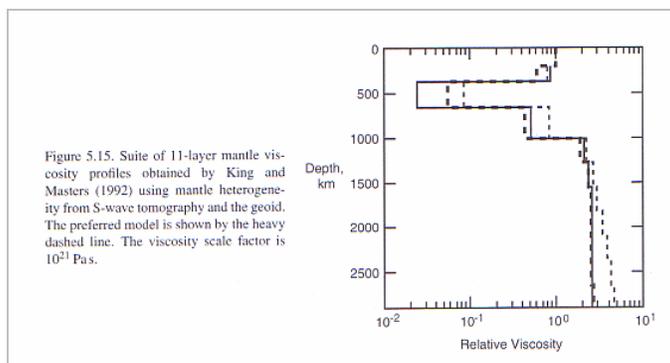
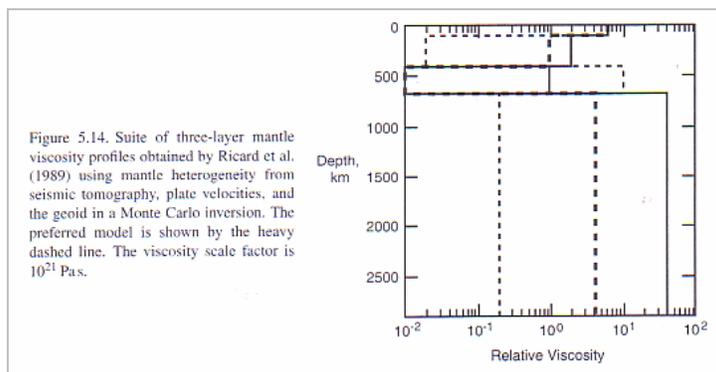
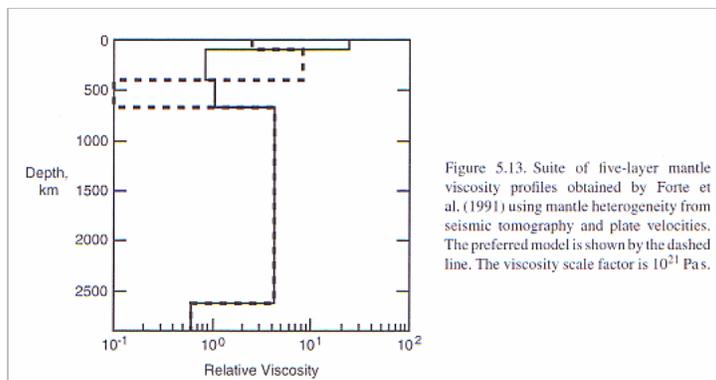
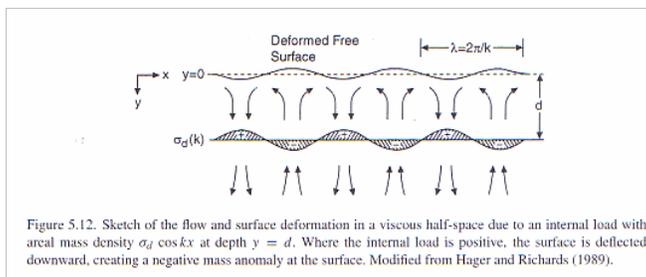
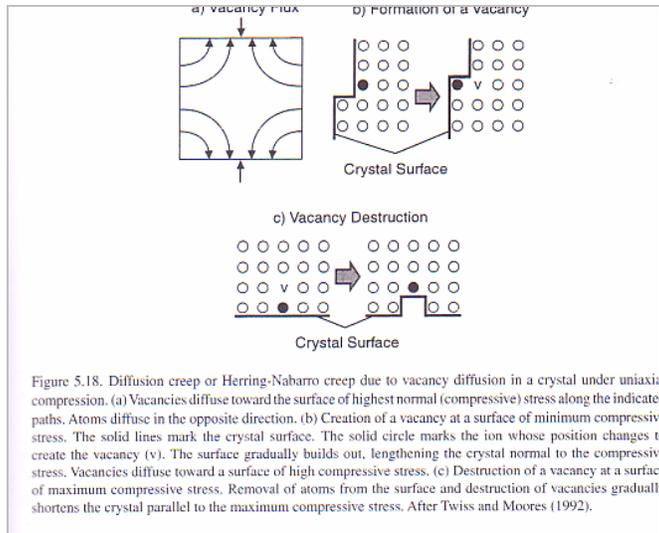
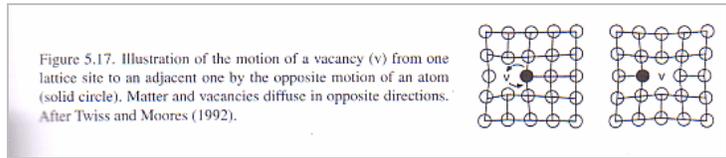
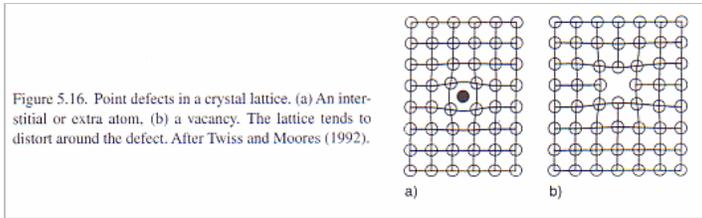


Figure 5.11. Comparison of nonhydrostatic geoid (top) and geoid computed from lower mantle seismic heterogeneity and dynamic topography in a two-layer mantle model with a factor 30 increase in viscosity at 660 km depth (bottom). Shaded regions are negative; unshaded regions are positive relative to the hydrostatic geoid. From Hager and Richards (1989).





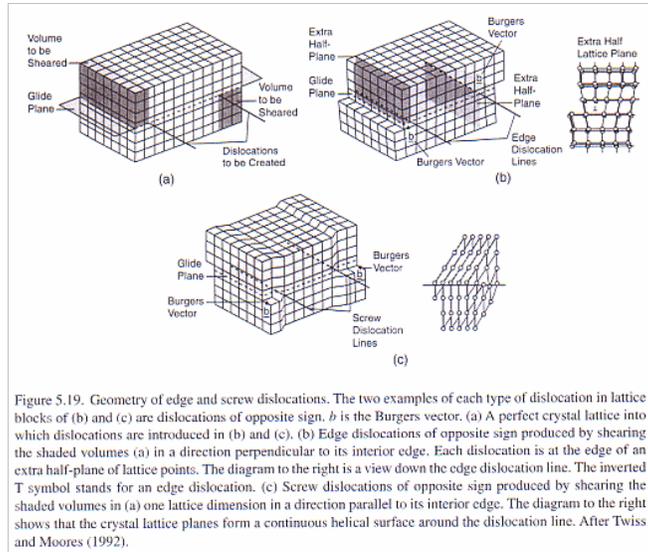


Figure 5.19. Geometry of edge and screw dislocations. The two examples of each type of dislocation in lattice blocks of (b) and (c) are dislocations of opposite sign. b is the Burgers vector. (a) A perfect crystal lattice into which dislocations are introduced in (b) and (c). (b) Edge dislocations of opposite sign produced by shearing the shaded volumes (a) in a direction perpendicular to its interior edge. Each dislocation is at the edge of an extra half-plane of lattice points. The diagram to the right is a view down the edge dislocation line. The inverted T symbol stands for an edge dislocation. (c) Screw dislocations of opposite sign produced by shearing the shaded volumes in (a) one lattice dimension in a direction parallel to its interior edge. The diagram to the right shows that the crystal lattice planes form a continuous helical surface around the dislocation line. After Twiss and Moores (1992).

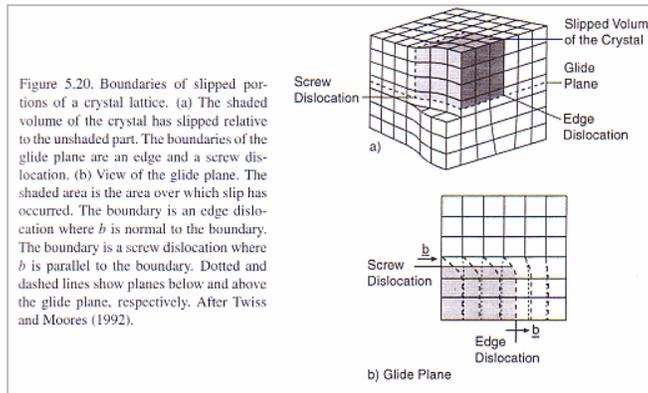


Figure 5.20. Boundaries of slipped portions of a crystal lattice. (a) The shaded volume of the crystal has slipped relative to the unshaded part. The boundaries of the glide plane are an edge and a screw dislocation where b is normal to the boundary. The boundary is a screw dislocation where b is parallel to the boundary. Dotted and dashed lines show planes below and above the glide plane, respectively. After Twiss and Moores (1992).

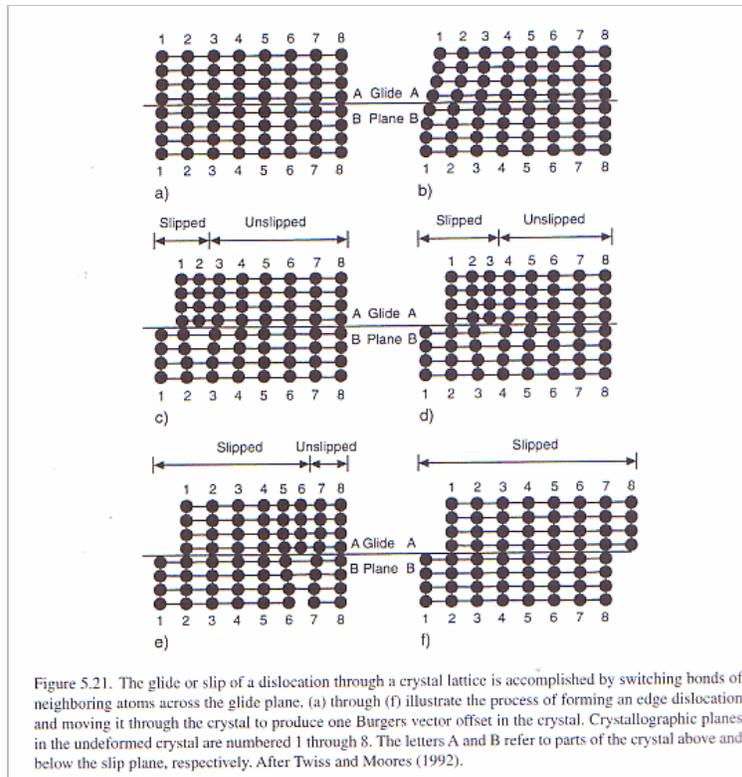


Figure 5.21. The glide or slip of a dislocation through a crystal lattice is accomplished by switching bonds of neighboring atoms across the glide plane. (a) through (f) illustrate the process of forming an edge dislocation and moving it through the crystal to produce one Burgers vector offset in the crystal. Crystallographic planes in the undeformed crystal are numbered 1 through 8. The letters A and B refer to parts of the crystal above and below the slip plane, respectively. After Twiss and Moores (1992).

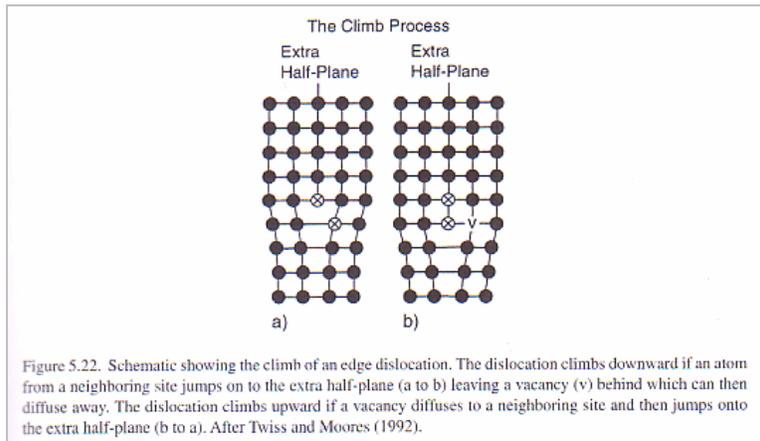


Figure 5.22. Schematic showing the climb of an edge dislocation. The dislocation climbs downward if an atom from a neighboring site jumps on to the extra half-plane (a to b) leaving a vacancy (v) behind which can then diffuse away. The dislocation climbs upward if a vacancy diffuses to a neighboring site and then jumps onto the extra half-plane (b to a). After Twiss and Moores (1992).

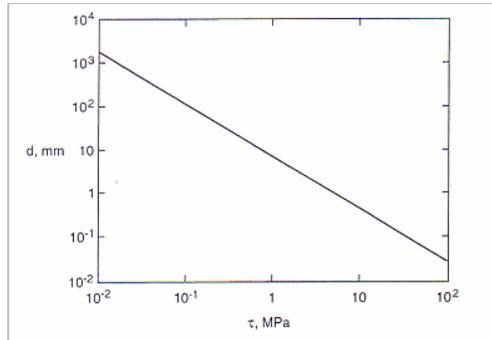


Figure 5.23. Dependence of grain size d on the deviatoric stress τ from (5.9.4).

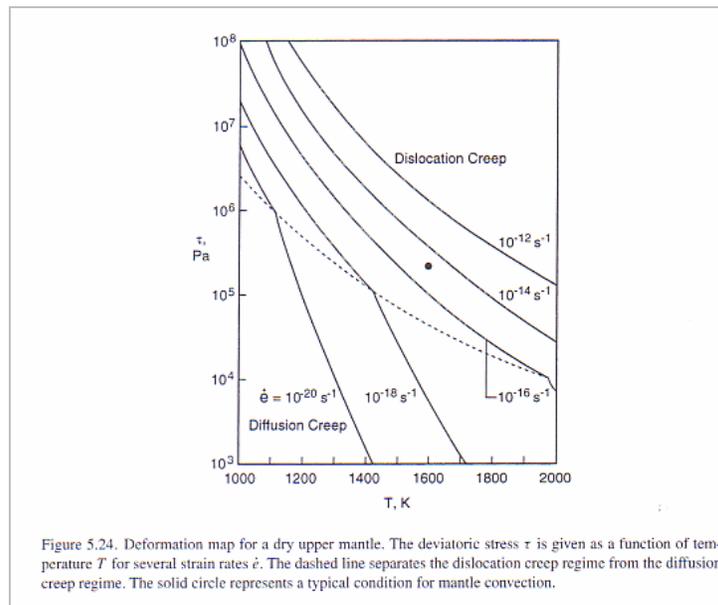


Figure 5.24. Deformation map for a dry upper mantle. The deviatoric stress τ is given as a function of temperature T for several strain rates $\dot{\epsilon}$. The dashed line separates the dislocation creep regime from the diffusion creep regime. The solid circle represents a typical condition for mantle convection.

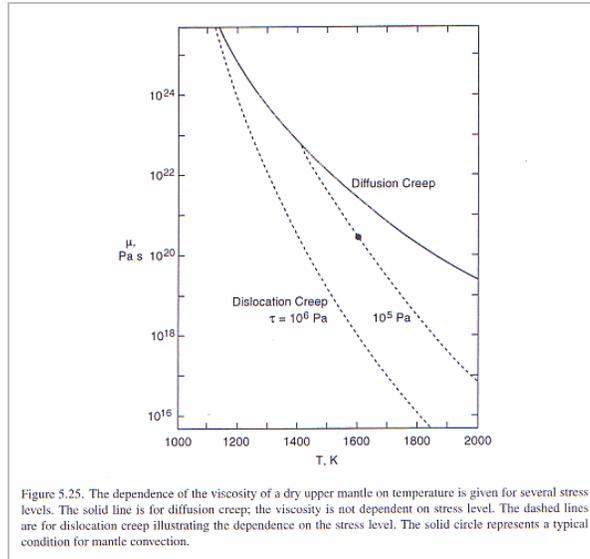


Table 5.1. Postglacial Rebound Data

Quantity	Laurentide	Fennoscandia
Length (km)	4,000	2,250
Width (km)	2,500	1,350
Harmonic degree, l	6	8
Melting begins, 10^3 yr before the present	18	18
Melting ends, 10^3 yr before the present	6.5	8.5
Present central uplift rate, mm yr^{-1}	3–10	9
Relaxation time, 10^3 yr	2.6	4.4

Table 5.2. Two-layer Mantle Viscosity Models

Data	Lithosphere Thickness (km)	Upper Mantle Viscosity (Pa s)	Lower Mantle Viscosity (Pa s)
Postglacial rebound ¹	120	1×10^{21}	4.5×10^{21}
Geoid ²	100	2×10^{19}	6×10^{21}
Geoid and plate velocities ³	100	2.6×10^{20}	1.3×10^{22}
Continental margins ⁴	75	2×10^{20}	7.5×10^{21}
Ocean Islands ⁵	50	1×10^{20}	1×10^{22}

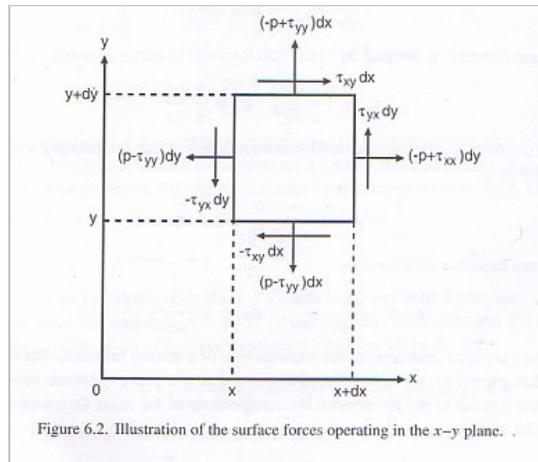
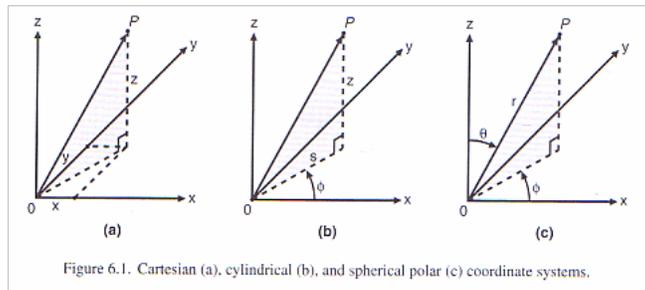
¹Mitrovica and Peltier (1991), ²Hager and Richards (1989), ³Ricard and Vigny (1989), ⁴Lambeck and Nakada (1990), ⁵Nakada and Lambeck (1989).

Table 5.3. Parameter Values for Diffusion Creep and Dislocation Creep in a Dry Upper Mantle^a

Quantity	Diffusion Creep	Dislocation Creep
Pre-exponential factor A (s^{-1})	8.7×10^{15}	3.5×10^{22}
Stress exponent n	1	3.5
Grain size exponent m	3	0
Activation energy E^* ($kJ\ mol^{-1}$)	300	540
Activation volume V^* ($m^3\ mol^{-1}$)	6×10^{-6}	2×10^{-5}

^a After Karato and Wu (1993). Other relevant parameter values are $\mu_{\text{shear modulus}} = 80\ \text{GPa}$, $b = 0.55\ \text{nm}$, and $R = 8.3144\ \text{J K}^{-1}\ \text{mol}^{-1}$.

Imágenes del Capítulo 6



Imágenes del Capítulo 15

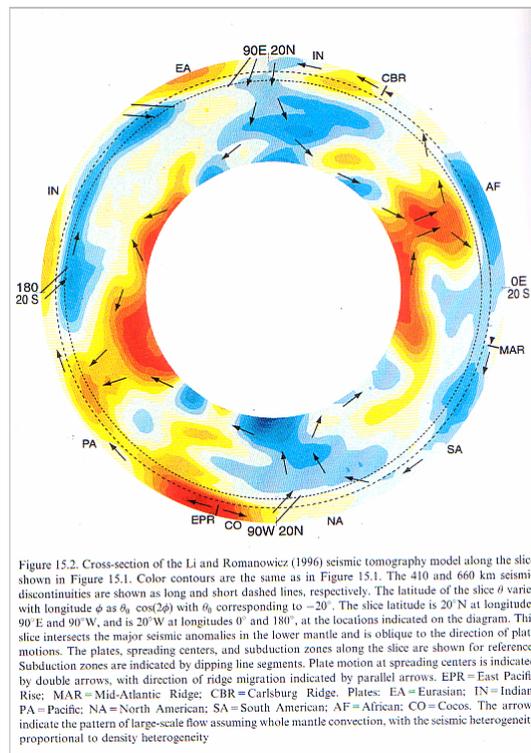
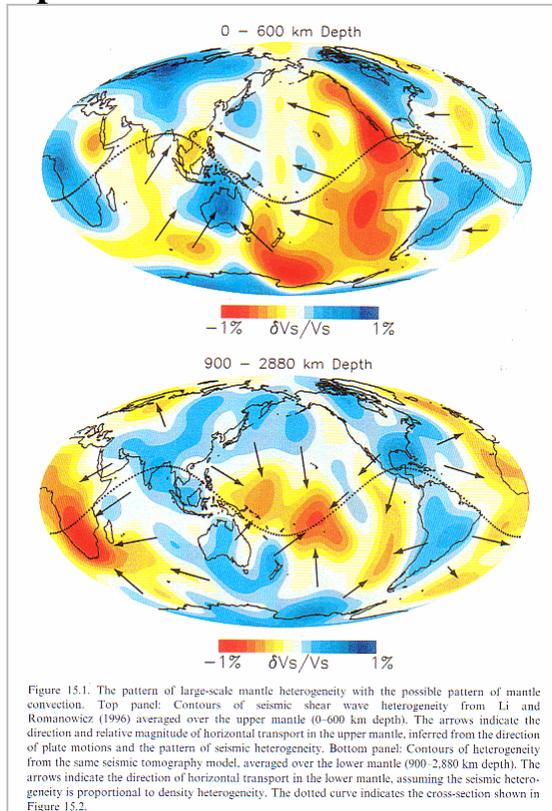


Tabla de Preguntas

Table 15.1. Major Questions Concerning Mantle Convection

Question Number	Question
1.1	What is the source of energy for the tectonics and volcanism of the solid Earth?
1.2	How is this energy converted into the tectonic and volcanic phenomena we are familiar with?
2.1	Why do accretional plate margins develop the orthogonal ridge segment–transform fault geometry?
2.2	What is the rheology of the lithosphere at a subduction zone?
2.3	What determines the subduction dip angle?
2.4	What is the fate of descending slabs?
2.5	Do slabs that cross 660 km depth sink all the way to the core–mantle boundary or do they come to rest at some shallower depth?
2.6	Why do subduction zones have arcuate structures?
2.7	What is the mechanism for subduction zone volcanism?
2.8	Why do back-arc basins form?
2.9	Are there plumes in the mantle beneath hot spots, and if so, from what depth(s) do they originate?
2.10	How were the continents formed?
2.11	Does delamination play an important role in recycling continental crust and lithosphere?

Question Number	Question
2.12	How is continental crust formed?
2.13	What are the forces that drive plate tectonics?
2.14	How is toroidal motion generated in mantle convection?
2.15	How are accretional plate margins formed?
2.16	How are subduction zones formed?
2.17	Is the temporal variability of plate tectonics stochastic or is it driven by episodicity in mantle convection?
3.1	Is the LVZ partially molten?
3.2	What is the thickness of the continental lithosphere? Do the continents have roots that extend to depths of several hundred kilometers in the mantle?
3.3	What is the nature of the Lehmann seismic discontinuity at a depth of 220km?
3.4	What is the nature of the 660km seismic discontinuity?
3.5	Is the composition of the lower mantle different from that of the upper mantle?
3.6	Is the D' layer a purely thermal boundary layer or does it have a compositional component?
3.7	Is there partial melt at the base of the mantle?
3.8	What is the composition of the core? What is the major light element in the core?
3.9	What is the relative importance of thermal and compositional convection in powering the geodynamo?
3.10	How deep do the upwellings beneath mid-ocean ridges extend into the mantle? What are the implications for the passivity of mid-ocean ridges?
3.11	Do subducted slabs penetrate into the lower mantle?
3.12	Do some subducted slabs sink all the way to the core–mantle boundary?
3.13	What is the topography of the core–mantle boundary?
4.1	Why are there deviations from the half-space cooling model for the oceanic lithosphere at seafloor ages greater than about 80Myr?
4.2	How thick is old oceanic lithosphere?
4.3	How thick is the continental lithosphere?
4.4	What is the fate of buoyant depleted mantle material created together with the continental crust?
4.5	What mechanism provides heat to the base of the continental lithosphere?
4.6	What causes the seismic LVZ beneath the oceanic lithosphere?
4.7	How is magma focused into a narrow region in the vicinity of a ridge crest?
4.8	How does magma rise through the lithosphere?
4.9	What causes volcanism at subduction zones?
4.10	Is there a wedge of metastable olivine in old descending slabs?
4.11	Is the olivine–spinel phase boundary in descending slabs shallower or deeper than it is in the surrounding mantle?
4.12	What is the cause of deep earthquakes?
4.13	How do the major phase transitions between 410 and 660km depth influence the style of mantle convection?
4.14	What is the heat flow from the core?
4.15	What is the temperature change across the thermal boundary layer at the base of the mantle?
4.16	Are there internal thermal boundary layers in the transition zone?
5.1	Is there a low-viscosity asthenosphere beneath some plates? What is the viscosity of the asthenospheric material?

Table 15.1 (continued)

Question Number	Question
5.2	What is the relationship between density anomalies and seismic velocity anomalies in the mantle?
5.3	What is the dynamical topography associated with mantle convection?
5.4	What is the difference between the viscosity of the upper mantle and the viscosity of the lower mantle?
5.5	What is the dependence of grain size on deviatoric stress in the mantle?
5.6	Is dislocation creep or diffusion creep the dominant deformation mechanism associated with mantle convection?
5.7	Does the mantle behave like a Newtonian or a non-Newtonian fluid on geological time scales?
5.8	Are there changes in viscosity associated with the solid–solid phase changes in the transition zone?
7.1	What is the influence of the olivine–spinel and spinel–perovskite + magnesiowüstite phase changes on mantle convection?
7.2	How supercritical is the mantle?
7.3	Is there secondary or small-scale thermal convection in the oceanic asthenosphere due to gravitational instability of the lower part of the oceanic lithosphere?
7.4	Is there mantle convection in the lunar interior?
8.1	Is mantle convection chaotic?
8.2	Is mantle convection turbulent?
8.3	Is the subducted oceanic lithosphere mixed and homogenized in the mantle?
9.1	What are the multi-rheological laws governing deformation of the crust and mantle?
9.2	How are mantle seismic velocity heterogeneities partitioned among temperature, composition, and melting?
9.3	Is mantle convection turbulent?
9.4	How does the emergence of plates in mantle convection influence the nature of that convection?
9.5	Are there compositional changes as well as phase changes in the transition zone?
9.6	To what extent is the mantle layered by the phase changes and possible compositional gradients of the transition zone?
9.7	How is mantle convection influenced by the temperature and pressure dependence of rock viscosity?
9.8	How does subduction initiate?
9.9	How do descending slabs interact with the spinel → perovskite + magnesiowüstite phase change at a depth of 660 km?
9.10	How do mantle plumes interact with the endothermic phase change at a depth of 660 km?
9.11	How is mantle convection influenced by the power-law viscosity of rocks?
9.12	How is mantle convection influenced by changes with depth in its thermodynamic and transport properties?
9.13	What are the effects of viscous heating on mantle dynamics?
9.14	What are the consequences of continents for the nature of mantle convection?
9.15	Is the D'' layer a chemical boundary layer as well as a thermal boundary layer?
9.16	Is there small-scale convection in the D'' layer?
10.1	What is the style of three-dimensional thermal convection in the mantle and how does it relate to the plates and the major structures of the mantle?
10.2	Do the properties of the endothermic phase change at a depth of 660 km explain the seismically observed morphological diversity in slabs near the base of the upper mantle and the top of the lower mantle?

Question Number	Question
10.3	Is the 660 km phase change responsible for imposing the long-wavelength spectral character of mantle seismic heterogeneity?
10.4	Do the avalanches that occur in mantle convection models also occur in the Earth's mantle?
10.5	Is mantle convection in the Earth partially layered by effects of the 660 km phase change?
10.6	Is the 660 km phase change responsible for the dominance of long-wavelengths in the Earth's nonhydrostatic geoid?
10.7	Why are tectonic plates so large?
10.8	Is an increase of viscosity with depth responsible for the long-wavelength dominance of the Earth's geoid and mantle seismic velocity heterogeneity?
10.9	Was the Earth's mantle divided into separately convecting upper and lower layers early in the Earth's evolution?
10.10	How important is viscous heating in the Earth's mantle?
10.11	Does compressibility in the Earth's mantle significantly affect the nature of mantle convection?
10.12	What essential rheological behavior needs to be incorporated into models of mantle convection for plate tectonics to arise from the model in a natural, self-consistent way?
11.1	Do mantle plumes exist?
11.2	Which "hot spots" are associated with mantle plumes?
11.3	What mechanism is responsible for the formation of hot spot swells?
11.4	What is the depth of the source of mantle plumes?
11.5	How much heat is transported by mantle plumes?
11.6	What is the physical mechanism for the generation of mantle plumes?
11.7	What causes massive flood basalt eruptions?
11.8	What is the structure of a mantle plume?
11.9	Do conduit waves occur in the Earth's mantle?
11.10	Are mass extinctions related to flood basalt events?
12.1	Do the isotope systematics of MORB require separate upper mantle and lower mantle reservoirs indicative of layered mantle convection?
12.2	Do the ^3He anomalies observed in some OIB indicate that there is a "primitive" mantle reservoir?
12.3	What is the mantle source region of the chemically heterogeneous OIB?
12.4	Do the 2 Gyr isotope anomalies associated with OIB develop in the mantle or elsewhere?
13.1	Was the Earth's mantle fractionated at the end of accretion?
13.2	What fraction of the Earth's surface heat flow can be attributed to radioactive heat generation and what fraction to secular cooling of the Earth?
13.3	What is the major light alloying element in the Earth's core?
13.4	What is the dominant energy source for driving convection and dynamo action in the Earth's outer core?
13.5	Has the Earth always had a geodynamo?
13.6	Did layered mantle convection ever occur in the Earth's thermal history?
13.7	Has convection in the Earth's mantle always occurred in the small viscosity contrast regime?
13.8	Is convection in the Earth's mantle chaotic?
13.9	Have avalanches occurred in the Earth's mantle?
13.10	What dynamical processes in the mantle are responsible for episodicity in the geological record?
13.11	Has continental crustal growth occurred continuously or episodically?

Table 15.1 (continued)

Question Number	Question
13.12	How has the volume of the continents changed through geologic time?
13.13	What processes acted in the Archean to produce and recycle continental crust?
14.1	Is mantle convection occurring in the terrestrial planets, the Moon, and satellites of the giant planets?
14.2	How does Venus lose its heat?
14.3	What caused the major resurfacing of Venus about 500–750 Myr ago?
14.4	What caused the hemispheric dichotomy on Mars?
14.5	What caused the nearside–farside dichotomy on the Moon?
14.6	What is the nature of mantle convection in Venus?
14.7	What produced the high topography on Venus and why are the topography and gravity strongly correlated?
14.8	Is there limited subduction or lithospheric foundering on Venus?
14.9	What is the thickness of the lithosphere on Venus?
14.10	Has the thermal evolution of Venus involved catastrophic events?
14.11	What is the composition of the rocks in the plateau highlands of Venus?
14.12	Why is there no plate tectonics on Venus?
14.13	Do the large-scale geoid, topography, and admittance ratios on Venus imply a thick lithosphere or a convecting mantle beneath a thin lithosphere?
14.14	Is mantle convection in Venus layered?
14.15	Is mantle convection on Venus in the sluggish-lid or stagnant-lid convection regime?
14.16	Why does Venus not have a magnetic field?
14.17	What internal process produced the Tharsis uplift on Mars?
14.18	How did the Valles Marineris canyon system on Mars form?
14.19	What is the thickness of the Martian lithosphere?
14.20	What is the explanation for the absence, at present, of a Martian magnetic field?
14.21	Why are there two major volcanic centers on Mars?
14.22	What is the structure of the Martian mantle?
14.23	Is the core of Mars entirely liquid?
14.24	Did the Moon have a magma ocean early in its history?
14.25	What is the origin of lunar mascons?
14.26	Why was there a time delay in the onset of mare volcanism?
14.27	What caused the termination of mare volcanism?
14.28	Does the Moon have a metallic core?
14.29	How was the lunar crust magnetized?
14.30	Did the Moon form from an impact of a Mars-size body with the Earth?
14.31	What is the degree of differentiation of the Moon?
14.32	Is the lunar mantle chemically heterogeneous?
14.33	Does Io have a partially molten asthenosphere?
14.34	How thoroughly has Io been differentiated?
14.35	What is the nature of Io's present thermal, orbital-dynamical state?
14.36	Does Io have a magnetic field?
14.37	What is the structure of Mercury's interior?
14.38	What is the source of Mercury's magnetic field?
14.39	Why is Mercury's density so high?
14.40	Does Europa have a subsurface liquid water ocean?
14.41	Does Callisto have a subsurface liquid water ocean?
14.42	Why are Ganymede and Callisto so different?