

## CAPÍTULO VI

---

### Resumen y Conclusiones

En esta tesis se ha realizado el primer trabajo de atenuación sísmica utilizando y comparando distintos métodos con datos digitales de ondas P, S y coda registradas por estaciones permanentes en la región de Nuevo Cuyo Argentina, (28°-34°S y 65°-72°O), una región calificada como de alta peligrosidad sísmica que se asocia a un segmento de subducción subhorizontal de la placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana. En primer lugar se ha obtenido un modelo de velocidad que define con claridad la geometría de la subducción en la región. Se ha encontrado que la subducción de la dorsal Juan Fernández se asocia a valores bajos de atenuación tanto de ondas coda como de ondas directas. Las variaciones de la atenuación en profundidad han permitido inferir la profundidad de la transición frágil dúctil en la placa subducida que a su vez coincide con la distribución de sismicidad. Se ha observado que las zonas de mayor sismicidad cortical se corresponden también con las zonas de mayor absorción de energía sísmica lo que estaría indicando un mayor acoplamiento entre las placas. En todas las determinaciones se ha encontrado una disminución de la atenuación con la frecuencia que se interpreta como un aumento del camino libre medio o del tiempo de relajación dependiendo de si se considera el efecto del *scattering* o de la absorción anelástica. Se ha obtenido la separación de dichos efectos, que ha mostrado un predominio de la anelasticidad que se vincula fuertemente a los parámetros reológicos. La comparación con valores de dichos parámetros obtenidos independientemente por otros métodos geofísicos o geológicos en análisis de variaciones de densidad, resistividad, temperatura o velocidad valida los resultados de esta tesis, lo que permite integrarlos para obtener un modelo más acertado de la región, resultando entonces un aporte concreto para futuras aplicaciones.

#### 6.1 LOS DATOS y LOS MÉTODOS

En este trabajo se han utilizado datos seleccionados entre los registros de 23 estaciones permanentes, de corto período y componente vertical, pertenecientes a la Red Sismológica Zonal Nuevo Cuyo, que depende del INPRES, en el período agosto de 1995 a marzo de 1999.

Para estudiar la atenuación del medio se hace indispensable contar con una distribución de sismicidad que tenga localizaciones precisas y con una estructura de velocidad que permita plantear modelos para la interpretación de los resultados. Para ello se ha determinado una estructura unidimensional de velocidad de ondas P, utilizando un método de localización conjunta de eventos. El modelo resultante consta de 8 capas y un semiespacio. Mediante diagramas de Wadati se ha establecido una relación  $V_p/V_s = 1.76$ . La aplicación del nuevo modelo y correcciones de estación a la localización ha resultado en una mejor convergencia de las soluciones, una mayor definición de la zona de Wadati-Benioff y una mejor alineación de los epicentros superficiales con los principales sistemas de fallas activas. La comparación de la distribución de hipocentros resultante con las profundidades de las principales discontinuidades y las distribuciones de sismicidad obtenidas en otros trabajos a partir de bases de datos y metodologías diferentes corrobora la confiabilidad del modelo para los análisis de atenuación en la RNC.

De esta manera la zona de estudio ha quedado definida finalmente entre los 27° y los 34° de latitud sur y desde los 65° hasta los 72° de longitud oeste, de acuerdo a la distribución de los 452 sismos localizados. Las profundidades focales superficiales han resultado estar concentradas principalmente en corteza intermedia, hasta los 50 km de profundidad, bajo la Sierra Pie de Palo y también al oeste a lo largo del corrimiento Villicum-Pedernal. A profundidades intermedias los eventos se distribuyen en los primeros 20 km de la placa de Nazca subducida, es decir entre los 100 y 120 km de profundidad con una clara concentración bajo la Precordillera.

Se ha determinado la atenuación de ondas directas y ondas coda y se ha hecho la separación de los efectos anelásticos y de *scattering* en el intervalo de frecuencias entre 1 y 12 Hz de acuerdo a las respuestas instrumentales de las estaciones. Los métodos de estudio han sido seleccionados en primer lugar según las características de los datos (como por ejemplo: distribución de sismicidad, magnitudes, definición de los tiempos de llegada, naturaleza de las ondas, relación señal ruido, respuesta instrumental y distribución de estaciones) y en segundo lugar según la difusión de dichos métodos en la literatura para poder realizar la comparación de los resultados en la región de Nuevo Cuyo con otras regiones del mundo. En algunos casos, la implementación de los métodos se efectuó mediante programas existentes desarrollados a tal fin, en otros se adaptaron los programas para optimizar su aplicación a los datos y también, se desarrollaron nuevas implementaciones de algunos métodos de acuerdo a los criterios adoptados en este estudio. Es sobre todo en estas nuevas aplicaciones que pueden sacarse conclusiones. En primer lugar, los resultados han sido comparables a aquellos

obtenidos por otros programas. En algunos casos han mostrado una mejor definición permitiendo extraer mayor información de los mismos y en otros se ha visto que pueden aún ser optimizados. Los criterios utilizados en dichas aplicaciones han sido más rigurosos con las hipótesis del modelo empleado que las implementaciones ya existentes disponibles.

## 6.2 LAS ONDAS CODA

La determinación del factor de calidad  $Q_c$  se ha efectuado con dos métodos en forma simultánea y usando un ajuste no lineal. Se ha supuesto la validez del *Back-Scattering* Simple (Aki-Chouet, 1975) en la generación de las codas y también se ha aplicado la adaptación de Sato (1977) para el *Scattering* Isótropo Simple (Sato, 1977). En valores medios regionales, tanto a profundidades corticales como en el manto, ambos métodos demuestran una fuerte dependencia del  $Q_c$  con la frecuencia pudiendo ajustarse una relación de tipo potencia ( $Q_c = Q_o (f/f_o)^n$ ). A profundidades intermedias la atenuación disminuye con el lapso de tiempo independientemente del método usado. A profundidades corticales, la atenuación de ondas coda según el SBS muestra también un comportamiento decreciente hasta los 180 s donde comienza a estabilizarse. En cambio, los resultados del SIS se apartan notablemente del SBS para lapsos entre los 60 y 170 s, donde comienza a converger hacia el SBS al disminuir la sensibilidad a la asimetría del patrón de radiación y del *scattering*. Los valores de la potencia  $n$  se mantienen muy similares entre ambos métodos y a lo largo de toda la coda, mostrando un comportamiento levemente decreciente con el lapso de tiempo analizado conforme aumenta  $Q_o$ .

Analizando valores de atenuación obtenidos por estación, no se han observado variaciones importantes de la atenuación superficial de ondas coda con la dirección de propagación de las ondas directas. Por lo tanto se ha considerado la hipótesis de Pulli (1984) asignando los valores de  $Q_o$  obtenidos al volumen de *scattering* que da origen a las ondas coda. Cerca de la superficie, entre 0 y 82 km, la mayor atenuación se registra en la región oriental de la provincia de San Juan, hacia las Sas. Pie de Palo y Valle Fértil; otro mínimo se da en el oeste, en Precordillera. Hacia los 90 s de lapso de tiempo, se homogeneiza la distribución de  $Q_o$  tomando un valor medio cercano a 100. Por otra parte, se observa una fuerte dependencia de  $Q_c$  con la frecuencia, que se manifiesta en valores de  $n$  en general superiores a 1. En todos los lapsos de tiempo, los mayores valores de  $n$  se corresponden con los valores más bajos de  $Q_o$ , de modo que a mayor atenuación, mayor variación de ella con la frecuencia. Según este análisis puede asumirse un valor homogéneo de  $Q_o$  igual a 30 hasta los 82 km de profundidad, 70 hasta los 97 km, 100 hasta los 114 km, 103 hasta los 132 km, 100

hasta los 144 km y 112 hasta los 161 km (en todos los casos se trata de valores desde la superficie hasta las profundidades indicadas). Estos valores medios se asignan al área donde la placa de Nazca permanece horizontal, disminuyendo en la dirección de avance de la dorsal Juan Fernández subducida. La mayor absorción de energía sísmica indicada por esos mínimos coincidiría con un incremento del acoplamiento viscoso entre las placas continental y oceánica (Alvarado et al., 2010) debido a la morfología irregular de la placa de Nazca en la JFR, la escasez de material astenosférico entre placas, la consecuente alteración de la estructura geotérmica y por lo tanto el enfriamiento de la litósfera continental que resulta en un endurecimiento de su reología.

Del análisis comparativo entre la variación de  $Q_0$  y la distribución de sismicidad con la profundidad se observa que la condición frágil de la litósfera superior hasta los 50 km de profundidad coincide con una atenuación alta. Donde se da la transición litósfera continental-litósfera oceánica se da una disminución brusca de la atenuación y ausencia de terremotos. En la parte superior de la litósfera oceánica, a los 100km de profundidad, se da la mayor concentración de eventos sísmicos, así como un aumento de la atenuación. Relacionando la atenuación de ondas coda a un efecto anelástico, el aumento de la atenuación entre los 100 y 114 km estaría indicando la posible ubicación de la Transición Frágil Dúctil en la litósfera de Nazca subducida.

### 6.3 LAS ONDAS DIRECTAS

La determinación de la atenuación de la onda directa P se ha realizado en función de la frecuencia mediante el Método Espectral, ME, e independientemente de ella, mediante el método del Ancho del Primer Pulso, APP. Para las ondas S, se han empleado el Método Espectral, y la Normalización de la Coda, NC.

El ME se ha implementado mediante el método de Tsujiura (1966) con una sola estación, utilizando el criterio de Giampiccolo et al. (2007) con un ajuste lineal (ME\_L) y una nueva adaptación propuesta en este trabajo que considera un ajuste no lineal de los factores de calidad (ME\_NL). Los factores de calidad medios regionales, obtenidos con el ME\_L resultaron:  $230 \pm 21 \cdot f^{0.24 \pm 0.04}$  para ondas P a profundidades corticales;  $157 \pm 65 \cdot f^{0.52 \pm 0.21}$  para ondas P a profundidades intermedias;  $305 \pm 28 \cdot f^{0.38 \pm 0.04}$  para ondas S a profundidades corticales y  $411 \pm 41 \cdot f^{0.15 \pm 0.06}$  para ondas S a profundidades intermedias. Las variaciones de los ajustes del ME\_NL interpretadas en planta, muestran máximos de la atenuación de ondas P y S directas a profundidades corticales bajo la Sierra Pie de Palo y en la proyección superficial de la dorsal Juan Fernández subducida. La mayor atenuación de ondas S directas a

profundidades intermedias se encuentra bajo Precordillera y al oeste de la Sa. Pie de Palo, coincidiendo con la concentración de sismicidad en esas profundidades. Del mismo modo, coinciden para ondas P y S los mínimos de atenuación en una zona bien definida hacia el sudeste de la región. De la comparación entre el ME\_NL y el ME\_L puede decirse que el ME\_NL resulta tener una mejor justificación teórica y sus resultados han permitido una regionalización de los valores de atenuación para ondas P y S.

Analizando la relación entre la atenuación de ondas P y la de ondas S en función de la frecuencia, se ve que  $Q_\alpha^{-1}/Q_\beta^{-1} > 1$  y además que es creciente en la corteza, mientras que a profundidades intermedias,  $Q_\alpha^{-1}/Q_\beta^{-1} > 1$  pero decreciente con la frecuencia indicando que la atenuación de las ondas S tiende a estabilizarse a profundidades intermedias mientras que la atenuación de ondas P lo hace a profundidades corticales. La variedad de escalas en las estructuras corticales así como las diferentes composiciones de los terrenos que la conforman pueden ser la causa de la estabilidad de la atenuación de ondas P en corteza. La mayor homogeneidad a profundidades intermedias hace que la presencia de fluidos en la dinámica de la subducción afecte principalmente a la atenuación de las ondas S.

La atenuación de ondas P mediante el ensanchamiento del primer pulso de P con el tiempo de viaje, se ha determinado mediante la relación establecida por Gladwin y Stacey (1974b). Definiendo dos zonas sismogénicas a profundidades 0-40 km y 90-120 km en la zona central de la RNC, se ha obtenido un valor de  $Q_P = 271$  en corteza y un  $Q_P = 532$  para trayectorias que se inician en la placa de Nazca. Mediante un modelo simple de estructura en capas paralelas homogéneas se ha obtenido un valor de  $Q_P = 1183$  para la capa asísmica intermedia de 70 km de espesor que combina litósfera continental inferior y el escaso material astenosférico interplaca.

El método de Normalización de la Coda propuesto por Aki (1980), ha sido aplicado en numerosas regiones, por lo que resultaba interesante aplicarlo también en la RNC para estudiar la atenuación de las ondas S directas. Los mejores ajustes de  $Q_d$  a profundidades intermedias resultaron al normalizar mediante valores medios regionales de  $Q_c$  por frecuencia y lapso de tiempo obtenidos del modelo SIS y a un tiempo de referencia  $t_c = 90$  s. A profundidades corticales se ha analizado la variación lateral de la atenuación de ondas directas mediante ajustes sobre grupos de estaciones asociadas de acuerdo a su entorno geotectónico. En este caso la normalización se ha hecho con ajustes del SIS obtenidos en los mismos grupos de estaciones. Los resultados muestran dos niveles de atenuación diferentes en la región. Por un lado se encuentra la atenuación estimada para las zonas E SP, W PC y E PC con valores de

$Q_0$  altos y una variación con la frecuencia relativamente lenta, dada por exponentes menores que 0.8. Por otra parte se encuentran valores bajos de  $Q_0$  y muy similares entre sí, para la SPP, E PC eb, W SP y S PC\_CC b con una dependencia con la frecuencia no homogénea dentro del grupo. Relacionando los valores de la atenuación con la distribución de sismicidad, se observa nuevamente que a mayor actividad tectónica mayor es la atenuación y a su vez mayor es su dependencia con la frecuencia. Sobre un mapa de la atenuación de ondas S directas, se destacan dos mínimos de  $Q_0$ , uno en la zona de la Sierra Pie de Palo y el otro en el NO de Mendoza, donde tuvieron epicentro los sismos históricos de mayor magnitud de la región. Los resultados a profundidades intermedias permiten una interpretación que corrobora lo observado a profundidades corticales.

#### 6.4 LA ATENUACIÓN INTRÍNSECA y DE SCATTERING

La separación de la atenuación intrínseca y de *scattering* mediante el método de las Ventanas Temporales Múltiples, MLTWA, (Hoshiya et al., 1991) se ha efectuado utilizando el programa desarrollado por Bianco y Del Pezzo (2002). Del análisis de los resultados a profundidades corticales se ha visto que, dentro de los rangos de error, toda la región presenta valores similares de  $L_e^{-1}$  y  $B_0$ . Comparando valores promedio regionales en profundidades corticales y del manto se observa que la atenuación intrínseca aumenta del manto a la corteza, lo que se puede asociar a las propiedades anelásticas de las estructuras geológicas complejas de la región. El *scattering* disminuye al pasar de corteza a manto, probablemente debido a la mayor homogeneidad estructural del manto litosférico. A profundidades corticales,  $Q_i^{-1}$  es similar a  $Q_s^{-1}$ , indicando una contribución similar de ambos procesos de atenuación, mientras que en el manto litosférico,  $Q_s^{-1}$  es mucho menor que  $Q_i^{-1}$ , interpretándose como una mayor contribución de la absorción anelástica por sobre la atenuación de *scattering*.

La separación de la atenuación intrínseca y de *scattering* mediante el método de Wennerberg (1993), MWe, se ha efectuado a partir de los valores de la atenuación de las ondas S directas y de su coda para longitudes de coda largas. Puede decirse que los resultados del MWe han sido congruentes con el MLTWA, utilizando indistintamente los valores de atenuación de ondas S dados por el Método Espectral o por el método de Normalización de la Coda y los resultados del método de *Back-Scattering* Simple para la coda. Los valores de  $Q_i^{-1}$  y  $Q_s^{-1}$  estimados por el MWe en este estudio pueden asignarse a los efectos de la atenuación intrínseca y de *scattering* en el espesor total del sistema de placas Sudamericana–Nazca yuxtapuestas en la zona de subducción plana e inclusive al manto astenosférico por debajo de ellas hasta la zona de transición. La atenuación intrínseca juega un rol preponderante en el

proceso de subducción y es muy próxima a la atenuación de ondas coda, mientras que la atenuación total prácticamente coincide con la atenuación de las ondas directas. La atenuación intrínseca y la total disminuyen con la frecuencia como ya se había observado anteriormente. La atenuación por *scattering* resulta ser muy débil y no muestra una dependencia clara con la frecuencia pudiendo asociarse a una densidad de dispersores constante en función de su tamaño.

De los dos métodos puede concluirse que la absorción anelástica domina la atenuación total por sobre los efectos de *scattering*. La gran heterogeneidad que se deduce de los resultados del MLTWA en corteza, coincide con la complejidad tectónica de la placa continental en la región de Nuevo Cuyo con la presencia de valles, una tectónica de piel fina y fallas inversas reactivadas sobre un basamento cristalino. El predominio de la atenuación intrínseca en el manto litosférico puede ser explicado por la presencia de agua u otros fluidos liberados en la litósfera continental desde la placa oceánica subducida.

## 6.5 LA REGIÓN

Los valores de atenuación encontrados en la región de Nuevo Cuyo son una clara manifestación de su estado de actividad tectónica. La RNC se caracteriza por una alta atenuación de ondas coda a profundidades corticales estabilizándose su valor cuando los volúmenes de *scattering* alcanzan una profundidad más allá de la zona sismogénica a profundidades intermedias. Las determinaciones de la atenuación de ondas directas, realizadas por los distintos métodos convergen entre sí para algunos métodos, frecuencias y profundidades. Los valores medios de atenuación de ondas P y S permiten inferir el rol de las diferencias composicionales superficiales en la atenuación de las ondas P para trayectorias corticales y el efecto de la presencia de fluidos en la litósfera debido a la subducción dados los efectos observados sobre las ondas S en trayectorias que abarcan profundidades intermedias. La separación de la atenuación intrínseca y de *scattering* ha mostrado que la absorción anelástica es el efecto predominante, más aún cuanto mayor sea la profundidad de validez de los resultados. No son las heterogeneidades las que dominan la atenuación a gran escala sino los parámetros anelásticos del medio. La subducción subhorizontal océano-continente y todos los procesos geodinámicos asociados a ella son los protagonistas.

## 6.6 LA TESIS y EL FUTURO

Este es el momento de pararse y mirar hacia atrás, ver qué se ha hecho, cuál es el aporte, qué se puede mejorar y entonces decidir los próximos pasos. Bien dicen que la tesis más que

cerrar una etapa, abre varias. Fundamentalmente, esta tesis ha servido para integrar los conocimientos y el trabajo de un grupo de personas e instituciones que han hecho sus aportes a lo largo de estos años. Con la energía de estos aportes se han podido interpretar los fríos resultados que surgen del análisis de las ondas, elevando la temperatura de los mismos hasta fundirlos con suficiente coherencia como para enunciarlos.

La implementación de las metodologías que se han hecho ya sea siendo fieles a su diseño original, replanteando los criterios de aplicación o mejorando las técnicas de cálculo, forman un conjunto de herramientas que serán de utilidad en otras áreas tectónicas en las que se está colaborando y que en algunos casos tienen como protagonista a la actividad volcánica, lo que sin duda representará un nuevo desafío. Sin embargo también abre las puertas a la colaboración en otras regiones y a la incorporación de nuevos datos de la Región de Nuevo Cuyo que permitan densificar la información obtenida. Seguramente de este modo podrán satisfacerse aquellas inquietudes que han surgido a partir de los resultados. En particular se cree que podrían lograrse mejores resultados incorporando rutinas que efectúen algunas etapas de procesamiento previas de modo de eliminar posibles fuentes de error. Ya se han dado los primeros pasos a fin de extender los análisis de la atenuación de una a dos dimensiones. En colaboración con investigadores del Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania, Catania, Italy se está trabajando en la elaboración de la tomografía de velocidad de ondas P que luego permitirá elaborar una tomografía de atenuación.

A lo largo de esta tesis se ha visto que el análisis de los efectos de la atenuación permite tener otro punto de vista de los parámetros que definen el medio por donde se propagan las ondas y que se relacionan con los procesos geodinámicos activos en la región. Se espera que estos resultados puedan ser incorporados y con éxito a la elaboración de modelos reológicos más completos de la región de subducción plana argentina.

Existe otra finalidad de gran importancia y aplicación y es que los valores de los factores de atenuación, permiten establecer fórmulas que describen el decaimiento de las amplitudes con la distancia. El correcto planteo de estas fórmulas es fundamental para la realización de estudios de peligrosidad y riesgo sísmico y por lo tanto para la elaboración de normas de construcción sismorresistente. En este sentido se espera que esta tesis pueda aportar a los trabajos que al respecto viene haciendo el Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) ya sea a partir de los resultados obtenidos en la región de Nuevo Cuyo o en otras regiones sísmicamente activas del país donde sea de interés la aplicación de las técnicas aquí implementadas.