

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE
ENSENADA**



**Programa de posgrado en ciencias
en ciencias de la tierra con orientación en sismología**

**Estudio de Semiperiodicidad para Grandes Sismos en Venezuela
y Japón**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:
Claudia Beatriz Mercedes Quinteros Cartaya

Ensenada, Baja California, México.

2012

Resumen de la tesis de Claudia Beatriz Mercedes Quinteros Cartaya, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Sismología.

Estudio de semiperiodicidad para grandes sismos en Venezuela y Japón

Resumen aprobado por:

Dr. Fidencio Alejandro Nava Pichardo
Director de Tesis

Es ampliamente aceptado que la generación de sismos en alguna región se debe a procesos críticamente autoregulados, los cuales presentan semiperiodicidad para eventos grandes. Los estudios usuales de periodicidad suponen, simplistamente, que todos los sismos observados en una región determinada corresponden al mismo proceso; lo que resulta en estimaciones erróneas de los periodos de recurrencia. Este estudio considera la posibilidad de que la sismicidad sea causada por más de un proceso semiperiódico y/o de que haya sismos que no estén relacionados con los procesos semiperiódicos observados. La transformada analítica de Fourier de los tiempos de ocurrencia de los sismos, considerados como proceso puntual, permite la identificación de secuencias semiperiódicas, a partir de las cuales es posible pronosticar el próximo sismo de cada secuencia, así como evaluar su nivel de significatividad. Como aplicación del método, se analiza la sismicidad en una región de Japón y en cuatro regiones de Venezuela. Las secuencias identificadas que tienen al menos cuatro eventos y altas probabilidades de ocurrencia no aleatoria, son: una secuencia con $M \geq 8$ en Japón, y en Venezuela dos secuencias con $M \geq 5.6$ y tres con $M \geq 6$. Las probabilidades de los pronósticos para intervalos alrededor de los tiempos correspondientes, son mayores que las probabilidades de ocurrencia poissoniana, y las ganancias de probabilidad son significativas.

Palabras clave: **Peligro sísmico, pronóstico sísmico, semiperiodicidad, Venezuela y Japón.**

Abstract of the thesis by Claudia Beatriz Mercedes Quinteros Cartaya, presented as partial requirement for obtaining the Master in Science Degree in Earth Sciences with orientation in Seismology.

Study of semi-periodicity for large earthquakes in Venezuela and Japan

Abstract approved by:

Dr. Fidencio Alejandro Nava Pichardo
Thesis Director

It is widely accepted that earthquake generation in a given region is due to critically self-regulated processes, which feature semi-periodicity for large events. Usual periodicity studies suppose, naively, that all earthquakes observed in a given region belong to the same process, which results in erroneous estimations of the recurrence periods. Our study considers the possibility that seismicity may be caused by more than one semi-periodic process and/or that there may be events unrelated to the observed semi-periodic processes. The analytical Fourier transform of the earthquake occurrence times, considered as a point process, allows identification of semi-periodic sequences, based on which it is possible to forecast the next earthquake for each sequence, and to evaluate its significance level. As application of the method, we analyzed the seismicity in one region in Japan and four regions in Venezuela. Sequences having at least four events and high probabilities of non-random occurrence are: one with $M \geq 8$ in Japan, and in Venezuela two sequences with $M \geq 5.6$ and three with $M \geq 6$. The forecast probabilities for intervals centered on the corresponding times are larger than the Poissonian occurrence probabilities, and with probability gains. are significant.

Keywords: Seismic **hazard**, **seismic forecast**, **semi-periodicity**, **Venezuela and Japan**.

DEDICATORIA

*A mis Padres,
Gerardo Quinteros y Mercedes Cartaya.
Mis mejores maestros.*

AGRADECIMIENTOS

Al CICESE, por haberme dado la oportunidad de ingresar al programa de Maestría en Ciencias de la Tierra y de llevar a cabo mis estudios exitosamente. Al Consejo nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado durante los dos años de estudio.

Al comité evaluador: Dr. Eva Glowacka, MSc. José Frez y Dr. Modesto Ortiz, por todo su importante apoyo y orientación durante el desarrollo de esta tesis. Agradezco muy especialmente a mi Director de tesis, Dr. F. Alejandro Nava P., quién durante la realización de este trabajo, cumplió un papel fundamental, como profesor, asesor y amigo; sin sus enseñanzas, su paciencia, orientación y motivación, este trabajo no hubiese sido posible.

A la Fundación venezolana de investigaciones sismológicas (FUNVISIS), especialmente a Gloria Romero, Michael Schmitz, Leonardo Alvarado y Raquel Vásquez, por su valioso apoyo en cuanto a la información de la sismicidad histórica e instrumental de Venezuela.

A TODOS los profesores, investigadores y compañeros de la Div. de Ciencias de la Tierra y del Cicese en general, con quienes, durante el período 2010-2012, tuve la oportunidad de aprender, compartir y crecer.

A mi familia, por toda la confianza, estímulo y apoyo invaluable que me ha ayudado a seguir siempre adelante.

Muchísimas gracias!

Tabla de Contenido

	Página
Resumen español.....	2
Resumen inglés.....	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimientos.....	5
Lista de Figuras.....	8
Lista de Tablas.....	13
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.2 Objetivos	
1.2.1 Objetivo general.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3 Estudios previos sobre “periodicidad” de sismos.....	17
Capítulo 2. Tectónica y actividad sísmica	
2.1 Japón.....	20
2.2 Venezuela.....	26
Capítulo 3. Método	
3.1 Tiempos de ocurrencia como proceso puntual.....	32
3.2 Análisis espectral.....	36
3.3 Significatividad.....	44
3.4 Pronóstico.....	47
Capítulo 4. Datos	
4.1 Japón	
4.1.1 Área de estudio.....	51
4.1.2 Catálogos sísmicos.....	52
4.1.3 Procesamiento de catálogo y magnitudes.....	54
4.2 Venezuela	
4.2.1 Áreas de estudio.....	56
4.2.2 Catálogos sísmicos.....	57
Capítulo 5. Resultados y Discusión.	
5.1 Japón	
5.1.1 Secuencias semiperiódicas dentro del intervalo de tiempo 1890-2012.....	62
5.1.1.1 Primera secuencia semiperiódica entre los años 1890-2012.....	63
5.1.1.2 Segunda secuencia semiperiódica entre los años 1890-2012.....	69
5.1.2 Secuencias semiperiódicas dentro del intervalo de tiempo 1670-2012.	72

	Página
5.1.3 Pronóstico del evento sísmico del año 2003.73.....	75
5.1.3.1 Caso de prueba 1: año actual 1980.....	75
5.1.3.2 Caso de prueba 2: año actual 2002.....	77
5.1.4 Ubicación de los eventos de cada secuencia identificada.....	80
5.2 Venezuela	
5.2.1 Área 1.....	81
5.2.1.1 Primera secuencia semiperiódica del área 1.....	81
5.2.1.2 Segunda secuencia semiperiódica del área 1.....	85
5.2.1.3 Pronóstico de los eventos de los años 1994 y 1997.....	89
5.2.2 Área 2	92
5.2.2.1 Secuencia semiperiódica del área 2.....	92
5.2.2.2 Pronóstico del evento ocurrido en el año 2009.9.....	96
5.2.3 Área 3.....	98
5.2.3.1 Secuencia semiperiódica del área 3.....	98
5.2.3.2 Pronóstico del evento ocurrido en el año 2009.338.....	103
5.2.4 Área 4.....	105
5.2.4.1 Secuencia semiperiódica del área 4.....	105
5.2.4.2 Pronóstico del evento ocurrido en el año 1997.52.....	109
5.2.5 Ubicación de los eventos de cada secuencia identificada.....	111
Conclusiones.....	112
Referencias bibliográficas.....	116
Apéndices.....	123

Lista de figuras

	Página
Figura 2.1. Configuración de las placas tectónicas en la región de los arcos de islas de Japón.....	22
Figura 2.2. Diferentes tipos de sismos que pueden ocurrir en la región de Japón.....	23
Figura 2.3. Probabilidad de ocurrencia de sismos durante los próximos 30 años en las principales fallas activas intraplaca (probabilidad calculada de forma poissoniana).....	24
Figura 2.4. Probabilidad de ocurrencia de sismos durante los próximos 30 años en los bordes de placas, según su magnitud y ubicación. (probabilidad calculada de forma poissoniana).....	25
Figura 2.5. Límite de placas tectónicas en la región de Venezuela.....	27
Figura 2.6. Mapa de fallas cuaternarias de Venezuela. (Audemard <i>et al.</i> , 2005).....	29
Figura 2.7. Mapa de sismicidad ($M > 3$) en Venezuela (1910-2012).....	30
Figura 3.1. Las 3 gráficas de la izquierda: a) Ejemplo de una secuencia periódica con $\tau = 100$ años. b) Su Transformada de Fourier analítica. c) Función Sinc de la convolución. Las 3 gráficas de derecha, espectros de la secuencia con variaciones aleatorias θ_j : a) con desviación estándar $\sigma = 7.24$ años, b) con desviación estándar $\sigma = 16.99$ años y c) Con desviación estándar $\sigma = 23.55$ años.	35
Figura 3.2. Serie sintética construida para ejemplificar la aplicación del método de identificación de secuencias.....	36
Figura 3.3. a) Espectro de Fourier de las series mostradas en la figura 3.2. Las líneas verdes verticales refieren las frecuencias $s_{\min}$ y $s_{\max}$, las líneas rojas segmentadas indican la frecuencia seleccionada $s_p = 0.0141$ años ⁻¹ y dos de sus múltiplos, la línea negra corta señalada bajo el pico a la derecha del seleccionado indica que ese pico fue probado anteriormente y rechazado como posible solución. b) Se muestran todos los eventos de los cuales, los que están resaltados con flechas azules, son los eventos identificados como los correspondientes a la secuencia de período $\tau_p = 71.09$ años c) Peine construido al cuál se asocia la secuencia mostrada en la gráfica superior.....	38

	Página
Figura 3.4. Segundo pase luego de eliminar los eventos más lejanos....	40
Figura 3.5. Tercer pase. El período identificado es $\tau_p = 70.76$ años y el error estándar es $\sigma = 2.610$	41
Figura 3.6. Cuarto y último utilizando únicamente los eventos pertenecientes a la secuencia encontrada en el pase anterior.....	42
Figura 3.7. Primer pase de la identificación de la segunda secuencia de los datos sintéticos.....	43
Figura 3.8 Dependencia de P_ϕ sobre σ/T y K para tres valores típicos de N	46
Figura 3.9. Ejemplo del pronóstico basado en la identificación de la secuencia presentada en la figura 3.8.....	49
Figura 4.1. Área de estudio de Japón, con la ubicación de los sismos incluidos en la base de datos preliminar.....	51
Figura 4.2. Diferentes magnitudes calculadas, según diferentes agencias, para el sismo del 11-03-2011, ocurrido en Japón. Información obtenida del catálogo del ISC.....	53
Figura 4.3. División de las áreas de estudio de Venezuela, con la ubicación de los sismos incluidos en la base de datos preliminar.....	57
Figura 5.1. Serie de tiempo con las ocurrencias de episodios de liberación de energía en el área de estudio de Japón, con magnitudes $M \geq 8.0$	62
Figura 5.2. Identificación de la primera secuencia semiperiódica en Japón. Primer y segundo pase.....	65
Figura 5.3. Identificación de la primera secuencia semiperiódica en Japón. Tercer y cuarto pase.....	66
Figura 5.4. Gráficas de evaluación del pronóstico en la primera secuencia de Japón.....	68
Figura 5.5. Identificación de la segunda secuencia semiperiódica en Japón. Primer y segundo pase.....	70

	Página
Figura 5.6. Identificación de la segunda secuencia semiperiódica en Japón. Tercer y cuarto pase.....	71
Figura 5.7. Identificación de la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1670 y 2012. Primer y segundo pase.....	73
Figura 5.8. Identificación de la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1670-2012. Tercer y cuarto pase. Simbología equivalente a figuras anteriores.....	74
Figura 5.9. Identificación de la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1890 y 1970. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase.....	76
Figura 5.10. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1890 y 1970.	77
Figura 5.11. Identificación de la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1890 y 2002. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase.....	78
Figura 5.12. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1890 y 2002.....	79
Figura 5.13. Mapa de ubicación de los eventos pertenecientes a las secuencias identificadas en el área de estudio de Japón.....	80
Figura 5.14. Serie de tiempos de ocurrencia de los sismos con magnitudes $M \geq 6.0$ en el área 1 de Venezuela, entre 1590 y 2012.....	81
Figura 5.15. Identificación de la primera secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 2012. Primer y segundo pase.....	82
Figura 5.16. Identificación de la primera secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 2012. Tercer y cuarto pase.....	83
Figura 5.17. Gráficas de evaluación del pronóstico en la primera secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela.....	85
Figura 5.18. Identificación de la segunda secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 2012. Primer y segundo pase.....	86
Figura 5.19. Identificación de la segunda secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 2012. Tercer y cuarto pase.....	87
Figura 5.20. Gráficas de evaluación del pronóstico en la segunda secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela.....	88

	Página
Figura 5.21. Identificación de la primera secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 1970. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase.....	89
Figura 5.22. Gráficas de evaluación del pronóstico en la primera secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 1970.	90
Figura 5.23. Identificación de la segunda secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 1970. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase.....	91
Figura 5.24. Gráficas de evaluación del pronóstico en la segunda secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 1970.	91
Figura 5.25. Serie de tiempos de ocurrencia de los sismos con magnitudes $M \geq 5.6$ en el área 2 de Venezuela, entre 1673 y 2012.....	92
Figura 5.26. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 2 de Venezuela, entre 1774 y 2012. Primer y segundo pase.....	93
Figura 5.27. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 2 de Venezuela, entre 1774-2012. Tercer y cuarto pase.....	94
Figura 5.28. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 2 de Venezuela.....	95
Figura 5.29. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 2 de Venezuela, entre 1774 y 1970. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase.....	97
Figura 5.30. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 2 de Venezuela, entre 1774 y 1970.....	97
Figura 5.31. Serie de tiempos de ocurrencia de los sismos con magnitudes $M \geq 5.6$ en el área 3 de Venezuela, entre 1641 y 2012.....	98
Figura 5.32. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 3 de Venezuela, entre 1800 y 2012. Primer y segundo pase.....	99
Figura 5.33. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 3 de Venezuela, entre 1800 y 2012. Tercer y cuarto pase.....	100
Figura 5.34. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 3 de Venezuela.....	101

	Página
Figura 5.35. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 3 de Venezuela, entre 1800 y 1980. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase.....	104
Figura 5.36. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 3 de Venezuela, entre 1800 y 1980.....	104
Figura 5.37. Serie de tiempos de ocurrencia de los sismos con magnitudes $M \geq 6$ en el área 4 de Venezuela, entre 1530 y 2012.....	105
Figura 5.38. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 4 de Venezuela, entre 1852 y 2012. Primer y segundo pase.....	106
Figura 5.39. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 4 de Venezuela, entre 1852 y 2012. Tercer y cuarto pase.....	107
Figura 5.40. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 4 de Venezuela, entre 1852 y 2012.....	108
Figura 5.41. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 4 de Venezuela, entre 1852 y 1970. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase.....	110
Figura 5.42. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 4 de Venezuela, entre 1852 y 1970.	110
Figura 5.43. Mapa de ubicación de los eventos pertenecientes a las secuencias identificadas en Venezuela.....	111

Lista de tablas

	Página
Tabla 2.1. Sismos más significativos en Japón de el año 1891 hasta la actualidad.....	26
Tabla 2.2. Sismos más significativos en Venezuela desde 1530 hasta la actualidad.....	31
Tabla 3.1. Probabilidades y Ganancia de la probabilidad y de información.....	48
Tabla 4.1. Catálogo final de Japón a utilizar en el análisis.....	56
Tabla 4.2. Catálogo de eventos sísmicos utilizados para el caso de Venezuela, con magnitudes paritr de 5.5 y localizados dentro de las áreas de estudio A1, A2, A3 y A4.....	59
Tabla 5.1. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia J1 de Japón.....	67
Tabla 5.2. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la segunda secuencia de Japón.....	69
Tabla 5.3. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia entre 1890-1980.....	75
Tabla 5.4. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia entre 1890 y 2002.....	78
Tabla 5.5. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la primera secuencia en el área 1 de Venezuela.....	84
Tabla 5.6. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la segunda secuencia en el área 1 de Venezuela.....	88
Tabla 5.7. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia en el área 2 de Venezuela...	95
Tabla 5.8. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia V1 en el área 3 de Venezuela.....	101
Tabla 5.9. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia en el área 4 de Venezuela...	108

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La ocurrencia de grandes sismos puede producir daños cuantiosos y numerosas fatalidades. Por tanto, uno de los objetivos principales de la Sismología es lograr predecir o pronosticar dicha ocurrencia, pues ello contribuiría a reducir los riesgos asociados con grandes terremotos.

Los pronósticos sísmicos pueden estar basados en estudios puramente estadístico-probabilísticos, en modelos físicos o en combinaciones de ambos. Nosotros proponemos un método con base en el modelo físico de *rebote elástico* (Reid, 1910) que toma en cuenta, de manera probabilística, las posibles variaciones que la complejidad de los procesos geológicos introduce en dicho modelo.

El modelo de rebote elástico propone que existe un proceso de acumulación de deformación en la corteza terrestre, que cuando el esfuerzo asociado con dicha deformación supera el límite de la resistencia (mínimo esfuerzo que causa la ruptura; en inglés *strength*) del terreno, éste *falla* generando una fractura, desplazando el material a los lados de ésta, lo que libera energía en forma de ondas sísmicas y produce calor y concentraciones de esfuerzo. Posteriormente a la ruptura, la falla *sana* y el proceso de acumulación de energía comienza de nuevo. Este proceso repetido de acumulación y liberación de energía es conocido como *ciclo sísmico*.

La teoría de tectónica de placas (Morgan, 1968; Cox, 1973; Richardson *et.al.*, 1979) permite explicar la fuente de la deformación en el modelo de rebote elástico,

como la interacción entre placas tectónicas debida al movimiento relativo entre éstas. La velocidad del movimiento relativo entre placas se mantiene casi constante durante cientos, a millones, de años y esta alimentación constante permite esperar la ocurrencia de ciclos sísmicos.

Sin embargo, la realidad es mucho más compleja que el simple modelo de rebote elástico, pues los esfuerzos y la resistencia varían espacialmente y puede haber múltiples fallas y diversos procesos involucrados, de manera que difícilmente puede esperarse que el ciclo sísmico sea perfectamente periódico. Por lo tanto, trabajaremos bajo el supuesto de que el, o los, ciclo(s) producidos por la sismicidad real son *semiperiódicos*.

La suposición de semiperiodicidad es contraria al ampliamente usado modelo de probabilidad uniforme en el tiempo, también llamado *modelo poissoniano* pues el número de eventos en cualquier intervalo está distribuido según la distribución de Poisson. El modelo poissoniano es acausal y sin memoria, pues la probabilidad de ocurrencia de un sismo es constante en el tiempo y no depende de la actividad sísmica previa; es decir que la energía liberada en un sismo grande no influye en el estado de energía que pueda generar el siguiente sismo (Aki, 1956; Cornell, 1968; Vere-Jones y Ozaki, 1982).

El modelo poissoniano ha sido ampliamente utilizado para describir la ocurrencia de sismos debido a su simplicidad, ya corresponde a un modelo de máxima entropía. Considerando la causalidad del proceso sísmico, las probabilidades poissonianas pueden ser sobreestimadas en el caso de que el último evento haya sido muy grande y si el último sismo fue pequeño o si pasa un largo tiempo sin que ocurra otro evento, entonces las probabilidades pueden ser subestimadas (Anagnos y Kiremidjian, 1984).

El modelo poissoniano es razonable cuando la ocurrencia de los sismos depende de procesos diferentes e independientes, por lo que ha surgido la necesidad de desarrollar otros modelos para estudios de agrupamiento de sismos o réplicas. Estos son modelos tales como *Markov* (Vere-Jones, 1966; Knopoff, 1971, entre otros), *semi-Markov* (Patwardhan *et. al.*, 1980) y *modelos de renovación* (Kameda y Ozaki, 1979; Kiremidjian y Anagnos, 1984, entre otros). Cada uno de estos modelos caracteriza diferentes aspectos de la dependencia; mientras unos plantean la dependencia entre eventos principales, otros se concentran en la dependencia entre eventos principales y secundarios. Ninguno de estos modelos tienen bases físicas.

Mediante el estudio de semiperiodicidades de grandes sismos se busca identificar las secuencias correspondientes a los ciclos sísmicos y, utilizar la semiperiodicidad observada para pronosticar el próximo sismo de la secuencia. A diferencia de estudios previos de periodicidad, nuestro estudio toma en cuenta la posibilidad de que exista más de un proceso cíclico en una región sismogénica, además de la posible presencia de grandes sismos cuya ocurrencia es aparentemente aleatoria, pues no pueden ser asociados a algún proceso cíclico reconocible.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general es pronosticar grandes sismos, con base en la identificación de secuencias semiperiódicas mediante el análisis espectral de Fourier. Como aplicación del método, se analiza la sismicidad de Japón y Venezuela; dos regiones con características sísmicas y tectónicas distintas.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Calcular la transformada analítica de Fourier de las series conformadas por los tiempos de ocurrencia de sismos, dentro de una región e intervalo de tiempo determinados, considerando cada serie como segmento de una serie infinita.
2. Identificar las secuencias semiperiódicas presentes en las series y evaluar su grado de semiperiodicidad.
3. Evaluar la significatividad de las secuencias semiperiódicas observadas, mediante el cálculo de probabilidad de aleatoriedad de ocurrencia para cada secuencia y el cálculo de la ganancia de probabilidad y de información en comparación con las probabilidades poissonianas.
4. Pronosticar los próximos eventos a ocurrir, con base en las secuencias identificadas y sus características, mediante la función de densidad de probabilidad de ocurrencia en el tiempo. Complementar los pronósticos mediante las funciones de supervivencia, de tiempo de vida futura y de peligro.

1.3 Estudios previos sobre “periodicidad” de sismos

Desde hace varias décadas, numerosos estudios han sido realizados con la intención de definir patrones de ocurrencia de eventos en el tiempo. Desafortunadamente, los resultados de la mayoría de estos estudios no han sido satisfactorios, ya que no han considerado la posibilidad de tener eventos que no correspondan a la secuencia buscada.

El modelo basado en la *recurrencia de tiempo predecible*, propuesto por Shimazaki y Nakata (1980), está basado en la acumulación y relajación de esfuerzos. Dicho modelo propone que un sismo ocurre cuando se alcanza un nivel

de esfuerzo dado, por lo que el tiempo de ocurrencia de un sismo depende del tamaño del sismo más reciente.

La ocurrencia de sismos característicos fue sugerida para el famoso caso del segmento de Parkfield, de la falla de San Andrés en, California (Bakun y Lindh, 1985), en el cual se aplicó el modelo de tiempo predecible. En dicho estudio, se tomó en cuenta una secuencia de 6 sismos que ocurrieron en 1857, 1881, 1901, 1922, 1934 y 1966, con periodicidad media de $\tau = 21.9 \pm 3.1$ años. Se estimó un 95% de confianza de que ocurriera un sismo de magnitud 6 o mayor alrededor de 1985 y hasta 1993, el cual ocurrió en el año 2004, 11 años después de lo esperado. Los tiempos de recurrencia de la supuesta secuencia resultaron ser $\tau_1 = 24.1$ años, $\tau_2 = 20.1$ años, $\tau_3 = 21.0$ años, $\tau_4 = 12.2$ años, $\tau_5 = 32.0$ años y $\tau_6 = 38.2$ años.

Otros estudios han intentado identificar los errores del pronóstico de Parkfield y proponer modelos más realistas (Ben-Zion *et.al.*, 1993; Kagan, 1997; Murray y Segall, 2002). El hecho de no conocer completamente las variables físicas involucradas y de no contar con suficientes datos observacionales (en un mayor rango de tiempo) dificulta los cálculos de tiempos de recurrencia de grandes sismos. Zöller *et.al.*(2007) proponen el análisis Bayesiano para solventar el problema de escasez de datos. La distribución del tiempo de recurrencia fue ajustado aproximadamente a una distribución Gamma y se combinó datos sintéticos con tiempos de recurrencia observados entre los 6 sismos de la secuencia en Parkfield. Estimaron el promedio de la caída de esfuerzos de los eventos y la media del tiempo esperado para el próximo evento ~M6, calculado para el año 2027 con un error asociado a la desviación estándar de 7.7 años. Este modelo implica que el peligro sísmico aumenta después de un gran sismo continuamente hasta que llega a un punto en donde tiende a ser constante; por lo tanto, si un sismo característico no sucede o se retrasa debido a la relajación de

esfuerzos en sismos pequeños o intermedios, la estadística se aproxima a un proceso aleatorio de Poisson con peligro constante. Por otra parte, es importante tomar en cuenta que este modelo está limitado a un contexto tectónico relativamente simple, por lo que no garantiza una aplicación exitosa en las muchas otras regiones del mundo que se caracterizan por la interacción compleja de fallas.

CAPÍTULO 2. TECTÓNICA Y ACTIVIDAD SÍSMICA

2.1. Japón

Los arcos de islas japonesas constan de cuatro segmentos: el arco de las Kuriles, Honshu, Ryukyu e Izu-Bonin (Ogasawara). Este sistema de arcos contiene cuatro grandes islas: Hokkaido, Honshu, Shikoku y Kyushu. Están ubicadas en una zona de confluencia entre cuatro placas tectónicas principales: las placas oceánicas del Pacífico y de las Filipinas, y las placas continentales de América del Norte/Okhotsk y la de Eurasia/Amuria (figura 2.1). La placa del Pacífico subduce bajo el arco Kuriles y el arco Izu-Bonin (o Izu-Ogasawara), desplazándose hacia el Oeste-Noroste con una velocidad de 8 cm por año (Wei y Seno, 1998). El frente de subducción, que sobrepasa los 6000 m de profundidad, está conformado por las fosas de las Kuriles, de Japón y de Izu-Bonin. Los volcanes cuaternarios se sitúan en paralelo a estas fosas y forman un frente volcánico. En el norte, la subducción de la placa del Pacífico es oblicua a la fosa de las Kuriles, causando un movimiento transcurrente a lo largo del arco, que se traduce en una zona de colisión local dentro de la placa de Okhotsk en el centro de Hokkaido conocida como *zona de colisión Hidaka* y causando la migración de la franja antearco de las Kuriles hacia el oeste.

La convergencia con dirección este-oeste en el noreste de Japón, entre la placa de Okhotsk y la placa de Amuria, ha puesto en marcha una zona de subducción incipiente en el margen oriental del mar de Japón (Nakamura 1983, Tamaki y Honza 1985).

La placa de Filipinas se mueve hacia el noroeste con velocidad de aproximadamente 5 cm / año (Wei y Seno, 1998) y subduce bajo el suroeste del arco de Ryukyu y Japón. El frente volcánico se encuentra paralelo a la fosa de las

Ryukyu y al canal de Nankai, el cual se vuelve menos significativo en la parte central de Honshu y de Shikoku, debido a que la profundidad de la subducción de la placa de Filipinas es menor a 100 km (por encima de la profundidad de la fusión parcial). La placa de Filipinas también subduce oblicuamente bajo el canal de Nankai, que comprende una franja tectónica que se está moviendo hacia el oeste a lo largo de una zona de transcurrencia conocida como "línea media tectónica" (MTL).

Existe una zona de extensión activa de rifting, entre el arco de Ryukyu y la placa Eurasiática/Amuria en el oeste, que causa la expansión del canal de Okinawa. Este campo extensional horizontal se extiende al oeste de Kyushu. La región antearco de Okinawa es también considerada una microplaca (Sibuet et.al., 1987; Bird, 2003).

En consecuencia de este contexto tectónico, se han generado diversos sistemas de fallas activas (figura 2.1) que son puntualizadas a continuación (Taira, 2001):

1. En Hokkaido, un sistema de falla significativa está presente a lo largo del piedemonte occidental de la Cordillera de Hidaka. Este sistema de fallas activo es parte del cinturón de plegamiento antepaís de la *zona de colisión Hidaka*.
2. En el occidente de Hokkaido y el noreste de Honshu se desarrollan, de norte a sur, los sistemas de fallas inversas, lo que indica que estas áreas se encuentran bajo un régimen de compresión de este a oeste. Esta observación concuerda con los resultados de GPS geodésicos y estudios sísmicos.
3. Del centro al suroeste de Honshu domina una densa red de sistemas de fallas transcurrentes tipo conjugadas con dirección NO-SE y NE-SO. Hacia el sur, estos sistemas de fallas están delimitadas por la MTL. Estos sistemas pueden ser mejor explicados por un régimen de compresión este-oeste.
4. En las proximidades de la *zona de colisión de Izu*, el sistema falla está fuertemente relacionado con la configuración del límite de placa (Huchon y

Kitazato, 1984). Estudios de GPS y resultados de estudios sísmicos también confirman dicha forma puntiaguda en el límite.

5. La extensión hacia el oeste de la MTL conecta con un zona de extensión norte-sur en Kyushu central (Okamura et al 1992), la cual continúa hacia el este al final del canal de Okinawa.

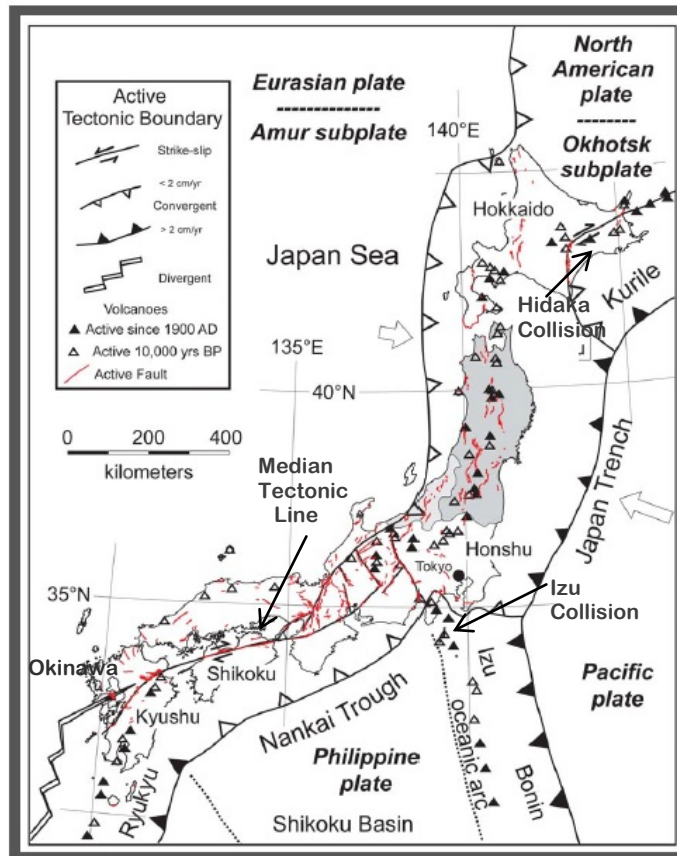


Figura 1. Configuración de las placas tectónicas en la región de los arcos de islas de Japón. En rojo se indica las fallas cuaternarias activas. Los triángulos pequeños indican la actividad volcánica. Modificado de Nuclear Waste Management Organization of Japan (2009), NUMO-TR-08-03.

Los sismos ocurridos en estos arcos de islas y sus alrededores podrían dividirse en dos tipos (figura 2.2). El primer tipo comprende los sismos en o muy cerca de los límites de placas en las trincheras. El segundo tipo comprende los sismos que se producen a mayor distancia, en lugares someros.

La zona del límite de placas en la trinchera de Japón es la que presenta mayor actividad sísmica; más de 100 sismos mayores a M6 han ocurrido desde 1885. En el canal de Nankai se han generado sismos mayores de M8 en intervalos de aproximadamente 180 años (Ando, 1975; Sangawa, 1994).

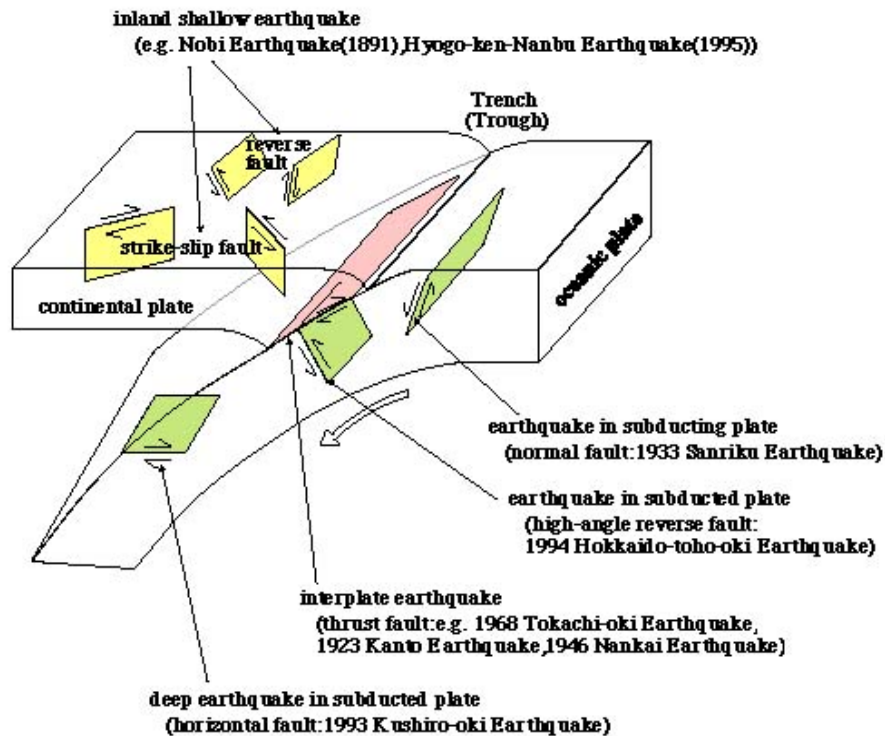


Figura 2.2. Diferentes tipos de sismos que ocurren en la región de Japón. Como ejemplo se indica algunos de los sismos importantes ocurridos entre el año 1891 y 1995. (Tomado de Headquarters for Earthquake Research Promotion, <http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchreng/eqchrfrm.htm>. Fig.2-18).

El *Headquarters for Earthquake Research Promotion* de Japón, publicó en enero de 2012 una evaluación aproximada de las probabilidades de ocurrencia en los próximos 30 años, según las principales fallas activas y las principales zonas de subducción, tal como se muestra en las figuras (2.3 y 2.4), respectivamente:

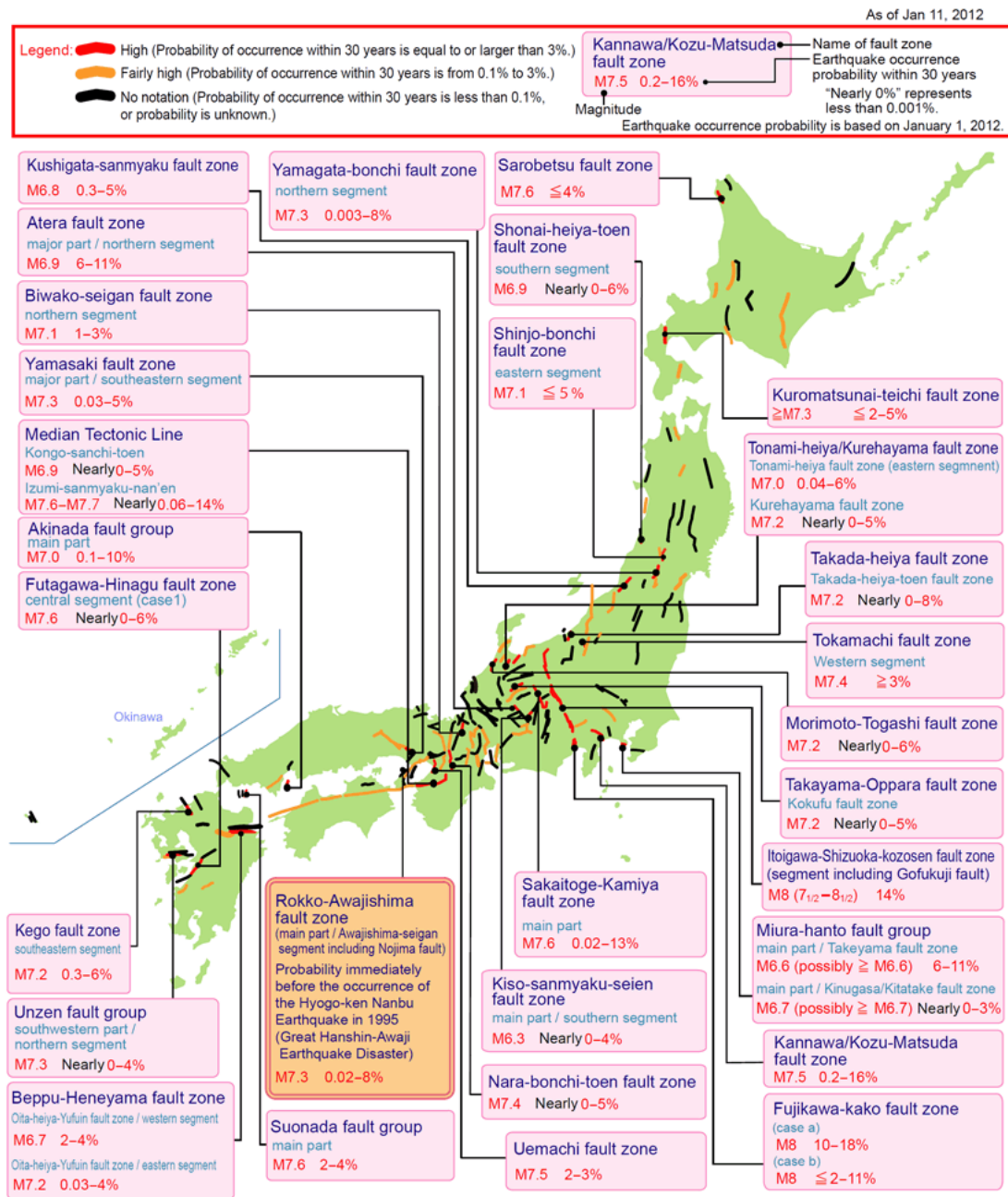


Figura 2.3. Probabilidad de ocurrencia de sismos durante los próximos 30 años en las principales fallas activas intraplaca (probabilidad calculada de forma poissoniana). Las fallas en rojo indican probabilidad mayor que el 3%, las color naranja entre 0.1% y 3% y las negras indican probabilidad menor que 0.1%. (Headquarters for Earthquake Research Promotion, http://www.jishin.go.jp/main/img/w_shokai-e_katsudanso.gif).

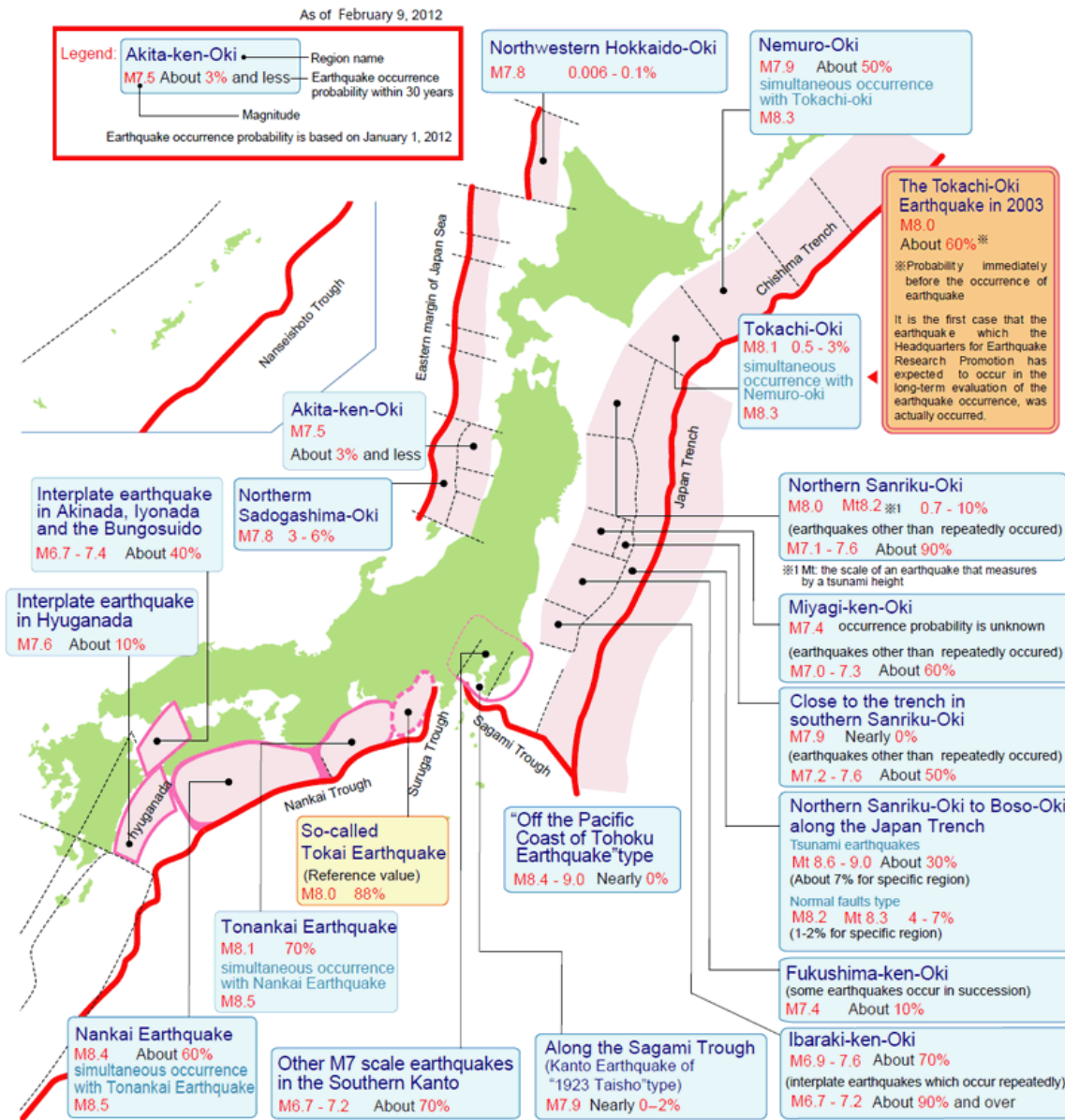


Figura 2.4. Probabilidad de ocurrencia de sismos durante los próximos 30 años en los bordes de placas, según su magnitud y ubicación. (probabilidad calculada de forma poissoniana) (Headquarters for Earthquake Research Promotion, http://www.jishin.go.jp/main/img/w_shokai-e_kaiko.gif).

A continuación se muestra una lista representativa de los sismos más significativos ocurridos en Japón desde el año 1891:

Tabla 2.1. Sismos más significativos en Japón desde el año 1891 hasta la actualidad.

Fecha	Localidad	Magnitud	Observaciones
27-10-1891	Mino-Owari, Japón	8.4	
15-06-1896	Sanriku, Japón	8.3	Tsunamigénico
15-06-1911	Islas Ryukyu, Japan	8.0	Tsunamigénico
01-09-1923	Kanto (Kwanto), Japón	7.9	Tsunamigénico
07-03-1927	Tango, Japón	7.3	Tsunamigénico
02-03-1933	Sanriku, Japón	8.4	Tsunamigénico
10-09-1943	Tottori, Japón	7.4	
07-12-1944	Tonankai, Japón	8.1	Tsunamigénico
12-01-1945	Mikawa, Japón	7.1	Tsunamigénico
20-12-1946	Nankaido, Japón	8.1	Tsunamigénico
28-06-1948	Fukui, Japón	7.3	
04-03-1952	Hokkaido, Japón	8,1	Tsunamigénico
16-06-1964	Nigata, Japón	7.5	Tsunamigénico
16-01-1995	Kobe, Japón	6.9	Tsunamigénico
25-09-2003	Hokkaido Japón	8.3	Tsunamigénico
11-03-2011	Cerca del este de la la costa de Honshu, Japón	9	Tsunamigénico

2.2. Venezuela

Venezuela se encuentra ubicada en el norte de América del Sur, razón por la cual su geología está afectada directamente por procesos tectónicos originados principalmente por el choque entre las placas Caribe y Sudamericana. Algunos autores señalan que la placa del Caribe se mueve hacia el este con respecto a la placa Sudamericana (Malfait y Dinkelman, 1972; Pindell y Dewey, 1982; Sykes *et. al.*, 1982; entre otros), con velocidad de 20 ± 2 mm/año, subduciendo al oeste de Venezuela, bajo la Placa Sudamericana (Weber *et. al.*, 2001; Van der Hilst, 1990). Otros autores consideran que el contacto entre placas es de colisión oblicua N75°W (Minster y Jordan, 1978) (figura 2.5).

Al oeste de Venezuela el límite entre dichas placas abarca unos 600 km de extensión y comprende un conjunto de bloques tectónicos o microplacas. Dentro

de estos bloques destaca el Bloque de Maracaibo por tener forma triangular (figura 2.5); está limitado al suroeste por la falla transcurrente sinistral Santa Marta-Bucaramanga en Colombia y al este por la falla dextral de Boconó en Venezuela, y está separado del bloque Bonaire en el norte por la falla dextral de Onca-Ancón. Los bloques de Bonaire y Maracaibo están siendo expulsados hacia el NNE con respecto a Sudamérica y están sobrecabalgando al norte en la Placa del Caribe, donde limitan con las Antillas de Sotavento (Audemard *et. al.*, 2005).

El nororiente de Venezuela está ubicado en una zona de interacción entre las placas Sudamericana, Caribe y Atlántica, con extrema complejidad estructural caracterizada por la existencia de un sistema de corrimientos y fallas, asociados con la subducción continental, donde sucesivos cinturones plegados de la Placa Caribe obducen la corteza continental (Russo y Speed, 1992). La actividad sísmica evidencia la subducción con buzamiento noroeste en Trinidad y al este de la costa de Venezuela (Jácome *et. al.*, 2003). En esta región se puede distinguir dos regímenes de actividad sísmica: la actividad cortical asociada con la falla de El Pilar y otros accidentes activos subordinados (Giraldo *et. al.*, 2002), y la sismicidad generada por la subducción de la placa del Atlántico debajo del Caribe (Passalacqua *et. al.*, 1995).

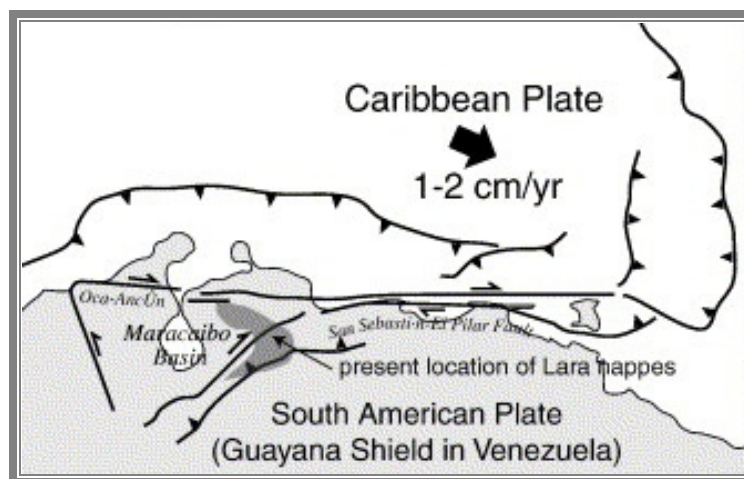


Figura 2.5. Límite de placas tectónicas en la región de Venezuela.

Toda esta interacción tectónica ha originado deformaciones cuaternarias concentradas en cinturones localizados en el norte y en el oeste de Venezuela. El cinturón de deformación activo de fallamientos transcurrentes y plegamientos (figura 2.6), de unos ~100 km de ancho y ~1200 km de largo (Audemard *et. al.*, 2006) corresponde con los sistemas montañosos mayores que se extienden desde la frontera con Colombia, pasando por Venezuela hasta llegar al este de Trinidad. Consecuentemente, estos cinturones de deformación se caracterizan por tener alta sismicidad a lo largo de seis familias de estructuras tectónicas frágiles (Audemard *et. al.*, 2006): (1) fallas dextrales Este-Oeste, (2) fallas dextrales NW que actúan como riedels sintéticos, (3) fallas dextrales ENE a Este que se comportan como fracturas de tipo Paterson, (4) fallas normales NNW, (5) fallas sinestrales submeridianas consideradas como fracturas tipo riedels antitéticos y (6) fallas inversas ENE - sub-paralelas al plegamiento de la misma orientación.

En el norte de Venezuela la transcurrencia es acomodada por las fallas mayores (Oca-Ancón, San Sebastián, El Pilar; E-W dextrales) y sus riedels sintéticos (R: Urumaco, Río Seco, fallas NW-SE de la costa oriental falconiana, Río Guárico, Tácata, Píritu, San Mateo, Urica y San Francisco; entre muchas otras fallas activas), mientras el acortamiento transversal es distribuido entre las fallas inversas (cabalgamientos) de los bordes sur de la Cordillera de la Costa y de la Serranía del Interior; así como en Falcón por un intenso plegamiento y fallamiento inverso de dirección ENE-WSW (Audemard *et. al.*, 2005). Este cinturón de deformación se extiende hacia el suroeste de Venezuela, a lo largo de los Andes de Mérida, donde la falla de Boconó, ubicada aproximadamente en posición axial (NE-SW) en el centro de la cadena, tiene movimiento transcurrente dextral.

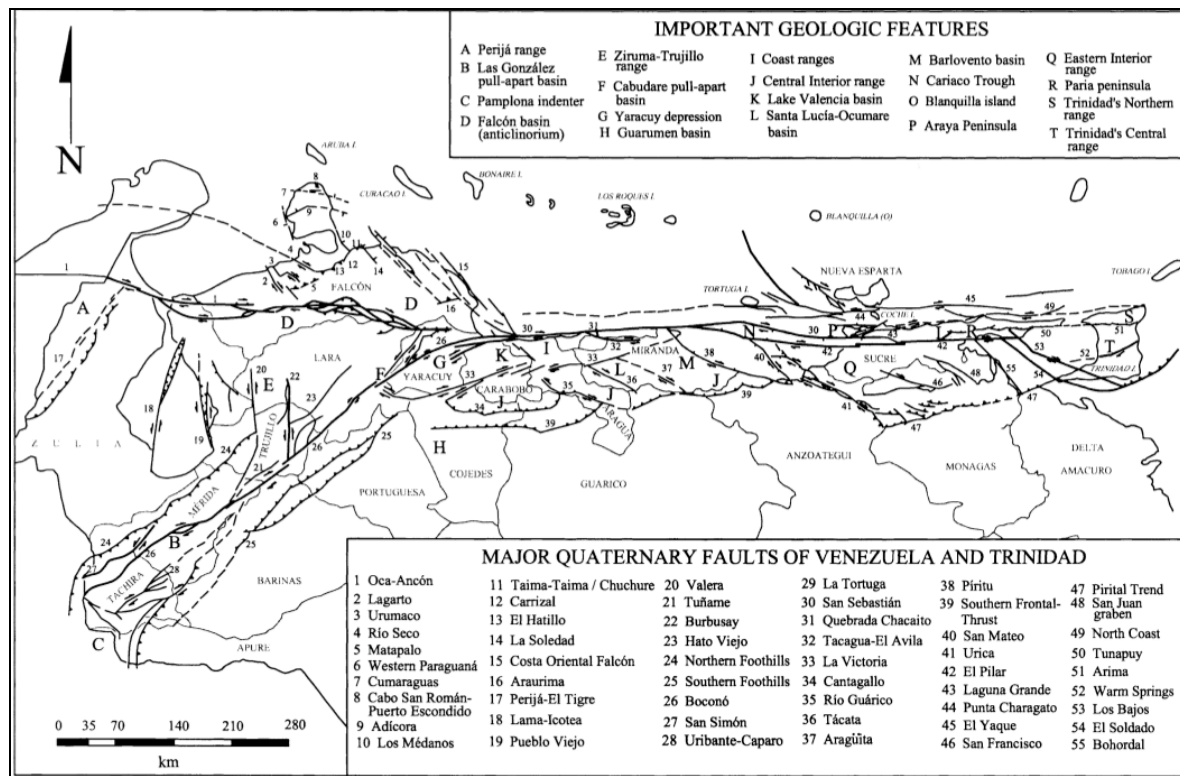


Figura 2.6. Mapa de fallas cuaternarias de Venezuela. (Audemard *et. al.*, 2005).

La actividad sísmica en Venezuela asociada a estos procesos tectónicos está claramente definida a lo largo de los grandes sistemas de fallas (figura 2.7). Está caracterizada por ser una actividad moderada con alta tasa de microsismicidad (eventos de magnitud ≤ 3) y eventos de magnitud intermedia (entre 3 y 5), sin embargo, hay registros históricos de grandes sismos destructores que, afortunadamente para la población, no ocurren frecuentemente (Grases *et. al.*, 1999; Audemard *et. al.*, 2012, entre otros). La sismicidad es mayormente superficial concentrada en los primeros 40 km, exceptuando la sismicidad profunda asociada con la zona de subducción en el noreste de Venezuela, que alcanza cerca de los 120 km de profundidad (Sobiesiak *et. al.*, 2005).

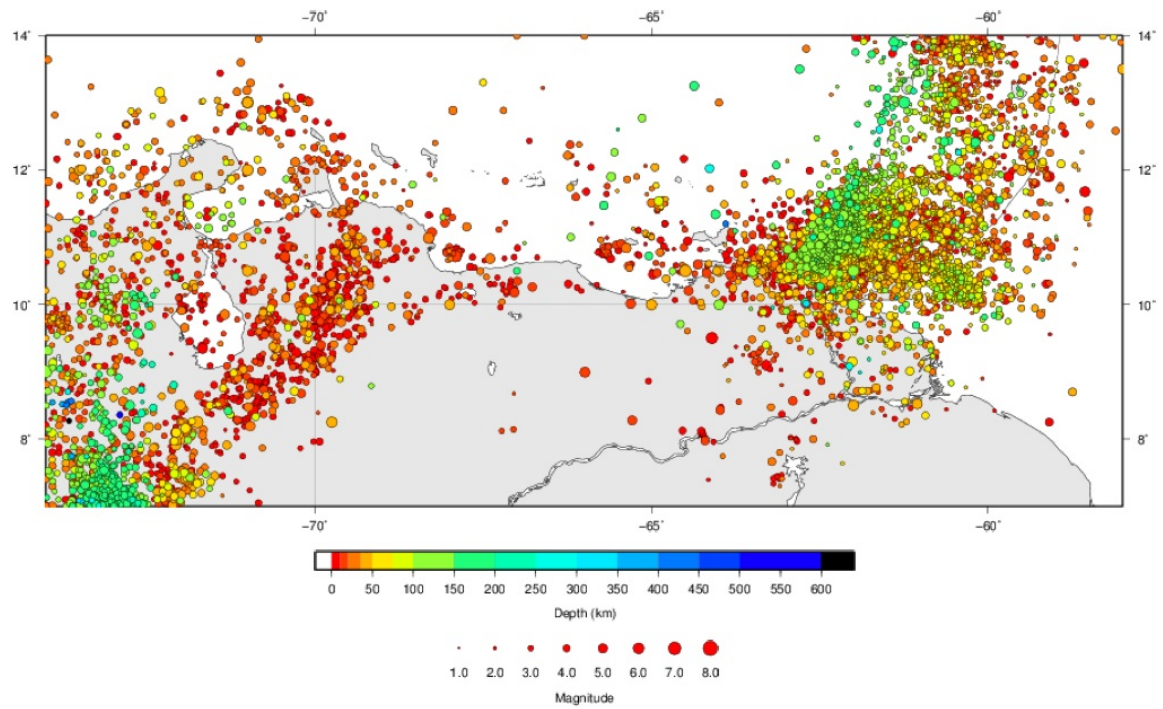


Figura 2.7. Mapa de sismicidad ($M>3$) en Venezuela (1910-2012).

Los sismos más significativos ocurridos en Venezuela que se conocen hasta la fecha, considerados no sólo por sus grandes magnitudes sino también por las pérdidas cuantiosas que han causado, son listados en la siguiente tabla:

Tabla 2.2. Sismos más significativos en Venezuela desde 1530 hasta la actualidad.

Fecha	Localidad	Magnitud	Observaciones
01-09-1530	Cumaná	7.3	Tsunamigénico
03-02-1610	La Grita	7.6	
11-06-1641	Caracas, La Guaira	6.2	
16-01-1674	Gibraltar, Trujillo	7.4	
21-10-1766	Cumaná, Trinidad	7.5	
26-03-1812	La Guaira	7.1	
26-03-1812	Barquisimeto	6.0	
26-03-1812	Mérida	7.4	
15-07-1853	Cumaná	7.3	Tsunamigénico
18-05-1875	Cúcuta (límite Colombia-Venezuela)	7.4	
12-04-1878	Cúa	6.3	
28-04-1894	Santa cruz de Mora	7.6	
29-10-1900	Curiepe	7.8	Tsunamigénico
17-01-1929	Cumaná	6.9	Tsunamigénico
14-03-1932	La Grita	6.8	
03-08-1950	El Tocuyo	6.6	
29-07-1967	Caracas, La Guaira	6.5	
09-07-1997	Cariaco, Cumaná	6.9	Tsunamigénico
12-09-2009	Morón	6.4	

CAPÍTULO 3. MÉTODO

3.1 Tiempos de ocurrencia como proceso puntual

Consideramos la ocurrencia de sismos en un área de estudio como un *proceso puntual en el tiempo*, representado por sus tiempos de ocurrencia $t_E = \{t_j; j = 1:K\}$, donde K es el número de sismos observados.

Si la serie de sismos corresponde a un proceso periódico, cuyo *período de recurrencia* es τ , entonces el tiempo de ocurrencia de cada sismo puede reescribirse como:

$$t_j = t_0 + j\tau, \quad (3.1)$$

donde t_0 es el tiempo inicial al que está referenciada la secuencia y el valor de τ se puede calcular como $\tau_j = t_j - t_{j-1} = \tau$.

Sin embargo, cuando se trata de un proceso *semiperiódico*, el tiempo de ocurrencia de cada sismo es:

$$t_j = t_0 + j\tau + \theta_j, \quad (3.2)$$

donde θ_j es una variación aleatoria cuyas magnitudes deben ser suficientemente pequeñas, con respecto al valor de τ , para poder considerar comportamiento semiperiódico de la secuencia. El período entre eventos sucesivos es:

$$\tau_j = t_j - t_{j-1} = \tau + \theta_j - \theta_{j-1}, \quad (3.3)$$

(los valores de θ_j pueden ser positivos o negativos) y el valor de τ puede ser estimado a partir de la media y la desviación estándar de τ_j .

Puede ocurrir que no todos los sismos que sucedieron dentro de un intervalo de tiempo T , forman parte de un mismo proceso semiperiódico, es decir que en la serie de tiempo, además de haber K sismos que conforman una secuencia, también puede haber R sismos independientes que no forman parte de la secuencia y que además contaminan la serie dificultando la identificación de los K eventos semiperiódicos.

El tiempo de ocurrencia de cada evento es ahora denotado como $t_E = \{t_k ; k = 1:N\}$, en donde $N = K + R$ y desafortunadamente no es obvia la identificación de los K eventos de la secuencia semiperiódica y de los R eventos restantes.

Aún más complicado puede ser cuando se tiene dos o más secuencias semiperiódicas en la serie de tiempo además de los R sismos restantes fuera de las secuencias. Así pues, la serie de tiempo estaría conformada por un total de N sismos, en cuyo caso $N = K_1 + K_2 + \dots + R$.

Para estos casos, el *análisis de Fourier* es una herramienta matemática muy útil que permite reconocer periodicidades o semiperiodicidades en una serie de tiempo.

El análisis mediante la Transformada Digital (Discreta) de Fourier (DFT) tiene el problema de que sólo reconoce submúltiplos del período fundamental T , el tiempo total de observación, y los periodos de las secuencias buscadas no necesariamente son múltiplos de T y no se puede escoger T a priori pues se desconoce los periodos por buscar. Este problema es particularmente grave para series pequeñas.

Para solucionar este problema, en vez de utilizar la DTF, conviene utilizar la Transformada Analítica de Fourier (FT), la cual permite identificar componentes en cualquier frecuencia. Representamos nuestra serie como la función

$$f(t) = \sum_{j=j_1}^{j_2} \delta(t - t_j) \quad (3.4)$$

Como la FT se aplica a funciones con dominio infinito, consideramos a $f(t)$ como si fuese una sección de una función infinita $f_{\infty}(t)$:

$$f_{\infty}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \delta(t - t_j) \quad (3.5)$$

La sección finita $f(t)$ se obtiene multiplicando la función infinita $f_{\infty}(t)$ por una función cajón:

$$f(t) = \sum_{j=j_1}^{j_2} \delta(t - t_j) = f_{\infty}(t) \Pi\left[\frac{t - t_c}{T}\right], \quad (3.6)$$

en donde $\Pi(t)$ es la función cajón, $t_c = (t_f + t_0)/2$, los tiempos t_0 y t_f son los tiempos inicial y final del intervalo de observación, respectivamente, $T = t_f - t_0$. De esta manera, la FT de la función $f(t)$ queda expresada como:

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi t s} dt = \sum_{j=j_1}^{j_2} e^{-i2\pi t_j s} = F_{\infty}(s) * T \text{sinc}(T s) e^{-i2\pi t_c s}, \quad (3.7)$$

y $F(s)$ puede ser evaluada en cualquier valor de s . A pesar de que $F_{\infty}(s)$ es convolucionada con la función sinc, sus componentes importantes pueden ser identificadas correctamente.

Para una secuencia estrictamente periódica:

$$f(t) = \text{III}(t/\tau) \quad \supset \quad F(s) = \tau \text{III}(\tau s), \quad (3.8)$$

donde $\text{III}(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \delta(x - j)$; $j \in \mathbb{Z}$, es la función Shah o peine de Dirac, es decir, un peine de impulsos equiespaciados (figura 3.1). Pero en el caso de una secuencia

semiperiódica, el espectro será distinto a la función Shah dependiendo de los valores de θ_j , además de que la presencia de R eventos no pertenecientes a la secuencia también contribuyen a que $F(s)$ sea diferente al de un espectro estrictamente periódico en donde no hayan eventos ajenos a la secuencia.

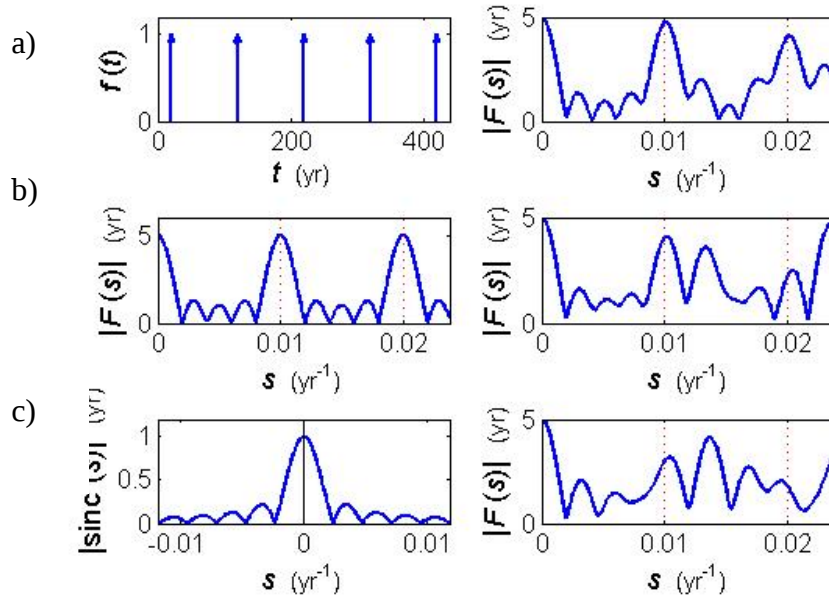


Figura 3.1. Las tres gráficas de la izquierda muestran: a) Ejemplo de una secuencia periódica con $\tau = 100$ años, truncada con $T = 440$ años; b) Su Transformada de Fourier analítica; c) Función Sinc de la convolución. Las tres gráficas de derecha muestran espectros de la secuencia con variaciones aleatorias θ_j : a) con desviación estándar $\sigma = 7.24$ años; b) con desviación estándar $\sigma = 16.99$ años; c) Con desviación estándar $\sigma = 23.55$ años. Las líneas negras punteadas, indican las frecuencias $1/\tau$ y su primer armónico.

Cuando la periodicidad tiene variaciones aleatorias relativamente pequeñas, ocurren grandes desfases para altas frecuencias y pequeños desfases para bajas frecuencias, por lo que los períodos de interés, comparables con T , se pueden reconocer en la mayoría de los casos. Los eventos ajenos a la secuencia causan desfases para cualquier frecuencia, pero por no ser periódicos, la FT podría ser capaz de identificar, aunque sea aproximadamente, las semiperiodicidades de las secuencias.

3.2 Análisis espectral

Para describir el método para identificación de secuencias semiperiódicas utilizado, se presenta como ejemplo una serie sintética (figura 3.2) con eventos entre los tiempos $t_0 = 10$ años y $t_f = 310$ años, compuesta de dos secuencias periódicas: una de 5 eventos, período $\tau^{(1)} = 75$ años y variación normal aleatoria con desviación estándar $\sigma^{(1)} = 4.0$ años, y la otra secuencia con 3 eventos, período $\tau^{(2)} = 120$ años y variación normal aleatoria con desviación estándar $\sigma^{(2)} = 3.5$ años. Además incluye dos eventos ajenos a las secuencias con tiempos de ocurrencia aleatorios.

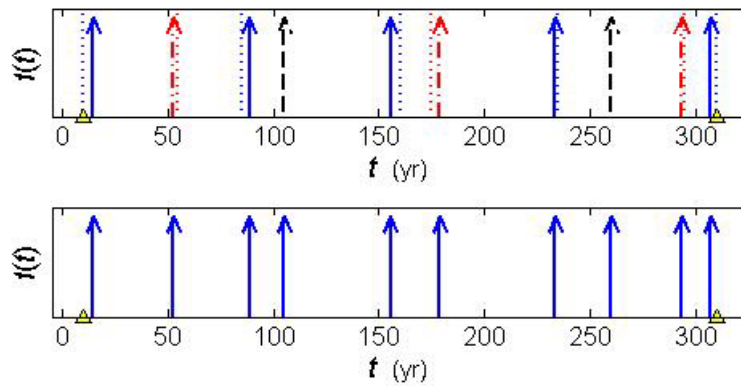


Figura 3.2. Serie sintética construida para ejemplificar la aplicación del método de identificación de secuencias. La gráfica superior muestra una secuencia con flechas sólidas azules y otra secuencia con flechas rojas de líneas discontinuas. Las flechas negras segmentadas indican los eventos ajenos a las secuencias. Las líneas punteadas indican el tiempo de ocurrencia de la flecha más cercana en el caso en que la secuencia respectiva fuese periódica. Los triángulos señalan los t_0 y t_f . La gráfica inferior muestra la serie sin diferenciación de los eventos, lo que permite observar la dificultad para distinguir algún tipo de periodicidad en la serie.

Como se observa en la figura 3.2, hay un total de $N=10$ eventos, dentro de un intervalo de tiempo establecido entre $t_0 = -5$ años y $t_f = 320$ años, correspondientes al inicio y final del catálogo sísmico, respectivamente. Con estos datos se obtiene el valor de la media del tiempo inter-eventos y su desviación estándar. Se calcula la FT analítica como la suma de exponenciales de la

ecuación (3.7) y se grafica su valor absoluto, indicando en el espectro, con guías aproximadas, la frecuencia máxima $s_{\max}$ y mínima $s_{\min}$ aceptables para la semiperiodicidad.

Se busca tener al menos tres eventos correspondientes a un período dado; por lo tanto, la mínima frecuencia que debe considerarse es $s_{\min} \approx 2/T$. Por otra parte, el menor período medible no puede ser mucho más pequeño que el tiempo inter-eventos más largo ($\Delta t_{\max}$), así que la frecuencia más alta que puede ser observada

$$\text{es } s_{\max} \approx \frac{1}{0.8 * \Delta t_{\max}} = 1.25 / \Delta t_{\max}.$$

La gráfica del espectro abarca un rango que va desde $s_1 = 0.5s_{\min}$ hasta $s_2 = 2.2s_{\max}$, de forma tal que se puedan identificar gráficamente períodos largos, frecuencias un poco más altas que $1/\Delta t_{\max}$ y posibles réplicas de los picos espectrales.

Para determinar el posible período de una secuencia, se escoge algún pico espectral localizado entre $s_{\min}$ y $s_{\max}$ o, por lo menos, bastante cerca de este intervalo. El valor de la frecuencia s_p correspondiente al pico seleccionado (figura 3.3 superior), será utilizada para construir el peine $c(t)$ (figura 3.3c), con K dientes separados por $\tau_p = 1/s_p$ y referenciado en un tiempo inicial $t_{0p} = -\phi_p / 2\pi s_p$, donde $\phi_p = \arctan\{\text{Im } F(s_p) / \text{Re } F(s_p)\}$ es la fase espectral correspondiente a s_p .

Cada evento cuyo tiempo sea el más cercano a un diente del peine construido, es identificado para poder determinar cuáles eventos pertenecen a la secuencia asociada al peine. Si para algún diente no se encuentra algún evento cuya cercanía sea menor o igual a un tiempo equivalente a $0.25 * \tau_p$, entonces el τ_p

obtenido es rechazado y se continúa probando con la construcción de otro peine seleccionando otro pico espectral.

Al hacer las pruebas para buscar el pico espectral correspondiente a la s_p que genere el peine adecuado, es recomendable empezar probando desde los picos de altas frecuencias hasta los picos de frecuencias medias, puesto que cuando se tienen muchos eventos, hay mayor posibilidad de encontrar picos espectrales de baja frecuencia engañosos que, a pesar de generar peines bien ajustados a los eventos, no son verdaderos.

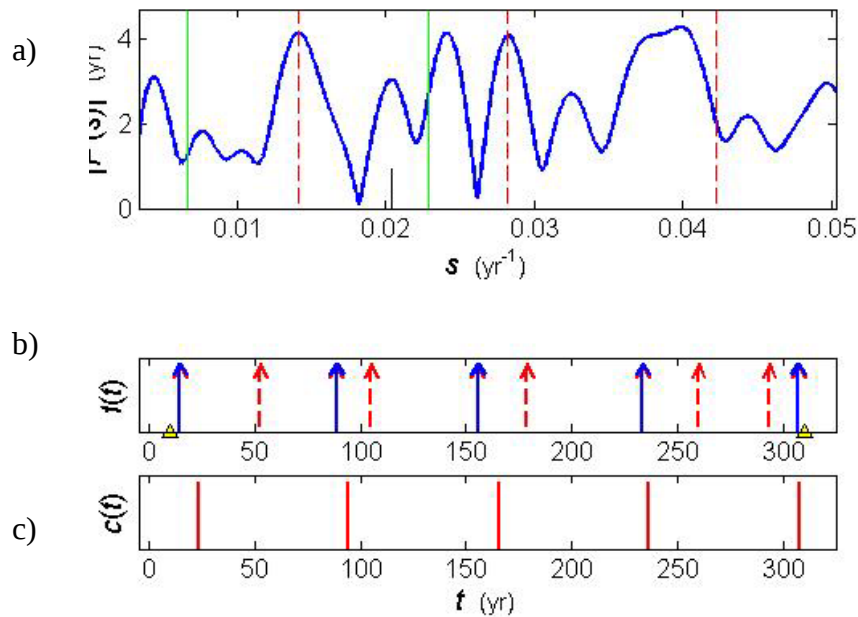


Figura 3.3. a) Espectro de Fourier de las series mostradas en la figura 3.2. Las líneas verdes verticales referencian las frecuencias $s_{\min}$ y $s_{\max}$, las líneas rojas segmentadas indican la frecuencia seleccionada $s_p = 0.0141$ años⁻¹ y dos de sus múltiplos, la línea negra corta señala el al pico que fue probado anteriormente y rechazado como posible solución. b) Se muestra todos los eventos de los cuales, los que están resaltados con flechas azules, son los eventos identificados como los correspondientes a la secuencia de período $\tau_p = 71.09$ años. c) Peine construido al cuál se asocia la secuencia mostrada en (b).

La bondad de ajuste es calculada a partir de la diferencia entre los tiempos de cada diente t_i^c y los tiempos de ocurrencia de los eventos t_i correspondientes a cada diente, utilizando la expresión:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (t_i^c - t_i)^2}{K - 2}} = \sigma, \quad (3.9)$$

en la cual se considera dos grados de libertad debido a que los datos han sido utilizados para estimar dos parámetros: el periodo y el tiempo origen. Este error estándar es también denotado como σ , ya que se supone que la desviación de la periodicidad tiene distribución normal, en cuyo caso este error es el mejor estimador para la desviación estándar de la distribución.

Una vez que se obtiene el peine ajustado adecuadamente, se busca refinar la identificación de los eventos de la secuencia, repitiendo de nuevo el mismo proceso, pero esta vez, el espectro de frecuencias es obtenido eliminando de la serie aquellos eventos cuyos tiempos estén a una distancia mayor que $\tau_p / 4$ del diente más cercano, es decir, se elimina los eventos que definitivamente no tienen posibilidad de pertenecer a la secuencia semiperiódica hallada. Se espera que el nuevo espectro obtenido muestre un comportamiento periódico más claro.

En la continuación del proceso, se selecciona otra vez un pico espectral y se construye un peine con la frecuencia del pico para identificar los eventos cercanos al peine (figura 3.4), ahora reduciendo el criterio de aceptación a una distancia máxima de $\tau_p / 4.5$ del evento al diente del peine.

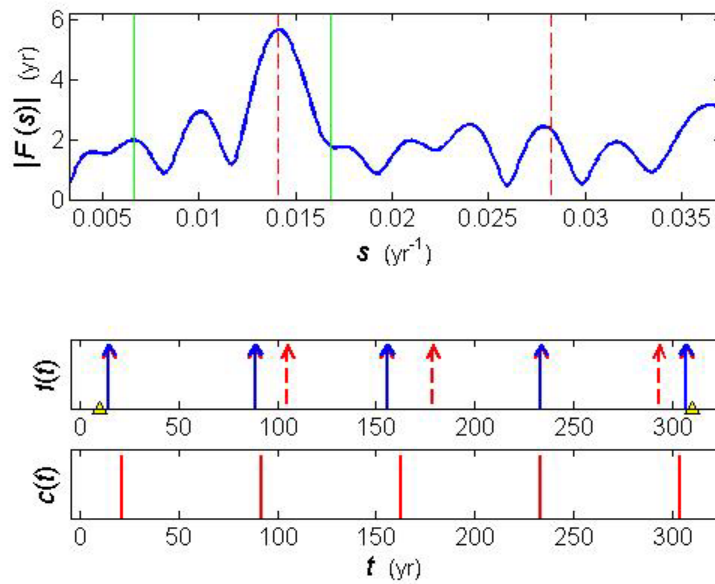


Figura 3.4. Segundo pase luego de eliminar los eventos más lejanos. El nuevo período identificado es $\tau_p = 70.75$ años con un error estándar $\sigma = 6.10$ años. La simbología es igual a la figura 3.3.

Para continuar refinando el cálculo, se realiza un tercer pase, pero esta vez, el espectro de frecuencias es obtenido eliminando de la serie aquellos eventos cuyos tiempos estén a una distancia mayor que $\tau_p / 4.5$ del diente más cercano del peine obtenido anteriormente. Se selecciona otra vez un pico espectral (figura 5.35) y se construye un peine con la frecuencia del pico para identificar los eventos cercanos al peine, ahora reduciendo el criterio de aceptación a una distancia máxima de $\tau_p / 5$ del evento al diente del peine.

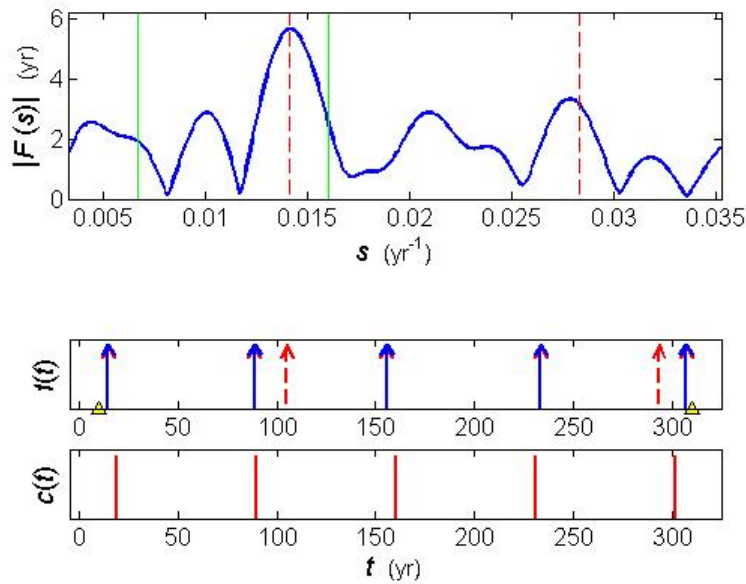


Figura 3.5. Tercer pase. El período identificado es $\tau_p = 70.76$ años y el error estándar es $\sigma = 2.610$. La simbología es igual a la figura 3.3.

Por último, se realiza un cuarto refinamiento utilizando únicamente los eventos de la serie que se identificaron como parte de la secuencia en el tercer pase. Usualmente, en este nuevo espectro los picos se ven claramente definidos. El peine definitivo es construido en este caso, utilizando una distancia máxima de aceptación de $\tau_p/6$ de cada evento al diente más cercano (figura 3.6). La secuencia resultante de 5 eventos se ajusta muy bien a una de las secuencias utilizadas al construir la serie sintética, por lo que hasta ahora el método resulta bastante eficiente.

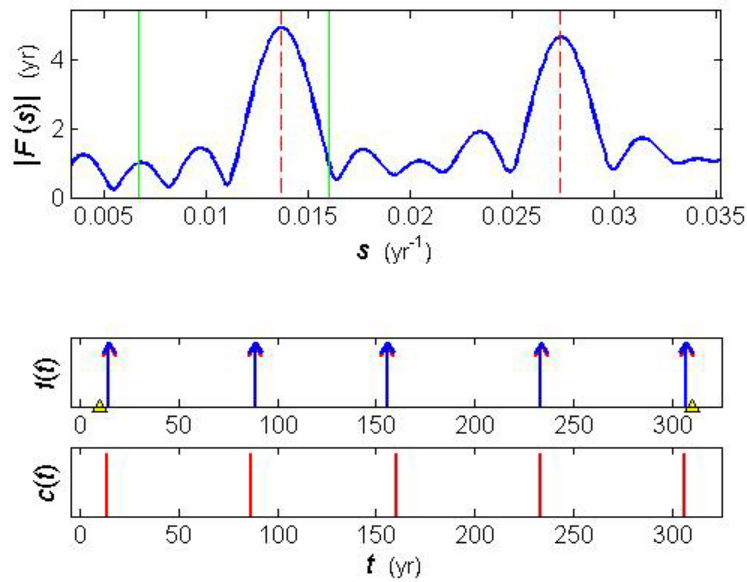


Figura 3.6. Cuarto y último pase utilizando únicamente los eventos pertenecientes a la secuencia encontrada en el pase anterior. El período final identificado es $\tau_p = 73.17$ años y el error estándar es $\sigma = 2.91$ años. La simbología es igual a la figura 3.3.

Todos aquellos eventos que quedaron excluidos de la secuencia encontrada, son utilizados para realizar nuevamente el mismo análisis para buscar otras posibles secuencias existentes. En la figura (3.7) se muestra el primer pase del siguiente análisis, en donde el resultado final de la secuencia encontrada es de período $\tau_p = 120.97$ años y el error estándar es $\sigma = 4.95$. Esta segunda secuencia de 4 eventos, igualmente está muy bien ajustada a la secuencia inicialmente propuesta al construir los datos sintéticos.

El análisis termina en el momento en que no se encuentren más secuencias.

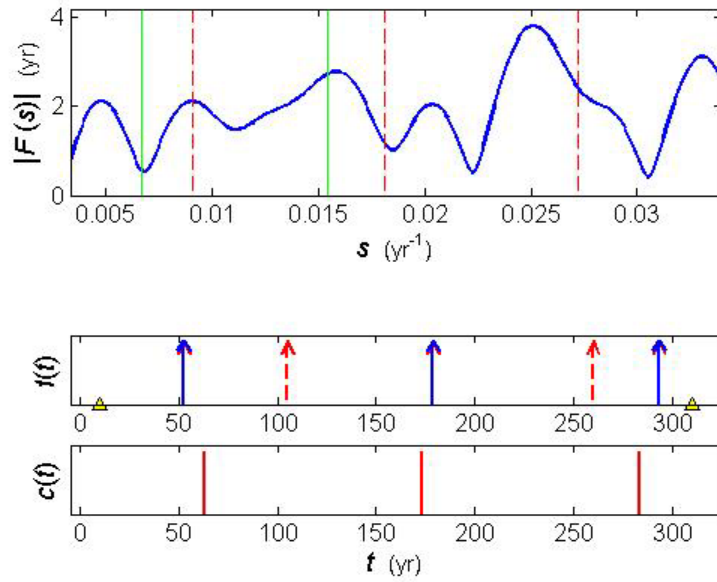


Figura 3.7. Primer pase de la identificación de la segunda secuencia de los datos sintéticos. El período identificado es de $\tau_p = 110.21$ años y el error estándar es $\sigma = 15.50$ años. La simbología es igual a la figura 3.3.

Repetidas pruebas con datos sintéticos, en donde se conoce a priori cuáles eventos pertenecen a las secuencias y cuáles no, muestran que aunque la FT es capaz de identificar muy bien las secuencias semi-periódicas de una serie de eventos, la identificación correcta no sólo depende de qué tanto esté alejada la secuencia de ser estrictamente periódica y de la cantidad de eventos extraños a la secuencia, sino que también depende de la combinación del tiempo inicial de la serie, del período y de los tiempos en que hayan ocurrido los eventos ajenos a la secuencia. En este sentido, puede haber series de eventos cuya combinación particular, cause una identificación errónea o imposible, por lo que es muy importante tomar en cuenta esta salvedad cuando se aplica el método con datos de sismicidad real.

3.3 Significatividad

Una primera y rápida evaluación de las secuencias identificadas, es hecha tomando en cuenta intervalos $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ exponencialmente distribuidos, lo cual es una propiedad de la sismicidad con distribución poissoniana. Para una sismicidad poissoniana, la relación $\rho = E[\Delta t] / \text{StDev}[\Delta t] \approx 1$. La desviación del valor ρ con respecto a 1, será la medida para caracterizar qué tanto se aleja la secuencia identificada de un proceso poissoniano sin memoria. En el caso del ejemplo utilizado con datos sintéticos, la primera secuencia identificada tiene como resultado $\rho = 15.635$.

Por otra parte, la significatividad de una secuencia identificada puede evaluarse estimando la probabilidad de que el resultado obtenido haya ocurrido al azar, es decir que una secuencia de sismos que tenga alta probabilidad de ser aleatoria, no es buen fundamento para cualquier tipo de pronóstico.

Par el cálculo de la probabilidad, se toma en cuenta que hay N eventos ocurridos dentro de un intervalo de tiempo T , de los cuales K eventos corresponden a una secuencia identificada, con desviación estándar σ con respecto al peine. El tiempo total es dividido en M intervalos equiprobables con longitud $\varepsilon = 6\sigma$, ya que 3 desviaciones estándar de cada lado de un diente del peine proporciona una confianza de 0.9973, la cual es suficiente para este caso (podría utilizarse algún otro nivel de confianza).

Dentro de un intervalo T , un peine de K dientes puede tener período τ entre $\tau_1 = (T / K) + \delta$ (donde δ es un valor muy pequeño ~ 0.00001 años), el cuál abarca $M_1 = \text{Fix}[(K - 1)\tau_1 / \varepsilon]$ intervalos, donde $\text{Fix}(x)$ indica el entero inmediatamente $\leq x$, y $\tau_2 = T / (K - 1)$, que abarca $M_2 = \text{Ceil}[(K - 1)\tau_2 / \varepsilon] = M$ intervalos, donde $\text{Ceil}(x)$

indica el entero inmediatamente $\geq x$. El primer evento de una secuencia aceptable puede estar en cualquiera de los $M_f = M - M_1 + 1$ intervalos. La probabilidad de tener al menos un evento en un intervalo dado es $p_1 = 1 - \exp(-\lambda \varepsilon)$, donde $\lambda = N/T$ (Parzen, 1960; Daley y Vere-Jones, 2002). Si el primer evento está en el i -ésimo intervalo, la probabilidad de tener un evento final admisible es $p_{2,i} = p_1 \{1 - \exp[-\lambda_2 (M_f + 1 - i) \varepsilon]\}$, donde $\lambda_2 = (N - 1)/(T - \varepsilon)$, debido a que ya utilizamos un evento y un intervalo. Estas probabilidades alternativas son combinadas iterativamente como $p_{2,j} = p_{2,j} + p_{2,j-1} - p_{2,j}p_{2,j-1}$, y la probabilidad resultante estará denotada por $p_2 \equiv p_{2,M_f}$.

Cada evento intermedio tiene que caer en intervalos específicos, así que sus probabilidades están dadas por $p_{3,k} = 1 - \exp(-\lambda_k \varepsilon)$, donde $k = 3, \dots, K$. La probabilidad final de ocurrencia al azar está dada por $P_\phi = p_2 \prod_{k=3}^K p_{3,k}$.

La figura 3.8 muestra cómo P_ϕ varía con σ/T y K , para diferentes valores de N . Incluso, P_ϕ puede tener un valor significativo para valores pequeños de σ en secuencias de sólo 3 eventos.

Dado que P_ϕ es la probabilidad de que la secuencia observada haya ocurrido por azar, entonces un estimado de la probabilidad de que la secuencia semiperiódica y su peine asociado no hayan ocurrido al azar sería:

$$P_c = 1 - P_\phi. \quad (3.10)$$

Por lo tanto, P_c es una medida de la probabilidad de que el próximo diente del peine, número $K+1$, indicará el tiempo de ocurrencia del próximo sismo (futuro) en la secuencia.

En el caso en que $P_c = 1$, esto significaría una certeza absoluta de que el próximo evento de la secuencia ocurrirá dentro del intervalo de incertidumbre alrededor del próximo diente del peine. Pero si $P_c < 1$, existe la posibilidad de que el pronóstico del futuro evento resulte ser una falsa alarma.

En la primera secuencia del ejemplo, para $T = 300$ años, $N = 10$, $K = 5$ y $\sigma = 2.91$, las probabilidades son $P_\phi = 0.0538$ y $P_c = 0.9462$.

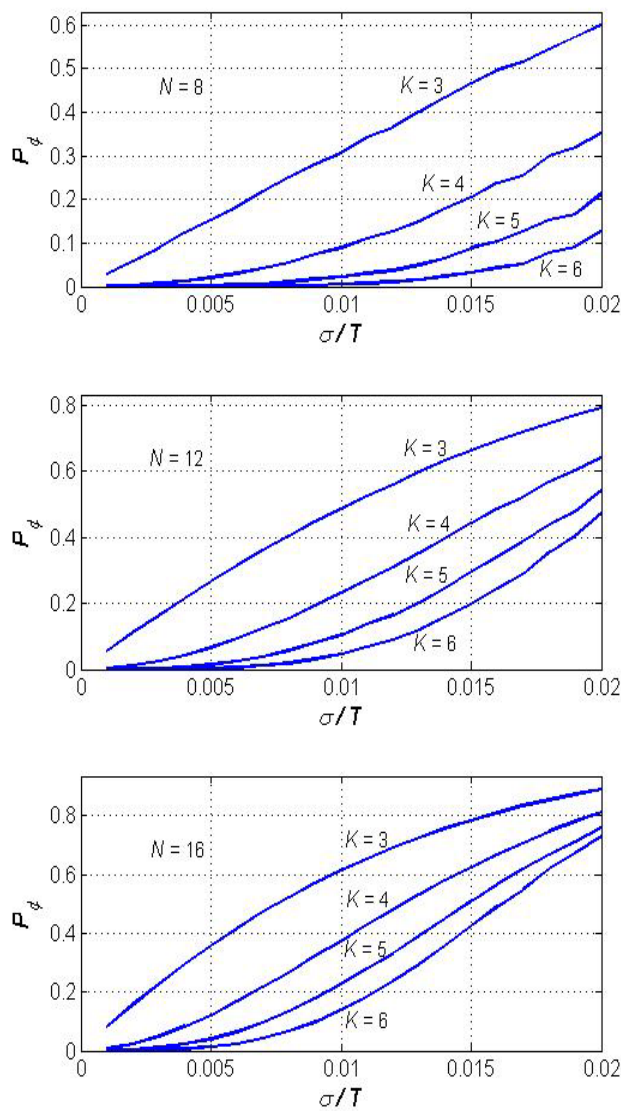


Figura 3.8 Dependencia de P_ϕ sobre σ/T y K para tres valores típicos de N .

3.4 Pronóstico

El objetivo de identificar secuencias semiperiódicas de sismos, es poder pronosticar la ocurrencia futura de eventos similares. A partir de la identificación de un peine dado, con período τ_p , tiempo inicial t_{0p} , K dientes (cada uno asociado a un evento observado) y desviación estándar σ , el tiempo del próximo evento a ocurrir es expresado como:

$$t_f = t_{0p} + K \tau_p \pm q \sigma, \quad (3.11)$$

donde q es un factor que determina el nivel de confianza para el cálculo de incertidumbre ($\varepsilon = 2q\sigma$).

Utilizando los datos sintéticos inicialmente mostrados, para un nivel de confianza del 95.45% con $q=2$, el tiempo del próximo evento a ocurrir en la secuencia observada de 5 eventos sería $t_f = 379.53 \pm 5.82$ años.

Considerando que una gran cantidad de procesos y factores están involucrados en la generación del sismo, la distribución de densidad de probabilidad del tiempo de ocurrencia de dicho evento se puede considerar, con fundamento en el Teorema del Límite Central, una distribución normal, centrada en t_f , con desviación estándar σ , truncada en el tiempo del evento sucedido más reciente y normalizada a tener área bajo la curva igual a P_c . El método de pronóstico no depende de que la distribución sea normal, así que en el caso en que se considere más apropiada otro tipo de distribución, también es posible utilizarla.

Otra forma de medir qué tan significativos son los resultados, es calcular las ganancias de la probabilidad y la información (Vere-Jones, 1998; Harte y Vere-Jones, 2005) que dan un intervalo dado $(t_f - q \sigma, t_f + q \sigma)$ alrededor del tiempo

pronosticado, comparados con la probabilidad calculada mediante el modelo poissoniano, para la ocurrencia de al menos un sismo durante dicho intervalo.

Para dicho intervalo pronosticado, la probabilidad de que ocurra un evento que corresponda al siguiente diente del peine es $P_{cq} = P_c \text{erf}(q)$, la probabilidad de Poisson de que ocurra al menos un evento cualquiera es $\pi_{1+} = 1 - e^{-\lambda 2q\sigma}$ con $\lambda = N/T$ y la probabilidad de Poisson de que ocurra un evento no perteneciente al peine es $\pi_{1+}^* = 1 - e^{-\lambda^* 2q\sigma}$ con $\lambda^* = (N - K)/T$; así que la probabilidad de tener un evento que continúe con la secuencia del peine y/o tener un evento que no sea parte del peine es $P_{cq} + \pi_{1+}^* - P_{cq}\pi_{1+}^*$, así que la ganancia de la probabilidad es:

$$P_G = \frac{P_{cq} + \pi_{1+}^* - P_{cq}\pi_{1+}^*}{\pi_{1+}} \quad (3.12)$$

La ganancia de la información es la diferencia entre la *autoinformación* (Fano, 1961) o *entropía de la información* (Harte y Vere-Jones, 2005) del pronóstico del peine y la probabilidad tradicional, expresado en bits:

$$I_G = \log_2(P_G), \quad (3.13)$$

En el ejemplo con datos sintéticos, con $N=10$, $T=300$ años, $K=5$, $\tau = 73.17$ años, $\sigma = 2.908$ años, la probabilidad del peine de la primera secuencia es $P_c = 0.998$; la tasas de ocurrencias son $\lambda = 0.333 \text{ años}^{-1}$ y $\lambda^* = 0.0.167 \text{ años}^{-1}$. Los valores de probabilidades del pronóstico y de las ganancias de probabilidad y de información se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Probabilidades y Ganancia de la probabilidad y de información.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.6816	0.1762	0.0924	4.0352	2.0126
2	0.9530	0.3214	0.1762	2.9912	1.5807
3	0.9958	0.4410	0.2523	2.2606	1.1767

A continuación, la figura 3.9 (arriba) muestra la función de densidad de probabilidad (pdf) del pronóstico $p(t)$, junto con la identificación de la secuencia, el peine construido $c(t)$ y el rango de incertidumbre $\pm 2\sigma$ (con $q=2$).

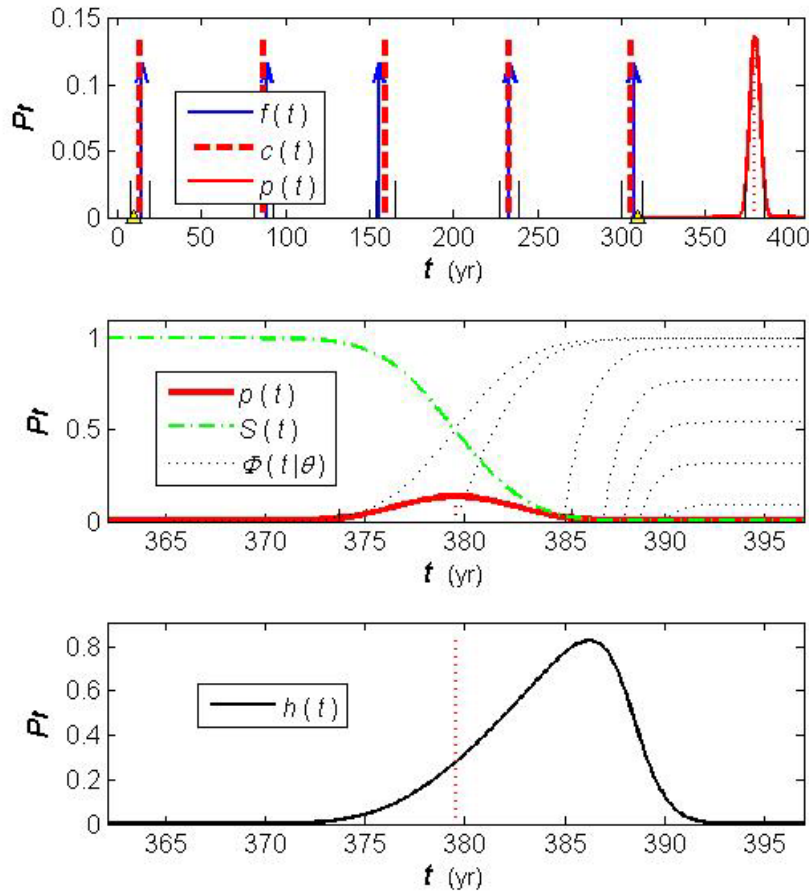


Figura 3.9. Ejemplo del pronóstico basado en la identificación de la secuencia presentada en la figura 3.8; los sismos se muestran en flechas azules y los dientes del peine en líneas rojas punteadas (la altura de las líneas no tienen significado); la función de densidad de probabilidad del pronóstico $p(t)$ en rojo, está normalizada en P_c , la función de supervivencia $S(t)$, la función de tiempo de vida futura del pronóstico $\Phi(t|\theta)$ en negro punteado y la función de peligro $h(t)$ en negro.

Para visualizar mejor las consecuencias del pronóstico, también se presentan otras funciones, tal como se muestran en la figura 3.9. La función de supervivencia

$$S(t) = \Pr(x > t) = 1 - P(t) = \int_t^{\infty} p(x) dx, \quad (3.14)$$

donde x es el tiempo de ocurrencia, $P(t)$ es la acumulada de $p(t)$ y representa la probabilidad de que el sismo no haya ocurrido todavía en un tiempo t . Para $P_c < 1$, $S(t)$ no tiende a cero, sino a P_ϕ , que sería la probabilidad de una falsa alarma.

También se muestra la función de tiempo de vida futura:

$$\Phi(t | \gamma) = \Pr(x \leq t | x > \gamma) = \frac{\Pr(\gamma < x \leq t)}{\Pr(x > \gamma)} = \frac{P(t) - P(\gamma)}{S(\gamma)} \quad (3.15)$$

que representa la probabilidad de ocurrencia para tiempos posteriores a un tiempo γ , dado que el sismo no ha ocurrido todavía para ese tiempo. Las líneas punteadas muestran $\Phi(t | \gamma)$ para varios γ ; para valores de γ antes de la parte significativa de $p(t)$, la línea de tiempo de vida futura crece más rápidamente a medida que γ aumenta, alcanzando valores de ~ 1 ; para tiempos mayores de supervivencia y $P_c = 1$ continúa el mismo comportamiento, pero para $P_c < 1$ el máximo valor decrece y tiende a cero para tiempos de supervivencia mayores a la parte significativa de $p(t)$.

La figura 3.9 muestra la función de peligro:

$$h(t) dt = \Pr(t < x \leq t + dt | x > t), \quad (3.16)$$

que describe cómo es renormalizada $p(t)$, dado que el evento no ha ocurrido en el tiempo t :

$$h(t) = \frac{p(t)}{1 - P(t)} = \frac{p(t)}{S(t)} \quad (3.17)$$

Ya que para $P_c < 1$ la función de supervivencia $S(t)$ no tiende a cero, la función de peligro no aumenta indefinidamente, sino que alcanza su máximo en un tiempo posterior al máximo de $p(t)$ y luego decrece.

CAPÍTULO 3. MÉTODO

3.1 Tiempos de ocurrencia como proceso puntual

Consideramos la ocurrencia de sismos en un área de estudio como un *proceso puntual en el tiempo*, representado por sus tiempos de ocurrencia $t_E = \{t_j; j = 1:K\}$, donde K es el número de sismos observados.

Si la serie de sismos corresponde a un proceso periódico, cuyo *período de recurrencia* es τ , entonces el tiempo de ocurrencia de cada sismo puede reescribirse como:

$$t_j = t_0 + j\tau, \quad (3.1)$$

donde t_0 es el tiempo inicial al que está referenciada la secuencia y el valor de τ se puede calcular como $\tau_j = t_j - t_{j-1} = \tau$.

Sin embargo, cuando se trata de un proceso *semiperiódico*, el tiempo de ocurrencia de cada sismo es:

$$t_j = t_0 + j\tau + \theta_j, \quad (3.2)$$

donde θ_j es una variación aleatoria cuyas magnitudes deben ser suficientemente pequeñas, con respecto al valor de τ , para poder considerar comportamiento semiperiódico de la secuencia. El período entre eventos sucesivos es:

$$\tau_j = t_j - t_{j-1} = \tau + \theta_j - \theta_{j-1}, \quad (3.3)$$

(los valores de θ_j pueden ser positivos o negativos) y el valor de τ puede ser estimado a partir de la media y la desviación estándar de τ_j .

Puede ocurrir que no todos los sismos que sucedieron dentro de un intervalo de tiempo T , forman parte de un mismo proceso semiperiódico, es decir que en la serie de tiempo, además de haber K sismos que conforman una secuencia, también puede haber R sismos independientes que no forman parte de la secuencia y que además contaminan la serie dificultando la identificación de los K eventos semiperiódicos.

El tiempo de ocurrencia de cada evento es ahora denotado como $t_E = \{t_k ; k = 1:N\}$, en donde $N = K + R$ y desafortunadamente no es obvia la identificación de los K eventos de la secuencia semiperiódica y de los R eventos restantes.

Aún más complicado puede ser cuando se tiene dos o más secuencias semiperiódicas en la serie de tiempo además de los R sismos restantes fuera de las secuencias. Así pues, la serie de tiempo estaría conformada por un total de N sismos, en cuyo caso $N = K_1 + K_2 + \dots + R$.

Para estos casos, el *análisis de Fourier* es una herramienta matemática muy útil que permite reconocer periodicidades o semiperiodicidades en una serie de tiempo.

El análisis mediante la Transformada Digital (Discreta) de Fourier (DFT) tiene el problema de que sólo reconoce submúltiplos del período fundamental T , el tiempo total de observación, y los periodos de las secuencias buscadas no necesariamente son múltiplos de T y no se puede escoger T a priori pues se desconoce los periodos por buscar. Este problema es particularmente grave para series pequeñas.

Para solucionar este problema, en vez de utilizar la DTF, conviene utilizar la Transformada Analítica de Fourier (FT), la cual permite identificar componentes en cualquier frecuencia. Representamos nuestra serie como la función

$$f(t) = \sum_{j=j_1}^{j_2} \delta(t - t_j) \quad (3.4)$$

Como la FT se aplica a funciones con dominio infinito, consideramos a $f(t)$ como si fuese una sección de una función infinita $f_{\infty}(t)$:

$$f_{\infty}(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \delta(t - t_j) \quad (3.5)$$

La sección finita $f(t)$ se obtiene multiplicando la función infinita $f_{\infty}(t)$ por una función cajón:

$$f(t) = \sum_{j=j_1}^{j_2} \delta(t - t_j) = f_{\infty}(t) \Pi\left[\frac{t - t_c}{T}\right], \quad (3.6)$$

en donde $\Pi(t)$ es la función cajón, $t_c = (t_f + t_0)/2$, los tiempos t_0 y t_f son los tiempos inicial y final del intervalo de observación, respectivamente, $T = t_f - t_0$. De esta manera, la FT de la función $f(t)$ queda expresada como:

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi t s} dt = \sum_{j=j_1}^{j_2} e^{-i2\pi t_j s} = F_{\infty}(s) * T \text{sinc}(T s) e^{-i2\pi t_c s}, \quad (3.7)$$

y $F(s)$ puede ser evaluada en cualquier valor de s . A pesar de que $F_{\infty}(s)$ es convolucionada con la función sinc, sus componentes importantes pueden ser identificadas correctamente.

Para una secuencia estrictamente periódica:

$$f(t) = \text{III}(t/\tau) \quad \supset \quad F(s) = \tau \text{III}(\tau s), \quad (3.8)$$

donde $\text{III}(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \delta(x - j)$; $j \in \mathbb{Z}$, es la función Shah o peine de Dirac, es decir, un peine de impulsos equiespaciados (figura 3.1). Pero en el caso de una secuencia

semiperiódica, el espectro será distinto a la función Shah dependiendo de los valores de θ_j , además de que la presencia de R eventos no pertenecientes a la secuencia también contribuyen a que $F(s)$ sea diferente al de un espectro estrictamente periódico en donde no hayan eventos ajenos a la secuencia.

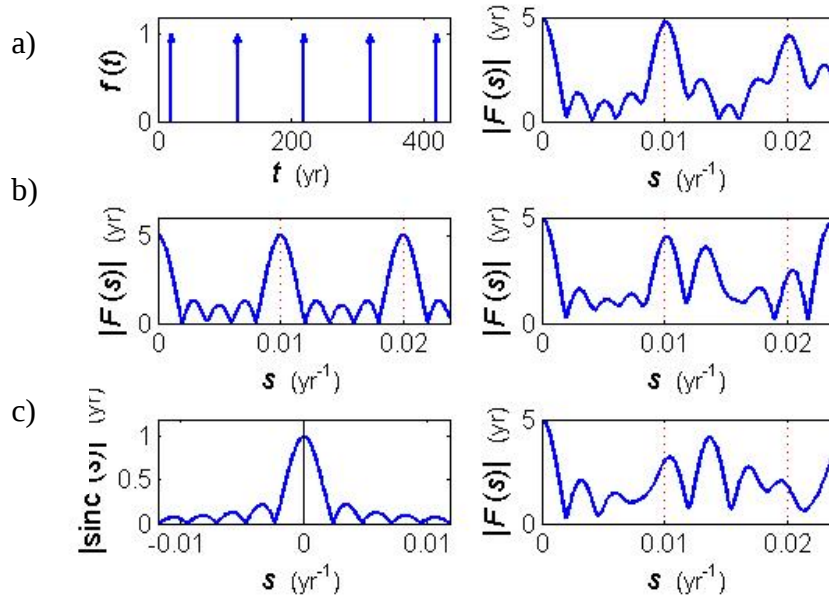


Figura 3.1. Las tres gráficas de la izquierda muestran: a) Ejemplo de una secuencia periódica con $\tau = 100$ años, truncada con $T = 440$ años; b) Su Transformada de Fourier analítica; c) Función Sinc de la convolución. Las tres gráficas de derecha muestran espectros de la secuencia con variaciones aleatorias θ_j : a) con desviación estándar $\sigma = 7.24$ años; b) con desviación estándar $\sigma = 16.99$ años; c) Con desviación estándar $\sigma = 23.55$ años. Las líneas negras punteadas, indican las frecuencias $1/\tau$ y su primer armónico.

Cuando la periodicidad tiene variaciones aleatorias relativamente pequeñas, ocurren grandes desfases para altas frecuencias y pequeños desfases para bajas frecuencias, por lo que los períodos de interés, comparables con T , se pueden reconocer en la mayoría de los casos. Los eventos ajenos a la secuencia causan desfases para cualquier frecuencia, pero por no ser periódicos, la FT podría ser capaz de identificar, aunque sea aproximadamente, las semiperiodicidades de las secuencias.

3.2 Análisis espectral

Para describir el método para identificación de secuencias semiperiódicas utilizado, se presenta como ejemplo una serie sintética (figura 3.2) con eventos entre los tiempos $t_0 = 10$ años y $t_f = 310$ años, compuesta de dos secuencias periódicas: una de 5 eventos, período $\tau^{(1)} = 75$ años y variación normal aleatoria con desviación estándar $\sigma^{(1)} = 4.0$ años, y la otra secuencia con 3 eventos, período $\tau^{(2)} = 120$ años y variación normal aleatoria con desviación estándar $\sigma^{(2)} = 3.5$ años. Además incluye dos eventos ajenos a las secuencias con tiempos de ocurrencia aleatorios.

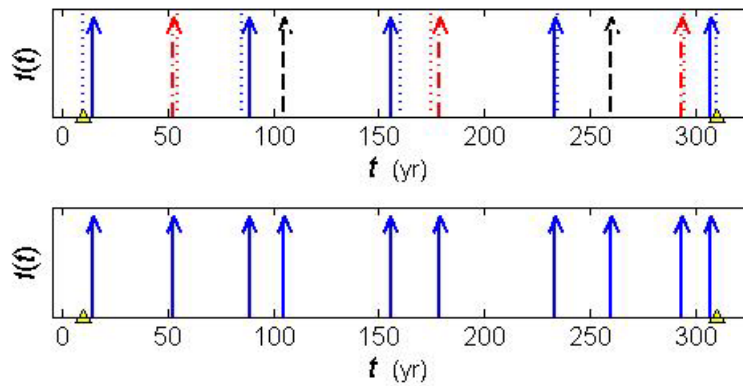


Figura 3.2. Serie sintética construida para ejemplificar la aplicación del método de identificación de secuencias. La gráfica superior muestra una secuencia con flechas sólidas azules y otra secuencia con flechas rojas de líneas discontinuas. Las flechas negras segmentadas indican los eventos ajenos a las secuencias. Las líneas punteadas indican el tiempo de ocurrencia de la flecha más cercana en el caso en que la secuencia respectiva fuese periódica. Los triángulos señalan los t_0 y t_f . La gráfica inferior muestra la serie sin diferenciación de los eventos, lo que permite observar la dificultad para distinguir algún tipo de periodicidad en la serie.

Como se observa en la figura 3.2, hay un total de $N=10$ eventos, dentro de un intervalo de tiempo establecido entre $t_0 = -5$ años y $t_f = 320$ años, correspondientes al inicio y final del catálogo sísmico, respectivamente. Con estos datos se obtiene el valor de la media del tiempo inter-eventos y su desviación estándar. Se calcula la FT analítica como la suma de exponenciales de la

ecuación (3.7) y se grafica su valor absoluto, indicando en el espectro, con guías aproximadas, la frecuencia máxima $s_{\max}$ y mínima $s_{\min}$ aceptables para la semiperiodicidad.

Se busca tener al menos tres eventos correspondientes a un período dado; por lo tanto, la mínima frecuencia que debe considerarse es $s_{\min} \approx 2/T$. Por otra parte, el menor período medible no puede ser mucho más pequeño que el tiempo inter-eventos más largo ($\Delta t_{\max}$), así que la frecuencia más alta que puede ser observada

$$\text{es } s_{\max} \approx \frac{1}{0.8 * \Delta t_{\max}} = 1.25 / \Delta t_{\max}.$$

La gráfica del espectro abarca un rango que va desde $s_1 = 0.5s_{\min}$ hasta $s_2 = 2.2s_{\max}$, de forma tal que se puedan identificar gráficamente períodos largos, frecuencias un poco más altas que $1/\Delta t_{\max}$ y posibles réplicas de los picos espectrales.

Para determinar el posible período de una secuencia, se escoge algún pico espectral localizado entre $s_{\min}$ y $s_{\max}$ o, por lo menos, bastante cerca de este intervalo. El valor de la frecuencia s_p correspondiente al pico seleccionado (figura 3.3 superior), será utilizada para construir el peine $c(t)$ (figura 3.3c), con K dientes separados por $\tau_p = 1/s_p$ y referenciado en un tiempo inicial $t_{0p} = -\phi_p / 2\pi s_p$, donde $\phi_p = \arctan\{\text{Im } F(s_p) / \text{Re } F(s_p)\}$ es la fase espectral correspondiente a s_p .

Cada evento cuyo tiempo sea el más cercano a un diente del peine construido, es identificado para poder determinar cuáles eventos pertenecen a la secuencia asociada al peine. Si para algún diente no se encuentra algún evento cuya cercanía sea menor o igual a un tiempo equivalente a $0.25 * \tau_p$, entonces el τ_p

obtenido es rechazado y se continúa probando con la construcción de otro peine seleccionando otro pico espectral.

Al hacer las pruebas para buscar el pico espectral correspondiente a la s_p que genere el peine adecuado, es recomendable empezar probando desde los picos de altas frecuencias hasta los picos de frecuencias medias, puesto que cuando se tienen muchos eventos, hay mayor posibilidad de encontrar picos espectrales de baja frecuencia engañosos que, a pesar de generar peines bien ajustados a los eventos, no son verdaderos.

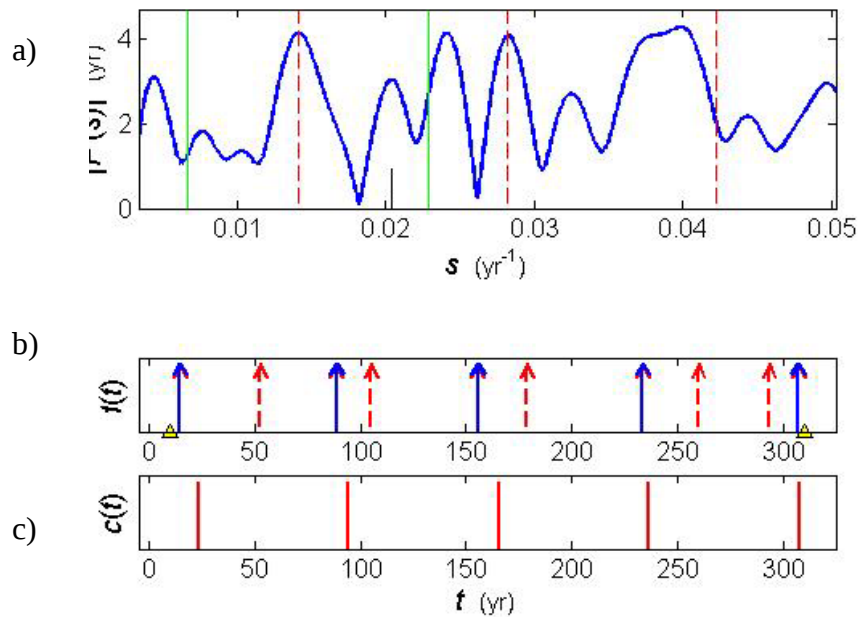


Figura 3.3. a) Espectro de Fourier de las series mostradas en la figura 3.2. Las líneas verdes verticales referencian las frecuencias $s_{\min}$ y $s_{\max}$, las líneas rojas segmentadas indican la frecuencia seleccionada $s_p = 0.0141$ años⁻¹ y dos de sus múltiplos, la línea negra corta señala el al pico que fue probado anteriormente y rechazado como posible solución. b) Se muestra todos los eventos de los cuales, los que están resaltados con flechas azules, son los eventos identificados como los correspondientes a la secuencia de período $\tau_p = 71.09$ años. c) Peine construido al cuál se asocia la secuencia mostrada en (b).

La bondad de ajuste es calculada a partir de la diferencia entre los tiempos de cada diente t_i^c y los tiempos de ocurrencia de los eventos t_i correspondientes a cada diente, utilizando la expresión:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (t_i^c - t_i)^2}{K - 2}} = \sigma, \quad (3.9)$$

en la cual se considera dos grados de libertad debido a que los datos han sido utilizados para estimar dos parámetros: el periodo y el tiempo origen. Este error estándar es también denotado como σ , ya que se supone que la desviación de la periodicidad tiene distribución normal, en cuyo caso este error es el mejor estimador para la desviación estándar de la distribución.

Una vez que se obtiene el peine ajustado adecuadamente, se busca refinar la identificación de los eventos de la secuencia, repitiendo de nuevo el mismo proceso, pero esta vez, el espectro de frecuencias es obtenido eliminando de la serie aquellos eventos cuyos tiempos estén a una distancia mayor que $\tau_p / 4$ del diente más cercano, es decir, se elimina los eventos que definitivamente no tienen posibilidad de pertenecer a la secuencia semiperiódica hallada. Se espera que el nuevo espectro obtenido muestre un comportamiento periódico más claro.

En la continuación del proceso, se selecciona otra vez un pico espectral y se construye un peine con la frecuencia del pico para identificar los eventos cercanos al peine (figura 3.4), ahora reduciendo el criterio de aceptación a una distancia máxima de $\tau_p / 4.5$ del evento al diente del peine.

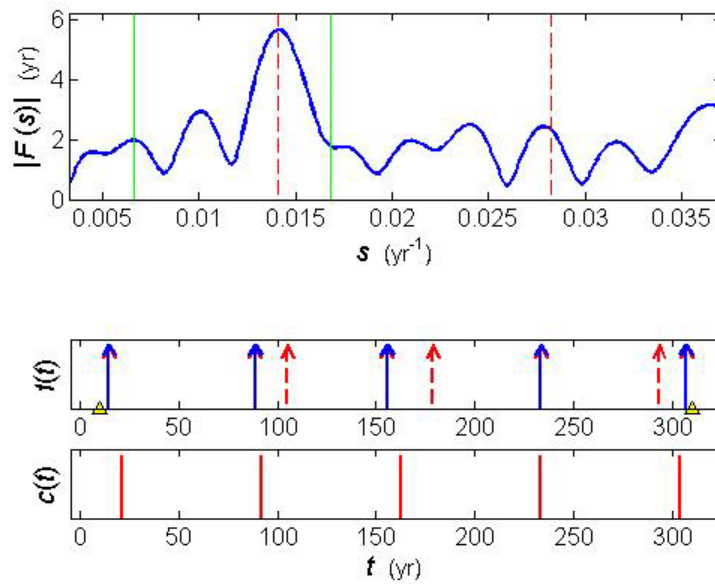


Figura 3.4. Segundo pase luego de eliminar los eventos más lejanos. El nuevo período identificado es $\tau_p = 70.75$ años con un error estándar $\sigma = 6.10$ años. La simbología es igual a la figura 3.3.

Para continuar refinando el cálculo, se realiza un tercer pase, pero esta vez, el espectro de frecuencias es obtenido eliminando de la serie aquellos eventos cuyos tiempos estén a una distancia mayor que $\tau_p / 4.5$ del diente más cercano del peine obtenido anteriormente. Se selecciona otra vez un pico espectral (figura 5.35) y se construye un peine con la frecuencia del pico para identificar los eventos cercanos al peine, ahora reduciendo el criterio de aceptación a una distancia máxima de $\tau_p / 5$ del evento al diente del peine.

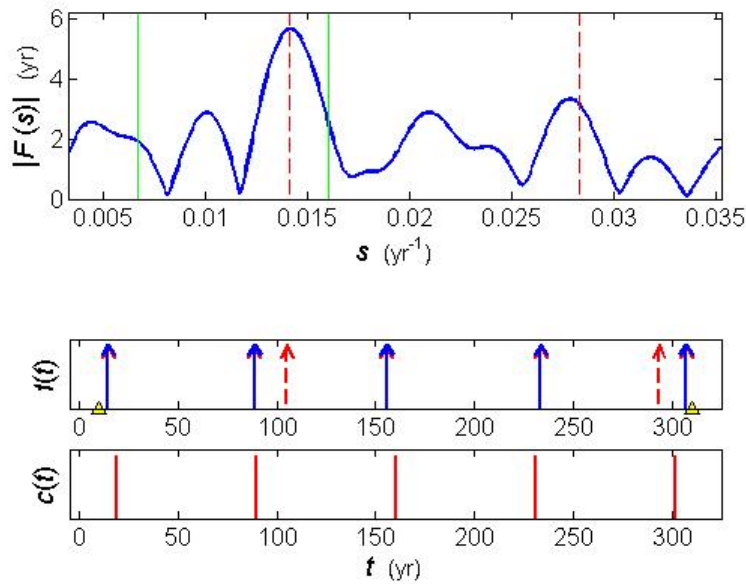


Figura 3.5. Tercer pase. El período identificado es $\tau_p = 70.76$ años y el error estándar es $\sigma = 2.610$. La simbología es igual a la figura 3.3.

Por último, se realiza un cuarto refinamiento utilizando únicamente los eventos de la serie que se identificaron como parte de la secuencia en el tercer pase. Usualmente, en este nuevo espectro los picos se ven claramente definidos. El peine definitivo es construido en este caso, utilizando una distancia máxima de aceptación de $\tau_p/6$ de cada evento al diente más cercano (figura 3.6). La secuencia resultante de 5 eventos se ajusta muy bien a una de las secuencias utilizadas al construir la serie sintética, por lo que hasta ahora el método resulta bastante eficiente.

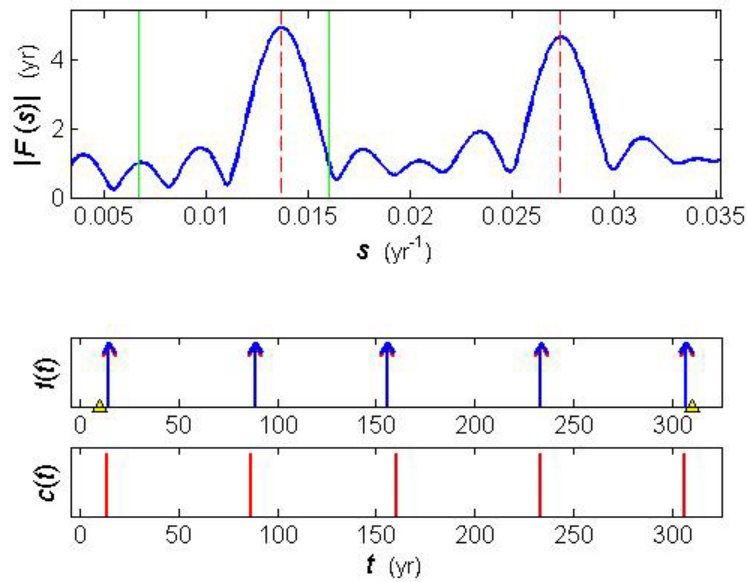


Figura 3.6. Cuarto y último pase utilizando únicamente los eventos pertenecientes a la secuencia encontrada en el pase anterior. El período final identificado es $\tau_p = 73.17$ años y el error estándar es $\sigma = 2.91$ años. La simbología es igual a la figura 3.3.

Todos aquellos eventos que quedaron excluidos de la secuencia encontrada, son utilizados para realizar nuevamente el mismo análisis para buscar otras posibles secuencias existentes. En la figura (3.7) se muestra el primer pase del siguiente análisis, en donde el resultado final de la secuencia encontrada es de período $\tau_p = 120.97$ años y el error estándar es $\sigma = 4.95$. Esta segunda secuencia de 4 eventos, igualmente está muy bien ajustada a la secuencia inicialmente propuesta al construir los datos sintéticos.

El análisis termina en el momento en que no se encuentren más secuencias.

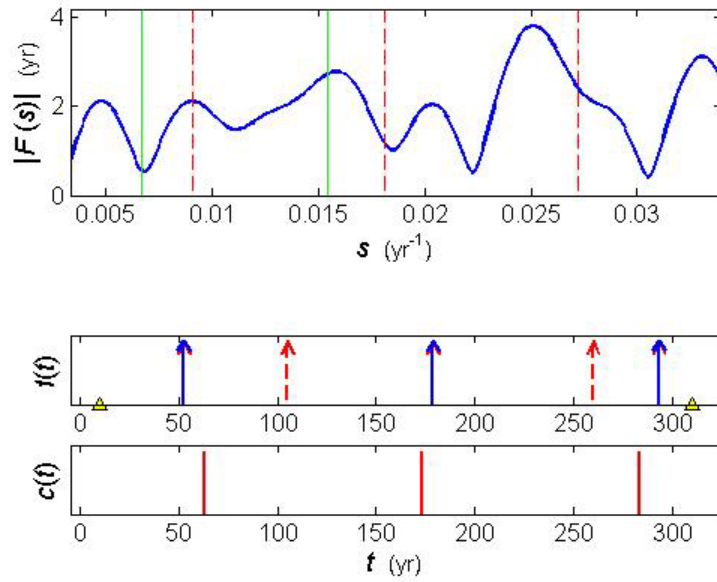


Figura 3.7. Primer pase de la identificación de la segunda secuencia de los datos sintéticos. El período identificado es de $\tau_p = 110.21$ años y el error estándar es $\sigma = 15.50$ años. La simbología es igual a la figura 3.3.

Repetidas pruebas con datos sintéticos, en donde se conoce a priori cuáles eventos pertenecen a las secuencias y cuáles no, muestran que aunque la FT es capaz de identificar muy bien las secuencias semi-periódicas de una serie de eventos, la identificación correcta no sólo depende de qué tanto esté alejada la secuencia de ser estrictamente periódica y de la cantidad de eventos extraños a la secuencia, sino que también depende de la combinación del tiempo inicial de la serie, del período y de los tiempos en que hayan ocurrido los eventos ajenos a la secuencia. En este sentido, puede haber series de eventos cuya combinación particular, cause una identificación errónea o imposible, por lo que es muy importante tomar en cuenta esta salvedad cuando se aplica el método con datos de sismicidad real.

3.3 Significatividad

Una primera y rápida evaluación de las secuencias identificadas, es hecha tomando en cuenta intervalos $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ exponencialmente distribuidos, lo cual es una propiedad de la sismicidad con distribución poissoniana. Para una sismicidad poissoniana, la relación $\rho = E[\Delta t] / \text{StDev}[\Delta t] \approx 1$. La desviación del valor ρ con respecto a 1, será la medida para caracterizar qué tanto se aleja la secuencia identificada de un proceso poissoniano sin memoria. En el caso del ejemplo utilizado con datos sintéticos, la primera secuencia identificada tiene como resultado $\rho = 15.635$.

Por otra parte, la significatividad de una secuencia identificada puede evaluarse estimando la probabilidad de que el resultado obtenido haya ocurrido al azar, es decir que una secuencia de sismos que tenga alta probabilidad de ser aleatoria, no es buen fundamento para cualquier tipo de pronóstico.

Par el cálculo de la probabilidad, se toma en cuenta que hay N eventos ocurridos dentro de un intervalo de tiempo T , de los cuales K eventos corresponden a una secuencia identificada, con desviación estándar σ con respecto al peine. El tiempo total es dividido en M intervalos equiprobables con longitud $\varepsilon = 6\sigma$, ya que 3 desviaciones estándar de cada lado de un diente del peine proporciona una confianza de 0.9973, la cual es suficiente para este caso (podría utilizarse algún otro nivel de confianza).

Dentro de un intervalo T , un peine de K dientes puede tener período τ entre $\tau_1 = (T / K) + \delta$ (donde δ es un valor muy pequeño ~ 0.00001 años), el cuál abarca $M_1 = \text{Fix}[(K - 1)\tau_1 / \varepsilon]$ intervalos, donde $\text{Fix}(x)$ indica el entero inmediatamente $\leq x$, y $\tau_2 = T / (K - 1)$, que abarca $M_2 = \text{Ceil}[(K - 1)\tau_2 / \varepsilon] = M$ intervalos, donde $\text{Ceil}(x)$

indica el entero inmediatamente $\geq x$. El primer evento de una secuencia aceptable puede estar en cualquiera de los $M_f = M - M_1 + 1$ intervalos. La probabilidad de tener al menos un evento en un intervalo dado es $p_1 = 1 - \exp(-\lambda \varepsilon)$, donde $\lambda = N/T$ (Parzen, 1960; Daley y Vere-Jones, 2002). Si el primer evento está en el i -ésimo intervalo, la probabilidad de tener un evento final admisible es $p_{2,i} = p_1 \{1 - \exp[-\lambda_2 (M_f + 1 - i) \varepsilon]\}$, donde $\lambda_2 = (N - 1)/(T - \varepsilon)$, debido a que ya utilizamos un evento y un intervalo. Estas probabilidades alternativas son combinadas iterativamente como $p_{2,j} = p_{2,j} + p_{2,j-1} - p_{2,j}p_{2,j-1}$, y la probabilidad resultante estará denotada por $p_2 \equiv p_{2,M_f}$.

Cada evento intermedio tiene que caer en intervalos específicos, así que sus probabilidades están dadas por $p_{3,k} = 1 - \exp(-\lambda_k \varepsilon)$, donde $k = 3, \dots, K$. La probabilidad final de ocurrencia al azar está dada por $P_\phi = p_2 \prod_{k=3}^K p_{3,k}$.

La figura 3.8 muestra cómo P_ϕ varía con σ/T y K , para diferentes valores de N . Incluso, P_ϕ puede tener un valor significativo para valores pequeños de σ en secuencias de sólo 3 eventos.

Dado que P_ϕ es la probabilidad de que la secuencia observada haya ocurrido por azar, entonces un estimado de la probabilidad de que la secuencia semiperiódica y su peine asociado no hayan ocurrido al azar sería:

$$P_c = 1 - P_\phi. \quad (3.10)$$

Por lo tanto, P_c es una medida de la probabilidad de que el próximo diente del peine, número $K+1$, indicará el tiempo de ocurrencia del próximo sismo (futuro) en la secuencia.

En el caso en que $P_c = 1$, esto significaría una certeza absoluta de que el próximo evento de la secuencia ocurrirá dentro del intervalo de incertidumbre alrededor del próximo diente del peine. Pero si $P_c < 1$, existe la posibilidad de que el pronóstico del futuro evento resulte ser una falsa alarma.

En la primera secuencia del ejemplo, para $T = 300$ años, $N = 10$, $K = 5$ y $\sigma = 2.91$, las probabilidades son $P_\phi = 0.0538$ y $P_c = 0.9462$.

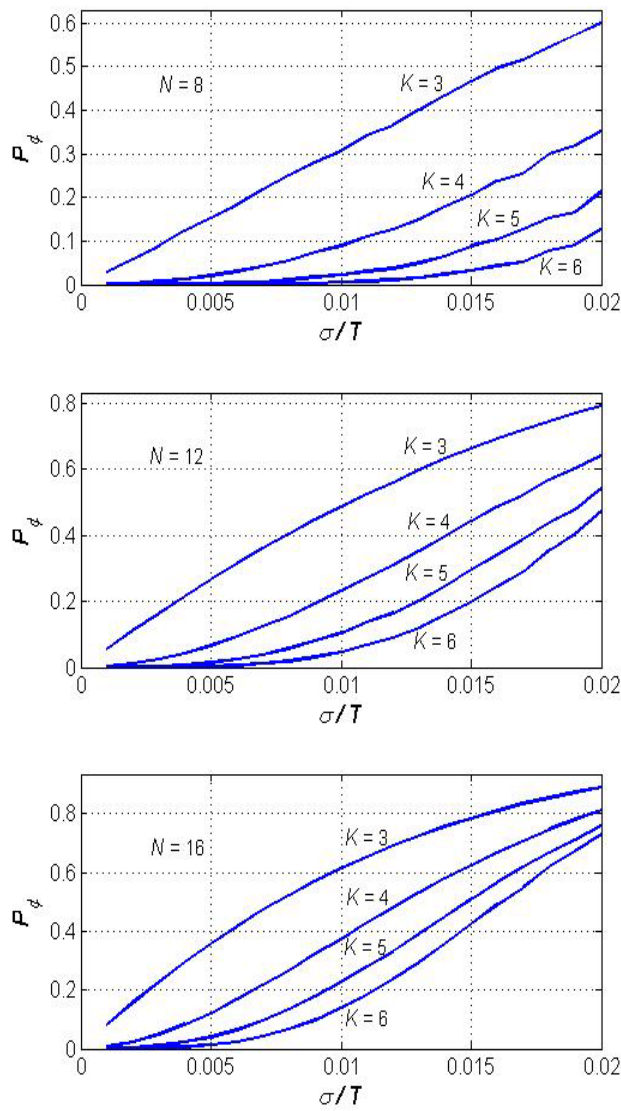


Figura 3.8 Dependencia de P_ϕ sobre σ/T y K para tres valores típicos de N .

3.4 Pronóstico

El objetivo de identificar secuencias semiperiódicas de sismos, es poder pronosticar la ocurrencia futura de eventos similares. A partir de la identificación de un peine dado, con período τ_p , tiempo inicial t_{0p} , K dientes (cada uno asociado a un evento observado) y desviación estándar σ , el tiempo del próximo evento a ocurrir es expresado como:

$$t_f = t_{0p} + K \tau_p \pm q \sigma, \quad (3.11)$$

donde q es un factor que determina el nivel de confianza para el cálculo de incertidumbre ($\varepsilon = 2q\sigma$).

Utilizando los datos sintéticos inicialmente mostrados, para un nivel de confianza del 95.45% con $q=2$, el tiempo del próximo evento a ocurrir en la secuencia observada de 5 eventos sería $t_f = 379.53 \pm 5.82$ años.

Considerando que una gran cantidad de procesos y factores están involucrados en la generación del sismo, la distribución de densidad de probabilidad del tiempo de ocurrencia de dicho evento se puede considerar, con fundamento en el Teorema del Límite Central, una distribución normal, centrada en t_f , con desviación estándar σ , truncada en el tiempo del evento sucedido más reciente y normalizada a tener área bajo la curva igual a P_c . El método de pronóstico no depende de que la distribución sea normal, así que en el caso en que se considere más apropiada otro tipo de distribución, también es posible utilizarla.

Otra forma de medir qué tan significativos son los resultados, es calcular las ganancias de la probabilidad y la información (Vere-Jones, 1998; Harte y Vere-Jones, 2005) que dan un intervalo dado $(t_f - q \sigma, t_f + q \sigma)$ alrededor del tiempo

pronosticado, comparados con la probabilidad calculada mediante el modelo poissoniano, para la ocurrencia de al menos un sismo durante dicho intervalo.

Para dicho intervalo pronosticado, la probabilidad de que ocurra un evento que corresponda al siguiente diente del peine es $P_{cq} = P_c \text{erf}(q)$, la probabilidad de Poisson de que ocurra al menos un evento cualquiera es $\pi_{1+} = 1 - e^{-\lambda 2q\sigma}$ con $\lambda = N/T$ y la probabilidad de Poisson de que ocurra un evento no perteneciente al peine es $\pi_{1+}^* = 1 - e^{-\lambda^* 2q\sigma}$ con $\lambda^* = (N - K)/T$; así que la probabilidad de tener un evento que continúe con la secuencia del peine y/o tener un evento que no sea parte del peine es $P_{cq} + \pi_{1+}^* - P_{cq}\pi_{1+}^*$, así que la ganancia de la probabilidad es:

$$P_G = \frac{P_{cq} + \pi_{1+}^* - P_{cq}\pi_{1+}^*}{\pi_{1+}} \quad (3.12)$$

La ganancia de la información es la diferencia entre la *autoinformación* (Fano, 1961) o *entropía de la información* (Harte y Vere-Jones, 2005) del pronóstico del peine y la probabilidad tradicional, expresado en bits:

$$I_G = \log_2(P_G), \quad (3.13)$$

En el ejemplo con datos sintéticos, con $N=10$, $T=300$ años, $K=5$, $\tau = 73.17$ años, $\sigma = 2.908$ años, la probabilidad del peine de la primera secuencia es $P_c = 0.998$; la tasas de ocurrencias son $\lambda = 0.333 \text{ años}^{-1}$ y $\lambda^* = 0.0.167 \text{ años}^{-1}$. Los valores de probabilidades del pronóstico y de las ganancias de probabilidad y de información se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Probabilidades y Ganancia de la probabilidad y de información.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.6816	0.1762	0.0924	4.0352	2.0126
2	0.9530	0.3214	0.1762	2.9912	1.5807
3	0.9958	0.4410	0.2523	2.2606	1.1767

A continuación, la figura 3.9 (arriba) muestra la función de densidad de probabilidad (pdf) del pronóstico $p(t)$, junto con la identificación de la secuencia, el peine construido $c(t)$ y el rango de incertidumbre $\pm 2\sigma$ (con $q=2$).

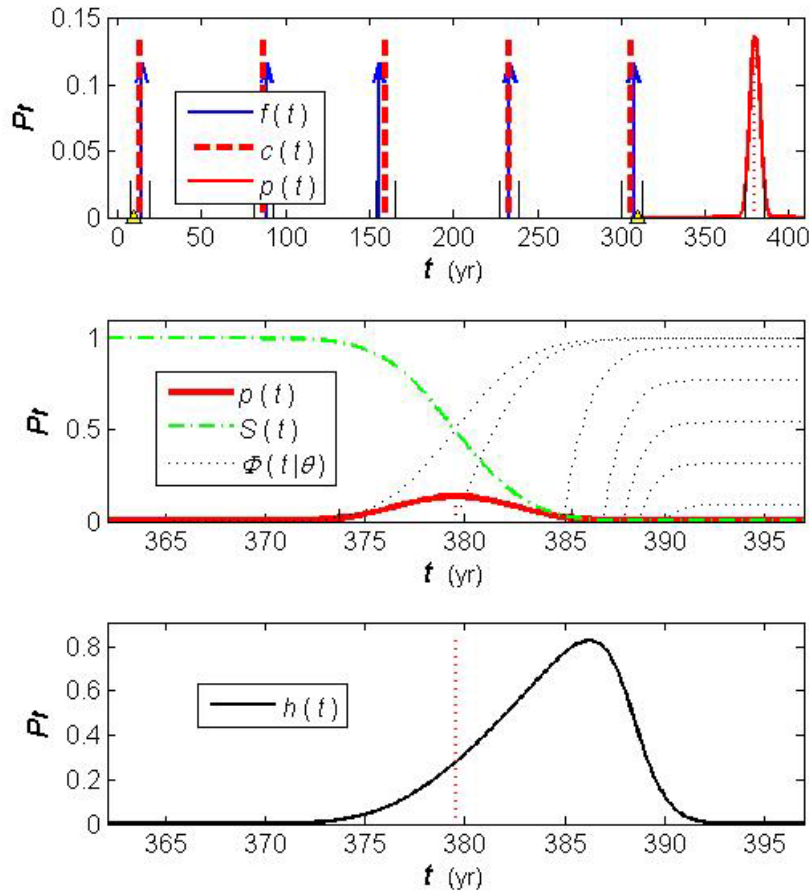


Figura 3.9. Ejemplo del pronóstico basado en la identificación de la secuencia presentada en la figura 3.8; los sismos se muestran en flechas azules y los dientes del peine en líneas rojas punteadas (la altura de las líneas no tienen significado); la función de densidad de probabilidad del pronóstico $p(t)$ en rojo, está normalizada en P_c , la función de supervivencia $S(t)$, la función de tiempo de vida futura del pronóstico $\Phi(t|\theta)$ en negro punteado y la función de peligro $h(t)$ en negro.

Para visualizar mejor las consecuencias del pronóstico, también se presentan otras funciones, tal como se muestran en la figura 3.9. La función de supervivencia

$$S(t) = \Pr(x > t) = 1 - P(t) = \int_t^{\infty} p(x) dx, \quad (3.14)$$

donde x es el tiempo de ocurrencia, $P(t)$ es la acumulada de $p(t)$ y representa la probabilidad de que el sismo no haya ocurrido todavía en un tiempo t . Para $P_c < 1$, $S(t)$ no tiende a cero, sino a P_ϕ , que sería la probabilidad de una falsa alarma.

También se muestra la función de tiempo de vida futura:

$$\Phi(t | \gamma) = \Pr(x \leq t | x > \gamma) = \frac{\Pr(\gamma < x \leq t)}{\Pr(x > \gamma)} = \frac{P(t) - P(\gamma)}{S(\gamma)} \quad (3.15)$$

que representa la probabilidad de ocurrencia para tiempos posteriores a un tiempo γ , dado que el sismo no ha ocurrido todavía para ese tiempo. Las líneas punteadas muestran $\Phi(t | \gamma)$ para varios γ ; para valores de γ antes de la parte significativa de $p(t)$, la línea de tiempo de vida futura crece más rápidamente a medida que γ aumenta, alcanzando valores de ~ 1 ; para tiempos mayores de supervivencia y $P_c = 1$ continúa el mismo comportamiento, pero para $P_c < 1$ el máximo valor decrece y tiende a cero para tiempos de supervivencia mayores a la parte significativa de $p(t)$.

La figura 3.9 muestra la función de peligro:

$$h(t) dt = \Pr(t < x \leq t + dt | x > t), \quad (3.16)$$

que describe cómo es renormalizada $p(t)$, dado que el evento no ha ocurrido en el tiempo t :

$$h(t) = \frac{p(t)}{1 - P(t)} = \frac{p(t)}{S(t)} \quad (3.17)$$

Ya que para $P_c < 1$ la función de supervivencia $S(t)$ no tiende a cero, la función de peligro no aumenta indefinidamente, sino que alcanza su máximo en un tiempo posterior al máximo de $p(t)$ y luego decrece.

CAPÍTULO 4. DATOS

4.1 Japón

4.1.1 Área de estudio

Inicialmente se organizó una base de datos con sismos de magnitudes iguales o superiores a 7, ocurridos entre las longitudes 120°E y 160°E y latitudes 20°N y 55°N (ver apéndice 1. Datos de Japón $M \geq 7$).

Se escogió un área de estudio tomando en cuenta la configuración sismotectónica de Japón y la ubicación de las zonas con mayor ocurrencia de grandes sismos. El área abarca los sismos ocurridos en la zona del arco de Japón y la zona suroeste del arco de las Kuriles (figura 4.1).

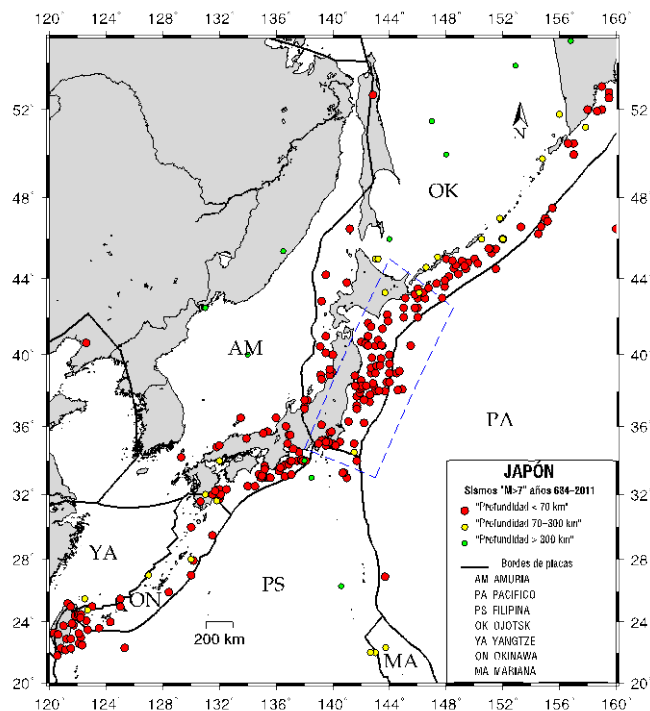


Figura 4.1. Área de estudio de Japón, con la ubicación de los sismos incluidos en la base de datos preliminar.

4.1.2 Catálogos sísmicos

Existen diversos catálogos sísmicos de donde se puede extraer la información de sismos instrumentales ocurridos en Japón, tales como el catálogo de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA), del International Seismological Centre (ISC), de la U.S. Geological Survey (USGS), de la Universidad de Harvard, de la National Geophysical Data Center/World Data Center (NGDC/WDC), entre otros.

Con el fin de obtener un catálogo lo más homogéneo y completo posible, fue necesaria la revisión detallada de diferentes catálogos sísmicos, poniendo especial cuidado en los casos donde hay diferencias en los cálculos de magnitudes, en los diferentes tipos de magnitudes y en las localizaciones asignadas dependiendo del centro sismológico que haya analizado el sismo.

La figura 4.2 muestra un ejemplo de la información de un sismo, tal como se encuentra en el catálogo del ISC disponible en la red, en la cual se observa que un mismo sismo puede tener asignado diferentes tipos de magnitud y, además, diferentes valores del mismo tipo de magnitud dependiendo del autor del cálculo.

Otro detalle importante, es que en el caso de solicitar que el sistema muestre un catálogo con sismos, por ejemplo, de magnitudes mayores o iguales a 7.5, el sistema sólo mostrará las magnitudes calculadas de cada sismo mayores o iguales a 7.5 y en caso de haber cálculos de magnitudes menores, las omitirá, causando que corramos el riesgo de no ver la magnitud posiblemente correcta en algunos casos.

```

DATA_TYPE EVENT_CATALOGUE
ISC Bulletin
--EVENT--|-----ORIGIN (PRIME HYPOCENTRE)-----
  EVENTID,AUTHOR ,DATE ,TIME ,LAT ,LON ,DEPTH,DEPFIX,
16461282,NEIC ,2011-03-11,05:46:24.68, 38.3200, 142.3510, 32.0,

-|-----MAGNITUDES-----...
AUTHOR ,TYPE ,MAG
,NEIC ,MS , 8.3
,NEIC ,mb , 7.2
,DNK ,Ms , 8.9
,JMA ,M , 9.0
,BJI ,Ms , 8.7
,BJI ,Ms7 , 8.6
,BJI ,mB , 7.7
,BJI ,mb , 7.3
,IDC ,MS , 8.2
,IDC ,Ms1 , 8.2
,IDC ,ms1mx , 8.0
,MOS ,MS , 8.7
,GCMT ,MW , 9.1
,BKK ,M , 8.4
,BKK ,Mw(mB) , 8.6
,BKK ,mB , 8.3
,BKK ,mb , 6.9
,BGS ,Mw , 8.9
,IGIL ,MS , 8.8
,CSEM ,Mw , 8.7
,CSEM ,Mw , 8.8
,PTWC ,Mw , 7.9
,JMA ,Mw , 7.9
,BGS ,Mw , 8.9
,NAO ,mb , 6.7
,DJA ,M , 8.4
,DJA ,Mw(mB) , 8.4
,DJA ,Mwp , 7.8
,DJA ,mB , 8.2
,DJA ,mb , 6.8
,NAO ,mB , 7.3

```

Figura 4.2. Diferentes magnitudes calculadas, según diferentes agencias, para el sismo del 11-03-2011, ocurrido en Japón. Información obtenida del catálogo del ISC.

Luego de revisar cuidadosamente los catálogos de varios centros sismológicos y de compararlos entre sí para extraer la información que pudiese considerarse la más precisa, se decidió utilizar la base de datos sísmicos publicada por el National Geophysical Data Center/World Data Center (NGDC/WDC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la cual tiene una buena recopilación de grandes sismos históricos y de los sismos instrumentales que han ocurrido hasta

la fecha (2012), haciendo referencia a las fuentes de donde proviene la información e indicando los valores que están mejor estimados.

4.1.3 Procesamiento de catálogo y magnitudes

Como se mencionó antes, podemos esperar que los grandes sismos sean los mejores candidatos para exhibir comportamiento semiperiódico, en tanto que no se puede esperar semiperiodicidad para sismos pequeños. Por esta razón, se trata de realizar el análisis de semiperiodicidad con los sismos más grandes posibles; pero es necesario contar con suficientes sismos para obtener un espectro de Fourier confiable. Por otro lado, demasiados sismos pueden enmascarar las características propias de las secuencias y aumentan la probabilidad de secuencias aleatorias. Esto hace necesario utilizar magnitudes $M \geq M_{min}$, donde la magnitud mínima se escoge comenzando con la más alta que dé un mínimo de cuatro eventos, y se va disminuyendo hasta tener una población suficientemente grande para obtener resultados satisfactorios.

Un problema de fijar una magnitud límite es la incertidumbre en el cálculo de las magnitudes, usualmente $\approx \pm 0.1$, por la cual podríamos estar eliminando del cálculo sismos que deberían estar incluidos. También existe la posibilidad de que un sismo justo bajo el límite, junto con sus premonitores y réplicas, tenga liberación de energía que alcance la de M_{min} , y por tanto debería ser incluido en el cálculo.

Para aminorar este problema, calculamos magnitudes equivalentes con base en las relaciones de Richter (1958) y Kanamori y Anderson (1975), respectivamente:

$$\log_{10} E_s = 11.8 + 1.5 M_s \quad , \quad (4.1)$$

,donde E_s es la energía sísmica irradiada medida en *ergios*, y

$$\log_{10} M_0 = 16.05 + 1.5 M_w \quad , \quad (4.2)$$

,donde M_0 es el momento sísmico medido en *dyn cm*.

Puede usarse cualquiera de las dos ecuaciones, ya que ambas tienen la misma dependencia de la magnitud. Añadimos a los sismos con $M \geq M_{min} - 0.1$ la energía o momento de todos los sismos menores asociados con cada uno, y le reasignamos la magnitud

$$M_I = \frac{2}{3} \log_{10} \sum_{i \in I} 10^{1.5 M_i} \quad (4.3)$$

donde I es el conjunto de índices del catálogo de los eventos asociados con un sismo dado (incluyendo su propio índice). Un evento menor se considera asociado a un evento previo mayor si ocurre durante un Δt después de éste y el sismo mayor es el más cercano que satisface un criterio de vecindad espacial que varía como elipse, según la orientación de cada par de sismos, con eje el mayor paralelo al sistema local de fallas. El tamaño del eje mayor se determina a partir de la magnitud del evento grande según las relaciones de Wells y Coppersmith (1994) y el del eje menor se fija como 1/5 del mayor. Una vez que las magnitudes han sido reasignadas, se repite el proceso para ver qué eventos con $M = M_{min} - 0.1$ deben ser asignados con eventos mayores, y finalmente sólo eventos con $M \geq M_{min}$ son incluidos en el catálogo.

Si bien la ocurrencia de réplicas es un proceso que puede durar años, la mayor parte de la energía o el momento es liberada durante los primeros días después del sismo principal, por tanto, utilizaremos un criterio de vecindad temporal de 60 días.

Tabla 4.1 . Catálogo final de Japón a utilizar en el análisis. La magnitud con * indica que inicialmente era de 7.9.

<i>t</i> (años)	<i>Lat</i> (°N)	<i>Lon</i> (°E)	<i>D</i> (km)	<i>M</i>
869.52877	38.50	139.30	-	8.6
1611.91781	39.00	144.50	-	8.1
1677.27945	40.00	144.00	-	8.1
1703.99646	35.00	140.00	-	8.2
1763.07671	40.50	143.50	-	8.0
1793.12877	38.50	144.00	-	8.3
1843.31233	42.00	146.00	-	8.4
1856.64208	40.50	143.50	-	8.0
1894.22036	42.50	146.00	40.0	8.1*
1896.45475	39.50	144.00	-	8.3
1898.42468	38.00	143.00	60.0	8.7
1901.60381	40.50	142.50	33.0	8.0*
1901.60486	40.60	142.30	33.0	8.2
1933.16638	39.10	144.70	10.0	8.4
1952.17229	42.15	143.85	45.0	8.1
1968.37168	40.80	143.20	7.0	8.2
2003.73377	41.81	143.91	27.0	8.3
2011.18967	38.30	142.37	29.0	9.0

4.2 Venezuela

4.2.1 Áreas de estudio

Preliminarmente se organizó la información de los sismos con magnitudes iguales o superiores a 5, ocurridos entre los años 1530 y 2012, localizados entre las longitudes 74°W y 58°W y latitudes 4°N y 14°N (ver apéndice 2. Datos con magnitudes a partir de 5).

Basándose en el marco sismotectónico de Venezuela, se consideró la distribución de los principales sistemas de fallas y localización de la sismicidad para definir las áreas de estudio (figura 4.3). El área 1 representa el segmento sur de los Andes de Venezuela y la zona limítrofe de Colombia, el área 2 representa el segmento norte de los Andes, el área 3 representa la zona norte-central de Venezuela y el área 4 representa la zona nororiental de Venezuela.

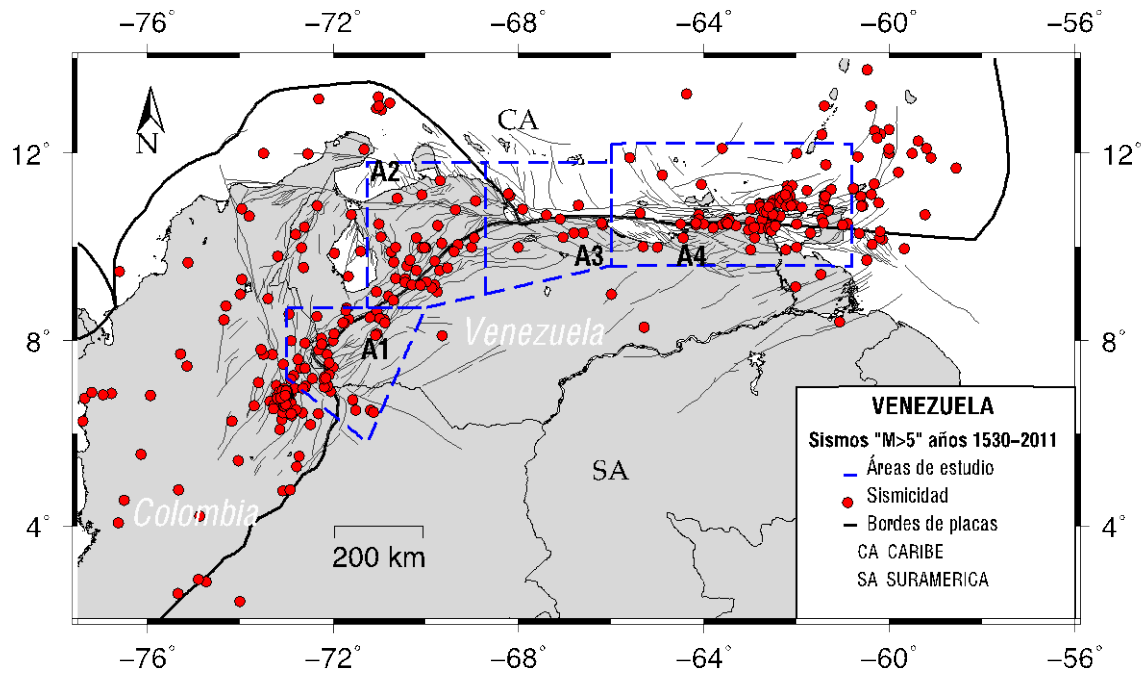


Figura 4.3. División de las áreas de estudio de Venezuela, con la ubicación de los sismos incluidos en la base de datos preliminar.

4.2.2 Catálogos sísmicos

Durante los últimos años, la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), que monitorea la Red Sismológica Nacional desde el año 2000, ha realizado la tarea de completar la información de los catálogos de sismos ocurridos en Venezuela, con la integración de bases de datos instrumentales provenientes de otros centros sismológicos de Venezuela que operan las redes locales instaladas desde la década de los 80; tales como la Red Sismológica de los Andes Venezolanos (RedSAV), la Red del Centro de Sismología de la Universidad de Oriente (CSUDO), la Red Sismológica de la Electrificación del Caroní (EDELCA) y la Red Sismológica del Complejo Uribante-Caparo (DESURCA). De igual manera, parte importante de la información proviene de los registros perteneciente al Observatorio Cajigal, el cual se encargaba del monitoreo de la actividad sísmica en Venezuela desde finales del

siglo XIX y cuyos boletines sismológicos empezaron a elaborarse desde 1959 (Grases, 2005). Además FUNVISIS ha integrado la información de los sismos instrumentales ocurridos en la primera mitad del siglo XX, proveniente de los catálogos de centros sismológicos internacionales, tales como el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS), el International Seismological Centre (ISC) y la U.S. Geological Survey (USGS), entre otros.

El primer sismo ocurrido en Venezuela, registrado instrumentalmente, ocurrió el 29 de octubre de 1900, con magnitud 7.8 (Fiedler, 1988) y hasta ese entonces, la información sobre los sismos sentidos en Venezuela existía únicamente en documentación histórica. Actualmente FUNVISIS en conjunto con la Universidad de los Andes (ULA) y la Universidad Central de Venezuela (UCV), están realizando un trabajo de recopilación y análisis de información histórica documentada sobre los sismos más significativos ocurridos en Venezuela y aunado a esto, se han llevado a cabo estudios Paleosísmicos por trincheras desde el año 1960 (Audemard, 2003) que han permitido conocer la información más detallada sobre magnitudes y localizaciones de los sismos históricos.

La sismicidad en Venezuela tiene un patrón de actividad moderada, es decir, los sismos de grandes magnitudes ocurren con poca frecuencia y por tal razón, para tener suficientes datos que permitan realizar el análisis de semiperiodicidad de grandes sismos, fue necesario utilizar no solo los datos del catálogo instrumental que inicia en 1900, sino también los datos del catálogo de sismicidad histórica en donde el sismo documentado más antiguo es del 1 de septiembre de 1530 y cuya magnitud estimada es de 7.2-7.4 (Audemard, 1999).

Es importante señalar que, pese a que varios sismos históricos no tienen una magnitud asignada, algunos de ellos fueron incorporados a la base de datos utilizada, puesto que, aunque no se conozcan las magnitudes de estos sismos, se consideran sismos destructores o por lo menos sismos que causaron grandes

daños según la documentación histórica que se ha encontrado (Palme *et. al.*, 2005; Ferrer *et. al.*, 2005; Grases, 1999, 2005; Sobiesiak *et. al.*, 2005; Audemard, 1999, 2002; Rodríguez y Audemard, 2003; Altez, 2003, 2005; Memorias VI Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica, 2012; entre otros).

El arreglo del catálogo definitivo de Venezuela (tabla 4.2), utilizado en este estudio, fue obtenido aplicando el mismo procedimiento utilizando en el caso de Japón, descrito anteriormente en el punto 4.1.3.

Tabla 4.2 . Catálogo de eventos sísmicos utilizados para el caso de Venezuela, con magnitudes partir de 5.5 y localizados dentro de las áreas de estudio A1, A2, A3 y A4.

<i>t</i> (años)	<i>Lat</i> (°N)	<i>Lon</i> (°W)	<i>M</i>	Área
1530.6674	10.7	-64.1	7.3	A3
1597.0001	7.8	-72.3	--	A1
1604.0001	8.5	-71	--	A1
1610.0926	8.45	-71.65	7.6	A1
1629.0001	10.47	-64.17	6.2	A3
1641.4426	10.9	-66.7	6.2	A4
1644.0421	7.4	-72.7	7.3	A1
1673.9352	9.33	-70.64	--	A2
1674.0434	8.95	-70.8	7.4	A2
1684.3411	10.48	-63.6	--	A3
1736.0001	10.05	-69.3	--	A2
1737.0001	10.05	-69.3	--	A2
1766.8038	11	-62.5	7.5	A3
1775.9847	9.6	-70.4	6.1	A2
1782.7864	9.05	-69.75	--	A2
1786.0001	8.5	-71.2	6.1	A1
1797.9533	10.6	-64.1	6.3	A3
1801.0001	9.2	-70.3	--	A2
1803.0001	10	-69	--	A2
1807.1307	6.5	-71.5	5.7	A1
1812.2346	10.6	-67.1	7.1	A4
1812.2346	10.2	-68.95	7.4	A2
1812.2347	8.65	-71.05	6	A1
1827.4788	8.15	-71.96	--	A1

1834.6128	8.87	-70.7	6.2	A2
1837.692	10.3	-66.6	--	A4
1849.1546	8.05	-72.25	6.4	A1
1853.5364	12.1	-63.6	7.3	A3
1867.2982	8.37	-71.75	--	A1
1869.1307	7.92	-72.24	6.2	A1
1870.484	9.5	-69.7	6.1	A2
1874.6264	10.55	-63	6.1	A3
1875.3772	7.95	-72.6	7.4	A1
1878.2796	10.3	-66.8	6.3	A4
1879.1803	10.47	-66.18	--	A4
1883.8999	11.42	-69.68	--	A2
1886.7432	9.32	-70.44	5.5	A2
1888.0234	11.3	-62.2	6.5	A3
1888.8791	9.2	-69.8	6.4	A2
1894.3236	8.7	-71.7	7.6	A1
1894.8431	9.5	-70.2	6.1	A2
1899.532	10.05	-69.3	--	A2
1900.8257	10.52	-66.2	7.8	A4
1919.5233	8	-72	6.3	A1
1921.8667	10.5	-71	6.3	A2
1923.6014	10.5	-63.5	6.5	A3
1926.0851	10.5	-63.5	6.5	A3
1929.0452	10.5	-64.5	6.9	A3
1929.2037	9.9	-69.39	5.5	A2
1932.1747	8.15	-71.97	6.8	A1
1933.8421	8.38	-71.78	6	A1
1935.2738	10.5	-62	6.5	A3
1939.7843	10.5	-64	5.6	A3
1940.4776	10	-68	5.6	A4
1942.3451	10	-65	6	A3
1945.9763	10	-62	6.5	A3
1950.5154	7.6	-72.75	6.1	A1
1950.5888	9.7	-69.8	6.6	A2
1952.299	6.9	-72.05	6.8	A1
1954.9254	10.9	-61.4	6.3	A3
1956.8757	8.15	-71.05	5.5	A1
1957.7521	10.94	-62.8	6.1	A3
1957.7568	10.92	-62.81	6.7	A3

1957.9827	10.46	-62.58	5.9	A3
1961.7797	10.67	-62.52	6.3	A3
1961.8884	10.59	-62.74	6.2	A3
1961.8886	10.4	-62.76	6.4	A3
1962.8967	10.2	-62.9	5.5	A3
1962.99	10.3	-61.7	6.1	A3
1963.5322	10.4	-62.6	6.3	A3
1965.8586	11.21	-61.77	5.8	A3
1967.5753	10.68	-67.4	6.5	A4
1968.7193	10.76	-62.7	6.2	A3
1970.0723	7.49	-72.09	5.6	A1
1973.6624	7.24	-72.85	5.7	A1
1974.4457	10.61	-63.47	5.7	A3
1975.1742	9.13	-69.87	5.5	A2
1975.2586	10.08	-69.65	6	A2
1977.9443	9.56	-69.52	5.5	A2
1981.795	8.52	-72.35	5.5	A1
1982.5048	7.7	-72.12	5.5	A1
1983.1828	10.9	-62.04	5.9	A3
1986.4427	10.42	-62.91	5.9	A3
1986.5444	10.8	-69.35	5.6	A2
1989.327	11.1	-68.18	5.7	A4
1993.554	6.46	-71.12	5.9	A1
1994.413	7.42	-72	6.1	A1
1997.0005	7	-72.19	6	A1
1997.25	11.08	-61.38	5.6	A3
1997.4433	6.97	-72.64	5.5	A1
1997.52	10.54	-63.52	6.9	A3
2000.7585	11.02	-62.3	5.9	A3
2003.1219	9.72	-70.33	5.8	A2
2005.8245	10.85	-61.88	5.5	A3
2006.5906	10	-70.64	5.5	A2
2006.744	10.8	-61.3	6.1	A3
2006.7446	10.78	-61.32	5.5	A3
2007.5396	7.19	-72.16	5.5	A1
2009.338	10.21	-67.03	5.6	A4
2009.6982	10.81	-67.91	6.4	A4
2009.9051	10.46	-69.74	5.6	A2

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de simplificar la descripción de los resultados, la explicación de los cuatro pases del análisis espectral será descrita en detalle sólo para el primer caso presentado en este estudio. Para las siguientes secuencias semiperiódicas y el resto de los casos, se presenta las figuras de los cuatros pases del análisis espectral, pero se describirá sólo los resultados obtenidos en el último pase.

5.1 Japón

5.1.1 Secuencias semiperiódicas dentro del intervalo de tiempo 1890-2012.

Debido a que la información de eventos sísmicos con magnitudes $M \geq 8.0$ está aparentemente completa a partir del año 1890 (figura 5.1), dicha fecha se tomó como tiempo inicial de la serie de tiempo.

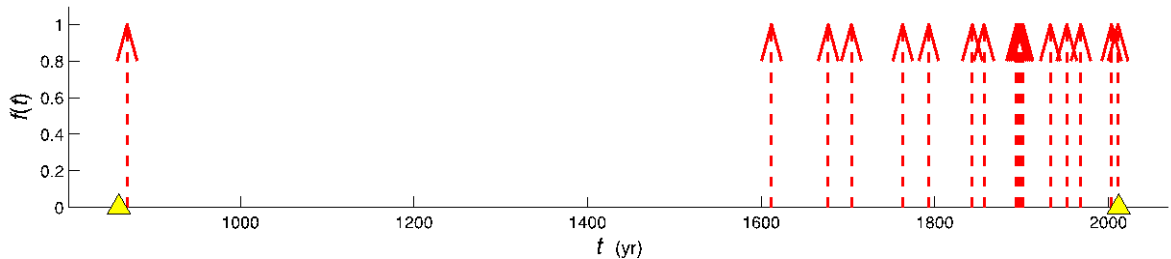


Figura 5.1. Serie de tiempo con las ocurrencias de episodios de liberación de energía en el área de estudio de Japón, con magnitudes $M \geq 8.0$. Nótese que antes del año 1600, el catálogo presenta grandes espacios, causados muy probablemente por falta de datos históricos y después de 1890 se densifica la información del catálogo

El análisis espectral permitió identificar dos secuencias semiperiódicas. La primera secuencia está conformada por 4 eventos y la segunda por 3 eventos.

5.1.1.1 Primera secuencia semiperiódica entre los años 1890-2012

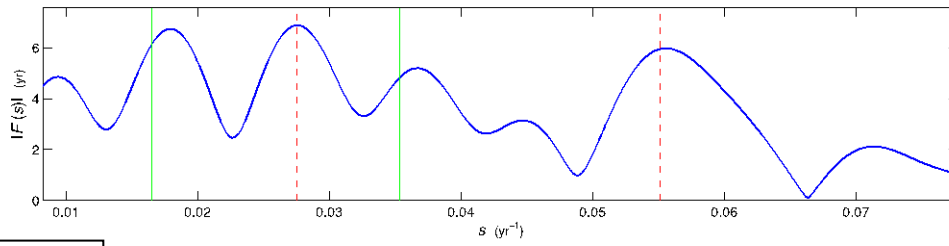
1. La serie inicial contiene $N=10$ eventos sísmicos distribuidos a lo largo de un tiempo $T=122$ años. En el primer pase (figura 5.2), calculamos el espectro de frecuencias correspondiente a dicha serie y al seleccionar el pico espectral con frecuencia $s_p = 0.0275 \text{ años}^{-1}$, se obtuvo un peine con período $\tau_p = 36.3095$ años y fase $\varphi_p = -1.383$, identificando $K=4$ eventos de la serie cuyos años son: $t_1 = 1898.4246$, $t_2 = 1933.1663$, $t_3 = 1968.3716$ y $t_4 = 2003.7337$, asociados a dicho peine con error estándar $\sigma = 2.885$ años.
2. De los $N=10$ eventos de la serie inicial, fueron conservados aquellos cuya distancia al diente más cercano del peine obtenido fuese ≤ 0.25 veces el período. Un total de $N=9$ eventos cumplieron con esa condición y fueron utilizados para realizar el segundo pase (figura 5.2). Se obtuvo el espectro de frecuencia y se seleccionó el pico espectral correspondiente a $s_p = 0.0275 \text{ años}^{-1}$. El peine construido resultó similar al anterior con $\tau_p = 36.3095$ años y $\varphi_p = -1.3767$, cuyos eventos asociados son exactamente los mismos del primer pase; esta vez con $\sigma = 2.8472$ años, menor que el del primer pase.
3. En el tercer pase, fueron conservados los eventos cuya distancia al diente más cercano del peine obtenido en el segundo pase fuese $\leq 1/4.5$ veces el período. Los mismos nueve eventos utilizados en el pase anterior cumplieron con esa condición (figura 5.3). Se obtuvo el espectro de frecuencias y se seleccionó un pico espectral correspondiente $s_p = 0.0275 \text{ años}^{-1}$. El peine obtenido fue exactamente igual que en el pase anterior, con los mismos eventos asociados.

4. En el cuarto y último pase se utilizó los cuatro eventos asociados al peine obtenido anteriormente. La forma del espectro resultante (figura 5.3) define claramente el período del peine asociado a la secuencia $\tau_p = 35.0574$ años con $\varphi_p = -1.494$. El error estándar de la secuencia de los $K=4$ eventos asociados al peine es $\sigma = 0.2413$ años, bastante pequeño, pues es apenas una fracción 0.007 del período. La ubicación geográfica de los 4 eventos de la secuencia identificada se muestra en la figura 5.13.

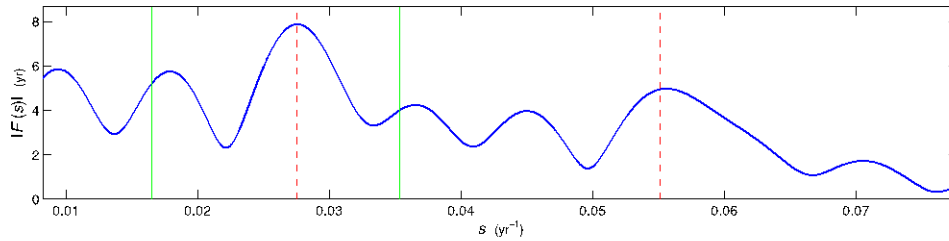
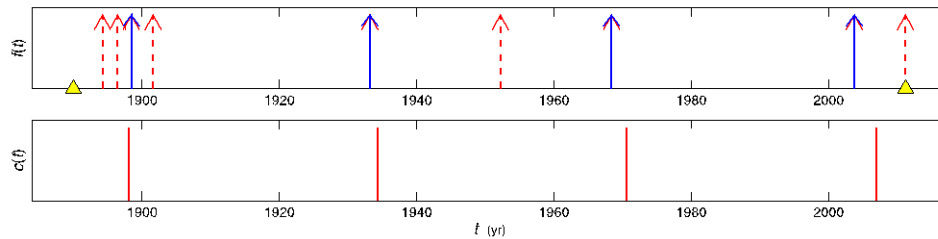
La probabilidad de ocurrencia del peine es $P_c = 0.99368$, lo que indica que la probabilidad de que la secuencia obtenida no sea aleatoria es considerablemente alta. De manera referencial esta secuencia será llamada J1.

El tiempo del próximo evento a ocurrir, perteneciente a J1, es $t_{k+1} = 2038.568 \pm 0.483$, donde la incertidumbre corresponde a $\pm 2\sigma$ ($q = 2$) que determina 95.45% de confianza. En la figura 5.4 se muestra la secuencia y el peine calculado junto con la representación de la función de densidad de probabilidad del pronóstico (pdf), que ha sido normalizada de manera que su área total sea P_c .

La probabilidad de que el evento pronosticado ocurra en un intervalo de $\pm 2\sigma$ centrado sobre el tiempo t_{k+1} es $P_{cq} = 0.9485$, la probabilidad poissoniana de que ocurra al menos un evento en dicho intervalo, como resultado de distribución aleatoria con probabilidad uniforme de los 10 eventos a lo largo del tiempo T , es $\pi_{1+} = 0.0761$, la probabilidad poissoniana de que ocurra al menos un evento en el intervalo pronosticado, tomando en cuenta sólo los eventos ajenos a la secuencia es $\pi_{1+}^* = 0.0464$ y la probabilidad de que ocurra al menos un evento en el intervalo pronosticado, perteneciente a la secuencia y/o ajeno a ésta es $P_{cq} + \pi_{1+}^* - P_{cq}\pi_{1+}^* = 0.9509$.



Primer pase



Segundo pase

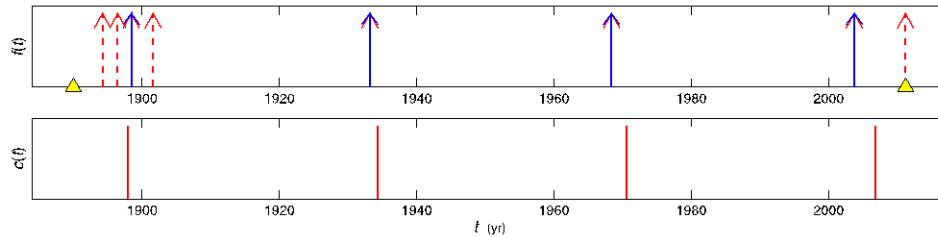


Figura 5.2. Identificación de la primera secuencia semiperiódica en Japón. primer y segundo pase. En cada pase el espectro muestra la frecuencia seleccionada con una línea roja punteada. Las líneas verdes indican las frecuencias mínima y máxima referenciales. Bajo cada espectro se muestra las series, en donde las flechas azules son los eventos más cercanos al peine. Cada peine se muestra con líneas rojas sólidas en la gráfica siguiente a las series respectivas y son construidos a partir de la frecuencia y la fase asociados al pico espectral seleccionado en cada caso.

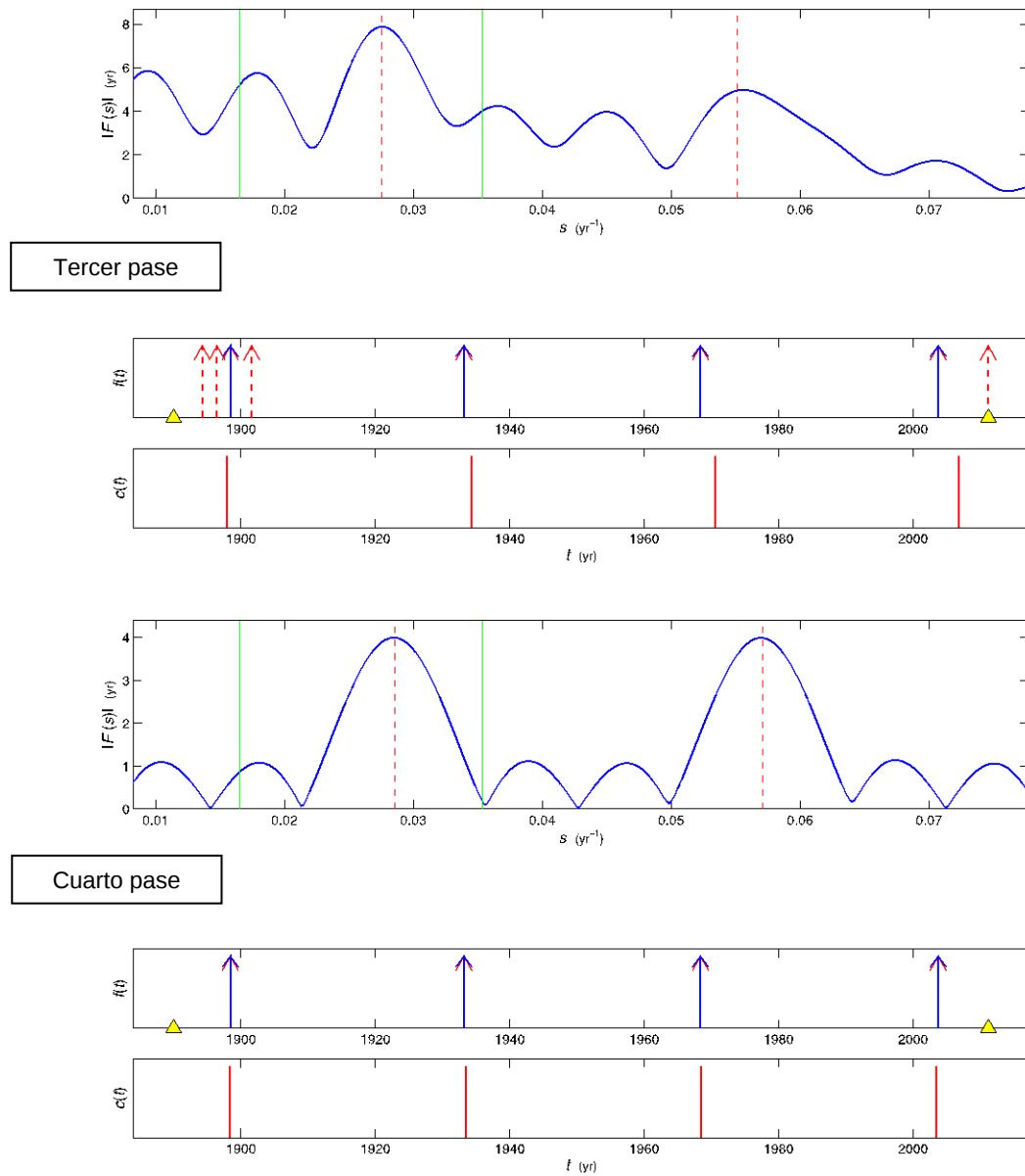


Figura 5.3. Identificación de la primera secuencia semiperiódica en Japón. Tercer y cuarto pase. Simbología igual a la figura 5.2.

La ganancia de probabilidad es $P_G = 12.4985$ ($P_G = 1$ implica que la probabilidad es la misma con o sin pronóstico) y la ganancia de información es $I_G = 3.6437$ bits, (a $P_G = 1$ corresponde $I_G = 0$, que significa que no hubo ganancia de información por hacer el pronóstico) .

Estos valores de las probabilidades y las ganancias del pronóstico fueron calculados con incertidumbre de $\pm 2\sigma$, es decir $q = 2$. A continuación se muestra los cálculos para valores de $q=1,2$ y 3 :

Tabla 5.1. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia J1 de Japón.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.6784	0.0388	0.0235	17.6827	4.1443
2	0.9485	0.0761	0.0464	12.4985	3.6437
3	0.9910	0.1119	0.0687	8.8602	3.1473

En la figura 5.4 se muestra una vista en acercamiento de la pdf normalizada a P_c , con la referencia de los límites del intervalo de confianza $\pm 2\sigma$. La función de supervivencia $S(t)$ comienza a decrecer más notablemente dentro del intervalo de confianza, lo que significa que al acercarse a el límite inferior del intervalo de confianza, la probabilidad del que el evento pronosticado no haya ocurrido todavía es cada vez menor, hasta pasar el límite superior del intervalo de confianza, donde la probabilidad tiende a ser constante e igual a la probabilidad de que el peine sea aleatorio $P_\varphi = 0.00632$.

La función de tiempo de vida futura $\Phi(t|\gamma)$ es representada para diferentes tiempos de observación γ (figura 5.4). Para $\gamma \ll t_{K+1}$ comienza a tener valores significativos casi un año antes del tiempo pronosticado; conforme aumenta γ la función de tiempo de vida futura va aumentando más notablemente en los tiempos de ocurrencia dentro del intervalo de confianza, pero después de pasar el límite de dicho intervalo, comienza a tener comportamiento casi constante hasta llegar a $\sim P_c$. Para otros tiempo de observación $\gamma = 2038.5$ y $\gamma = 2039$, ubicados dentro del intervalo de probabilidad de ocurrencia del sismo pronosticado, $\Phi(t|\gamma)$ aumenta más rápido. Para γ posterior al tiempo máximo del intervalo del pronóstico, $\Phi(t|\gamma)$ igualmente aumenta con el tiempo, pero tiende a ser constante

para valores menores que P_c , que disminuyen conforme aumenta γ . En el presente caso, $\Phi(t | \gamma)$ es cercano a cero, para $\gamma > 2039.7$.

La función de peligro $h(t)$ (figura 5.4) comienza ser significativa a partir del límite inferior del intervalo de confianza del pronóstico. El tiempo de máximo peligro corresponde al año 2039.4081, y luego $h(t)$ comienza a disminuir nuevamente hasta considerar el pronóstico una falsa alarma. En este caso, el pronóstico podría considerarse falsa alarma si después de 2040, aproximadamente, el sismo pronosticado no ha ocurrido.

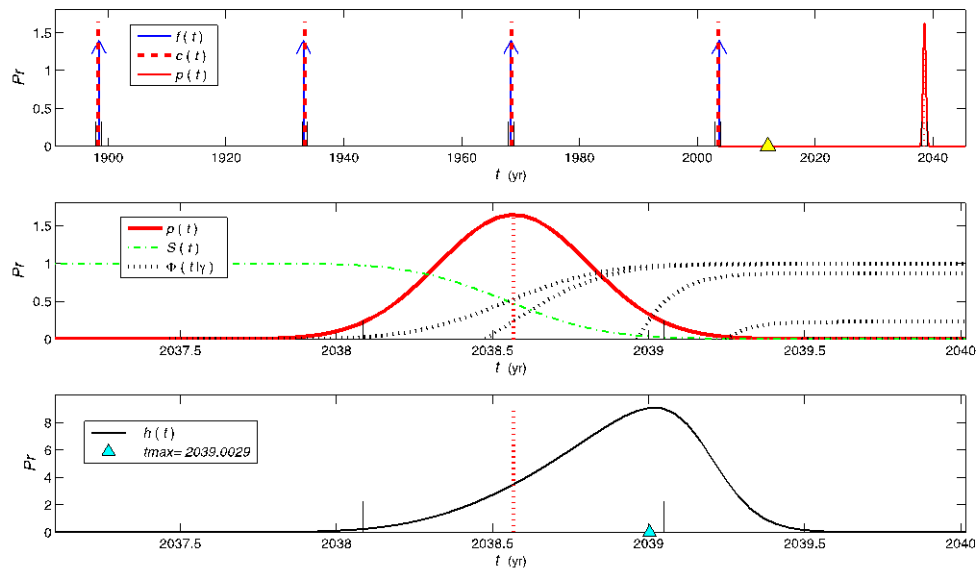


Figura 5.4. Gráficas de evaluación del pronóstico en la 1era secuencia de Japón. En la gráfica superior se muestra los eventos de la secuencia semiperiódica $f(t)$, los dientes del peine $c(t)$ y la función de densidad de probabilidad (pdf) del evento pronosticado $p(t)$. El triángulo amarillo indica el año 2012 (tiempo final de la serie). En la gráfica de la mitad, se muestra una vista ampliada de $p(t)$, junto con la función de supervivencia $S(t)$ y la función de tiempo de vida futura $\Phi(t | \gamma)$. En la gráfica inferior, se muestra la función de peligro $h(t)$.

5.1.1.2 Segunda secuencia semiperiódica entre los años 1890-2012

Luego de identificar la primera secuencia, se realizó de nuevo el análisis espectral para los 6 eventos restantes de la serie. Se identificó una segunda secuencia de 3 eventos asociados a un peine con $\tau_p = 57.547$ años y $\varphi_p = 0.625$ (figura 5.5 y 5.6). Los eventos de la secuencia semiperiódica son: $t_1 = 1896.4547$, $t_2 = 1952.17229$ y $t_3 = 2011.1897$ (figura 5.13), con $\sigma = 1.3709$ años.

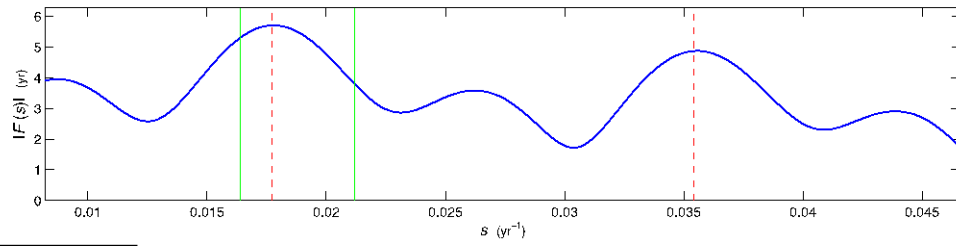
La probabilidad de ocurrencia del peine es $P_c = 0.54629$ y al contrario de la primera secuencia, la probabilidad de que sea aleatoria es considerablemente alta.

El tiempo del próximo evento a ocurrir, perteneciente a la secuencia, es $t_{k+1} = 2068.367 \pm 2.742$. Sin embargo, tomando en cuenta el relativamente bajo valor de P_c , el pronóstico basado en esta secuencia conformada por sólo tres no se considera confiable.

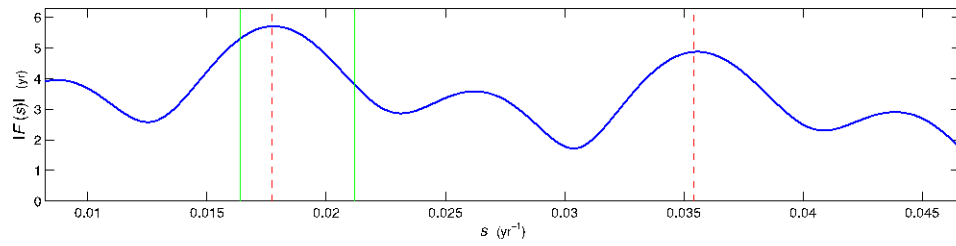
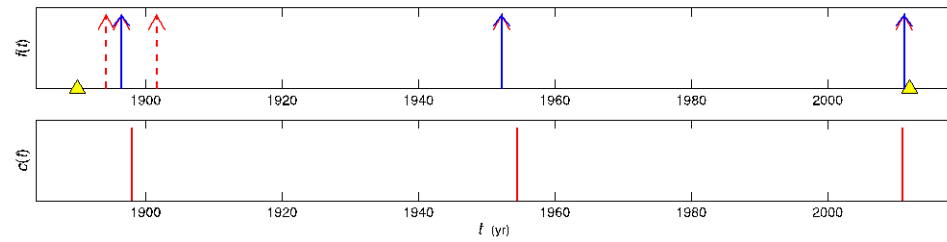
A continuación se muestra las probabilidades y las ganancias del pronóstico para valores de $q=1,2$ y 3 :

Tabla 5.2. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la segunda secuencia de Japón.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.3730	0.2013	0.1456	2.3064	1.2057
2	0.5214	0.3620	0.2699	1.7971	0.8457
3	0.5448	0.4904	0.3762	1.4600	0.5460



Primer pase



Segundo pase

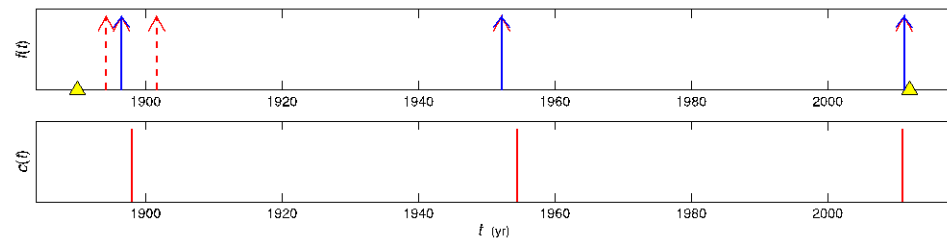


Figura 5.5. Identificación de la segunda secuencia semiperiódica en Japón. Primer y segundo pases. Simbología igual a la figura 5.2.

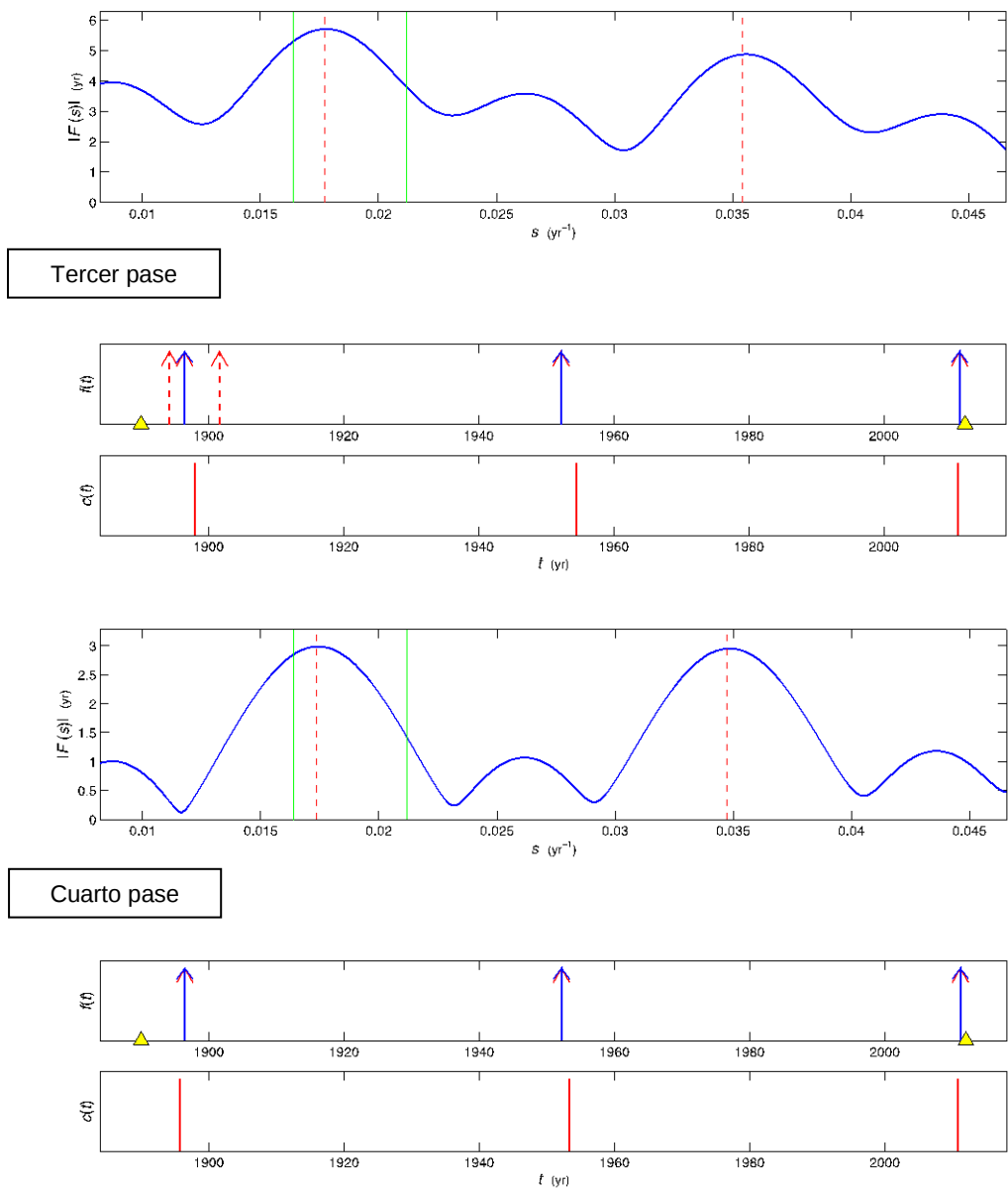


Figura 5.6. Identificación de la segunda secuencia semiperiódica en Japón. Tercer y cuarto pases. Simbología igual a la figura 5.2.

5.1.2 Secuencias semiperiódicas dentro del intervalo de tiempo 1670-2012.

Como el máximo periodo identificable no puede ser mayor que el tiempo total que dura la serie de eventos estudiada, se intentó el análisis incluyendo eventos antiguos, para tratar de ver mayores periodos a expensas de tener menor confiabilidad y/o menor homogeneidad de los datos. Se encontró que la inclusión de datos previos a 1670 no permitía obtener resultados satisfactorios, por lo que el análisis de períodos largos fue hecho considerando datos a partir de dicho año.

En el intervalo 1670-2012, para $M \geq 8.0$, se identificó una secuencia, de $K = 4$ eventos $t_1 = 1677.27945$, $t_2 = 1793.12877$, $t_3 = 1898.42468$ y $t_4 = 2003.73377$ (figuras 5.7 y 5.8), con $\tau_p = 108.228$ años, $\sigma = 4.101$ años, $P_c = 0.5215$ y $t_{K+1} = 2113.708 \pm 8.202$. A esta secuencia le será asignado el nombre referencial J2.

Los dos últimos eventos de J2 (t_3 y t_4) coinciden con el primero y el último evento de la secuencia J1 (primera secuencia entre 1890-2012) formada por: $t'_1 = 1898.42468$, $t'_2 = 1933.16638$, $t'_3 = 1968.37168$ y $t'_4 = 2003.73377$. Es posible que J1 y J2 sean secuencias del mismo proceso, pero que en J2 no se observe los eventos intermedios (t'_2 y t'_3), debido a que quizás falten datos previos a 1890 en el catálogo y no se logra identificar la secuencia con todos los eventos. Además, el período de la secuencia identificada entre 1670-2012 es $\tau_p = 108.2278$ años con $\sigma = 4.1012$ años, casi exactamente tres veces (3.087) el período de la secuencia del primer caso $\tau'_p = 35.0574$ años, por lo que J2 podría ser una secuencia submúltiplo de la secuencia identificada entre 1890-2012.

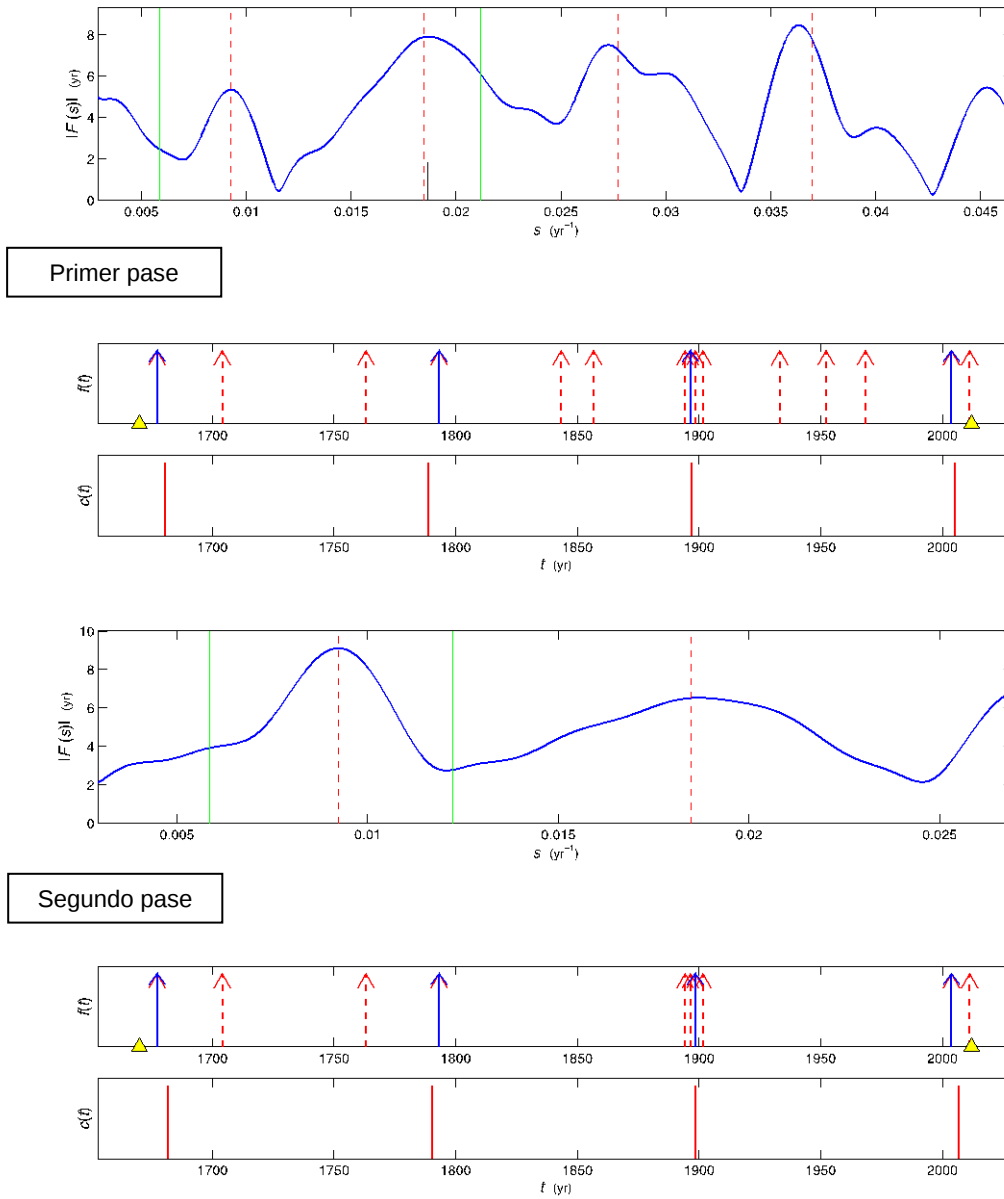


Figura 5.7. Identificación de la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1670-2012. Primer y segundo pases. Simbología igual a la figura 5.2. En el primer espectro de frecuencias se muestra una línea continua negra corta que indica que esa frecuencia fue rechazada por no encontrar eventos cercanos dentro del límite de distancia aceptado.

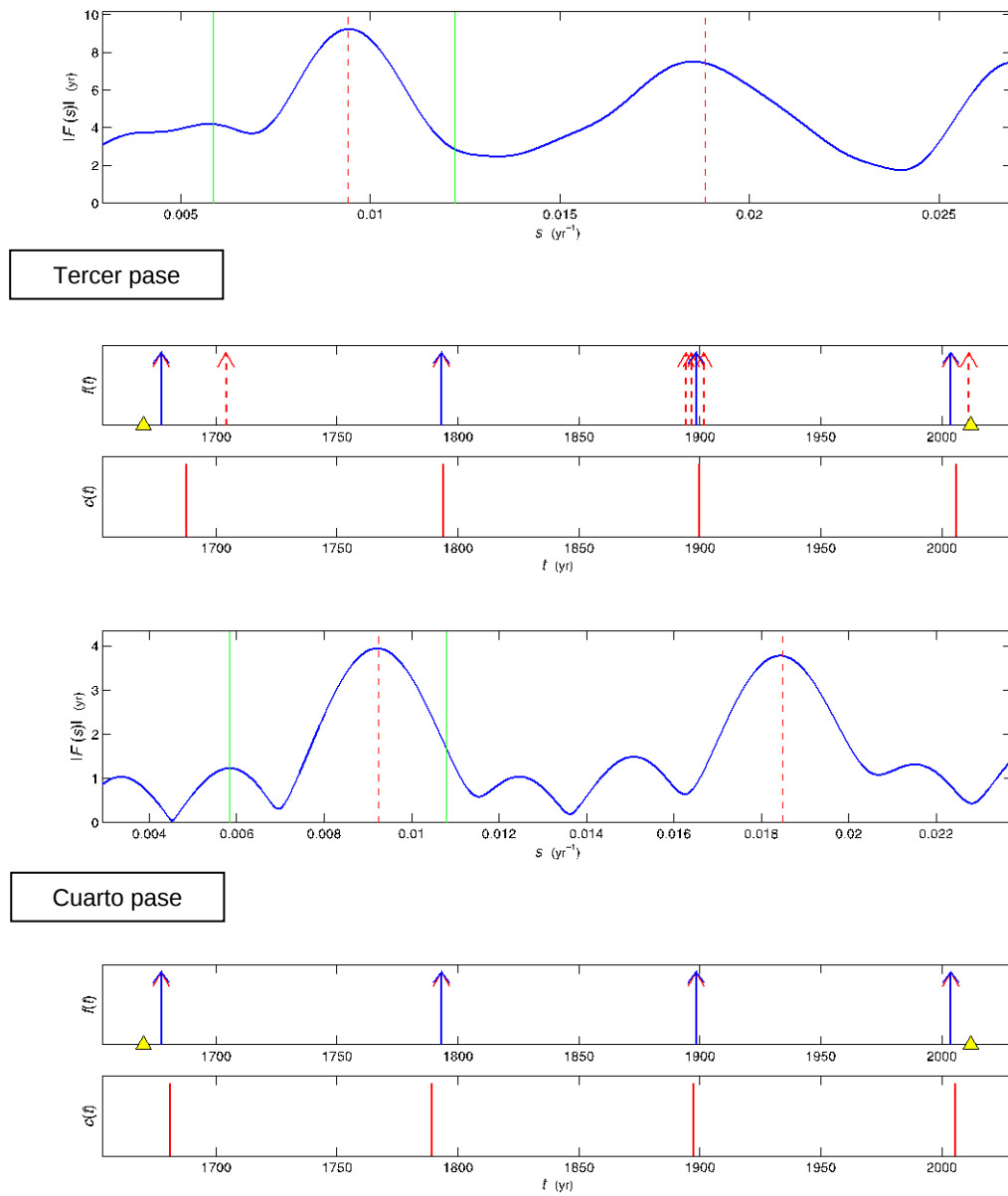


Figura 5.8. Identificación de la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1670-2012. Tercer y cuarto pases. Simbología igual a la figura 5.2.

5.1.3 Pronóstico del evento sísmico del año 2003.73

El sismo de 2003.7 es el último evento, hasta ahora ocurrido, perteneciente a la primera secuencia identificada (entre 1890-2012). Intentaremos el *postnóstico* (pronóstico de un evento ya ocurrido) de dicho evento, al que nos referiremos simplemente como pronóstico. Se realizó dos pruebas: en la primera prueba suponemos que el año actual es 1980, cercano al penúltimo evento de la secuencia ocurrido en el año 1968.37 y en la segunda prueba suponemos que ya estamos en 2002 a un poco más de un año del evento que se quiere pronosticar.

5.1.3.1 Caso de prueba 1: año actual 1980

La serie está limitada entre los años 1890-1980. El resultado del análisis espectral de la serie, con $N=8$ eventos, es un peine con $K = 3$, $\tau_p = 34.884$ años, $\sigma = 0.228$ años (figura 5.9). Satisfactoriamente, los eventos involucrados corresponden a los 3 primeros eventos de la secuencia J1: $t_1 = 1989.4246$, $t_2 = 1933.1663$ y $t_3 = 1968.3716$.

El pronóstico del próximo evento a la secuencia a ocurrir es $t_{K+1} = 2003.088 \pm 0.456$; lo que indica que, en este caso, el pronóstico funcionó bastante bien (figura 5.10).

Las probabilidades de este pronóstico son similares a las probabilidades del pronóstico, calculado con eventos hasta 2012. A continuación se muestran las probabilidades y las ganancias del pronóstico para valores de $q=1,2$ y 3:

Tabla 5.3. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia entre 1890-1980.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.6306	0.0397	0.0250	16.1137	4.0102
2	0.8816	0.0778	0.494	11.4018	3.5112
3	0.9212	0.1145	0.0732	8.0988	3.0177

La función de supervivencia $S(t)$ indica que el sismo ocurrió cuando la probabilidad de que todavía no hubiese ocurrido era bastante baja. Para valores de γ cercanos al tiempo de ocurrencia del evento, el tiempo de vida futura del pronóstico tiende a ser todavía alto. Además, el tiempo de ocurrencia se ubica en el rango de crecimiento de la función de peligro $h(t)$ (figura 5.10).

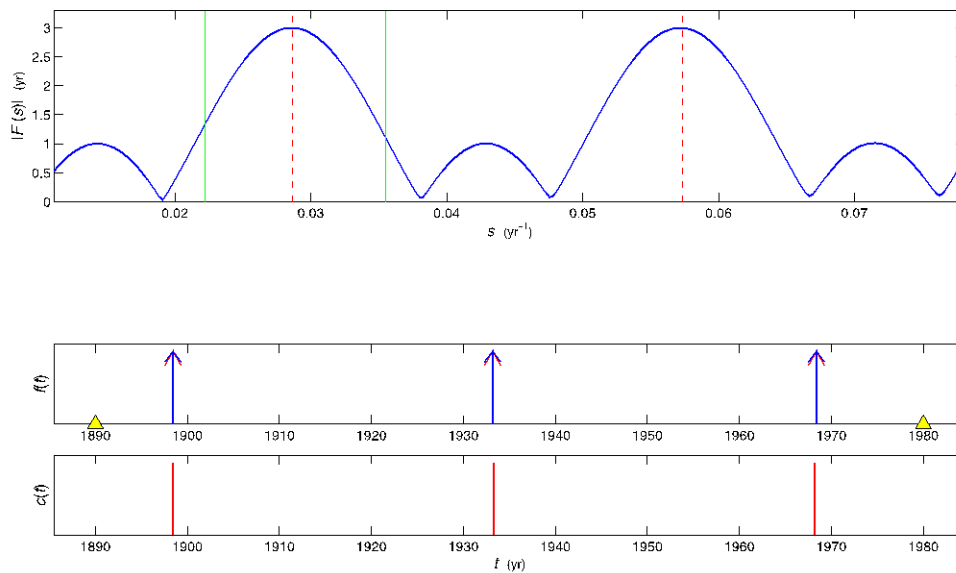


Figura 5.9. Identificación de la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1890-1970. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase. Simbología igual a la figura 5.2.

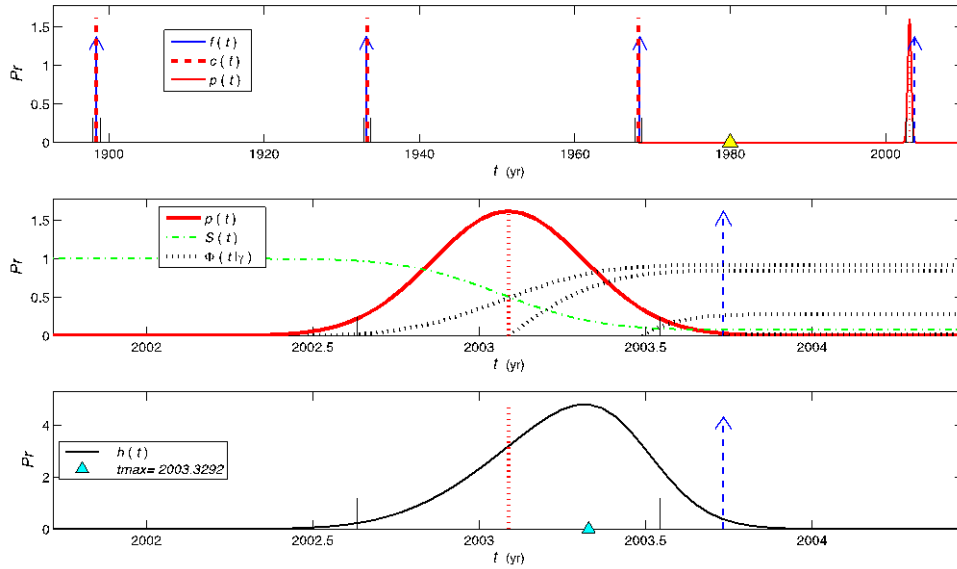


Figura 5.10. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1890-1970. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t|\gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4. Las flechas discontinuas de los paneles medio e inferior señalan el tiempo real de ocurrencia del evento pronosticado.

5.1.3.2 Caso de prueba 2: año actual 2002

La serie de tiempo limitada entre 1890-2002, contiene los mismos $N=8$ eventos que la serie del caso anterior, ya que desde 1968 hasta el 2002 no hay ocurrencia de sismos con magnitudes $M \geq 8.0$. Mediante el análisis espectral se obtuvo un peine con $K=3$ dientes con $\tau_p = 35.00$ años, cuyos eventos asociados resultaron ser los eventos esperados: $t_1 = 1989.4246$, $t_2 = 1933.1663$ y $t_3 = 1968.3716$, con $\sigma = 0.1929$ (figura 5.11).

El tiempo de ocurrencia del evento pronosticado de la secuencia es $t_{k+1} = 2003.321 \pm 0.386$. Aunque el tiempo real de ocurrencia del sismo se ubica justo después del límite superior del intervalo de confianza ($\pm 2\sigma$), sigue siendo una muy buena aproximación, ya que el error estándar es considerablemente

pequeño, $2\sigma \ll \tau_p$. Para efectos de pronóstico, el hecho de que el sismo haya ocurrido con una diferencia de menos de medio año, es un resultado bastante bueno.

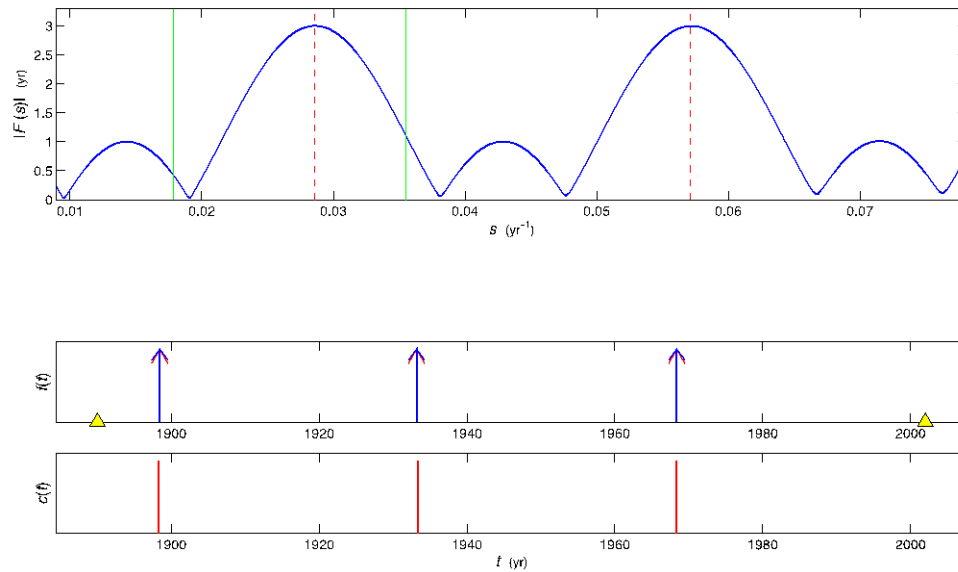


Figura 5.11. Identificación de la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1890-2002. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase. Simbología igual a la de la figura 5.2.

Las probabilidades de este pronóstico son similares a las probabilidades del pronóstico calculado con eventos hasta 1980 y hasta 2012. A continuación se muestran las probabilidades y las ganancias del pronóstico para valores de $q=1,2$ y 3:

Tabla 5.4. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia entre 1890-2002.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.6812	0.0272	0.0171	25.2562	4.6586
2	0.9524	0.0536	0.0339	17.7871	4.1528
3	0.9951	0.0794	0.0504	12.5416	3.6486

En el tiempo real de ocurrencia del evento, la función $S(t)$ se acerca al valor de probabilidad de ocurrencia aleatoria. Aún así, según $\Phi(t|\gamma)$ todavía es válido el pronóstico en el tiempo en que ocurrió el sismo. Lo más curioso es que el evento ocurrió aproximadamente en el tiempo en que $h(t)$ alcanza su máximo (figura 5.12).

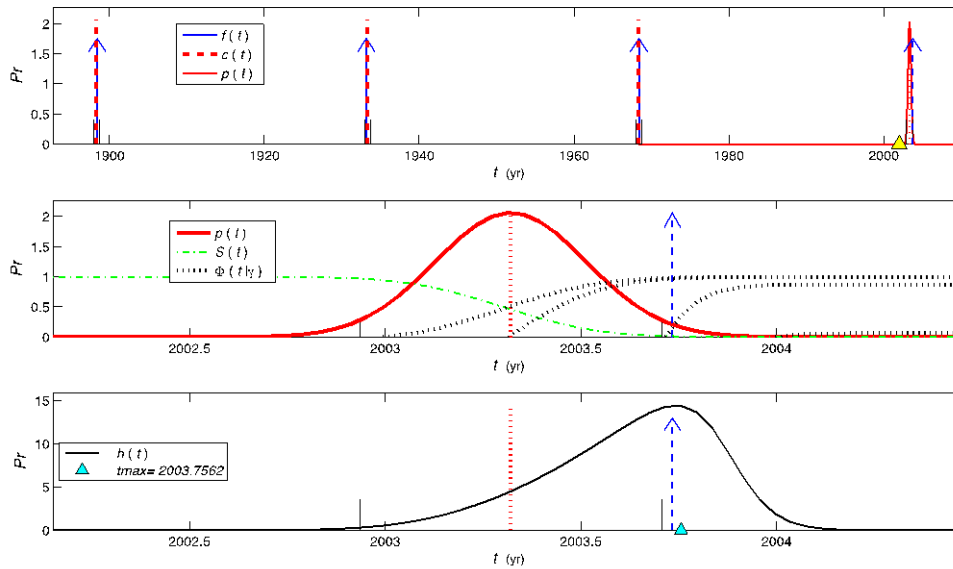


Figura 5.12. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en Japón, entre 1890-2002. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t|\gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

5.1.4 Ubicación de los eventos de cada secuencia identificada

A continuación se muestra un mapa representando la ubicación de los eventos pertenecientes a las secuencias identificadas entre 1890-2012 en el área de estudio de Japón:

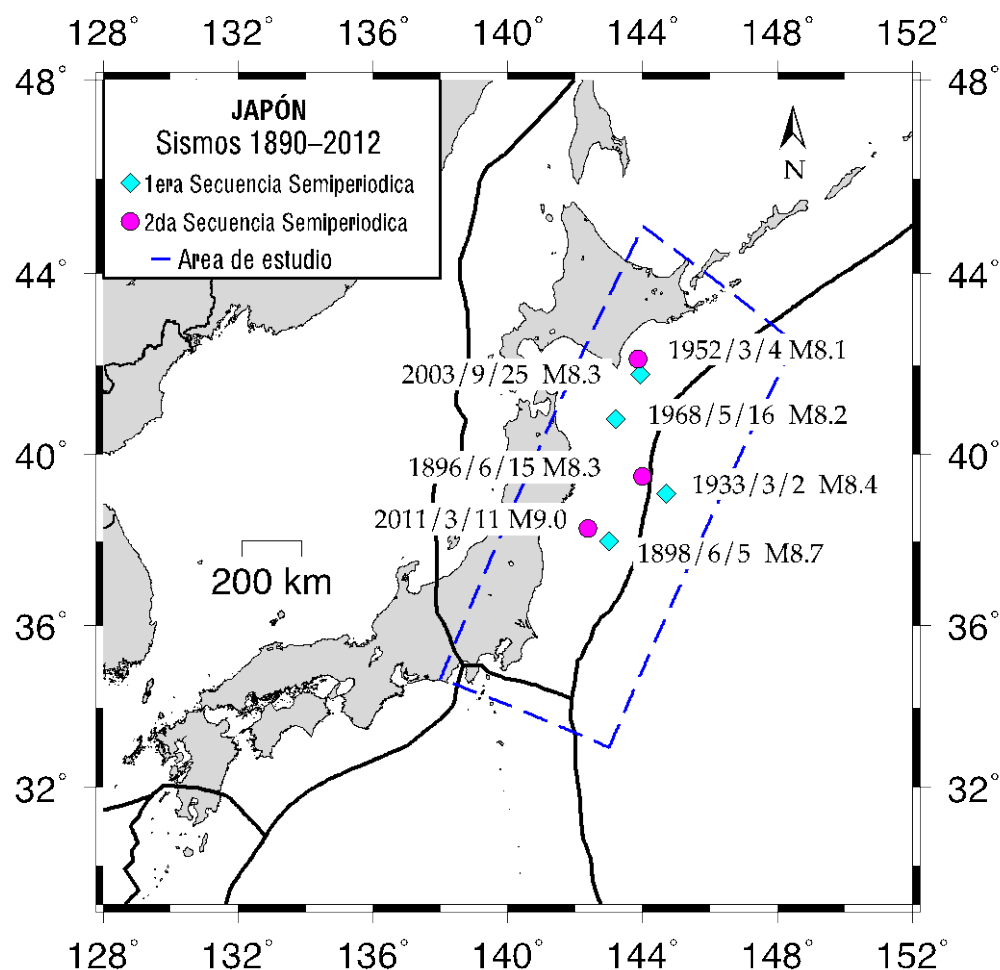


Figura 5.13. Mapa de ubicación de los eventos pertenecientes a las secuencias identificadas en el área de estudio de Japón

5.2 Venezuela

5.2.1 Área 1

La serie de tiempo utilizada abarca 1780-2012, con sismos de magnitudes $M \geq 6.0$, ya que en años previos se observa un gran espacio sin ocurrencia de sismos (figura 5.14), que posiblemente se deba a la falta de información histórica en el catálogo.

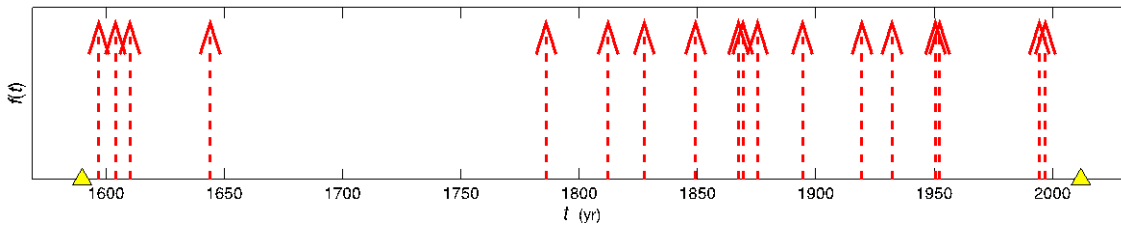


Figura 5.14. Serie de tiempos de ocurrencia de los sismos con magnitudes $M \geq 6.0$ en el área 1 de Venezuela, entre los años 1590 y 2012. Nótese que entre 1644 y 1780, hay más de 100 años de ausencia de eventos sísmicos, por lo que la serie utilizada se restringe al intervalo entre 1780 y 2012.

5.2.1.1 Primera secuencia semiperiódica del área 1

A partir de una serie de $N=14$ eventos, luego de cuatro pases de análisis espectral (figura 5.15 y 5.16) se identificó un peine con $\tau_p = 42.3357$ años y $\varphi_p = 0.878$, al cual se asocia una secuencia de 6 eventos con $\sigma = 3.7216$ años. Los tiempos de los eventos de la secuencia son: $t_1 = 1786.00$, $t_2 = 1827.4788$, $t_3 = 1869.1307$, $t_4 = 1919.5233$, $t_5 = 1952.2990$ y $t_6 = 1997.0005$ (figura 5.43). La probabilidad de que el peine no sea aleatorio es $P_c = 0.62550$.

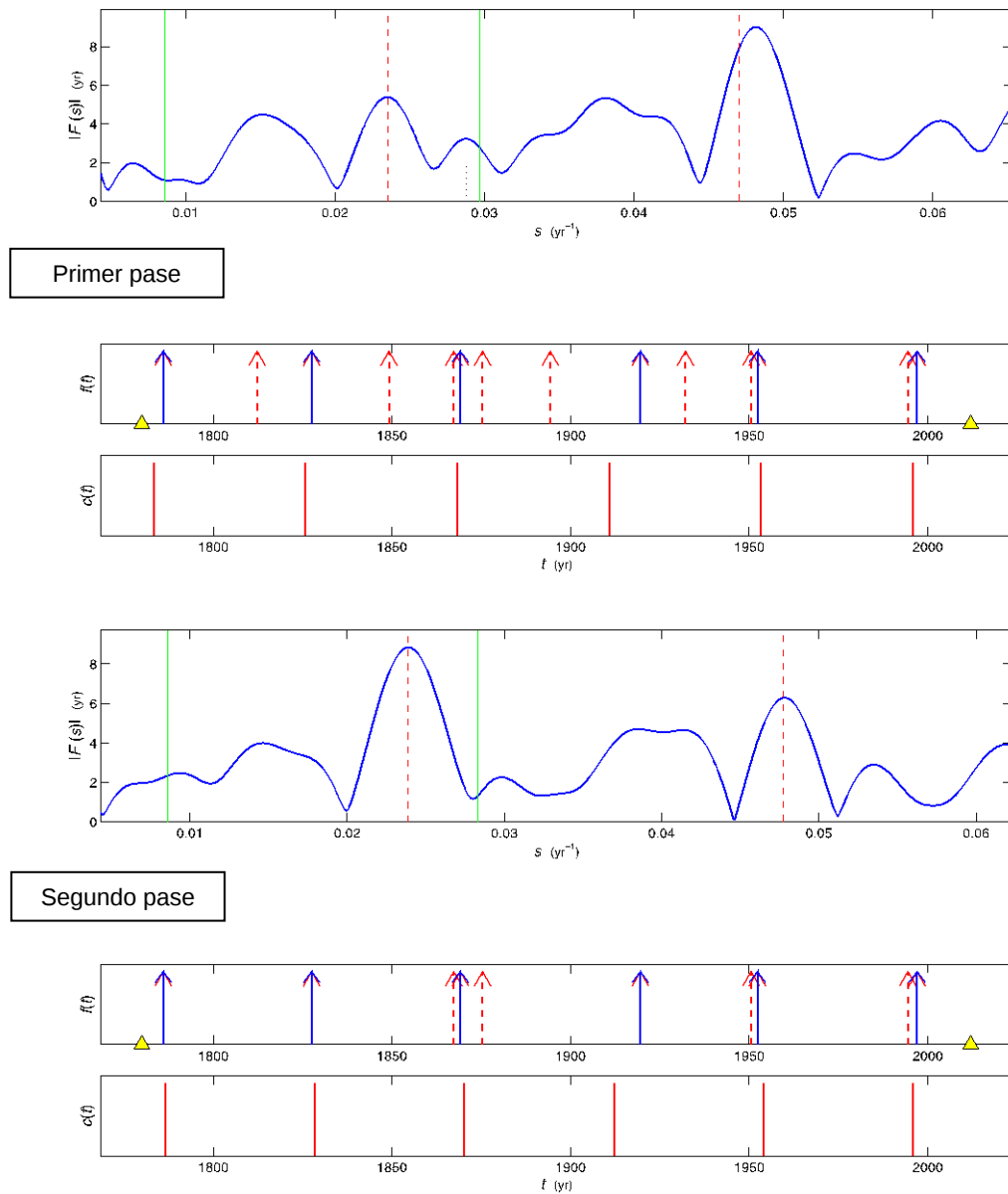


Figura 5.15. Identificación de la primera secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela , entre 1780-2012. Primer y segundo pases. En el primer espectro de frecuencias se muestra una línea corta punteada negra que indica que esa frecuencia fue rechazada ya que el peine obtenido tenía un error estándar muy grande. Simbología igual a la de la figura 5.2..

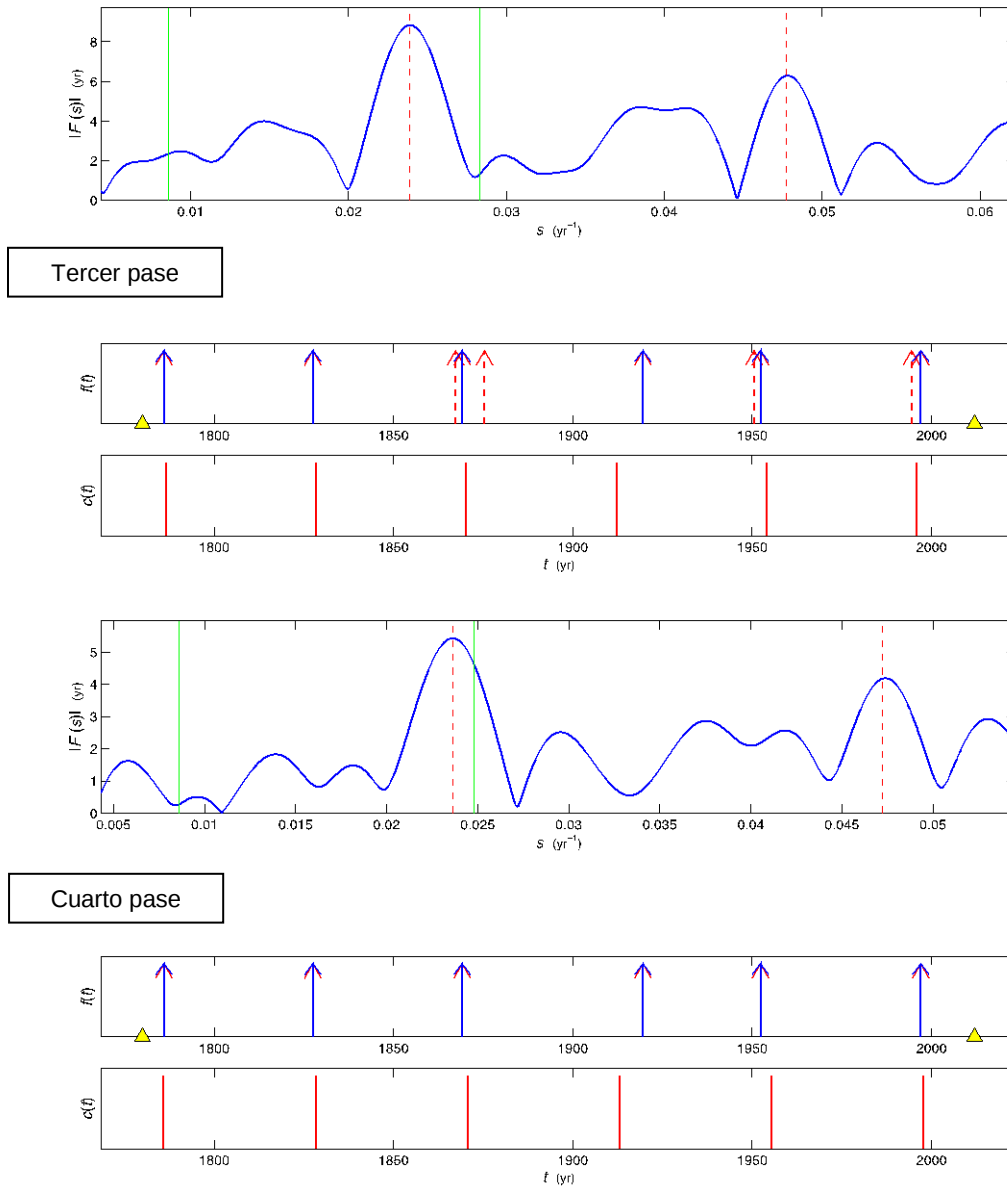


Figura 5.16. Identificación de la primera secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela , entre 1780 y 2012. Tercer y cuarto pases. Simbología igual a la de la figura 5.2.

El tiempo del evento pronosticado, perteneciente a la secuencia, es $t_{k+1} = 2039.931 \pm 7.443$, con un intervalo de confianza del 95.45%. Las probabilidades de ocurrencia dentro del intervalo del pronóstico son: $P_{cq} = 0.5970$, $\pi_{1+} = 0.5927$, $\pi_{1+}^* = 0.4015$ y $P_{cq} + \pi_{1+}^* - P_{cq}\pi_{1+}^* = 0.7588$. La ganancia de

probabilidad es $P_G = 1.2802$ y la ganancia de información es $I_G = 0.3564$ bits. Los valores de las probabilidades y las ganancias del pronóstico se calcularon con una incertidumbre de $\pm 2\sigma$, es decir $q = 2$. A continuación se muestran los cálculos para valores de $q=1,2$ y 3 :

Tabla 5.5. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la primera secuencia en el área 1 de Venezuela.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.4270	0.3618	0.2264	1.5386	0.6217
2	0.5970	0.5927	0.4015	1.2802	0.3564
3	0.6238	0.7401	0.5370	1.1158	0.1581

En la figura 5.17, la función de supervivencia $S(t)$ indica que a partir del año 2050 aproximadamente, la probabilidad de que todavía el sismo pronosticado no haya ocurrido, es muy baja y tiende al valor de la probabilidad de aleatoriedad del peine $P_\varphi = 0.3745$. La función de tiempo de vida futura $\Phi(t|\gamma)$ muestra que para $\gamma > 2050$, si no ha ocurrido el sismo, la probabilidad de que ocurra en tiempos futuros es casi nula. La función de peligro $h(t)$ alcanza su máximo en $t=2041.3753$ años.

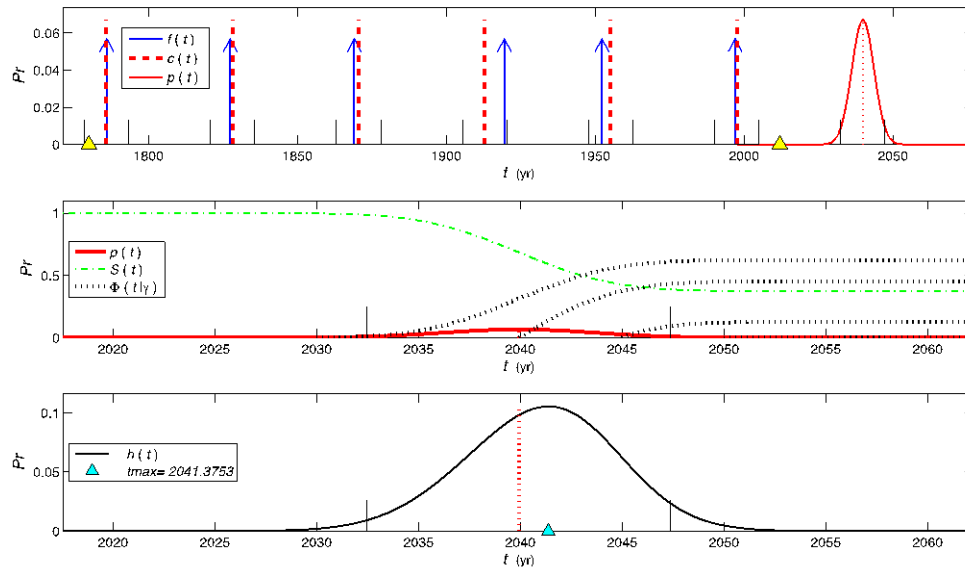


Figura 5.17. Gráficas de evaluación del pronóstico en la 1era secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t|\gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

5.2.1.2 Segunda secuencia semiperiódica del área 1

Luego de identificar la primera secuencia, se utilizaron los 8 eventos restantes que quedaron en la serie. Luego de cuatro pases de análisis espectral (figura 5.18 y 5.19) se identificó un peine con $\tau_p = 60.4166$ años y $\varphi_p = -3.4239$, al cual se asocia una secuencia de 4 eventos con $\sigma = 1.8953$ años. Los tiempos de los eventos de la secuencia son: $t_1 = 1812.2347$, $t_2 = 1875.3772$, $t_3 = 1932.1747$ y $t_4 = 1994.4130$ (figura 5.43). La probabilidad de que el peine no sea aleatorio es $P_c = 0.78001$.

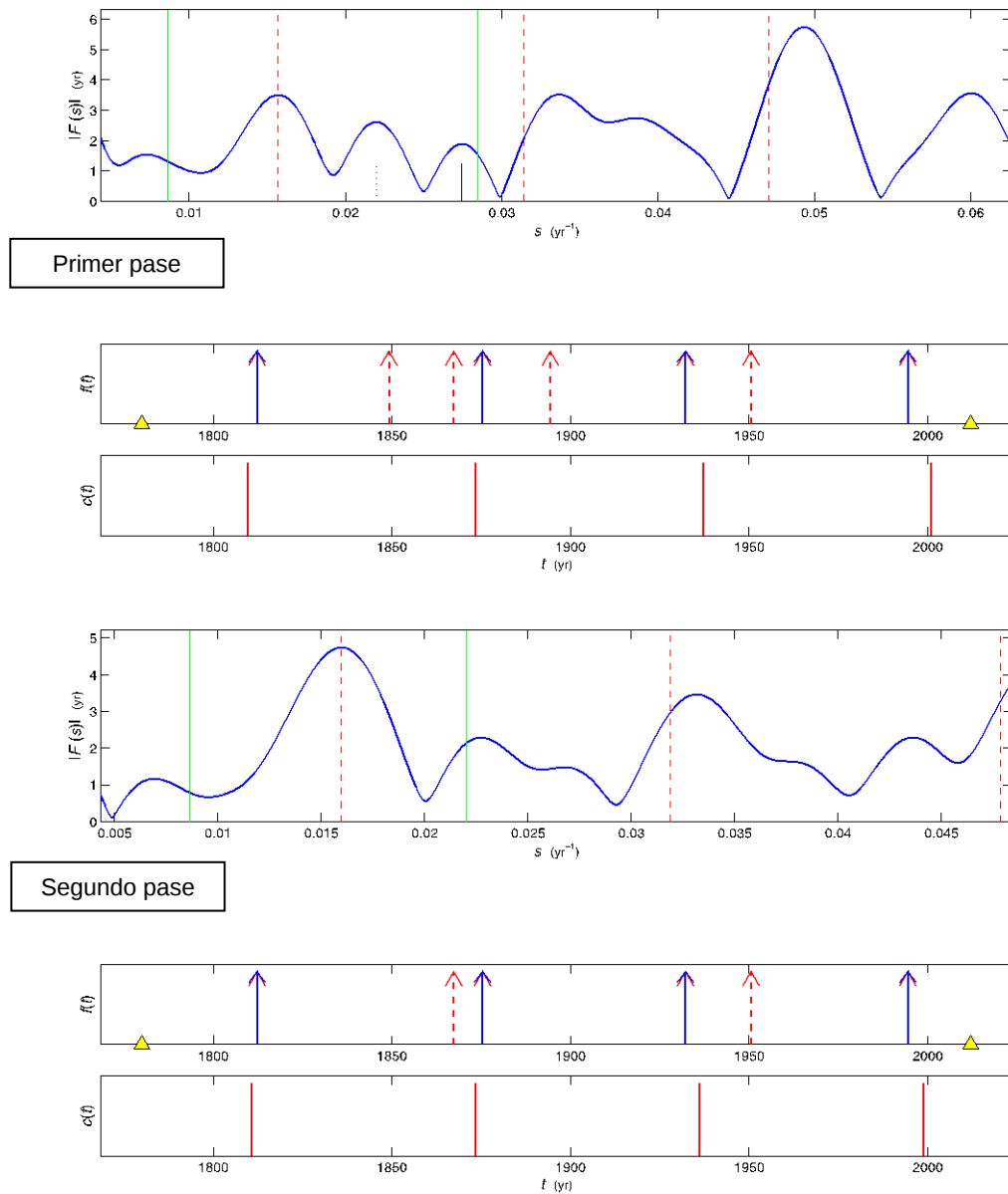


Figura 5.18. Identificación de la segunda secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela , entre 1780 y 2012. Primer y segundo pases. En el primer espectro de frecuencias se muestra una línea corta punteada negra que indica que esa frecuencia fue rechazada manualmente, ya que el peine obtenido tenía un error estándar muy grande y la línea corta continua negra indica que esa frecuencia fue rechazada por no encontrar eventos cercanos dentro del límite de distancia aceptado. Simbología igual a la de la figura 5.2.

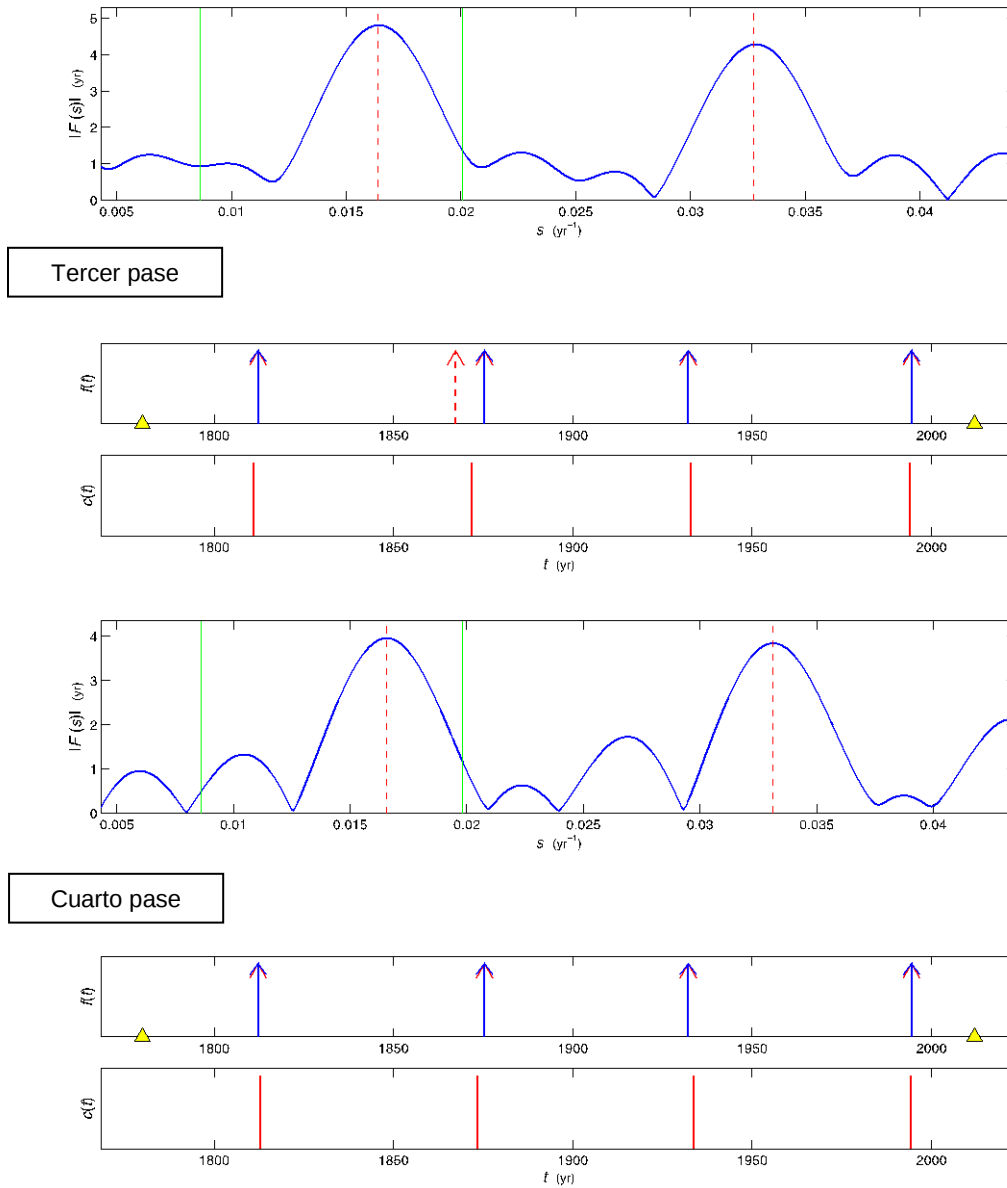


Figura 5.19. Identificación de la segunda secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela , entre 1780 y 2012. Tercer y cuarto pases. Simbología igual a la de la figura 5.2.

El tiempo del evento pronosticado, perteneciente a la secuencia, es $t_{k+1} = 2054.590 \pm 3.791$, con un intervalo de confianza del 95.45%. Las probabilidades de ocurrencia dentro del intervalo del pronóstico son: $P_{cq} = 0.7445$, $\pi_{1+} = 0.3671$, $\pi_{1+}^* = 0.2788$ y $P_{cq} + \pi_{1+}^* - P_{cq}\pi_{1+}^* = 0.8157$. La ganancia de

probabilidad es $P_G = 2.2219$ y la ganancia de información es $I_G = 1.1518$ bits. A continuación se muestran los cálculos para valores de $q=1,2$ y 3 :

Tabla 5.6. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la segunda secuencia en el área 1 de Venezuela.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.5325	0.2045	0.1507	2.9490	1.1518
2	0.7445	0.3671	0.2788	2.2219	1.3835
3	0.7779	0.4965	0.3875	1.7400	0.7991

En la figura 5.20, la función $S(t)$ indica que a partir del año 2059, aproximadamente, la probabilidad de que todavía el sismo pronosticado no haya ocurrido tiende a $P_\varphi = 0.21999$. La función $\Phi(t | \gamma)$ muestra que para valores de $\gamma > 2060$, si no ha ocurrido el sismo, la probabilidad de que ocurra en tiempos futuros es casi nula. La función $h(t)$ alcanza su máximo en $t=2055.763$ años.

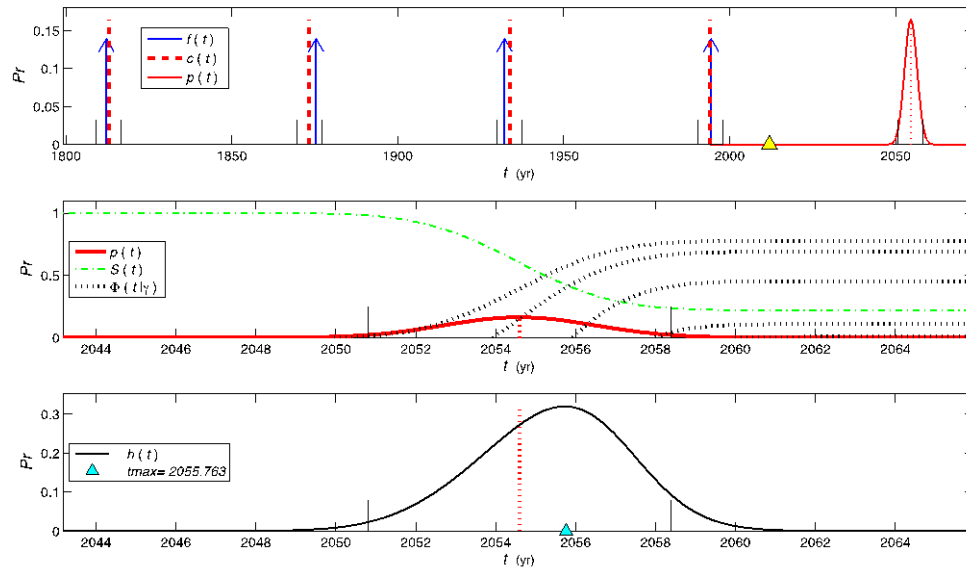


Figura 5.20. Gráficas de evaluación del pronóstico en la segunda secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t | \gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

5.2.1.3 Pronóstico de los eventos de los años 1994 y 1997

Los sismos de 1997 y 1994 son los últimos eventos, hasta ahora ocurridos, pertenecientes a la primera y segunda secuencia, respectivamente, identificadas en el área 1. Para el pronóstico suponemos que el año actual es 1970.

La serie es limitada entre los años 1780-1970. El resultado del análisis espectral de la serie con $N=12$ eventos, es un peine con $\tau_p = 42.6008$ años, al cual se asocia una secuencia de 5 eventos con $\sigma = 4.270$ años (figura 5.21). Satisfactoriamente, dichos eventos corresponden a los 5 primeros eventos de la primera secuencia de interés: $t_1 = 1786.00$, $t_2 = 1827.4788$, $t_3 = 1869.1307$ $t_4 = 1919.5233$ y $t_5 = 1952.2990$.

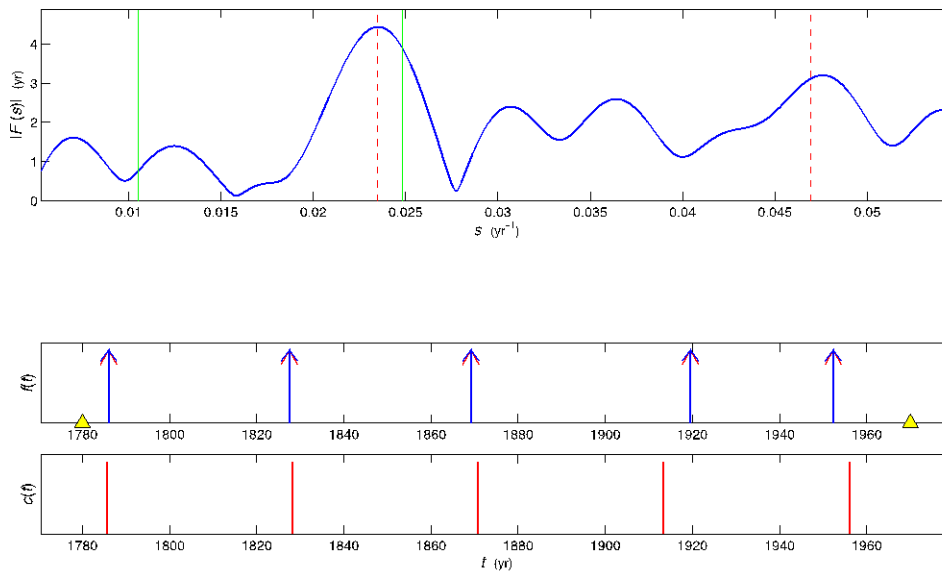


Figura 5.21. Identificación de la primera secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 1970. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase. Simbología igual a la de la figura 5.2.

El pronóstico indica que el próximo sismo de la secuencia, debería ocurrir dentro del intervalo $t_{k+1} = 1998.565 \pm 8.540$, lo cual se ajusta muy bien a la realidad, ya

que el sismo ocurrió en el año $t=1997.0005$. En la figura 5.22 se puede observar como el evento real se encuentra casi centrado bajo la curva de la pdf.

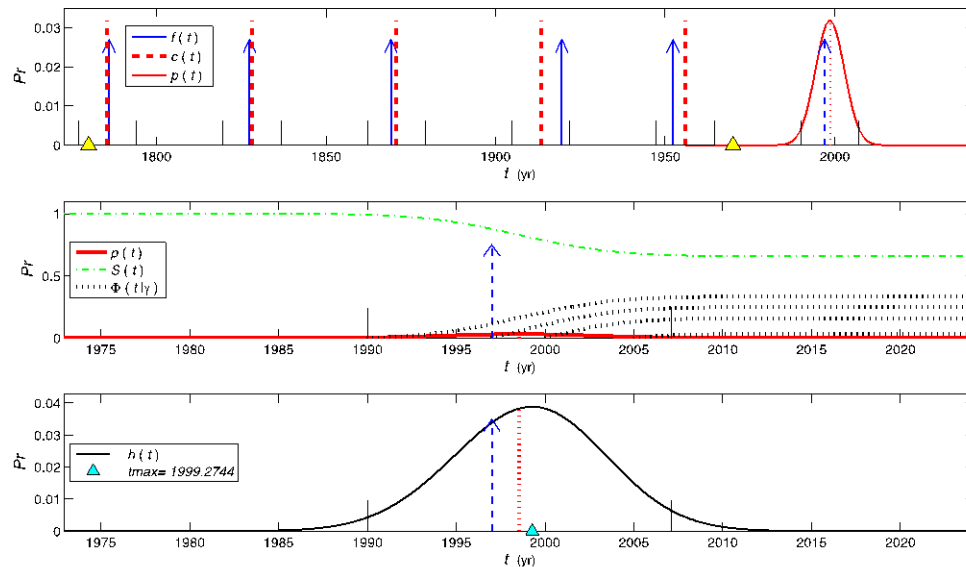


Figura 5.22. Gráficas de evaluación del pronóstico en la primera secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 1970. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t|\gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

Luego de identificar esta secuencia, se continuó el análisis con los 7 eventos restantes de la serie, y se identificó un peine con $\tau_p = 60.1265$ años, al cual se asocia una secuencia de 3 eventos con $\sigma = 2.599$ años (figura 5.23). Estos 3 eventos corresponden a los 3 primeros eventos de la segunda secuencia previamente encontrada: $t_1 = 1812.2347$, $t_2 = 1875.3772$ y $t_3 = 1932.1747$.

El tiempo del evento pronosticado, perteneciente a la secuencia, es $t_{k+1} = 1993.511 \pm 5.20$ y el tiempo real del evento es $t = 1994.4130$. En la figura 5.24, se puede observar como el tiempo de ocurrencia de este evento coincide con el máximo de la función $h(t)$. La prueba del pronóstico resultó bastante aproximada, al igual que la secuencia anterior.

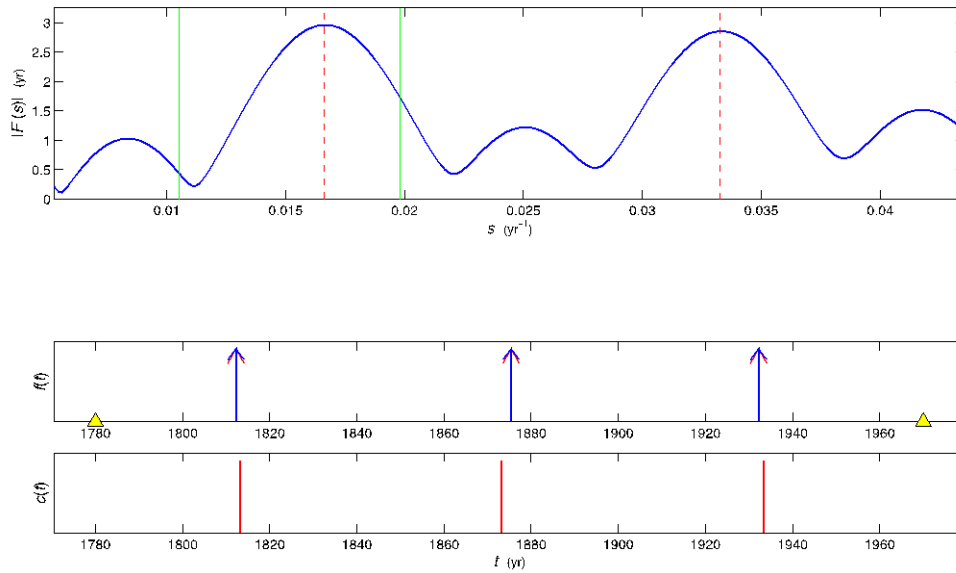


Figura 5.23. Identificación de la segunda secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 1970. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase. Simbología igual a la de la figura 5.2.

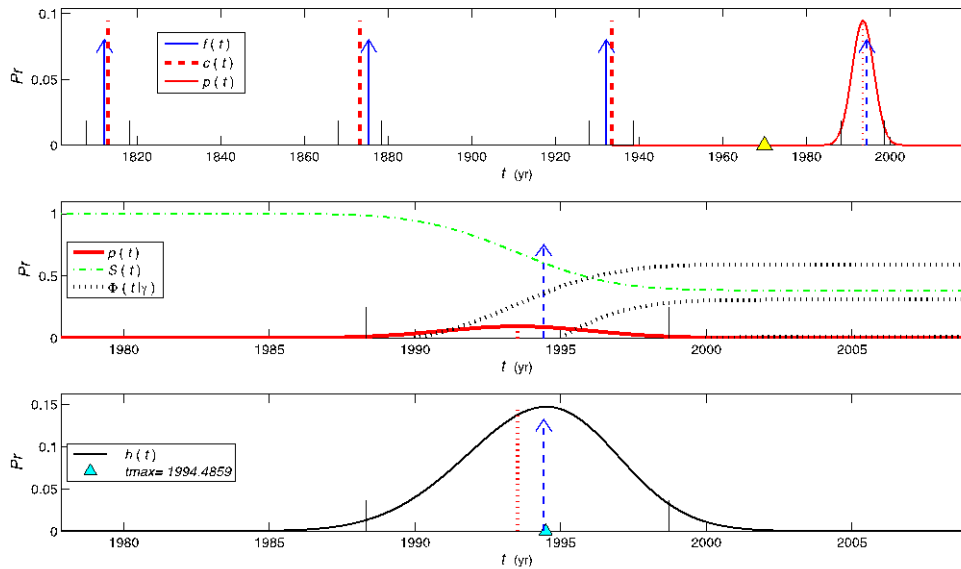


Figura 5.24. Gráficas de evaluación del pronóstico en la segunda secuencia semiperiódica en el área 1 de Venezuela, entre 1780 y 1970. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t|\gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

5.2.2 Área 2

La serie de tiempo está limitada entre los años 1774-2012, con sismos de magnitudes $M \geq 5.6$, ya que en años previos se observan espacios grandes sin ocurrencia de sismos (figura 5.25) y posiblemente se deba a la falta de información histórica en el catálogo.

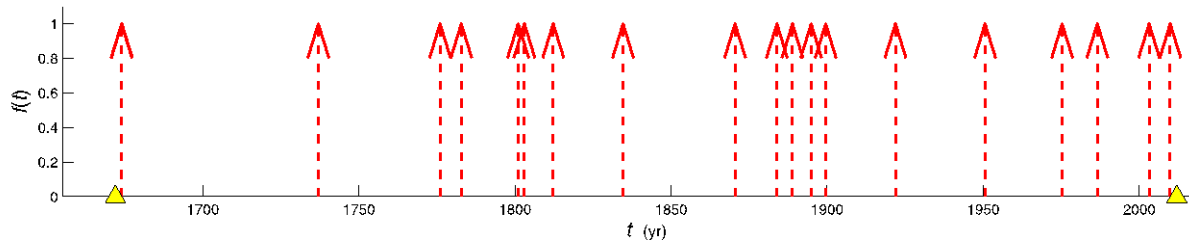


Figura 5.25. Serie de tiempos de ocurrencia de los sismos con magnitudes $M \geq 5.6$ en el área 2 de Venezuela, entre 1673 y 2012. Nótese que entre 1673 y 1774, hay grandes espacios con ausencia de eventos sísmicos, por lo que la serie utilizada se restringe al intervalo entre 1774 y 2012.

5.2.2.1 Secuencia semiperiódica del área 2

A partir de una serie de $N=17$ eventos, luego de cuatro pases de análisis espectral (figura 5.26 y 5.27) se identificó un peine con $\tau_p = 58.3333$ años y $\varphi_p = -0.2713$, al cual se asocia una secuencia de 5 eventos con $\sigma = 1.1486$ años. Los tiempos de los eventos de la secuencia son: $t_1 = 1775.9847$, $t_2 = 1834.6128$, $t_3 = 1894.8431$, $t_4 = 1950.5888$ y $t_5 = 2009.9051$ (figura 5.43). La probabilidad de que el peine no sea aleatorio es $P_c = 0.95546$.

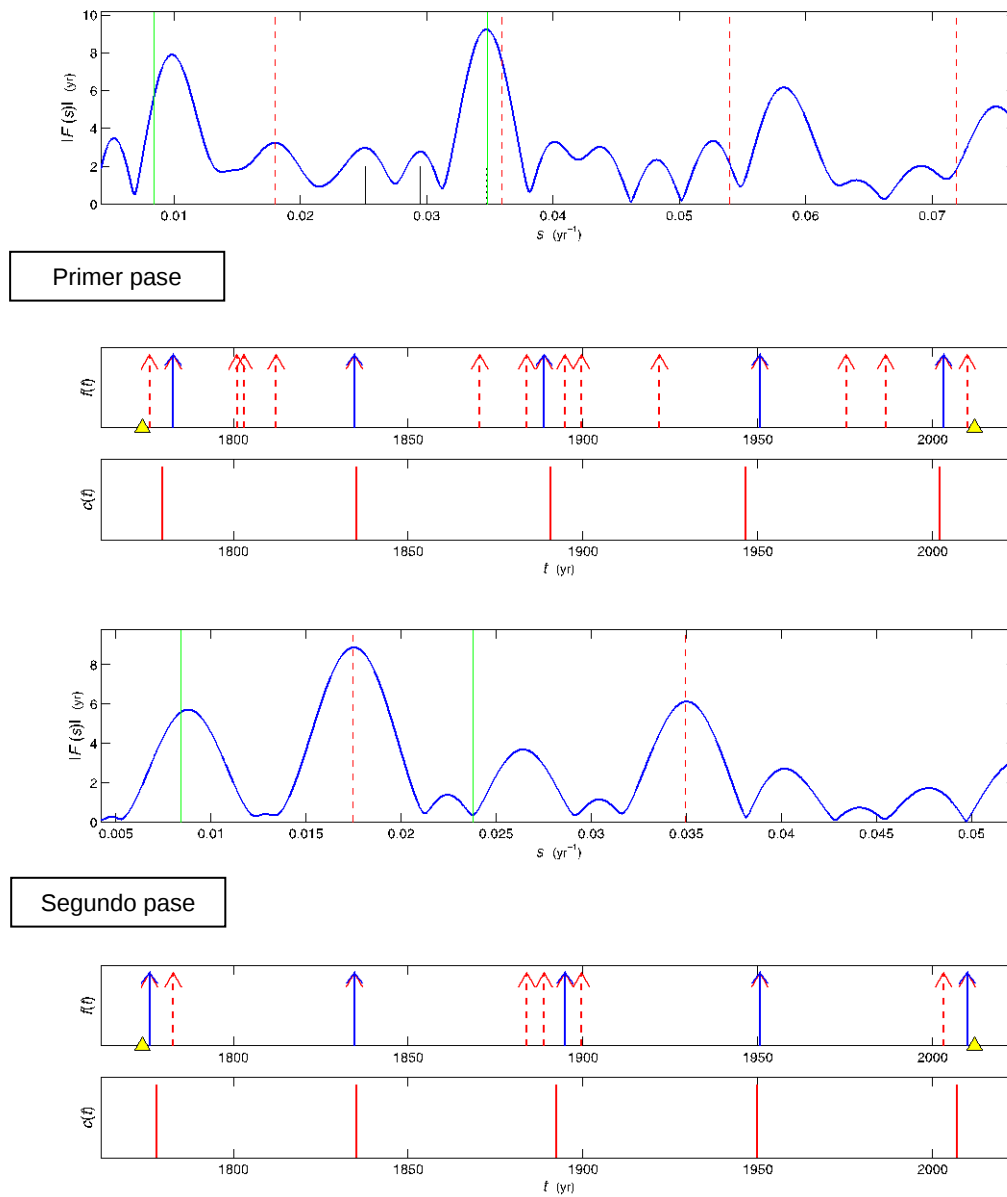


Figura 5.26. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 2 de Venezuela, entre 1774 y 2012. Primer y segundo pases. Simbología igual a la de la figura 5.2.

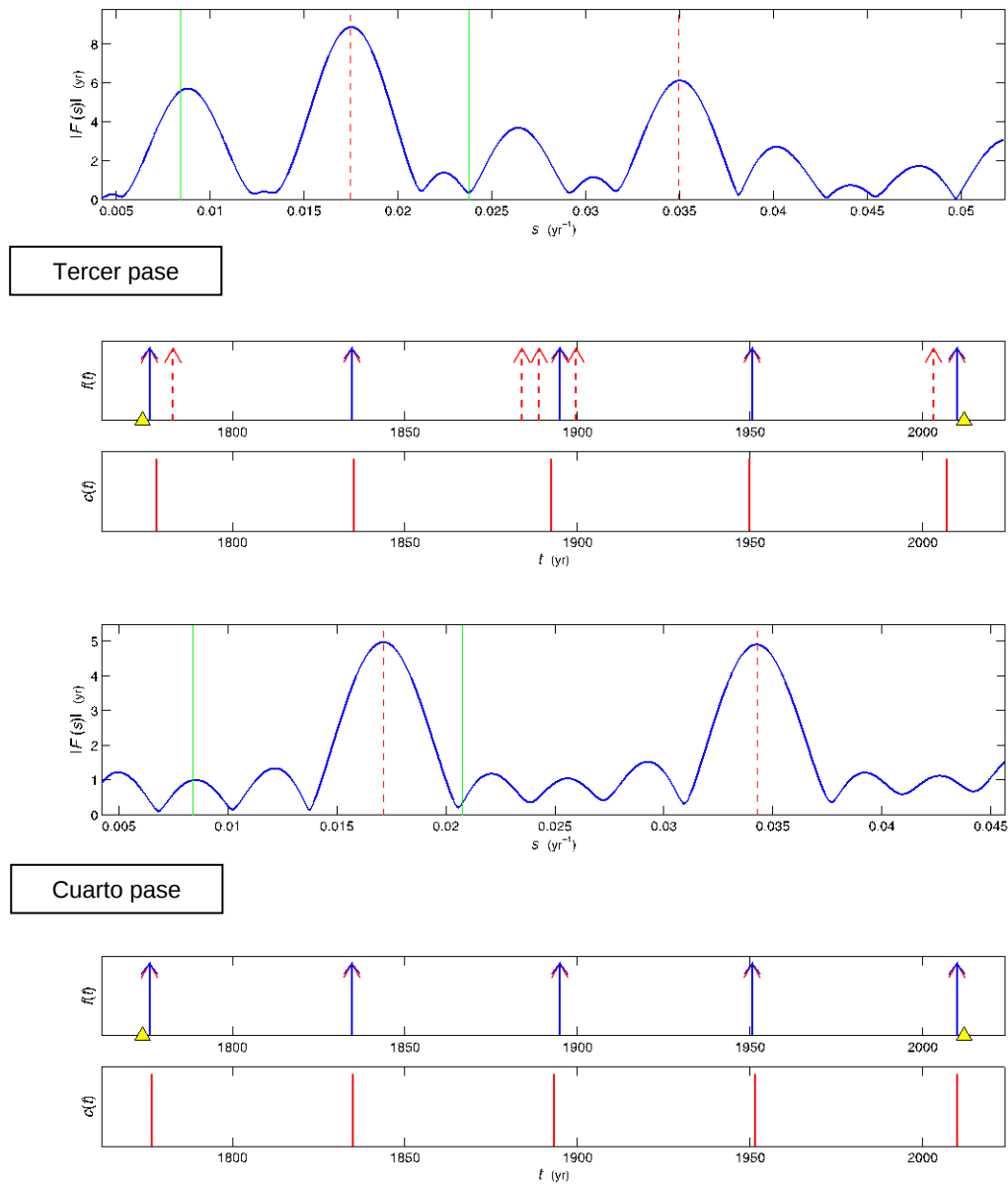


Figura 5.27. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 2 de Venezuela, entre 1774 y 2012. Tercer y cuarto pases. Simbología igual a la de la figura 5.2.

El tiempo del evento pronosticado, perteneciente a la secuencia, es $t_{k+1} = 2068.186 \pm 2.297$. Las probabilidades de ocurrencia dentro del intervalo del pronóstico son: $P_{cq} = 0.9120$, $\pi_{1+} = 0.2798$, $\pi_{1+}^* = 0.2068$ y $P_{cq} + \pi_{1+}^* - P_{cq}\pi_{1+}^* = 0.9302$. La ganancia de probabilidad es $P_G = 3.3249$ y la

ganancia de información es $I_G = 1.7333$ bits. A continuación se muestran los cálculos para valores de $q=1,2$ y 3:

Tabla 5.7. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia en el área 2 de Venezuela.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.6523	0.1513	0.1094	4.5616	2.1895
2	0.9120	0.2798	0.2068	3.3249	1.7333
3	0.9529	0.3888	0.2935	2.4866	1.3142

En la figura 5.28, la función $S(t)$ indica que a partir del año 2071 aproximadamente, la probabilidad de que todavía el sismo pronosticado no haya ocurrido, es muy baja y tiende a $P_\phi = 0.04454$. La función $\Phi(t | \gamma)$ muestra que para $\gamma > 2072$, si no ha ocurrido el sismo, la probabilidad de que ocurra en tiempos futuros es casi nula. La función $h(t)$ alcanza su máximo en $t=2069.5755$ años.

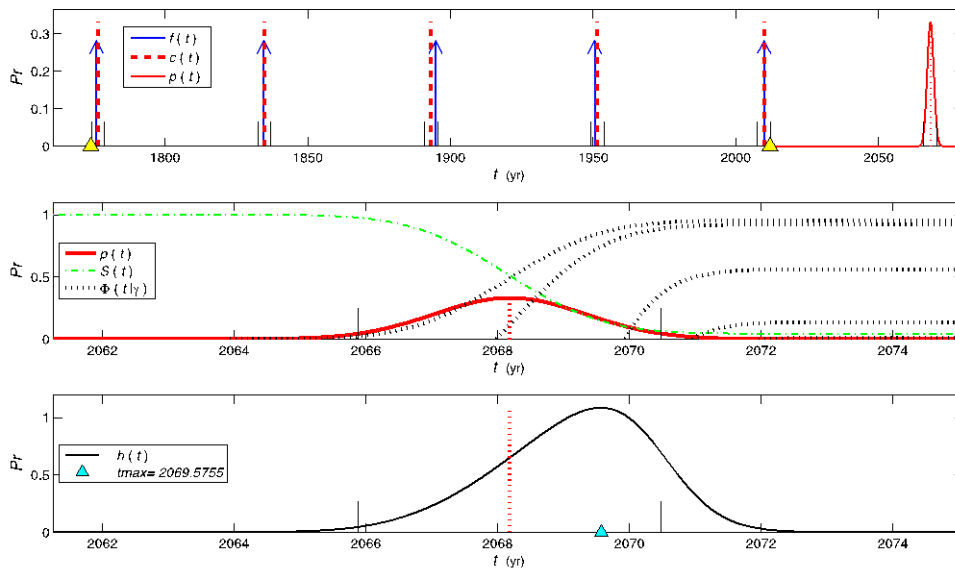


Figura 5.28. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 2 de Venezuela. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t | \gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

5.2.2.2 Pronóstico del evento ocurrido en el año 2009.9

El sismo de 2009.9 es el último evento, hasta ahora ocurrido, perteneciente a la secuencia identificada en el área 2. Para el pronóstico suponemos que el año actual es 1970.

La serie abarca los años 1774-1970. El resultado del análisis espectral de la serie con $N=13$ eventos, es un peine con $\tau_p = 58.3333$ años, al cual se asocia una secuencia de 4 eventos con $\sigma = 1.4061$ años (figura 5.29). Satisfactoriamente, dichos eventos corresponden a los 4 primeros eventos de la primera secuencia de interés: $t_1 = 1775.9847$, $t_2 = 1834.6128$, $t_3 = 1894.8431$ y $t_4 = 1950.5888$.

El pronóstico estima que el próximo sismo de la secuencia debería ocurrir dentro del intervalo $t_{k+1} = 2009.839 \pm 2.812$, lo cual indica que el sismo del año $t=2009.9051$, ocurrió bastante cercano al pronóstico (figura 5.30).

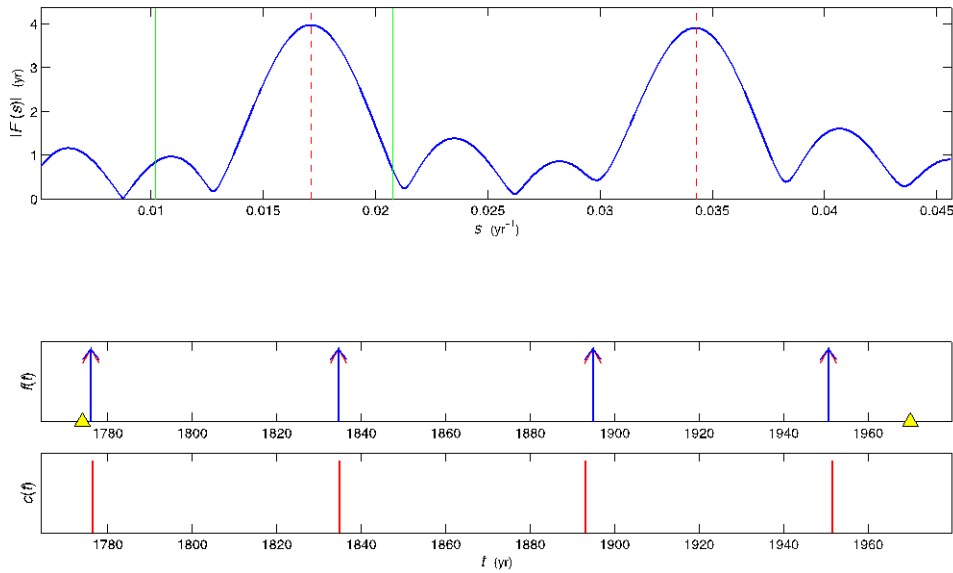


Figura 5.29. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 2 de Venezuela, entre 1774 y 1970. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase. Simbología igual a la de la figura 5.2.

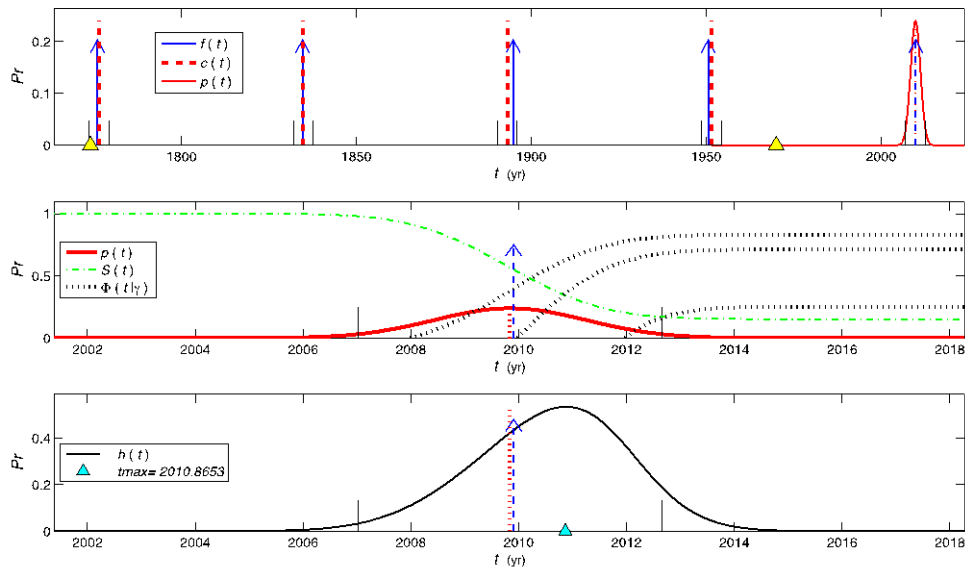


Figura 5.30. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 2 de Venezuela, entre 1774 y 1970. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t | \gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

5.2.3 Área 3

La serie de tiempo está limitada entre los años 1800-2012, con sismos de magnitudes $M \geq 5.6$, ya que en tiempos previos al sismo de 1812 no se tiene suficiente información histórica en el catálogo (figura 5.31).

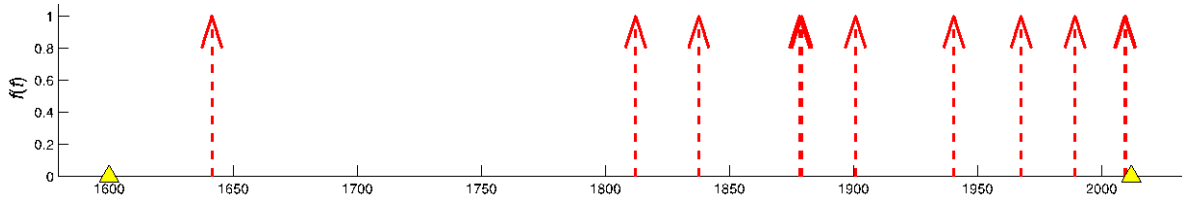


Figura 5.31. Serie de tiempos de ocurrencia de los sismos con magnitudes $M \geq 5.6$ en el área 3 de Venezuela, entre 1641 y 2012. Nótese que entre 1641 y 1812, hay un gran espacio de tiempo sin información sobre ocurrencias de eventos sísmicos, por lo que la serie utilizada se restringe al intervalo entre 1800-2012.

5.2.3.1 Secuencia semiperiódica del área 3

A partir de una serie de $N=10$ eventos, luego de cuatro pases de análisis espectral (figura 5.32 y 5.33) se identificó un peine con $\tau_p = 65.4321$ años y $\varphi_p = -1.14638$, al cual se asocia una secuencia de 4 eventos con $\sigma = 1.9412$. Los tiempos de los eventos de la secuencia son: $t_1 = 1812.2346$, $t_2 = 1878.2796$, $t_3 = 1940.4776$ y $t_4 = 2009.3380$ (figura 5.43). La probabilidad de que el peine no sea aleatorio es $P_c = 0.86390$. De manera referencial, se llamará a esta secuencia V1.

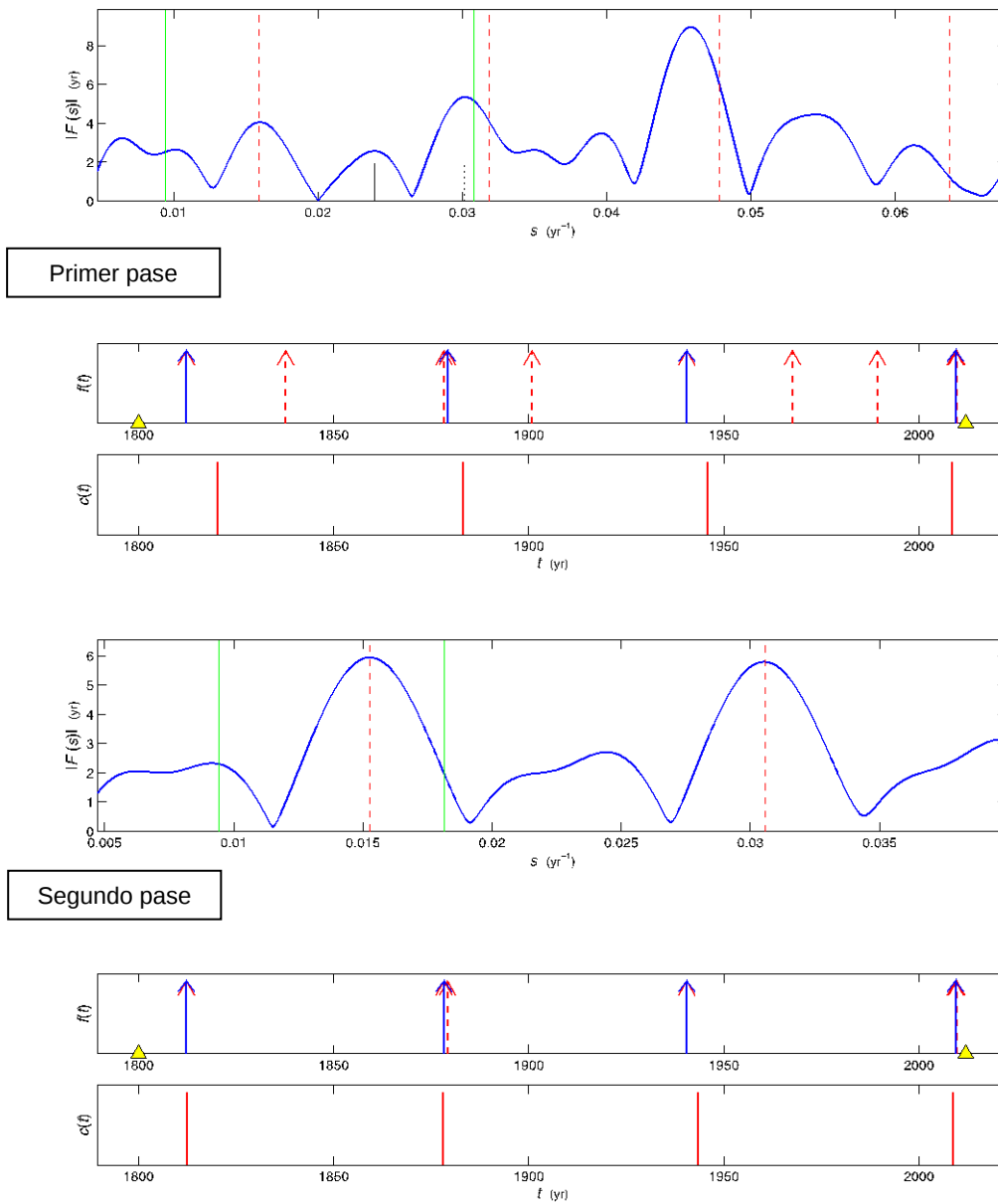


Figura 5.32. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 3 de Venezuela , entre 1800 y 2012. Primer y segundo pases. Simbología igual a la de la figura 5.2..

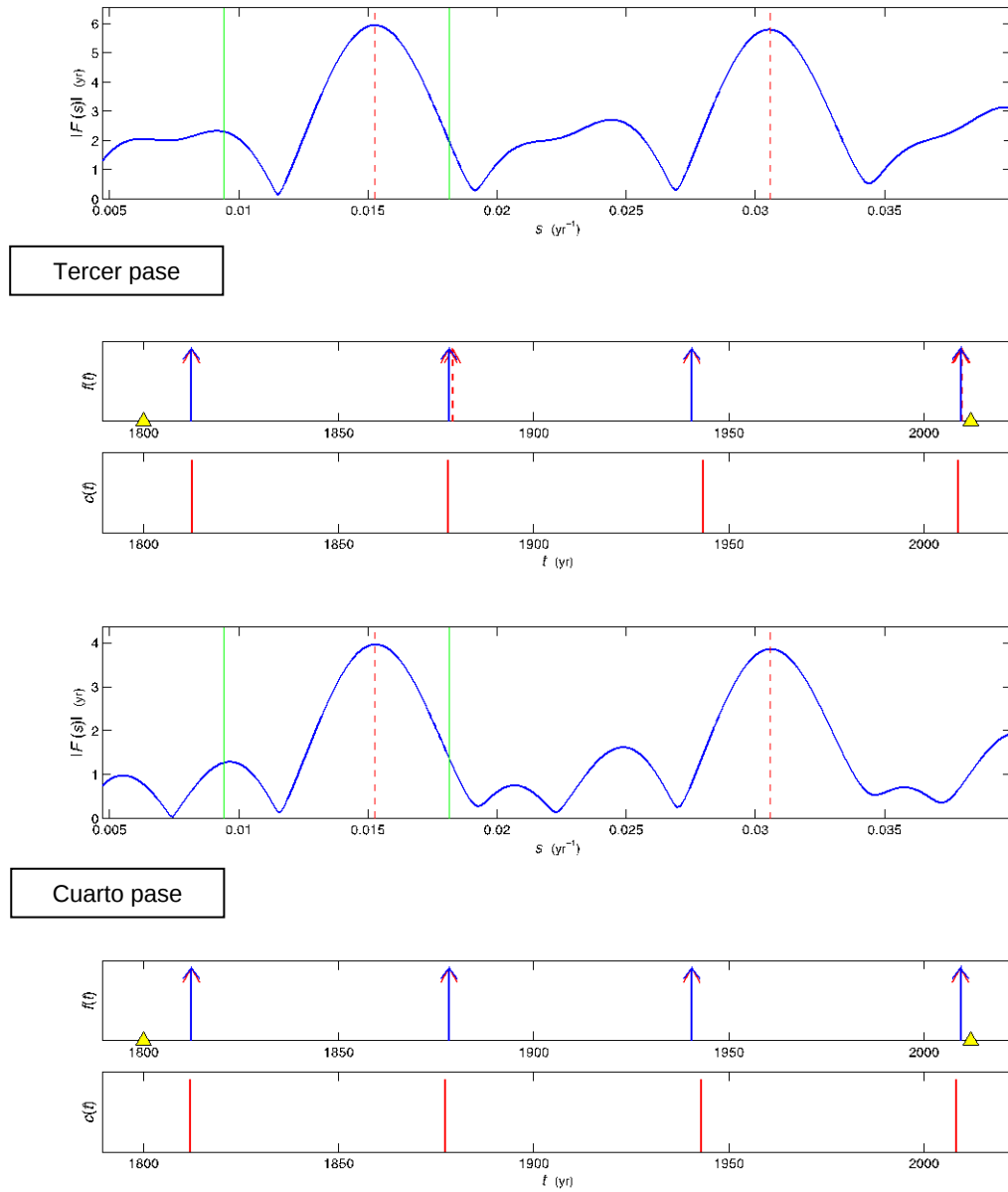


Figura 5.33. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 3 de Venezuela, entre 1800 y 2012. Tercer y cuarto pase. Simbología igual a la de la figura 5.2.

El tiempo del evento pronosticado, perteneciente a V1, es $t_{k+1} = 2073.667 \pm 3.883$. Las probabilidades de ocurrencia dentro del intervalo del pronóstico son: $P_{cq} = 0.8246$, $\pi_{1+} = 0.3067$, $\pi_{1+}^* = 0.1973$ y $P_{cq} + \pi_{1+}^* - P_{cq}\pi_{1+}^* = 0.8592$. La ganancia de probabilidad es $P_G = 2.8015$ y la ganancia de información es

$I_G = 1.4862$ bits. A continuación se muestran los cálculos para valores de $q=1,2$ y 3:

Tabla 5.8. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia V1 en el área 3 de Venezuela.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.5898	0.1673	0.1041	3.7794	1.9182
2	0.8246	0.3067	0.1973	2.8015	1.4862
3	0.8616	0.4227	0.2808	2.1301	1.0910

En la figura 5.34, la función $S(t)$ indica que a partir del 2077 aproximadamente, la probabilidad de que todavía el sismo pronosticado no haya ocurrido, es muy baja y tiende a $P_\varphi = 0.13610$. La función $\Phi(t | \gamma)$ muestra que para $\gamma > 2080$, si no ha ocurrido el sismo, la probabilidad de que ocurra en tiempos futuros es casi nula. La función $h(t)$ alcanza su máximo en $t=2075.2195$ años.

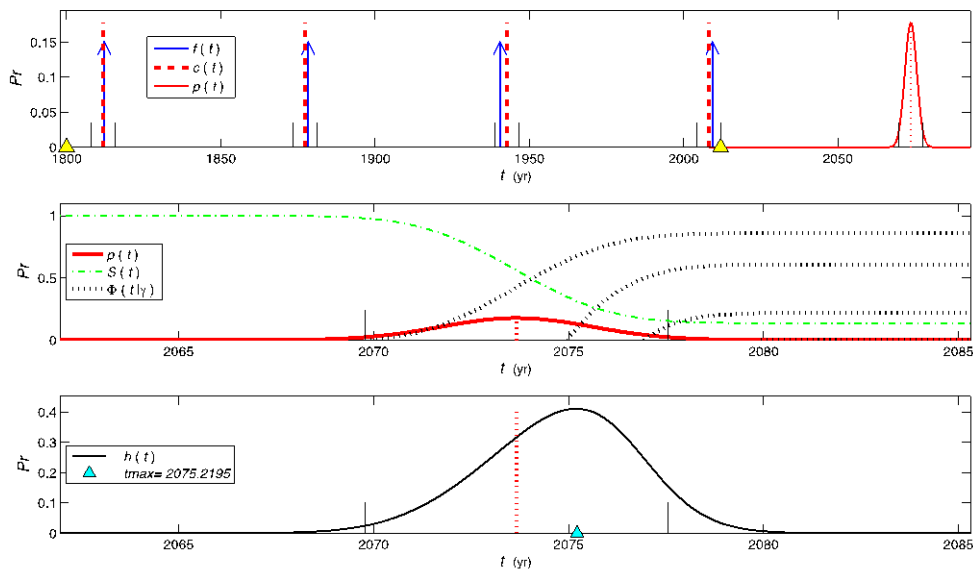


Figura 5.34. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 3 de Venezuela. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t | \gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

Es importante señalar que en el proceso de identificación de V1, se consideró lo siguiente:

En el espectro del primer pase (figura 5.32) se muestra una línea punteada negra corta que indica que ese valor de frecuencia sí permite construir un peine, pero que se rechazó manualmente. En caso de haber seleccionado esa frecuencia, se hubiese obtenido inicialmente un peine con 7 eventos asociados, pero con σ muy grande en comparación a τ_p . Esto causaba que en el tercer pase, al considerar el criterio de selección de eventos más cercanos a los dientes, con una distancia máxima de $0.2 \tau_p$, se descartaban 3 de los eventos de esta secuencia, que llamaremos V2, por no cumplir con las condiciones de cercanía en este pase. Luego, a partir del tercer pase se obtiene la misma secuencia V1 de 4 eventos que se obtuvo seleccionando una menor frecuencia desde el primer pase.

Sin embargo, si los criterios de selección de eventos asociados al peine fuesen menos estrictos, resultara la secuencia V2: $t_1 = 1812.2346$, $t_2 = 1837.6920$, $t_3 = 1878.2796$, $t_4 = 1900.8257$, $t_5 = 1940.4776$, $t_6 = 1967.5753$ y $t_7 = 2009.3380$, con $\tau_p = 32.716$ y $\sigma = 4.9277$. Este período es casi la mitad del período de la secuencia V1. Otro aspecto importante es que el pronóstico para el evento t_{k+1} de V2 sería $t_{k+1} = 2037.607 \pm 9.856$ y el pronóstico de la secuencia V1 es para 36 años después de éste, en $t_{k+1} = 2073.667 \pm 3.883$, dentro del intervalo en que debería ocurrir el evento t_{k+2} de la secuencia V2.

Por tales razones, ambas secuencias podrían resultar ser la misma, sólo que en la de 4 eventos (V1) vemos la mitad de toda la secuencia (V2), al excluir los dientes intermedios. Sin embargo, por razones de incertidumbre, preferimos la secuencia V1 por ser más confiable.

5.2.3.2 Pronóstico del evento ocurrido en el año 2009.338

El sismo de 2009.338 es el último evento, hasta ahora ocurrido, perteneciente a la secuencia identificada en el área 3. Para el pronóstico suponemos que el año actual es 1970.

La serie abarca de 1800 a 1970, con $N=7$ eventos. En este caso no se pudo identificar la primera parte de la secuencia V1, por lo que el pronóstico del evento del año 2009.338, se obtuvo al seleccionar la frecuencia que genera un peine con $\tau_p = 31.716418$ años, al cual se asocia una secuencia de 6 eventos con $\sigma = 4.3915$ años (figura 5.35). Dichos eventos corresponden a los 6 primeros eventos de la secuencia V2: $t_1 = 1812.2346$, $t_2 = 1837.6920$, $t_3 = 1878.2796$, $t_4 = 1900.8257$, $t_5 = 1940.4776$ y $t_6 = 1967.5753$. Según ésta secuencia, el sismo t_{k+1} debería ocurrir dentro del intervalo $t_{k+1} = 2000.558 \pm 8.783$ y el evento del año 2009.338 ocurrió justo alcanzando el valor máximo de incertidumbre, pero dentro del intervalo de confianza (figura 5.36). Según el comportamiento de las funciones $S(t)$, $\Phi(t | \gamma)$ y $h(t)$, el evento pronosticado ocurrió en un tiempo todavía aceptable.

Considerando que el pronóstico funcionó con la secuencia V2 y la secuencia V1 no pudo ser identificada, queda abierta la posibilidad de que V2 realmente sea una secuencia semiperiódica, a pesar de tener una incertidumbre muy grande ($2\sigma \approx \tau_p / 4$).

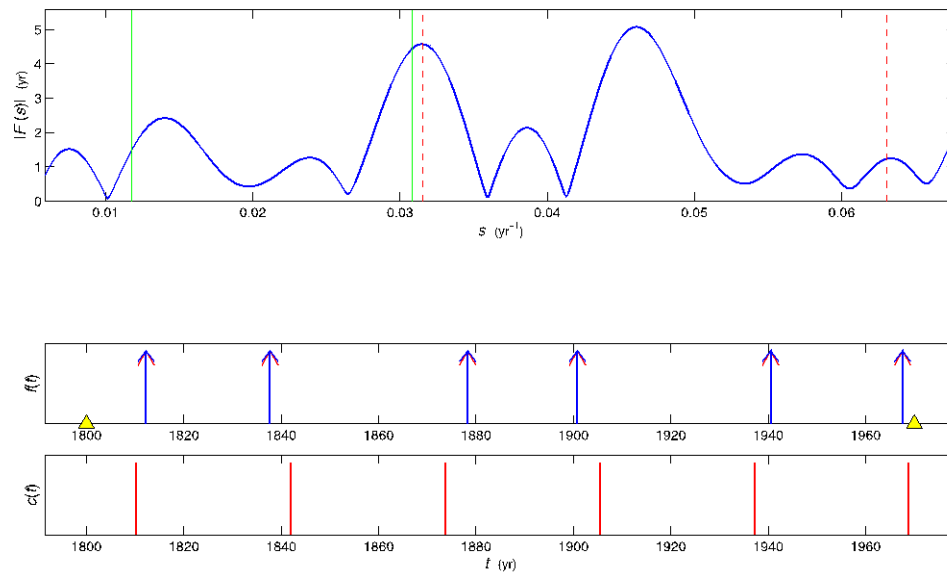


Figura 5.35. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 3 de Venezuela, entre 1800 y 1980. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase. Simbología igual a la de la figura 5.2.

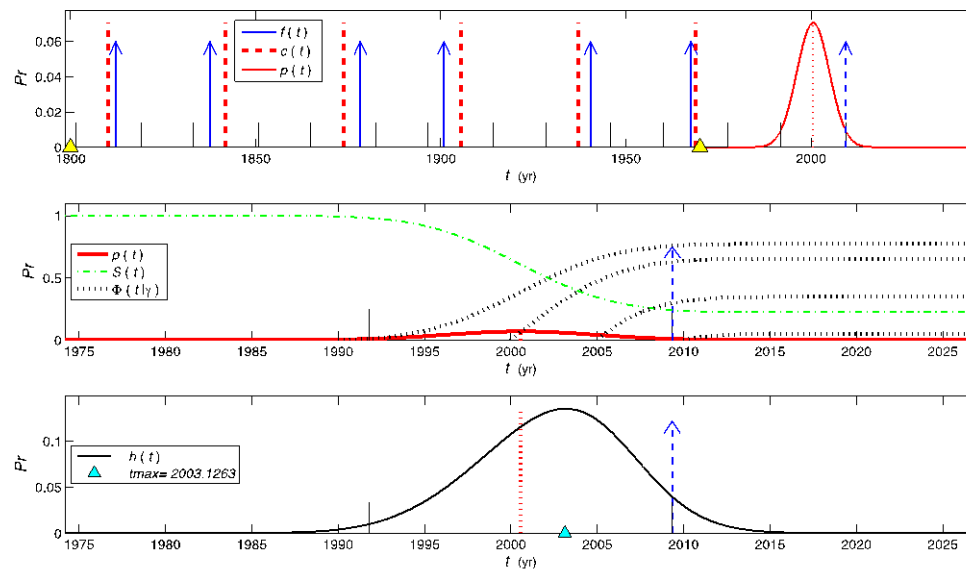


Figura 5.36. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 3 de Venezuela, entre 1800 y 1980. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t|\gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

5.2.4 Área 4

La serie de tiempo está limitada entre los años 1840-2012, con sismos de magnitudes $M \geq 6$, ya previo este intervalo, aparentemente no hay suficiente información histórica en el catálogo (figura 5.37).

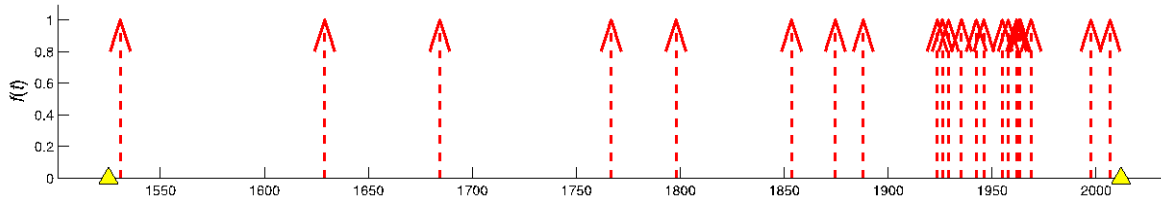


Figura 5.37. Serie de tiempos de ocurrencia de los sismos con magnitudes $M \geq 6$ en el área 4 de Venezuela, entre 1530 y 2012. Nótese que entre 1530 y 1852, hay grandes espacios de tiempo sin información sobre ocurrencias de eventos sísmicos, por lo que la serie utilizada se restringe al intervalo entre 1840-2012.

5.2.4.1 Secuencia semiperiódica del área 4

A partir de una serie de $N=25$ eventos, luego de cuatro pases de análisis espectral (figura 5.38 y 5.39) se identificó un peine con $\tau_p = 36.1344$ años y $\varphi_p = -2.2854$, al cual se asocia una secuencia de 5 eventos con $\sigma = 0.880$ años. Los tiempos de los eventos de la secuencia son: $t_1 = 1853.5364$, $t_2 = 1888.0234$, $t_3 = 1923.6014$, $t_4 = 1961.8886$ y $t_5 = 1997.5200$ (figura 5.43). La probabilidad de que el peine no sea aleatorio es $P_c = 0.91808$.

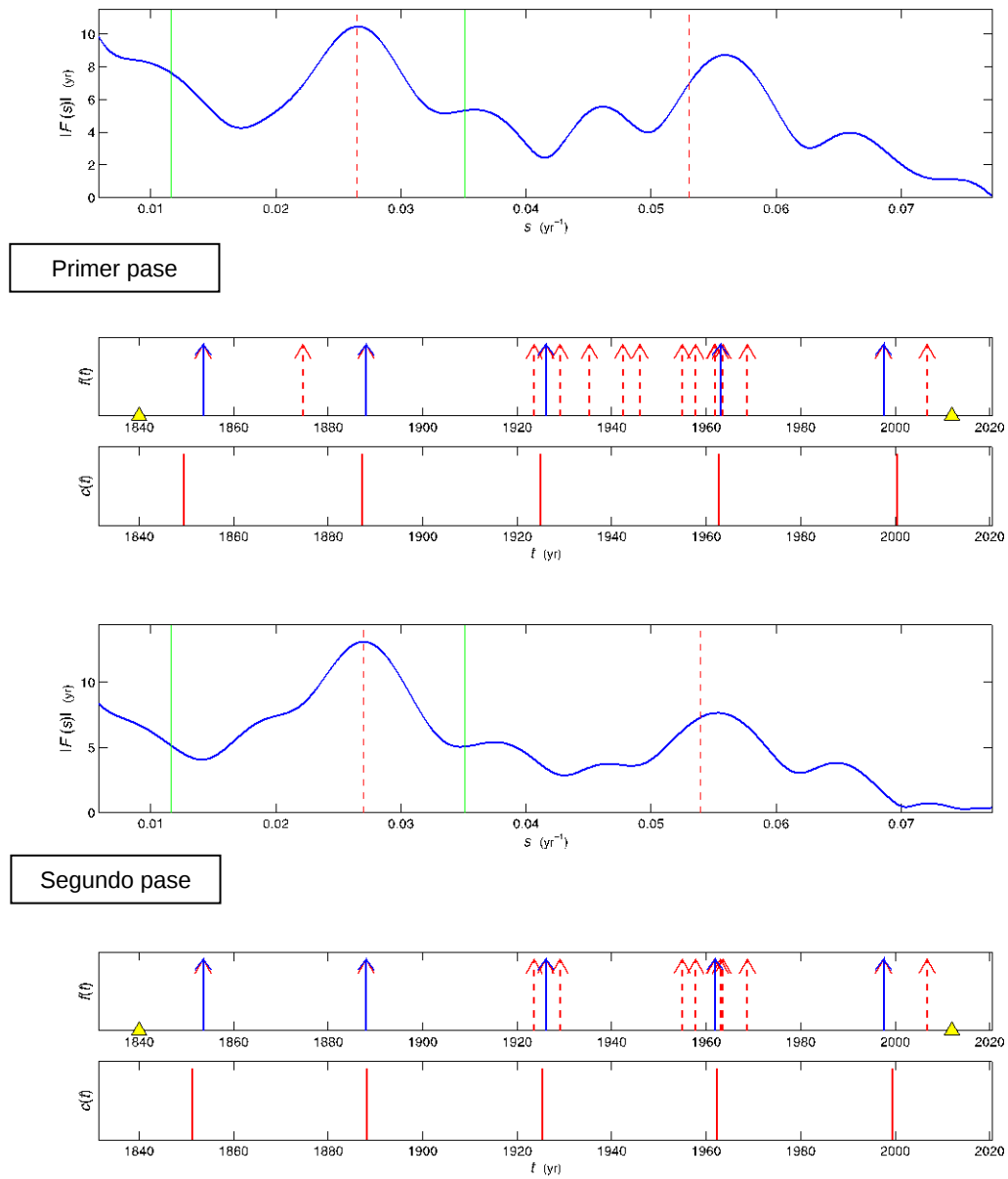


Figura 5.38. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 4 de Venezuela , entre 1852 y 2012. Primer y segundo pases. Simbología igual a la de la figura 5.2.

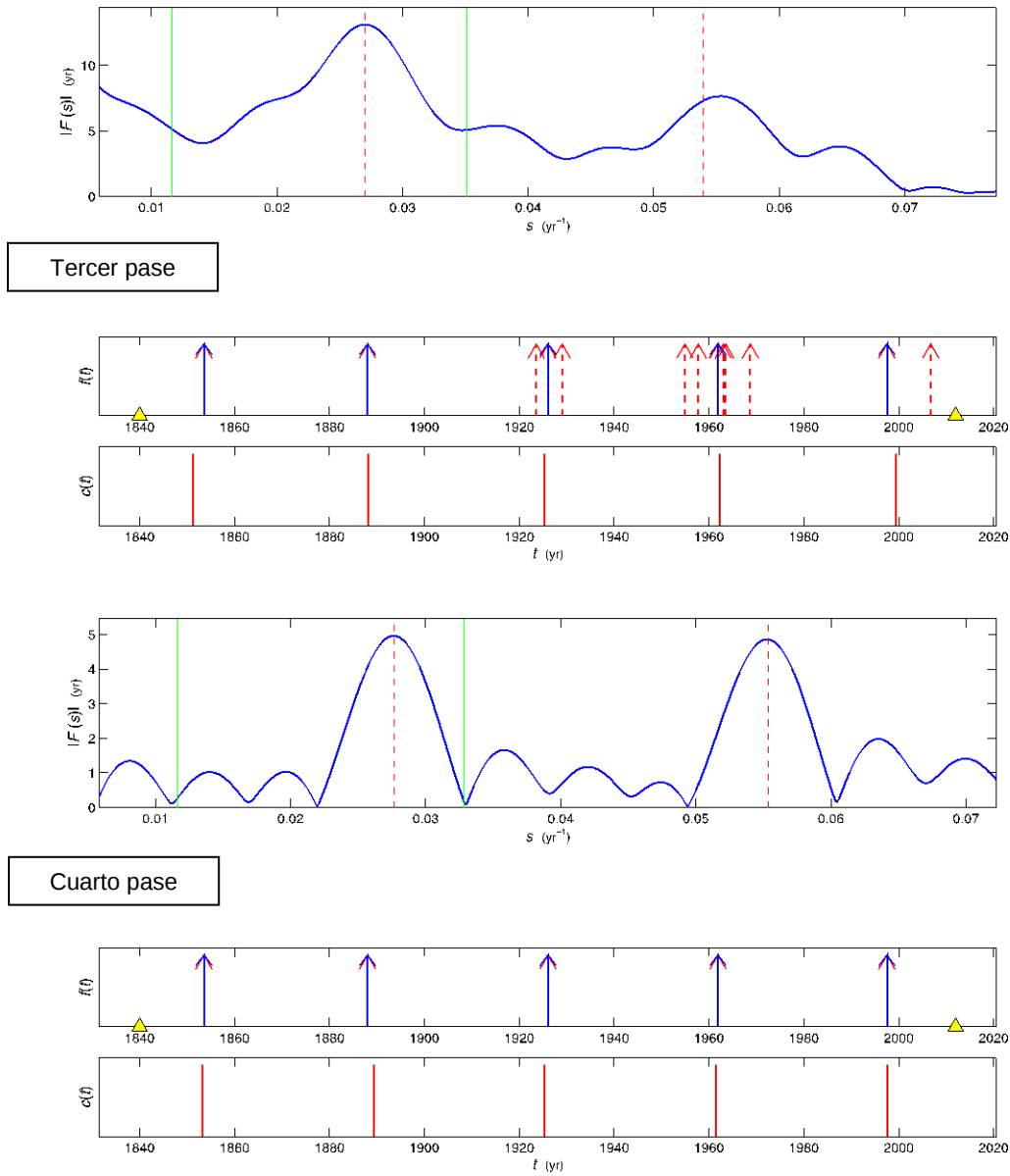


Figura 5.39. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 4 de Venezuela , entre 1852 y 2012. Tercer y cuarto pases. Simbología igual a la de la figura 5.2.

El tiempo del evento pronosticado, perteneciente a la secuencia, es $t_{k+1} = 2034.502 \pm 1.698$. Las probabilidades de ocurrencia dentro del intervalo del pronóstico son: $P_{cq} = 0.8763$, $\pi_{1+} = 0.3359$, $\pi_{1+}^* = 0.2644$ y $P_{cq} + \pi_{1+}^* - P_{cq}\pi_{1+}^* = 0.9090$. La ganancia de probabilidad es $P_G = 2.7061$ y la

ganancia de información es $I_G = 1.4362$ bits. A continuación se muestran los cálculos para valores de $q=1,2$ y 3 :

Tabla 5.9. Valores de probabilidad y ganancia de probabilidad y de información del pronóstico de la secuencia en el área 4 de Venezuela.

q	P_{cq}	π_{1+}	π_{1+}^*	P_G	I_G (bits)
1	0.6268	0.1851	0.1423	3.6734	1.8771
2	0.8763	0.3359	0.2644	2.7061	1.4362
3	0.9156	0.4588	0.3690	2.0634	1.0451

En la figura 5.40, la función $S(t)$ indica que a partir del 2036 aproximadamente, la probabilidad de que todavía el sismo pronosticado no haya ocurrido, es muy baja y tiende a $P_\varphi = 0.08192$. La función $\Phi(t | \gamma)$ muestra que para $\gamma > 2037$, si no ha ocurrido el sismo, la probabilidad de que ocurra en tiempos futuros es casi nula. La función $h(t)$ alcanza su máximo en $t=2034.6834$ años.

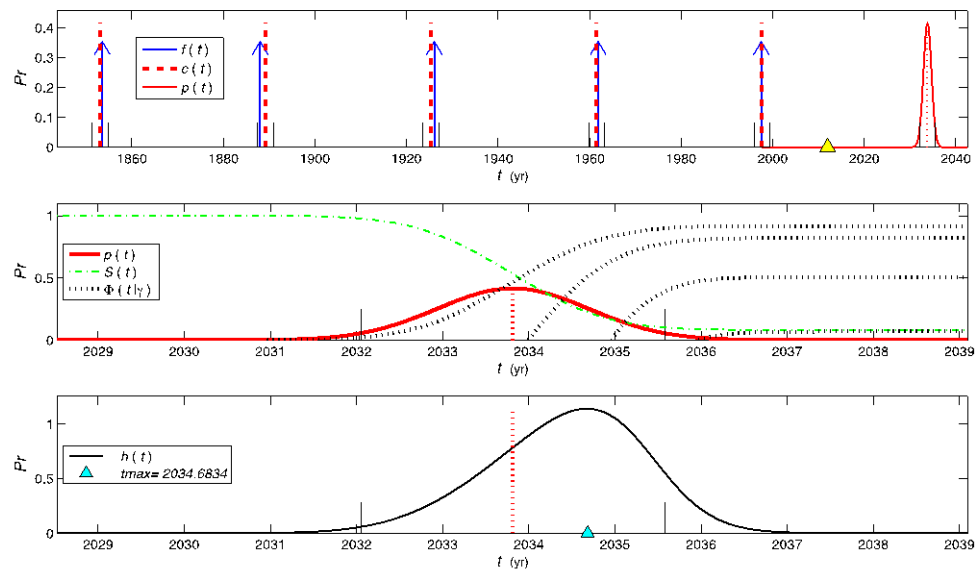


Figura 5.40. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 4 de Venezuela, entre 1852 y 2012. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t | \gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

5.2.4.2 Pronóstico del evento ocurrido en el año 1997.52

El sismo de 1997.52 es el último evento, hasta ahora ocurrido, perteneciente a la secuencia identificada en el área 4. Para el pronóstico suponemos que el año actual es 1980.

La serie abarca de 1840 a 1980. El resultado del análisis espectral de la serie con $N=18$ eventos, es un peine con $\tau_p = 36.2694$ años, al cual se asocia una secuencia de 4 eventos con $\sigma = 1.032$ años (figura 5.41). Satisfactoriamente, dichos eventos corresponden a los 4 primeros eventos de la primera secuencia de interés: $t_1 = 1853.5364$, $t_2 = 1888.0234$, $t_3 = 1923.6014$ y $t_4 = 1961.8886$. El pronóstico estima que el próximo sismo de la secuencia, debe ocurrir dentro del intervalo $t_{k+1} = 1998.031 \pm 2.064$, lo cual se ajusta muy bien a la realidad, ya que el sismo ocurrió en el año $t=1997.52$. En la figura 5.42 se puede observar como el evento real se encuentra dentro del intervalo de confianza muy cercano al pronóstico.

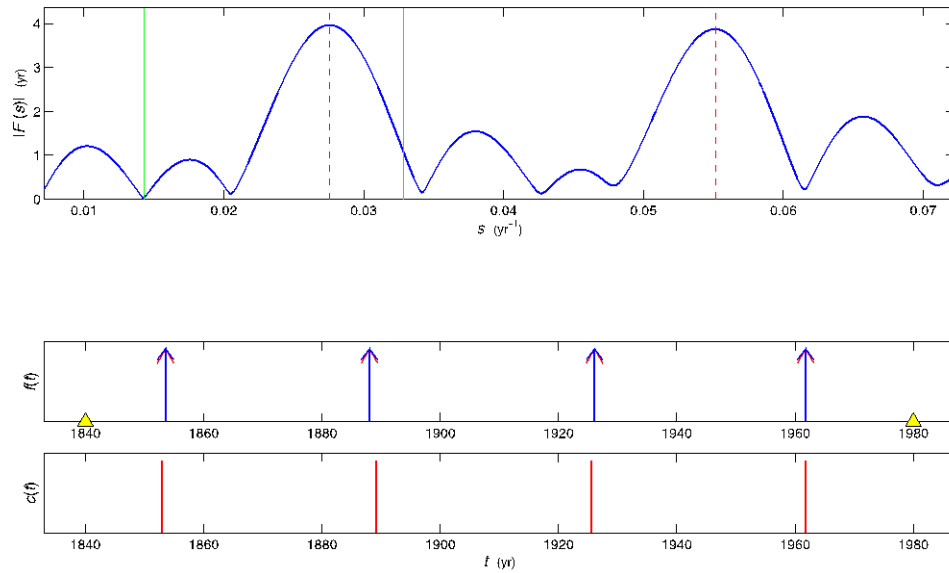


Figura 5.41. Identificación de la secuencia semiperiódica en el área 4 de Venezuela, entre 1852 y 1970. Se muestra el resultado del análisis espectral obtenido en el cuarto pase. Simbología igual a la de la figura 5.2.

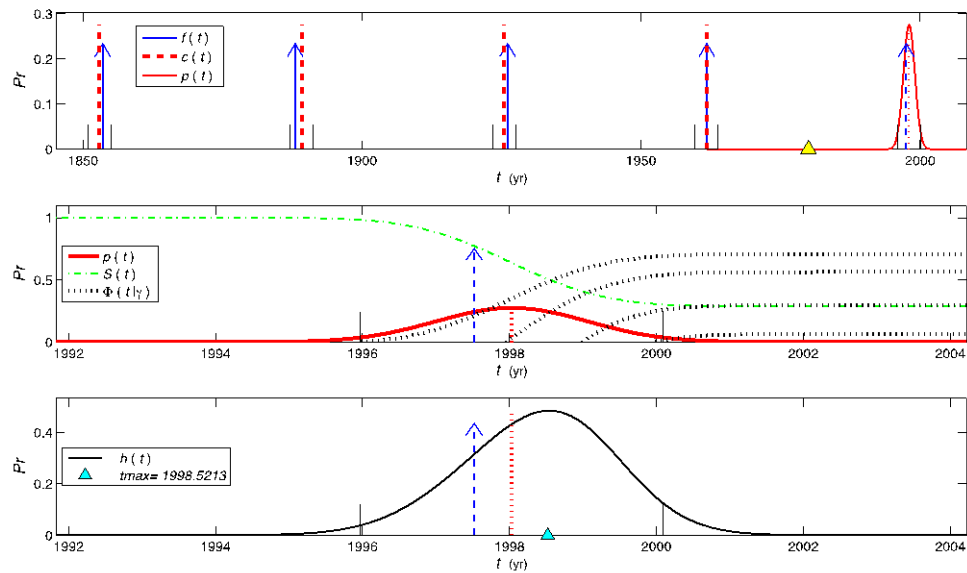


Figura 5.42. Gráficas de evaluación del pronóstico en la secuencia semiperiódica en el área 4 de Venezuela, entre 1852 y 1970. Secuencia semiperiódica $f(t)$, peine $c(t)$, pdf del evento pronosticado $p(t)$, función de supervivencia $S(t)$, función de tiempo de vida futura $\Phi(t|\gamma)$ y función de peligro $h(t)$. Simbología igual a la de la figura 5.4.

5.2.5 Ubicación de los eventos de cada secuencia identificada

A continuación se muestra un mapa representando la ubicación de los eventos pertenecientes a las secuencias identificadas cada una de las zonas de estudio de Venezuela:

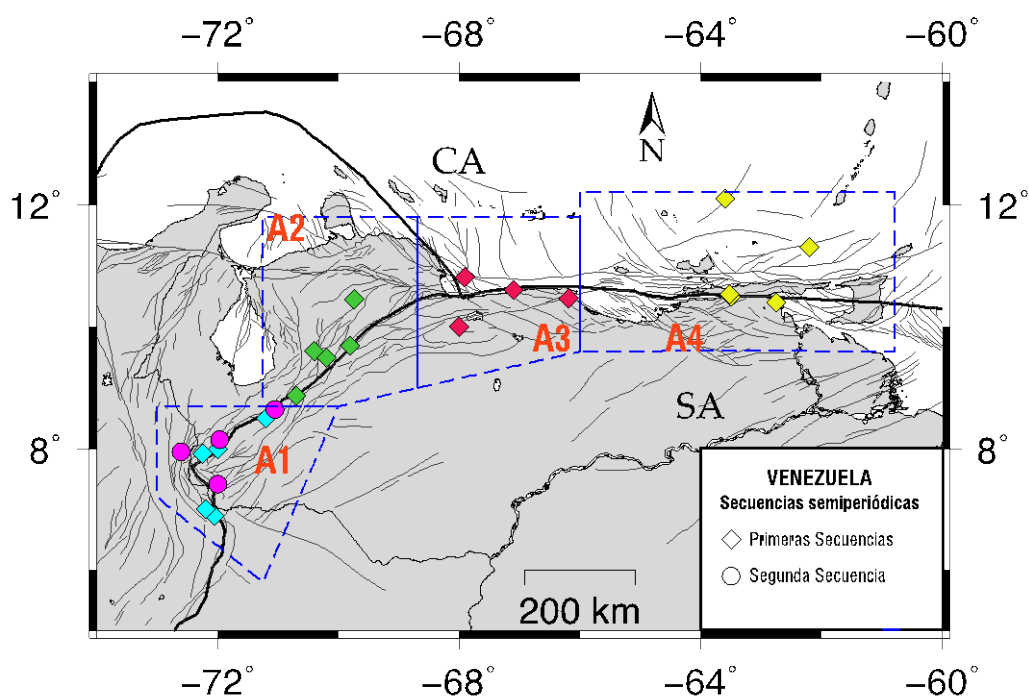


Figura 5.43. Mapa de ubicación de los eventos pertenecientes a las secuencias identificadas en Venezuela

CONCLUSIONES

El método de análisis espectral de Fourier utilizado, permitió identificar posibles secuencias semiperiódicas, utilizando datos reales de diferentes regiones sismotectónicas.

Se consideró la posibilidad de que las series de tiempos de ocurrencia de sismos, tuviesen más de una secuencia semiperiódica, además de eventos ajenos a la(s) secuencia(s). Los eventos que no aparecen en las secuencias podrían pertenecer a secuencias que no fueron identificadas, posiblemente por tener períodos muy grandes en comparación a nuestro intervalo de tiempo de observación. También existe la posibilidad que estos eventos pertenezcan a nuevas secuencias que están iniciando. A falta de explicación segura puede considerarse que estos eventos ocurren de forma aleatoria.

Qué tan reconocibles son las secuencias en el espectro, depende de la distribución o combinación de los tiempos de ocurrencias que se tenga en la serie de eventos estudiada, por lo que es posible que, para ciertas combinaciones, no se logre identificar las secuencias presentes mediante el análisis de Fourier.

Sólo fueron consideradas como secuencias semiperiódicas, aquellas con altas probabilidades de no haber sido obtenidas por azar y cuyos pronósticos tuvieran probabilidades mayores a las probabilidades de ocurrencia con comportamiento poissoniano.

Existe la posibilidad de que algún evento de una secuencia sea “confundido” o sustituido por otro evento cercano perteneciente a otra secuencia (y/o viceversa), debido a que la cercanía de los tiempos de ocurrencia de los eventos está dentro del rango de incertidumbre. Sin embargo, esta “confusión” no debe alterar

significativamente el comportamiento de las secuencias y el pronóstico; por lo que, para efectos de toma de medidas de peligro sísmico no hay mucha variación.

Los tiempos pronosticados que son presentados a continuación, consideran incertidumbre equivalente a $\pm 2\sigma$ ($q = 2$), para un 95.45% de confianza de que el evento pronosticado ocurra dentro del rango esperado. Sin embargo, en el caso de que el error estándar estimado sea muy pequeño (menor a un año), es posible que el sismo pronosticado ocurra fuera del intervalo de confianza y aun así el tiempo de ocurrencia esté bastante aproximado al pronóstico, tal como se observó en a prueba de pronóstico realizada para el caso de Japón.

El pronóstico puede variar un poco dependiendo de qué tan lejos o cerca estemos del próximo evento de la secuencia, tal como se observó en los casos de prueba de Japón, al pronosticar el evento de 2003.73, con $t_2 = 1980$ y $t_2 = 2002$,. El pronóstico se acercó más al tiempo de ocurrencia real para $t_2 = 2002$. Sin embargo la diferencia entre ambos pronósticos fue mucho más pequeña que la incertidumbre, por lo que ambos pronósticos fueron válidos.

El área de estudio de Japón se ubica en la zona de subducción, en el arco de Japón y el sur del arco de las Kuriles (figura 4.1), en donde fueron identificadas dos secuencias, con base en sismos recientes y confiables con $M \geq 8$ ocurridos entre 1890 y 2012.

La primera secuencia, J1, consta de $K = 4$ eventos, con $\tau_p = 35.0574$ años, $\sigma = 0.2413$ años y $P_c = 0.994$. Si esta secuencia corresponde a un proceso semiperiódico, el próximo evento asociado a ella, deberá ocurrir en $t_{K+1} = 2038.568 \pm 0.483$. La segunda secuencia identificada es de $K = 3$ eventos, con $\tau_p = 57.547$ años, $\sigma = 1.3709$ años y $P_c = 0.546$; $t_{K+1} = 2068.367 \pm 2.742$

Para sismos de Japón con $M \geq 8$ ocurridos entre 1670 y 2012, se identificó la secuencia, J2, de $K = 4$ eventos con $\tau_p = 108.228$ años, $\sigma = 4.101$ años, $P_c = 0.522$ y $t_{K+1} = 2113.708 \pm 8.202$. Los dos últimos eventos de esta secuencia son el primer y el último evento de la secuencia J1, y el período de esta secuencia es casi exactamente tres veces (3.087) el período de J2; por lo que se presume que podría tratarse del mismo proceso, pero en el análisis que incluye sismos históricos, sólo pudo identificarse un submúltiplo del periodo verdadero por falta de información histórica. Un fuerte apoyo para esta especulación es que, no sólo coinciden los periodos, sino que el tiempo $t_{K+2} = 2115.7$ de J1 coincide asombrosamente bien con el pronosticado por J2. Estas coincidencias subrayan el poder del método para identificar secuencias semiperiódicas.

En el caso de Venezuela, fueron delimitadas 4 áreas de estudio: 1) sur de los Andes, 2) norte de los Andes, 3) zona Centro-Norte y 4) zona Nororiental.

En el área 1 fueron identificadas 2 secuencias semiperiódicas, con sismos de $M \geq 6.0$ ocurridos entre 1890 y 2012. La primera secuencia tiene $K = 6$ eventos, con $\tau_p = 42.3357$ años, $\sigma = 3.7216$ años, $P_c = 0.62550$ y $t_{K+1} = 2039.931 \pm 7.443$. La segunda secuencia tiene $K = 4$, $\tau_p = 60.4166$ años, $\sigma = 1.8953$ años, $P_c = 0.78001$ y $t_{K+1} = 2054.590 \pm 3.791$.

En el área 2 se obtuvo una secuencia con $K = 5$ eventos de $M \geq 5.6$, $\tau_p = 58.3333$ años, $\sigma = 1.1486$ años, $P_c = 0.95546$ y $t_{K+1} = 2068.186 \pm 2.297$.

En el área 3 se obtuvo, para $M \geq 5.6$, una secuencia, V1, con $K = 4$, $\tau_p = 65.4321$, $\sigma = 1.9412$, $P_c = 0.86390$ y $t_{K+1} = 2073.667 \pm 3.883$. Es posible que esta secuencia sea submúltiplo de la secuencia V2, con $K = 7$, $\tau_p = 32.716$ años, $\sigma = 4.9277$ años y $t_{K+1} = 2037.607 \pm 9.856$.

En el área 4 se obtuvo, para $M \geq 6.0$, una secuencia con $K = 4$ eventos, $\tau_p = 36.6972$ años, $\sigma = 0.849$ años, $P_c = 0.91808$ y $t_{K+1} = 2034.502 \pm 1.698$.

En todos los casos de Japón y Venezuela para secuencias con $K > 3$, fueron hechas pruebas tomando como tiempo de observación final un tiempo previo al último evento (ya ocurrido) de cada secuencia, con objeto de comprobar si estos eventos hubieran sido correctamente pronosticados. Estas pruebas dieron resultados satisfactorios, ya que los pronósticos fueron bastante acertados en relación al tiempo real en que ocurrió el último evento conocido de cada caso.

Es de capital importancia subrayar que los pronósticos realizados en este estudio, son resultados exploratorios de un método basado en suposiciones puramente teóricas. El método tiene limitaciones numéricas y, naturalmente, está limitado también por la extensión y calidad de los datos. El punto más importante es que, por confiable que sea cualquier secuencia identificada, no hay seguridad de que ésta corresponda, efectivamente, a un proceso semiperiódico estable. Por lo anterior, los pronósticos que produce el método no deben ser considerados todavía como fundamentos para tomar acciones preventivas hasta que su confiabilidad sea confirmada o refutada por más estudios. Sin embargo, sí pueden constituir un elemento que ayuda a la estimación del peligro sísmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aki, K. (1956). Some problems in statistical seismology. *Zisin. Journal of Seismological Society of Japan*. Ser II, 8, 205-228.
- Altez, R. (1998). Cronometrización extemporánea: los sismos del 26 de marzo de 1812 en Caracas y Mérida. *Revista Geográfica Venezolana*, 39(1-2):297-325.
- Altez, R. (2003). La sismología histórica y la oportunidad transdisciplinaria. *Revista Geográfica Venezolana*, 44(2), 285-302.
- Altez, R. (2005a). Todo lo que se movió en 1812: sismos, volcanes y transmisión de energía. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. Especial, 143-170.
- Altez, R. (2005b). Los sismos del 26 de marzo de 1812 en Venezuela: nuevos aportes y evidencias sobre estos eventos. *Boletín técnico IMME*, 43(2), 11-34.
- Altez R., Audemard, F. A. (2008). El sismo de 1629 en Cumaná: aportes para una nueva historia sísmica del oriente venezolano. *Boletín técnico IMME*, 46 (2), 53-71.
- Anagnos, T., Kiremidjian, A. S. (1984). Stochastic Time-Predictable Model for Earthquake Occurrences. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 74, 2593-2611.
- Ando, M. (1975). Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along the Nankai Trough, Japan. *Tectonophysics* 27, 117-40.
- Audemard, F. A. (1999). Nueva percepción de la sismicidad histórica del segmento en tierra de la falla de El Pilar, Venezuela nororiental, a partir de primeros resultados paleosísmicos. *VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*.
- Audemard, F. A. (2002). Ruptura de los grandes sismos históricos venezolanos de los siglos XIX y XX revelados por la sismicidad instrumental contemporánea. *Memorias del XI Congreso Venezolano de Geofísica*.
- Audemard, F. A. (2003): Estudios paleosísmicos por trincheras en Venezuela: métodos, alcances, aplicaciones, limitaciones y perspectivas. *Revista Geográfica Venezolana*, 44(1), 11-46.
- Audemard, F. A., Leal, A. y Palme, C. (2012). Testimonios históricos de terremotos locales tsunamigénicos en el oriente venezolano. En: *Memorias de la VI Jornadas Venezolanas de sismología histórica*. 71-75.

- Audemard, F. A., Romero, G., Rendón, H. y Cano, V. (2005). Quaternary fault kinematics and stress tensors along the southern Caribbean from fault-slip data and focal mechanism solutions. *Earth-Science Review*, 69, 181–233.
- Audemard F. A., Singer, A., Soulas, J-P., et al. (2006). Quaternary faults and stress regime of Venezuela. *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, 61(4), 480-491.
- Bak, P., Tang, C. y Wiesenfeld, K. (1988) Self organized criticality. *Phys.Rev.*, A 38(1), 364-374.
- Bak,P., Tang,C. (1989) Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *J.Geophys.Res.*, 94(B1), 15635-15637.
- Bak,P., Chen,K. (1991). Self-organized criticality. *Sci.Amer.*, 26-33.
- Bakun, W. H., Lindh, A. G. (1985). The Parkfield, California, earthquake prediction experiment. *Science*, 229, 619-624.
- Ben-Zion, Y., Rice, J. R. y Dmowska, R. (1993). Interaction of the San Andreas fault creeping segment with adjacent great rupture zones and earthquake recurrence at Parkfield. *J. Geophys. Res.*, 98, 2135-2144.
- Bird, P. (2003). An updated digital model of plate boundaries. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 4(3), 1027.
- CERESIS (1985). *Catálogo de terremotos para América del Sur: Venezuela*. Centro Regional de Sismología para América del Sur. 8: 289.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- Cox, A. (1973). Plate tectonics and geomagnetic reversals. San Francisco, W. H. Freeman and Co.
- Daley, D., Vere-Jones, R. (2002). *An introduction to the theory of point processes*. USA, Springer.
- Fano, R.,(1961). *Transmission of information*. USA, M.T.I Press and J Wiley and Sons.
- Ferrer, C., Laffaille, J. y Rincón, J.C. (2005). Evidencias de la Formación y Ruptura de una Presa Natural en la Cuenca Media del Río Chama (Andes Centrales Venezolanos): Limitaciones de los Catálogos Históricos. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. Especial, 69-92.
- Fiedler, G. (1972). La liberación de energía sísmica en Venezuela, volúmenes sísmicos y mapa de isosistas. *Memorias del IV Congreso Geológico Venezolano*. Tomo IV (4), 2441-2462.

- Fiedler, G. (1988). Preliminary evaluation of the large Caracas earthquake of October 29, 1900, by means of historical seismograms. En: *Historical Seismograms and Earthquakes of the World*, editado por W.H.K. Lee et al., Academic Press, 201-206.
- FUNVISIS (comunicación personal, agosto de 2011). Información de grandes sismos históricos e instrumentales de Venezuela, 1530-2011.
- Giraldo, C., Schmitz, M., Arminio, J. F., Audemard, F. A. y Martins, A. (2002). Un transecto La Blanquilla-cratón guayanés, Venezuela oriental: modelos corticales. *Memorias del XI Congreso Venezolano de Geofísica*.
- Grases, J., Altez, R. y Lugo, M. (1999). *Catálogo de sismos sentidos o destructores: Venezuela 1530-1998*. Academia de las Ciencias Física Matemáticas y Naturales, Universidad Central de Venezuela.
- Grases, J. (2005). Algunas contribuciones de Günter Fiedler a la sismología venezolana. *Revista geográfica venezolana*, Vol. Especial, 257-266.
- Harris, R., Arrowsmith, J. (2006). Introduction to the Special Issue on the 2004 Parkfield earthquake and the Parkfield Prediction Experiment. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 96, S1-S10, 2006.
- Harte, D., Vere-Jones, D. (2005). The entropy score and its uses in earthquake forecasting. *Pure and Applied Geophysics*, 162(6-7), 1229-1253.
- Headquarters for Earthquake Research Promotion (1999). Seismic Activity in Japan - Regional perspectives on the characteristics of destructive earthquakes - (extracto). [En línea]:<<http://www.jishin.go.jp/main/index-e.html>> [Consulta: mayo 2012].
- Headquarters for Earthquake Research Promotion (2012). What is Organization of the Headquarters for Earthquake Research Promotion? Comprehensive evaluation of seismic activity. [En línea]:<<http://www.jishin.go.jp/main/index-e.html>> [Consulta: junio 2012].
- Huchon P., Kitazato, H. (1984). Collision of the Izu block with central Japan during the Quaternary and geological evolution of the Ashigara area. *Tectonophysics* 110, 201-10.
- International Seismological Centre. ISC Bulletin: event catalogue search.[En línea]:<<http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue>>
- Jackson, D., Kagan, Y. (2006). The 2004 Parkfield earthquake, the 1985 prediction, and characteristic earthquakes: Lessons for the future. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 96, S397-S409.

- Jácome M.I., Kusznir, N., Audemard, F. y Flint, S. (2003). Formation of the Maturín Foreland Basin, Eastern Venezuela: Thrust Sheet Loading or Subduction Dynamic Topography. *Tectonics*, 22(5), 104.
- Kagan, Y. Y. (1997). Statistical aspects of Parkfield earthquake sequence and Parkfield prediction experiment, *Tectonophysics.*, 270, 207-219.
- Kameda, H., Ozaki, Y. (1979). A Renewal Process Model for Use in Seismic Risk Analysis. *Memoirs of Faculty of Engineering*, Kyoto University, XLI, 11-35.
- Kanamori, H., Anderson, D. L. (1975). Theoretical basis of some empirical relations to seismology. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, 1073-1095.
- Kiremidjian, A. S., Anagnos, T. (1984). Stochastic slip-predictable model for earthquake occurrences. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 739-755.
- Knopoff, L. (1971). A stochastic model for the occurrence of main-sequence earthquakes. *Rev. Geop. Space Phys.*, 9, 175-188.
- Laffaille, J. (1996). Períodos de retorno de los terremotos andinos. *Notisismos Mérida*, 5 de febrero de 1996.
- Lomnitz, C. (1994) *Fundamentals of earthquake prediction*. USA, JohnWiley & Sons Inc.
- Malfait, B.T., Dinkelman, M. G. (1972). Circum-Caribbean tectonic and igneous activity and the evolution of the Caribbean Plate. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, 251-272.
- Memorias VI Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica (2012). Caracas, Venezuela.
- Minster, J.B., Jordan, T.H. (1978). Present-day plate motions. *J. Geophys. Res.*, 83, 5331-5354.
- Morgan, W. J. (1968). Rises, Trenches, Great Faults, and Crustal Blocks. *J. Geophys. Res.*, 73(6), 1959-1982.
- Murray, J., Segall, P. (2002). Testing time-predictable earthquake recurrence by direct measurement of strain accumulation and release. *Nature*, 419, 287-291.
- Nakamura, K. (1983). Possible nascent trench along the eastern Japan Sea as the convergent boundary between Eurasian and North American plates. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, 58, 711-22.

National Geophysical Data Center / World Data Center (NGDC/WDC) Significant Earthquake Database, Boulder, CO, USA. [En línea]:
<<http://www.ngdc.noaa.gov/nndc/struts/form?t=101650&s=1&d=1>>

Nuclear Waste Management Organization of Japan (2009). *Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan: The Tohoku Case Study*. NUMO-TR-08-03.

Okamura M., Shimazaki, K., Nakata, T., Chida, N. y Miyatake, T. (1992). Submarine active faults in the northwestern part of Beppu Bay, Japan: on a new technique for submarine active fault survey. *Mem. Geol. Soc. Jpn.* 40, 65-74.

Palme, C. (2012). Testimonios históricos de terremotos locales tsunamigénicos en el oriente venezolano. En: *Memorias de la VI Jornadas Venezolanas de sismología histórica*. Caracas, Venezuela. 71-75.

Palme, C., Morandi, M. y Choy, J. (2005). Determinación de una relación lineal entre intensidad, magnitud y distancia epicentral para el occidente de Venezuela. *Interciencia*, 30(4), 195-204.

Parzen, E. (1960). *Modern probability theory and its applications*. Japan, JohnWiley & Sons, Inc./Toppan Printing Co.Ltd.

Passalacqua, H., Fer-dez, F., Gou, Y. y Roure, F. (1995). Crustal architecture and strain partitioning in the Eastern Venezuelan Ranges. En : *Petroleum basins of South America*, Tankard, Suárez y Welsink (eds.), *Memorias AAPG*, 62, 667-679.

Patwardhan, A. S., Kulkarni, R. B. y Tocher, D. (1980). A semi-Markov model for characterizing recurrence of great earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, 323-347.

Pindell, J., Dewey, J. F. (1982). Permo-Triassic reconstruction of western Pangea and the evolution of the Gulf of Mexico-Caribbean region. *Tectonics*, 1, 179-212.

Reid, H. F. (1910). The California Earthquake of April 18, 1906. *Volume II. The Mechanics of the Earthquake*. Washington DC: Carnegie Institution of Washington, Publication No. 87, 192.

Rendón, H. (1997). Red sísmica de Venezuela, en AAVV Grases, J., *Diseño Sismorresistente, especificaciones y criterios empleados en Venezuela*. Caracas.

Richardson, R. M., Solomon, S. C. y Sleep, N. H. (1979). Tectonic stress in the plates. *Reviews of Geophysics*, 17, 981-1019.

- Richter, C. (1958). *Elementary Seismology*. USA, Freeman and Co.
- Rodríguez, J. A., Audemard, F. (2003). Sobreestimaciones y limitaciones en los estudios de sismicidad histórica con base en casos Venezolanos, *Revista Geográfica Venezolana*, 44(1), 47-75.
- Russo, R. M., Speed, R. C. (1992). Oblique collision and tectonic wedging of the South American continent and Caribbean terranes. *Geology*. 20, 447-450.
- Sangawa, A. (1994). Evidences of paleoearthquakes at archaeological sites. *Proc. Jt. Meet. US/Jpn. Coop. Program Dev. Util. Nat. Resour. Panel Earthq. Predict. Technol.*, 9th, 137-43. Tsukuba: Geogr. Surv. Inst.
- Savage, J. (1993) The Parkfield prediction fallacy. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 83, 862-881.
- Shimazaki, K., Nakata, T. (1980). Time predictable recurrence for large earthquakes. *Geophys. Res. Letts.*, 7, 279-282.
- Sibuet, J.-C., Letouzey, J., Barbier, E., Charvet, J., Foucher, J.-P., Hilde, T. W. C., Kimura, M., Ling-Yun, C., Marsett, B., Muller, C. y Strphan, J.-E. (1987). Backarc extension in the Okinawa Trough. *J. Geophys. Res.*, 92(B13), 14, 041-14, 063.
- Sobiesiak M., Alvarado, L. y Vásquez, R. (2005). Recent seismicity in northeastern Venezuela and tectonic implications. *Revista de la Facultad de Ingeniería, UCV*, 20, 75-84.
- Sykes L. R., McCann, W. R. y Kafka, A. L. (1982). Motion of Caribbean plate during last 7 million years and implications for earlier cenozoic movements. *J. Geophys. Res.*, 87, 10656-10676.
- Taira, A. (2001). Tectonic Evolution of The Japanese Island Arc System Tamaki. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 29, 109–34.
- Tamaki, K., Honza, E. (1985). Incipient subduction and obduction along the eastern margin of the Japan Sea. *Tectonophysics*, 119, 381-406.
- Turcotte, D. (1992). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Second Edition. New York. Cambridge University Press.
- ULA. Sismicidad histórica de Venezuela. [En línea]: <<http://www.sismicidad.ciens.ula.ve>> [Consulta: agosto 2011].
- Van der Hilst, R. (1990). Tomography with P, PP and pP delay-time data and the three-dimensional mantle structure below the Caribbean region. *Geologica Utraiectina*, 67, 250.

- Vere-Jones, D. (1966). A Markov model for aftershock occurrence. *Pure and Applied Geophysics*, 64(1), 31-42.
- Vere-Jones, D. (1998), Probabilities and information gain for earthquake forecasting. *Comput. Seismol.*, 30, 248–263.
- Vere-Jones, D., Ozaki, T. (1982). Some examples of statistical estimation applied to earthquake data I: cyclic Poisson and self-exciting models. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 34(1), 189-207.
- Weber, J., Dixon, T., DeMets, C., Ambeh, W., Jansma, P., Mattioli, G., Bilham, R., Saleh, J. y Perez, O. (2001). A GPS Estimate of the Relative Motion between the Caribbean and South American Plates, and Geologic Implications for Trinidad and Venezuela. *Geology*, 29, 75-78.
- Wei, D., Seno, T. (1998). Determination of the Amurian plate motion, in *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*, Geodynamics Ser. Editado por M. F. J. Flower et. al., 27, 337-46. Washington, DC: Am. Geophys. Union.
- Wells, D., Coppersmith, K. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 974-1002.
- Zöller G., Ben-Zion, Y., Holschneider, M. y Hainzl, S. (2007). Estimating recurrence times and seismic hazard of large earthquakes on an individual fault. *Geophys. J. Int.*, 170, 1300-1310.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos de Japón $M \geq 7$, entre las longitudes 120°E y 160°E y latitudes 20°N y 55°N

Año	Latitud (N)	Longitud (E)	Profundidad (km)	M
684.90984	32.5	134	--	8.4
701.3589	35.7	135.4	--	7
704.5847	33.8	136.7	--	7
745.42466	35.5	136.9	--	7.9
818.58082	35.2	139.3	--	7.9
850.90411	39	139.9	--	7
863.52055	37.1	138	--	7
869.52877	38.5	143.8	--	8.6
887.64932	33	135.3	--	8.6
922	33.8	136.7	--	7
1026.45479	34.8	131.8	--	7.5
1088.43989	40.5	143	--	7
1096.95902	34	137.5	--	8.4
1099.14247	33	135.5	--	8.4
1241.3863	35.2	139.4	--	7
1257.76986	39	144	--	7.5
1257.76986	35.2	139.5	--	7
1293.4	35.2	139.4	--	7.1
1331.61918	33.7	135.2	--	7
1341.83014	41	139.5	--	7
1360.89071	33.4	136.2	--	7
1361.5863	33	135	--	8.4
1403.91507	33.7	136.5	--	7
1408.05464	33.8	136.9	--	7
1433.84932	34.9	139.5	--	7.1
1448.71585	37.5	138.2	--	7
1495.69589	35.1	139.5	--	7.1
1498.71781	33.5	135.2	--	7.5
1498.71781	34	138.1	--	8.3
1510.7726	34.5	137.6	--	7
1520.25683	33.6	136.3	--	7
1586.04658	35	136.8	--	8.2
1602.10411	35.1	140.5	--	7.2
1605.09041	34	137.8	--	7.9
1605.09041	33	134.9	--	7.9
1611.91781	39	144.5	--	8.1
1614.90137	37.5	138	--	7.7

1616.68852	38.1	142	--	7
1616.92896	39	144.5	--	7.5
1633.16164	35.2	139.2	--	7.1
1646.43562	37.7	141.7	--	7.6
1662.8274	31.7	132	--	7.6
1677.27945	40	144	--	8.1
1677.8411	35	141.5	--	7.4
1678.75068	38.6	142	--	7.4
1700.28767	34.2	129.3	--	7
1703.99646	35	140	--	8.2
1707.82237	34.1	137.8	--	8.4
1707.82249	33.2	134.8	--	8.4
1708.11749	34	137	--	7
1717.36164	39	142.7	--	7.6
1730.85753	36.2	142.2	--	7.6
1737.9589	50	157	50	7.5
1739.62192	40.7	142.3	--	7.1
1742.87945	50.5	157	40	7.5
1763.07671	40.5	143.5	--	8
1763.18904	41	142.5	--	7.8
1763.2	40.7	142	--	7.1
1769.65753	32.3	132	--	7.4
1770.4	38.6	142	--	7.4
1771.30959	24	124.3	--	7.4
1772.42077	39.3	142.7	--	7.4
1780.4918	45.3	151.2	40	7.5
1782.63836	35.1	139.7	--	7.3
1793.12877	38.5	144	--	8.3
1804.52334	39.05	139.95	--	7.3
1811.20822	25.2	121.3	--	7
1833.93151	38.9	139.15	--	7.4
1835.54795	37.9	141.9	--	7.6
1839.32877	42.5	145	--	7.3
1841.37506	52	158	30	8.4
1843.31233	42	146	--	8.4
1847.34795	37	138	--	7.4
1847.46849	46	152	40	7.5
1854.97534	34	137.9	--	8.3
1854.979	33.1	135	--	8.4
1855.84932	34.5	137.6	--	7
1855.86027	35.65	139.8	--	7
1855.92055	32.5	134.5	--	7
1856.64208	40.5	143.5	--	8
1861.802	38.5	142	--	7.4
1872.2004	34.9	132	--	7.4
1891.82165	35.5	137	--	8.4

1894.22036	42.5	146	40	7.9
1894.46575	35.7	139.9	--	7.5
1894.80646	38.9	139.8	--	7
1896.45475	39.5	144	--	8.3
1896.88002	43.5	146	40	7.6
1897.10224	40	140	60	8.3
1897.13662	38.1	141.9	33	7.4
1897.5918	38	143.7	--	7.7
1897.62282	39	143	60	7.9
1898.30681	38.6	142	--	7.2
1898.42468	38	143	60	8.7
1899.89427	53	159	20	7.9
1899.89803	31.9	132	60	7.1
1900.02844	36.5	133.5	--	7.8
1900.98141	43	146	40	7.9
1901.2601	45	148	30	7.5
1901.47752	27	130	60	7.9
1901.60381	40.5	142.5	33	7.9
1901.60486	40.6	142.3	33	8.2
1902.44167	50	148	600	8
1904.21194	42.5	145.8	40	7.6
1904.43264	40	134	350	7.9
1904.48255	52	159	30	8.3
1904.48327	52	159	30	8.1
1904.48636	52	159	60	7.9
1904.6472	30	130	25	7.9
1905.41708	34	132	100	7.8
1905.51146	37.4	142.6	33	7
1905.66607	45	143	230	7.5
1906.05637	34	138	340	8.4
1907.39612	51.5	147	600	7.9
1908.84781	45	150	40	7.6
1909.19617	34.5	141.5	80	7.5
1909.28446	25	121.5	--	7.3
1909.85824	32	131	190	7.9
1909.88854	24.4	121.8	--	7.3
1910.11714	33	138.5	350	7.4
1910.27675	25.5	122.5	200	7.8
1910.38703	42	145	60	7.5
1911.33968	51.8	156	240	7.6
1911.4537	28	130	160	8
1913.05203	46	152	120	7.5
1913.58278	47.5	155.5	60	7.7
1914.03014	31.58	130.67	--	7.1
1914.20228	39.2	139.8	33	7.2
1914.89725	22	143	110	8.7

1915.16107	23.6	123.5	60	7.7
1915.32934	47	155	25	8.1
1915.83372	38.3	142.9	60	7.8
1916.08557	29.5	131.5	33	8
1916.30459	33	141	60	7.8
1916.83237	46.5	160	60	7.7
1917.50418	25	123	60	7.7
1917.57847	42.5	131	460	7.5
1918.08188	45.4	136.5	350	7.7
1918.68416	45.5	151.5	33	8.3
1918.85258	44.5	151.5	25	7.8
1919.33435	40.5	145.5	60	7.6
1920.42673	23.5	122.7	--	8
1922.66795	24.5	122	--	7.6
1922.8134	47	151.8	90	7.5
1923.66609	35.1	139.5	40	7.9
1923.66881	34.9	140.2	20	7.7
1924.49633	45.1	147.4	120	7.6
1926.49206	27	127	130	7.5
1927.17916	35.6	135.1	10	7.3
1929.03288	49.8	154.8	140	7.7
1930.9008	35	139	19	7.1
1931.184	40.5	142.5	60	7.7
1931.72081	36.1	139.2	20	7
1931.83676	32	131.5	60	7.5
1933.16638	39.1	144.7	10	8.4
1935.69476	43	146.5	55	7.6
1936.64013	22.3	120.8	--	7.2
1937.14053	44.5	149.4	45	7.6
1937.93522	22.9	121.2	--	7
1938.43948	25.5	125	60	7.7
1938.84483	37.1	141.7	30	7.7
1938.84507	37.2	141.7	30	7.6
1938.84759	37.5	142.2	0	7.5
1938.84905	37	141.7	0	7.1
1938.93139	22.9	121.5	--	7
1939.32945	40.1	139.5	--	7
1940.58369	44.2	139.5	10	7.5
1941.88137	32	132.1	10	7.4
1941.95837	23.3	120.3	--	7.1
1943.69139	35.3	133.9	10	7.4
1943.90881	54.9	156.8	350	7.6
1944.93222	34	137.1	30	8.1
1945.03226	34.7	137.2	--	7.1
1946.96933	33	135.6	20	8.1
1947.84111	43.8	141	33	7

1948.48989	36.5	136	20	7.3
1950.16008	46	144	340	7.9
1951.80613	23.8	121.7	21	7.3
1951.89804	22.9	121.5	--	7.5
1952.17229	42.15	143.85	45	8.1
1952.18773	41.7	142.5	--	7.1
1952.84346	52.75	159.5	45	9
1953.90066	34	141.7	60	7.4
1956.77623	46	150.5	110	7.1
1957.14754	23.9	121.6	69	7.2
1958.18908	25	125	70	7.5
1958.8492	44.53	148.54	40	8.3
1959.31743	24.78	122.7	150	7.5
1959.33782	52.5	159.5	60	8.2
1959.6202	22.18	121.13	60	7
1960.2178	39.8	143.4	20	7.5
1961.1555	31.6	131.8	74	7.3
1961.63077	36	136.7	--	7.3
1963.11882	24.5	122.1	47	7.3
1963.20374	46.6	154.7	10	7.5
1963.78143	44.81	149.54	47	8.5
1963.8001	44.78	150.24	--	7.4
1964.04782	23.2	120.6	33	7
1964.45674	38.65	139.2	40	7.5
1964.47557	43.3	146.1	77	7.6
1965.4415	44.7	148.7	--	7.2
1966.19367	24.1	122.6	48	8
1967.21142	45.53	151.11	38	7
1967.81381	24.5	122.2	65	7
1968.24871	32.3	132.5	30	7.5
1968.37168	40.8	143.2	7	8.2
1968.3728	41.5	142.7	33	7.5
1968.44691	39.4	143.1	44	7.2
1968.76723	26.3	140.6	516	7.5
1969.05012	45	143.2	204	7.6
1969.61067	43.6	147.9	30	8.2
1970.56423	32.2	131.7	34	7
1971.58441	41.4	143.5	51	7.3
1971.67883	46.5	141.2	9	7.1
1972.00857	22.6	122.1	33	7.6
1972.06581	22.5	122.3	33	7.5
1972.06599	23	122.2	33	7.7
1972.16227	33.3	140.8	56	7.2
1972.92467	33.3	140.7	66	7.4
1973.15966	50.5	156.6	27	7.2
1973.45798	43.2	145.8	48	7.7

1973.47702	43.3	146.4	50	7.1
1975.09448	40.64	122.58	33	7.4
1975.43993	43.02	147.73	15	7
1976.05579	44.91	149.12	41	7
1978.22229	44.93	148.44	33	7.5
1978.22692	44.24	148.86	33	7.6
1978.44478	38.19	142.03	44	7.7
1978.55784	22.28	121.51	17	7.4
1978.93037	44.59	146.58	91	7.5
1978.97664	23.25	122.08	33	7
1980.14547	43.53	146.75	44	7
1983.3976	40.46	139.1	24	7.7
1984.22788	44.12	148.19	44	7
1986.87093	23.9	121.57	34	7.8
1989.83498	39.84	142.76	29	7.4
1991.9736	45.53	151.02	24	7.6
1992.5447	39.42	143.33	29	7
1993.03962	43.3	143.69	102	7.6
1993.43437	51.22	157.83	71	7.5
1993.52754	42.85	139.2	17	7.7
1993.8659	51.93	158.65	34	7
1994.75769	43.77	147.32	14	8.3
1994.77077	43.91	147.92	33	7.3
1994.99045	40.52	143.42	27	7.8
1995.40149	52.63	142.83	11	7.1
1995.79573	27.93	130.18	28	7.1
1995.9226	44.66	149.3	33	7.9
1998.33693	22.31	125.31	33	7.5
1999.71984	23.77	120.98	33	7.7
2000.23896	22.34	143.73	127	7.6
2002.24462	24.28	122.18	33	7.1
2003.39833	38.85	141.57	68	7
2003.73377	41.81	143.91	27	8.3
2003.83026	37.81	142.62	10	7
2004.67875	33.07	136.62	14	7.2
2004.6793	33.18	137.07	10	7.4
2004.90921	43.01	145.12	39	7
2005.62223	38.28	142.04	36	7.2
2005.87096	38.11	144.9	11	7
2006.87252	46.59	153.27	10	8.3
2006.98498	21.8	120.55	10	7
2007.03338	46.24	154.52	10	8.1
2007.74128	22.01	142.67	260	7.5
2008.50845	53.88	152.89	633	7.7
2009.04039	46.86	155.15	36	7.4
2010.15577	25.93	128.43	25	7

2010.97184	26.9	143.7	14	7.4
2011.18388	38.44	142.84	32	7.5
2011.1897	38.3	142.37	29	9
2011.18976	36.28	141.11	43	7.9
2011.18978	38.06	144.59	19	7.6
2011.26467	38.28	141.59	42	7.1
2011.52066	38.03	143.26	23	7

Apéndice 2. Datos de Venezuela $M \geq 5$, entre las longitudes 74°W y 58°W y latitudes 4°N y 14°N.

Año	Latitud (°N)	Longitud (°W)	M	No Área
1530.6674	10.7	-64.1	7.3	4
1597.0001	7.8	-72.3	--	1
1604.0001	8.5	-71	--	1
1610.0926	8.45	-71.65	7.6	1
1629.0001	10.47	-64.17	6.2	4
1641.4426	10.9	-66.7	6.2	3
1644.0421	7.4	-72.7	7.3	1
1673.9352	9.33	-70.64	--	2
1674.0434	8.95	-70.8	7.4	2
1684.3411	10.48	-63.6	--	4
1691.0001	8.4	-71.6	--	1
1703.0001	10.5	-66.92	--	3
1709.0001	10.5	-63.6	--	4
1724.8333	6.19	-72.48	7.7	0
1737.0001	10.05	-69.3	--	2
1740.0001	8.7	-70.4	--	1
1766.8038	11	-62.5	7.5	4
1775.9847	9.6	-70.4	6.1	2
1782.7864	9.05	-69.75	--	2
1786.0001	8.5	-71.2	6.1	1
1794.77	10.1	-64.17	--	4
1796.1235	7.4	-72.6	5	1
1797.9533	10.6	-64.1	6.3	4
1801.0001	9.2	-70.3	--	2
1802.3832	10.48	-68.03	--	3
1802.6187	10.27	-64.11	--	4
1803.0001	10	-69	--	2
1805.0736	10.6	-64.1	--	4
1807.1307	6.5	-71.5	5.7	1
1812.2346	10.6	-67.1	7.1	3
1812.2346	10.2	-68.95	7.4	2
1812.2347	8.65	-71.05	6	1
1820.1882	10.5	-66.9	--	3

1823.5809	10.5	-63.8	--	4
1825.7207	10.81	-61.7	--	4
1827.0879	10.5	-66.9	--	3
1827.4788	8.15	-71.96	--	1
1831.9233	12.4	-61.45	--	0
1834.6128	8.87	-70.7	6.2	2
1837.692	10.3	-66.6	--	3
1839.2792	10.47	-64.17	--	4
1845.1356	7.8	-72.2	--	1
1849.1546	8.05	-72.25	6.4	1
1849.3353	10.7	-71.6	5.5	0
1853.5364	12.1	-63.6	7.3	4
1865.9553	10.5	-66.9	--	3
1867.2982	8.37	-71.75	--	1
1869.1307	7.92	-72.24	6.2	1
1869.1766	7.7	-73.3	6	0
1870.4356	12.04	-61.45	--	0
1870.484	9.5	-69.7	6.1	2
1874.1002	10.64	-66.92	--	3
1874.6264	10.55	-63	6.1	4
1875.3772	7.95	-72.6	7.4	1
1875.3808	7.8	-72.2	--	1
1878.2796	10.3	-66.8	6.3	3
1879.1803	10.47	-66.18	--	3
1883.4455	8.62	-70.11	--	1
1883.8999	11.42	-69.68	--	2
1886.7432	9.32	-70.44	5.5	2
1888.0234	11.3	-62.2	6.5	4
1888.8791	9.2	-69.8	6.4	2
1894.3236	8.7	-71.7	7.6	1
1894.8431	9.5	-70.2	6.1	2
1899.532	10.05	-69.3	--	2
1900.4322	10.5	-63.42	--	4
1900.8257	10.52	-66.2	7.8	3
1910.0624	12	-60.5	0.7	0
1911.2734	9	-74	7.2	0
1918.1506	12	-62	6.3	0
1919.5233	8	-72	6.3	1
1921.8667	10.5	-71	6.3	2
1922.3569	12	-59.5	6	0
1923.6014	10.5	-63.5	6.5	4
1926.0851	10.5	-63.5	6.5	4
1928.7378	12	-60	6.5	0
1929.0452	10.5	-64.5	6.9	4
1929.2037	9.9	-69.39	5.5	2
1931.3313	8.1	-69.64	6.3	0

1932.1302	12	-73.5	5.6	0
1932.1747	8.15	-71.97	6.6	1
1933.8421	8.38	-71.78	5.8	1
1935.2738	10.5	-62	6.5	4
1939.7843	10.5	-64	5.6	4
1940.4776	10	-68	5.6	3
1940.5113	13	-61.4	6.5	0
1942.3451	10	-65	6	4
1943.9714	12.97	-71.04	6.5	0
1943.9741	13.19	-71.02	6.5	0
1943.9755	12.92	-70.95	6.2	0
1943.9772	12.95	-71.06	6.5	0
1943.9782	13	-71	6.2	0
1944.0122	13.06	-70.77	6.2	0
1945.9763	10	-62	6.5	4
1946.5781	12.5	-60	6	0
1948.0567	10.2	-70.2	5	2
1950.5154	7.6	-72.75	6.1	1
1950.5888	9.7	-69.8	6.6	2
1952.299	6.9	-72.05	6.8	1
1954.3073	8	-72.9	5	1
1954.7118	6.5	-71.19	5	1
1954.9254	10.9	-61.4	6.3	4
1956.8757	8.15	-71.05	5.5	1
1957.3038	6.92	-72.97	6.6	0
1957.7521	10.94	-62.8	6.1	4
1957.7568	10.92	-62.81	6.7	4
1957.7617	10.86	-62.77	5.1	4
1957.9827	10.46	-62.58	5.9	4
1961.456	8.9	-73.4	6	0
1961.4951	11.9	-59.1	6	0
1961.7797	10.67	-62.52	6.3	4
1961.8884	10.59	-62.74	6.2	4
1961.8886	10.4	-62.76	6.4	4
1961.9422	12.1	-59.2	5.1	0
1961.9465	11.6	-59.8	5.9	0
1962.0393	13	-60.4	6.7	0
1962.8967	10.2	-62.9	5.5	4
1962.97	11.1	-61.4	5.2	4
1962.99	10.3	-61.7	6.1	4
1963.1662	11	-61.4	5.1	4
1963.2344	6.3	-73.1	5	0
1963.5322	10.4	-62.6	6.3	4
1963.6734	7.1	-73.6	5.5	0
1964.6085	9.15	-62.02	5.4	0
1964.7727	6.84	-73.05	5.2	0

1965.1561	6.77	-73	5.4	0
1965.398	11.9	-65.6	5.1	0
1965.5362	11.23	-61.25	5.1	4
1965.5457	9.25	-70.44	5.2	2
1965.5485	10.2	-64.45	5.1	4
1965.5762	6.87	-72.9	5.3	0
1965.7285	8.99	-65.99	5.7	0
1965.7783	8.28	-65.29	5.2	0
1965.8586	11.21	-61.77	5.8	4
1966.2046	10.46	-63.31	5.2	4
1966.2703	6.83	-72.95	5.4	0
1966.3667	10.37	-63.04	5.3	4
1966.581	10.01	-65.31	5.3	4
1966.5842	11.09	-62.13	5.3	4
1966.6001	12.41	-60.19	5.2	0
1966.6294	10.41	-63.8	5.3	4
1966.6952	6.78	-72.95	5.7	0
1966.731	9.95	-62.99	5.3	4
1966.7903	11.34	-64.05	5	4
1966.8001	11.68	-58.56	5.9	0
1967.0105	10.93	-62.52	5.4	4
1967.2105	13.25	-64.37	5	0
1967.2185	6.81	-73.04	5.4	0
1967.2432	10.61	-61.45	5.3	4
1967.4123	12.48	-60.31	5.2	0
1967.4778	11.54	-64.89	5	4
1967.5738	6.84	-73.09	5.9	0
1967.5753	10.68	-67.4	6.5	3
1967.991	6.97	-72.84	5	0
1968.1951	13.15	-72.3	5.3	0
1968.348	6.82	-73.01	5.6	0
1968.3593	7.7	-73.5	6	0
1968.7193	10.76	-62.7	6.2	4
1968.8771	9.57	-72.63	5.8	0
1969.5541	6.6	-73.7	5	0
1969.8015	10.88	-72.34	5.7	0
1969.8069	10.92	-62.55	5.4	4
1970.0723	7.49	-72.09	5.6	1
1970.3793	10.99	-68.92	5.1	2
1970.55	6.83	-73.01	5.1	0
1970.698	9.31	-73.97	5	0
1970.9512	9.99	-72.68	5.1	0
1971.3084	6.77	-72.97	5.1	0
1972.1737	6.78	-72.99	5	0
1972.1897	10.82	-62.98	5.1	4
1972.6308	6.87	-73.12	5.2	0

1972.6589	10.66	-62.35	5.2	4
1973.3087	6.78	-73.07	5.1	0
1973.5155	6.82	-75.94	5.4	0
1973.6624	7.24	-72.85	5.7	1
1974.4457	10.61	-63.47	5.7	4
1974.6776	6.82	-73.07	5.3	0
1974.825	10.58	-63.45	5	4
1975.1742	9.13	-69.87	5.5	2
1975.2586	10.08	-69.65	6	2
1975.286	9.42	-61.47	5.3	0
1975.644	10.75	-62.65	5.1	4
1975.9062	9.38	-71.67	5.2	0
1976.1992	6.83	-72.98	5.3	0
1976.2508	6.82	-72.99	5	0
1976.6437	11.07	-62.36	5	4
1976.9747	6.78	-73.02	5	0
1977.2222	6.77	-73.02	5.4	0
1977.7224	10.42	-62.56	5.1	4
1977.7577	9.95	-62.23	5.1	4
1977.8056	7.17	-72.91	5	1
1977.9443	9.56	-69.52	5.5	2
1978.0557	6.43	-72.31	5.1	0
1978.3211	11.99	-72.54	5.2	0
1978.499	6.75	-73.02	5.1	0
1978.6003	7.02	-72.11	5	1
1979.0378	6.77	-73	5	0
1979.1123	6.73	-73	5	0
1979.1904	6.75	-73.01	5.1	0
1979.342	8.44	-70.89	5.4	1
1979.342	8.48	-70.98	5.2	1
1979.3859	6.69	-73.36	5.2	0
1980.201	6.85	-73.02	5	0
1980.3335	7.22	-72.18	5	1
1980.6227	6.81	-73.02	5	0
1980.8304	6.77	-73.01	5	0
1981.1653	12.32	-60.26	5	0
1981.4487	6.78	-73.05	5	0
1981.795	8.52	-72.35	5.5	1
1981.9258	10.52	-61.42	5	4
1981.9369	9.05	-71.06	5.2	2
1981.9504	6.74	-73	5.2	0
1981.9604	6.79	-73.05	5	0
1981.9823	10.94	-62.36	5.1	4
1982.0388	9.26	-69.98	5.1	2
1982.0538	13.76	-60.47	5.1	0
1982.3536	10.7	-62.51	5.2	4

1982.5048	7.7	-72.12	5.5	1
1982.7197	11.25	-60.77	5.2	0
1982.8157	11.32	-62.09	5	4
1982.9436	8.65	-71.72	5.1	1
1983.1828	10.9	-62.04	5.9	4
1983.2749	10.35	-62.54	5.1	4
1983.3808	6.51	-72.8	5	0
1983.6585	6.38	-72.89	5	0
1984.015	6.75	-73.06	5	0
1984.0406	11.08	-60.61	5.1	0
1984.1136	12.09	-60	5.3	0
1984.3131	6.72	-71.57	5	1
1984.6366	10.45	-62.45	5.1	4
1984.843	6.76	-73.06	5.1	0
1985.4849	6.45	-73.08	5.2	0
1985.5092	16.91	-69.92	5.3	0
1985.9069	11.76	-61.37	5.2	4
1986.2755	12.26	-59.38	5	0
1986.4427	10.42	-62.91	5.9	4
1986.4927	6.59	-72.96	5.3	0
1986.5444	10.8	-69.35	5.6	2
1986.8309	7.03	-73.22	5	0
1987.0525	6.99	-72.6	5	1
1988.1892	10.17	-60.14	7	0
1988.1945	10.2	-60.21	5.3	0
1988.2056	9.72	-60.48	5.2	0
1988.5285	9.91	-71.4	5	0
1989.2866	8.4	-61.07	5	0
1989.327	11.1	-68.18	5.7	3
1989.337	11.14	-68.21	5	3
1990.0995	10.27	-72.8	5	0
1990.1977	9.97	-59.68	5.5	0
1990.2186	10.73	-65.37	5.2	4
1990.4747	6.97	-73.06	5	0
1990.8211	6.45	-72.65	5.3	0
1990.9206	6.67	-73.15	5.1	0
1991.4821	4.76	-73.08	5.6	0
1991.5984	9.99	-69.99	5	2
1991.6254	10	-70.03	5.3	2
1992.005	5.41	-74.04	5.6	0
1992.9974	6.65	-72.9	5.3	0
1993.3366	6.51	-72.79	5	0
1993.3899	6.42	-72.9	5	0
1993.4287	9.2	-70.29	5	2
1993.554	6.46	-71.12	5.9	1
1993.6953	10.86	-62.6	5.2	4

1993.9978	9.68	-70.69	5.2	2
1994.1327	6.61	-73.06	5.2	0
1994.1423	8.57	-72.94	5.3	1
1994.3361	10.06	-60.37	5.7	0
1994.413	7.42	-72	6.1	1
1994.4133	7.27	-72.08	5	1
1994.4141	11.92	-60.68	5.5	0
1994.4158	7.02	-72.59	5.1	1
1994.8552	7.52	-72.08	5.4	1
1994.9415	6.6	-73.08	5.1	0
1995.051	5.28	-72.78	6	0
1995.0537	4.78	-72.92	5.2	0
1995.147	6.58	-73.05	5	0
1995.9933	9.99	-70.08	5.1	2
1995.9933	9.99	-70.03	5	2
1996.1529	11.35	-60.32	5.1	0
1997.0005	7	-72.19	6	1
1997.1801	6.72	-73.02	5.1	0
1997.25	11.08	-61.38	5.6	4
1997.2677	10.88	-60.57	5.1	0
1997.3052	11.13	-60.39	5.7	0
1997.3053	10.95	-60.23	5.1	0
1997.3372	10.87	-60.6	5.2	0
1997.3583	6.68	-73.08	5.1	0
1997.4419	6.61	-73.27	5.2	0
1997.4433	6.97	-72.64	5.5	1
1997.5125	11.21	-62.2	5.1	4
1997.52	10.54	-63.52	6.9	4
1998.8189	6.53	-73.28	5.5	0
1999.2109	10.66	-73.8	5.5	0
1999.2422	11.04	-70.61	5.4	2
1999.283	6.63	-73.02	5	0
1999.8527	7.18	-72.44	5.4	1
1999.9207	11.12	-70.08	5.2	2
2000.7585	11.02	-62.3	5.9	4
2001.0349	12.87	-89.02	5.7	0
2001.0773	18.68	-73.13	5	0
2001.1611	13.51	-89.02	5.8	0
2001.1618	9.48	-76.61	5	0
2001.1669	23.51	-70.71	5	0
2001.21	12.98	-86.57	5.3	0
2001.2391	14.89	-88.89	5.5	0
2001.279	13.47	-86.69	5.2	0
2001.2949	7.71	-75.29	5.4	0
2001.3307	18.91	-61.37	5	0
2001.3341	34.19	60.86	5.6	0

2001.3379	24.52	-67.11	5.7	0
2001.3476	9.11	-77.7	5.1	0
2001.35	17.32	-86.66	5.9	0
2001.3728	2.75	-80.12	5.2	0
2001.4054	8.44	-74.35	5.2	0
2001.4076	18.91	-117.77	5.7	0
2001.9722	8.12	-71.08	5.1	1
2002.0811	23.12	-58.83	5.3	0
2002.0928	9.63	-82.07	5	0
2002.3693	18.89	-70.61	5.1	0
2002.4574	6.9	-84.04	5	0
2002.5795	19.44	-64.42	5.1	0
2002.6526	10.29	-60.64	5.4	0
2002.6951	4.94	-77.78	5	0
2002.8959	2.79	-74.73	5	0
2003.0594	2.54	-75.34	5.9	0
2003.1219	9.72	-70.33	5.8	2
2003.1578	6.81	-73.21	5	0
2003.1856	19.32	-68.07	5.3	0
2003.2166	18.11	-68.11	5.3	0
2003.2413	4.07	-76.63	5.3	0
2003.3467	18.54	-65.32	5.4	0
2003.3857	36.25	3.73	8.9	0
2003.3936	6.86	-76.78	5	0
2003.4576	8.38	-70.88	5	1
2003.4619	6.84	-73.08	5	0
2003.4692	10.69	-59.23	5	0
2003.541	6.83	-76.96	5.2	0
2003.5569	18.39	-68.14	5.2	0
2003.5721	18.49	-64.74	5	0
2003.6102	8.74	-74.31	5	0
2003.6625	17.18	-68.56	5.2	0
2003.6634	6.27	-77.39	5.3	0
2003.7178	4.78	-75.33	5	0
2003.8237	9.27	-80.22	5.5	0
2003.8289	4.56	-76.5	5.4	0
2003.9028	18.57	-69.41	5.3	0
2003.9292	19.29	-67.33	5.4	0
2003.9293	19.39	-67.1	5.2	0
2003.9668	2.85	-74.9	5.4	0
2003.9816	18.62	-68.79	5.3	0
2004.0395	10.87	-62.22	5.2	4
2004.0952	19.51	-70.01	5.2	0
2004.0952	19.51	-70	5.2	0
2004.0957	19.99	-70.61	5.3	0
2004.1379	10.82	-73.96	5.2	0

2004.3406	6.27	-74.18	5	0
2004.4635	6.74	-73.17	5	0
2004.5097	7.45	-75.15	5	0
2004.6179	4.22	-74.87	5.2	0
2004.6399	9.25	-78.48	5.3	0
2004.693	6.75	-77.35	5	0
2004.693	6.75	-77.35	5	0
2004.693	6.75	-77.35	5	0
2004.7551	6.86	-73.09	5.3	0
2004.7847	6.99	-78.07	5.3	0
2004.7991	6.88	-77.2	5	0
2004.8726	4.55	-78.08	7	0
2004.9202	10.51	-60.9	5.2	4
2004.9202	10.47	-61.01	5	4
2004.9202	10.47	-61.01	5	4
2004.9202	10.47	-61.01	5	4
2004.9819	10.43	-72.61	5	0
2004.9962	9.67	-75.13	5.3	0
2005.1514	6.91	-73.04	5.5	0
2005.2573	2.36	-74.01	5.2	0
2005.2573	2.36	-74.01	5.2	0
2005.3101	6.08	-73.15	5.2	0
2005.3152	9.19	-70.11	5.2	2
2005.3484	6.89	-73.16	5	0
2005.3933	9.9	-70.74	5	2
2005.5197	6.84	-73.08	5.3	0
2005.8104	9.81	-73.19	5.2	0
2005.812	11.05	-62.2	5.3	4
2005.8245	10.85	-61.88	5.5	4
2006.0011	12.08	-71.32	5	0
2006.008	9.87	-71.96	5	0
2006.025	6.78	-73.13	5.4	0
2006.448	10.88	-62.11	5	4
2006.5906	10	-70.64	5.5	2
2006.744	10.8	-61.3	6.1	4
2006.7446	10.78	-61.32	5.5	4
2006.9169	6.91	-73.09	5	0
2007.3106	5.55	-76.14	5.6	0
2007.343	6.75	-73.2	5.3	0
2007.4679	7.17	-72.2	5.3	1
2007.4722	10.06	-77.65	5	0
2007.5396	7.19	-72.16	5.5	1
2008.1308	6.8	-73.07	5.5	0
2008.1512	10.22	-70.96	5	2
2008.2396	6.91	-72.99	5.2	0
2008.4869	11.12	-62.24	5.2	4

2008.5035	10.34	-60.2	5.3	0
2008.6087	6.91	-73.01	5	0
2008.6101	10.52	-64.17	5.2	4
2009.2996	7.81	-73.55	5.4	0
2009.338	10.21	-67.03	5.6	3
2009.3869	5.51	-72.73	5	0
2009.5516	7.49	-73.07	5	0
2009.6982	10.81	-67.91	6.4	3
2009.7535	6.77	-73.12	5.2	0
2009.8211	6.82	-73.03	5.3	0
2009.9051	10.46	-69.74	5.6	2
2010.0404	10.51	-63.49	5.4	4