GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS PARA LA LUNA BASADOS EN LA METODOLOGÍA DE KANAI-TAJIMI

Oscar Alejandro Arcila Giraldo

Co-directores:

Daniel Gómez Pizano, PhD

Alejandro Cruz Escobar, MSc

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Programa Académico de Ingeniería Civil (3747)

Santiago de Cali, febrero 2025

GENERACIÓN DE ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS PARA LA LUNA BASADOS EN LA METODOLOGÍA DE KANAI-TAJIMI

Oscar Alejandro Arcila Giraldo

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Co-directores:

Daniel Gómez Pizano, PhD

Alejandro Cruz Escobar, MSc

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Programa Académico de Ingeniería Civil (3747)

Santiago de Cali, febrero 2025

RiSK GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INFRAESTRUCTURA CIVIL INTELIGENTE Y RESILIENTE

Universidad del Valle

Nota de aceptación

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad del Valle para optar al título de Ingeniero Civil.

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, febrero 2025

RESUMEN

La idea de colonizar la Luna para aprovechar todas sus ventajas geográficas, económicas y tecnológicas, plantea la necesidad de construir hábitats permanentes. La construcción de estas estructuras debe considerar la amenaza sísmica. No obstante, la poca disponibilidad de registros con características adecuadas requiere el uso de metodologías alternativas que nos permitan generar registros nuevos a partir de los existentes. Este trabajo calcula la deconvolución regularizada de los registros tipo superficial del proyecto Apollo, registrados con sismómetros tipo LP de disposición horizontal, posteriormente emplea un algoritmo derivado de la metodología de Kanai–Tajimi y la optimización de enjambres para caracterizar los registros. Se obtuvieron los sismogramas calibrados de los registros, se caracterizaron estos en el dominio del tiempo y frecuencia y se construyó una aplicación para automatizar y simplificar el proceso. Adicionalmente, se desarrolló una metodología que permite la deconvolución de los registros LP de proyecto Apollo de componente horizontal, caracterizando de manera satisfactoria estos registros e implementando un software para la aplicación fácil y rápida de estos resultados en la generación de sismogramas sintéticos para la Luna. La metodología desarrollada puede adaptarse con relativa facilidad a otros tipos de eventos, como por ejemplo los producidos por impacto de meteoroide o a registros clasificados como profundos. Finalmente, los resultados se encuentran limitados principalmente debido al número de registros disponibles, lo que demuestra la necesidad de nuevos estudios sísmicos en la Luna.

Palabras clave: moonquake, proyecto Apollo, deconvolución, sismos sintéticos

Tiburoncín, gracias por ser

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría expresar mi sincera gratitud a Daniel y Alejandro, mis estimados profesores, por toda la orientación, apoyo e instrucción que me brindaron durante mis estudios de pregrado. No podría haber completado este proyecto sin su invaluable ayuda.

Este trabajo recibió financiamiento del proyecto de convocatoria interna de la Universidad del Valle titulado **Metodología para la caracterización de la amenaza sísmica, generación de sismos sintéticos y espectros de diseño para la Luna** (21078). Agradezco a la universidad por los recursos dispuestos para su realización.

Agradezco a ISAS/JAXA por su servicio gratuito de base de datos DARTS, el cual proporcionó los registros sísmicos del proyecto Apollo. Estos registros resultaron esenciales para esta investigación.

This research made use of data obtained from Data ARchives and Transmission System (DARTS), provided by Center for Science-satellite Operation and Data Archive (C-SODA) at ISAS/JAXA.

TABLA DE CONTENIDO

Página

RESUMEN IV
LISTA DE TABLAS IX
LISTA DE FIGURAS X
LISTA DE CÓDIGOS FUENTE XIII
1. INTRODUCCIÓN 1
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 3
2.1. Planteamiento del problema 3
2.2. Formulación del problema 4
3. JUSTIFICACIÓN 5
4. OBJETIVOS 6
4.1. Objetivo general 6
4.2. Objetivos específicos 6
5. ALCANCE 7
6. MARCO TEÓRICO 8
6.1. Revisión de antecedentes 8
6.2. Estado del arte 9
6.2.1. Experimento sísmico pasivo del programa Apollo 9
6.2.2. Sismicidad lunar 11
6.2.3. Método de Kanai–Tajimi (Convencional) 12
7. PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS 15
7.1. Descripción de los sismómetros LP horizontales 15
7.2. Unidades Digitales (DU) de los sismómetros 19
7.3. Registros sísmicos del programa Apollo 20
7.4. Preprocesamiento 22

Página

7.5. Calibración de los registros . . . 25
7.5.1. Deconvolución de los registros LP del programa Apollo . . . 25
7.5.2. Implementación y verificación del algoritmo de deconvolución . 27
8. CARACTERIZACIÓN DE LOS REGISTROS . . . 32
8.1. Optimización . . . 32
8.1.1. Optimización por enjambres de partículas . . . 34
8.1.2. Aspectos matemáticos de la optimización por enjambres de partículas . . . 36
8.2. Proceso de caracterización . . . 37
8.2.1. Modelo de filtro . . . 40
8.2.2. Modelo de ventana . . . 41
8.2.3. Generación de acelerogramas . . . 43
8.2.4. Función objetivo . . . 44
8.2.5. Validación del algoritmo de caracterización . . . 46
9. RESULTADOS . . . 49
9.1. Generación de acelerogramas sintéticos . . . 49
9.1.1. Seleción de eventos . . . 49
9.1.2. Ruido blanco . . . 50
9.1.3. Filtro en frecuencia . . . 51
9.1.4. Ventana envolvente temporal . . . 52
9.2. Synthetic Moonquake Generaor . . . 54
9.2.1. Pantalla principal . . . 55
9.2.2. Pestaña de acelerograma sintético . . . 58
9.2.3. Pestaña de espectros de respuesta . . . 69
10. CONCLUSIONES . . . 78
BIBLIOGRAFÍA . . . 79

LISTA DE TABLAS

Tabla Página

9.1. Registros seleccionados luego del proceso de caracterización clasificados según rango de magnitud de momento 50

9.2. Valores medios de los parámetros de las ventanas definidas según rango de magnitud de momento 53

LISTA DE FIGURAS

Figura Página

6.1. Estación PSE del Apollo 11 desplegada. Tomado de *Apollo 11 Seismic Experiment - Moon: NASA Science* (2023). 10

6.2. Configuración del ALSEP de las misiones Apollo. Tomado de *Hamish* (2016). 10

6.3. Ejemplo de registro de sismos lunares. Tomado de Nunn et al. (2020). . 12

6.4. Ejemplo de ruido blanco limitado en banda. Tomado de la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* 13

6.5. Ejemplo de filtro Kanai–Tajimi. Tomado de Clough y Penzien (2003). . . 14

6.6. Ejemplo de ventana temporal. Tomado de Clough y Penzien (2003). . . . 14

7.1. Modulo PSE de las misiones Apollo 12, 14, 15 y 16. Tomado de *ALSEP, Passive Seismic Experiment Array | National Air and Space Museum* (2023). 16

7.2. Detalle de un sismómetro horizontal del Apollo PSE. Tomado de *Hamish* (2016). 17

7.3. Diagrama de bloques de los sismómetros Apollo LP. Adaptado de Yamada (2005). 18

7.4. Curvas de respuesta de los sismómetros LP del proyecto Apollo en desplazamiento. Adaptado de Yamada (2005). 19

7.5. Ejemplo de sismograma de los datos extraídos 23

7.6. Ejemplo de sismograma y PSD de los datos procesados 24

7.7. Función de transferencia LP-Peak original y modificada para nivel de agua con $k = 0{,}10$. 28

7.8. Ejemplo de sismograma de moonquake. Tomado de National Aeronautics and Space Administration (NASA) (1970) 29

7.9. Resultado del proceso de verificación del algoritmo de deconvolución . . . 30

7.10. Comparación de la deconvolución del registro N01 ST12 LPX Peak por el metodo de Nunn et al. (2022) y la deconvolución regularizada por nivel de agua de este trabajo (Arcila). 31

Figura Página

8.1. Diagrama de bloques general de un algoritmo de de optimización de enjambres de partículas . . . 35
8.2. Resultado esquemático de la ejecución de un algoritmo de enjambre de partículas tridimensional. Tomado de *Particle Swarm Optimisation* (2017) 36
8.3. Diagrama de flujo General del proceso de caracterización de un moonquake 39
8.4. Diagrama de amplitudes de Bode de un ejemplo de filtro. Tomado de la aplicación *Synthetic Moonquake Generator*. . . . 40
8.5. Función que describe los componentes y ecuaciones de la envolvente temporal. Adaptado de Clough y Penzien (2003). . . . 41
8.6. Comparación de los registros de moonquake real y sintéticos para el registro N02-ST14-LPX . . . 46
8.7. Comparación de los registros de moonquake real y sintéticos para el registro N16-ST12-LPX . . . 47
8.8. Comparación de los registros de moonquake real y sintéticos para el registro N01-ST12-LPY . . . 47
9.1. Ventana principal del software *Synthetic Moonquake Generator* . . . 56
9.2. Barra de menú y pestañas *Synthetic Accelerogram* y *Response Spectrum* . 56
9.3. Menú File y sus opciones . . . 57
9.4. Menú *? (Ayuda)* y sus opciones . . . 57
9.5. Ventana *About* . . . 58
9.6. Pestaña *Synthetic Accelerogram* . . . 59
9.7. Panel de generación de la señal de ruido blanco (*White Noise*) . . . 60
9.8. Pestaña *Observed Values* del panel de edición del filtro (*Band–Pass Filter*) 61
9.9. Pestaña *User Values* del panel de edición del filtro (*Band–Pass Filter*) . . 62
9.10. Pestaña *Observed Values* del panel *Temporal Envelope* . . . 63
9.11. Pestaña *User Values* del panel *Temporal Envelope*. . . . 65
9.12. Panel *Peak Ground Acceleration* de la pestaña *Synthetic Accelerogram* . . 66
9.13. Panel de figuras de la pestaña *Synthetic Accelerogram* . . . 67
9.14. Controles embebidos en cada figura del panel de figuras de la pestaña *Synthetic Accelerogram* . . . 67
9.15. Botón *Export Figures* de la pestaña *Synthetic Accelerogram* . . . 68

Figura Página

9.16. Botón *Export Accelerogram* de la pestaña *Synthetic Accelerogram* 68
9.17. Pestaña *Response Spectrum* 70
9.18. Panel *Damping Ratio* de la pestaña *Response Spectrum* 70
9.19. Panel *Response Spectrum Periods* de la pestaña *Response Spectrum* . . . 71
9.20. Panel *Gravitational Acceleration* de la pestaña *Response Spectrum* 71
9.21. Panel de figuras de la pestaña *Response Spectrum* 75
9.22. Botón *Export Figures* de la pestaña *Response Spectrum* 75
9.23. Botón *Export Spectra* de la pestaña *Response Spectrum* 76

LISTA DE CÓDIGOS FUENTE

Código Página

7.1. Ejemplo de Datos LP del Apollo PSE. Tomado de DARTS 20
7.2. Formato de URL del DARTS y ejemplo. Tomado de DARTS 21
7.3. Parte del catálogo Nakamura. 21
7.4. Archivo de ejemplo con datos extraídos 22
7.5. Archivo de ejemplo con datos procesados 24
7.6. Algoritmo de Deconvolución 29
8.1. Algoritmo para el diseño y aplicación del filtro en frecuencia 41
8.2. Algoritmo para el cálculo de la ventana envolvente temporal 43
8.3. Algoritmo para la generación de sismogramas para cada partícula del enjambre 44
8.4. Conjunto de frecuencias y coeficientes de ponderación para el cálculo del objetivo en Frecuencia 45
8.5. Función objetivo del algoritmo de caracterización 45
9.1. Algoritmo usado para la generación de la señal de ruido blanco limitado en banda 51
9.2. Algoritmo usado para el cálculo del filtro Pasa–Banda y su aplicación . . 52
9.3. Algoritmo para el cálculo de la envolvente temporal y su aplicación . . . 53
9.4. Algoritmo para la aplicación del PGA deseado al registro 54
9.5. Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo de la señal de ruido blanco limitado en banda y su PSD 60
9.6. Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo del filtro Pasa–Banda de la pestaña *Observed Values* del panel *Band–Pass Filter* 61
9.7. Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo del filtro Pasa–Banda en la pestaña *User Values* del panel *Band–Pass Filter* 62

Código Página

9.8. Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo de la envolvente temporal de la pestaña *Observed Values* del panel *Temporal Envelope* 64

9.9. Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo del envolvente temporal en la pestaña *User Values* del panel *Temporal Envelope* 65

9.10. Parte inicial de un archivo *Synthetic Moonquake Accelerogram Record* exportado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* 69

9.11. Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo de los periodos del panel *Response Spectrum Periods* 71

9.12. *SpecMQ.m*: Función para el cálculo de los espectros de respuesta sísmicos de la pestaña *Response Spectrum* 73

9.13. Parte inicial de un archivo *Synthetic Moonquake Response Spectra* exportado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* 77

1. INTRODUCCIÓN

Recientemente, ha aumentado el interés científico y económico por la colonización de la Luna y Marte, lo que supone la adaptación de las técnicas y tecnologías existentes para la futura construcción de hábitats extraterrestres. La Luna, por su relativa proximidad con el planeta Tierra, es el laboratorio de pruebas perfecto para el desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías, convirtiéndose en el primer candidato para ser colonizado (Benaroya, 2018). Los asentamientos lunares permanentes permitirán mejorar nuestro entendimiento de la ingeniería y la ciencia en general y eventualmente servirán como un primer paso hacia la colonización de otros cuerpos celestes (Benaroya, 2018).

En la Luna, las edificaciones extraterrestres se expondrán a una serie de condiciones extremas, que incluyen la ausencia de atmósfera, considerables gradientes de temperatura y las amenazas locales (Benaroya, 2018). Una de estas amenazas es causada por la actividad sísmica, la cual fue registrada durante un periodo de ocho años, con ayuda de los sismómetros desplegados durante las misiones 12, 14, 15 y 16 del programa Apollo (Nakamura et al., 1982). En los registros adquiridos por estos sismómetros se han identificado alrededor de 13000 eventos (Nunn et al., 2020), que se clasificaron como térmicos, profundos, superficiales, impactos de meteoroide, impactos artificiales y sin clasificar (Nakamura et al., 1981). Los eventos superficiales son particularmente importantes debido a la liberación de energía relativamente alta y magnitudes de ondas de cuerpo (M_b) en algunos casos mayores a 5.0 (Oberst, 1987).

El diseño de estructuras que presentan una respuesta adecuada frente a un evento sísmico determinado hace parte de la ingeniería sísmica (Reddy et al., 2019). Esta actividad se ha venido perfeccionando mediante la investigación y experimentación, para la construcción de estructuras en la Tierra durante siglos (Rodríguez-Pascua et al., 2020). No obstante, la construcción de hábitats extraterrestres en la Luna necesita la extrapolación de las metodologías a un entorno con gravedad reducida, recursos limitados y extremadamente hostil. Esta extrapolación supone la revisión de los métodos actuales, que incluyen la evaluación de la amenaza, la creación de

espectros de diseño, los métodos constructivos y la creación de nuevos materiales, entre otros.

Sin embargo, en la Luna solo se cuenta con registros de 74 eventos superficiales identificados (Nakamura et al., 1981; Onodera, 2024) y dentro de una breve ventana temporal, que posiblemente no incluya un registro que clasifique como sismo de diseño. Para solucionar esta problemática, se puede recurrir a la generación de sismos sintéticos con características acordes a la sismicidad registrada, que puedan ser modificados para hacerlos sismos de diseño a partir de la adaptación de sus espectros de respuesta (Patiño et al., 2024) a los espectros de diseño disponibles (Ruiz et al., 2022). En particular, la metodología de Kanai–Tajimi permite la generación de acelerogramas sintéticos mediante el uso de una señal aleatoria, un filtro en frecuencia y una ventana temporal con características adecuadas (Kanai, 1957; Tajimi, 1960).

En este trabajo se plantea la generación de acelerogramas sintéticos con características compatibles a los sismos lunares (moonquakes) superficiales, siguiendo una metodología basada en el algoritmo de Kanai–Tajimi. Los resultados permitirán una mejor comprensión del comportamiento dinámico de las estructuras lunares. Esto se puede lograr desarrollando acelerogramas sintéticos a partir de la caracterización en tiempo y frecuencia de los registros existentes y el escalado de los registros sintéticos. Esta comprensión es esencial en el contexto de la ingeniería lunar, donde la seguridad y la fiabilidad de las estructuras en la Luna son consideraciones críticas

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Planteamiento del problema

La intención de colonizar la Luna en la próxima década ha despertado el interés del público general y de la comunidad científica, con la aparición de proyectos por parte de entes gubernamentales y particulares (Gebhardt, 2017; Mogg, 2018; Berger, 2021). En la Luna se presentan movimientos sísmicos clasificados como superficiales, profundos, térmicos, por impacto de meteoroide y no clasificados (Nakamura, 1977). Son de particular interés para el caso de este estudio los sismos de origen superficial, que tienen la menor frecuencia de ocurrencia, pero representan una amenaza sísmica importante para un asentamiento lunar (Oberst y Nakamura, 1992). Estos eventos se caracterizan por sus grandes liberaciones de energía de hasta $6.9{\cdot}10^{12} J$ y magnitudes de ondas de cuerpo M_b mayores a 5.0 (Oberst, 1987; Oberst y Nakamura, 1992).

En la Tierra se ha observado, en numerosas ocasiones, que sismos de características similares tienen alto potencial destructivo (Ruiz et al., 2022). Además, la propagación de las ondas sísmicas lunares es distinta a la terrestre, observándose una dispersión con mayor intensidad y una menor atenuación debida a la ausencia de agua en el suelo y a la heterogeneidad del mismo (Oberst y Nakamura, 1992). En consecuencia, los eventos suelen tener duraciones de más de una hora, por lo que podrían potencialmente, llegar a generar fatiga estructural e incluso el colapso.

El diseño sismoresistente de edificaciones puede usar una serie de registros instrumentales (Reddy et al., 2019). En caso de no contar con información local suficiente se puede recurrir a registros con características compatibles pero de zonas con geología y sismología similar (Reddy et al., 2019). Para la Luna se cuenta únicamente con registros de 74 eventos superficiales, registrados en un periodo de ocho años. Estos registros se encuentran disponibles gracias al "fdsnws-dataselect"[1]. Adicionalmente, las señales sísmicas registradas por el programa Apollo se encuentran disponibles en unidades digitales (DU), esto significa que es necesario realizar un proceso de deconvolución sobre estas para obtener los valores de aceleración, velocidad y desplazamiento.

[1]The International Federation of Digital Seismograph Networks

Para resolver el problema de la escasez de registros se puede recurrir a las técnicas de generación de registros sintéticos como por ejemplo la metodología de Kanai–Tajimi (Kanai, 1957; Tajimi, 1960). La metodología de Kanai–Tajimi, a partir de una señal de naturaleza aleatoria, permite obtener un registro sintético con una serie de características que pueden ajustarse al tipo de evento requerido (Jennings et al., 1968). Esto se logra con ayuda de un filtro en frecuencia y una ventana temporal de características determinadas a partir del análisis de los registros disponibles tanto en el dominio del tiempo como de frecuencia (Clough y Penzien, 2003).

2.2 Formulación del problema

Considerando que las características de los sismos superficiales hacen de estos una potencial amenaza para futuros asentamientos lunares y el hecho de que existen muy pocos registros, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo adaptar la metodología Kanai–Tajimi para generar acelerogramas sintéticos para la Luna que guarden armonía con los registros de sismos lunares superficiales?

3. JUSTIFICACIÓN

Diversas agencias espaciales gubernamentales (NASA, ESA, JAXA, etc.) y compañías privadas han mostrado un creciente interés en desarrollar asentamientos lunares permanentes en los próximos años. En estas instalaciones se tiene planeado realizar actividades económicas e industriales, y principalmente investigación científica, que permitirán tener un mejor entendimiento de la ciencia, la tecnología y el sistema solar. Estos asentamientos estarán compuestas por hábitats que deberán ser diseñados para cumplir con requisitos de economía, seguridad, comodidad y funcionalidad para los futuros ocupantes. El diseño racional de estos asentamientos extraterrestres necesitará considerar una diversidad de condiciones y amenazas entre las que encontramos la sísmica.

El diseño sismoresistente de las futuras estructuras permanentes extraterrestres requiere del uso de sismos de diseño, no obstante, el escaso número de registros tipo superficial requiere de metodologías alternativas para la generación de registro sintéticos. No obstante, no se encontraron registros de sismos lunares sintéticos obtenidos a partir de los registros del programa Apollo. Este trabajo propone la generación de acelerogramas sintéticos a partir de los registros existentes. Específicamente, se pretende generar registros sintéticos con características acordes a las de los registros tipo superficial del proyecto Apollo, empleando un método derivado de la metodología de Kanai–Tajimi. La metodología desarrollada podrá ser extrapolada para generar registros sintéticos compatibles con otros tipos de sismos lunares como por ejemplo el producido por impacto de meteoroides, convirtiéndose en un referente para trabajos posteriores relacionados con el diseño de estructuras seguras y sostenibles a largo plazo. Así mismo, este trabajo incentiva la necesidad del despliegue de una nueva red sísmica lunar que permita la adquisición de datos con mayor calidad y en una ventana de tiempo más amplia, de modo que se puedan realizar análisis similares con menor incertidumbre asociada.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Generar acelerogramas sintéticos para la Luna que conserven las características de los sismos superficiales previamente registrados por el programa Apollo.

4.2 Objetivos específicos

1. Realizar el procesamiento de los registros de tipo superficial del programa Apollo
2. Determinar las características en el dominio del tiempo y frecuencia de los sismos lunares superficiales
3. Adaptar la metodología Kanai–Tajimi para la generación de acelerogramas sintéticos para la Luna que conserven las características de los sismos lunares superficiales previamente registrados

5. ALCANCE

El presente trabajo se centra en generar acelerogramas sintéticos compatibles con los registros de los eventos tipo superficial obtenidos por el proyecto Apollo. Para esto fue necesario extraer la información de los registros sísmicos existentes y calcular mediante deconvolución los acelerogramas de los movimientos del suelo lunar tipo superficial de componente horizontal registrados por los sensores de periodo largo. Estos acelerogramas se caracterizaron mediante un modelo de ventana temporal y filtro en frecuencia con ayuda de un algoritmo de optimización global de enjambres. Finalmente, se construyó un software con interfaz gráfica, que facilita la generación de los acelerogramas sintéticos con características compatibles con los sismos lunares tipo superficial.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 Revisión de antecedentes

El movimiento de la superficie lunar se registró con ayuda de los sismómetros del proyecto Apollo, que hacían parte del Apollo Lunar Surface Experiments Package (ALSEP) (National Aeronautics and Space Administration (NASA), 1970). Estos sismómetros fueron desplegados durante las misiones 11, 12, 14, 15 y 16. Desde entonces los datos recogidos con estos instrumentos se han procesado y analizado desde numerosos puntos de vista. Entre los primeros estudios realizados paralelamente al despliegue de la red sísmica lunar encontramos el trabajo de Gary Latham en NASA (1970), donde se logró detectar y confirmar la presencia de moonquakes (actividad sísmica de ocurrencia natural sobre la superficie lunar) y estudiar sus características.

El continuo proceso de investigación a dado lugar a numerosos descubrimientos sobre la sismicidad lunar. Algunos aspectos técnicos se encuentran cubiertos por Nunn et al. (2020). Mientras que Nakamura (1980) encontró que los eventos de tipo superficial guardan similitud con los terremotos intraplaca (analizando las distribuciones espaciales, temporales y su liberación de energía). La magnitud de cada evento, en escala de magnitud de ondas de cuerpo, fue determinada por Oberst (1987), a partir de estimaciones de localización y energía liberada, teniendo en cuenta el patrón de radiación de los focos, atenuación inelástica de las ondas sísmicas y respuesta instrumental, entre otras.

Aunque hay mucha información disponible sobre la sismicidad lunar, aún no hay un estudio sobre la generación de sismogramas sintéticos a partir de los registros disponibles basados en la metodología de Kanai–Tajimi. El método de Kanai–Tajimi ha sido modificado a lo largo de los años por numerosos autores, considerando diferentes parámetros y enfoques (e.g., Lin y Yong (1987); Fan y Ahmadi (1990); Alotta et al. (2014)). La revisión detallada de estos trabajos permite la apropiación y entendimiento de la metodología Kanai–Tajimi. No obstante, se consideraron supuestos o pasos extras en sus cálculos para poder utilizarla en la generación de sismogra-

mas sintéticos con características compatibles con los registros de moonquake tipo superficial.

6.2 Estado del arte

6.2.1 Experimento sísmico pasivo del programa Apollo

El Passive Seismic Experiment (*PSE*) del proyecto Apollo fue desplegado por las misiones 11, 12, 14, 15 y 16 durante los años 1969 a 1972 y operó entre los años de 1969 y 1977 (Nunn et al., 2020). El *PSE* consistía en la escucha pasiva y medición de la velocidad del suelo lunar mediante un paquete de sismómetros y equipos auxiliares denominados en conjunto estación. Cada estación fue nombrada según el número de la misión y estaba dotada de dos sismómetros, uno de periodo largo (*LP*) y uno de periodo corto (*SP*). El sismómetro *LP* tenía una frecuencia de muestreo nominal de 6.25 Hz y está compuesto de tres sensores en una configuración ortogonal con dos de ellos orientados horizontalmente y uno vertical, mientras que el sismómetro *SP* tenía una frecuencia de muestreo nominal de aproximadamente 53 Hz y una orientación vertical (Horvath, 1979).

La primera estación lunar desplegada fue la 11, que operó solo durante 21 días terrestres. Aunque no formó parte de la red sismológica del programa Apollo, proporcionó información importante sobre el diseño y la posibilidad de desplegar y operar una estación sismológica lunar que se empleó para mejorar los equipos para las siguientes misiones (NASA, 1969). La red sismológica conformada por las estaciones 12, 14, 15 y 16 operó sin mayores contratiempos hasta el 30 de septiembre de 1977, cuando el experimento fue terminado debido a razones principalmente presupuéstales (Nunn et al., 2020). Debido a la baja calidad de las señales y la estimación de la llegada de las ondas de cuerpo, la localización de los epicentros se han reportado con grandes incertidumbres (Nakamura et al., 1982). En la Fig. 6.1 se muestra la estación PSE del Apollo 11 desplegada, mientras que los ALSEP posteriores incluían varios experimentos adicionales como se muestra en la Fig. 6.2 donde se observa la configuración usada en las misiones 12 y 14 a 16.

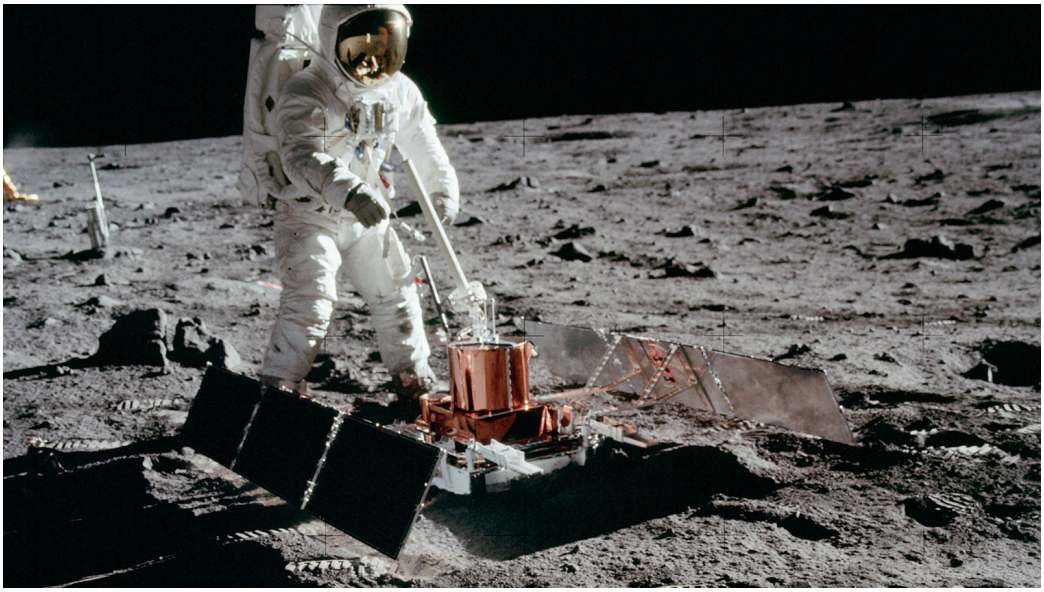

Figura 6.1.: Estación PSE del Apollo 11 desplegada. Tomado de *Apollo 11 Seismic Experiment - Moon: NASA Science* (2023).

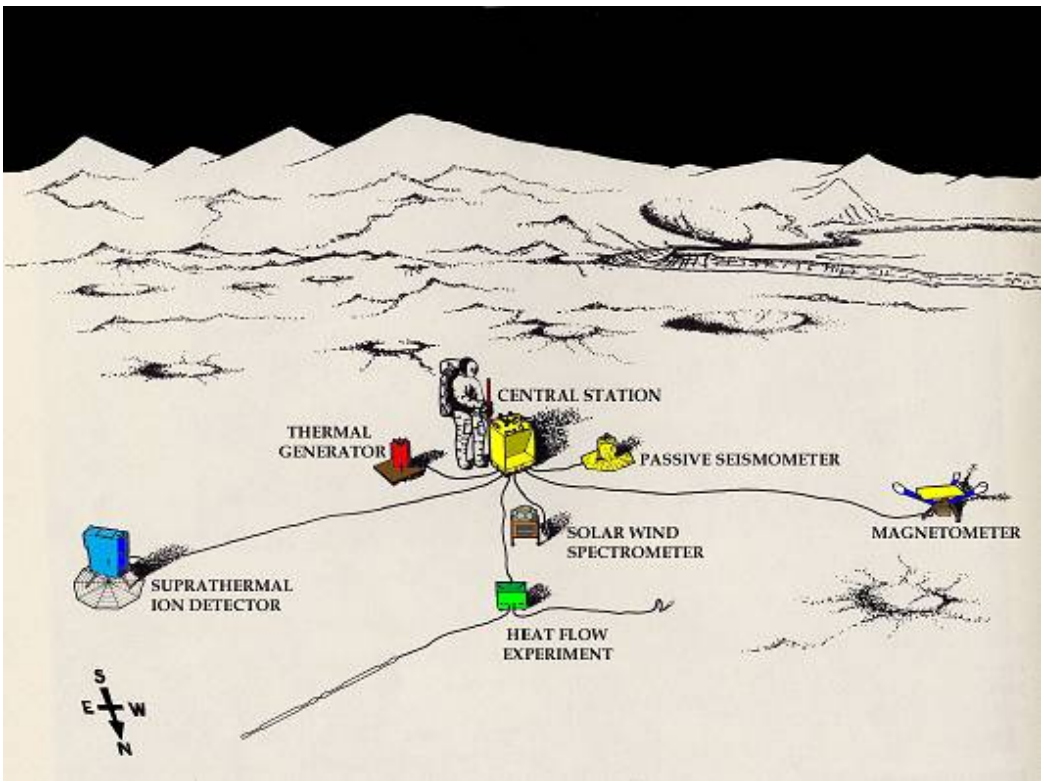

Figura 6.2.: Configuración del ALSEP de las misiones Apollo. Tomado de *Hamish* (2016).

6.2.2 Sismicidad lunar

Los registros de eventos lunares se analizaron y clasificaron en cinco categorías, teniendo en cuenta las características de cada registro. En la Fig. 6.3 se pueden ver una muestra de estos eventos.

- *Termales:* Son causado por los cambios de temperatura en la superficie lunar poseen muy poca amplitud y sólo se detectaron los eventos relativamente cercanos a las estaciones sísmicas (Nunn et al., 2020). La actividad de los moonquakes térmicos empieza abruptamente pocos días después de la salida del sol y decrece rápidamente luego del atardecer. Entre los posibles mecanismos encontramos la fractura o movimiento de roca a lo largo de zonas débiles (Duennebier y Sutton, 1974).

- *Profundos:* Varios estudios señalan la asociación entre tiempos de ocurrencia y las fases de marea lunar (Nunn et al., 2020). Se originan de forma periódica en zonas de entre 700 y 1200 km de profundidad (Nakamura, 2005). El mecanismo de generación permanece desconocido, pero se teoriza sobre la presencia de fluidos (especialmente agua) (Nakamura, 2005) o regiones de material parcialmente fundido (Frohlich y Nakamura, 2009).

- *Causados por impactos de meteoroide*: se identificaron más de 1700 eventos de esta índole, causados por meteoritos con masas entre 0.1 y 1000 kg (Nunn et al., 2020). Las ondas P llegan de manera emergente y no se observa la llegada de las ondas S, a diferencia de los otros tipos de sismos con llegadas impulsivas y relativamente bien definidas de las ondas P y S (Nakamura et al., 1974).

- *Superficiales:* Estos son los de menor ocurrencia, en promedio, sólo se detectaron cuatro anualmente (Nakamura, 1980). Un total de 28 eventos fueron observados y presentan las mayores liberaciones de energía y los mayores momentos sísmicos (Oberst, 1987). El análisis de estos eventos mostró magnitudes que alcanzaron 5 en la escala Mb, con caídas de esfuerzo estimadas de hasta 100 MPa (Oberst, 1987). Conocidos también como Telesismos de alta frecuencia (HFT), los sismos lunares superficiales se distinguen por su elevado contenido frecuencia y por presentar tiempos de llegada de las ondas P y S claramente establecidos. (Nakamura et al., 1974). Aún no se ha determinado con precisión el origen de estos sismos lunares superficiales (Nakamura, 1980), debido

a las considerables incertidumbres en la localización de epicentros y al limitado numero de registros resulta difícil describir con exactitud los mecanismos que generan este tipo de eventos. Algunos estudios sugieren que podrían ser provocados por influencias térmicas debidas a variaciones de temperatura en la superficie, actividades tectónicas intraplaca o la interacción de la Luna con partículas de alta energía. No obstante, investigaciones recientes indican que la actividad sísmica está vinculada a una extensa red global de fallas de escarpe lobuladas, como ha observado el Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO), una sonda espacial estadounidense dedicada a la exploración lunar en órbita desde junio de 2009 (Watters et al., 2010, 2019; Williams et al., 2019).

- *No Clasificado:* Reúne a todas aquellas señales que se han identificado como potenciales eventos pero que por sus características no encajan dentro de ninguna de las otras categorías.

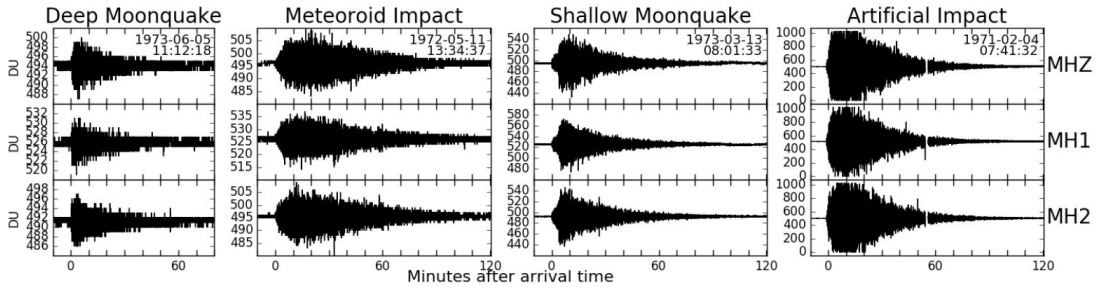

Figura 6.3.: Ejemplo de registro de sismos lunares. Tomado de Nunn et al. (2020).

6.2.3 Método de Kanai–Tajimi (Convencional)

El proceso de generación de acelerogramas sintéticos por la metodología de Kanai–Tajimi clásica (Kanai, 1957; Tajimi, 1960) es descrito por Jennings et al. (1968) y puede ser resumido como sigue:

Paso 1: Se produce una secuencia de números aleatorios, no correlacionados, normalmente distribuidos y con varianza unitaria. Esta secuencia se considera como un muestreo representativo de una señal de ruido blanco con una duración y frecuencia de muestreo determinadas. La señal así obtenida corresponde a un ruido blanco limitado en banda Fig. 6.4.

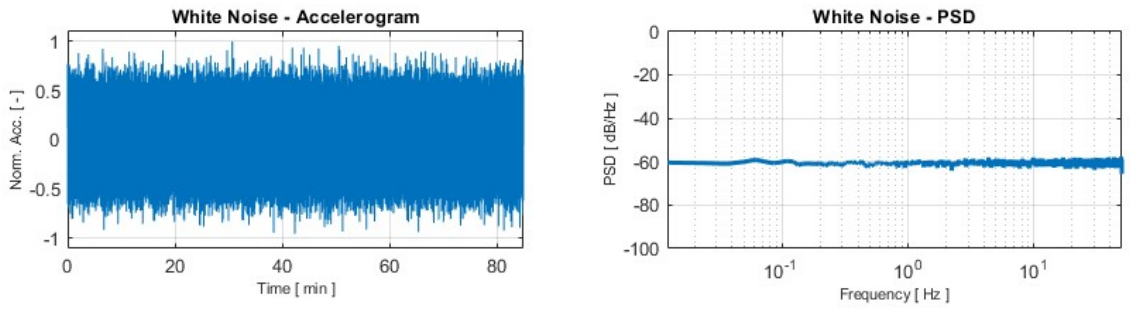

Figura 6.4.: Ejemplo de ruido blanco limitado en banda. Tomado de la aplicación *Synthetic Moonquake Generator*

Paso 2: Se procede a filtrar el ruido blanco limitado en banda con ayuda de un filtro H_1 pasa–bajo de orden típicamente dos que se emplea para representar el efecto que la capa de suelo, entre el hipocentro y el sitio de interés en superficie, tiene sobre la señal. Típicamente, se encuentra descrito por una ecuación como Ec. 6.1 (Clough y Penzien, 2003), donde ζ_1 es la razón de amortiguamiento, ω_1 la frecuencia de corte y $\bar{\omega}$ representa la variable de frecuencia en rad/s.

$$H_1(i\bar{\omega}) = \frac{\left[1 + 2i\zeta_1\left(\frac{\bar{\omega}}{\omega_1}\right)\right]}{\left[\left(1 - \frac{\bar{\omega}^2}{\omega_1^2}\right) + 2i\zeta_1\left(\frac{\bar{\omega}}{\omega_1}\right)\right]} \tag{6.1}$$

Este filtro modifica las componentes de la señal de entrada amplificando cerca de la región de resonancia si el amortiguamiento es "bajo" y amortiguando, mientras que a frecuencias menores de resonancia, la magnitud debe ser igual a 1. La posible aparición de grandes aceleraciones al inicio del registro puede ser corregida de diversas maneras, una de ellas propuesta por Clough y Penzien (2003), consiste en el uso de un filtro H_2 pasa–alto que filtre de manera marcada las bajas frecuencias. La ecuación típica de H_2 se muestra en Ec. 6.2.

$$H_2(i\bar{\omega}) = \frac{\left(\frac{\bar{\omega}}{\omega_2}\right)^2}{\left[\left(1 - \frac{\bar{\omega}^2}{\omega_2^2}\right) + 2i\zeta_2\left(\frac{\bar{\omega}}{\omega_2}\right)\right]} \tag{6.2}$$

El efecto combinado de ambos filtros es lo que se conoce como un filtro Kanai–Tajimi convencional $H(i\bar{\omega})$ (Fig. 6.5). Observemos que este filtro cuenta con cuatro parámetros $\omega_1, \zeta_1, \omega_2$ y ζ_2. Los parámetros ω_1 y ζ_1 representan características de la capa de suelo presente en el sitio de interés, mientras que los parámetros ω_2 y ζ_2 deben seleccionarse apropiadamente para producir el filtrado deseado de las frecuen-

cias mas bajas. El filtro Kanai–Tajimi le otorga en su mayor parte las características en frecuencia al acelerograma sintético.

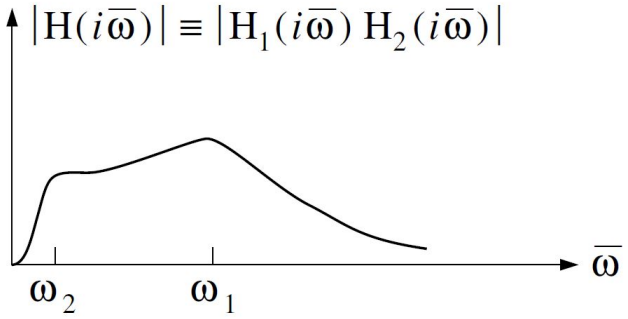

Figura 6.5.: Ejemplo de filtro Kanai–Tajimi. Tomado de Clough y Penzien (2003).

Paso 3: La señal filtrada es multiplicada por una envolvente temporal con características acordes al rango de magnitud del evento a sintetizar (Jennings et al., 1968; Clough y Penzien, 2003). Esta ventana suele estar dividida en tres regiones, inicialmente se tiene un crecimiento potencial, seguido de una meseta y finalizando con una región de decrecimiento exponencial Fig. 6.6. Al multiplicar la señal filtrada por una envolvente adecuada (ventana) se le otorga al registro las características no estacionarias propias de los acelerogramas de eventos sísmicos.

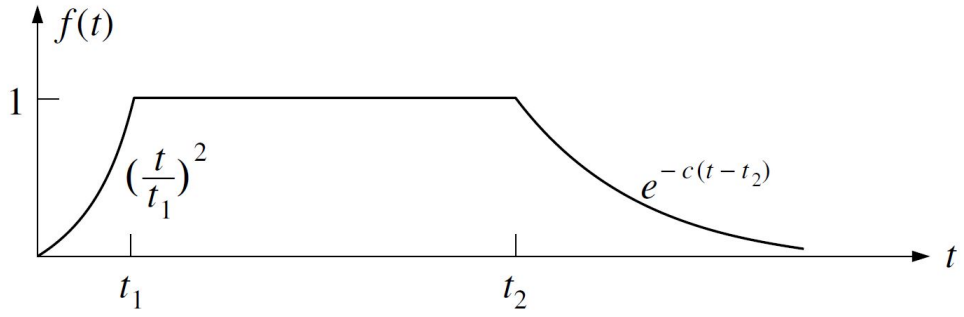

Figura 6.6.: Ejemplo de ventana temporal. Tomado de Clough y Penzien (2003).

7. PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS

Han transcurrido más de 50 años desde la terminación del proyecto Apollo. Durante este tiempo la información recopilada a revelado mucho sobre la Luna. El Early Apollo Lunar Surface Experiment Packages (EASEP) del Apollo 11 y los Apollo Lunar Surface Experiment Packages (ALSEPs) fueron una serie de experimentos geotécnicos in-situ. Entre los experimentos realizados se encuentra el Passive Seismic Experiment (PSE) que consistía en la escucha pasiva de la superficie lunar con ayuda de sismómetros. Es precisamente este experimento el que se va a considerar en este trabajo, en particular, en los sismómetros de periodo largo (LP) que fueron dispuestos horizontalmente y en sus registros.

7.1 Descripción de los sismómetros LP horizontales

La unidad PSE, que se muestra en la Fig. 7.1, está principalmente compuesta de berilio y tenía una masa total de 11.5 kg, incluyendo tanto el módulo electrónico como el aislamiento térmico. Su estructura se presentaba en forma de tambor con dimensiones de 23 cm de diámetro y 29 cm de altura, con una base redondeada que reposaba sobre un cojinete nivelador.

Cada unidad PSE se divide en dos subsistemas principales: una unidad de sensores y un módulo electrónico. La unidad de sensores alberga tres sismómetros de período largo (LP) con una frecuencia de muestreo nominal de 6.625 Hz (Bulow et al., 2005), dispuestos ortogonalmente en un conjunto triaxial para medir las componentes vertical y horizontal del movimiento de la superficie. Los sismómetros horizontales son especialmente sensibles a la inclinación y se nivelaban con precisión mediante un cardán motorizado de dos ejes controlado desde tierra. Un tercer motor ajusta el sismómetro de componente vertical en dirección vertical. Adicionalmente, se incluye un cuarto sismómetro de período corto (SP) con una frecuencia de muestreo nominal de 53 Hz (Bulow et al., 2005) y período de resonancia de 1 segundo, que medía el movimiento vertical con una sensibilidad máxima de 8 Hz y un rango de respuesta de 0,05 a 20 Hz. El conjunto del experimento se completaba con una cubierta térmica y un calentador de 2,5 W para el control térmico. La

cubierta térmica, hecha de mylar aluminizado, cubría tanto el instrumento como el suelo circundante hasta una distancia radial de aproximadamente 75 cm. (*NASA - NSSDCA - Experiment - Details*, s.f.).

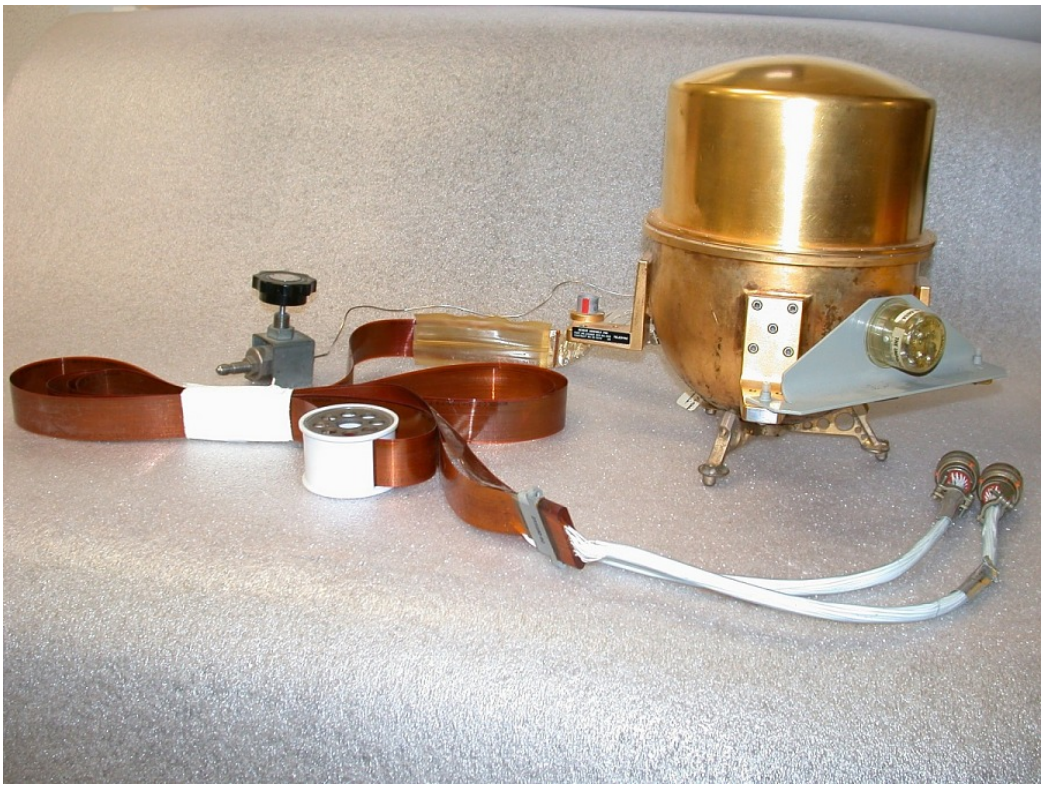

Figura 7.1.: Modulo PSE de las misiones Apollo 12, 14, 15 y 16. Tomado de *ALSEP, Passive Seismic Experiment Array | National Air and Space Museum* (2023).

Los sismómetros están compuestos por una masa inercial suspendida sobre un brazo sensor mediante muelles y bisagras, junto con una placa condensadora y un imán amortiguador (consultar Fig. 7.2). Todos los sismómetros tenían la capacidad de detectar movimientos del terreno tan diminutos como 0.3 nm. La sensibilidad de estos instrumentos era de 0.008 mgal. Se utilizaron los impactos en la superficie lunar de las etapas de ascenso Saturno-IVB (S-IVB) y del módulo lunar (LM) gastadas como fuentes externas de calibración para los sismómetros. Con la masa y velocidad conocidas de estas etapas en el momento del impacto en la superficie lunar, así como las coordenadas del punto de impacto, fue posible calcular la energía generada en el impacto y determinar el punto de aplicación de dicha energía.

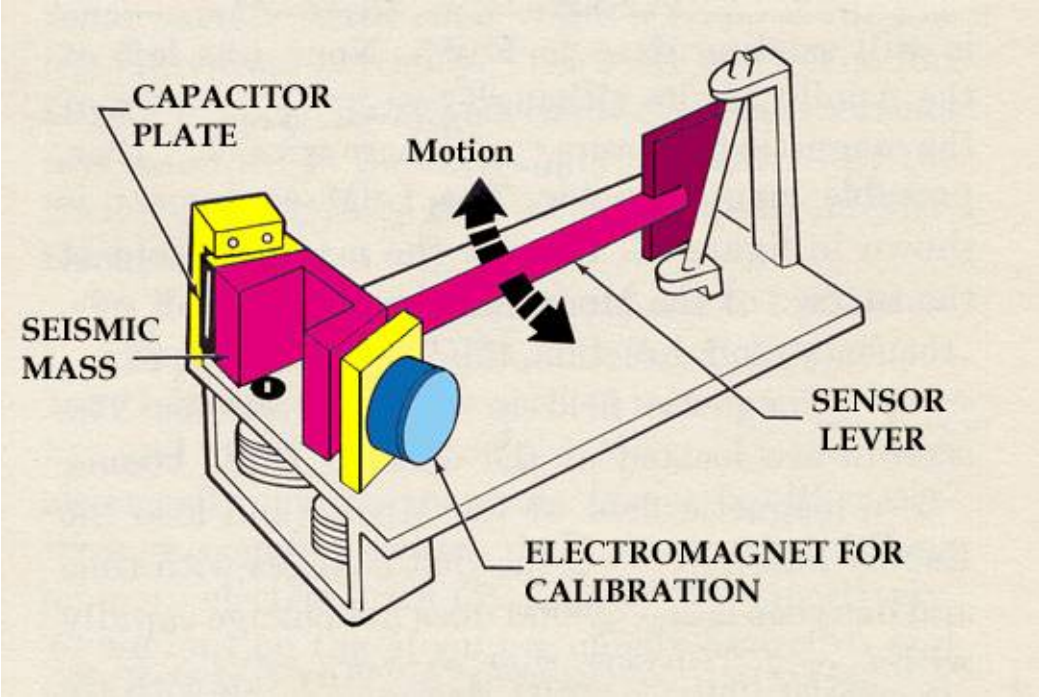

Figura 7.2.: Detalle de un sismómetro horizontal del Apollo PSE. Tomado de *Hamish* (2016).

Los sismómetros LP podían funcionar en modo de respuesta plana y en modo de respuesta pico. En el modo de respuesta plana, los sismómetros LP tenían un periodo natural de 15 s (pico y plano se refieren a la forma de la Función de transferencia en Unidades Digitales por metro). En el modo de respuesta pico, actuaban como péndulos subamortiguados con un periodo natural de 2.2 s. La sensibilidad al movimiento del suelo alcanzó un pico brusco a 0,45 Hz en el modo de respuesta pico, con un rango de frecuencia útil de 0.004 a 2 Hz. La sensibilidad máxima aumentó en un factor de 5.6 en el modo de respuesta máxima, pero se redujo la sensibilidad a las señales de baja frecuencia. En la Fig. 7.3 se muestra el diagrama de bloques del instrumento incluyendo el laso de retroalimentación donde los triángulos representan amplificadores operacional con ganancia K.

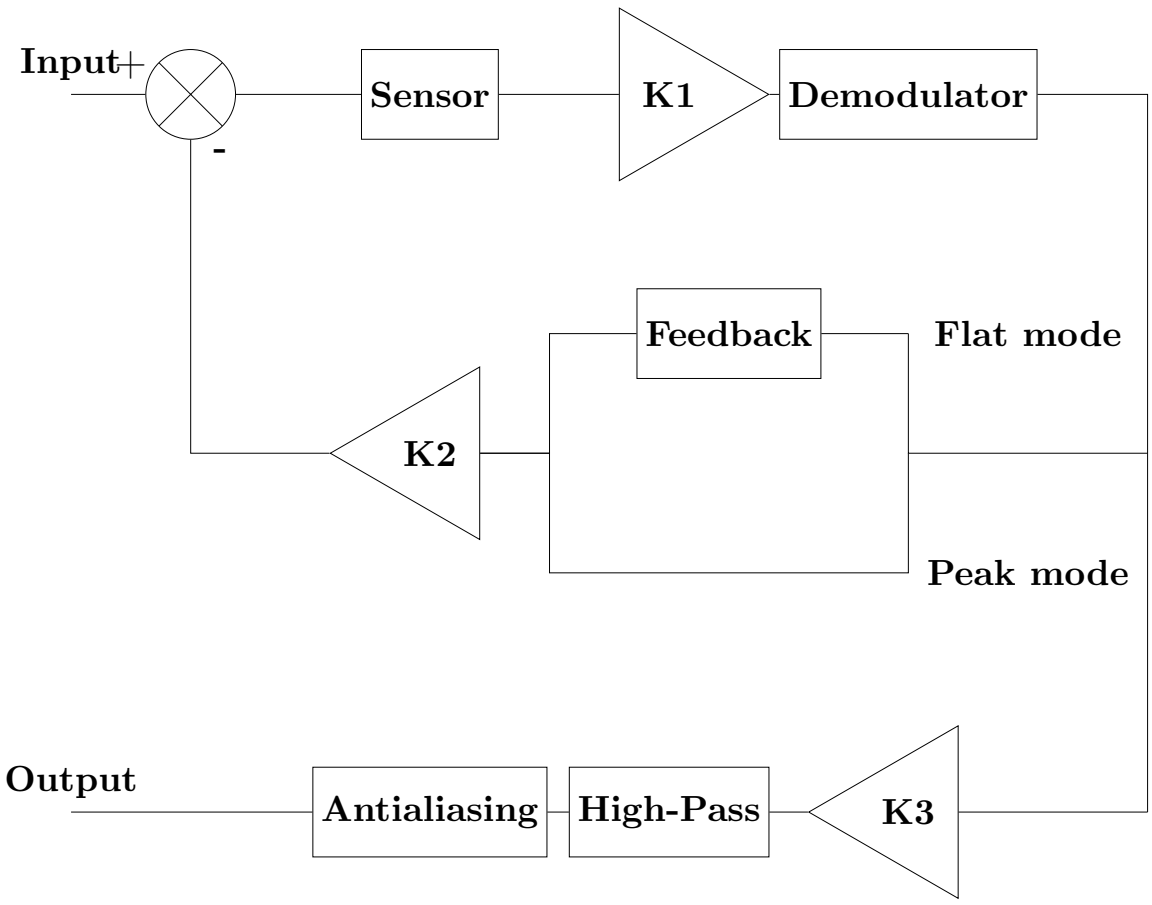

Figura 7.3.: Diagrama de bloques de los sismómetros Apollo LP. Adaptado de Yamada (2005).

La identificación de la función de transferencia del instrumento se realizó mediante el análisis de la respuesta a los pulsos de calibración generados por el propio instrumento. Este estudio fue realizado por Horvath (1979) en su tesis doctoral *Analysis of Lunar Seismic Signals: Determination of Instrumental Parameters and Seismic Velocity Distributions*. De donde se obtienen las funciones de transferencia nominales de los instrumentos que se muestran en la Fig. 7.4. Como se observa en la Fig. 7.3 el sismómetro de periodo largo (LP) cuenta con dos modos de operación, el modo plano que hace uso del lazo de realimentación (denominado así por la meseta que presenta su función de transferencia para desplazamientos) y el otro modo denominado pico (por razones similares) que emplea un bypass (derivación que permite que la corriente eléctrica fluya directamente entre dos puntos, evitando un componente o sección del circuito) sobre el filtro de realimentación. La operación

en uno u otro modo se controla desde la superficie terrestre y en su mayor parte corresponde al modo plano.

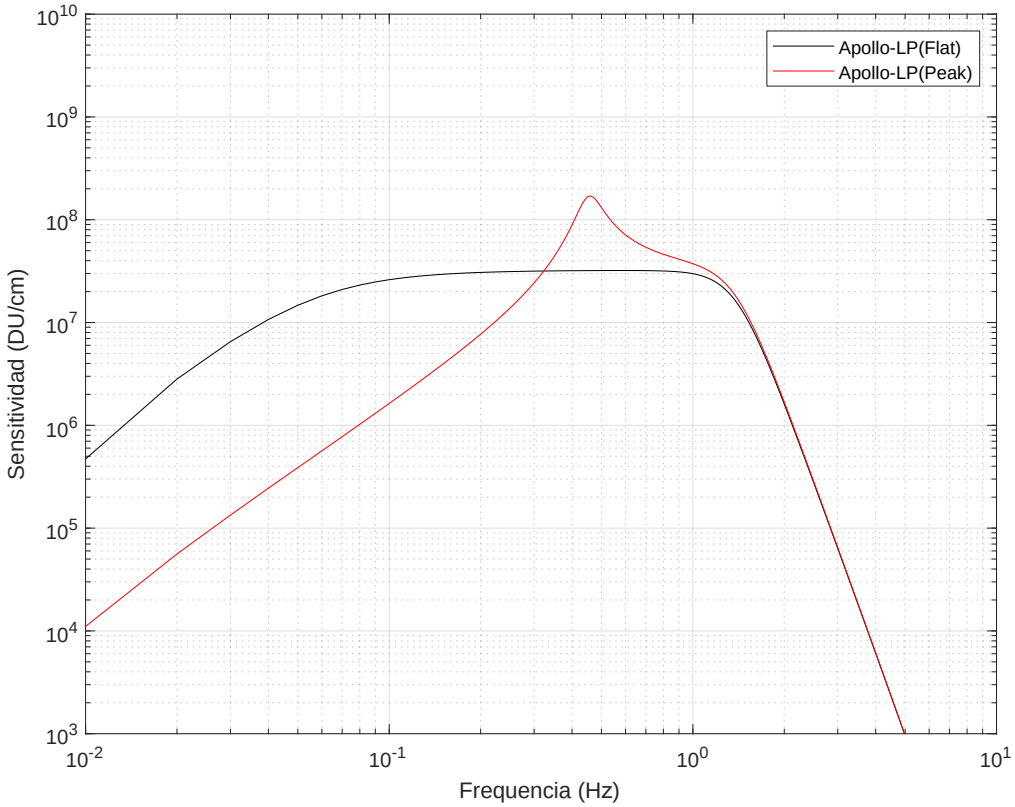

Figura 7.4.: Curvas de respuesta de los sismómetros LP del proyecto Apollo en desplazamiento. Adaptado de Yamada (2005).

7.2 Unidades Digitales (DU) de los sismómetros

La unidad de amplitud de los registros del Apollo - PSE se denomina Unidad Digital (Digital Unit - DU) y corresponde a una unidad de medida arbitraria relacionada con los instrumentos empleados para el procesamiento de la señal análoga (Yamada, 2005). En principio la señal que produce un evento al ser registrada por el instrumento (que consta de sismómetro, demodulador, amplificador y antialias) se digitaliza con ayuda de un conversor análogo digital (DAC) antes de poder ser transmitida y almacenada Yamada (2005). En ese momento se empleó un DAC de 10-bit Yamada (2005) lo que significa que se contaba con una conversión que proporcionaba $2^{10} = 1024$ valores diferentes para representar el nivel de la señal análoga

de entrada, así la magnitud de la señal fue representada en una escala que depende intrínsecamente del instrumento y que va de 0 – 1023 unidades, estas unidades se denominan Unidades Digitales (DU) dentro del contexto del programa Apollo, y para convertirlas a una unidad de medida convencional se hace necesario de un procesamiento que involucra la remoción del efecto que el instrumento tiene en esta señal, conocido como deconvolución o calibración.

7.3 Registros sísmicos del programa Apollo

Los registros de datos se descargaron en unidades digitales (DU) de manera gratuita desde DARTS - ISAS/JAXA en forma de archivo CSV que contiene una variedad de columnas que registran entre otras cosas la estación Apollo, el tiempo y la amplitud de la observación registrada como se muestran en el Cód. 7.1. Para descargar estos archivos es necesario indicar el tipo de sensor, momento de inicio y momento de finalización requeridos con una duración total inferior a tres horas. A partir de esta información se debe crear la URL de acceso con el formato mostrado en el Cód. 7.2. Debido a la enorme cantidad de información disponible es necesario contar con un registro detallado de eventos que especifique entre otras cosas: el tipo de evento (Shallow, Deep, etc.), el momento de inicio momento de finalización y una medida de la amplitud de cada evento. Este documento fue elaborado por Nakamura et al. (1981) en la Universidad de Texas y se le conoce como el catálogo Nakamura de eventos de periodo largo (que ha sido actualizado en diversas ocasiones). Actualmente, el catálogo de eventos se encuentra disponible en forma de archivo dat en el siguiente enlace Catálogo Nakamura. En el Cód. 7.3 se muestra parte de este catálogo.

```
# frame_count, ap_station, ground_station, nc, time, lpx, lpy, lpz
62,12,6,3,1971-04-17 07:00:00.076000,521,520,511
62,12,6,4,1971-04-17 07:00:00.227000,521,520,511
63,12,6,1,1971-04-17 07:00:00.378000,521,520,511
63,12,6,2,1971-04-17 07:00:00.529000,521,520,511
63,12,6,3,1971-04-17 07:00:00.680000,521,520,510
63,12,6,4,1971-04-17 07:00:00.831000,521,520,510
64,12,6,1,1971-04-17 07:00:00.982000,521,520,510
64,12,6,2,1971-04-17 07:00:01.133000,521,520,510
64,12,6,3,1971-04-17 07:00:01.284000,521,520,510
```

Código 7.1: Ejemplo de Datos LP del Apollo PSE. Tomado de DARTS

```
Question 2
I have used Moon Seismic Monitor(obsolete) to download the Apollo seismic data.
↪  Is there a way to access the data directly within the database without going
↪  through the webpage interface?

Answer
You can download the data directly by using the following methods:

FORMAT:
https://darts.isas.jaxa.jp/planet/seismology/apollo/dump/dump/{type}/START_TIME/⌋
↪  {yyyy-mm-ddThh:mm:ss}/STOP_TIME/{yyyy-mm-ddThh:mm:ss}

"type" must be lp, sp, tidal, temp, and lspe.

Please set the time after "START_TIME" and "STOP_TIME" respectively.

The duration between "START_TIME" and "STOP_TIME" must be less than 3 hours, or
↪  time out will occur.

Example:
https://darts.jaxa.jp/planet/seismology/apollo/dump/dump/lp/START_TIME/⌋
↪  1971-04-17T07:00:00/STOP_TIME/1971-04-17T09:00:00
```

Código 7.2: Formato de URL del DARTS y ejemplo. Tomado de DARTS

```
69 208 2348 0040 3.1                  5    11Z AMLPITUDE                  M
69 209 1146 1215 1.8                  5    11Z AMPLITUDE                  C
69 209 1349 1430 3.7                  5    11Z AMPLITUDE  SP              A 00
69 210 1318 1415 1.9                  5    11Z AMPLITUDE                  C
69 214 1720 1810 1.9                  5    11Z AMPLITUDE                  C
69 233 1858 2000 5.0                  5    11Z AMPLITUDE                  C
69 235 0009 0045 1.6                  5    11Z AMPLITUDE
69 236 0618 0720 5.1                  5    11Z AMPLITUDE                  M
69 237 0030 0115 4.0                  5    11Z AMPLITUDE  SP              A 00
69 324 2217 2322 30.              2   5    12 LM IMP                      L
```

Código 7.3: Parte del catálogo Nakamura.

En particular, este trabajo se enfocará en los shallow moonquake que presentan un total de 28 eventos, considerando únicamente las componentes horizontales de-

nominadas LPX y LPY. Adicionalmente, es necesario modificar el formato en que se encuentra la información para eliminar columnas irrelevante para nuestro estudio y trabajar con un formato de archivo más adecuado al flujo de trabajo actual. Por lo tanto, se crearon archivos por cada componente de cada evento que incluyan datos de solo una estación. Estos archivos presentan un encabezado descriptivo y los datos de tiempo y amplitud como se muestra en el Cód. 7.4, mientras en la Fig. 7.5 se muestra el sismograma en DU. El vector de tiempo ha sido recalculado en segundos, con tiempo cero para el primer dato. Esta etapa del proceso se ha denominado *Extracción* debido a que permite extraer los datos requeridos a partir de la información existente sin modificación de estos.

```
% Date: 21/January/2023-20:08:08
% Extracted Apollo seismogram record
% File: 02-N01-ST12-LPX.txt
% Event: N01
% Station: 12
% Record Type:LP
% Component: X
% First Column: Time (s)
% Second Column: Amplitude (DU)
% Matlab Loading Method:
% fileID = fopen('02-N01-ST12-LPX.txt');
% Data = cell2mat(textscan(fileID,'%f %f','headerlines',15));
% fclose(fileID);


0.076000        521
0.227000        521
0.378000        521
0.529000        521
0.680000        521
```

Código 7.4: Archivo de ejemplo con datos extraídos

7.4 Preprocesamiento

Posteriormente, los registros son sometidos a un tratamiento que inicia eliminando aquellos datos para los que el valor del tiempo no incrementa respecto al dato anterior. A continuación se recorta la duración del registro según se establece en el

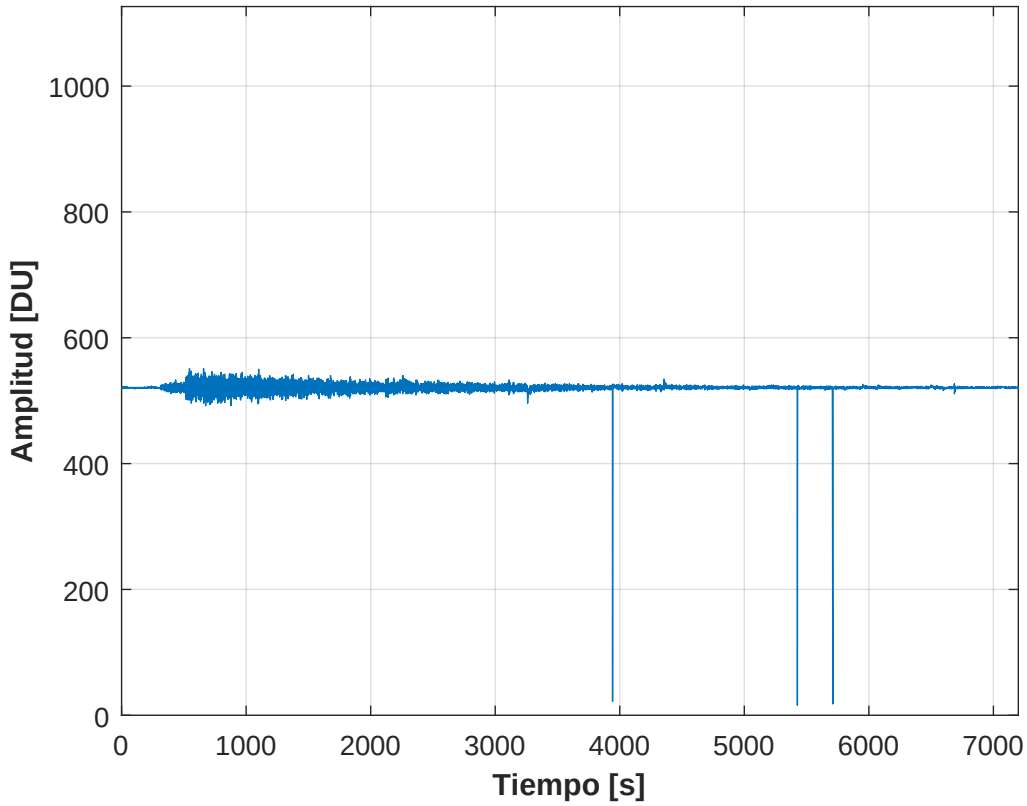

Figura 7.5.: Ejemplo de sismograma de los datos extraídos

catálogo Nakamura (considerando el tiempo inicial y final adecuados) y se recalcula el vector de tiempo para que inicie en cero. Posteriormente, se remuestrean los registros a la frecuencia nominal de operación de los sismómetros que corresponde a 1/0.15094 Hz. Luego se elimina la línea de tendencia y se filtra la señal mediante una ventana de media móvil empírica con un ancho de 1000 puntos y tres desviaciones estándar de altura, para eliminar los picos indeseables similares a los que se muestran en la Fig. 7.5. Esta etapa del proceso se denomina preprocesamiento y finaliza con la creación de los archivos de los registros y el gráfico en el dominio del tiempo y frecuencia de cada registro como se muestra en el Cód. 7.5 y la Fig. 7.6.

```
% Date: 21/January/2023-20:08:16
% Processed Apollo seismogram record
% File: 03-N01-ST12-LPX.txt
% Event: N01
% Station: 12
% Record Type:LP
```

```
% Component: X
% First Column: Time (s)
% Second Column: Amplitud (DU)
% Matlab Loading Method:
% fileID = fopen('03-N01-ST12-LPX.txt');
% Data = cell2mat(textscan(fileID,'%f %f','headerlines',15));
% fclose(fileID);


0.000000        1.190582
0.150940        2.190185
0.301880        1.191377
0.452820        1.190582
0.603760        0.192171
```

Código 7.5: Archivo de ejemplo con datos procesados

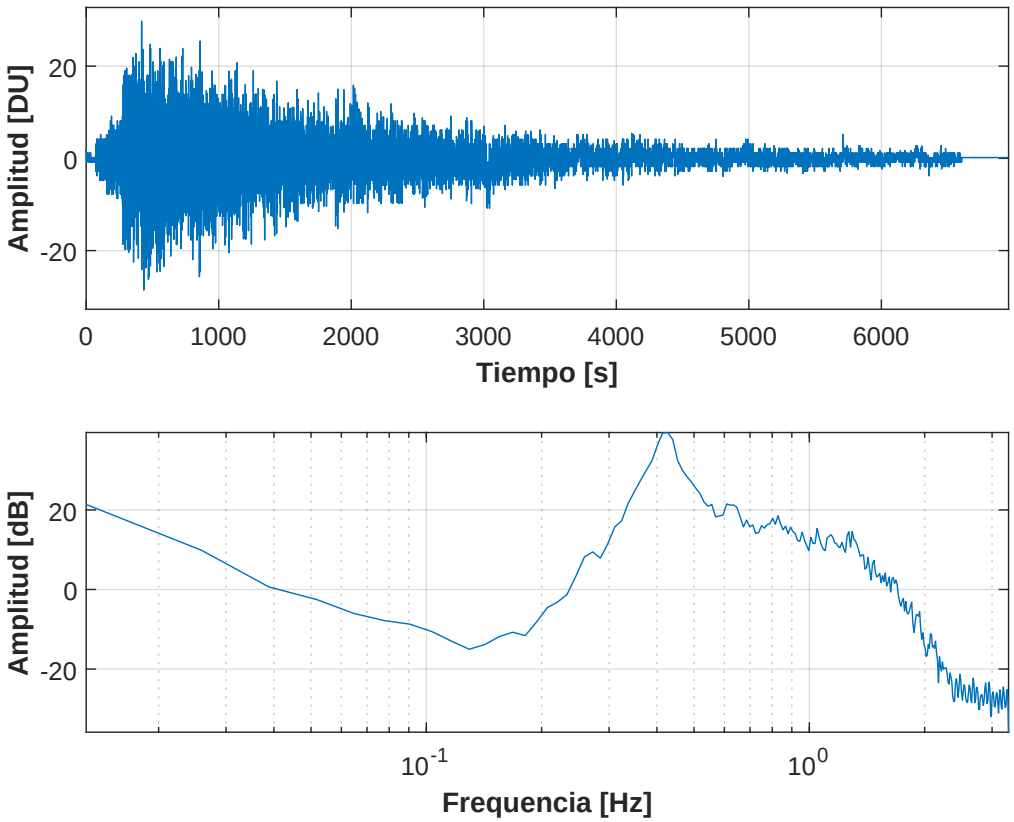

Figura 7.6.: Ejemplo de sismograma y PSD de los datos procesados

7.5 Calibración de los registros

7.5.1 Deconvolución de los registros LP del programa Apollo

En este estudio se obtienen los registros en aceleración del movimiento del terreno $a_g(t)$, a partir de los registros procesados. Para tal fin, se considera que los sismómetros de proyecto Apollo son sistemas lineales invariantes en el tiempo (LTI) descritos por sus características nominales. Así, junto con su diagrama de bloques, es posible calcular el movimiento del terreno mediante una técnica conocida como deconvolución por división espectral (Gubbins, 2012). Esta técnica considera que la señal obtenida por un sismómetro está determinada por la convolución entre la respuesta al impulso $h(t)$ del dispositivo y el movimiento del terreno $u_g(t)$. No obstante, el movimiento del terreno puede ser descrito en desplazamiento, velocidad o aceleración. Por lo que existen tres funciones de respuesta al impulso, una correspondiente a cada variable. El desarrollo siguiente se enfocará en la variable aceleración debido a que se desea calcular registros en unidades de aceleración.

La Ec. 7.1 muestra la respuesta del instrumento $u(t)$ en función de su respuesta al impulso y el movimiento del suelo (Nolet y Scherbaum, 2001).

$$u(t) = h(t) * u_g(t) \tag{7.1}$$

Al considerar la transformada de Laplace ($\mathscr{L}$) de la Ec. 7.1, obtenemos el movimiento del suelo $U_g(s)$, la respuesta del instrumento $U(s)$ en el dominio s y la función de transferencia $TF(s)$ del sistema. La operación de convolución en el dominio s corresponde a un producto entre $TF(s)$ y $U_g(s)$ Ec. 7.2 (Borchers y Aster, 2013).

$$U(s) = TF(s) \cdot U_g(s) \tag{7.2}$$

En este punto para obtener $U_g(s)$ a partir de $U(s)$ es necesario dividir la Ec. 7.2 entre $TF(s)$, esto último se conoce como división espectral Ec. 7.3 (Nolet y Scherbaum, 2001; Borchers y Aster, 2013). Este enfoque requiere el calculo de $TF(s)$ que puede hacerse a partir del diagrama de bloques del instrumento (Oppenheim et al., 2010).

$$\frac{U(s)}{TF(s)} = U_g(s) \tag{7.3}$$

Este método no suele funcionar adecuadamente debido a la posibilidad de la existencia de ceros en la función de transferencia (donde evidentemente no es posi-

ble definir un valor para U_g) y la presencia de ruido en la señal u (Borchers y Aster, 2013). Además, se debe discernir entre dos tipos de ruido en el sistema; el primero es el ruido originado durante la convolución (imperfecciones del instrumento, variaciones de temperatura, perturbaciones del medio, etc.) y el segundo corresponde al ruido añadido después de la convolución (relacionados con el conversor análogo/digital) (Nolet y Scherbaum, 2001). Consideremos el primer caso descrito por la Ec. 7.4 donde $n_1(t)$ representa una señal de ruido aleatorio en el dominio del tiempo.

$$u(t) = h(t) * (u_g(t) + n_1(t)) \tag{7.4}$$

Al calcular la transformada de Laplace ($\mathscr{L}$) y la división espectral obtenemos la señal $U_g(s) + N_1(s)$ (Ec. 7.5), es decir el nivel de ruido no se ve afectado por la deconvolución.

$$\frac{U(s)}{TF(s)} = U_g(s) + N_1(s) \tag{7.5}$$

Al considerar el segundo caso descrito por la Ec. 7.6, observamos que al calcular la transformada de Laplace ($\mathscr{L}$) y la división espectral obtenemos un nivel de ruido que depende de la función de transferencia del sistema $N_2(f)/TF(f)$ Ec. 7.7.

$$u(t) = h(t) * u_g(t) + n_2(t) \tag{7.6}$$

En este caso la contribución del ruido se ve afectada por el proceso de deconvolución y esto ocasiona problemas cuando el valor de $N_2(s)/TF(s)$ es relativamente grande. En particular esto ocurre para las frecuencias s_i en las que $|N_2(s_i)|$ sea significativamente mayor que $|TF(s_i)|$ y cuando $|TF(s_i)| = 0$ (Nolet y Scherbaum, 2001; Borchers y Aster, 2013).

$$\frac{U(s)}{TF(s)} = U_g(s) + \frac{N_2(s)}{TF(s)} \tag{7.7}$$

Existe una diversidad de técnicas para corregir estos problemas conocidas colectivamente como regularización (Nolet y Scherbaum, 2001; Borchers y Aster, 2013). La idea fundamental radica en que, aunque resulta imposible obtener el valor exacto de $U_g(s)$ es posible obtener un valor aproximado, pero útil para fines prácticos (Borchers y Aster, 2013). Las diversas implementaciones buscan eliminar los ceros de la $TF(s)$ e incrementar la amplitud de la función de transferencia del sistema $|TF|$ en las regiones donde su valor es relativamente pequeño en comparación con el

nivel de ruido, en este sentido, el trabajo de Horvath resulta pionero en la aplicación de una técnica de deconvolución regularizada por nivel de agua k para el cálculo de la deconvolución de los registros del programa Apollo (Horvath, 1979). Esta metodología, mediante la inclusión de un parámetro de nivel de agua ω (en función de una constante de nivel de agua k), permite modificar la función de transferencia de manera que cumpla con los criterios de regularización como se muestra en Horvath (1979); Borchers y Aster (2013) (Ec. 7.8).

$$\omega = k \max_{s} |TF(s)| \quad 0 < k < 1 \tag{7.8}$$

El modelo de regularización por nivel de agua se muestra en la Ec. 7.9. Donde para amplitudes de la función de transferencia mayores al parámetro de nivel de agua la función de transferencia se deja inalterada, para amplitudes mayores a cero y menores que el nivel de agua la amplitud de la función de transferencia se reemplaza por el parámetro de nivel de agua pero su fase se conserva, finalmente, si la amplitud de la función de transferencia se hace cero su valor se asume igual al del parámetro de nivel de agua con fase igual a cero (es decir se supone real).

$$TF^*(s_i) = \begin{cases} TF(s_i) & |TF(s_i)| > \omega \\ \omega \frac{TF(s_i)}{|TF(s_i)|} & 0 < |TF(s_i)| \leq \omega \\ \omega & |TF(s_i)| = 0 \end{cases} \tag{7.9}$$

La determinación de un valor adecuado para la constante del nivel de agua k debe realizarse a partir de un análisis de los niveles de ruido en los pulsos de calibración del sistema y la comparación de estos con la respuesta nominal esperada para el pulso de calibración aplicado. Este método se encuentra más allá del alcance del presente estudio, por lo que se empleó el valor sugerido por Horvath (1979) en su tesis doctoral, donde $k = 0{,}10$ para todos los registros con amplitudes pico a pico menores a 50 DU. La Fig 7.7 muestra las funciones de transferencia LP-Peak original y modificada para un nivel de agua con $k = 0{,}10$ junto con la frecuencia limite de deconvolución de 0.7655 Hz.

7.5.2 Implementación y verificación del algoritmo de deconvolución

La implementación del algoritmo de deconvolución se muestra en el Cód. 7.6

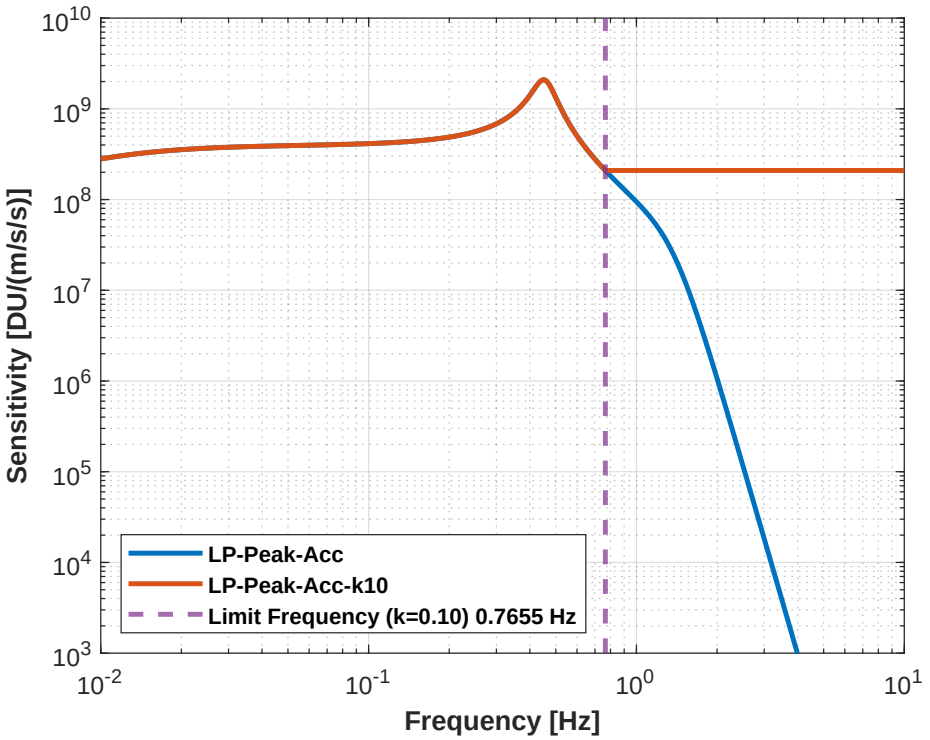

Figura 7.7.: Función de transferencia LP-Peak original y modificada para nivel de agua con $k = 0{,}10$.

```
if (LP_Mode == 'P')
    num = [5.185e18 0];
    den = [1 94 3284 6.775e04 9.569e05 9.811e06 7.444e07 4.178e08 1.693e09
    ↪  4.765e09 9.281e09 1.366e10 8.223e08];
elseif (LP_Mode == 'F')
    num = [5.185e18 5.17e15 0];
    den = [1 94 3284 6.737e04 9.395e05 9.415e06 6.859e07 3.571e08 1.245e09
    ↪  2.441e09 1.468e09 3.729e08 3.127e07 8.199e05];
end
h = tf(num,den);
impulse = tt==0;
ffth = fft(lsim(h,impulse,tt)).';
k = 0.1;
wl = k*max(abs(ffth));
for jj = 1:N
    fft(jj) = (fftDU(jj)*conj(ffth(jj)))/(max(abs(ffth(jj)),wl))^2;
```

```
15 end
16 acc = real(ifft(fft));
```

Código 7.6: Algoritmo de Deconvolución

Este algoritmo emplea la variable "LP_Mode" para determinar si el modo de operación del sistema en el momento de la captura de los datos fue "Peak" ó "Flat" y emplear los correspondientes coeficientes, a partir de estos, se calcula la función de transferencia del sistema denominada "h" y se calcula la transformada de Fourier de la respuesta al impulso del sistema (la variable "'tt" corresponde al vector de tiempo del registro y debe iniciar en cero), junto con el nivel de agua "wl". Finalmente se aplica el algoritmo de deconvolución regularizada por nivel de agua descrito por Horvath y se obtiene el registro de aceleración.

El proceso de verificación se centra en construir una señal sintética (en este caso, una señal tipo barrido de frecuencias) con un contenido frecuencial y amplitud adecuados para representar un posible sismograma. para tal fin se realizó una búsqueda bibliográfica de registros de moonquakes deconvolucinados para obtener las características de referencia de nuestra señal sintética. En la Fig. 7.8 se observa un registro de moonquake en desplazamiento que aparece publicado en National Aeronautics and Space Administration (NASA) (1970). Donde se indica una amplitud observada de alrededor de 5 nm. A partir de esta información, considerando las características del instrumento y de los moonquakes superficiales en general se emplea una señal tipo barrido logarítmico con un barrido desde 0.05 Hz hasta 3.3125 Hz, una amplitud de 1 nm, una frecuencia de muestreo de 6.6250 Hz y una duración de 1000 s.



Figura 7.8.: Ejemplo de sismograma de moonquake. Tomado de National Aeronautics and Space Administration (NASA) (1970)

Esta señal de prueba se le aplicó la función de transferencia de instrumento y se sometió al proceso de deconvolución regularizada por nivel de agua obteniendo los resultados que se muestran en la Fig. 7.9. En esta figura se aprecia que en términos generales tanto en el dominio del tiempo como de frecuencia hay un buen

ajuste entre la señal original y la señal deconvolucionada alcanzando una bondad de ajuste $NRSME$ del 96 % en amplitud y un 97 % en PSD hasta la frecuencia limite de 0.7655 Hz.

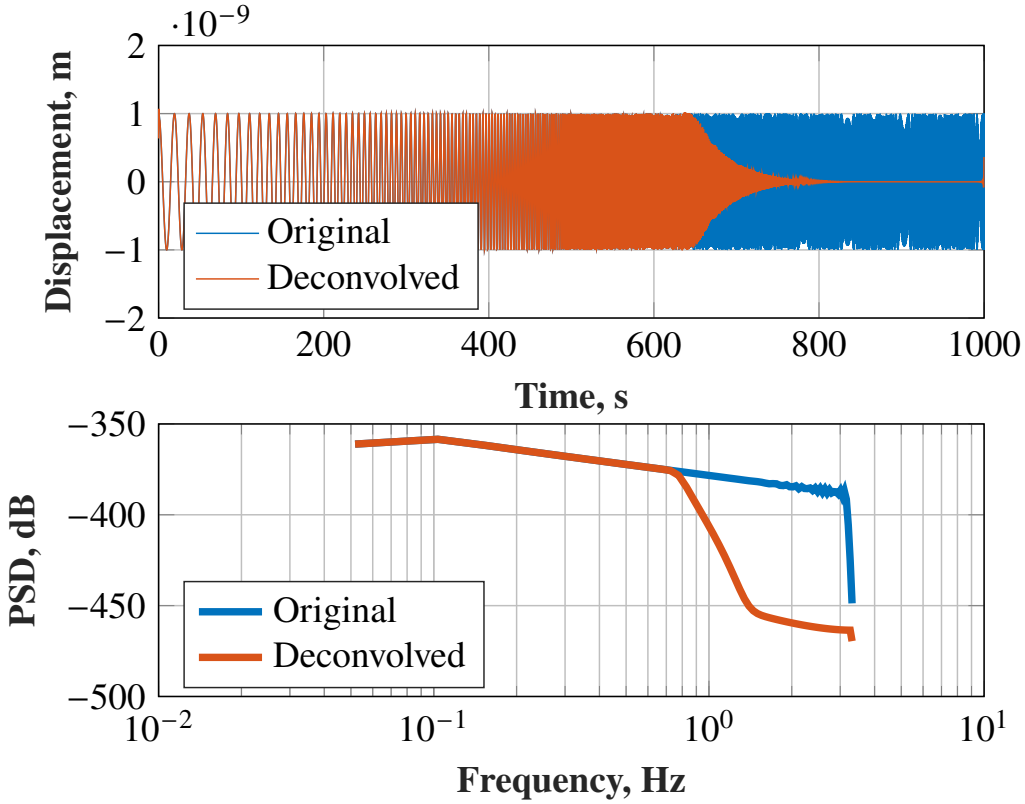

Figura 7.9.: Resultado del proceso de verificación del algoritmo de deconvolución

Un metodo alternativo de verificación consiste en comparar los registros deconvolucionados de esta investigación con los obtenidos por Nunn et al. (2022) que mediante la aplicación de un prefiltro y el algoritmo de division espectral obtuvo registros calibrados dentro del rango de frecuencias de 0.30 a 1.00 HZ para registros LP, como se muestra en la Fig 7.10 junto el registro obtenido por deconvolución regularizada por nivel de agua para $k = 0{,}10$ que presenta una frecuencia limite de 0.7655 Hz. Se observa un menor PGA debido a la presencia de mayores amplitudes del PSD para las frecuencias superiores a la limite hasta 1.00 Hz. Adicionalmente se observa un conjunto de amplitudes del PSD menores entre 0.30 Hz y la frecuencia limite debido a la utilización de una constante de nivel de agua $k = 0{,}10$.

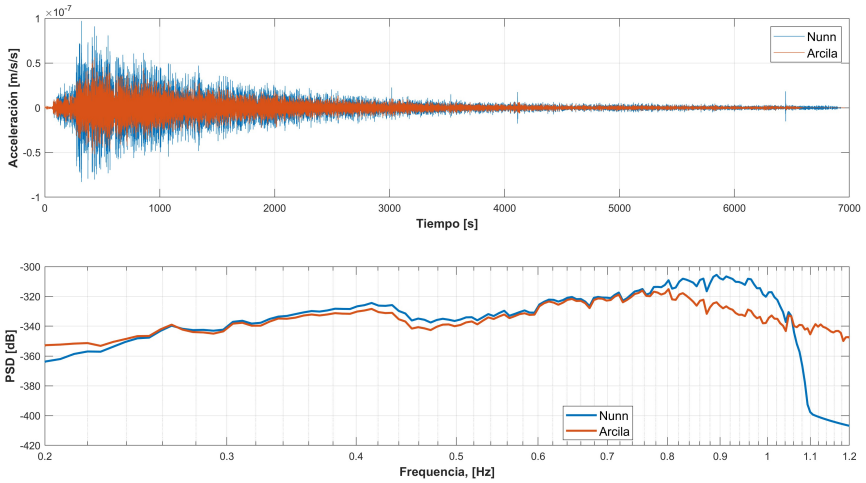

Figura 7.10.: Comparación de la deconvolución del registro N01 ST12 LPX Peak por el metodo de Nunn et al. (2022) y la deconvolución regularizada por nivel de agua de este trabajo (Arcila).

8. CARACTERIZACIÓN DE LOS REGISTROS

Una vez obtenidos los registros de aceleración del terreno, se procede a analizarlos para identificar las características tanto en el dominio del tiempo como de frecuencia de cada uno de estos registros. El enfoque adoptado para la obtención de los diferentes parámetros y sus valores, consiste en la generación de un sismograma sintético que se ajuste y represente de manera significativa a las características del registro en cuestión. La implementación del algoritmo que permite realizar esto emplea la metodología de Kanai–Tajimi en combinación con un algoritmo de optimización global de enjambres. La idea consiste en identificar un modelo de filtro y un modelo de ventana que a partir de ruido blanco Gaussiano limitado en banda (BLWN), de duración y frecuencia de muestreo similar a la del registro considerado, permita generar con los valores de parámetros adecuados un sismograma sintético con características similares al registro original. El algoritmo de enjambres permite realizar una búsqueda iterativa de los valores óptimos de los parámetros del filtro y de la ventana, calculando un gran número de combinaciones. El conjunto de valores obtenidos para los parámetros del filtro y la ventana identifican y caracterizan el registro siempre que el grado de similitud sea lo suficientemente alto y esto se garantiza mediante la aplicación de una función objetivo cuyo valor se busca minimizar. La identificación de la estructura de la función objetivo es un paso crítico para la obtención de resultados de calidad.

8.1 Optimización

La optimización trata de expresar, en términos matemáticos, el objetivo de resolver un problema de la mejor manera. Este deseo de resolver un problema de forma óptima es tan común que modelos de optimización surgen en casi todos los ámbitos de aplicación (Griva et al., 2009). En términos prácticos, lo que se busca es encontrar la solución que satisfaga algún criterio, como por ejemplo minimizar una función, también conocida como función objetivo, cuyo valor sirve como indicador de la calidad de la solución encontrada. Típicamente, los problemas de optimización están compuestos de tres elementos. El primero es una función objetivo o costo que

debe ser minimizada o maximizada durante el proceso de optimización (Griva et al., 2009). Tales funciones incluyen ejemplos desde minimizar una longitud u área hasta formulaciones muy complejas cuyo único requerimiento es que en cada momento del proceso iterativo pueda tener un único valor numérico de preferencia real. Es importante distinguir entre funciones de objetivo con una estructura lineal de aquellas con una estructura no lineal. El segundo elemento es una colección de variables cuyos valores pueden ser modificados a lo largo del proceso de optimización, para evaluar la función objetivo (Griva et al., 2009). Es decir, la función objetivo es una función de esta colección de variables (parámetros) y es importante distinguir la presencia de una o múltiples variables, si estas son de origen complejo o real y en este último caso si son de tipo continuo o discreto. El tercer elemento es un conjunto de restricciones en los valores que las variables pueden tomar. Como por ejemplo la definición de intervalos, la exclusión de conjuntos de valores y condiciones adicionales entre variables (Griva et al., 2009). Adicionalmente, existe la posibilidad que dentro de la región definida exista más de una solución local lo que dificulta el proceso de identificación de una de estas como una solución global. Todos estos factores influyen de manera importante la elección de un método específico de optimización adecuado para el problema considerado.

En este trabajo se cuenta con un problema multivariable con variables reales y continuas debido a la presencia de varios parámetros de variable real continua tanto para el filtro como para la ventana. Además,se cuenta con una región de solución bien definida y no hay restricciones adicionales sobre los valores de las variables. Adicionalmente, el proceso de optimización es global debido a no existe una clara región donde puedan encontrarse una única solución (posibilidad de existencia de múltiples soluciones locales). Finalmente, la función objetivo es no lineal, lo que limita el posible número de algoritmos a emplear para resolver nuestro problema de caracterización.

Los métodos de optimización global buscan soluciones globales a problemas que contienen múltiples máximos o mínimos. Entre los algoritmos comunes que permiten la solución de tales problemas encontramos la búsqueda de patrones, los algoritmos genéticos y el enjambre de partículas (Jiménez-Builes et al., 2016). Entre estos se eligió el algoritmo de enjambres debido a su facilidad de implementación en MatLab, su intuitiva interpretación gráfica y a los buenos resultados que mostró en las pruebas preliminares.

8.1.1 Optimización por enjambres de partículas

El algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas (PSO) es una técnica computacional inspirada en el comportamiento colectivo de organismos naturales, como aves o peces, que se mueven juntos para alcanzar un objetivo común (Clerc, 2010). En PSO se considera una población inicial de partículas, junto con un conjunto de posiciones y velocidades que se mueven en un espacio de soluciones para encontrar la mejor solución posible. Cada partícula ajusta su posición en función de su propia mejor solución conocida (mejor solución personal) y de la mejor solución descubierta por todo el grupo (mejor solución global) (Clerc, 2010). Este movimiento colaborativo permite a las partículas converger hacia soluciones óptimas a lo largo de las iteraciones. Cuando se busca una solución óptima se trata de maximizar o minimizar la función objetivo. Esta función objetivo que puede tener múltiples máximos y mínimos locales, pero se espera la existencia de un único máximo y mínimo global (Clerc, 2010). Adicionalmente, la complejidad y el costo computacional de calcular la función objetivo afecta significativamente la cantidad de recursos computacionales y el tiempo de ejecución del algoritmo.

La Fig. 8.1 muestra un diagrama de flujo general del algoritmo PSO donde se muestra que inicia definiendo un enjambre de partículas mediante sus posiciones en el espacio de soluciones, posteriormente calcula la función de costo para cada una de estas partículas y determina las mejores posiciones de partícula junto con la mejor posición global. En este punto se calcula un nuevo conjunto de velocidades para el enjambre y se procede a determinar el nuevo conjunto de posiciones. Finalmente, se determina si se satisfacen las condiciones de terminación del algoritmo y en caso contrario se procede a un nuevo ciclo de iteración que comienza con la evaluación de la función de costo.

El resultado de este proceso iterativo bajo las condiciones de convergencia adecuada es que la población final presenta un agrupamiento alrededor de la posición que presente un mejor valor para la función de costo y si los criterios de finalización que incluyen entre otros, número máximo de iteraciones sin mejora de la función objetivo, número máximo de iteraciones, valor límite de la función objetivo, entre otras, se satisfacen el algoritmo finaliza con un resultado que en principio puede visualizarse para problemas tridimensionales como se muestra en la Fig. 8.2.

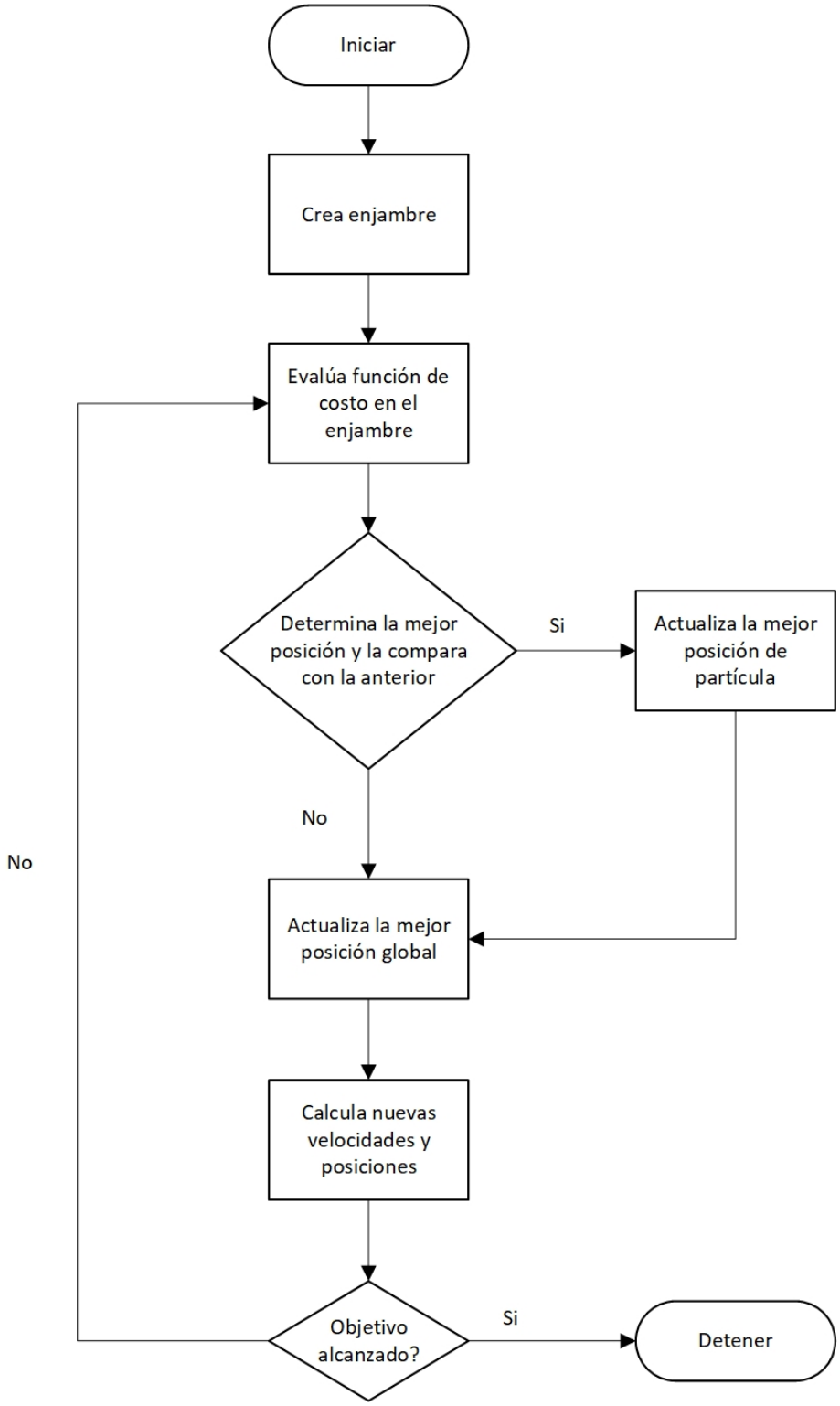

Figura 8.1.: Diagrama de bloques general de un algoritmo de de optimización de enjambres de partículas

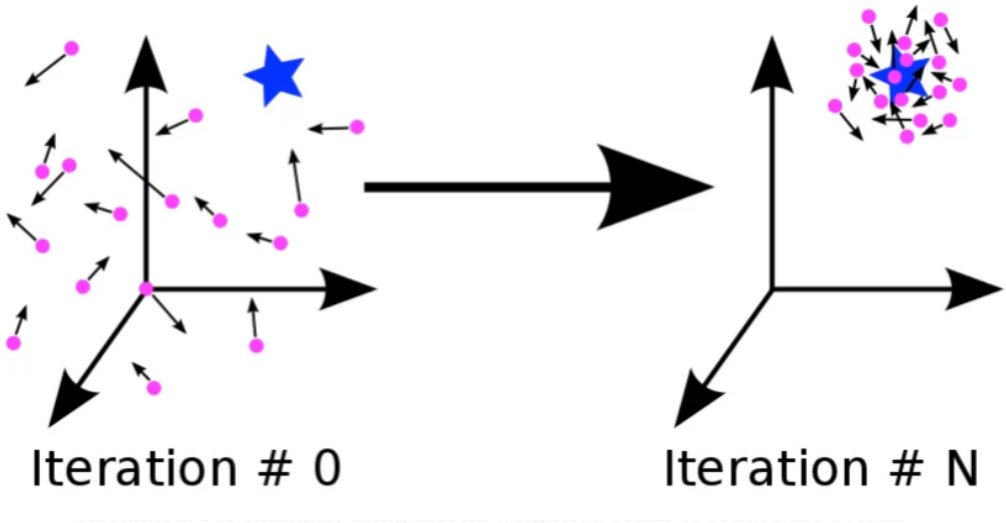

Figura 8.2.: Resultado esquemático de la ejecución de un algoritmo de enjambre de partículas tridimensional. Tomado de *Particle Swarm Optimisation* (2017)

8.1.2 Aspectos matemáticos de la optimización por enjambres de partículas

El enjambre de partículas está definido dentro del espacio de búsqueda de soluciones y se define en función de las coordenadas de partículas que buscan encontrar la mejor solución global. Un ejemplo de dicho enjambre se muestra en la Ec. 8.1, donde P^t representa el enjambre y x_i^t representa la $i-ésima$ partícula, ambos en el instante t (Thevenot, 2022).

$$P^t = \left[x_0^t,\ x_1^t,\ x_2^t,\ \ldots,\ x_n^t \right] \tag{8.1}$$

El conjunto de velocidades que permite actualizar el conjunto de posiciones del enjambre se define de una manera análoga y se muestra en la Ec. 8.2, donde V^t representa el conjunto de velocidades del enjambre y v_i^t representa velocidad de la $i-ésima$ partícula, ambos en el instante t (Thevenot, 2022).

$$V^t = \left[v_0^t,\ v_1^t,\ v_2^t,\ \ldots,\ v_n^t \right] \tag{8.2}$$

El proceso de actualización de las posiciones del enjambre se muestra en la Ec. 8.3 y consiste básicamente en la adición del vector de velocidades V^t al antiguo enjambre P^t (Thevenot, 2022). La Ec. 8.4 muestra el procedimiento para actua-

lizar el conjunto de velocidades del enjambre, donde aparece un primer término denominado *Inercia* que se define proporcional al conjunto de velocidades anterior, el segundo término denominado *Personal* es proporcional a la diferencia entre el mejor valor personal de cada partícula y su posición actual. El tercer y último termino denominado *Global* está definido de forma proporcional a la diferencia entre la mejor posición global del enjambre y el actual vector de posiciones del enjambre (Thevenot, 2022). Los coeficientes c_1 y c_2 denominados hiperparámetros proporcionan una medida de que tanto se influencia el enjambre por parte de las mejores soluciones, mientras que el parámetro w_I conocido como coeficiente de aceleración inercial influencia a capacidad del enjambre de explorar el espacio de soluciones. Finalmente, los coeficientes r_1 y r_2 denominados aceleración cognitiva y social son valores aleatorios de un valor único para cada partícula y cada iteración y reflejan el carácter variable que tiene cada partícula del enjambre donde en un momento dado puede mostrar más o menos interés en las soluciones ya encontradas (Thevenot, 2022).

$$P^{t+1} = P^t + V^t \tag{8.3}$$

$$V^{t+1} = \underbrace{w_I V^t}_{\text{Inercia}} + \underbrace{c_1 r_1 \left(P^t_{\text{Mejor Personal}} - P^t\right)}_{\text{Personal}} + \underbrace{c_2 r_2 \left(P^t_{\text{Mejor Global}} - P^t\right)}_{\text{Global}} \tag{8.4}$$

8.2 Proceso de caracterización

El diagrama de flujo general del proceso de caracterización (denominado así por que se obtienen valores de un conjunto de parametros que son caracteristicos de cada registro) se muestra en la Fig. 8.3. Básicamente, el proceso inicia importando un registro de un moonquake al que se le calcula su PSD y su *Envolvente Temporal*, posteriormente se procede a la generación de un registro sintético mediante el algoritmo de Kanai–Tajimi y se somete al procedimiento para calcular el valor de la función objetivo mediante la comparación de las *Envolventes Temporales* calculadas y los PSD tanto para el registro real como el sintético. El resultado obtenido se emplea para verificar los criterios de finalización del algoritmo y en caso contrario se procede a la variación de los parámetros (cálculo de un nuevo enjambre) para repetir el algoritmo desde el proceso de generación del acelerograma sintético. En principio se calculan un gran numero de acelerogramas sintéticos a partir de los

conjuntos de valores de los enjambres de parámetros luego se evalúa cada una de estos sismogramas y se calcula el valor de la función objetivo para aplicar las características evolutivas del algoritmo y generar una nueva población de enjambres hasta que se satisfaga alguno de los criterios de finalización.

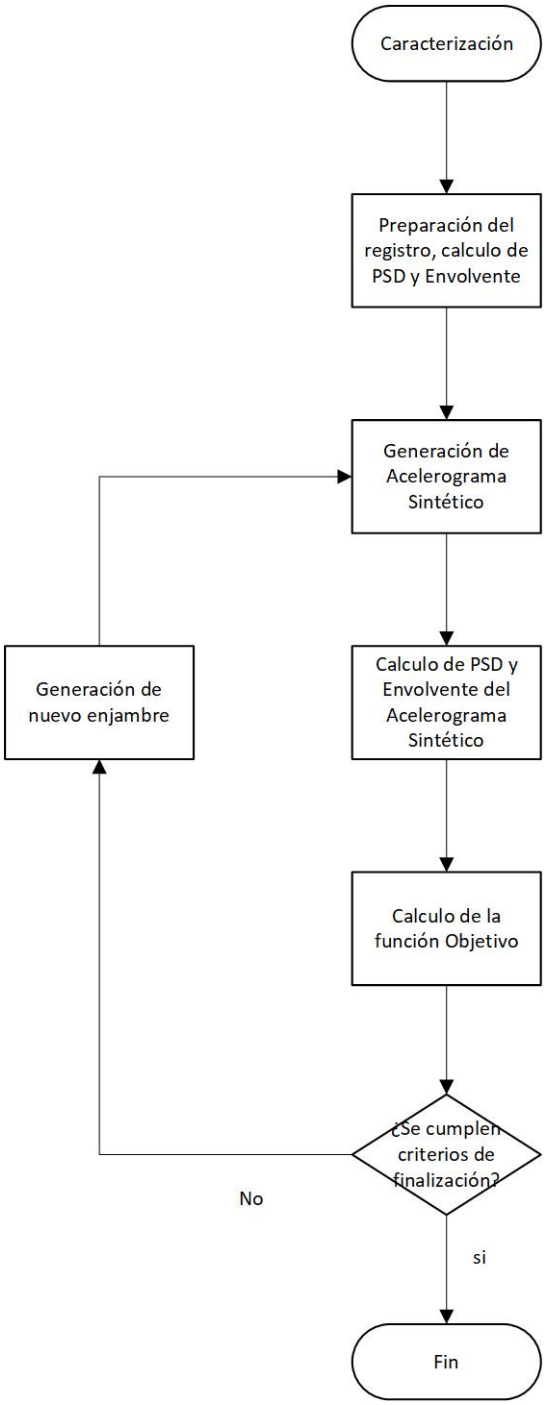

Figura 8.3.: Diagrama de flujo General del proceso de caracterización de un moonquake

8.2.1 Modelo de filtro

El filtro está compuesto por un filtro pasa–bajo que representa las características de la capa de suelo existente entre la fuente del evento y el sitio de medición, y un filtro pasa–alto que cumple la función de limitar la magnitud de la aceleración al inicio del registro (Clough y Penzien, 2003). El diseño de estos filtros se detalla en las Ec. 8.5 y 8.6. Donde z_g y w_g corresponden al amortiguamiento y frecuencia de corte del filtro pasa–bajo, mientras que z_h y w_h corresponden al amortiguamiento y frecuencia de corte del filtro pasa–alto. La Fig. 8.4 muestra un ejemplo de filtro, mientras que el Cód. 8.1 muestra el algoritmo empleado en el proceso de generación y aplicación del filtro.

$$H_{Low-Pass\ Filter} = \frac{2z_g w_g \mathbf{s} + w_g^2}{\mathbf{s}^2 + 2z_g w_g \mathbf{s} + w_g^2} \tag{8.5}$$

$$H_{High-Pass\ Filter} = \frac{\mathbf{s}^2}{\mathbf{s}^2 + 2z_h w_h \mathbf{s} + w_h^2} \tag{8.6}$$

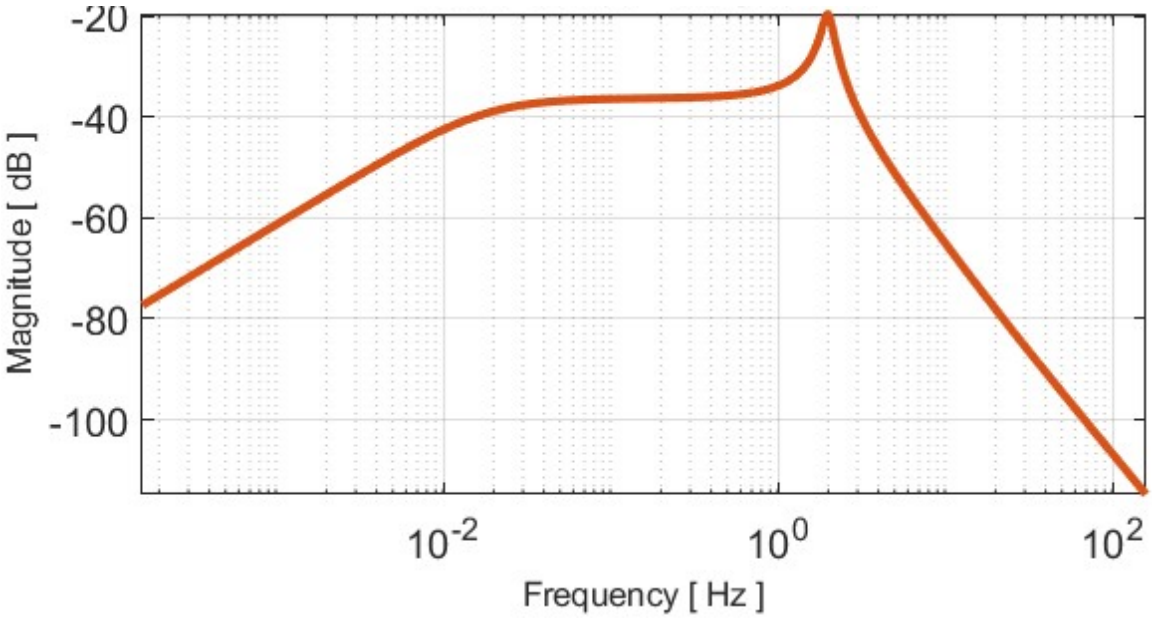

Figura 8.4.: Diagrama de amplitudes de Bode de un ejemplo de filtro. Tomado de la aplicación *Synthetic Moonquake Generator*.

```
numeq = conv([1 0],[2*zg*wg wg^2]);
deneq = conv([1 2*zh*wh wh^2],[1 2*zg*wg wg^2]);
H = tf(numeq,deneq);
GenAcc = lsim(H,RanAcc,ttS);
```

Código 8.1: Algoritmo para el diseño y aplicación del filtro en frecuencia

8.2.2 Modelo de ventana

La ventana temporal está formada por tres segmentos y su diseño se basa en los trabajos de Jennings et al. (1968) y Clough y Penzien (2003). En la Fig. 8.5 se muestra el esquema de la envolvente temporal y como esta se describe en función de cuatro parámetros que se definen a continuación.

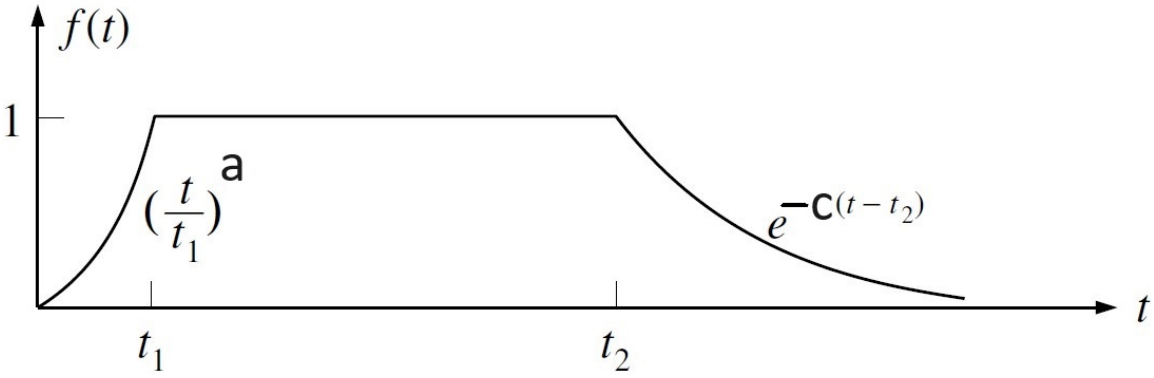

Figura 8.5.: Función que describe los componentes y ecuaciones de la envolvente temporal. Adaptado de Clough y Penzien (2003).

- t_1 [%] tiempo relativo del final del crecimiento, expresado como una fracción porcentual del tiempo donde termina la región de crecimiento del registro respecto a la duración total del mismo.
- a [−] exponente de la curva de la región de crecimiento.
- t_2 [%] tiempo relativo de inicio del decrecimiento, expresado como una fracción porcentual del tiempo donde inicia la región de decrecimiento del evento respecto a la duración total del mismo.
- c [−] exponente de la región de decrecimiento.

En el Cód. 8.2 se muestra el algoritmo empleado en el cálculo de la envolvente temporal. Este algoritmo empieza con el cálculo de la envolvente RMS superior del registro y procede a normalizar su amplitud, a partir de esta envolvente se procede al cálculo de la ventana mediante el suavizado de la curva utilizando algoritmos de optimización de enjambres para determinar la extensión y valor de exponente que mejor se ajustan cada una las regiones. Así, hay un total de dos algoritmos de optimización de enjambres uno para determinar la mejor curva de ajuste para la región de crecimiento potencial de la amplitud del registro y una para el ajuste de la mejor curva de decrecimiento exponencial para la cola del registro. Finamente, las curvas se emplean para construir la ventana envolvente temporal de todo el registro.

```
function [envN,winN,optiw01,optiw03,lbw,ubw] = WinCalc(tt,mq)
        N = length(mq);
        [env,~] = envelope(mq,round(N/40),'rms');
        envN = env/max(env);
        lbw01 = [round(0.05*N) 0.1];%[N01 expo01]
        ubw01 = [round(0.20*N) 5.0];
        nvarsw01 = length(lbw01);
        optionsw01 = optimoptions(␣
        ↪  @particleswarm,'Display','off','FunctionTolerance',1e-6);
        contw01 = 0;
        rng('default');
        p_optw01 = particleswarm(@CostW01,nvarsw01,lbw01,ubw01,optionsw01);
        win01 = win01(:);
        lbw03 = (length(win01) + 2);%N02
        ubw03 = round(0.40*N);
        nvarsw03 = length(lbw03);
        optionsw03 = optimoptions(␣
        ↪  @particleswarm,'Display','off','FunctionTolerance',1e-6);
        contw03 = 0;
        rng('default');
        p_optw03 = particleswarm(@CostW03,nvarsw03,lbw03,ubw03,optionsw03);
        win03 = win03(:);
        n02 = N - length(win01) - length(win03);
        win02 = ones(n02,1);
        winN = [win01; win02; win03];
        lbw = [lbw01 lbw03];
        ubw = [ubw01 ubw03];

        function objw01 = CostW01(pw01)
                contw01 = contw01 +1;
```

```
29                  N01 = floor(pw01(1));
30                  n01 = N01;
31                  expo01 = pw01(2);
32                  win01 = ((1:n01)/n01).^expo01;
33                  win01 = win01(:);
34                  env01 = envN(1:n01);
35                  objw01 = goodnessOfFit(env01,win01,'NRMSE');
36                  optiw01(contw01,:) = [N01 expo01 objw01];
37          end
38
39          function objw03 = CostW03(pw03)
40                  contw03 = contw03 +1;
41                  N02 = ceil(pw03(1));
42                  N03 = N;
43                  ttw03 = tt(N02:N03)-tt(N02);
44                  env03 = envN(N02:N03);
45                  alpha = fit(ttw03,env03,'exp1','Lower',[1 -Inf],'Upper',[1 Inf]);
46                  expo03 = alpha.b;
47                  n03 = N03 - N02 + 1;
48                  win03 = exp(expo03*(tt(N03) - tt(N02))/(n03 - 1)*(1:n03));
49                  win03 = win03(:);
50                  objw03 = goodnessOfFit(env03,win03,'NRMSE');
51                  optiw03(contw03,:) = [N02 expo03 objw03];
52          end
53
54  end
```

Código 8.2: Algoritmo para el cálculo de la ventana envolvente temporal

8.2.3 Generación de acelerogramas

La generación de sismogramas sintéticos para la caracterización sigue la metodología de Kanai–Tajimi, empezando con la creación de una señal aleatoria normalmente distribuida de ruido blanco limitado en banda a la que se le aplican el filtro (Sec. 8.2.1) y la envolvente temporal (Sec. 8.2.2) anteriormente descritos. El Cód. 8.3 muestra el algoritmo empleado que implementa el método de Kanai-Tajimi y finalmente normaliza la amplitud del registro obtenido.

```
function [ttS,mqSN] = Generate(p)
    global fs N winN
    ttS = 1/fs*(0:(N-1)).';
    rng('default');
    RanAcc = randn(1,N);
    fh = p(1);
    wh = fh*2*pi;
    zh = p(2);
    fg = p(3);
    wg = fg*2*pi;
    zg = p(4);
    numeq = conv([1 0],[2*zg*wg wg^2]);
    deneq = conv([1 2*zh*wh wh^2],[1 2*zg*wg wg^2]);
    H = tf(numeq,deneq);
    GenAcc = lsim(H,RanAcc,ttS);
    mqS = GenAcc.*winN;
    mqSN = mqS/max(abs(mqS));
end
```

Código 8.3: Algoritmo para la generación de sismogramas para cada partícula del enjambre

8.2.4 Función objetivo

La función objetivo empleada empieza generando el sismograma sintético, como se describe en la Sec. 8.2.3 y procede al cálculo de la envolvente temporal usando el algoritmo Cód. 8.2 y el PSD del registro sintético. A partir de estos resultados se calculan las componentes de la función objetivo en el tiempo obj_t y en frecuencia obj_f. La componente de tiempo se calcula punto a punto usando las ventanas envolventes temporales del sismograma real y sintetico, mientras que la componente en frecuencia se calcula empleando las PSD del registro real y sintetico por tramos usando los coeficientes de ponderación y frecuencias que se muestran en el Cód. 8.4. En este fragmento de código se definen las frecuencias f_cut en las que se divide el PSD y el coeficiente de ponderación Wf dado a cada región entre dos frecuencias adyacentes. La necesidad de la ponderación de las regiones del PSD surge debido a que se busca que el algoritmo de optimización presente un mejor ajuste en las regiones de mayor ponderación que en otros casos muestran pobres resultados. En cada caso se emplea la función de MATLAB $goodnessOfFit$ con la opción $NRMSE$.

No existe un valor a priori para terminar el proceso de caracterización debido a que no se conoce un valor óptimo u esperado para la función objetivo en su lugar se asume un una serie de criterios de terminación que incluyen: (i) un numero máximo de 20 iteraciones sin que se presente variación en el valor calculado para la función objetivo, (ii) un numero máximo de 20 iteraciones en las que el cambio de valor relativo de la función objetivo respecto al mínimo valor global sea inferior a $1e-4$ y (iii) un numero máximo de iteraciones (generación de enjambres) de 200 que corresponde a un total de 16000 acelerogramas.

```
%           1     2     3     4     5     6     7
f_cut    = [0.10  0.15  0.40  0.50  0.60  0.70  0.80];
Wf       = [    00    05    01    10    10    10    ];
Wf = Wf/sum(Wf);
```

Código 8.4: Conjunto de frecuencias y coeficientes de ponderación para el cálculo del objetivo en Frecuencia

```
function C = Cost(p)
    global N fs winN psdmqN fIdx cont opti lbw ubw ffSN Wf ttSN mqSN winSN psdSN
    ↪  tStartIter vidObj
    cont = cont + 1;
    if (cont == 1)
        tStartIter = tic;
    end
    [ttS,mqSN] = Generate(p);
    NS = length(mqSN);
    TS = ttS(end);
    ttSN = ttS/TS;
    [~,winSN,optiwS01,optiwS03,lbw,ubw] = WinCalc(ttSN,mqSN);
    [psdSN,ffSN] = psdCalc(mqSN,NS,fs);
    obj_t = goodnessOfFit(winN,winSN,'NRMSE');
    for ii = 1:(length(fIdx)-1)
        obj_f(ii) = goodnessOfFit(psdmqN(fIdx(ii):fIdx(ii+1)),psdSN(fIdx(
        ↪  ii):fIdx(ii+1)),'NRMSE');
    end
    WC = [1 1];
    C = dot(WC,[obj_t dot(Wf,obj_f)/sum(Wf)])/sum(WC);
    opti(cont,:) = [p optiwS01(end,1:2) optiwS03(end,1:2) C];
end
```

Código 8.5: Función objetivo del algoritmo de caracterización

8.2.5 Validación del algoritmo de caracterización

Para verificar el correcto funcionamiento del algoritmo de caracterización, se generaron una serie de acelerogramas y se compararon con los acelerogramas reales en busca de similitudes como se muestra a continuación. Los gráficos muestran en la parte superior los acelerogramas, mientras que en la parte inferior aparecen las densidades espectrales de potencia (PSD) del registro real y sobre puesto sobre este la del registro sintético generado. Las lineas verticales verdes indican el rango de frecuencias que se considero para realizar el ajuste de los sismogramas y corresponde al intervalo de $0{,}15Hz$ a $0{,}80Hz$, que coincide con el rango de frecuencias de la de la caracterización (El rango de frecuencia para la deconvolución es de $0{,}10Hz$ a $0{,}7655Hz$, pero el limite superior para la caracterización se redondeado a $0{,}80HZ$, mientras que para la caracterización se empleo un coeficiente de 0 en la región de $0{,}10Hz$ a $0{,}15Hz$ como se muestra en la Código. 8.4, haciendo que el limite inferior corresponda a $0{,}15Hz$).

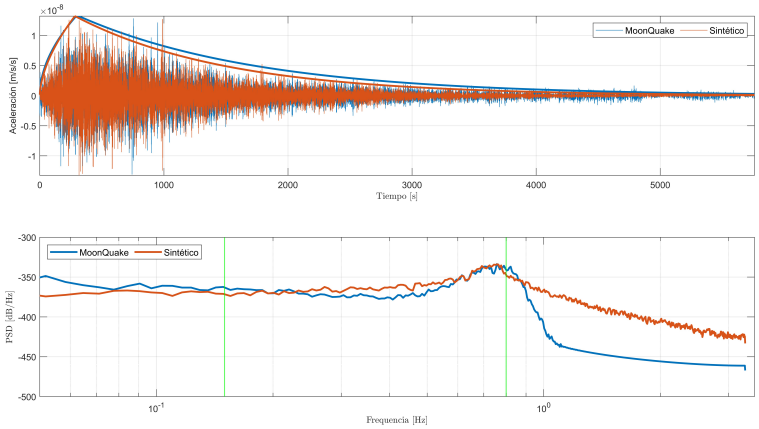

Figura 8.6.: Comparación de los registros de moonquake real y sintéticos para el registro N02-ST14-LPX

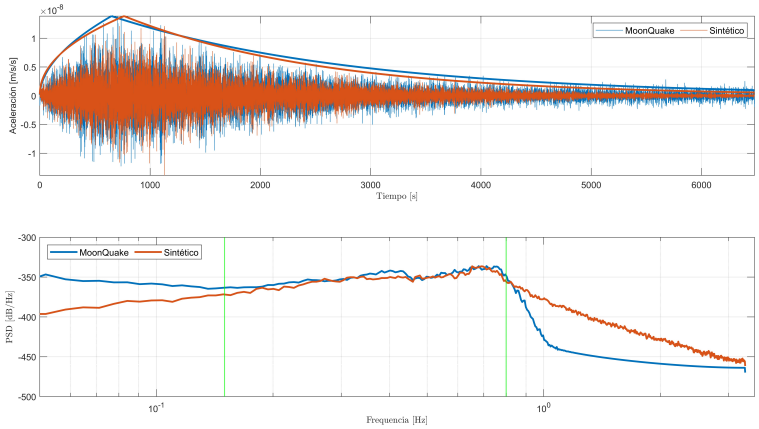

Figura 8.7.: Comparación de los registros de moonquake real y sintéticos para el registro N16-ST12-LPX

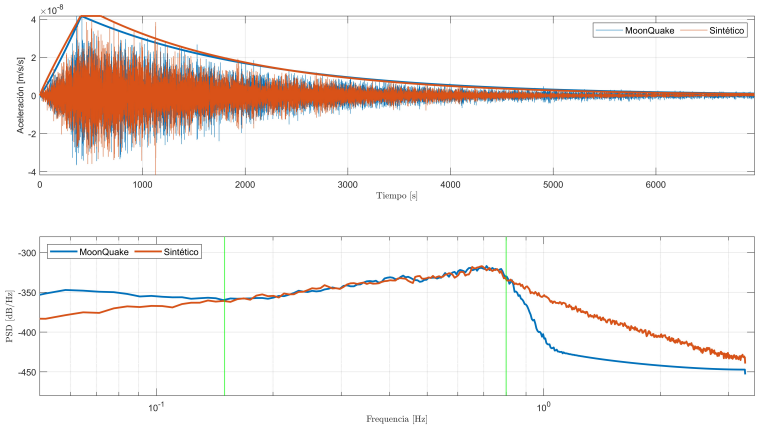

Figura 8.8.: Comparación de los registros de moonquake real y sintéticos para el registro N01-ST12-LPY

La inspección visual de las figuras indica que existe un alto grado de similitud entre los moonquakes reales y los sintéticos empleados en la caracterización de los registros alcanzando una bondad de ajuste NRSME promedio del 80 % en la envolvente temporal y un 55 % en PSD dentro de la región de estudio (0,15Hz a 0,80Hz). La región para frecuencias menores a 0,15Hz no se considero debido a que en general las amplitudes del PSD para estas regiones aumenta contrario a lo que se espera en

un fenómeno natural y que puede tener su origen en limitaciones instrumentales[1]. De igual manera, la región para frecuencias mayores a $0{,}80Hz$ no se considero debido a que la señal obtenida en esta región queda por fuera de la banda de frecuencias útil de la deconvolución, adicionalmente en esta región se observa una fuerte caída en las amplitudes del PSD (efecto de filtrado) que no corresponde a las características esperadas para un shallow moonquake (Nunn et al., 2020). Finalmente, la amplitud de los sismogramas sintéticos generados es ligeramente menor a la del sismograma real debido al empleo de la envolvente cuadrática media del sismograma real y no la envolvente superior como base para el diseño de la ventana envolvente temporal. Esta característica se escogió a propósito con el fin de limitar los picos exagerados que evidencian ruido excesivo en los registro debido, nuevamente, a las limitaciones instrumentales de los sismómetros de la red Apollo(Horvath, 1979).

[1]La banda de frecuencias sugerida para los registros Apollo LP corresponde a $0{,}30Hz$ a $1{,}00Hz$ (Nunn et al., 2022), a menos que el análisis individual de las señales permita ampliar este rango, en nuestro caso empleamos el limite inferior de $0{,}10Hz$ debido a que se obtuvieron buenos resultados en la calidad de las señales obtenidas y el limite superior esta determinado por las limitaciones de la técnica de deconvolución que corresponde a $0{,}7655Hz$ y que por razones practicas se ha redondeado a $0{,}80Hz$

9. RESULTADOS

9.1 Generación de acelerogramas sintéticos

El proceso de generación de los moonquakes sintéticos sigue la filosofía de Kanai–Tajimi descrita por Jennings et al. (1968), que empieza con la generación de una señal de ruido blanco limitado en banda, que proporciona la naturaleza aleatoria del registro. Seguido de la aplicación de un filtro en frecuencia que dota el registro de las características deseadas en el dominio de la frecuencia. Posteriormente, se aplica una ventana envolvente temporal que, en caso de ser "lo suficientemente suave", afecta muy poco las características en frecuencia del registro y proporciona la naturaleza no estacionaria al registro, concediéndole su forma en el dominio del tiempo. Como último paso del proceso se procede a escalar el registro multiplicando el acelerograma normalizado por el PGA deseado (Dhulipala, 2023). En este capítulo se describen los algoritmos empleados en la generación de los moonquakes sintéticos que condujeron a su diseño final.

9.1.1 Seleción de eventos

El proceso de caracterización se llevo a cabo en 51 registros preseleccionadas de manera visual y empírica por la calidad del registro en el dominio del tiempo y frecuencia. El proceso de caracterización toma entre 10 y 14 horas e ejecutarse para un registro y en la mayoría de las ocasiones se ejecuto en dos o veces para mediante inspección de los resultados proceder a realizar modificaciones en los parámetros de la optimización de amajanares como por ejemplo el número máximo de iteraciones, ajuste de los valores limites del espacio de soluciones y la tolerancia mínima en la función de costo. Luego de realizar la caracterización en el dominio del tiempo y frecuencia de los 51 registros se procedió a la selección de aquellos registros para los que el algoritmo termino satisfactoriamente lo que implica que el algoritmo termino debido a que se alcanzo la precisión requerida y ninguno de los ocho parámetros mostró convergencia hacia alguno de los extremos de su intervalo de valores. Luego de estas verificaciones se seleccionaron un total de 35 registros que posteriormente

se separaron empíricamente en tres grupo según su magnitud de momento con el fin de diseñar ventanas envolventes para cada uno de estos grupos empleando los valores de los parámetros obtenidos en la caracterización. El listado de registros se muestra en la Tabla. 9.1

	M_w [2,7 − 3,2]	
N28-ST16-LPX	N20-ST14-LPY	N20-ST16-LPY
N21-ST15-LPX	N24-ST14-LPY	N03-ST12-LPX
N03-ST14-LPX	N03-ST14-LPY	N27-ST14-LPX
N27-ST14-LPY	N02-ST14-LPX	
	M_w [3,3 − 3,6]	
N18-ST15-LPX	N18-ST15-LPY	N18-ST16-LPY
N10-ST12-LPY	N10-ST16-LPX	N04-ST15-LPY
N16-ST12-LPX	N16-ST14-LPX	N16-ST15-LPY
N16-ST16-LPX	N16-ST16-LPY	N10-ST14-LPX
N26-ST14-LPX	N26-ST16-LPX	
	M_w [3,7 − 4,1]	
N01-ST12-LPX	N01-ST12-LPY	N01-ST14-LPX
N01-ST14-LPY	N09-ST12-LPX	N09-ST12-LPY
N09-ST14-LPX	N09-ST16-LPX	N09-ST16-LPY
N17-ST14-LPX		

Tabla 9.1.: Registros seleccionados luego del proceso de caracterización clasificados según rango de magnitud de momento

9.1.2 Ruido blanco

Para generar el ruido blanco limitado en banda empezamos definiendo un vector de tiempo de una duración $GP.T$ en min y una frecuencia de muestreo $GP.fs$ medida en Hz. Posteriormente, la duración de la señal se ajusta para que el vector de tiempo $GP.tt$ tenga un número par de componentes debido a requerimientos posteriores. A continuación se emplea la función $randn$ que nos permite generar un vector de números aleatorios normalmente distribuidos de la misma longitud del

vector de tiempo. Finalmente, la señal se normaliza en su amplitud ($GP.NGenAcc$). El algoritmo exacto se muestra en el Cód. 9.1.

```
GP.tt = 1/GP.fs*(0:GP.T*60*GP.fs).';
if (mod(length(GP.tt),2)==1)
    GP.tt(end) = [];
end
GP.RndAcc = randn(1,length(GP.tt));
GP.NGenAcc = GP.RndAcc/max(abs(GP.RndAcc));
```

Código 9.1: Algoritmo usado para la generación de la señal de ruido blanco limitado en banda

9.1.3 Filtro en frecuencia

Los valores sugeridos para las variables $z_g = 0{,}072$ [−], $z_h = 12{,}1362$ [−] y $w_h = 2\pi \cdot 0{,}4318$ [rad/s] se obtuvieron como el valor medio de los resultados obtenidos durante el proceso de caracterización de los registros existentes, mientras que el valor de la frecuencia w_g se toma deliberadamente como $GP.fs/3$ para permitir que los moonquakes generados cuenten con un ancho de banda mayor, debido a que en los registros deconvolucionados este se encuentra limitados hasta los $0{,}77Hz$ y se ha observado que estos eventos presenten frecuencias mucho mayores (Nunn et al., 2020). En la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para la generación de registros sintéticos se implementan una serie de rangos para los parámetros del filtro, los valores de estos rangos se derivan directamente de los rangos observados durante el proceso de caracterización de los registros existentes.

El algoritmo empleado se muestra en el Cód. 9.2, donde las variables $FP.fh$, $FP.zh$, $FP.fgg$ y $FP.zg$ corresponden a las frecuencias de corte y razón de amortiguamiento del filtro Pasa–Alto y Pasa–Bajo, respectivamente medidas las frecuencias en Hz y las razones de amortiguamiento adimensionales. A partir de estas variables se definen los conjuntos de coeficientes del filtro y mediante la función tf se implementa la función de transferencia que posteriormente se aplica haciendo uso de la función $lsim$. Por último, la señal obtenida es normalizada en su amplitud ($FP.NGenAcc$).

```
FP.wh = FP.fh*2*pi;
FP.wg = FP.fgg*2*pi;
FP.numeq = conv([1 0],[2*FP.zg*FP.wg FP.wg^2]);
FP.deneq = conv([1 2*FP.zh*FP.wh FP.wh^2],[1 2*FP.zg*FP.wg FP.wg^2]);
FP.H = tf(FP.numeq,FP.deneq);
FP.GenAcc = lsim(FP.H,GP.RndAcc,GP.tt);
FP.NGenAcc = FP.GenAcc/max(abs(FP.GenAcc));
```

Código 9.2: Algoritmo usado para el cálculo del filtro Pasa–Banda y su aplicación

9.1.4 Ventana envolvente temporal

La ventana temporal está diseñada por rango de magnitud de momento, como sugiere el trabajo de Jennings et al. (1968) en el que se plantea un total de cuatro de estas envolventes para los sismos allí considerados. Para el caso de la Luna, se calculó la magnitud de momento M_w a partir de la tabla de momento sísmico M_0 presentada por Oberst (1987) y la Ec. 9.1 (Ruiz et al., 2022) que produce resultados consistentes con los valores de magnitud de momento reportados en la literatura (v.g. Kumar et al. (2019)).

$$M_w = \log(M_0 - 9{,}05)/1{,}5 \tag{9.1}$$

Una vez obtenidas las magnitudes de momento, se procedió a dividir los resultados de la caracterización en tres rangos de magnitud con el objeto de agrupar los registros en grupos con un numero aproximadamente igual de registros. El primero de [2,7 − 3,2], el segundo de [3,3 − 3,6] y el último de [3,7 − 4,1].

123

La estructura de la ventana envolvente que se muestra en la Fig. 8.5 se describe en la Pág. 41.

Para cada uno de estos rangos se calculó el valor medio de los parámetros de la envolvente temporal y se determinaron los rangos de variación observada. Los valores medios de estos análisis se resumen en la Tabla 9.2. Mientras que en la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para la generación de registros sintéticos se implementan los rangos para los parámetros de cada una de las envolventes temporales definidas.

M_w [−]	t_1 [%]	a [−]	t_2 [%]	c [−]
[2,7 − 3,2]	10,35	1,62	12,21	−3,10
[3,3 − 3,6]	8,48	0,74	9,54	−3,21
[3,7 − 4,1]	6,09	1,00	8,74	−4,85

Tabla 9.2.: Valores medios de los parámetros de las ventanas definidas según rango de magnitud de momento

El algoritmo implementa la ventana por tramos empezando con la región de amplitud creciente donde se calcula el número de datos que tendrá la longitud de esta parte de la ventana ($TP.n01$) y calcula los valores de la curva potencial ($TP.win01$), seguidamente se calcula la longitud de la región decreciente ($TP.n03$) y se calculan los datos de la curva decreciente exponencial ($TP.win03$). Por último, se calcula el número de datos de la meseta ($TP.n02$) y se unen las tres secciones de la ventana ($TP.winN$) para proceder a aplicarla y normalizar la amplitud de la señal resultante ($TP.mqSN$). El Cód. 9.3 muestra en detalle el Código fuente para el diseño y aplicación de la envolvente temporal.

```
TP.N01 = floor(TP.t1*length(GP.tt)/100);
TP.n01 = TP.N01;
TP.win01 = ((1:TP.n01)/TP.n01).^TP.a;
TP.win01 = TP.win01(:);
TP.N02 = ceil(TP.t2*length(GP.tt)/100);
TP.N03 = length(GP.tt);
TP.n03 = TP.N03 - TP.N02 + 1;
TP.win03 = exp(TP.c*(1:TP.n03)/TP.n03);
TP.win03 = TP.win03(:);
TP.n02 = length(GP.tt) - length(TP.win01) - length(TP.win03);
TP.win02 = ones(TP.n02,1);
TP.winN = [TP.win01; TP.win02; TP.win03];
TP.mqS = FP.NGenAcc.*TP.winN;
TP.mqSN = TP.mqS/max(abs(TP.mqS));
```

Código 9.3: Algoritmo para el cálculo de la envolvente temporal y su aplicación

Como un último paso se procede a la aplicación del PGA, como un factor de escala, para obtener el registro con la escala deseada. El Cód. 9.4 muestra el algoritmo empleado para obtener el moonquake sintético escalado ($TP.mqSPGA$).

```
1 TP.mqSPGA = TP.mqSN*TP.PGA;
```

Código 9.4: Algoritmo para la aplicación del PGA deseado al registro

9.2 Synthetic Moonquake Generaor

Synthetic Moonquake Generator es una aplicación informática diseñada para la generación de sismos lunares sintéticos, adaptada específicamente para reproducir las características de los sismos lunares tipo superficial registrados por sensores de periodo largo y orientación horizontal de la red Apollo. El software emplea una metodología Kanai-Tajimi y algoritmos de optimización de enjambres. Haciendo posible que cualquier persona pueda realizar el cálculo del acelerograma de un moonquake sintético y sus espectros de respuesta.

La aplicación se desarrolló en el lenguaje MATLAB versión 2022A, y está escrita utilizando una *MatLab figure* y su compilación a ejecutable se hizo con ayuda de la herramienta *MATLAB COMPILER*, consta de un total de 43 archivos de código fuente *.m*, tres archivos de imagen y tres archivos *.pdf*. Mientras que los archivos auxiliares para su compilación constan de seis archivos de imagen, un archivo de texto y tres archivos *.pdf*.

Respecto al hardware empleado para su desarrollo se utilizó un computador personal tipo portátil con procesador Intel Core i5 de 10th generación, 20 GB de RAM DDR4 @ 3200 MHz, disco de estado sólido NVME M.2 500GB PCIE3. Las demás características son las comunes para un equipo de consumo general.

La aplicación consiste en un menú principal y dos pestañas principales desde las cuales se accede a los diversos controles que permiten configurar los parámetros para los cálculos y obtener los resultados. Para hacer uso adecuado de la aplicación se puede seguir cualquier orden de acciones. No obstante, hay un orden lógico (basado en el orden del procedimiento algorítmico seguido en la generación del los acelerogramas sintéticos) para la aplicación del algoritmo Kanai–Tajimi y la generación de los espectros de respuesta, que son fundamentales para el funcionamiento software.

Primero, se sugiere que el usuario interactué con la pestaña *Synthetic Accelerogram*, donde puede definir las características del ruido blanco base, diseñar un filtro en frecuencia y ventana temporal, aplicarlos y escalar el registro a un PGA deseado. En cada ocasión que se realice un cambio la aplicación ajustara y recalculara automáticamente los resultados y los mostrara en la región de gráficas.

Adicionalmente, se cuenta con la pestaña *Response Spectrum*, donde se pueden calcular los espectros de respuesta sísmica. Igual que en la pestaña anterior, las operaciones pueden realizarse en cualquier orden, pero existe un orden lógico (basado en el orden del procedimiento algorítmico seguido en el calculo de los espectros de respuesta) sugerido que pasa por definir la razón de amortiguamiento, rango y número de periodos y la magnitud de la aceleración gravitacional[1] deseados. Los respectivos espectros de respuesta se calcularán de manera automática luego de cada cambio y se mostrarán en la región de gráficas.

El software cuenta con la posibilidad de exportar los resultados numéricos y gráficos tanto del acelerograma como de los espectros de respuesta y de salvar el entorno para su uso posterior. Una vez finalizado el proceso de instalación, se puede asociar la extensión de archivo, para que al hacer doble clic sobre el archivo de un proyecto se abra la aplicación y cargue los valores guardados. A continuación se describe la interfaz gráfica y los procesos internos de cálculo del los acelerogramas lunares sintéticos y espectros de respuesta sísmica con esta aplicación.

9.2.1 Pantalla principal

La ventana principal contiene el logotipo de la aplicación, la *barra de menú* y las pestañas *Synthetic Accelerogram* y *Response Spectrum* (Fig. 9.1). Inicialmente, se muestra el contenido de la pestaña *Synthetic Accelerogram*, pero puede se puede elegir la pestaña *Response Spectrum* con total libertad, ya que al iniciarse la aplicación ya se ha calculado un acelerograma sintético de muestra y sus espectros de respuesta.

[1]Este argumento es variable ya que puede ser útil evaluar espectros de respuestas en entornos diferentes a la Luna

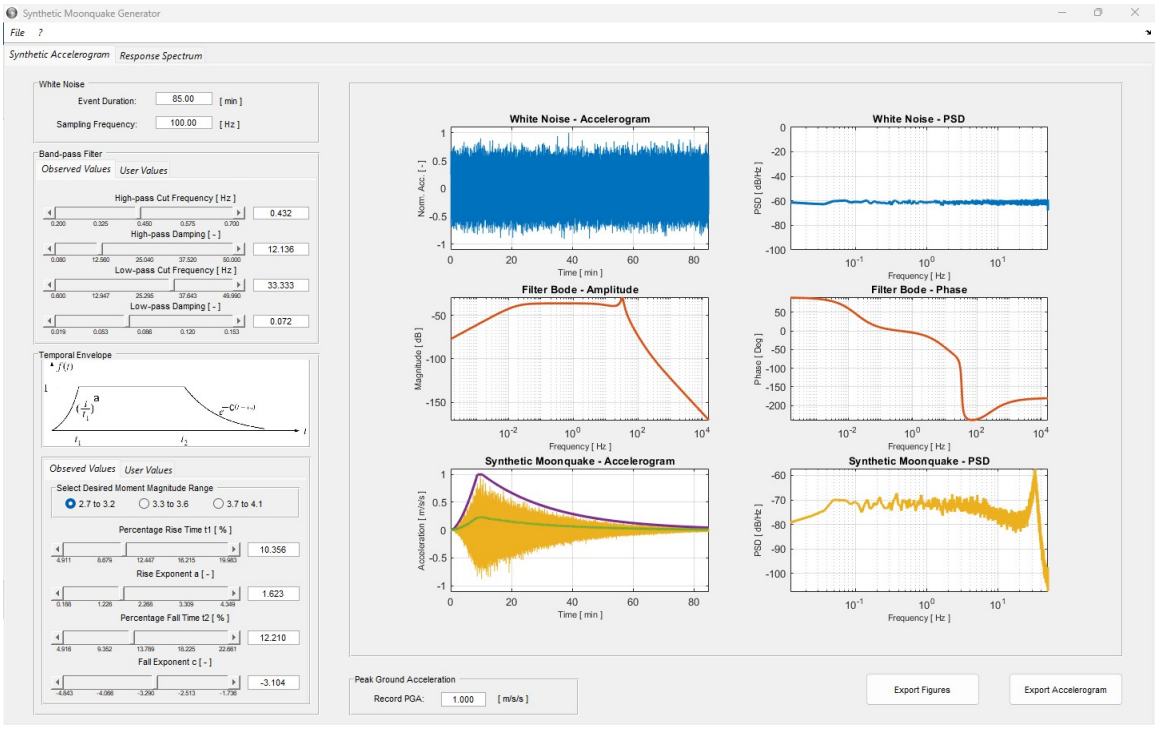

Figura 9.1.: Ventana principal del software *Synthetic Moonquake Generator*

En la Fig. 9.2 se muestra un detalle de la barra de menú y las pestañas *Synthetic Accelerogram* y *Response Spectrum*, donde se aprecian los menús *File* y *? (Ayuda)*.

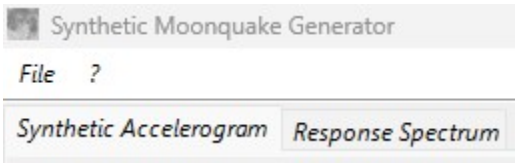

Figura 9.2.: Barra de menú y pestañas *Synthetic Accelerogram* y *Response Spectrum*

Menú archivo

El menú *File* contiene un total de tres ítems: *Open...* que permite abrir un entorno de trabajo guardado con una extensión personalizada $*.smg$, *Save As...* permite guardar el entono de trabajo con todos los valores, gráficos y configuraciones bajo un archivo con extensión personalizada $*.smg$ y *Close* (este comando cierra la aplicación). Cada uno de los comandos antes mencionados cuenta con un método

abreviado de teclado para su invocación. La Fig. 9.3 muestra un detalle del menú *File* desplegado.

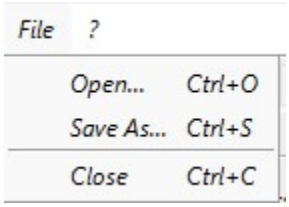

Figura 9.3.: Menú File y sus opciones

Menú ayuda

El menú *? (Ayuda)* contiene un total de cuatro ítems:

- *User Manual* que muestra el manual de usuario de la aplicación
- *File Association* que muestra las instrucciones para asociar el formato de archivo *.smg* con la aplicación
- *License Agreement* que muestra un documento, donde se tratan todos los detalles relevantes al acuerdo de licencia
- *About* que abre una venta con información acerca del software como versión, desarrolladores y la afiliación a la *Escuela de Ingeniería Civil y Geomática* de la *Universidad del Valle*

La Fig. 9.4 muestra un detalle del menú *? (Ayuda)* desplegado, mientras que la Fig. 9.5 muestra la ventana que abre la opción *About*.



Figura 9.4.: Menú *? (Ayuda)* y sus opciones

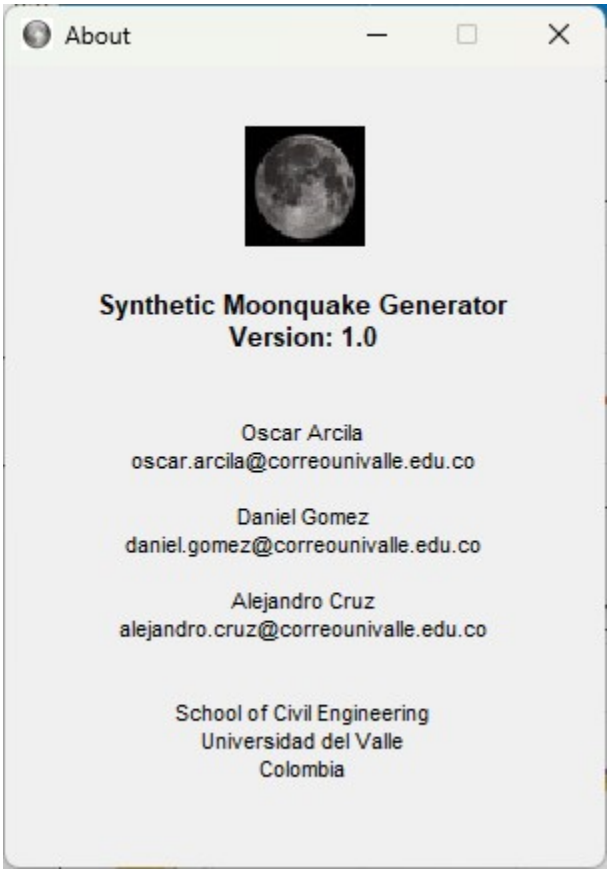

Figura 9.5.: Ventana *About*

9.2.2 Pestaña de acelerograma sintético

La aplicación inicia con la pestaña *Synthetic Accelerogram* seleccionada que se muestra en la Fig. 9.6, donde se puede apreciar que consta de los paneles *White Noise* donde podemos controlar las características del ruido blanco a emplear,*Band-Pass Filter* que permite diseñar y aplicar un filtro pasa–banda en frecuencia, *Temporal Envelope* donde podemos diseñar la envolvente temporal de los acelerogramas, *PGA* que permite escalar los registros, un panel donde se muestran diversas gráficas relacionadas con el proceso de generación del acelerograma sintético y dos botones que permiten exportar los resultados tanto numéricamente como gráficamente.

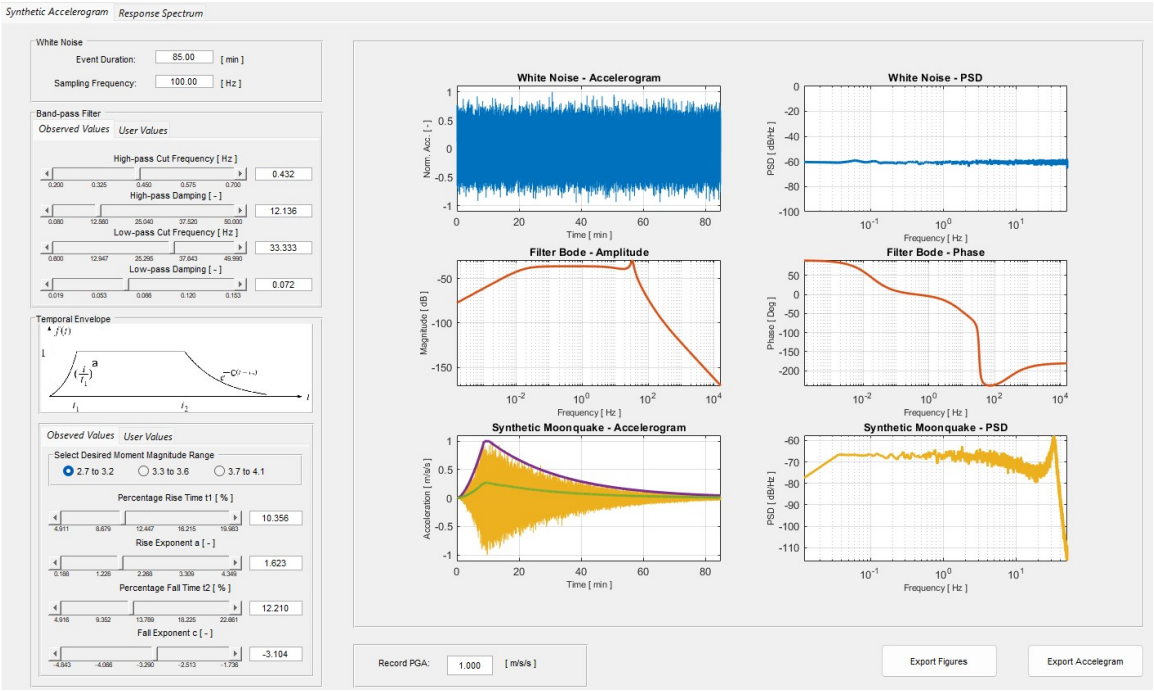

Figura 9.6.: Pestaña *Synthetic Accelerogram*

Generación de ruido blanco

La interfaz está diseñada de modo que el usuario pueda seguir cualquier orden de cálculo, no obstante hay un orden sugerido. En primer lugar, el usuario puede definir las características de duración y frecuencia de muestreo del ruido blanco limitado en banda a emplear utilizando los cuadros de texto editables del panel *White Noise* (Fig. 9.7). El algoritmo de generación de la señal de ruido blanco se basa en el conjunto de instrucciones mostradas en el Código 9.5 donde se describe el proceso de generación de ruido blanco de banda limitada junto con las instrucciones necesarias para el cálculo de su densidad espectral de potencia (PSD). En este Código $GT.fs$ y $GT.T$ hacen referencia a la frecuencia de muestreo del registro medida en Hz y a la longitud del registro medida en min. Mientras que $GP.NGenAcc$, $GP.psd$ y $GP.ff$ corresponden a la señal de ruido blanco limitado en banda normalizada medida en $m/s/s$ y a las componentes de amplitud y fase del PSD de la señal. Adicionalmente, la longitud de la señal se limita a una número par de elementos debido a requerimientos del proceso de generación del moonquake sintético (específicamente se debe al uso de la función lsim (simulación lineal) de MatLab que requiere que la señal empleada tenga una longitud o número de elementos par).



Figura 9.7.: Panel de generación de la señal de ruido blanco (*White Noise*)

```
GP.tt = 1/GP.fs*(0:GP.T*60*GP.fs).';
if (mod(length(GP.tt),2)==1)
    GP.tt(end) = [];
end
GP.RndAcc = randn(1,length(GP.tt));
GP.NGenAcc = GP.RndAcc/max(abs(GP.RndAcc));
GP.nfft = 2^(nextpow2(length(GP.tt))-6);
GP.noverlap = GP.nfft/2;
GP.window = GP.nfft;
[GP.psd,GP.ff] = pwelch(GP.NGenAcc,GP.nfft,GP.noverlap,GP.window,GP.fs);
```

Código 9.5: Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo de la señal de ruido blanco limitado en banda y su PSD

Diseño y aplicación de filtro

El siguiente paso lógico consiste en el diseño y aplicación del filtro en frecuencia, esto puede efectuarse de dos maneras, la primera de estas es mediante la pestaña *Observed Values*, de panel *Band–Pass Filter*, que permite generar un filtro pasa–banda compuesto por un filtro pasa–bajo de orden dos y un filtro pasa–alto de orden dos, que corresponden estrechamente con las características observadas en el dominio de la frecuencia de los moonquakes reales. Ambos filtros se definen en función de su frecuencia de corte y su razón de amortiguamiento. Los valores de estos cuatro parámetros se pueden modificar ya sea haciendo uso de los controles deslizantes o haciendo uso de los cuadros de texto editables dispuestos frente a cada control (Fig. 9.8). El algoritmo de generación del filtro Paso-Banda de la pestaña *Observed Values* se basa en el conjunto de instrucciones mostradas en el Código 9.6 donde se describe el proceso de construcción del filtro junto con las instrucciones necesarias para el cálculo del diagrama de Bode. En este Código $FP.fhone$, $FP.zhone$, $FP.fggone$ y $FP.zgone$ hacen referencia a la frecuencia de corte del filtro Paso-Alto

medida en Hz, la relación de amortiguamiento del filtro Paso-Alto, la frecuencia de corte del filtro Paso-Bajo medida en Hz y la relación de amortiguamiento del filtro Paso-Bajo.

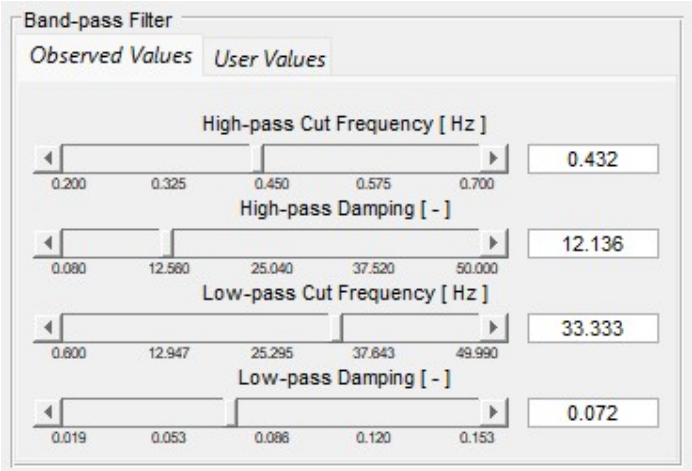

Figura 9.8.: Pestaña *Observed Values* del panel de edición del filtro (*Band–Pass Filter*)

```
1 FP.whone = FP.fhone*2*pi;
2 FP.wgone = FP.fggone*2*pi;
3 FP.numeqone = conv([1 0],[2*FP.zgone*FP.wgone FP.wgone^2]);
4 FP.deneqone = conv([1 2*FP.zhone*FP.whone FP.whone^2],[1 2*FP.zgone*FP.wgone
  ↪  FP.wgone^2]);
5 FP.Hone = tf(FP.numeqone,FP.deneqone);
6 FP.H = FP.Hone;
7 FP.GenAccone = lsim(FP.Hone,GP.RndAcc,GP.tt);
8 FP.NGenAcc = FP.GenAccone/max(abs(FP.GenAccone));
9 [FP.mag,FP.ph,FP.w] = bode(FP.H);
```

Código 9.6: Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo del filtro Pasa–Banda de la pestaña *Observed Values* del panel *Band–Pass Filter*

El segundo método para diseñar y aplicar el filtro consiste en emplear la pestaña *User Values*, de panel *Band–Pass Filter*, donde es posible definir un filtro pasa banda compuesto por un filtro pasa–bajo y un filtro pasa–alto con un orden variable de uno a cuatro. Ambos filtros se definen de la manera convencional, como filtros Butterworth de frecuencia de corte y orden definidos (de manera independiente).

Los valores de estos cuatro parámetros se pueden modificar haciendo uso de los cuadros de texto editables dispuestos como se muestra en la Fig. 9.9. El algoritmo de generación del filtro Paso-Banda de la pestaña *User Values* se basa en el conjunto de instrucciones mostradas en el Código 9.7 donde se describe el proceso de construcción del filtro junto con las instrucciones necesarias para el cálculo del diagrama de Bode. En este Código $FP.fhtwo$, $FP.fhotwo$, $FP.fggtwo$ y $FP.fggotwo$ hacen referencia a la frecuencia de corte del filtro Paso-Alto medida en Hz, el orden del filtro Paso-Alto, la frecuencia de corte del filtro Paso-Bajo medida en Hz y el orden del filtro Paso-Bajo.

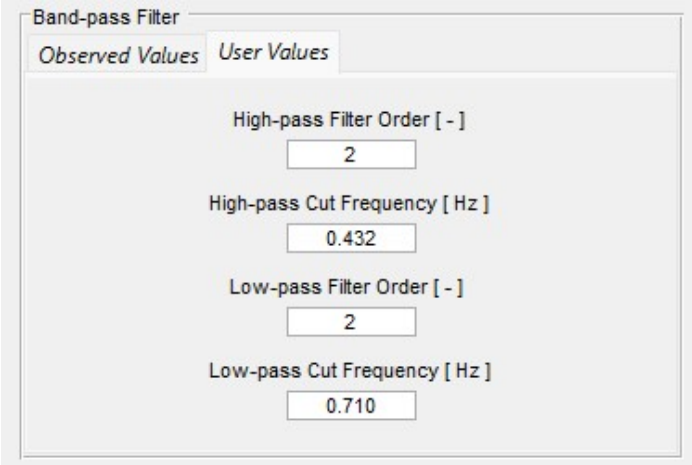

Figura 9.9.: Pestaña *User Values* del panel de edición del filtro (*Band–Pass Filter*)

```
[FP.fhbtwo,FP.fhatwo] = butter(FP.fhotwo,FP.fhtwo/(GP.fs/2),'high');
[FP.fggbtwo,FP.fggatwo] = butter(FP.fggotwo,FP.fggtwo/(GP.fs/2),'low');
FP.btwo = conv(FP.fhbtwo,FP.fggbtwo);
FP.atwo = conv(FP.fhatwo,FP.fggatwo);
FP.Htwo = tf(FP.btwo,FP.atwo);
FP.H = FP.Htwo;
FP.GenAcctwo = filtfilt(FP.btwo,FP.atwo,GP.RndAcc);
FP.GenAcctwo = FP.GenAcctwo(:);
FP.NGenAcc = FP.GenAcctwo/max(abs(FP.GenAcctwo));
[FP.mag,FP.ph,FP.w] = bode(FP.H);
```

Código 9.7: Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo del filtro Pasa–Banda en la pestaña *User Values* del panel *Band–Pass Filter*

Diseño y aplicación de ventana envolvente temporal

La continuación natural (siguiendo el orden del algoritmo de generación de sismogramas sintéticos) en la generación de los acelerogramas sintéticos es la aplicación de una ventana temporal adecuada. Esto puede hacerse con ayuda del panel *Temporal Envelope* y los controles allí dispuestos. En primer lugar, contamos con una imagen que describe de manera esquemática la notación de los elementos de las ventanas envolventes temporales que emplea el software *Synthetic Moonquake Generator*. Estas consisten de una región inicial de amplitud creciente, una meseta y una región final de decrecimiento exponencial.

El proceso de diseño y aplicación de la envolvente temporal puede realizarse de dos maneras la primera de estas es usando la pestaña *Observed Values* del panel *Temporal Envelope* que aparece por defecto y se muestra en la Fig. 9.10. Donde se observa el panel *Select Desired Moment Magnitude Range* que cuenta con tres controles radiales que permiten elegir un rango de magnitud que corresponde a uno de los tres modelos de envolvente temporal propuestos basados en las características observadas para los moonquakes tipo superficial. Una vez se elige uno de estos botones, la nueva ventana se aplica de manera automática y se recalcula los resultados y gráficas necesarias. La Fig. 9.10 muestra la apariencia de la pestaña *Observed Values* del panel *Temporal Envelope*.

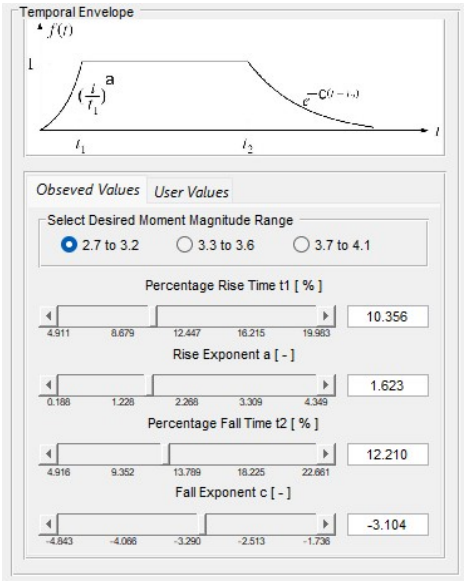

Figura 9.10.: Pestaña *Observed Values* del panel *Temporal Envelope*

Seleccionar un rango de magnitud aplica la correspondiente envolvente temporal predefinida para dicho rango, pero esta admite posterior personalización mediante el uso de unos controles deslizantes o sus correspondientes cuadros de texto editables que permiten modificar los valores de los cuatro parámetros que describen la envolvente temporal dentro de un rango de valores sugeridos según los resultados de la caracterización de los moonquakes estudiados. No obstante, cabe notar que los rangos de valores sugeridos y los valores por defecto son distinto para cada rango de magnitud de momento disponible en el panel *Select Desired Moment Magnitude Range*.

El Cód 9.8 muestra el algoritmo empleado para el cálculo de la envolvente temporal. En este $TP.t1one$, $TP.aone$, $TP.t2one$ y $TP.cone$ corresponden al tiempo relativo del final del crecimiento, el exponente de la curva de la región de crecimiento, el tiempo relativo de inicio del decrecimiento y el exponente de la región de decrecimiento. Mientras que $TP.winN$ corresponde a la envolvente temporal.

```
TP.N01 = floor(TP.t1one*length(GP.tt)/100);
TP.n01 = TP.N01;
TP.win01 = ((1:TP.n01)/TP.n01).^TP.aone;
TP.win01 = TP.win01(:);
TP.N02 = ceil(TP.t2one*length(GP.tt)/100);
TP.N03 = length(GP.tt);
TP.n03 = TP.N03 - TP.N02 + 1;
TP.win03 = exp(TP.cone*(1:TP.n03)/TP.n03);
TP.win03 = TP.win03(:);
TP.n02 = length(GP.tt) - length(TP.win01) - length(TP.win03);
TP.win02 = ones(TP.n02,1);
TP.winNone = [TP.win01; TP.win02; TP.win03];
TP.winN = TP.winNone;
```

Código 9.8: Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo de la envolvente temporal de la pestaña *Observed Values* del panel *Temporal Envelope*

El segundo método para diseñar y aplicar la envolvente temporal consiste en el empleo de la pestaña *User Values* del panel *Temporal Envelope*. Este panel cuenta con cuatro cuadros de texto editables que permiten la modificación de los valores de los parámetros que describen la envolvente temporal. Al modificar el valor de alguno de estos campos se procede a recalcular los resultados y actualizar las gráficas

correspondientes de manera automática. La Fig. 9.11 muestra la apariencia de la pestaña *User Values* del panel *Temporal Envelope*.

El Cód 9.9 muestra el algoritmo empleado para el cálculo de la envolvente temporal. En este $TP.t1two$, $TP.atwo$, $TP.t2two$ y $TP.ctwo$ corresponden al tiempo relativo del final del crecimiento, el exponente de la curva de la región de crecimiento, el tiempo relativo de inicio del decrecimiento y el exponente de la región de decrecimiento. Mientras que $TP.winN$ corresponde a la envolvente temporal.

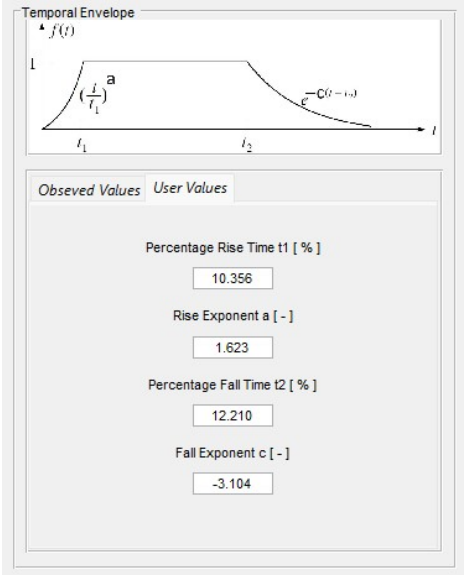

Figura 9.11.: Pestaña *User Values* del panel *Temporal Envelope*.

```
TP.N01 = floor(TP.t1two*length(GP.tt)/100);
TP.n01 = TP.N01;
TP.win01 = ((1:TP.n01)/TP.n01).^TP.atwo;
TP.win01 = TP.win01(:);
TP.N02 = ceil(TP.t2two*length(GP.tt)/100);
TP.N03 = length(GP.tt);
TP.n03 = TP.N03 - TP.N02 + 1;
TP.win03 = exp(TP.ctwo*(1:TP.n03)/TP.n03);
TP.win03 = TP.win03(:);
TP.n02 = length(GP.tt) - length(TP.win01) - length(TP.win03);
TP.win02 = ones(TP.n02,1);
TP.winNtwo = [TP.win01; TP.win02; TP.win03];
TP.winN = TP.winNtwo;
```

Código 9.9: Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo del envolvente temporal en la pestaña *User Values* del panel *Temporal Envelope*

Modificación del PGA del registro

La modificación del PGA del registro puede hacerse gracias al panel *Peak Ground Acceleration*, que cuenta con un cuadro de texto editable que al modificarse recalcula de forma automática los resultados y figuras relacionadas con el acelerograma sintético. El panel *Peak Ground Acceleration* se muestra en la Fig. 9.12.



Figura 9.12.: Panel *Peak Ground Acceleration* de la pestaña *Synthetic Accelerogram*

Área de figuras de la pestaña Synthetic Accelerogram

El último panel de la pestaña *Synthetic Accelerogram* es el panel de figuras que muestra los resultados del proceso de generación del moonquake sintético. Está compuesta por un total de seis figuras que corresponden desde la parte superior izquierda hacia la derecha así:

1. El acelerograma del ruido blanco generado
2. La densidad espectral de potencia del ruido blanco
3. La componente de amplitudes del diagrama de Bode del filtro
4. La componente de fases del diagrama de Bode del filtro
5. El acelerograma del moonquake sintético generado (amarillo), junto con su ventana envolvente temporal (violeta) y su envolvente raíz cuadrática media (verde)
6. La densidad espectral de potencia del moonquake sintético.

Adicionalmente, cada figura de la aplicación cuenta con una serie de controles embebidos que permiten realizar la acción de acercamiento, alejamiento, paneo, cursor para seleccionar valores, restaurar vista original y exportar a diversos formatos de imagen. El panel de figuras de la pestaña *Synthetic Accelerogram* se muestra en la Fig. 9.13, mientras que el detalle de los controles en una de estas figuras se muestra en la Fig. 9.14.

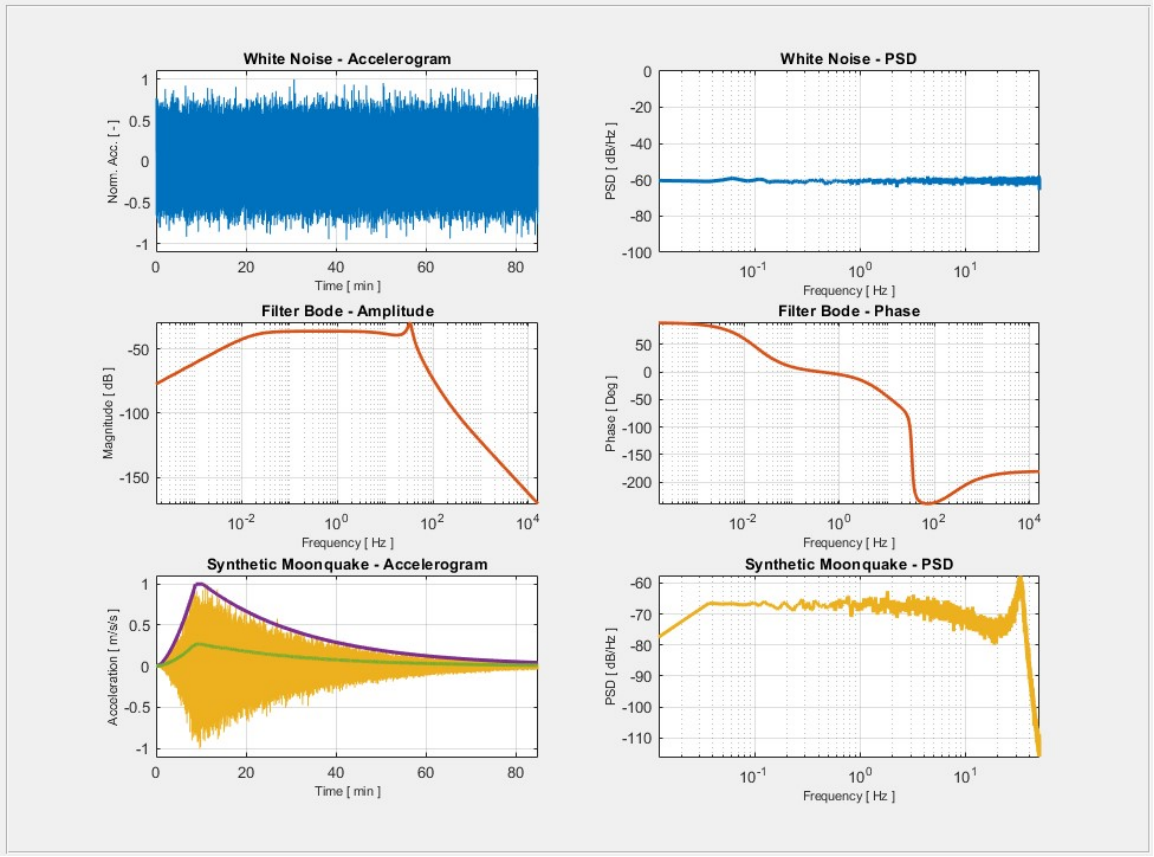

Figura 9.13.: Panel de figuras de la pestaña *Synthetic Accelerogram*

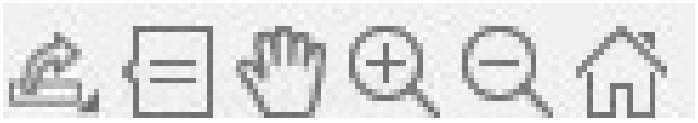

Figura 9.14.: Controles embebidos en cada figura del panel de figuras de la pestaña *Synthetic Accelerogram*

Exportar resultados de la pestaña Synthetic Accelerogram

Las imágenes del panel de figuras pueden exportar como archivos *.fig* de MATLAB para su posterior análisis y procesamiento al presionar en el botón *Export Figures* de la pestaña *Synthetic Accelerogram* (Fig. 9.15). Al presionar este botón se abre el cuadro de diálogo *Export figures as 'MATLAB .fig' files* que permite elegir la ubicación para guardar las figuras.



Figura 9.15.: Botón *Export Figures* de la pestaña *Synthetic Accelerogram*

Por su parte, es posible exportar el moonquake sintético generado como un archivo de texto de dos columnas (Tiempo y Aceleración) haciendo uso de la funcionalidad proporcionada por el botón *Export Accelerogram* de la pestaña *Synthetic Accelerogram* (Fig. 9.16). Al presionar este botón se abre una ventana con el cuadro diálogo *Export Accelerogram as '.txt' file* que permite asignar un nombre y ubicación especifica al archivo de texto.

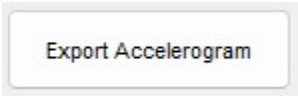

Figura 9.16.: Botón *Export Accelerogram* de la pestaña *Synthetic Accelerogram*

El archivo del acelerograma sintético exportado incluye un encabezado descriptivo con la siguiente información:

- Fecha de creación del archivo
- Tipo de registro: *Synthetic Moonquake Accelerogram Record*
- Nombre del archivo
- Duración del registro
- Frecuencia de muestreo del registro
- Nombre de la primera columna y unidad de medida: Time (s)

- Nombre de la segunda columna y unidad de medida: Synthetic Moonquake Acc. (m/s/s)
- Conjunto de instrucciones para cargar los datos del archivo en MATLAB
- Datos del registro a dos columnas

Una parte del inicio de un archivo de *Synthetic Moonquake Accelerogram Record* se muestra en el cuadro de Cód. 9.10.

```
% Date: 28/February/2024-21:40:02
% Synthetic Moonquake Accelerogram Record
% File: MQ001.txt
% Durantion: 85.000 min
% Sampling Frequency: 100.000 Hz
% PGA: 1.000 m/s/s
% First Column: Time (s)
% Second Column: Synthetic Moonquake Acc. (m/s/s)
% Matlab Loading Method:
% fileID = fopen('MQ001.txt');
% Data = cell2mat(textscan(fileID,'%f %f','headerlines',14));
% fclose(fileID);


0.000000        4.457583e-27
0.010000        7.682189e-09
0.020000        4.556491e-08
```

Código 9.10: Parte inicial de un archivo *Synthetic Moonquake Accelerogram Record* exportado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator*

9.2.3 Pestaña de espectros de respuesta

Una vez finalizado el proceso de generación de un moonquake sintético es posible proceder al cálculo de los espectros de respuesta sísmica con ayuda de la pestaña *Response Spectrum* que se muestra en la Fig. 9.17, donde se puede apreciar que consta de los paneles *Damping Ratio* donde es posible definir el valor de la razón de amortiguamiento, *Response Spectrum Periods* donde se puede definir el rango de los periodos y el número de los mismos, *Gravitational Acceleration Magnitude* donde es posible definir la magnitud de la aceleración gravitacional a emplear, un panel

de figuras donde se muestran los resultados gráficos de los espectros calculados y dos botones que permiten exportar los resultados tanto numéricamente como gráficamente[2].

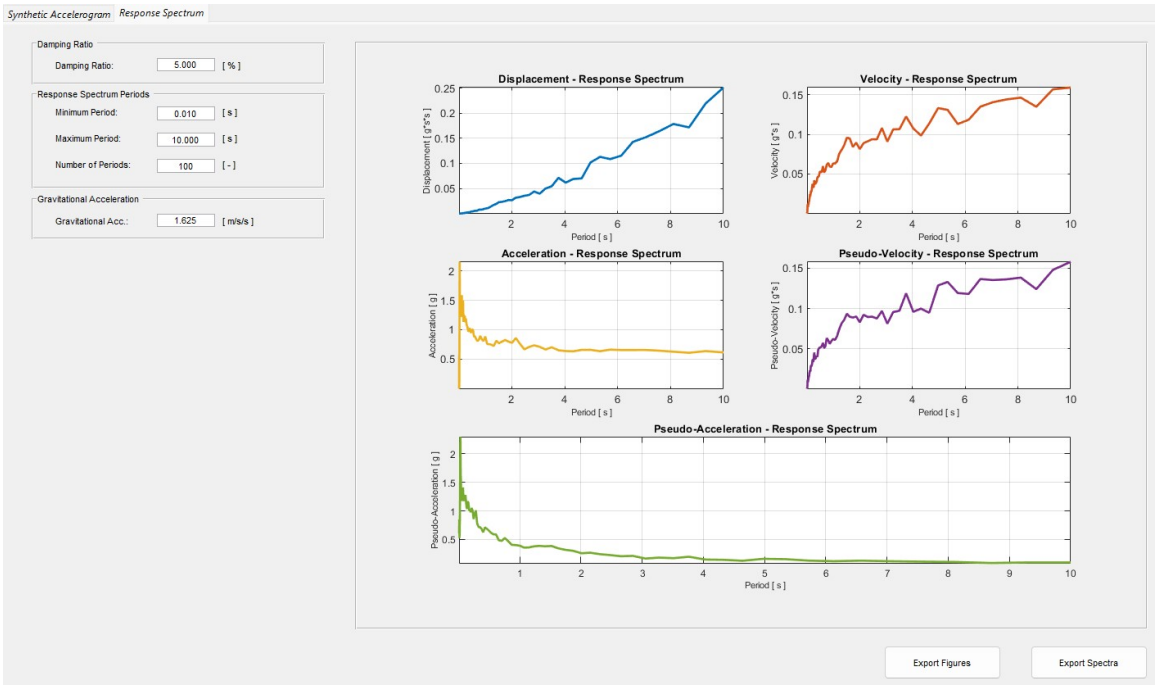

Figura 9.17.: Pestaña *Response Spectrum*

Razón de amortiguamiento

El valor de la razón de amortiguamiento puede modificarse con ayuda del cuadro de texto editable del panel *Damping Ratio*. Una vez modificado este valor, la aplicación procede al cálculo de los espectros de respuesta y actualización de las gráficas del panel de figuras de la pestaña *Response Spectrum*.



Figura 9.18.: Panel *Damping Ratio* de la pestaña *Response Spectrum*

[2]El algoritmo de calculo de espectros de respuesta ha sido verificado empleado el registro de terremoto del centro y se ha comparado con los resultados presentados en el texto de Dinámica de estructuras de Anil K. Chopra

Definición de periodos

El proceso de definición de periodos para el cálculo de los espectros de respuesta puede llevarse a cabo con ayuda del panel *Response Spectrum Periods*. Este panel cuenta con tres cuadros de texto editables que permiten modificar el valor del periodo mínimo, el valor del periodo máximo y el número de periodos. El algoritmo para el cálculo específico del vector de periodos se muestra en el Cód. 9.11 donde las variables $TN.Tmin$, $TN.Tmax$ y $TN.Tnum$ corresponden a los periodos mínimo, máximo y número de periodos.



Figura 9.19.: Panel *Response Spectrum Periods* de la pestaña *Response Spectrum*

```
1 TN.Tn=logspace(log10(TN.Tmin),log10(TN.Tmax),TN.Tnum);
```

Código 9.11: Algoritmo usado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* para el cálculo de los periodos del panel *Response Spectrum Periods*

Magnitud de la aceleración gravitacional

Para modificar el valor de la magnitud de la aceleración gravitacional es necesario emplear el cuadro de texto editable del panel *Gravitational Acceleration*. Una vez modificado este valor, la aplicación procederá al cálculo automático de los espectros de respuesta y actualización de las gráficas del panel de figuras de la pestaña *Response Spectrum*.



Figura 9.20.: Panel *Gravitational Acceleration* de la pestaña *Response Spectrum*

SpecMQ Función para el cálculo de los espectros de respuesta sísmicos

El algoritmo que calcula los espectros de respuesta para la aplicación *Synthetic Moonquake Generator* se basa en el método de interpolación de la excitación por motivos de rapidez de cálculo (Chopra, 2012). La implementación del código se muestra en Cód. 9.12 y cabe destacar que las variables $SP.ResD$, $SP.ResV$, $SP.ResA$, $SP.ResSV$ y $SP.ResSA$ corresponden a los espectros en Desplazamiento, Velocidad, Aceleración, Pseudo–Velocidad y Pseudo–Aceleración respectivamente.

```
function SpecMQ()

global M GP FP TP ZZ TN GG SP

    set(M.fg, 'pointer', 'watch')
    drawnow;

    SP.ResD=zeros;
    SP.ResV=zeros;
    SP.ResA=zeros;
    SP.ResSV=zeros;
    SP.ResSA=zeros;
    for ii=1:length(TN.Tn)
        SP.tn=TN.Tn(ii);
        SP.wn=2*pi/SP.tn;
        SP.c=2*ZZ.Z/100*SP.wn;
        SP.k=SP.wn^2;
        [SP.u,SP.v,SP.a]=interpolation(
        ↪  1,SP.c,SP.k,-TP.mqSN*TP.PGA/GG.gg,0,0,1/GP.fs,length(TP.mqSN));
        SP.D=max(abs(SP.u));
        SP.V=max(abs(SP.v));
        SP.A=max(abs(SP.a));
        SP.SV=SP.wn*SP.D;
        SP.SA=SP.wn*SP.wn*SP.D;
        SP.ResD(ii)=SP.D;
        SP.ResV(ii)=SP.V;
        SP.ResA(ii)=SP.A;
        SP.ResSV(ii)=SP.SV;
        SP.ResSA(ii)=SP.SA;
    end

    set(M.fg, 'pointer', 'arrow');

```

```
33      function [u,v,a]=interpolation(m,c,k,pt,uo,vo,dt,N)
34          u=zeros;
35          v=zeros;
36          a=zeros;
37          wn=sqrt(k/m);
38          zita= c/(2*m*wn);
39          wd=wn*sqrt(1- zita^2);
40          p=pt;
41          u(1)=uo;
42          v(1)=vo;
43          a(1)=(p(1)/m)-(2*zita*wn*v(1))-(wn^2)*u(1);
44          A=exp(-zita*wn*dt)*(((zita*sin(wd*dt))/sqrt(1-(zita)^2))+cos(wd*dt));
45          B=exp(-zita*wn*dt)*(sin(wd*dt)/wd);
46          C=(1/k)* (((2*zita)/ (wn*dt)) + (exp(-zita*wn*dt)*(((((1-
            ↪  2*(zita^2))/(wn*dt)) - (zita/sqrt(1 -(zita^2))))*sin(wd*dt)) -((1
            ↪  +((2*zita)/(wn*dt)))*cos(wd*dt)))));
47          D=(1/k)* ( (1-(2*zita/(wn*dt))) +
            ↪  (exp(-zita*wn*dt)*(((-1+2*(zita^2))/(wn*dt))*sin(wd*dt)
            ↪  +(2*zita/(wn*dt))*cos(wd*dt))));
48          Apr=-exp(-zita*wn*dt)*(wn*sin(wd*dt)/sqrt(1 - zita^2));
49          Bpr=exp(-zita*wn*dt)*(-zita*sin(wd*dt)/sqrt(1 - zita^2) + cos(wd*dt));
50          Cpr=(1/k)* ((-1/ dt) + exp(-zita*wn*dt)*(((wn/sqrt(1 - zita^2)) +
            ↪  zita/(dt*sqrt(1 - zita^2)))*sin(wd*dt) +(1/dt)*cos(wd*dt)));
51          Dpr=(1/(k*dt))*(1-exp(-zita*wn*dt)*((zita/sqrt(1 - zita^2))*sin(wd*dt)
            ↪  +cos(wd*dt)));
52          for i=1:N-1
53              u(i+1)= A*u(i)+B*v(i)+C*p(i)+D*p(i+1);
54              v(i+1)= Apr*u(i)+Bpr*v(i)+Cpr*p(i)+Dpr*p(i+1);
55              a(i+1)=(p(i+1)/m)-2*zita*wn*v(i+1)-(wn^2)*u(i+1);
56          end
57      end
58  end
```

Código 9.12: *SpecMQ.m*: Función para el cálculo de los espectros de respuesta sísmicos de la pestaña *Response Spectrum*

Área de figuras de la pestaña Response Spectrum

El último panel de la pestaña *Response Spectrum* muestra los resultados del cálculo de los espectros de respuesta del moonquake sintético. Este panel está com-

puesto por cinco figuras, dispuestas desde la parte superior izquierda hacia la derecha y descendiendo:

- Espectro de respuesta en desplazamiento
- Espectro de respuesta en velocidad
- Espectro de respuesta en aceleración
- Espectro de respuesta en Pseudo-velocidad
- Espectro de respuesta en pseudo-aceleración

Todas estos espectros se calculan a partir del moonquake sintético generado. Además, cada figura incluye una serie de controles embebidos que permiten realizar las siguientes acciones:

- Acercamiento
- Alejamiento
- Paneo
- Cursor para seleccionar valores
- Restaurar vista original
- Exportar a diversos formatos de imagen

El panel de figuras de la pestaña *Response Spectrum* se muestra en la Figura 9.21, mientras que el detalle de los controles en una de las figuras se presenta en la Figura 9.14.

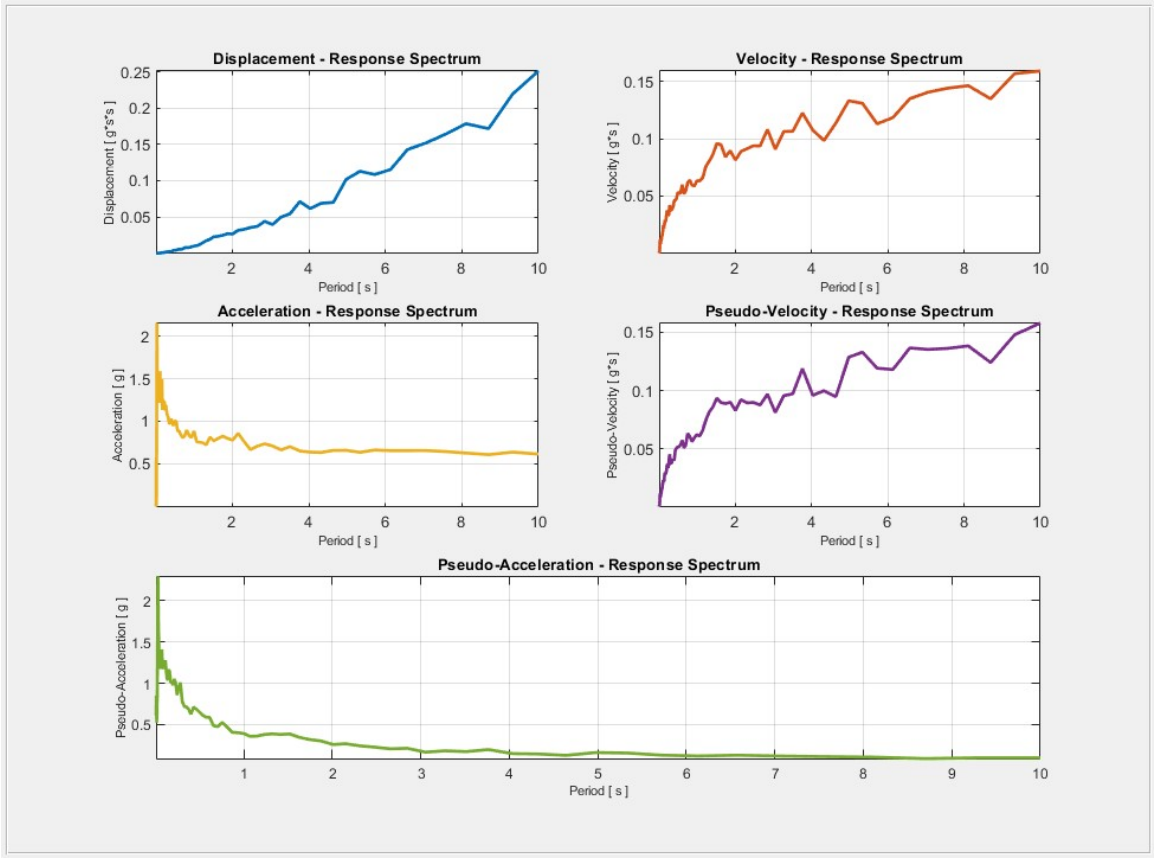

Figura 9.21.: Panel de figuras de la pestaña *Response Spectrum*

Exportar resultados de la pestaña Response Spectrum

Las imágenes del panel de figuras pueden exportar como archivos $.fig$ de MATLAB para su posterior análisis y procesamiento al presionar en el botón *Export Figures* de la pestaña *Response Spectrum* (Fig. 9.22). Al presionar este botón se abre el cuadro de diálogo *Export figures as 'MATLAB .fig' files* que permite elegir la ubicación para guardar las cinco figuras.

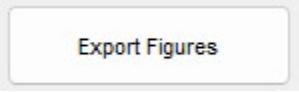

Figura 9.22.: Botón *Export Figures* de la pestaña *Response Spectrum*

Por su parte es posible exportar los espectros de respuesta calculados como un archivo de texto de seis columnas (Periodo, Desplazamiento, Velocidad, Aceleración,

Pseudo–Velocidad y Pseudo–Aceleración) haciendo uso de la funcionalidad proporcionada por el botón *Export Spectra* de la pestaña *Response Spectrum* (Fig. 9.23). Al presionar este botón se abre una ventana con el cuadro diálogo *Export Response Spectra as '.txt' file* que permite asignar un nombre y ubicación especifica al archivo de texto.

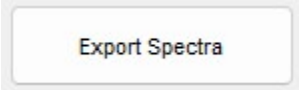

Figura 9.23.: Botón *Export Spectra* de la pestaña *Response Spectrum*

El archivo con los espectros de respuesta exportados cuentan con un encabezado descriptivo que indica la fecha de creación del archivo, tipo de registro (Synthetic Moonquake Response Spectra), nombre del archivo, razón de amortiguamiento, mínimo periodo, máximo periodo, número de periodos, magnitud de la aceleración gravitacional, nombre de las columnas y unidad de medida (*Period (s)*, *Displacement (g*s*s)*, *Velocity (g*s)*, *Acceleration (g)*, *Pseudo-Velocity (g*s)* y *Pseudo-Acceleration (g)*), conjunto de instrucciones para cargar el archivo en MATLAB y datos de los registros en seis columnas. Una parte del inicio de un archivo de *Synthetic Moonquake Response Spectra* se muestra en el cuadro de Cód. 9.13.

```
% Date: 28/February/2024-21:40:37
% Synthetic Moonquake Response Spectrum's
% File: Spect001.txt
% Structural Damping Ratio: 5.000 %
% Minimum Period: 0.010 s
% Maximum Period: 10.000 s
% Number of Periods: 100 -
% Gravitational Acceleration: 1.625 m/s/s
% First Column: Period (s)
% Second Column: Displacement (g*s*s)
% Third Column: Velocity (g*s)
% Fourth Column: Acceleration (g)
% Fifth Column: Pseudo-Velocity (g*s)
% Sixth Column: Pseudo-Acceleration (g)
% Matlab Loading Method:
% fileID = fopen('Spect001.txt');
% Data = cell2mat(textscan(fileID,'%f %f','headerlines',20));
% fclose(fileID);
```

```
19
20
21 0.010000     1.553475e-06     4.525456e-05     6.555663e-04     9.760771e-04
   ↪        6.132873e-01
22 0.010723     1.868718e-06     7.281014e-05     4.145625e-02     1.095016e-03
   ↪        6.416487e-01
23 0.011498     2.269645e-06     1.407785e-04     1.066917e-01     1.240314e-03
   ↪        6.778062e-01
```

Código 9.13: Parte inicial de un archivo *Synthetic Moonquake Response Spectra* exportado por la aplicación *Synthetic Moonquake Generator*

10. CONCLUSIONES

La metodología propuesta crea un marco de trabajo para el procesamiento, caracterización y generación de sismogramas artificiales para la Luna, con características compatibles a las presentadas por los shallow moonquakes registrados por los sensores de periodo largo (LP) del programa Apollo de disposición horizontal. Los resultados presentados pueden ser clasificados en tres categorías: (i) Procesamiento y convolución de los registros, (ii) Caracterización de los registros con ayuda de un algoritmo de optimización global de enjambres y (iii) Generación de acelerogramas. Esta metodología permite la generación de tres tipos básicos de sismogramas según las características observadas en los registros estudiados al clasificarlos en tres rangos de magnitud de momento M_w.

El procesamiento y convolución de los registros resulto en el diseño de un procedimiento y la implementación de un algoritmo que mediante la deconvolución regularizada por nivel de agua que permite el procesamiento semi-automatizado de los registros. Este procedimiento permitió obtener acelerogramas de los registros en unidades de desplazamiento, velocidad y aceleración, tomando en consideración la eliminación de los efectos instrumentales. Si bien la calibración de registros sísmicos del programa Apollo se ha realizado por otros autores, este trabajo es de particular importancia e interés para la comunidad científica debido a que presenta un procedimiento detallado para la calibración de los registro LP del programa Apollo.

La caracterización de los registros involucra la formulación de un modelo de ventana y filtro para los moonquakes tipo superficial. En este sentido, este trabajo es único debido a que se desarrolló un modelo propio basado en extensas pruebas y ensayos. Además, el uso de un algoritmo de enjambres para la carcterizacion del filtro Kanai–Tajimi y las ventanas envolventes temporales es pionero en su campo, permitiendo obtener ajustes de mejor calidad respecto a procedimientos de optimización convencionales. Este proceso de caracterización permitió obtener valores de parámetros y modelos que recrean con precisión los registros de los shallow moonquakes estudiados, sirviendo como base para la generación de los sismogramas sintéticos.

La generación de los registros sintéticos presenta tres tipos de acelerogramas modelo que, basados en dos modelos paramétricos, uno para la ventana envolvente

temporal, otro para filtro en frecuencia y un conjunto de valores medios y rangos sugeridos para los parámetros, permite generar acelerogramas con características compatibles con los de los shallow moonquakes observados. Adicionalmente, se ha desarrollado una aplicación (Synthetic Moonquake Generator) que automatiza el proceso y permite, mediante una interfaz gráfica sencilla, generar moonquakes sintéticos con relativa facilidad.

No obstante, es importante resaltar que este trabajo se encuentra limitado principalmente por la poca disponibilidad de registros sísmicos del programa Apollo con calidad suficiente como para atravesar todas las etapas del estudio. El conjunto de registros LP disponible es simplemente desafiante debido a la pobre o nula calidad de estos registros que en su mayoría son inutilizables. En este sentido el trabajo de Onodera (2024) que analizó la totalidad de los registros SP encontrando alrededor de 23000 nuevos eventos que incluyen nuevos shallow moonquake enriquece el catálogo de eventos disponible y proporciona nuevos datos para el procesamiento de estas señales. La metodología desarrollada puede fácilmente adaptarse al estudio de sismogramas de cualquier tipo y naturaleza, lo que hace este estudio particularmente interesante debido a la implementación de técnicas novedosas y su enfoque actualizado que puede ser aplicado tanto a la Luna como a la Tierra. Finalmente, es necesario registrar nuevos eventos sísmicos lunares que permitan tener datos de mejor calidad y en ventanas temporales y geográficas más amplias para poder mejorar y expandir futuros estudios de este tipo.

BIBLIOGRAFÍA

Alotta, G., Di Paola, M., y Pirrotta, A. (2014). Fractional Tajimi–Kanai model for simulating earthquake ground motion. *Bulletin of Earthquake Engineering*, *12*(6), 2495–2506. doi: 10.1007/s10518-014-9615-z

Alsep, passive seismic experiment array | national air and space museum. (2023, 01/17). https://airandspace.si.edu/collection-objects/alsep-passive-seismic-experiment-array/nasm_A19820511000.

Apollo 11 seismic experiment - moon: Nasa science. (2023, 01/17). https://moon.nasa.gov/resources/13/apollo-11-seismic-experiment/.

Benaroya, H. (2018). *Building habitats on the moon: Engineering approaches to lunar settlements* (1.ª ed.). Springer International Publishing.

Berger, E. (2021). *NASA's full Artemis plan revealed: 37 launches and a lunar outpost.* Descargado 9/14/2021, de https://arstechnica.com/science/2019/05/nasas-full-artemis-plan-revealed-37-launches-and-a-lunar-outpost/

Borchers, B., y Aster, R. (2013). *Time Series/Data Processing and Analysis: Notes on Deconvolution.* Descargado de http://www.ees.nmt.edu/outside/courses/GEOP505/Docs/deconv.pdf

Bulow, R., Johnson, C., y Shearer, P. (2005). New events discovered in the apollo lunar seismic data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *110*(E10).

Chopra, A. (2012). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4th ed. ed.). Upper Saddle River N.J.: Prentice Hall.

Clerc, M. (2010). *Particle swarm optimization.* ISTE.

Clough, R., y Penzien, J. (2003). *Dynamics of structures* (Third ed.). Computers and Structures inc.

Dhulipala, S. L. (2023). Seismological understanding of accelerogram amplitude scaling for engineers with implications to seismic risk analysis. *arXiv preprint arXiv:2305.05631*.

Duennebier, F., y Sutton, G. (1974). Thermal moonquakes. *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, *79*(29), 4351-4363. Descargado de https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JB079i029p04351 doi: https://doi.org/10.1029/JB079i029p04351

Fan, F., y Ahmadi, G. (1990). Nonstationary Kanai-Tajimi models for El Centro 1940 and Mexico City 1985 earthquakes. *Probabilistic Engineering Mechanics*, *5*(4), 171–181. doi: 10.1016/0266-8920(90)90018-f

Frohlich, C., y Nakamura, Y. (2009). The physical mechanisms of deep moonquakes and intermediate-depth earthquakes: How similar and how different? *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *173*(3), 365-374. Descargado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031920109000338 doi: https://doi.org/10.1016/j.pepi.2009.02.004

Gebhardt, C. (2017). The Moon, Mars, & around the Earth – Musk updates BFR architecture, plans. *NASA Space Flight*. Descargado 9/14/2021, de https://www.nasaspaceflight.com/2017/09/the-moon-mars-earth-musk-updates-bfr-plans/

Griva, I., Nash, S., y Sofer, A. (2009). *Linear and nonlinear optimization*. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Gubbins, D. (2012). *Time Series Analysis and Inverse Theory for Geophysicists*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511840302

Hamish. (2016, 01/16). https://www.hq.nasa.gov/alsj/HamishALSEP.html.

Horvath, P. (1979). *Analysis of Lunar Seismic Signals: Determination of Instrumental Parameters and Seismic Velocity Distributions* (Dissertation). Texas University, Dallas, Texas.

Jennings, P., Housner, G., y Tsai, N. (1968). *Simulated earthquake motions.* Pasadena, California. Descargado 9/19/2021, de https://resolver.caltech.edu/CaltechEERL:1968.EERL.1968.001

Jiménez-Builes, J. A., Arango-Sanchez, R. E., y Jiménez-Pinzón, L. D. (2016, dic.). Métodos de búsqueda usando los algoritmos de enjambre de partículas y genético. *Lámpsakos*, *1*(16), 52–60. doi: 10.21501/21454086.1901

Kanai, K. (1957). 210) Semi-empirical Formula for the Seismic Characteristics of Ground(Structure). *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, *57.1*(0), 281–284. doi: 10.3130/aijsaxx.57.1.0{\textunderscore}281

Kumar, P. S., Mohanty, R., Lakshmi, K. J. P., Raghukanth, S. T. G., Dabhu, A. C., Rajasekhar, R. P., y Menon, R. (2019). The seismically active lobate scarps and coseismic lunar boulder avalanches triggered by 3 january 1975 (mw 4.1) shallow moonquake. *Geophysical Research Letters*, *46*(14), 7972-7981. Descargado de https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019GL083580 doi: https://doi.org/10.1029/2019GL083580

Lin, Y. K., y Yong, Y. (1987). Evolutionary Kanai–Tajimi Earthquake Models. *Journal of Engineering Mechanics*, *113*(8), 1119–1137. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1987)113:8(1119)

Mogg, T. (2018). Prime delivery, straight from the moon? Bezos dreams of heavy industry in space. *Digital Trends*. Descargado 9/14/2021, de https://www.digitaltrends.com/cool-tech/jeff-bezos-reaffirms-plan-for-moon-colony/

Nakamura, Y. (1977). Hft events: Shallow moonquakes? *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *14*(3), 217–223.

Nakamura, Y. (1980, jan). Shallow moonquakes: How they compare with earthquakes. *Lunar and Planetary Science Conference Proceedings*, *3*, 1847-1853. Descargado de https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1980LPSC...11.1847N

Nakamura, Y. (2005). Farside deep moonquakes and deep interior of the Moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *110*(E1), 1-12. Descargado de https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004JE002332 doi: 10.1029/2004JE002332

Nakamura, Y., Dorman, J., Duennebier, F., Ewing, M., Lammlein, D., y Latham, G. (1974, jan). High-frequency lunar teleseismic events. *Lunar and Plane-*

tary Science Conference Proceedings, *3*, 2883-2890. Descargado de https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1974LPSC....5.2883N

Nakamura, Y., Latham, G., Dorman, H., y Harris, J. (1981). *Passive seismic experiment, long period event catalog, final version (1969 day 202 - 1977 day 273, alsep stations 11, 12, 13, 14, 15, and 16)* (Inf. Téc.). Austin, Texas: University of Texas Institute for Geophysics Technical Report No. 18 (originally published 19 June 1981, revised 2 October 2008), 2p plus appendices.

Nakamura, Y., Latham, G. V., y Dorman, H. J. (1982). Apollo lunar seismic experiment—final summary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *87*(S01), A117-A123. Descargado de https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JB087iS01p0A117 doi: https://doi.org/10.1029/JB087iS01p0A117

Nakamura, Y., Latham, G. V., Dorman, H. J., y Harris, J. (1981). *Passive seismic experiment, long period event catalog, final version (1969 day 202-1977 day 273, alsep stations 11, 12, 13, 14, 15, and 16)* (Inf. Téc.). -: Institute for Geophysics.

Nasa - nssdca - experiment - details. (s.f.). https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experiment/display.action?id=1969-099C-03. ((Accessed on 01/16/2023))

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (1969). *Apollo 11: preliminary science report*. Washington: Scientific and Technical Information Office.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (1970). *Apollo 12: preliminary science report*. Washington: Scientific and Technical Information Office.

Nolet, G., y Scherbaum, F. (2001). *Of Poles and Zeros* (Vol. 15). Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-1-4020-6861-4

Nunn, C., Garcia, R., Nakamura, Y., Marusiak, A., Kawamura, T., Sun, D., ... Zhu, P. (2020, julio). Lunar seismology: A data and instrumentation review. *Space Science Reviews*, *216*(5), 89.

Nunn, C., Nakamura, Y., Kedar, S., y Panning, M. P. (2022). A new archive of apollo's lunar seismic data. *The Planetary Science Journal*, *3*(9), 219.

Oberst, J. (1987). Unusually high stress drops associated with shallow moonquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *92*(B2), 1397-1405. Descargado de https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JB092iB02p01397 doi: 10.1029/JB092iB02p01397

Oberst, J., y Nakamura, Y. (1992). A Seismic Risk for the Lunar Base. En W. Mendell et al. (Eds.), *Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century* (p. 231-233). Descargado 9/14/2021, de https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1992lbsa.conf..231O

Onodera, K. (2024). New views of lunar seismicity brought by analysis of newly discovered moonquakes in apollo short-period seismic data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, *129*(7), e2023JE008153.

Oppenheim, A., Schafer, R., y Buck, J. (2010). *Discrete-Time Signal Processing* (Third ed.). Prentice-hall Englewood Cliffs.

Particle swarm optimisation. (2017, 12/17). https://medium.com/@iamterryclark/swarm-intelli-eb5e46eda0c3.

Patiño, C., Ruiz, S., Gomez, D., Cruz, A., Dyke, S. J., y Ramirez, J. (2024). Seismic assessment of a long-term lunar habitat. *Acta Astronautica*, *214*, 414-426. doi: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.11.004

Reddy, G., Muruva, H., y Verma, A. (Eds.). (2019). *Textbook of seismic design*. Springer Singapore. doi: 10.1007/978-981-13-3176-3

Rodríguez-Pascua, M. A., Benavente Escobar, C., Rosell Guevara, L., Grützner, C., Audin, L., Walker, R., ... Aguirre, E. (2020, 01 de Aug). Did earthquakes strike machu picchu? *Journal of Seismology*, *24*(4), 883-895. Descargado de https://doi.org/10.1007/s10950-019-09877-4 doi: 10.1007/s10950-019-09877-4

Ruiz, S., Cruz, A., Gomez, D., Dyke, S. J., y Ramirez, J. (2022). Preliminary approach to assess the seismic hazard on a lunar site. *Icarus*, *383*, 115056. doi: https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115056

Tajimi, H. (1960). A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure during an Earthquake. En *Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering* (pp. 781–798). Descargado 9/14/2021, de https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/vol.2_session2_781.pdf

Thevenot, A. (2022, Feb). *Particle swarm optimization visually explained.* Towards Data Science. Descargado de https://towardsdatascience.com/particle-swarm-optimization-visually-explained-46289eeb2e14

Watters, T., Robinson, M., Beyer, R., Banks, M., Bell, J., Pritchard, M., ... Williams, N. R. (2010). Evidence of Recent Thrust Faulting on the Moon Revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. *Science*, *329*(5994), 936-940. Descargado de https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1189590 doi: 10.1126/science.1189590

Watters, T., Weber, R., Collins, G., Howley, I., Schmerr, N., y Johnson, C. (2019). Shallow seismic activity and young thrust faults on the Moon. *Nature Geoscience*, *12*, 411–417. doi: 10.1038/s41561-019-0362-2

Williams, N., Bell, J., Watters, T., Banks, M., Daud, K., y French, R. (2019). Evidence for recent and ancient faulting at Mare Frigoris and implications for lunar tectonic evolution. *Icarus*, *326*(March), 151–161. doi: 10.1016/j.icarus.2019.03.002

Yamada, R. (2005). The Apollo Seismometer Responses. *DARTS*.