

CONVOCATORIA INTERNA 2019

Metodología para la caracterización de la amenaza
sísmica, generación de sismos sintéticos y espectros
de diseño para la Luna

Daniel Gómez
Alejandro Cruz

Universidad del Valle
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

12 de septiembre de 2022

Resumen

La creación de viviendas seguras y confortables es una de las actividades más antiguas de la humanidad. Milenios de experimentación y planificación han llevado a la creación y el mantenimiento de hábitats en la Tierra a un alto grado de sofisticación. Sin embargo, la humanidad se enfrenta ahora a nuevos desafíos a medida que comenzamos a avanzar más allá de la superficie relativamente benigna de la Tierra y al Espacio. Más allá de la protección de la atmósfera de la Tierra, los futuros exploradores espaciales y colonos se enfrentan a nuevos desafíos derivados de la falta de presión del aire, el oxígeno, las fluctuaciones de la temperatura y amenazas como los impactos de meteoritos, las actividades sísmicas y la radiación intensa de partículas. Contrarrestar estos desafíos para proporcionar condiciones habitables en el espacio requerirá las aplicaciones más elaboradas de ingeniería y tecnología.

La necesidad del diseño de estructuras en asentamientos extraterrestres humanos sostenibles, está llevando a caracterizar los diferentes tipos de amenazas a los que se verán expuestas las edificaciones extraterrestres. Específicamente para el caso de la Luna, se tienen diferentes amenazas que deben ser cuantificadas para obtener diseños seguros y resilientes en un ambiente extremadamente hostil. Una de estas amenazas es la actividad sísmica lunar, la cual fue registrada por la red sísmica instalada por las misiones Apollo. Estas estaciones funcionaron durante ocho años, registrando mas de 12500 eventos sísmicos, algunos con magnitud de Richter mayor a 5. Este estado sísmico muestra la frecuente actividad de los movimientos del suelo lunar, resaltando la necesidad de una caracterización de la amenaza para ser empleada en el diseño sísmico de asentamientos humanos.

Este proyecto de investigación tiene como objetivo principal cuantificar esta amenaza sísmica en términos de sus características sismogénicas para generar acelerogramas artificiales probables para la construcción de espectros de diseño para la Luna. Para lograr lo anterior se pretende: 1) Generar y procesar los registros de aceleración adquiridos por el programa Apollo para su posterior caracterización y clasificación. 2) Proponer una metodología para la generación de sismos sintéticos que conserven las características en tiempo y frecuencia de los originales. 3) Proponer espectros de diseño que puedan ser utilizados en el análisis y diseño de edificaciones bajo tierra y en la superficie de la Luna. Este estudio, y los que se generen a partir de él, servirán de base para que las agencias espaciales y compañías espaciales privadas usen e implementen los acelerogramas y espectros propuestos en los diseños de las diferentes edificaciones en la Luna.

Palabras clave: Hábitats resilientes en la Luna, Amenaza sísmica lunar, Filtro Kanai-Tajimi, Acelerogramas sintéticos, Espectros de diseño.

ÍNDICE

1	Descripción y planteamiento del problema	4
2	Marco teórico y Estado del Arte	5
3	Objetivos	7
4	Metodología propuesta	8
5	Impactos esperados a partir del uso de los resultados	9
6	Impacto Ambiental del proyecto	10
7	Cronograma de actividades	11
8	Presupuesto	11
9	Disposiciones Vigentes	11
10	Productos esperados	12
11	Consideraciones adicionales	12

1. DESCRIPCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El diseño de asentamientos humanos extraterrestres seguros y sostenibles, representa un gran desafío científico y tecnológico para la humanidad. Futuros hábitats permanentes en la Luna y Marte pueden facilitar la exploración del espacio al servir como un puesto de avanzada para misiones tripuladas a otros planetas [17]. En 2015, la NASA lanzó su plan para establecer asentamientos permanentes expresando: *“Buscamos la capacidad para que las personas trabajen, aprendan, operen y vivan de manera sostenible más allá de la Tierra por largos períodos de tiempo. Los esfuerzos realizados hoy y en la próxima década sentarán las bases para una presencia sostenible e independiente de la Tierra en el espacio profundo.”* [10, 13].

La seguridad y la capacidad de recuperación de esos hábitats es la principal preocupación debido a las peligrosas condiciones existentes como la fluctuación de la temperatura, la radiación, la actividad sísmica y los impactos de meteoritos. Existe un interés creciente por parte de agencias espaciales como la NASA, la Agencia de Exploración Japonesa (JAXA), la Agencia Espacial Europea (ESA), y compañías privadas como SpaceX, Boeing, Blue Origin, entre otras, en establecer asentamientos humanos permanentes fuera de la Tierra, sin embargo, incluso una inspección superficial de las propuestas muestra carencias en su análisis y diseño conceptual.

Para la Luna, por ejemplo, es muy poco lo que se sabe acerca de su sismicidad. La red sísmica lunar conformada por cuatro estaciones fue establecida durante las misiones del programa Apollo desde 1969 hasta 1972, operando hasta el 30 de septiembre de 1977, cuando se suspendió la recepción de los datos sísmicos. Los datos se recopilaron de forma continua durante ocho años y tardaron varios años más en procesarse. Después del procesamiento de estos datos se identificaron alrededor de 12500 registros sísmicos clasificados en cuatro tipos distintos de fuentes sismogénicas naturales: profundos, superficiales, térmicos y causados por impactos de meteoritos [12, 9]. Esto refleja el estado dinámico del interior de la Luna resaltando los peligros de los movimientos del suelo en cualquier estructura habitable. Por lo tanto, una caracterización de la amenaza sísmica lunar es necesaria para el diseño sísmico de asentamientos humanos para corto y largo plazo.

La utilización de acelerogramas para el análisis de la respuesta estructural se ha convertido en una herramienta obligada en el diseño sísmico. Sin embargo, aun en la Tierra no hay disponibilidad suficiente de registros sísmicos para todos los sitios y condiciones de interés. Por lo tanto, existe una necesidad de desarrollar métodos para la generación de acelerogramas sintéticos que conserven las características observadas en la sismicidad histórica. Infortunadamente, en la Luna no se ha realizado una caracterización de la sismicidad con fines de establecer movimientos de diseño en términos de acelerogramas y espectros.

En esta investigación se pretende desarrollar una metodología para la generación de acelerogramas artificiales basados en los tipos y las características propias de la sismicidad lunar. Con base en los posibles sismos sintéticos lunares se propondrán espectros de diseño que podrán ser utilizados para obtener diferentes niveles de desempeño estructural. Considerando

la necesidad del diseño de estructuras en asentamientos extraterrestres humanos sostenibles bajo tierra o en la superficie lunar, y teniendo en cuenta la limitación de sismos históricos, se desea responder la siguiente pregunta:

¿Cómo desarrollar una metodología para generar los sismos probables para la construcción de espectros de diseño para la Luna?

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

El diseño, construcción y operación de viviendas seguras y confortables es una de las actividades más antiguas de la humanidad. Milenios de experimentación y planificación han llevado a la creación y el mantenimiento de comunidades en la Tierra a un alto grado de sofisticación. Sin embargo, la humanidad se enfrenta ahora a nuevos desafíos a medida que comenzamos a avanzar más allá de la superficie relativamente benigna de la Tierra [4]. Los futuros exploradores espaciales se enfrentarán a nuevas amenazas en ambientes extremos y hostiles. Contrarrestar estos desafíos para proporcionar condiciones habitables en el espacio requerirá las aplicaciones mas elaboradas de ingeniería y tecnología.

Específicamente en la ingeniería geotécnica y estructural, hay mucha experiencia adquirida en términos de enfoques para diseñar y construir estructuras que cumplan con niveles de resistencia a amenazas extremas tales como huracanes, sismos, tornados, etc. Las lecciones aprendidas a partir de desastres anteriores han motivado el desarrollo de metodologías para el diseño basado en desempeño y resiliencia, no sólo de estructuras sino también de comunidades. Por lo tanto, es crucial integrar y adaptar esta vasta experiencia para enfrentar nuevos desafíos fuera de la protección de la atmósfera de la tierra.

Considerando la necesidad del diseño de estructuras civiles en asentamientos extraterrestres sostenibles, es necesario caracterizar los diferentes tipos de amenazas. Para el caso de la Luna, se tienen diferentes amenazas que deben ser cuantificadas para obtener diseños seguros y resilientes en un ambiente extremadamente hostil. Una de estas amenazas es la actividad sísmica lunar. Fue registrada por las estaciones del programa Apollo en las misiones 12, 14, 15 y 16, y cuyos datos fueron enviados a la Tierra hasta que fueron apagadas en 1977. Los cuatro sismómetros de la red sísmica del programa Apollo constan de tres sensores de periodo largo (LP) alineados ortogonalmente para medir una componente vertical (LP_z) y dos componentes horizontales (LP_x , LP_y) del movimiento de la superficie. El sismómetro también incluye un sensor de periodo corto (SP) sensible al movimiento vertical a frecuencias más altas. Estos sensores detectaron la actividad sísmica lunar caracterizada en cuatro tipos de movimientos del suelo. 1) Sismos profundos: el tipo más abundante con más de 7000 eventos reconocidos que se originan desde 700 hasta 1200 km de profundidad [11]. Estos eventos de pequeña magnitud (menor a 3) están fuertemente asociados con la fuerza de atracción entre la Luna y la Tierra, y se originan en ubicaciones específicas (nidos) [19]. Hasta la fecha, se han identificado 318 nidos. 2) Sismos térmicos: mucho más pequeños en magnitud que los sismos profundos. Los eventos registrados se originan en muchos lugares aislados dentro de

unos pocos kilómetros de cada estación sísmica Apollo, ocurriendo a intervalos mensuales regulares. La actividad más alta ocurrió dos días después de la salida del sol, probablemente provocada por tensiones termoelásticas en la superficie lunar [19]. 3) Sismos superficiales: el tipo más fuerte, con los 3 más grandes registrados con una magnitud mayor a 5 y profundidades focales estimadas entre 50-200 km [5]. 4) Impactos de meteoritos: estos sismos ocurren cuando parte de la energía del impacto de un meteorito se transforma en ondas sísmicas. Entre 1969 y 1977 se registraron más de 1700 eventos que representaron masas de meteoritos de 0.1 a 100 kg [14].

Dos tipos de sismos lunares son potencialmente peligrosos para un asentamiento humano a corto y largo plazo: los sismos superficiales y los causados por los impactos de meteoritos. Sólo se registraron 28 sismos superficiales en 8 años, pero estos contienen mayor energía a altas frecuencias que los sismos terrestres de energía comparable [1]. Algunos de estos sismos superficiales llegaron a tener magnitud de 5 en la escala de Richter, lo que es suficiente para causar daño estructural moderado (en una escala terrestre). Sin embargo, el efecto de un terremoto de magnitud mayor a 5 en una base lunar podría ser catastrófico. En un hábitat o estructura lunar se debe garantizar una presión interna por lo que la presencia de grietas en los elementos estructurales es inadmisibles. Además, el tren de ondas sísmicas en la Luna está menos atenuado y más disperso que en la Tierra. Por lo tanto, los sismogramas lunares son muy largos (pueden durar más de dos horas), en comparación con los de la Tierra (Figura 2.1) por lo que pueden llegar a generar incomodidad en usuarios, fatiga estructural y hasta el colapso.

Esta sismicidad lunar está activa y debe tenerse en cuenta en el diseño estructural. Sin embargo, no hay suficiente disponibilidad de la sismicidad histórica y la poca información que hay no ha sido tratada con fines para el diseño sísmico. Es por esto que una metodología para la generación de sismos artificiales debe ser propuesta para el futuro análisis, diseño y construcción de edificios, viviendas, laboratorios, etc. en asentamientos lunares. Es así como se hace necesario realizar un estudio para definir los diferentes tipos de acelerogramas que representan las condiciones particulares de la sismicidad lunar.

Un modelo generalizado para la generación de acelerogramas sintéticos no estacionarios es el filtro Kanai-Tajimi [8, 16] el cual es ampliamente utilizado para describir y simular registros de movimiento del suelo en aceleración [18, 15, 6, 7]. El registro de aceleraciones se obtiene al filtrar una señal estacionaria de ruido blanco y posteriormente convertirla en un proceso no estacionario al multiplicarla por una función en el dominio del tiempo [2]. El filtro Kanai-Tajimi requiere la estimación de diferentes parámetros que dependen de las características del sitio y el contenido frecuencial esperado del acelerograma. Para la Luna estos parámetros serán obtenidos usando la sismicidad histórica existente junto con algoritmos de optimización global para el ajuste tanto en el dominio del tiempo como de frecuencia. El algoritmo de optimización capturará con precisión las características no estacionarias de los registros obtenidos por las estaciones sísmicas del programa Apollo. Posteriormente, las propiedades de las curvas de respuesta espectral serán obtenidas a partir de los sismos artificiales de diseño.

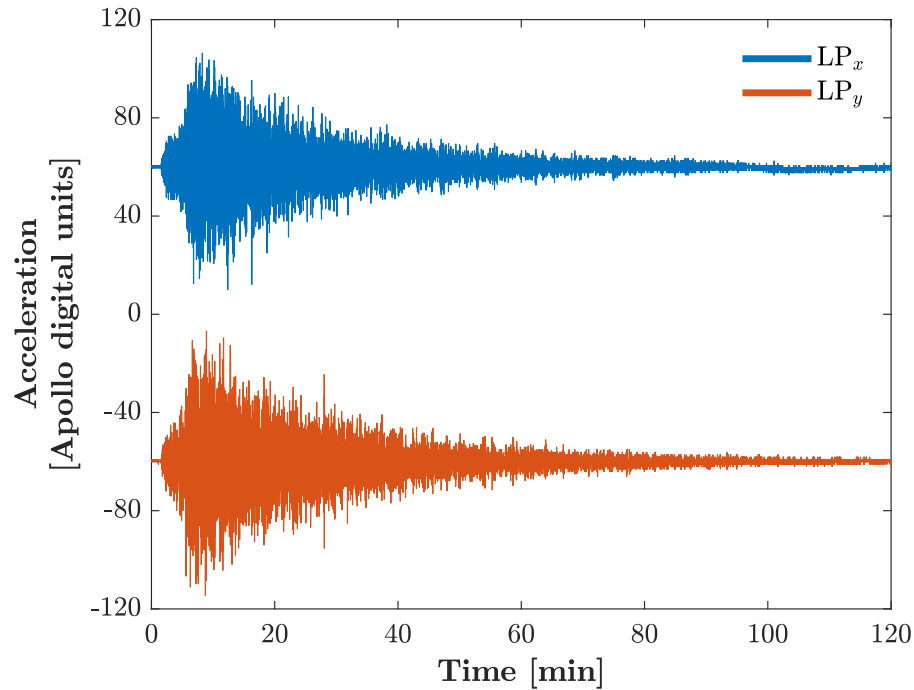


Figura 2.1: Componentes X y Y de un acelerograma representativo de un sismo lunar superficial. (Estación 12. Fecha: Mar-13-1973, hora:08:00) [3]

3. OBJETIVOS

El principal objetivo de este estudio es el de proponer una metodología para la generación de acelerogramas artificiales basados en los tipos y las características propias de la sismicidad lunar. Además, con base en los posibles sismos sintéticos lunares se propondrán espectros de diseño que podrán ser utilizados para obtener diferentes niveles de desempeño estructural. Los objetivos específicos son:

- Caracterizar la sismicidad histórica en la Luna con base en la información obtenida por los sismómetros del programa Apollo desde 1969 hasta 1977.
- Generar acelerogramas sintéticos de diseño que guarden armonía con las características y tipos de las fuentes sísmicas de la Luna.
- Construir espectros de diseño compatibles con los sismos probables para la Luna.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

Para el desarrollo de la presente investigación se dividió la metodología en 4 fases: (i) caracterización de la sismicidad histórica, (ii) generación de acelerogramas de diseño sintéticos, (iii) desarrollo de los espectros de diseño para diferentes niveles de desempeño sísmico y (iv) conclusiones y socialización. A su vez, cada fase metodológica contiene una serie de actividades, las cuales en conjunto darán cumplimiento a los objetivos específicos y al objetivo general de la propuesta.

1. Fase de caracterización de la sismicidad histórica:

La recopilación de bases de datos de registros sísmicos es esencial para la caracterización de las fuentes de amenaza sísmica o fuentes sismogénicas a la que está expuesta una zona en particular. Los registros sísmicos proporcionan información de las fuentes en función de los posibles sismos generados en éstas, de acuerdo con parámetros de sismicidad como: rangos de magnitudes, contenido frecuencial, profundidad del evento, tipo de sismo, frecuencia de ocurrencia, aceleración máxima, etc. Con base en esta información se puede proponer para cada fuente sismológica posibles sismos de diseño que tengan incidencia en la evaluación de la amenaza en una zona en particular. Los sismos de diseño deben guardar armonía con los parámetros de sismicidad identificados en cada fuente sismogénica, los cuales en ocasiones son registrados en la zona de estudio o en zonas con fuentes sismogénicas similares. Sin embargo, en sitios con escasez de información de registros sísmicos en donde no se tenga evidencia de sismos de diseño, es común que se trabaje con sismos sintéticos, garantizando que las características de las fuentes sísmicas se conserven, tal es el caso de la Luna.

En esta fase se propone categorizar la base de datos recopilada durante las misiones del programa Apollo desde 1969 hasta 1977 [3], de acuerdo con los siguientes parámetros de sismicidad, considerando específicamente los sismos de las fuentes superficiales y los producidos por el impacto de meteoritos.

- Magnitud
- Profundidad
- Aceleración/velocidad y desplazamiento máximo

Producto: Base de datos con los registros sísmicos característicos de la Luna clasificados según el tipo y sus parámetros de sismicidad.

2. Fase de generación de acelerogramas de diseño sintéticos:

Con las características de los eventos sísmicos analizados se desarrollará una metodología para la generación de acelerogramas sintéticos que guarden armonía con los parámetros de sismicidad identificados en cada fuente sismogénica. En este sentido se propone utilizar un modelo modificado del filtro Kanai-Tajimi para la generación de acelerogramas sintéticos no estacionarios.

Producto: Software para la generación de sismos sintéticos y una base de datos con ace-

lerogramas probables de diseño.

3. **Fase de desarrollo de los espectros de diseño para diferentes niveles de desempeño sísmico:**

Usando la sismicidad histórica lunar y los acelerogramas artificiales propuestos se pondrán espectros de diseño probables para diferentes niveles de desempeño sísmico.

Producto: Diferentes espectros de diseño según nivel de desempeño.

4. **Fase de conclusiones y socialización:**

La base de datos con la sismicidad histórica, el software para la generación de los acelerogramas sintéticos y los espectros de diseños propuestos serán divulgados mediante la elaboración de un artículo Q2 y una ponencia nacional.

5. IMPACTOS ESPERADOS A PARTIR DEL USO DE LOS RESULTADOS

Los impactos esperados a partir del uso de los resultados de este proyecto están detallados en la Tabla 5.1:

Cuadro 5.1: Impactos esperados a partir del uso de los resultados

Impacto esperado	Plazo (años) después de finalizado el proyecto: corto (1-4), mediano (5-9), largo (10 o más)	Indicador verificable	Supuestos
Impacto sobre la caracterización de la amenaza sísmica en la Luna.	5	Se construirá una base de datos robusta que permita a los investigadores tener un mayor conocimiento sobre la dinámica Lunar.	Se analizarán registros sísmicos con Magnitud superior a 2 en la escala de Richter, según escala terrestre.
Impacto en la zonificación sísmica en la Luna.	5	Se caracterizarán las diferentes fuentes sismogénicas en la Luna, en función de la geología y geomorfología.	Los sismos en la Luna, de acuerdo con su fuente sismogénica, tendrán coincidencia en los parámetros sísmicos.
Impactos de ciencia, tecnología e innovación.	4	Aumento de iniciativa investigativas en torno a la caracterización de otras amenazas en ambientes extraterrestres habitables.	La Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle contará con amplio conocimiento en la caracterización de este tipo de amenazas.
Impacto sobre la competitividad académica de la Universidad del Valle.	2	Crecimiento académico, actualización del conocimiento y aumento de la competitividad.	Se formarán estudiantes a nivel de pregrado y postgrado en ingeniería aplicada a la línea de Sismología Geotecnia y Estructuras. Además, se contribuirá al fortalecimiento del programa académico de Ing. Civil, ya que los contenidos científicos desarrollados en el proyecto serán adheridos a los contenidos de los cursos de: Geología, Mecánica de Suelos, e Ingeniería Sísmica.
Impacto en el fortalecimiento interinstitucional entre Purdue University (USA) y Universidad del Valle.	2	Artículos académicos en coautoría con profesores de Purdue University y Universidad del Valle.	Los profesores compartirán información y conocimiento sobre los estudios relacionados con el análisis y diseño de hábitats extraterrestres resilientes.

6. IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO

Teniendo en cuenta que la presente investigación se centra principalmente en la caracterización de la amenaza sísmica de la Luna, el efecto negativo en el medio ambiente durante el desarrollo de este será nulo. Sin embargo, será un referente para trabajos posteriores relacio-

nados en el uso del suelo para el diseño de estructuras en ambientes estructuras en asentamientos extraterrestres humanos sostenibles a largo plazo.

7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Cuadro 7.1: Cronograma de actividades del proyecto de investigación

Actividad	Mes					
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12
1. Revisión de literatura	X	X	X	X	X	
2. Caracterización de la sismicidad histórica	X	X				
3. Generación de acelerogramas de diseño sintéticos		X	X	X		
4. Espectros de diseño para diferentes niveles de desempeño sísmico			X	X	X	
5. Entrega informe final y divulgación de la información					X	X

8. PRESUPUESTO

Cuadro 8.1: Presupuesto del proyecto

RUBRO	CONTRAPART. EN ESPECIE		CONTRAPART. EN ESPECIE		TOPE MÁX. CON RESPECTO AL MONTO SOLICITADO	PRESUP. SOLICITADO A LA CONVOCATORIA	TOTAL
	DESCRIPCIÓN	MONTO	DESCRIPCIÓN	MONTO			
Equipo de Cómputo					15953600	12566400	12566400
Equipo de Laboratorio					15953600	0	0
Otros equipos					15953600	0	0
Materiales y suministros para el desarrollo del proyecto					9971000	0	0
Software	Matlab	2600000			9971000	0	2600000
Publicaciones					3988400	0	0
Mantenimiento					3988400	0	0
Prestación de servicios						0	
Monitorias - Asist. de invest.					13959400	5985600	5985600
Salidas de Campo					9971000	0	
Viajes					5982600	1390000	1390000
TOTALES PROYECTO						19942000	22542000

9. DISPOSICIONES VIGENTES

Este proyecto no involucra trabajo con humanos. La información sobre la sismicidad histórica de la Luna está disponible en artículos y páginas de internet. Sólo se requiere el análisis e interpretación de los registros de aceleraciones existentes, por lo cual sólo se requiere el uso de computadores.

10. PRODUCTOS ESPERADOS

Los productos esperados de este proyecto están detallados en la Tabla 10.1:

Cuadro 10.1: Productos esperados

Tipo de productos	Cantidad	
Productos de nuevos conocimientos		
Artículos	1 artículo en revista Q2 aceptado para publicación	
Libros de investigación	0	
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados	No. de trabajos terminados
Pregrado	2	0
Maestría	0	0
Doctorado	0	0
Productos de divulgación		
Publicaciones en revistas no indexadas o sus equivalentes.	0	
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
	1 ponencia en un evento académico con memoria	0

11. CONSIDERACIONES ADICIONALES

Daniel Gomez Pizano: Doctor en Ingeniería Estructural. Profesor Asociado de la Universidad del Valle. Su dedicación será de 8 horas a la semana. Se desempeñará como investigador principal. Su función será la coordinación científica y técnica de las actividades relacionadas con la generación de registros sintéticos y el análisis de los registros sísmicos.

Alejandro Cruz: Magíster en Ingeniería Civil. Profesor Asistente de la Universidad del Valle e Investigador del Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Eólica, Geotécnica y Estructural (G-7). Su dedicación será de 2 horas a la semana. Se desempeñará como Co- Investigador, apoyando en el análisis de los registros sísmicos en la Luna.

Dos estudiantes de pregrado: Su dedicación será de 10 horas a la semana cada uno. Se desempeñarán como personal de apoyo en las actividades relacionadas con la generación de la base de datos y la generación de acelerogramas de diseño.

Shirley Dyke (Purdue University): Doctora en Ingeniería Aeroespacial. Directora del Centro de Investigación en Estructuras Extraterrestres Resilientes el cual es financiado por la NASA (ver carta adjunta).

July 15, 2019

Daniel Gomez
Universidad del Valle
Calle 13 No. 100 - 00
Cali, Colombia

Subject: Letter of support for "Seismic hazard characterization and generation of synthetic ground motions for the Moon:

Dear Dr. Gomez,

The creation of safe and comfortable habitations is one of humankind's oldest activities. Millennia of experimentation and planning have brought the creation and maintenance of habitats on Earth to a high degree of sophistication. However, humankind is now faced with new challenges as we begin to move beyond the Earth's relatively benign surface and out into Space. Beyond the protection of Earth's atmosphere, future space explorers and colonists face new challenges stemming from the lack of air pressure, oxygen, wild temperature fluctuations and hazards such as *meteoroid impacts*, *seismic activities* and intense particle radiation. Countering these challenges to provide livable conditions in Space will require the highest applications of engineering and technology.

I would like to convey my commitment for Purdue University's Resilient ExtraTerrestrial Habitats research team to collaborate with the Universidad del Valle on your project entitled "**Seismic hazard characterization and generation of synthetic ground motions for the Moon**". As the director of the newly established RETHi research institute, I believe that this proposal provides a unique opportunity to team together on a topic that combines our strengths in the areas of extreme hazard quantification and risk mitigation to support the design of resilient deep space habitats. Together our partnership will enable the comprehensive and effective development and evaluation of the methodology you are proposing to generate maximum probable moonquakes compatible with design response spectra. These synthesized moonquakes will be useful for any future researchers that aim to examine the vulnerability of Moon structures, temporary or permanent, to seismic activity. As you know, recording seismic activity was a big part of the Apollo missions in the 1969-1972 timeframe, and since then, little progress has been made. Discussions of anticipated future missions to the Moon, however, have reawakened these needs.

As the U.S. Collaborator in support of your proposal to the Universidad del Valle, I look forward to sharing information and learning from one another. Your proposed project is closely related to both the 2017 New Horizons project funded by the Purdue Provost Office and our newly established NASA STRI Grant, for which I am the PI, entitled "Resilient ExtraTerrestrial Habitats Institute." The tasks within this project will harness promising next-generation technological advances to overcome the grand challenge of deep space habitation.

I look forward to working with you and your colleagues again. Our efforts in the Spring of 2016 to use remote shake table experiments at Purdue in classroom lessons at UniValle were hopefully quite beneficial for your students. And as you know, I first visited the Universidad del Valle in 1997, and then again during 2000-2003 when we successfully worked together on the structural monitoring of bridges using the instrumented cable-stayed bridge in Pereira. I will also be visiting Colombia again in support of the partnership that Purdue University has established with Colciencias to support PhD students. We can leverage these successful opportunities throughout this important effort.

I look forward to collaborating with you on this challenging project.

Sincerely,



Shirley Dyke, PhD
Professor of Mechanical and Civil Engineering
Director, Intelligent Infrastructure Systems Laboratory

REFERENCIAS

- [1] H. Benaroya. *Building Habitats on the Moon: Engineering Approaches to Lunar Settlements*. Springer, 2018.
- [2] R. Clough and J. Penzien. *of Structures*. 2nd York, 1992.
- [3] Data ARchives and Transmission System (DARTS). DARTS Labs services are experimental. , 2019. (Retrieved from: <http://www.darts.isas.jaxa.jp/planet/seismology/apollo/app/>. Online; accessed July 8 2019).
- [4] S. Dyke, A. Bobet, J. Ramirez, H. Melosh, D. Gomez, A. Maghareh, A. Modiriasari, and A. Theinat. Resilient extraterrestrial habitat engineering. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 49, 2018.
- [5] J. Gagnepain-Beyneix, P. Lognonné, H. Chenet, D. Lombardi, and T. Spohn. A seismic model of the lunar mantle and constraints on temperature and mineralogy. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 159(3-4):140–166, 2006.
- [6] G. Ghodrati Amiri, A. Bagheri, and M. Fadavi. New method for generation of artificial ground motion by a nonstationary Kanai-Tajimi model and wavelet transform. *Structural Engineering and Mechanics*, 26(6):709–723, 2007.
- [7] F. Jian, Z. Yanping, and L. Xiaohong. Establishment of a time-varying modified kanai-tajimi non stationary stochastic model of seismic records based on the S-transform. *Journal of Earthquake Engineering*, 18(6):876–890, 2014.
- [8] K. Kanai. Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground. *Bulletin of the earthquake research institute*, 35:309–325, 1957.
- [9] P. Lognonné and B. Mosser. Planetary seismology. *Surveys in Geophysics*, 14(3):239–302, 1993.
- [10] A. Maghareh, D. Gomez, S. Dyke, A. Bobet, J. Ramirez, H. Melosh, A. Modiriasari, and A. Theinat. Resilience for permanent extraterrestrial habitats. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 49, 2018.
- [11] Y. Nakamura. Farside deep moonquakes and deep interior of the moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110(E1), 2005.
- [12] Y. Nakamura, G. V. Latham, and H. J. Dorman. Apollo Lunar Seismic Experiment—Final summary. *Journal of Geophysical Research*, 87(S01):A117, 1982.
- [13] National Aeronautics and Space Administration (NASA). NASA’s Journey to Mars, 2015. (Retrieved from: <https://www.nasa.gov/content/nasas-journey-to-mars>. Online; accessed July 8 2019).
- [14] C. Neal. The importance of establishing a global lunar seismic network. In *Space Resources Roundtable VII: LEAG Conference on Lunar Exploration*, volume 1287, page 70, 2005.

- [15] F. R. Rofooei, A. Mobarake, and G. Ahmadi. Generation of artificial earthquake records with a nonstationary Kanai-Tajimi model. *Engineering Structures*, 23(7):827–837, 2001.
- [16] H. Tajimi. A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake. In *Proc. 2nd World Conf. Earthq. Eng.*, pages 781–797, 1960.
- [17] A. Theinat, A. Modiriasari, A. Bobet, H. Melosh, S. Dyke, J. Ramirez, A. Maghareh, and D. Gomez. Lunar lava tubes: morphology to structural stability. *Icarus*, (Submitted.).
- [18] H. Thráinsson, A. S. Kiremidjian, and S. R. Winterstein. Modeling of earthquake ground motion in the frequency domain. *Engineering*, (134), 2000.
- [19] D. Zhao, J. Lei, and L. Liu. Seismic tomography of the Moon. *Chinese Science Bulletin*, 53(24):3897–3907, 2008.