

CONVOCATORIA INTERNA 2021

DISEÑO POR DESEMPEÑO DE UN HÁBITAT
LUNAR SOMETIDO A CARGAS SÍSMICAS E
IMPACTOS DE METEORITOS

Daniel Gómez
Alejandro Cruz
Sandra Villamizar
Albert Ortiz
Jose Jaime García

Universidad del Valle
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

12 de septiembre de 2022

Resumen

El creciente interés de la humanidad por la colonización de cuerpos extra-terrestres ha propuesto un reto para los ingenieros al tener que adaptar sus conocimientos en la concepción de diseños de hábitats económicos, confortables y seguros. La Luna por ser el cuerpo celeste más cercano a la Tierra se ha convertido en el primer candidato a ser colonizado por el hombre. Futuros hábitats permanentes en la Luna facilitarían la exploración del espacio al servir como punto transitorio para misiones tripuladas a otros planetas. La concepción de cualquier diseño requiere la identificación y posterior cuantificación de las solicitaciones a las cuales va a estar expuesta la estructura durante su vida útil. Una estructura construida sobre la superficie lunar va a estar afectada por múltiples amenazas naturales debido a la falta de protección atmosférica y al entorno altamente hostil, entre las que se encuentran los sismos lunares (moonquakes) y los impactos de meteoritos.

Existen en la literatura numerosos estudios que involucran diferentes conceptos estructurales acerca del diseño de hábitats extraterrestres. En la concepción de la mayoría de estos diseños estructurales se han considerado las cargas generadas por el peso propio de los elementos y la presión interna a la que se debe someter la estructura para garantizar la vida de las personas. Por el contrario, el número de estudios que han considerado cargas generadas por moonquakes e impactos de meteoritos es muy limitado. De igual manera se ha dicho que el diseño de estructuras lunares debe considerar las incertidumbres inherentes a las cargas producidas por diferentes amenazas lunares y la respuesta de las estructuras a tales cargas. Para lograr esto, se ha requerido de la utilización de metodologías de diseño basadas en riesgo que permitan determinar, de forma explícita, el desempeño de las estructuras. Por este motivo en los últimos años se ha propuesto la implementación de la metodología de diseño basada en desempeño en la concepción de estructuras lunares. Sin embargo, esta filosofía de diseño ha sido aplicada particularmente al diseño de plataformas de aterrizaje considerando únicamente impactos de meteoritos.

Esta investigación tiene como objetivo principal realizar el análisis y diseño por desempeño de un hábitat lunar sometido a cargas sísmicas e impactos de meteoritos. El presente estudio se propone como una continuación del proyecto de investigación denominado **Metodología para la caracterización de la amenaza sísmica, generación de sismos sintéticos y espectros de diseño para la Luna**, desarrollado en el marco de la convocatoria interna 2019 de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle. Los resultados obtenidos en esta investigación servirán como punto de partida para el diseño por desempeño sísmico del hábitat lunar en esta nueva propuesta. En este estudio el grupo de trabajo contará de nuevo con la asesoría de la profesora Shirley J. Dyke, quien es la directora del Instituto de Investigación en Estructuras Extraterrestres Resilientes en Purdue University, el cual es un macroproyecto financiado por la NASA (ver carta de la alianza).

Palabras clave: Diseño basado en desempeño, Moonquakes, Impacto de meteoritos, Hábitat lunar.

ÍNDICE

1 Descripción y planteamiento del problema	5
2 Marco teórico y estado del arte	6
3 Objetivos	9
4 Metodología propuesta	10
5 Impacto esperado a partir del uso de los resultados	12
6 Impacto ambiental del proyecto	13
7 Cronograma de actividades	13
8 Presupuesto	14
9 Disposiciones vigentes	14
10 Productos esperados	14
11 Consideraciones adicionales	15

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 puntos transitorios de misiones tripuladas a otros planetas [42]. 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”* [22, 34].

La seguridad y resiliencia de las estructuras lunares es la principal preocupación debido a las peligrosas condiciones existentes como la fluctuación extrema de 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 el análisis y diseño conceptual desde el punto de vista de la ingeniería estructural.

Durante las misiones Apollo se instaló una red sísmica que permitió evidenciar movimientos de la superficie lunar generados por actividad sísmica e impactos de meteoritos [33]. A lo largo de ocho años de registro se detectaron más de 12500 eventos, los cuales fueron clasificados de acuerdo a su mecanismo de generación y profundidad focal [19, 33]. Los eventos fueron catalogados como superficiales, profundos, térmicos, impacto de meteorito y no clasificables [33]. Los sismos de tipo superficial son los eventos menos frecuentes (28 eventos en ocho años de muestreo), sin embargo, son los eventos con mayor interés desde el punto de vista estructural, ya que estos pueden llegar a tener magnitudes de onda de cuerpo (M_b) mayores a 5.0 [31, 33, 37, 43]. Por lo anterior, se considera que el diseño de estructuras lunares debe considerar el efecto de este tipo de evento sísmico [7]. De manera consecuente se formuló el proyecto de investigación denominado **Metodología para la caracterización de la amenaza sísmica, generación de sismos sintéticos y espectros de diseño para la Luna**, desarrollado en el marco de la convocatoria interna 2019 de la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle. El objetivo principal de esta investigación consistió en evaluar la amenaza sísmica para un sitio específico de la luna. Los resultados obtenidos fueron curvas y espectros uniformes y condicionales de amenaza, los cuales se usan para determinar las fuerzas sísmicas a las que se encontrará expuesta una estructura. Este estudio se convierte en un punto de partida en la presente propuesta para realizar el diseño por desempeño sísmico de un hábitat lunar.

Por otra parte, a pesar de que la Luna y la Tierra se encuentran sometidos a ambientes propensos al impacto de meteoritos muy similares, la falta de atmósfera lunar hace que estos puedan impactar libremente la superficie de la Luna [3]. Partículas de diferentes masas (entre 0.1 a 100 kg) impactan constantemente y de manera aleatoria sobre la superficie lunar a velocidades que pueden alcanzar los $70 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ [28]. Los impactos de meteoritos

poseen una energía cinética considerable por lo que pueden producir daños en las estructuras debido a impactos directos o efectos secundarios como impacto de escombros y movimientos del suelo [5]. Por lo tanto, el impacto de meteoritos es un fenómeno que también se debe considerar en el diseño de estructuras ubicadas sobre la superficie lunar [5, 18, 27]. Kalapodis et al. [20] muestran que el único estudio que considera efectos sísmicos es el realizado por Mottaghi y Benaroya [29] mientras que algunas investigaciones que consideran cargas por impacto de micrometeoritos son las desarrolladas por Malla, Chaudhuri y Gionet [24, 25].

De acuerdo con Benaroya [6], el diseño de estructuras lunares debe considerar la naturaleza estocástica de las diferentes amenazas lunares y la incertidumbre en la respuesta de las estructuras a tales cargas. Para lograr esto, se plantea la necesidad de utilizar metodologías de diseño basadas en riesgo [2] que permitan la evaluación explícita del desempeño de las estructuras. Por lo anterior, en los últimos años se ha propuesto la filosofía de diseño basada por desempeño en la concepción de estructuras lunares [2, 6, 8]. Sin embargo, hasta el momento esta metodología no ha sido aplicada para el diseño de hábitats lunares considerando cargas sísmicas e impactos de meteoritos [2]. En este contexto y teniendo en cuenta la necesidad de garantizar diseños estructurales seguros, económicos y confortables de hábitats lunares permanentes, la presente propuesta plantea responder la siguiente pregunta:

¿Cuáles son los niveles de desempeño estructural deseados para un hábitat lunar sometido a carga sísmica y a impacto de meteoritos?

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Las futuras bases lunares deberán estar compuestas por hábitats diseñados para soportar las cargas generadas por un entorno lunar extremadamente hostil. Para lograr esto, las diferentes amenazas a las que estos hábitats estarán expuestos deben ser previamente identificadas, caracterizadas y cuantificadas [8]. Una de estas amenazas es la actividad sísmica lunar, la cual fue registrada por las cuatro estaciones de la red sísmica Apollo a través del experimento sísmico pasivo (PSE) [19]. Los datos sísmicos fueron registrados durante ocho años y enviados a la Tierra en 1977 cuando las estaciones fueron apagadas [44]. Los cuatro sismómetros de la red sísmica del programa Apollo constaron 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 incluyó un sensor de periodo corto (SP), sensible al movimiento vertical a frecuencias más altas [37].

De acuerdo a su mecanismo de generación y profundidad, los sismos registrados durante las misiones Apollo fueron clasificados en cuatro categorías [33]:

- **Sismos profundos:** Son el tipo de sismo más frecuente, dado que se tiene registro de más de 7000 eventos en ocho años de muestreo [33]. Estos eventos se originan a profundidades entre 700 a 1200 km [32]. Se estima que la magnitud de onda de cuerpo

(M_b) de estos eventos se encuentra entre 1.3 y 3 [16]. De acuerdo con Nakamura et al. [33] los sismos profundos están fuertemente asociados con la fuerza de atracción entre la Luna y la Tierra. Estos eventos se originan en ubicaciones específicas (nidos), de los cuales hasta la fecha, se han identificado 318 [45]. Estos son eventos de baja frecuencia y baja magnitud y es poco probable que representen un peligro potencial para una estructura lunar [30].

- **Sismos superficiales:** También llamados telesismos de alta frecuencia, son el tipo de evento más energético y raro detectado en la Luna [30]. Durante los ocho años que duró el PSE se detectaron un total de 28 eventos [33]. Se ha calculado que estos eventos pueden tener magnitudes M_b entre 5.0 y 5.5 [17, 38, 39]. El mecanismo de generación de estos eventos es desconocido. Sin embargo, hay autores que sugieren que estos eventos están asociados a escarpes lobulados [43]. Las profundidades focales han sido estimadas entre 50-200 km [15].
- **Sismos térmicos:** Mucho más pequeños en magnitud que los sismos profundos, estos eventos se originan en muchos lugares aislados dentro de unos pocos kilómetros de cada estación sísmica Apollo, ocurriendo a intervalos mensuales regulares. Se cree que los sismos térmicos ocurren como consecuencia de la expansión y contracción de la corteza lunar causada por gradientes de temperatura entre el día y la noche lunar [10, 14]. La actividad más alta ocurre dos días después de la salida del sol, probablemente provocada por tensiones termoelásticas en la superficie lunar [45].
- **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 meteorito de 0.1 a 100 kg [33, 35].

Los investigadores Mottaghi y Benaroya [30] mencionaron que existen dos tipos de sismos lunares potencialmente peligrosos para un asentamiento humano a corto y largo plazo: los sismos superficiales y los causados por los impactos de meteoritos. A pesar de que en ocho años sólo se registraron 28 sismos superficiales, estos contienen mayor energía a altas frecuencias que los sismos terrestres de energía comparable [8]. Algunos de estos sismos superficiales llegaron a tener magnitud M_b de 5.5, lo que es suficiente para causar daño estructural moderado (en una escala terrestre). Sin embargo, el efecto de un sismo de magnitud mayor a 5 en una base lunar podría ser catastrófico [39]. 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 [39]. Por lo tanto, los sismogramas lunares son muy largos (pueden durar más de dos horas), en comparación con los de la Tierra (Fig. 2.1), por lo que pueden llegar a generar incomodidad en usuarios, fatiga estructural y hasta el colapso.

Otra de las principales amenazas del entorno lunar son los meteoritos [3]. Los meteoritos son desechos interplanetarios de origen natural que viajan a través del espacio [3, 28]. En promedio 33 toneladas métricas de meteoritos impactan cada día la Tierra y la Luna a velocidades que pueden alcanzar los $72 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ [41]. A diferencia de la Tierra, la Luna no cuenta con una atmósfera que desintegre estas partículas, por lo que estas impactan directamente

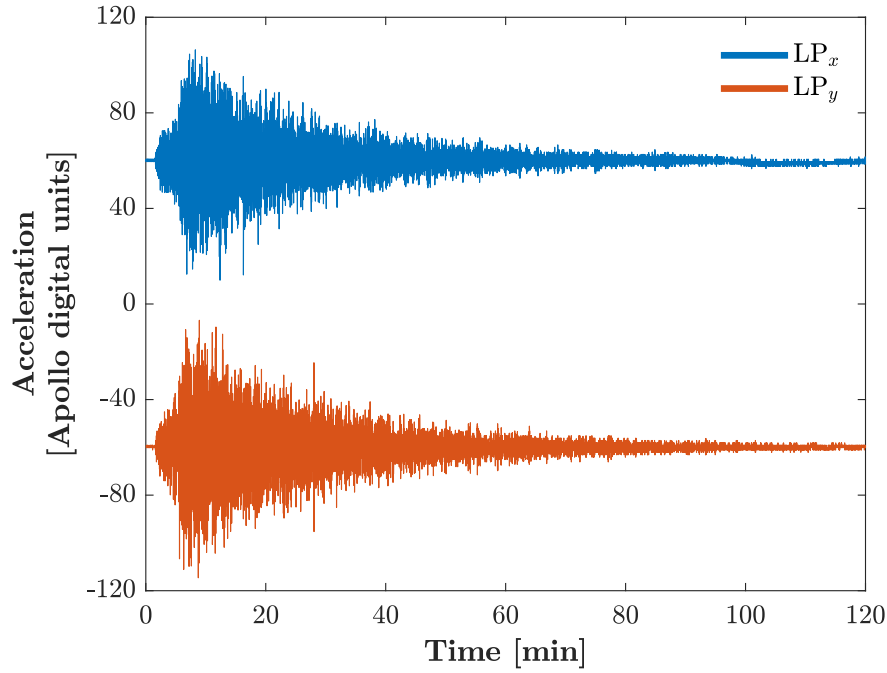


Figura 2.1: Componentes X y Y de un acelerograma representativo de un sismo lunar superficial. (Estación 12. Fecha: Mar-13-1973, hora:08:00) [12]

sobre su superficie [3]. Los impactos de meteoritos pueden afectar una estructura debido al impacto directo o a efectos secundarios como los sismos y partículas eyectadas generadas por el impacto sobre la superficie [5]. Por lo tanto, dada la frecuencia, la alta energía y la naturaleza aleatoria de su ocurrencia, la amenaza por impactos de meteoritos se convierte en un aspecto muy importante a considerar en el diseño de estructuras lunares [3].

En la literatura se han propuesto varios tipos de estructuras lunares. Los conceptos estructurales varían desde armaduras metálicas transportadas desde la Tierra [9, 23] hasta conceptos de hábitats inflables [1, 4, 11] y estructuras desplegables [36]. La mayoría de estos conceptos estructurales se han diseñado teniendo en cuenta las cargas producidas por su propio peso y presión interna. En estudios más recientes, se analizó el efecto de las variaciones extremas de temperatura [29] y las cargas de impacto [2, 3, 24, 25] en el diseño de estructuras e infraestructura lunar. El único estudio que se ha centrado en evaluar el efecto de los moonquakes en hábitats lunares fue el realizado por Mottaghi y Benaroya [30].

Dadas las características no determinísticas tanto de las diferentes amenazas lunares como de las propiedades y respuesta de las estructuras, Steinberg y Bulleit [40] presentaron un enfoque de confiabilidad estructural para el diseño de asentamientos lunares. Luego, Benaroya [6] sugirió la metodología de diseño basada por desempeño para ser aplicada al diseño de hábitats extraterrestres. Con base en lo anterior, Allende et al. [2] propuso una metodología para la aplicación del diseño por desempeño en infraestructura y hábitats lunares. Este estudio demostró la factibilidad del uso de esta metodología en el diseño de

estructuras lunares, ya que ésta facilita la toma de decisiones (basada en el riesgo), permitiendo evaluar diferentes ubicaciones, propuestas estructurales y materiales de las futuras estructuras lunares [2].

La metodología de diseño basada por desempeño consta de cuatro etapas (Fig. 2.2): 1) determinación de la amenaza; 2) cálculos estructurales; 3) análisis de daño y 4) evaluación de pérdidas [6, 13]. El proceso se inicia con la definición de la amenaza que es descrita a través de medidas de intensidad (MI). Usando las MI como parámetros de entrada, se realizan cálculos estructurales usando simulaciones computacionales no lineales para la determinación de la respuesta estructural. De estas simulaciones se obtienen los parámetros de demanda ingenieril (PDI), que luego son comparados con medidas de daño (MD) que permiten describir el daño físico de los componentes estructurales. Finalmente las MD son relacionadas con variables de decisión (VD) que permiten conocer las consecuencias o impactos en términos de pérdidas económicas, tiempo de reparación o pérdida de vidas [13, 21]. Cada variable en el proceso del diseño por desempeño tiene la propiedad de Markov de memoria de un paso, que hace a cada variable independiente de los pasos previos [26]. Esta independencia condicional hace que la metodología de diseño sea flexible y versátil por lo que los modelos dentro de cada análisis se pueden intercambiar para reflejar diferentes diseños, ubicaciones y materiales, o excluirse por completo si se considera innecesario [2].

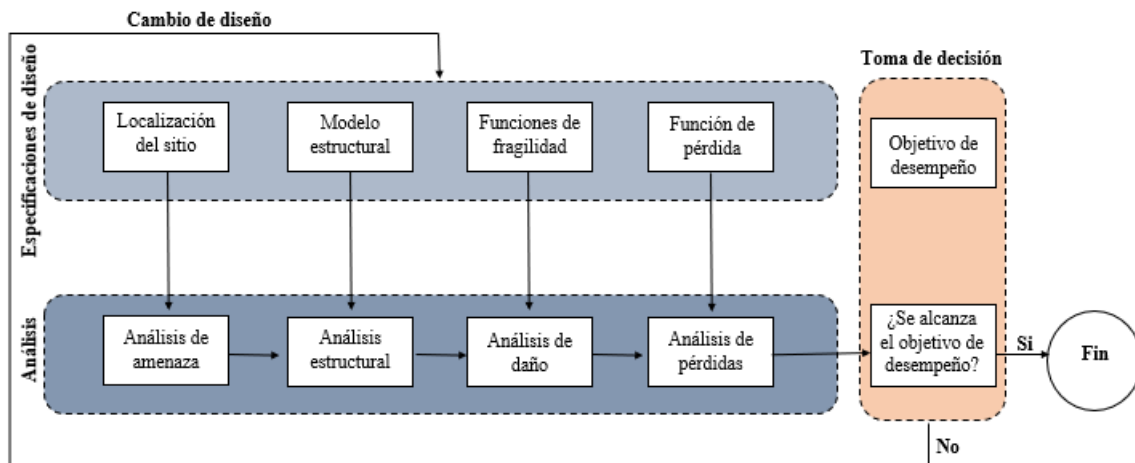


Figura 2.2: Metodología de diseño basado por desempeño. Adaptado de Allende et al. [2]

3. OBJETIVOS

El principal objetivo de este estudio es el de obtener los niveles de desempeño estructural deseados para un hábitat lunar sometido a cargas sísmicas y a impacto de meteoritos.

Los objetivos específicos son:

- Caracterizar la amenaza por impactos de meteoritos en una región de la Luna.

- Definir las características de una estructura modelo que represente un hábitat lunar (material, geometría, procedimiento constructivo, uso proyectado y niveles de desempeño).
- Realizar el análisis y diseño por desempeño del hábitat lunar considerando cargas sísmicas e impactos de meteoritos para un nivel de desempeño deseado.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta para el desarrollo de la presente investigación está dividida en tres fases: (i) caracterizar la amenaza por impactos de meteoritos en una región de la Luna; (ii) definir las características de una estructura modelo que represente un hábitat lunar; y (iii) realizar el análisis y diseño por desempeño del hábitat lunar considerando cargas sísmicas e impactos de meteoritos. Cada una de estas fases, a su vez, contiene una serie de actividades como se describe a continuación:

Fase 1. Caracterizar la amenaza por impactos de meteoritos en una región de la Luna.

A1.1: Revisar la literatura relacionada con la investigación.

Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura durante toda la duración del proyecto.

A1.2: Seleccionar el sitio donde se va a localizar el hábitat lunar.

Se seleccionará el sitio sobre la superficie lunar donde se localizará la estructura.

A1.3: Obtener y procesar los registros de datos históricos de impactos de meteoritos.

Se obtendrán los registros históricos de los destellos que emiten los meteoritos al chocar contra la superficie de la Luna. Estos datos se encuentran registrados en la Meteoroid Environment Office (MEO) y están a disposición de los usuarios en la página web de la NASA.

A1.4: Determinar el modelo de amenaza por impactos de meteoritos.

Se determinará el modelo probabilístico más adecuado que permita conocer el flujo de meteoritos (número de impactos por m^2 por año) en el sitio elegido sobre la superficie lunar.

Fase 2. Definir las características de una estructura modelo que represente un hábitat lunar.

A2.1: Determinar las propiedades de los materiales y métodos de construcción.

Se establecerán las propiedades físico-mecánicas del concreto lunar a partir de la literatura. Además, se evaluará la impresión 3D como la tecnología para el desarrollo constructivo de la estructura lunar.

A2.2: Determinar la geometría y sistema estructural del hábitat lunar.

Se propondrán diferentes hábitats lunares y se evaluarán sus características según el periodo de vida útil, sistema estructural, geometría, materiales y requisitos de construcción.

A2.3: Desarrollar el modelo en elementos finitos del hábitat para el análisis estructural.

Se desarrollará un modelo en elementos finitos del hábitat lunar. En este modelo se incluirá el efecto que tiene usar tecnología aditiva durante la construcción. Con esto se analizará y evaluará el contacto que se genera entre cada capa de concreto al ser extruidas y colocadas durante el proceso de impresión 3D.

Fase 3. Realizar el análisis y diseño por desempeño del hábitat lunar considerando cargas sísmicas e impactos de meteoritos.

A3.1: Definir el nivel de amenaza sísmica.

Se definirá el nivel de amenaza sísmica utilizando las diferentes curvas y espectros de amenaza sísmica desarrollados en la investigación denominada **Metodología para la caracterización de la amenaza sísmica, generación de sismos sintéticos y espectros de diseño para la luna** de Univalle. Estos insumos permitirán obtener la demanda sísmica a la cual va a estar sometida el hábitat lunar.

A3.2: Ejecutar el análisis estructural del hábitat lunar sujeto a cargas sísmicas.

Se usará el modelo en elementos finitos desarrollado en la Actividad A.2.3 para realizar análisis dinámicos (cronológicos y espectrales) en los que el hábitat lunar será sometido a una serie de excitaciones en la base que representan los diferentes niveles de amenaza. Las señales de aceleración corresponderán a acelerogramas debidamente seleccionados y escalados. Además, se usarán los espectros de diseño obtenidos de acuerdo con los niveles de amenaza obtenidos en la Actividad A3.1. Las respuestas de la estructura serán caracterizadas en términos de un parámetro de demanda ingenieril (PDI) adecuado.

A3.3: Determinar los modelos de daño estructural considerando cargas sísmicas.

Se determinarán modelos de daño o curvas de fragilidad para diferentes estados de daño a partir del tratamiento estadístico de los PDI obtenidos de los análisis estructurales de la Actividad A3.2. Con estas curvas de fragilidad se determinará si el hábitat lunar modelo cumple o no con el desempeño requerido para diferentes niveles de amenaza.

A3.4: Ejecutar el análisis estructural del hábitat sujeto a impactos de meteoritos.

Se usará el modelo en elementos finitos desarrollado en la Actividad A.2.3 para realizar el análisis dinámico de la estructura lunar sometida a una serie de impactos de meteoritos con diferentes masas. Los impactos deberán estar debidamente seleccionados de acuerdo con los niveles de amenaza obtenidos en la Actividad A.1.4. Las respuestas de la estructura serán caracterizadas en términos del PDI más adecuado.

A3.5: Determinar los modelos de daño estructural considerando impactos de meteoritos.

Se conducirán análisis estadísticos que permitirán definir los modelos de daño o curvas de fragilidad para diferentes estados de daño utilizando los PDI obtenidos del análisis dinámico desarrollado en la Actividad A3.4. Se utilizará la teoría de probabilidad para determinar la frecuencia anual de excedencia de una variable de daño específica que permitirá evaluar si el hábitat lunar modelo cumple o no con los niveles de desempeño deseados.

A3.6: Preparar informes, ponencias y artículos.

Se prepararán informes parciales cada seis meses, así como los artículos para ponencias

y revistas. Al final se escribirá el informe final que recopile todos los resultados de la investigación.

5. IMPACTO ESPERADO A PARTIR DEL USO DE LOS RESULTADOS

El impacto esperado a partir del uso de los resultados de la presente propuesta de investigación se detalla en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1: Impacto esperado 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 el diseño sísmico de estructuras lunares.	2	Se obtendrá el diseño de un hábitat lunar capaz de resistir cargas sísmicas.	Se propondrá y diseñará un hábitat lunar usando la metodología de diseño basado por desempeño considerando cargas sísmicas.
Impacto sobre el diseño por impactos de estructuras lunares.	2	Se obtendrá el diseño de un hábitat lunar capaz de resistir cargas por impactos de meteoritos.	Se propondrá y diseñará un hábitat lunar usando la metodología de diseño basado por desempeño considerando impactos de meteoritos.
Impactos de ciencia, tecnología e innovación.	3	Aumento de iniciativas investigativas en torno al diseño de estructuras extraterrestres.	La Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle aumentará conocimiento relacionado con el diseño de estructuras extraterrestres.
Impacto sobre la competitividad académica de la Universidad del Valle.	4	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 modelado numérico de estructuras. Además, se contribuirá al fortalecimiento del programa académico de Ing. Civil, ya que los contenidos desarrollados serán incluidos en los contenidos de los cursos de: FEM, Ing. sísmica y Dinámica estructural.
Impacto en el fortalecimiento interinstitucional entre Purdue University (USA) y la Universidad del Valle.	2	Artículos académicos en coautoría con profesores de Purdue University y la 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

La presente investigación se enfocará principalmente en el diseño por desempeño de un hábitat lunar usando programas computacionales de análisis estructural, por lo que el efecto negativo al medio ambiente durante el desarrollo de esta será nulo.

7. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla 7.1: Cronograma de actividades del proyecto de investigación (18 MESES)

Actividad	Mes					
	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18
A1.1. Revisar la literatura relacionada con la investigación.	X	X	X	X	X	X
A1.2. Seleccionar el sitio donde se va a localizar el hábitat lunar.	X					
A1.3. Obtener y procesar los registros de datos históricos de impactos de meteoritos.	X	X				
A1.4. Determinar el modelo de amenaza por impactos de meteoritos.		X	X			
A2.1. Determinar las propiedades de los materiales y métodos de construcción.	X	X				
A2.2. Determinar la geometría y sistema estructural del hábitat lunar.		X	X			
A2.3. Desarrollar el modelo en elementos finitos del hábitat para el análisis estructural.		X	X	X		
A3.1. Definir el modelo de amenaza sísmica.		X	X			
A3.2. Ejecutar el análisis estructural del hábitat lunar sujeto a cargas sísmicas.			X	X		
A3.3. Determinar los modelos de daño estructural considerando cargas sísmicas.				X	X	
A3.4. Ejecutar el análisis estructural del hábitat sujeto a impactos de meteoritos.			X	X	X	
A3.5. Determinar los modelos de daño estructural considerando impactos de meteoritos.				X	X	X
A3.6. Preparar informes, ponencias y artículos.			X	X	X	X

8. PRESUPUESTO

Tabla 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					39.991.885	12.400.000	12.400.000
Equipo de Laboratorio					0	0	0
Otros equipos					0	0	0
Materiales y suministros para el desarrollo del proyecto					0	0	0
Software	Matlab	20.000.000			24.994.928	0	20.000.000
Publicaciones					9.997.971	3.000.000	3.000.000
Mantenimiento					0	0	0
Prestación de servicios					34.992.899	1.000.000	1.000.000
Monitorias - Asist. de invest.						33.589.856	33.589.856
Salidas de Campo					0	0	0
TOTALES PROYECTO						49.989.856	69.989.856

9. DISPOSICIONES VIGENTES

Este proyecto no involucrará trabajo con humanos. Los registros de datos históricos de eventos sísmicos e impactos de meteoritos en la Luna se obtendrán de la literatura y páginas públicas de internet. Se requerirá del uso de herramientas informáticas y programas computacionales para dar cumplimiento con los alcances propuestos.

10. PRODUCTOS ESPERADOS

Los productos esperados de la presente propuesta de investigación están detallados en la Tabla 10.1:

Tabla 10.1: Productos esperados

Tipo de productos	Cantidad	
Productos de nuevos conocimientos		
Artículos	1 artículo en revista Q2 y 1 artículo en revista Q3 aceptados para publicación	
Libros de investigación	0	
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados	No. de trabajos terminados
Pregrado	2	0
Maestría	1	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	0

11. CONSIDERACIONES ADICIONALES

Daniel Gomez Pizano: Doctor en Ingeniería Civil. Profesor titular de la Universidad del Valle e investigador del Grupo de Investigación en Infraestructura Civil Inteligente y Resiliente (RISK). Su dedicación será de 10 horas a la semana. Se desempeñará como investigador principal. Su función será la coordinación científica y técnica de actividades relacionadas con la determinación de la amenaza debido a cargas sísmicas e impactos de meteoritos y diseño estructural.

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 5 horas a la semana. Se desempeñará como co-investigador, apoyando en la determinación de la amenaza sísmica y diseño estructural.

Sandra Villamizar: Magíster en Ingeniería Civil. Profesora hora cátedra de la Universidad del Valle e investigadora del Grupo de Investigación en Infraestructura Civil Inteligente y Resiliente (RISK). Su dedicación será de 5 horas a la semana. Se desempeñará como co-investigadora, apoyando en el análisis y diseño estructural por desempeño de un hábitat lunar.

Albert Ortiz: Doctor 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 5 horas a la semana. Se desempeñará como co-investigador, apoyando en la cuantificación probabilística de la amenaza por impactos de meteoritos.

José Jaime García: Doctor en Ingeniería Mecánica. Profesor titular de la Universidad del Valle e investigador del Grupo de Investigación en Biomecánica. Su dedicación será de 5 horas a la semana. Se desempeñará como co-investigador, apoyando en el modelado en elementos finitos del hábitat lunar.

Dos estudiantes de pregrado: Su dedicación será de 15 horas a la semana cada uno. Se desempeñarán como personal de apoyo en las actividades relacionadas con la obtención de registros históricos de impactos de meteoritos y la determinación de la configuración estructural del hábitat.

Un estudiante de posgrado: Su dedicación será de 20 horas a la semana. Se desempeñará como personal de apoyo en las actividades relacionadas con la determinación de amenaza sísmica y por impacto de meteoritos. Además, desarrollará el análisis y diseño de la estructura lunar propuesta.

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

August 21, 2021

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

Subject: Letter of support for “**Performance-based assessment of a lunar habitat considering seismic loads and meteorites impacts**”

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 “**Performance-based assessment of a lunar habitat considering seismic loads and meteorites impacts**”. As the director of the recently 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 exciting and challenging project.

Sincerely,



Shirley Dyke, PhD
Professor of Mechanical and Civil Engineering
Director, Intelligent Infrastructure Systems Laboratory
Director, Resilient ExtraTerrestrial Habitats Institute

REFERENCIAS

- [1] C. M. Adams and G. Petrov. *The Surface Endoskeletal Inflatable Module (SEIM)*, pages 1–8. 2006.
- [2] M. I. Allende, A. S. Kiremidjian, M. D. Lepech, and D. J. Loftus. Performance-based engineering framework to quantify micrometeoroid damage to lunar surface structures. *Journal of Aerospace Engineering*, 34(5):04021055, 2021.
- [3] M. I. Allende, J. E. Miller, B. A. Davis, E. L. Christiansen, M. D. Lepech, and D. J. Loftus. Prediction of micrometeoroid damage to lunar construction materials using numerical modeling of hypervelocity impact events. *International Journal of Impact Engineering*, 138:103499, 2020.
- [4] T. A. Bateman, J. E. Abarbanel, and M. E. Criswell. *Structural Modifications to the Framing System of a Proposed Lunar/Martian Inflatable Structure*, pages 424–430. 2000.
- [5] C. Beck, H. Montoya, D. Gomez, S. Dyke, A. Bobet, J. Melosh, and J. Ramirez. Hazard assessment of meteoroid impact for the design of lunar habitats. 2018.
- [6] H. Benaroya. *Performance-based engineering for lunar settlements.*, pages 1–8.
- [7] H. Benaroya. *Structures for Manned Habitation*, pages 1–8.
- [8] H. Benaroya. *Building habitats on the moon: engineering approaches to lunar settlements*. Springer, 2018.
- [9] H. Benaroya and M. Ettouney. Framework for evaluation of lunar base structural concepts. *Journal of Aerospace Engineering*, 5(2):187–198, 1992.
- [10] M. Billah, M. M. Islam, and R. Ali Bin. Earthquake vs. moonquake: A review. *World Scientific News*, 100(May):1–15, 2018.
- [11] M. E. Criswell and J. S. Carlson. *Concepts for the Design and Construction of a Modular Inflatable Habitat*, pages 9–16. 2004.
- [12] DARTS. DARTS Labs services are experimental. , 2019. (Retrieved from: <http://www.darts.isas.jaxa.jp/planet/seismology/apollo/app/>. Online; accessed July 8 2019).
- [13] G. G. Deierlein, H. K. C, and A. Cornell. A framework for performance-based earthquake engineering. 2003.
- [14] F. Duennebier and G. H. Sutton. Thermal moonquakes. *Journal of Geophysical Research*, 79(29):4351–4363, 1974.
- [15] 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.

- [16] N. R. Goins, A. M. Dainty, and M. N. Toksoz. Seismic energy release of the moon. , 86:378–388, Jan. 1981.
- [17] N. R. Goins, A. M. Dainty, and M. N. Toksöz. Lunar seismology: The internal structure of the moon. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B6):5061–5074, 1981.
- [18] A. Jablonski and K. Ogden. Technical aspects of meteroid impacts on a lunar structure. 04 2006.
- [19] A. M. Jablonski. Technical Aspects of Seismicity on the Moon. *Apollo The International Magazine Of Art And Antiques*, (613):1–25, 2010.
- [20] N. Kalapodis, G. Kampas, and O.-J. Ktenidou. A review towards the design of extraterrestrial structures: From regolith to human outposts. *Acta Astronautica*, 175:540–569, 2020.
- [21] H. Krawinkler and E. Miranda. Performance-based earthquake engineering. chapter 9 of earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering. *Bozorgnia and VV Bertero, CRC Pres*, 2004.
- [22] 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.
- [23] R. B. Malla, H. R. Adib-Jahromi, and M. L. Accorsi. Simplified design method for braced double-skinned structure in lunar application. *Journal of Aerospace Engineering*, 8(4):189–195, 1995.
- [24] R. B. Malla and D. Chaudhuri. *Dynamic Analysis of a 3-D Frame-Membrane Lunar Structure Subjected to Impact*, pages 1–10. 2008.
- [25] R. B. Malla and T. G. Gionet. Dynamic response of a pressurized frame-membrane lunar structure with regolith cover subjected to impact load. *Journal of Aerospace Engineering*, 26(4):855–873, 2013.
- [26] J. Moehle and G. G. Deierlein. A framework methodology for performance-based earthquake engineering. In *13th world conference on earthquake engineering*, volume 679, 2004.
- [27] H. P. Montoya, S. A. Dyke, A. Bobet, D. Gomez, J. Ramirez, and H. J. Melosh. Hazard assessment of meteoroid impact for the design of lunar habitats. In *The Summer Undergraduate Research Fellowship (SURF) Symposium*, 2017.
- [28] A. Moorhead, H. M. Koehler, and W. J. Cooke. Nasa meteoroid engineering model release 2.0. *Rep. No. NASA/TM—2015–218214. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration.*, 2015.

- [29] S. Mottaghi and H. Benaroya. Design of a lunar surface structure. i: Design configuration and thermal analysis. *Journal of Aerospace Engineering*, 28(1):04014052, 2015.
- [30] S. Mottaghi and H. Benaroya. Design of a lunar surface structure. ii: Seismic structural analysis. *Journal of Aerospace Engineering*, 28(1):04014053, 2015.
- [31] Y. Nakamura. .. HFT Events: Shallow Moonquakes?. . *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 14:197–205, 1977.
- [32] Y. Nakamura. Farside deep moonquakes and deep interior of the moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110(E1), 2005.
- [33] Y. Nakamura, G. V. Latham, and H. J. Dorman. Apollo Lunar Seismic Experiment—Final summary. *Journal of Geophysical Research*, 87(S01):A117, 1982.
- [34] 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).
- [35] 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.
- [36] T.-T. Ng. *Numerical Simulations of a Deployable Structure*, pages 1–6. 2006.
- [37] C. Nunn, R. Garcia, Y. Nakamura, A. Marusiak, T. Kawamura, D. Sun, L. Margerin, R. Weber, M. Drilleau, M. Wieczorek, A. Khan, A. Rivoldini, P. Lognonné, and P. Zhu. Lunar Seismology: A Data and Instrumentation Review. *Space Science Reviews*, 216(5), Aug. 2020.
- [38] J. Oberst. Unusually high stress drops associated with shallow moonquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B2):1397–1405, 1987.
- [39] J. Oberst and Y. Nakamura. A seismic risk for the lunar base. *The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, Volume 1*, pages 1397–1405, 1992.
- [40] E. P. Steinberg and W. Bulleit. Reliability analyses of meteoroid loading on lunar structures. *Structural Safety*, 15(1):51–66, 1994. Special Issue on Reliability on Special Structural Systems.
- [41] R. Suggs and R. Suggs. Results of lunar impact observations during geminid meteor shower events. *NASA/TM—2015–218209*, 2015.
- [42] 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.).
- [43] T. R. Watters, R. C. Weber, G. C. Collins, I. J. Howley, N. C. Schmerr, and C. L. Johnson. Shallow seismic activity and young thrust faults on the Moon. *Nature Geoscience*, 12(6):411–417, 2019.

- [44] R. Yamada. The description of the Apollo seismic experiment. 1971. (Retrieved from: [. Online](#); accessed July 8 2019).
- [45] D. Zhao, J. Lei, and L. Liu. Seismic tomography of the Moon. *Chinese Science Bulletin*, 53(24):3897–3907, 2008.