

DISEÑO POR DESEMPEÑO DE UN HÁBITAT LUNAR SOMETIDO A  
CARGAS SÍSMICAS

CONVOCATORIA DE APOYO A ESTUDIANTES DE MAESTRÍA

Carlos Andres Patiño Arroyo

Co-directores:

Daniel Gómez, Ph.D.

Alejandro Cruz, M.Sc.

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Santiago de Cali

Noviembre 2021

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS . . . . .	III
LISTA DE FIGURAS . . . . .	IV
1. RESUMEN . . . . .	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO . . . . .	3
2.1. Planteamiento del problema . . . . .	3
3. MARCO TEÓRICO . . . . .	6
3.1. Revisión de antecedentes . . . . .	6
3.2. Estado del arte . . . . .	7
3.2.1. Sismicidad lunar . . . . .	7
3.2.2. Daños de los eventos sísmicos sobre hábitats lunares . . . . .	9
3.2.3. Diseño por desempeño . . . . .	9
4. OBJETIVOS . . . . .	11
4.1. Objetivo general . . . . .	11
4.2. Objetivos específicos . . . . .	11
5. METODOLOGÍA PROPUESTA . . . . .	12
6. IMPACTOS ESPERADOS A PARTIR DEL USO DE LOS RESULTADOS . . . . .	14
7. IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO . . . . .	15
8. LINEAS DE INVESTIGACIÓN . . . . .	16
9. DISPOSICIONES VIGENTES . . . . .	17
10. PRODUCTOS ESPERADOS . . . . .	18
BIBLIOGRAFÍA . . . . .	19

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
6.1. Impacto esperado a partir del uso de los resultados . . . . .	14
10.1. Productos esperados . . . . .	18

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
3.1. Ejemplos de sismogramas lunares. Modificado de Jablonski (2010) . . . . .	8
3.2. Metodología de diseño basado en desempeño. Adaptado de Allende et al. (2021) . . . . .	10

## 1. RESUMEN

El creciente interés de la humanidad por la colonización de cuerpos extraterrestres 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), los impactos de meteoritos, radiación y extremos cambios de temperatura.

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 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. El presente estudio se propone como una continuación del proyecto de investigación denominado **Metodo-**

**logía 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.

**Palabras clave:** Diseño basado en desempeño; Moonquakes; Respuesta sísmica; Hábitat lunar.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### 2.1 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 (Theinat et al., 2019). 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”* (Maghareh et al., 2018; NASA, 2015).

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 (Nakamura et al., 1982). 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 (Nakamura et al., 1982; Jablonski, 2010). Los eventos fueron catalogados como superficiales, profundos, térmicos, impacto de meteoritos y no clasificables (Nakamura et al., 1982). 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 (Nunn et al., 2020; Nakamura, 1977; Nakamura et al., 1982; Watters et al., 2019). Por lo anterior, se considera que el diseño de estructuras lunares debe considerar el efecto de este tipo de evento sísmico. 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.

Referente al diseño de estructuras extraterrestres, se encuentran en la literatura numerosos estudios que abarcan una gran cantidad de propuestas que involucran diferentes conceptos estructurales (Benaroya, 2018; Kalapodis et al., 2020). En la concepción de la mayoría de los diseños se consideran únicamente las cargas generadas por el peso propio de los elementos estructurales y la presión interna a la que es sometida la estructura (Abarbanel et al., 1996; Benaroya, 2006b; Ruess et al., 2006; Malla y Chaudhuri, 2006). Por el contrario, Kalapodis et al. (2020) muestra que el único estudio que considera efectos sísmicos es el realizado en Mottaghi y Benaroya (2015a).

De acuerdo con Benaroya (2006a), 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 (Allende et al., 2021) 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 (Benaroya, 2006a, 2018; Allende et al., 2021). Sin embargo, hasta el momento esta metodología no ha sido aplicada para el diseño de hábitats lunares considerando cargas sísmicas Allende et al. (2021). En este contexto, es necesario desarrollar metodologías para el diseño de estructuras lunares que consideren cargas sísmicas. Estas metodologías permitirán concebir diseños de estructuras seguras y resilientes al agresivo ambiente lunar.



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:

¿Cómo realizar el diseño estructural de un hábitat lunar para que tenga un desempeño adecuado frente a sollicitaciones sísmicas de diferentes intensidades?

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1 Revisión de antecedentes

La actividad sísmica lunar fue registrada entre los años 1969 y 1977 por los sismómetros del programa Apollo en las misiones 12, 14, 15 y 16 (Nakamura et al., 1982). Los datos recolectados por las estaciones sísmicas fueron enviados a la Tierra hasta que las estaciones fueron apagadas en 1977 (Yamada, 1971). La red sísmica del programa Apollo está constituida por cuatro estaciones las cuales poseen 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 (Yamada, 1971; Nunn et al., 2020).

La actividad sísmica lunar fue categorizada en cuatro tipos de movimientos del suelo: sismos profundos, sismos térmicos, sismos superficiales e impactos de meteoritos (Nakamura et al., 1982). Varios autores han caracterizado los diferentes tipos de sismos en términos de magnitud, mecanismo de generación, localización y periodicidad. Los sismos profundos han sido estudiados por Nakamura et al. (1982), Goins et al. (1981) y Nakamura (2005), los sismos de origen térmico han sido descritos por Duennebier y Sutton (1974), los sismos superficiales, por su parte, han sido descritos por Oberst (1987), Nakamura (1977) y Watters et al. (2019), entre otros.

Oberst y Nakamura (1992) establecieron la necesidad de considerar el riesgo sísmico lunar en el diseño de bases lunares. En este sentido, Ruiz et al. (2021) propusieron una metodología para la obtención de la amenaza sísmica lunar a través de espectros uniformes y condicionales de amenaza. Los resultados obtenidos en esta investigación permiten determinar las sollicitaciones sísmicas a las que se encontrará expuesta una estructura en un sitio determinado de la superficie lunar.

En la literatura se han propuesto varios tipos de estructuras lunares durante varias décadas (Kalapodis et al., 2020). Los conceptos estructurales van desde armaduras metálicas transportadas desde la Tierra como los propuestos por Benaroya y Ettouney (1992) y Malla et al. (1995) hasta conceptos de hábitats inflables (Bateman et al. (2000), Adams y Petrov (2006) y Criswell y Carlson (2004)) y estructuras desplegables

(Ng, 2006). La mayoría de estos conceptos estructurales se han diseñado teniendo en cuenta únicamente las cargas producidas por su propio peso y presión interna (Kalapodis et al., 2020). El único estudio que se ha centrado en el efecto de los sismos en los hábitats lunares es el realizado por Mottaghi y Benaroya (2015b).

Dadas las características no determinísticas tanto de las diferentes amenazas lunares como de las propiedades y respuesta de las estructuras, Steinberg y Bulleit (1994) propusieron un enfoque de confiabilidad estructural para el diseño de asentamientos lunares. Luego, Benaroya (2006a) sugirió la metodología de diseño basada en desempeño para aplicar este enfoque en el diseño de hábitats extraterrestres. Con base en lo anterior Allende et al. (2021) desarrollaron 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. A través del uso de esta metodología de diseño se facilitará la toma de decisiones basada en el riesgo permitiendo evaluar diferentes ubicaciones, propuestas estructurales y materiales para las futuras estructuras lunares (Allende et al., 2021).

## 3.2 Estado del arte

### 3.2.1 Sismicidad lunar

Entre los años 1969 y 1975 se llevó a cabo el experimento sísmico pasivo (PSE) sobre la superficie lunar (Nakamura et al., 1982). Este experimento consistió en el registro de sismogramas provenientes de las vibraciones del suelo lunar (Jablonski, 2010). Los sismos fueron clasificados de acuerdo con su profundidad focal y mecanismo de generación como profundos, superficiales, térmicos e impactos de meteorito (Nakamura et al., 1982). En la Fig. 3.1 se muestran sismogramas representativos de eventos tipo profundo, superficial e impacto de meteorito. A continuación se describen las principales características de cada tipo de sismo:

- **Sismos profundos.** Son el tipo de sismo más frecuente, se tiene registro de más de 7000 eventos en 8 años de muestreo (Nakamura et al., 1982). Estos eventos se originan a profundidades entre 700 a 1200 km (Nakamura, 2005). Se estima que la magnitud de onda de cuerpo ( $M_b$ ) de estos eventos se encuentra entre 1.3 y 3 (Goins et al., 1981). De acuerdo con Nakamura et al. (1982) los sismos profundos están fuertemente asociados con la fuerza de atracción entre la Luna y la Tierra. Estos eventos se originan en sitios específicos (nidos), de los cuales

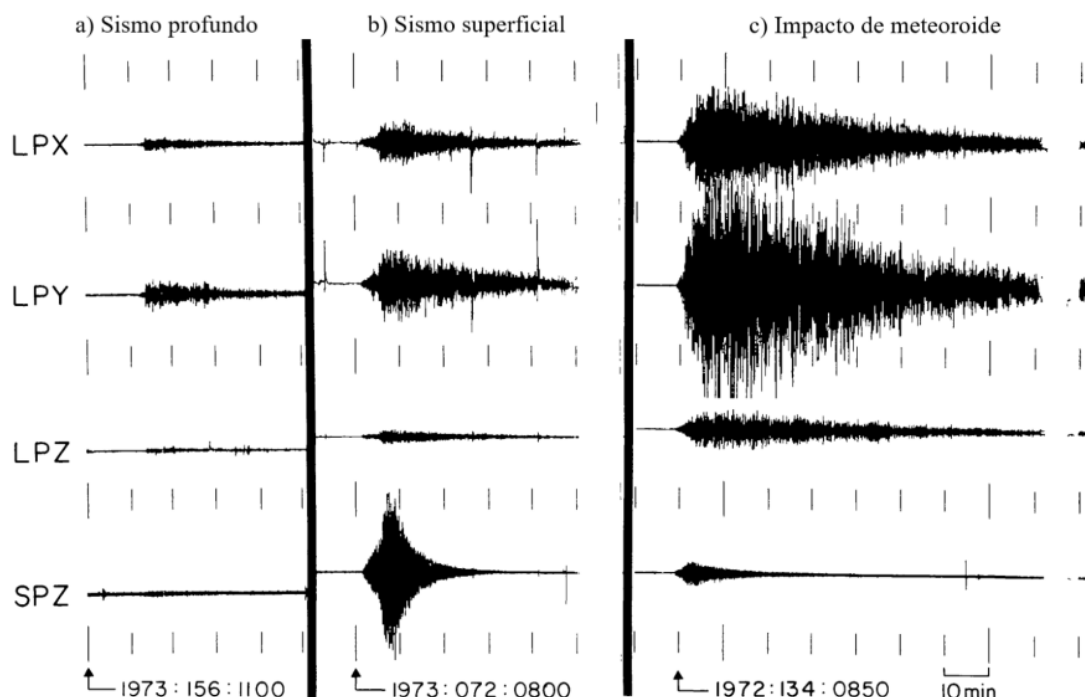


Figura 3.1.: Ejemplos de sismogramas lunares. Modificado de Jablonski (2010)

hasta la fecha se han identificado 318 (Zhao et al., 2008). Estos son eventos de baja frecuencia y baja magnitud y es poco probable que representen un peligro potencial para una estructura lunar (Mottaghi y Benaroya, 2015b).

- **Sismos superficiales.** También llamados telesismos de alta frecuencia (HFT), son el tipo de evento más energético y raro detectado en la luna (Mottaghi y Benaroya, 2015b). Durante los 8 años que duro el PSE se detectaron un total de 28 eventos (Nakamura et al., 1982). Se ha calculado que estos eventos pueden tener magnitudes ( $M_b$ ) entre 5.0 y 5.5 (Goins et al., 1981; Oberst, 1987; Oberst y Nakamura, 1992). El mecanismo de generación de estos eventos es desconocido, sin embargo, hay autores que sugieren que estos eventos están asociados a escarpes lobulados (Watters et al., 2019). Las profundidades focales han sido estimadas entre 50-200 km (Gagnepain-Beyneix et al., 2006).
- **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 (Zhao et al., 2008).

- **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 (Nakamura et al., 1982; Neal, 2005).

### 3.2.2 Daños de los eventos sísmicos sobre hábitats lunares

Mottaghi y Benaroya (2015b) mencionan que dos tipos de sismos lunares son potencialmente peligrosos para un asentamiento humano: los sismos superficiales y los causados por los impactos de meteoritos. Una de las características que hacen a los eventos superficiales peligrosos es que estos contienen mayor energía a altas frecuencias que los sismos terrestres de energía comparable (Benaroya, 2018). Algunos 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 moonquake de magnitud mayor a 5.5 en una base lunar podría ser catastrófico (Oberst y Nakamura, 1992). 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 (Oberst y Nakamura, 1992).

### 3.2.3 Diseño por desempeño

La metodología de diseño basada por desempeño consta de cuatro etapas (Fig. 3.2): 1) determinación de la amenaza; 2) cálculos estructurales; 3) análisis de daño y 4) evaluación de pérdidas (Benaroya, 2006a; Deierlein et al., 2003). 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 (Deierlein et al., 2003; Krawinkler y Miranda, 2004). 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 (Moehle y Deierlein, 2004). 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 (Allende et al., 2021).

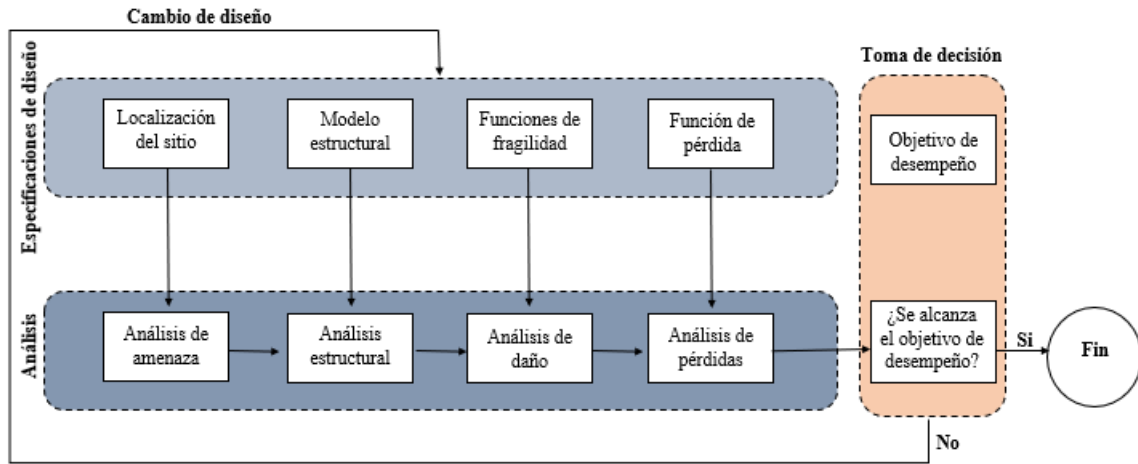


Figura 3.2.: Metodología de diseño basado en desempeño. Adaptado de Allende et al. (2021)

## 4. OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo general

Diseñar un hábitat lunar sometido a cargas sísmicas basado en desempeño.

### 4.2 Objetivos específicos

- Obtener los movimientos sísmicos del terreno para diferentes niveles de intensidad.
- Definir niveles de desempeño para un hábitat lunar compatibles con los niveles de respuesta deseados.
- Adaptar una metodología utilizada para el diseño por desempeño a un hábitat lunar.

## 5. METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta para el desarrollo de la presente investigación está dividida en tres fases: (i) Obtener los movimientos sísmicos del terreno para diferentes niveles de intensidad; (ii) definir niveles de desempeño para un hábitat lunar compatibles con los niveles de respuesta deseados; y (iii) Adaptar una metodología utilizada para el diseño por desempeño a un hábitat lunar. Cada una de estas fases, a su vez, contiene una serie de actividades como se describe a continuación:

### **Fase 1. Obtener los movimientos sísmicos del terreno para diferentes niveles de intensidad.**

#### **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: 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.

### **Fase 2. Definir niveles de desempeño para un hábitat lunar compatibles con los niveles de respuesta deseados.**

#### **A2.1: Seleccionar el material de construcción del hábitat lunar.**

Seleccionar el material de construcción del hábitat lunar de acuerdo con la disponibilidad, ventajas de uso y facilidades de construcción.

#### **A2.2: Definición de curvas esfuerzo-deformación.**

Definir las curvas de esfuerzo-deformación para diferentes estados de carga del material elegido de acuerdo con ensayos de laboratorio reportados en la literatura.

#### **A2.3: Determinación de estados límites y niveles de desempeño.**

Determinar un parámetro de demanda ingenieril adecuado y definir sus valores límites para diferentes niveles de desempeño.



### **Fase 3. Adaptar una metodología utilizada para el diseño por desempeño a un hábitat lunar.**

#### **A3.1: 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.

#### **A3.2: 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.

#### **A3.3: Ejecutar el análisis estructural del hábitat lunar sujeto a cargas sísmicas.**

Se usará el modelo en elementos finitos desarrollado en la Actividad A.3.2 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 A1.3. Las respuestas de la estructura serán caracterizadas en términos de un parámetro de demanda ingenieril (PDI) adecuado.

#### **A3.4: 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 A3.1. Con estas curvas de fragilidad se determinará la probabilidad de tener cierto nivel de daño ante un evento de una intensidad.

## 6. IMPACTOS ESPERADOS 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 6.1:

Tabla 6.1.: 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.
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.	1	Crecimiento académico, actualización del conocimiento y aumento de la competitividad.	Se mejoraran los conocimientos en la línea de modelado numérico de estructuras, 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.	Se compartirá información y conocimiento sobre los estudios relacionados con el análisis y diseño de hábitats extraterrestres resilientes.

## **7. 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.

## **8. LINEAS DE INVESTIGACIÓN**

Diseño de estructuras resilientes extraterrestres

## **9. DISPOSICIONES VIGENTES**

Este proyecto no involucrará trabajo con humanos. Los registros de datos históricos de eventos sísmicos 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	
<b>Productos de nuevos conocimientos</b>		
Artículos	1 artículo en revista Q2 y 1 artículo en revista Q1 aceptados para revisión	
Libros de investigación	0	
<b>Formación de recursos humanos</b>	No. de estudiantes vinculados	No. de trabajos terminados
Pregrado	0	0
Maestría	1	0
Doctorado	0	0
<b>Productos de divulgación</b>		
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
	2 ponencia en un evento académico	0

## Bibliografía

- Abarbanel, J. E., Bateman, T. A., Criswell, M. E., y Sadeh, W. Z. (1996). A framing system for a lunar/martian inflatable structure. En *Engineering, construction, and operations in space v* (p. 1069-1075). Descargado de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/401772820729143> doi: 10.1061/40177(207)143
- Adams, C. M., y Petrov, G. (2006). The surface endoskeletal inflatable module (seim). En *Earth & space 2006* (p. 1-8). Descargado de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40830281882959> doi: 10.1061/40830(188)59
- Allende, M. I., Kiremidjian, A. S., Lepech, M. D., y Loftus, D. J. (2021). Performance-based engineering framework to quantify micrometeoroid damage to lunar surface structures. *Journal of Aerospace Engineering*, 34(5), 04021055. doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001300
- Bateman, T. A., Abarbanel, J. E., y Criswell, M. E. (2000). Structural modifications to the framing system of a proposed lunar/martian inflatable structure. En *Space 2000* (p. 424-430). Descargado de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40479282042952> doi: 10.1061/40479(204)52
- Benaroya, H. (2006a). Performance-based engineering for lunar settlements. En *Proc., earth space 2006: Engineering, construction, and operations in challenging environment* (p. 1-8). Descargado de <https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/performance-based-framework-for-the-design-of-lunar-structures>
- Benaroya, H. (2006b). Structures for manned habitation. En *Earth & space 2006* (p. 1-8). Descargado de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40830281882978> doi: 10.1061/40830(188)78
- Benaroya, H. (2018). *Building habitats on the moon: engineering approaches to lunar settlements*. Springer.

- Benaroya, H., y Ettouney, M. (1992). Framework for evaluation of lunar base structural concepts. *Journal of Aerospace Engineering*, 5(2), 187-198. doi: 10.1061/(ASCE)0893-1321(1992)5:2(187)
- Criswell, M. E., y Carlson, J. S. (2004). Concepts for the design and construction of a modular inflatable habitat. En *Engineering, construction, and operations in challenging environments* (p. 9-16). Descargado de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/4072228153292> doi: 10.1061/40722(153)2
- Deierlein, G. G., C, H. K., y Cornell, A. (2003). A framework for performance-based earthquake engineering.
- Duennebier, F., y Sutton, G. H. (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>
- Gagnepain-Beyneix, J., Lognonné, P., Chenet, H., Lombardi, D., y Spohn, T. (2006). 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.
- Goins, N. R., Dainty, A. M., y Toksoz, M. N. (1981, enero). Seismic energy release of the moon. , 86, 378-388. doi: 10.1029/JB086iB01p00378
- Goins, N. R., Dainty, A. M., y Toksöz, M. N. (1981). Lunar seismology: The internal structure of the moon. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B6), 5061-5074. Descargado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JB086iB06p05061> doi: <https://doi.org/10.1029/JB086iB06p05061>
- Jablonski. (2010). Technical Aspects of Seismicity on the Moon. *Apollo The International Magazine Of Art And Antiques*(613), 1-25.
- Kalapodis, N., Kampas, G., y Ktenidou, O.-J. (2020). A review towards the design of extraterrestrial structures: From regolith to human outposts. *Acta Astronautica*, 175, 540-569. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576520303210> doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.05.038>



- Krawinkler, H., y Miranda, E. (2004). Performance-based earthquake engineering. chapter 9 of earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering. *Bozorgnia and VV Bertero, CRC Pres.*
- Maghareh, A., Gomez, D., Dyke, S., Bobet, A., Ramirez, J., Melosh, H., . . . Theinat, A. (2018). Resilience for permanent extraterrestrial habitats. En *Lunar and planetary science conference* (Vol. 49).
- Malla, R. B., Adib-Jahromi, H. R., y Accorsi, M. L. (1995). Simplified design method for braced double-skinned structure in lunar application. *Journal of Aerospace Engineering*, 8(4), 189-195. doi: 10.1061/(ASCE)0893-1321(1995)8:4(189)
- Malla, R. B., y Chaudhuri, D. (2006). Analysis of a 3d frame &#x2014; membrane structure for lunar base. En *Earth & space 2006* (p. 1-8). Descargado de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40830281882961> doi: 10.1061/40830(188)61
- Moehle, J., y Deierlein, G. G. (2004). A framework methodology for performance-based earthquake engineering. En *13th world conference on earthquake engineering* (Vol. 679).
- Mottaghi, S., y Benaroya, H. (2015a). Design of a lunar surface structure. i: Design configuration and thermal analysis. *Journal of Aerospace Engineering*, 28(1), 04014052. doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000382
- Mottaghi, S., y Benaroya, H. (2015b). Design of a lunar surface structure. ii: Seismic structural analysis. *Journal of Aerospace Engineering*, 28(1), 04014053. doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000396
- Nakamura, Y. (1977). .. HFT Events: Shallow Moonquakes?. . *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 14, 197-205.
- Nakamura, Y. (2005). Farside deep moonquakes and deep interior of the moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110(E1).
- Nakamura, Y., Latham, G. V., y Dorman, H. J. (1982). Apollo Lunar Seismic Experiment—Final summary. *Journal of Geophysical Research*, 87(S01), A117. doi: 10.1029/jb087is01p0a117

- NASA. (2015). *NASA's Journey to Mars*. ((Retrieved from: <https://www.nasa.gov/content/nasas-journey-to-mars>. Online; accessed July 8 2019))
- Neal, C. (2005). The importance of establishing a global lunar seismic network. En *Space resources roundtable vii: Leag conference on lunar exploration* (Vol. 1287, p. 70).
- Ng, T.-T. (2006). Numerical simulations of a deployable structure. En *Earth & space 2006* (p. 1-6). Descargado de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/40830281882910> doi: 10.1061/40830(188)10
- Nunn, C., Garcia, R., Nakamura, Y., Marusiak, A., Kawamura, T., Sun, D., ... Zhu, P. (2020, agosto). Lunar Seismology: A Data and Instrumentation Review. *Space Science Reviews*, 216(5). Descargado de <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02908567> doi: 10.1007/s11214-020-00709-3
- 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: <https://doi.org/10.1029/JB092iB02p01397>
- Oberst, J., y Nakamura, Y. (1992). A seismic risk for the lunar base. *The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century, Volume 1*, 1397-1405.
- Ruess, F., Schaenzlin, J., y Benaroya, H. (2006). Structural design of a lunar habitat. *Journal of Aerospace Engineering*, 19(3), 133-157. doi: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2006)19:3(133)
- Ruiz, S., Cruz, A., Gomez, D., Dyke, S. J., y Ramirez, J. (2021). Preliminary approach to assess the seismic hazard on a lunar site. *Under review*.
- Steinberg, E. P., y Bulleit, W. (1994). Reliability analyses of meteoroid loading on lunar structures. *Structural Safety*, 15(1), 51-66. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167473094900523> (Special Issue on Reliability on Special Structural Systems) doi: [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(94\)90052-3](https://doi.org/10.1016/0167-4730(94)90052-3)

- Theinat, A., Modiriasari, A., Bobet, A., Melosh, H., Dyke, S., Ramirez, J., . . . Gomez, D. (2019). Lunar lava tubes: morphology to structural stability. *Icarus*.
- Watters, T. R., Weber, R. C., Collins, G. C., Howley, I. J., Schmerr, N. C., y Johnson, C. L. (2019). Shallow seismic activity and young thrust faults on the Moon. *Nature Geoscience*, 12(6), 411–417. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1038/s41561-019-0362-2> doi: 10.1038/s41561-019-0362-2
- Yamada, R. (1971). The description of the Apollo seismic experiment.  
((Retrieved from: . Online; accessed July 8 2019))
- Zhao, D., Lei, J., y Liu, L. (2008). Seismic tomography of the Moon. *Chinese Science Bulletin*, 53(24), 3897–3907. doi: 10.1007/s11434-008-0484-1