



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

FACULTAD DE CIENCIAS Y INGENIERIA

**Metodología de Evaluación Visual Rápida para Determinar la
Vulnerabilidad Sísmica en las Iglesias Coloniales: Aplicaciones en
Cusco, Perú**

Ana Eduarda Mendes Vila-Chã

Asesor:

Rafael Aguilar, Susana Moreira; PUCP, Perú

Luís F. Ramos; Universidade do Minho, Portugal

San Miguel, 2017

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo no sería posible sin la colaboración de un gran número de personas. En especial agradezco a mis asesores de tesis, los profesores Dr. Rafael Aguilar, Dr^a Susana Moreira y Dr. Luís F. Ramos por las orientaciones y recomendaciones para el desarrollo de este proyecto. Agradezco también el apoyo recibido de las universidades durante el período de intercambio.

Estoy especialmente agradecida al Grupo Advanced Engineering Analysis and Monitoring of Heritage Structures (ENGINEERING & HERITAGE) de la Pontificia Universidad Católica del Perú por la fácil integración y por todo el apoyo y ayuda durante el desarrollo del proyecto. Muchas gracias por el intercambio de experiencias que contribuyeron para mi desarrollo intelectual y personal.

Agradezco también a todos los Pandas por todos los viajes y experiencias pasadas. Perú se tornó más increíble con ustedes. En especial, Ellie, Claire, Sayuri, Lina, Duvan y Zai Dane, por cada momento que se convirtió en recuerdo.

A mis amigos de siempre, muchas gracias por todo y en especial por la motivación e incentivo. Por último, un especial agradecimiento a mi familia principalmente a mis padres y hermana por el apoyo en todas mis ideas y proyectos y por tener las palabras correctas en los momentos correctos.

ABSTRACT

Cusco is one of the cities in Peru that possesses the largest amount of historical and architectural heritage. The churches under study are colonial temples built between the XVI and XVIII centuries, and present the very typical rich architectural wealth of Cusco, where one can observe the syncretic union of two different cultures. The material which was used on their construction was either adobe or stone and the techniques used were precarious, possessing a structural vulnerability. The structural vulnerability that associates itself to the fact that the country presents a great seismic activity and, therefore, may increase the risk posed to the population and even the loss of heritage. In this sense, the present project aims to develop and propose a rapid and visual methodology for the evaluation of structural and non-structural elements. As Cusco is a city with a large number of churches, this methodology offers the imminent advantage of being fast, having the goal of obtaining a list that dictates the churches that need a deeper evaluation, according to their vulnerability index and their importance. This methodology consists of an evaluation based on 14 parameters verifying the global and local vulnerability of the elements of the building. This way, we will contribute to the reduction of the seismic vulnerability and consequently safeguard the patrimony of Peru, anticipating possible damages or collapses.

RESUMEN

Cusco es una de las ciudades en el Perú que ostenta un gran número de patrimonio histórico y arquitectónico. Las iglesias en estudio son templos coloniales construidos entre los siglos XVI y XVIII y presentan una riqueza arquitectónica cusqueña muy basta donde se puede observar la unión sincrética de dos diferentes culturas. El material utilizado en su construcción fue adobe o piedra y las técnicas utilizadas fueron precarias, presentando así vulnerabilidad estructural. La vulnerabilidad estructural que asociada al hecho de que del país presenta una gran actividad sísmica podrá incrementar el riesgo para las poblaciones o mismo la pérdida de patrimonio. En ese sentido, el presente proyecto tiene como objetivo desarrollar y probar una metodología rápida y visual de evaluación previa al terremoto. Esta metodología nos permitirá hallar el índice de daño esperado de las iglesias con base en la identificación de su vulnerabilidad sísmica. La metodología consiste en la definición de la influencia sísmica según 14 parámetros verificando el análisis global, el local, el estado de conservación y los elementos no estructurales. Dado que Cusco es una ciudad con un gran número de iglesias, esta metodología presenta la ventaja inminente de ser rápida. Con los resultados obtenidos se establecerá una lista de prioridades para, así, determinar las iglesias que ameritan una evaluación más profunda, como por ejemplo, un estudio con métodos numéricos.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : Metodología de Evaluación Visual Rápida para Determinar la Vulnerabilidad Sísmica en las Iglesias Coloniales: Aplicaciones en Cusco, Perú

Área : Estructuras

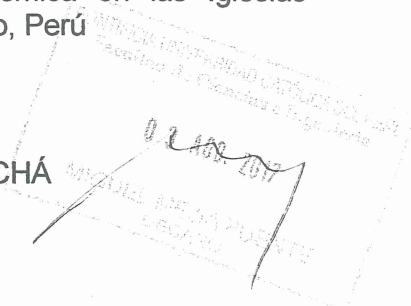
Asesor : Dr. Rafael Aguilar Vélez

Alumno : ANA EDUARDA MENDES VILA-CHÁ

Código : 2016.6917.412

Tema N° : # 437

Fecha : Lima, 2 de agosto de 2017



RESUMEN

Cusco es una de las ciudades en el Perú que ostenta un gran número de patrimonio histórico y arquitectónico. Las iglesias en estudio son templos coloniales construidos entre los siglos XVI y XVIII y presentan una riqueza arquitectónica cusqueña muy basta donde se puede observar la unión sincrética de dos diferentes culturas. El material utilizado en su construcción fue adobe o piedra y las técnicas utilizadas fueron precarias, presentando así vulnerabilidad estructural que asociada al hecho del país presentar una gran actividad sísmica podrá incrementar el riesgo para las poblaciones o mismo la pérdida de patrimonio. En ese sentido, el presente proyecto tiene como objetivo desarrollar y probar una metodología rápida y visual de evaluación previa al terremoto. Esta metodología nos permitirá hallar el índice de daño de las iglesias con base en la identificación de su vulnerabilidad sísmica. La metodología consiste en la definición de la influencia sísmica según 14 parámetros verificando el análisis global, el local, el estado de conservación y los elementos no estructurales. Como Cusco es una ciudad que presenta un gran número de iglesias, esta metodología presenta la ventaja inminente de ser rápida. Con los resultados obtenidos se establecerá una lista de prioridades para, así, determinar las iglesias que ameritan una evaluación más profunda, como por ejemplo, un estudio con métodos numéricos.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

La evaluación visual es un método rápido y probabilístico complejo. Las iglesias coloniales en estudio constituyen parte del patrimonio del Perú y del mundo. Tal como Cristóbal (1998) menciona, el periodo barroco para el Perú fue el periodo de máxima riqueza en el desarrollo del arte colonial.

Jain, et al. (2010) plantean que el RVS (Rapid Visual Screening) es una evaluación simple para un elevado número de edificaciones, el cual tiene una duración máxima de 15 a 30 minutos. Por su vez, el manual FEMA 154 (2015) menciona RVS como el desarrollo para identificar y listar edificaciones que se presentan como potencialmente peligrosos.

Calvi, et al. (2006), la vulnerabilidad es la susceptibilidad al daño provocado por un terremoto de una determinada intensidad. A su vez, Lourenço, et al (2013), menciona que



la vulnerabilidad sísmica que presentan las edificaciones históricas de mampostería al experimentar un terremoto se debe al deterioro y el daño que van sufriendo a lo largo de los años. Asimismo, afirma que los materiales utilizados tienen poca capacidad de resistencia y que las conexiones existentes entre los diferentes elementos estructurales en la mayoría de los casos no son suficientes. Así como Lourenço, et al (2013), NIKER (2010) menciona los principales factores que influyen en el desempeño de una estructura de albañilería. (1) la configuración original de la albañilería; (2) las modificaciones sufridas, como la inserción de contrafuertes, cintas o tirantes (elementos que mejoran el desempeño frente a un sismo) y la presencia de otros pisos (lo que tiende a comprometer el desempeño); (3) la calidad y actual condición de la albañilería; (4) la espesura de las paredes y sus discontinuidades; (5) la conexión entre elementos verticales y horizontales; (6) el material de los pisos. El mismo manual refiere que el desempeño de una edificación se relaciona directamente con su tipología. Los factores presentados en el manual, NIKER (2010), influyen directamente en la vulnerabilidad de una edificación. La conexión entre los elementos verticales y horizontales, es un ejemplo, una vez que una mala conexión entre los elementos estructurales frente a un terremoto hace que la edificación responda según macro elementos, lo que aumenta la susceptibilidad de la edificación.

JUSTIFICACIÓN E HIPÓTESIS

Justificación:

La aplicación de la metodología en estudio constituye un aporte para el patrimonio del Perú, pues ayuda a identificar las iglesias que presentan mayor vulnerabilidad estructural, así como a estimar el desempeño frente a sismos frecuentes, ocasionales y raros. Las iglesias objetos de estudio, están ubicadas en una zona de elevada actividad sísmica, por lo que la investigación se propone disminuir la vulnerabilidad de dichas edificaciones de valor histórico significativo. Gracias a la efectividad y rapidez del método, será posible evaluar un gran número de iglesias, lo que permitirá la elaboración posterior de una lista donde se clasifiquen las iglesias por prioridad de intervención.

Hipótesis:

La hipótesis consiste en probar si es posible utilizar una metodología de evaluación visual con base en tipologías y parámetros predefinidos en iglesias coloniales peruanas.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Este proyecto tiene como objetivo contribuir con la reducción de la vulnerabilidad de las iglesias coloniales construidas entre los siglos XVI y XVIII en la zona de Cusco. El proyecto, tal como ya ha sido planteado, pretende desarrollar una metodología de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las iglesias. Para ello se empleará un método probabilístico que estima su desempeño con base en parámetros predefinidos.

Objetivos específicos:

- Definir los parámetros de evaluación de la vulnerabilidad sísmica.
- Definir la influencia de la acción sísmica en la vulnerabilidad de las iglesias.
- Proponer una metodología de evaluación rápida y visual de la vulnerabilidad sísmica de iglesias utilizando coeficientes simples de comportamiento estructural.

METODOLOGIA

La Metodología se va desarrollar a través de las siguientes actividades:

Actividad 1: Definir los parámetros de evaluación de la vulnerabilidad sísmica

- 1.1 Definición de parámetros de análisis global que consiste en la definición de criterios sísmicos que van a afectar globalmente las iglesias objeto de estudio.
- 1.2 Definición de los parámetros de influencia local, estado de conservación y elementos no estructurales.

Actividad 2: Definir la influencia de la acción sísmica en la vulnerabilidad de las iglesias

- 2.1 Definición de los niveles de aceleración para sismos frecuentes y ocasionales según la extrapolación de valores probabilísticos que resulta de los definidos en la Norma Técnica Peruana E.030 (2016).

Actividad 3: Proponer una metodología de evaluación rápida y visual de la vulnerabilidad sísmica de iglesias utilizando coeficientes simples de comportamiento estructural

- 3.1 Definir los niveles y criterios de performance para hacer la evaluación y caracterización, con base en el índice previamente establecido.
- 3.2 Aplicación de la metodología a tres casos de estudio.

REFERENCIAS

Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F., & Crowley, H. (2006). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. ISET journal of Earthquake Technology, 43(3), 75-104.

Cristóbal, A. S. (1998). Esplendor del Barroco en Ayacucho. Retablo y arquitectura religiosa en Huamanga. Lima, Perú: Ediciones Peisa.

Jain, Sudhir K., et al. (2010). A Proposed Rapid Visual Screening Procedure for Seismic Evaluation of RC-Frame Buildings in India. Earthquake Spectra.

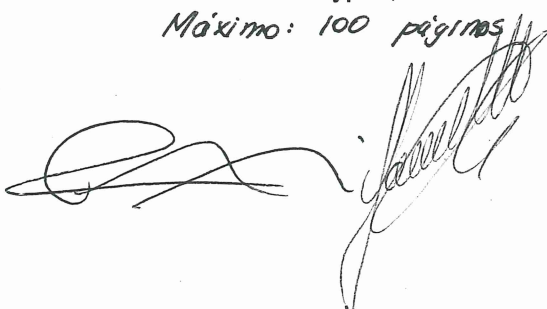
Lourenço, P. B., Oliveira, D. V., Leite, J. C., Ingham, J. M., Modena, C., & Da Porto, F. (2013). Simplified indexes for the seismic assessment of masonry buildings: International database and validation. Engineering Failure Analysis, 34, 585-605.

E.030, N. T. (2016). Diseño Sismorresistente. Lima-Perú.

FEMA. 154 (2015). Rapid Visual Screening of buildings for potential seismic hazards: A Handbook. Washington, D.C.

NIKER. (2010). Inventory of earthquake-induced failure mechanisms related to construction types, structural elements and materials. Italy: Università di Padova.

Máximo: 100 páginas



iii



CONTENIDO

Contenido.....	i
Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tablas	vii
Capítulo I: Introducción.....	1
1.1 Descripción de la Realidad Problemática	2
1.2 Formulación del Problema	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivo Especifico.....	4
1.4 Estructura de la Tesis	4
Capítulo II: Estado del Arte	6
2.1. La Vulnerabilidad Sísmica.....	7
2.1.1 Introducción	7
2.1.2 Definiciones de la Vulnerabilidad Sísmica	7
2.1.3 Métodos de Análisis de la Vulnerabilidad Sísmica.....	9
2.1.4 Vulnerabilidad de Construcciones en Adobe	16
2.2. Metodologías de Evaluación.....	19
2.2.1 Introducción	19
2.3 Guías de Metodologías de Evaluación Visual	19
2.4 Las Iglesias Coloniales.....	24
2.4.1 Introducción	24
2.4.2 Cusco y su Ubicación.....	26
2.4.3 Las Iglesias Coloniales.....	26

2.4.4	Iglesias en Estudio: Encuadramiento Histórico	28
2.4.4.1	Iglesia de San Pedro Apóstol, Andahuaylillas	28
2.4.4.2	Iglesia San Sebastián.....	29
2.4.4.3	Iglesia San Juan Bautista, Huaró.....	30
2.5	Conclusiones	31
Capítulo III: Propuesta de Indicadores.....		33
de la Vulnerabilidad Sísmica		33
3.1	Introducción	34
3.2	Parámetros de evaluación.....	35
3.3	Discusión de los parámetros	80
3.4	Metodología de Evaluación	84
Capítulo IV: Casos de Estudio.....		90
4.1.	Iglesia de San Pedro Apóstol, Andahuaylillas	91
4.2	Iglesia San Sebastián.....	99
4.3.	Iglesia San Juan Bautista, Huaró.....	108
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones		118
5.1.	Conclusiones	119
5.2.	Recomendaciones y Trabajos Futuros	121
Referencias bibliográficas.....		123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mecanismos predefinidos según terremotos ocurridos: (a) Rotación de la torre en la Iglesia S. Vittoria – Gualtieri (RE) (MODELLO A-DC, 2011); (b) Reversión del tímpano en la Iglesia de San Vito – L’Aquila (MODELLO A-DC, 2011)	2
Figura 1.2: Esquema de la estructura de la tesis	5
Figura 2.1: Daño típico de una edificación (NIKER, 2010)	14
Figura 2.2: Representación empírica de la fragilidad (a) Iglesias de piedra; (b) iglesias de ladrillo de arcilla; (c) iglesias en general (Lourenço et al., 2013).....	14
Figura 2.3: Propuesta del desempeño sísmico con base en el índice de daño (Asteris et al., 2013)	15
Figura 2.4: (a) Distribución mundial de la arquitectura en adobe; (b) Distribución mundial de riesgo sísmica moderado (De Sensi, 2003)	17
Figura 2.5: Construcciones en tierra marcadas como patrimonio de UNESCO (Quiteria et al, 2012)	17
Figura 2.6: Planta típica de edificaciones Religiosas en Perú (NIKER, 2010)	18
Figura 2.7: Recomendaciones para la construcción de las paredes (UNESCO, Guidelines For Earthquake Resistant Non-Engineered Construction; 2013)	18
Figura 2.8: Recomendaciones relativas a las dimensiones de los materiales (Peña y Lourenço; 1996)	19
Figura 2.9: Tipos de metodologías de la vulnerabilidad sísmica	20
Figura 2.10: Separación de la Iglesia por Macro Elementos (Modelo A-DC, 2011).....	21
Figura 2.11: Jerarquía de la metodología LOG-IDEAH (Novelli & D’Ayala; 2014)	23
Figura 2.12: Índice de vulnerabilidad, los parámetros y respectivos pesos (Vicente; 2008) .	24
Figura 2.13: Mapa de los países que presentan Patrimonio Cultural (WHEAP; 2012)	25
Figura 2.14: Mapa de la ruta turística Andino Barroca.....	27

Figura 2.15:Iglesia de San Pedro Apóstol (a) Fachada Frontal; (b) Vista Panorámica (Laboratorio de Investigación Engineering and Heritage, PUCP); (c) Vista Interior (Asociación Sempa - Ruta del Barroco Andino)	28
Figura 2.16: Iglesia San Pedro Apóstol, Planas Arquitectónicas (a) Plano Frontal; (b) Planta	29
Figura 2.17: Iglesia San Sebastián (a) Fachada Frontal; (b) Vista Lateral; (c) Vista Interior	29
Figura 2.18: Forma en Planta, Iglesia de San Sebastián	30
Figura 2.19:Iglesia San Juan Bautista (a) Fachada Principal; (b) Vista Interior	30
Figura 2.20:Iglesia San Juan Bautista (a) Vista Panorámica (Laboratorio de Investigación Engineering and Heritage, PUCP); (b) Planta	31
Figura 3.1 Demostración de las tipologías presentes (Huaranga, 2017)	36
Figura 3.2:Caracterización de las Tipologías	36
Figura 3.3: Distribución de las iglesias en estudio de acuerdo al material de construcción de la mampostería (Huaranga, 2017)	39
Figura 3.4: Demostración de la separación de los materiales; (a) Iglesia Andahuaylillas; (b) Iglesia Canincunca; (c) Iglesia Lucre	40
Figura 3.5:Demostracion del sobrecimiento en la Iglesia de San Cristóbal (a) Exterior; (b) Interior	41
Figura 3.6: Demostración de palla presente en los bloques, en la Iglesia de Canincunca ...	41
Figura 3.7: Ejemplos de albañilería de Adobe para las categorías B, C y D (Vicente; 2008)	42
Figura 3.8: Ejemplos de albañilería de Piedra para las categorías A, B, C y D (Vicente; 2008)	44
Figura 3.9: Demostración de los daños causados por el terremoto de 1950 (a) Templo de San Domingo; (b) Compañía de Jesús	45
Figura 3.10: Efecto Pounding (Vicente, 2008)	46
Figura 3.11: Desnivelado del terreno (MODELLO A-DC)	47
Figura 3.12: Geometrías en Planta típicas en las Iglesias Coloniales	48
Figura 3.13: Relación Geométrica para cada tipología. (a) Basilical; (b) Cruz Latina; (c) Rectangular;	49

Figura 3.14: Representación de las variables de influencia en el parámetro P6	56
Figura 3.15: Representación de las recomendaciones para las aberturas en edificaciones de Piedra (UNESCO, Guidelines For Earthquake Resistant Non-Engineered Construction; 2013)	58
Figura 3.16: Efecto de desalineación de las aberturas (Vicente, 2008)	59
Figura 3.17: Demostración del movimiento impulsivo en las paredes (NIKER,2010)	61
Figura 3.18: Daño provocado y visible en una albañilería de piedra (NIKER,2010)	61
Figura 3.19: Ilustraciones típicas de techos en madera	62
Figura 3.20: Representación del techo (a) Iglesia de Huaru; (b) Iglesia Canincunca	62
Figura 3.21: Caracterización tipológica de las coberturas (Vicente, 2008)	63
Figura 3.22: Mecanismos de colapso referente a los tres mecanismos de colapso; (a) volcamiento de la fachada; (b) volcamiento del tímpano; (c) mecanismo de corte	64
Figura 3.23: Relación de la geometría en la fachada	68
Figura 3.24: Demostración de los diferentes tipos de torres. (a) Iglesia de San Pedro; (b) Iglesia de San Pablo; (c) Iglesia de Canincunca	70
Figura 3.25: Macro elemento del Campanario (Lagomarsino & Podestá; 2004)	70
Figura 3.26: Posicionamiento de las Torres en el contexto urbano (Sepe, Vincenzo et al; 2008)	71
Figura 3.27: Criterio de evaluación de las torres (Vicente, 2008)	71
Figura 3.28: Representación del Espadaño (a) Iglesia San Juan Bautista de Huaru; (b) Iglesia de Oropesa	73
Figura 3.29: Mecanismos posibles de colapso asociados al espadaño (a) Volteo de los elementos superiores; (b) mecanismos del campanario	73
Figura 3.30: Patologías presentes en las Iglesias (a) Iglesia de Canincunca; (b) Iglesia Checacupe;	77
Figura 3.31: Esquema de Trabajos – Parte I	85
Figura 3.32: Esquema de Trabajos - Parte II	86
Figura 3.33: Matriz de Entrada	87
Figura 3.34: Rango de valores de la clase de fragilidad	88

Figura 3.35:Determinación del color que indica el daño esperado	89
Figura 3.36: Matriz de daño esperado.....	89
Figura 4.1: Representación de la Fachada con mayor número de aberturas, Iglesia San Pedro Apóstol.....	94
Figura 4. 2: Representación del tipo de cobertura, Iglesia San Pedro Apóstol	95
Figura 4.3: Representación de la torre, San Pedro Apóstol	96
Figura 4. 4: Planta de la Iglesia San Pedro Apóstol.....	96
Figura 4. 5: Representación de los elementos no estructurales de Iglesia San Pedro Apóstol (a) Pormenor de los cuadros; (b) Vista interior en dirección a la fachada principal	97
Figura 4.6:Representación del muro en análisis en la Iglesia San Sebastián (a) Corte de la Iglesia; (b) Identificación del muro en la planta estructural;	102
Figura 4.7: Representación de la fachada en análisis de las aberturas en la Iglesia San Sebastián	103
Figura 4.8: Representación del tipo de cobertura, Iglesia San Sebastián.....	103
Figura 4.9: Representación de las torres de la Iglesia San Sebastián.....	104
Figura 4.10: Representación de los contrafuertes en la Iglesia San Sebastián.....	105
Figura 4. 11: Representación del estado de conservación de la Iglesia San Sebastián (a) y (b) efectos del incendio.....	106
Figura 4.12: Vista Panorámica.....	111
Figura 4.13: Representación del tipo de cobertura, Iglesia San Juan Bautista.....	112
Figura 4.14: Representación de la fachada principal de la Iglesia San Juan Bautista.....	112
Figura 4.15: Representación de la Espadaña de la Iglesia San Juan Bautista.....	113
Figura 4.16: Planta Estructural de la Iglesia San Juan Bautista	113
Figura 4.17: Demostración de algunas patologías presentes en la Iglesia San Juan Bautista (a) Fachada Principal; (b) Interior.....	114
Figura 4.18: Representación de los elementos no estructurales de Iglesia San Jun Bautista (a) Elementos decorativos del altar; (b) Vista interior en dirección a la fachada principal; (c) Pormenor de los cuadros;.....	115

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Representación de los 28 Mecanismos de Colapso (MODELO A-DC, 2011).....	10
Tabla 2.2: Definición de las variables (Quinn et al., 2015)	16
Tabla 3.1: Mecanismos de colapso referentes a cada tipología (Huaranga, 2017)	37
Tabla 3.2: Numero de mecanismos de colapso asociados a cada tipología	38
Tabla 3.3: Clase de vulnerabilidad del parámetro P1	38
Tabla 3.4: Caracterización de algunas iglesias según el material (Huaranga; 2017).....	39
Tabla 3.5: Ejemplos de albañilería de Adobe (Vicente; 2008)	42
Tabla 3.6: Ejemplos de albañilería de Piedra (Vicente; 2008).....	43
Tabla 3.7: Corrección de la clase de vulnerabilidad del parámetro P2	46
Tabla 3.8: Definición de las clases de vulnerabilidad P3.....	47
Tabla 3.9: Definición de las clases de vulnerabilidad P8.....	50
Tabla 3.10: Fuerza sísmica en la base presente en la Norma Técnica Peruana (E.030)	51
Tabla 3.11: Resistencia al Corte (Vicente; 2008)	52
Tabla 3.12: Coeficiente al corte (Vicente, 2008).....	53
Tabla 3.13: Ejemplo de valores característicos del peso específico y de la resistencia al corte	54
Tabla 3.14: Definición de las clases de vulnerabilidad para el parámetro P5.....	55
Tabla 3.15: Definición de las clases de vulnerabilidad para edificaciones de Adobe P6	57
Tabla 3.16: Definición de las clases de vulnerabilidad para edificaciones de Piedra P6.....	57
Tabla 3.17: Parámetro de la clase de vulnerabilidad P7 para edificaciones de Adobe	59
Tabla 3.18: Parámetro de la clase de vulnerabilidad P7 para edificaciones de Piedra	60
Tabla 3.19: Definición del parámetro de vulnerabilidad P12 (Vicente, 2008)	63
Tabla 3.20: Definición de la influencia del tímpano.....	65
Tabla 3.21: Definición de las clases de vulnerabilidad para edificaciones de adobe P9	69

Tabla 3.22: Definición de las clases de vulnerabilidad para edificaciones de piedra P9	69
Tabla 3.23: Definición de la clase de vulnerabilidad P9.....	72
Tabla 3.24: Definición de las clases de vulnerabilidad del parámetro P10.....	74
Tabla 3.25: Definición de las clases de vulnerabilidad del parámetro P11 para edificaciones de Adobe.....	75
Tabla 3.26: Definición de las clases de vulnerabilidad del parámetro P11 para edificaciones de Piedra	76
Tabla 3.27: Definición del parámetro de vulnerabilidad P13 (Vicente, 2008)	78
Tabla 3.28: Definición del parámetro de vulnerabilidad P14	80
Tabla 3.29: Parámetros de Vulnerabilidad propuestos por Vicente (2008)	81
Tabla 3.30: Parámetros de Evaluación.....	82
Tabla 3.31: Factores escala para diferentes periodos de retorno (Noel, 2017)	89
Tabla 4.1: Datos de Entrada - Iglesia San Pedro Apóstol	91
Tabla 4.2:Relación Geométrica para la San Pedro Apóstol (a) Figura (b) Ecuación.....	92
Tabla 4.3: Categoría asignada al parámetro P13 para la Iglesia San Pedro Apóstol	97
Tabla 4.4: Categoría asignada al parámetro P14 para la Iglesia San Pedro Apóstol	97
Tabla 4.5: Tabla de calificación del índice de vulnerabilidad para la Iglesia de San Pedro Apóstol.....	98
Tabla 4.6: Asignación de la clase de fragilidad para diferentes periodos de retorno para la Iglesia San Pedro Apóstol.....	99
Tabla 4.7:Datos de Entrada - Iglesia San Sebastián.....	99
Tabla 4.8:Relación Geométrica para la San Sebastián (a) Figura (b) Ecuación	100
Tabla 4.9: Categoría asignada al parámetro P13 para la Iglesia San Sebastián	106
Tabla 4. 10: Categoría asignada al parámetro P14 para la Iglesia San Sebastián	106
Tabla 4.11: Tabla de calificación del índice de vulnerabilidad para la Iglesia San Sebastián	107

Tabla 4.12:Asignación de la clase de fragilidad para diferentes periodos de retorno para la Iglesia San Sebastián.....	108
Tabla 4.13:Datos de Entrada - Iglesia San Juan Bautista.....	108
Tabla 4.14: Relación Geométrica para la San Juan Bautista (a) Figura (b) Ecuación	109
Tabla 4. 15: Categoría asignada al parámetro P13 para la Iglesia San Juan Bautista	114
Tabla 4.16: Categoría asignada al parámetro P14 para la Iglesia San Juan Bautista	115
Tabla 4.17:Tabla de calificación del índice de vulnerabilidad para la Iglesia San Juan Bautista	116
Tabla 4.18: Asignación de la clase de fragilidad para diferentes periodos de retorno para la Iglesia San Juan Bautista	117
Tabla 5.1: Categorías asignadas al respectivo parámetro para las tres iglesias en estudio ..	120





CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

La preservación y el estudio del patrimonio son temas que han despertado un interés creciente a lo largo de los años. Por consiguiente, su protección es de gran relevancia, dado el valor histórico y patrimonial. El presente proyecto tiene como objetivo desarrollar y probar una metodología rápida y visual de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las iglesias previa al terremoto.

Las iglesias en estudio son iglesias coloniales que fueron construidas entre los siglos XVI y XVIII en la Región de Cusco y las técnicas utilizadas fueron precarias, lo que incrementa su vulnerabilidad. Esto puede derivar en daños irreversibles o incluso en el colapso de partes de las edificaciones que constituyen una porción del patrimonio del Perú. Las iglesias presentan también una riqueza arquitectónica cusqueña muy vasta. Sus paredes contienen pinturas que representan la unión sincrética entre el arte barroco y el arte indígena. En la medida en que Cusco es una zona que presenta actividad sísmica y las construcciones objeto de estudio son de albañilería, es necesario hacer un análisis orientado a prever el desempeño.

En general, las iglesias presentan una geometría muy compleja constituida por elementos como arcos, torres, cúpulas, entre otros. Además, las propiedades mecánicas de los mismos presentan un comportamiento anisótropo de difícil caracterización. El MODELLO A-DC (2011) sugiere una serie de mecanismos predefinidos para iglesias de mampostaría como resultado de terremotos pasados, ver Figura 1.1.



(a)



(b)

Figura 1.1: Mecanismos predefinidos según terremotos ocurridos: (a) Rotación de la torre en la Iglesia S. Vittoria – Gualtieri (RE) (MODELLO A-DC, 2011); (b) Reversión del tímpano en la Iglesia de San Vito – L'Aquila (MODELLO A-DC, 2011)

En muchos casos, algunos elementos también presentan debilidad en el punto de conexión de los materiales, por ejemplo, la conexión entre las fundaciones y las paredes o entre paredes ortogonales, por mencionar algunos casos. Debido a eso, algunas de las iglesias ya fueron objeto de otros estudios, a partir de los cuales se les han agregado cintas o tirantes orientadas a fortalecer su conexión. Por todos los factores expuestos y debido a la presencia de un gran número de iglesias que ameritan una evaluación, la metodología desarrollada nos permitirá hacer un análisis enumerado en un corto periodo de tiempo. De igual forma, esta metodología nos ayudará prever el índice de daño frente a sismos frecuentes, ocasionales y raros y de esa forma comparar con el desempeño esperado.

La ventaja inminente en el hecho de ser un método rápido y visual es que podremos hacer un análisis de un gran número de edificaciones, lo que constituye una ventaja significativa con respecto al método de análisis numérico; el cual, aunque es más riguroso y no está basado en probabilidades, requiere de un periodo de tiempo más largo.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El problema principal consiste en probar una metodología de evaluación visual con base en parámetros establecidos y predefinidos para iglesias coloniales peruanas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Este proyecto tiene como objetivo contribuir con la reducción de la vulnerabilidad de las iglesias coloniales construidas entre los siglos XVI y XVIII en la zona de Cusco. El proyecto, tal como ya ha sido planteado, pretende desarrollar una metodología de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las iglesias. Para ello se empleará un método probabilístico que estima su desempeño con base en parámetros predefinidos.

1.3.2 OBJETIVO ESPECIFICO

1. Definir los parámetros de evaluación de la vulnerabilidad sísmica;
2. Definir la influencia de la acción sísmica en la vulnerabilidad de las iglesias;
3. Proponer una metodología de evaluación rápida y visual de la vulnerabilidad sísmica de iglesias utilizando coeficientes simples de comportamiento estructural;

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El trabajo está estructurado en un total de 5 Capítulos, ver Figura 1.2. Los Capítulos se encuentran estructurados de la siguiente forma:

El **primer capítulo** presenta la introducción al tema desarrollado. La motivación que originó el estudio y los objetivos generales y específicos a obtener con el desarrollo de la tesis, incluyendo sus actividades. Este capítulo expone también la realidad problemática, la formulación del problema, los objetivos de este proyecto y la estructura de la tesis.

El **segundo capítulo** presenta el estado de arte con relación a la palabra vulnerabilidad. El capítulo se divide en tres partes: definiciones conceptuales, los métodos de análisis y la vulnerabilidad en las construcciones de adobe. Presenta también el marco teórico relacionados con metodologías de evaluación ya desarrolladas y validadas. Exhibe una breve introducción de las iglesias en estudio.

El **tercer capítulo** consiste en el desarrollo de los parámetros a considerar en la evaluación visual, así como la definición de los conceptos y explicación teórica de su aplicación.

En el **cuarto capítulo** se adaptan los planteamientos desarrollados en la tesis a los casos de estudio.

El **quinto capítulo** resume de forma general los resultados obtenidos y hace recomendaciones para estudios futuros.

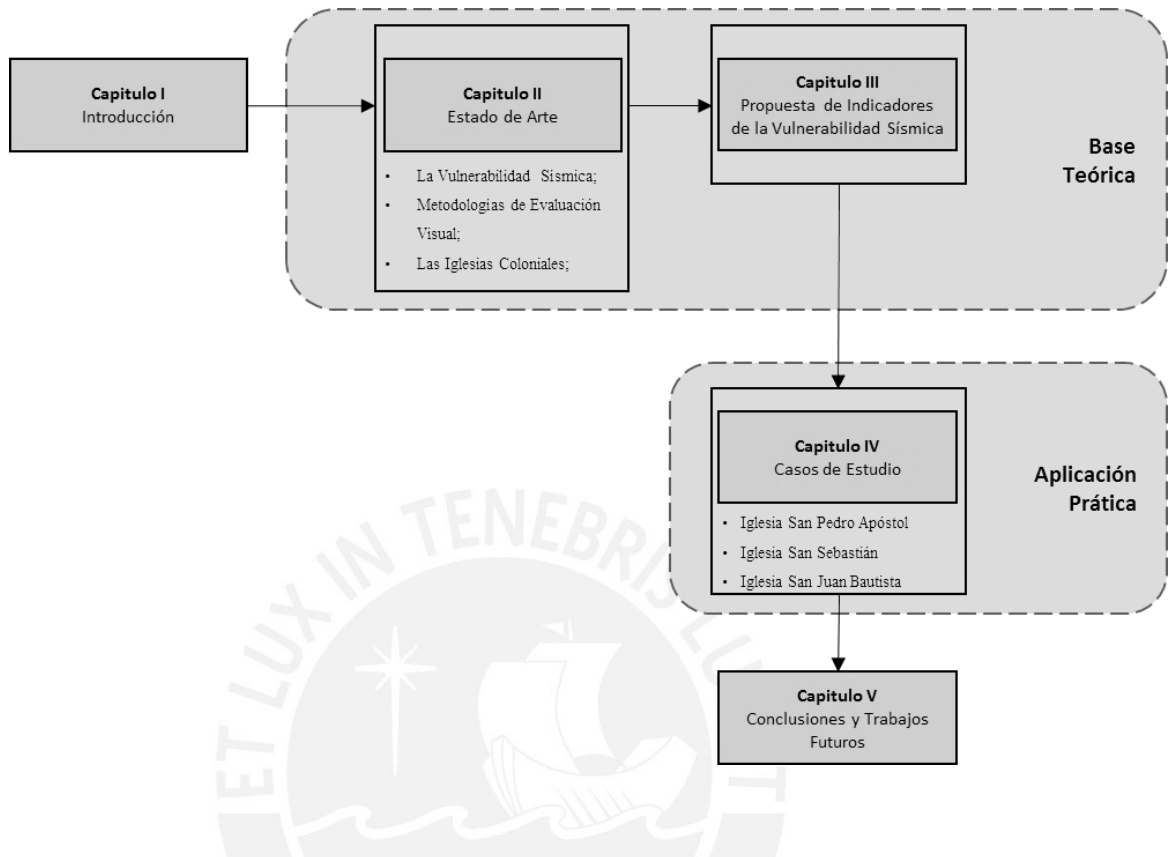


Figura 1.2: Esquema de la estructura de la tesis



CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1. LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

2.1.1 INTRODUCCIÓN

Este Capítulo se encuentra centrado en la palabra Vulnerabilidad. Para empezar, es importante definir la influencia de la misma sobre las edificaciones, así como las variables directamente proporcionales. El mismo capítulo termina con una explicación breve de la vulnerabilidad sísmica en construcciones de tierra y la explicación de las razones por las cuales estas presentan características de mayor susceptibilidad.

La motivación del estudio de la vulnerabilidad en iglesias coloniales radica en la necesidad de prever con el objetivo de poder intervenir para preservar parte del patrimonio presente en Cusco. Es sabido que estas edificaciones tienen un importante valor cultural, histórico y espiritual. Con el propósito de alcanzar ese objetivo, es necesario determinar el nivel de daño presente en las iglesias, y así anticipar sus posibles respuestas ante un sismo frecuente, ocasional y raro. De esa forma, el estudio de la vulnerabilidad de las edificaciones es una pieza importante para la comprensión del tema a desarrollar.

2.1.2 DEFINICIONES DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

Según Calvi, et al (2006), la vulnerabilidad es la susceptibilidad al daño provocado por un terremoto de una determinada intensidad, o sea, se puede definir como el daño que una edificación puede sufrir en base a sus características. Por otro lado, el daño se refiere a toda la modificación estructural que influye en la capacidad de resistencia del edificio frente a agentes exteriores. Lourenço, et al (2013) concluye que el peligro no se relaciona con el daño y que los desastres son el resultado de una mala gestión de los riesgos. A partir de lo anterior, es posible comprender que daño y vulnerabilidad son dos variables que están directamente relacionadas. En vista de que la vulnerabilidad es una de las variables centrales para este proyecto se concluye que al disminuir la vulnerabilidad será posible mejorar la respuesta de la edificación obteniendo así un menor riesgo.

Lourenço, et al (2013) definió el peligro como el nivel de amenaza para la vida, los bienes o el medio ambiente. Así se concluye, que el peligro se encuentra directamente ligado a la actividad sísmica de la zona, a las características del suelo y a la topografía local. El factor Z, presente en la Norma Técnica Peruana E.030 (2016), consiste en la separación del Territorio

Peruano con base en la sismicidad observada, a saber, cada zona tiene un factor asignado que se refiere a la aceleración máxima horizontal en suelo rígido, con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años. Como las edificaciones objeto de estudio se encuentran localizadas en Cusco, es necesario tener en cuenta la provincia en la que están ubicadas. En su mayoría Cusco esta zonificada como Zona 2 con el valor de 0.25g con excepción de algunas provincias del distrito de Chumbivilcas y la provincia de Espinar que están representadas como Zona 3 con el valor de 0.35g.

Lourenço, et al (2013), menciona que la vulnerabilidad sísmica que presentan las edificaciones históricas de mampostería al experimentar un terremoto se debe al deterioro y el daño que van sufriendo a lo largo de los años. Asimismo, afirma que los materiales utilizados tienen poca capacidad de resistencia y que las conexiones existentes entre los diferentes elementos estructurales en la mayoría de los casos no son suficientes. Los factores expuestos por el autor son de gran relevancia en la medida en que influyen directamente en la capacidad de resistencia de la edificación. Así mismo, la cuantificación de la vulnerabilidad sísmica en iglesias de albañilería presenta un gran desafío. Los autores (Araújo & Lourenço, 2011) señalaron que el estudio de la vulnerabilidad sísmica es de gran dificultad debido a los siguientes factores: la difícil caracterización geométrica, el comportamiento anisótropo de los materiales, el estado de degradación actual, el desconocimiento de las características iniciales, entre otros.

NIKER (2010) menciona los principales factores que influyen en el desempeño de una estructura de albañilería. (1) la configuración original de la albañilería; (2) las modificaciones sufridas, como la inserción de contrafuertes, cintas o tirantes (elementos que mejoran el desempeño frente a un sismo) y la presencia de otros pisos (lo que tiende a comprometer el desempeño); (3) la calidad y actual condición de la albañilería; (4) la espesura de las paredes y sus discontinuidades; (5) la conexión entre elementos verticales y horizontales; (6) el material de los pisos. El mismo manual refiere que el desempeño de una edificación se relaciona directamente con su tipología. Los factores presentados en el manual, NIKER (2010), influyen directamente en la vulnerabilidad de una edificación. La conexión entre los elementos verticales y horizontales, es un ejemplo, una vez que una mala conexión entre los elementos estructurales frente a un terremoto hace que la edificación responda según macro elementos, lo que aumenta la susceptibilidad de la edificación.

2.1.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA

Calvi et al (2006) presenta las más importantes contribuciones relativas al estudio del asentamiento en el campo de la actividad sísmica en los últimos treinta años. Además, hace la distinción entre los diferentes métodos de análisis de vulnerabilidad y los clasifica en tres tipos: método empírico, método analítico y método híbrido. Este último consiste en una conjunción de los otros dos métodos. La principal diferencia entre el método analítico y el método empírico, es que en el método analítico los resultados son obtenidos a partir de algo previamente estudiado y desarrollado, es decir, involucra consideraciones teóricas para obtener resultados. Por otra parte, el método empírico está basado únicamente en la observación, sin incorporar nociones teóricas externas.

Dentro de los métodos empíricos, Calvi, et al (2006) desarrolla el índice de vulnerabilidad. Este método se basa en la relación entre la actividad sísmica y la respuesta de la edificación. La fórmula desarrollada para obtener el índice depende de once parámetros, cada uno de los cuales va a ser clasificado como coeficiente, ver Ecuación (2.1).

$$I_v = \sum_{i=1}^{11} K_i W_i \quad (2.1)$$

Donde:

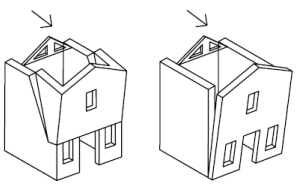
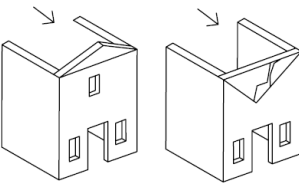
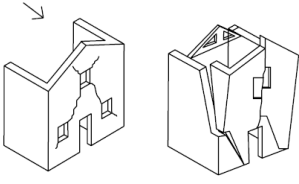
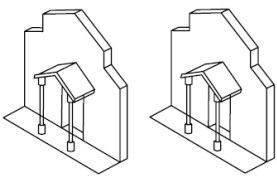
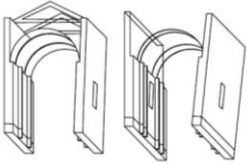
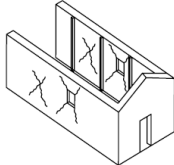
- K_i corresponde al coeficiente de acuerdo con la calidad de las condiciones;
- W_i corresponde al peso;

El mismo autor señala que la principal ventaja de la utilización de este método, al que considera indirecto, es que tiene en cuenta las características de vulnerabilidad de la edificación, más allá de las definiciones y tipologías teóricas más generales.

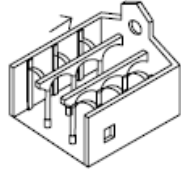
Dentro de los métodos analíticos, Calvi et al (2006) menciona los mecanismos de colapso. El autor explica que la capacidad de la edificación depende de la morfología, la geometría, la configuración estructural y las propiedades del material. Quinn, et al (2015) plantean que los macro-elementos consisten en la división de la estructura en componentes individuales considerados como entidades particulares que interactúan entre sí. Básicamente, la estructura es dividida por elementos locales que en conjunto conforman un todo global. De esa forma es

posible hacer un análisis de la vulnerabilidad mediante la evaluación local y global de la edificación. En línea con esos planteamientos, Valluzzi, et al (2004) menciona que los macro-elementos son la combinación o no de los elementos estructurales, teniendo en cuenta las restricciones constructivas y los materiales empleados. Por último, Lourenço et al (2013) refiere que los macro elementos son subdivisiones de la iglesia en elementos arquitectónicos que presentan independencia sísmica. A continuación, se presenta los 28 mecanismos de Colapso presentados en el manual MODELO A-DC como se encuentra ilustrados en la Tabla 2.1.

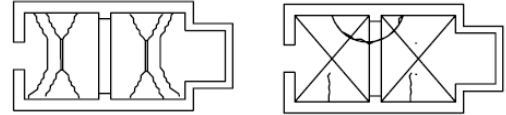
Tabla 2.1: Representación de los 28 Mecanismos de Colapso (MODELO A-DC, 2011)

<p>1. VOELCO DE LA FACHADA</p> 	<p>2. MECANISMO EN LA PARTE SUPERIOR DE LA FACHADA</p> 
<p>3. MECANISMO EN EL PLANO DE LA FACHADA</p> 	<p>4. PORCHE Y NÁRTEX</p> 
<p>5. RESPUESTA TRANSVERSAL</p> 	<p>6. MECANISMO DE CORTE EN LAS PAREDES LATERALES</p> 

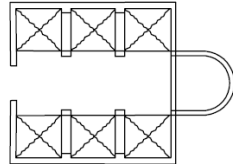
7. RESPUESTA LONGITUDINAL DE
LA COLUMNATA



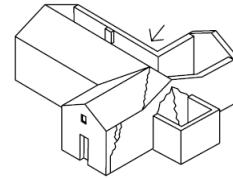
8. VOLTEO DE LA NAVE CENTRAL



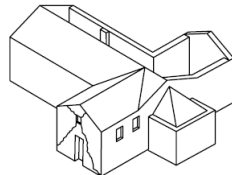
9. VOLTEO DE LA NAVE LATERAL



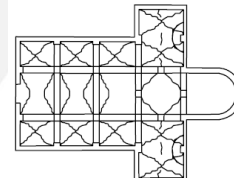
10. VUELCO DE LAS PAREDES DEL
TRANSEPTO



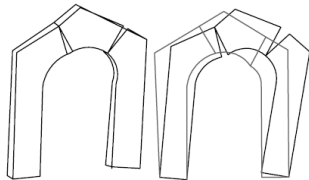
11. MECANISMO DE CORTE EN EL
TRANSEPTO



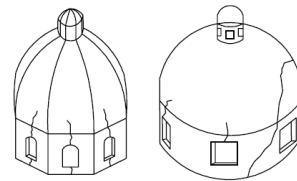
12. VOLTEO DEL TRANSEPTO



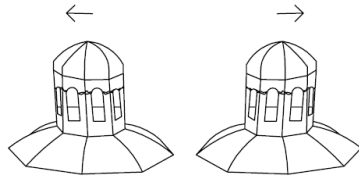
13. ARCO TRIUNFAL



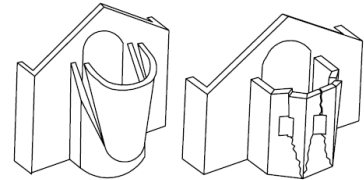
14. BOBEDA Y TAMBOR



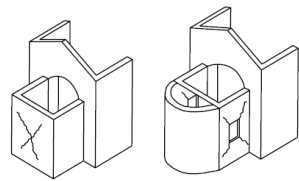
15. LINTERNA



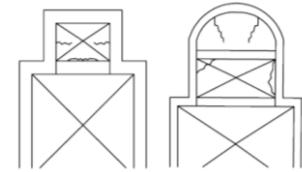
16. REVERSION DEL ABSIDE



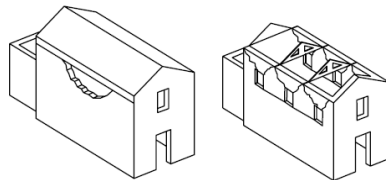
17. MECANISMO DE CORTE EN EL
ABSIDE



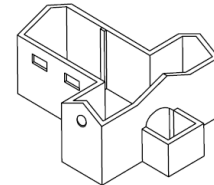
18. VOLTEO DEL SANTUARIO Ó DEL
ABSIDE



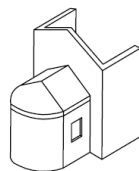
19. ELEMENTO DE CUBIERTA



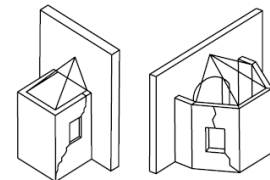
20. ELEMENTO DE CUBIERTA:
TRANSEPTO



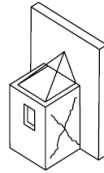
21. ELEMENTO DE CUBIERTA:
ABSIDE



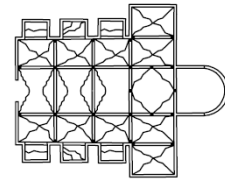
22. VUELCO DE LA CAPILLA



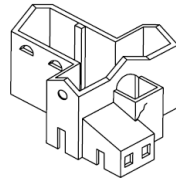
23. MECANISMO DE CORTE EN LA
CAPILLA



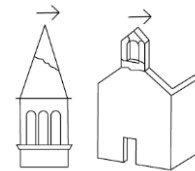
24. VOLTEO DE LA CAPILLA



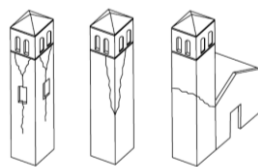
25. INTERACCIONES IRRELUGALES



26. PROYECCIONES LATERALES



27. TORRE CAMPANARIA



28. CAMPANÁRIO



La conexión entre los elementos estructurales, o macro elementos que son elementos que exhiben independencia sísmica, presentan una característica significativa en la respuesta de la estructura frente a los terremotos. La falta de capacidad de la transmisión de las cargas origina la inestabilidad in situ de los elementos, en lugar de una respuesta global de la edificación, Moreira (2015). Tal como ha sido expuesto anteriormente, la vulnerabilidad sísmica puede analizarse a partir del estudio de los macro elementos. Esos macro elementos pueden ser afectados por la aceleración sísmica de forma paralela o perpendicular. Para cada macro elemento existe un mecanismo de colapso asociado a la dirección de la fuerza. Valluzzi, et al (2004) hace la distinción entre el mecanismo en el plano y afuera del plano, y caracteriza como paralelo la acción sísmica dentro del plano y como perpendicular la acción sísmica fuera del plano. Igualmente, concluye que la rotación es la acción más probable en lo que se refiere a los mecanismos fuera del plano, ver Figura 2.1.

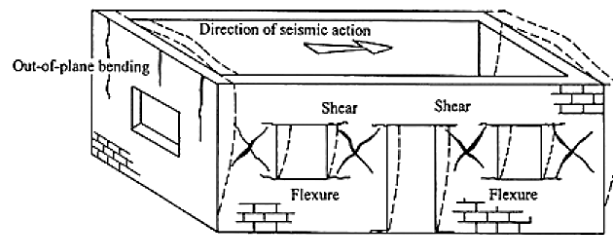


Figura 2.1: Daño típico de una edificación (NIKER, 2010)

Lourenço, et al (2013) desarrolló una metodología simplificada de asentamiento sísmico de iglesias según parámetros geométricos. Para cada índice, el autor presentó los factores que influyen el desempeño de la edificación. El proceso se dividió en dos bases de datos correspondientes a los índices dentro y fuera del plano. Definió como dentro del plano la relación área plano; la relación área peso; y la relación de cizallamiento en la base y fuera del plano la esbeltez de las columnas; la relación espesura y altura de las columnas; y la relación espesor y altura de la pared perimetral.

Lourenço, et al (2013) también nos presentó las curvas de fragilidad que consisten en la estimación del daño en función de la aceleración máxima del suelo, PGA (peak ground acceleration), ver Figura 2.2. Por otro lado, Asteris, et al (2014), señala que para la construcción de las curvas de fragilidad es necesario contar con información sobre la capacidad estructural y sobre el peligro sísmico. En consecuencia, la consideración de factores inciertos implica que el análisis no sea determinístico.

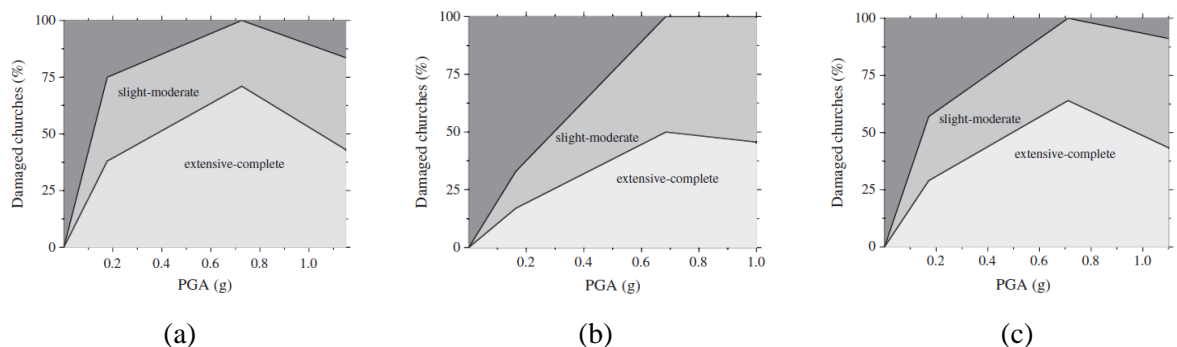


Figura 2.2: Representación empírica de la fragilidad (a) Iglesias de piedra; (b) iglesias de ladrillo de arcilla; (c) iglesias en general (Lourenço et al., 2013)

Asteris, et al (2014) propone algunos parámetros de gran importancia para el estudio del daño en edificaciones de albañilería como la deformación, la velocidad relativa, la aceleración absoluta y por último la energía de disipación. De esa forma, ha desarrollado un índice de daño, como se muestra a continuación, ver Ecuación (2.2).

$$[DI] = \frac{A_{fall}}{A_{tot}} * 100 \quad (2.2)$$

Donde:

- A_{fall} es el área del daño en la superficie de la estructura;
- A_{tot} es el área total de la superficie;

Para la interpretación de los resultados obtenidos, el mismo autor desarrolló una propuesta del desempeño estructural, ver Figura 2.3.

Overall Damage	Heavy damage	Moderate damage	Insignificant damage
[DI]	Extensive cracking: face course and veneer may peel off. Noticeable in-plane offsets $\geq 20\%$ Collapse prevention	Extensive cracking: Noticeable in-plane offsets of masonry and minor out-of-plane offsets $10\% \leq [DI] \leq 20\%$ Life Safety	Minor craking of veneers. Minor spalling in veneers at a few corner openings. No observable out-of-plane offsets $\leq 10\%$ Immediate occupancy

Figura 2.3: Propuesta del desempeño sísmico con base en el índice de daño (Asteris et al., 2013)

Quinn et al (2015) propuse un diagnóstico de la estructura con base en dos etapas. La primera etapa corresponde a la observación *in situ*, y la segunda a el análisis numérico. Para la evaluación *in situ* fueron definidos cinco parámetros de vulnerabilidad: resiliencia, interacción, conexión, fabricación y deterioro, como es posible observar en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Definición de las variables (Quinn et al., 2015)

Nombre de la variable	Definición
Resiliencia	La resiliencia se basa en la estructura original y en su influencia;
Interacción	La interacción consiste en la observación de la interacción de los macro-elementos;
Conexión	La conexión es la vinculación entre los elementos estructurales;
Fabricación	La fabricación se refiere a la construcción y la calidad de los macro-elementos;
Deterioro	El deterioro se refiere a los daños observables que pueden cambiar el desempeño del edificio;

Algunos de los autores arriba mencionados como Lourenço, et al (2013) y Asteris, et al (2006) hacen referencia a las recomendaciones ICOMOS (2003). ICOMOS (2003) es un documento que presenta propuestas y recomendaciones de intervención en edificaciones históricas. Las recomendaciones están separadas en dos secciones. La primera se refiere a los principios donde se presentan los conceptos básicos de la conservación, y la segunda a las directrices, las reglas y la metodología de intervención. Los principios ICOMOS (2003) establecen ocho pasos para la acción: 1) La documentación experimental e histórica; 2) Las características de los materiales; 3) El modelo estructural, 4) Las acciones presentes; 5) El análisis del modelo desarrollado; 6) El cálculo del criterio de falla y asentamiento; 7) Rehacer el análisis en caso de ser necesario repetir los pasos cinco y seis; 8) por último, La exportación del análisis.

2.1.4 VULNERABILIDAD DE CONSTRUCCIONES EN ADOBE

Las construcciones en adobe son uno de los métodos más antiguos y más utilizados en el mundo y en especial en las construcciones en el Perú. Cancino (2011) menciona que las construcciones en adobe son particularmente susceptibles y vulnerables frente a los terremotos. Por lo tanto, es de gran importancia hacer análisis de la vulnerabilidad sísmica con el objetivo de incrementar la resistencia de estas estructuras frente a la actividad sísmica de la región, lo cual a su vez disminuye los riesgos para la población. Quiteria et al (2012) plantea

que el 30% de la población mundial vive en construcciones de tierra y dentro de esos 30%, 50% pertenece a países del tercer mundo, como podemos observar en la Figura 2.4.

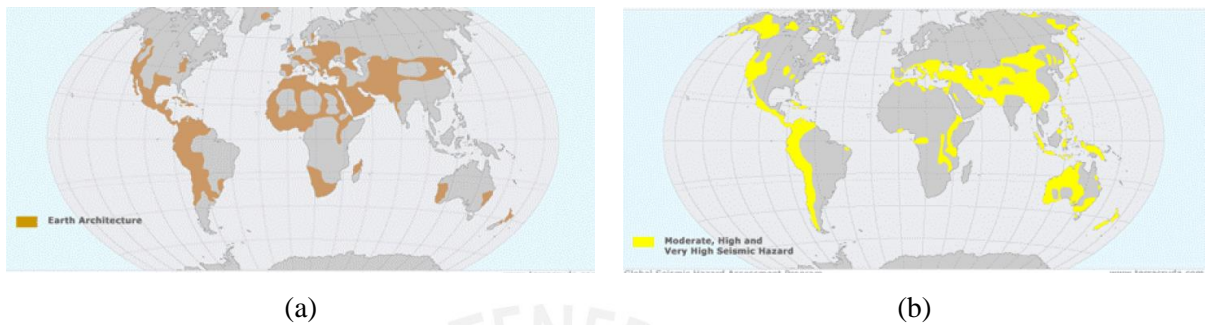


Figura 2.4: (a) Distribución mundial de la arquitectura en adobe; (b) Distribución mundial de riesgo sísmica moderado (De Sensi, 2003)

En la Figura 2.5 se presenta la distribución de las construcciones en tierra y las que patentan valor patrimonial según la UNESCO. También podemos observar que Perú es uno de los países que presenta edificaciones en tierra, que son también patrimonio histórico y cultural.



Figura 2.5: Construcciones en tierra marcadas como patrimonio de UNESCO (Quiteria et al, 2012)

WHEAP (2012) caracteriza la construcción en tierra como una de las expresiones de mayor habilidad del hombre para la construcción utilizando recursos locales. La principal desventaja de este método radica en que tiene bajas propiedades mecánicas, debido al hecho de que el material no posee propiedades lineales. Según Aguilar, et al (2015), el material representa una alta complejidad de análisis del comportamiento estructural. NIKER (2010) plantea

también la planta típica de construcciones en adobe. De las mencionadas, la más relevante para este trabajo es la referente a edificaciones religiosas en Perú, tal como se muestra a continuación, ver Figura 2 6.+

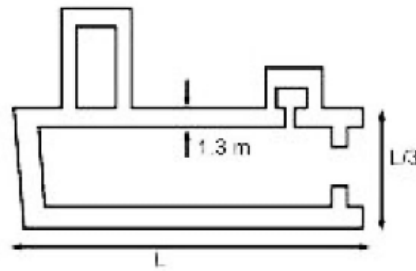


Figura 2 6: Planta típica de edificaciones Religiosas en Perú (NIKER, 2010)

El manual refiere también que las construcciones Coloniales en América Latina no presentan simplicidad en planta y elevación debido a influencias europeas, influencia de las típicas construcciones de ladrillos. El mismo manual establece que una aceleración pico de 0.1g a 0.2g es la aceleración necesaria para que las edificaciones de adobe sufran daño, en caso de no ser reforzadas. Esta conclusión surgió a raíz de la destrucción ocasionada por el terremoto de Northridge en 1994.

En la medida en que las construcciones en adobe todavía son utilizadas, algunos manuales desarrollaron una serie de recomendaciones con el objetivo de mejorar el desempeño estructural frente a un terremoto. UNESCO, Guidelines For Earthquake Resistant Non-Engineered Construction (2013) nos presenta diez recomendaciones para paredes, las cuales se puede observar en la Figura 2.7.

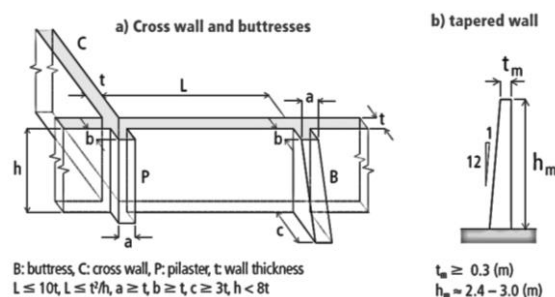


Figura 2.7: Recomendaciones para la construcción de las paredes (UNESCO, Guidelines For Earthquake Resistant Non-Engineered Construction; 2013)

Metodología	Campo de Aplicación		Esfuerzo Computacional		
	Conjunto de edificios	Edificio individual	Bajo	Moderado	Elevado
Vulnerabilidad Observada	x		x		
Modelos de análisis simplificada	x	x		x	
Proceso de análisis detallada		x			x

Figura 2.9: Tipos de metodologías de la vulnerabilidad sísmica

El Modelo A-DC (2011) es un manual destinado y desarrollado únicamente para iglesias y consiste en una metodología que es aplicada post-terremoto. Este modelo se divide en dos partes. La primera parte está compuesta por trece puntos en los que consta la ilustración y la información de carácter general de la edificación. La segunda parte cuenta con catorce subsecciones referentes al estado de mantenimiento, el registro de las inspecciones anteriores, entre otros. En esta segunda parte de la evaluación, uno de los puntos está destinado al daño sísmico. En esa subsección se presenta los veintiocho diagramas de mecanismos de colapso y fotografías respectivas a diferentes tipos de daño, con el objetivo de obtener un mejor conocimiento de los mecanismos de colapso. Los veintiocho mecanismos están subdivididos en diferentes partes de las iglesias, como demostramos en la Figura 2.10.

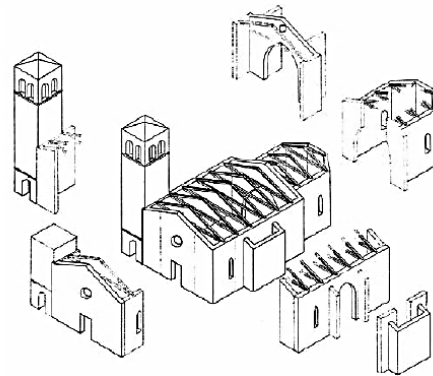


Figura 2.10: Separación de la Iglesia por Macro Elementos (Modelo A-DC, 2011)

- 4 mecanismos relativos a la fachada;
- 5 mecanismos relativos a la nave central;
- 3 mecanismos relativos al transepto;
- 1 mecanismo relacionado al arco triunfal;
- 2 mecanismos relacionados a la cúpula;
- 3 mecanismos relacionados al ábside;
- 3 mecanismos relacionados con la cobertura;
- 4 mecanismos relacionados con la capilla y asociados;
- 3 mecanismos relacionados con las torres;

Como es una metodología post terremoto, los mecanismos son analizados con base en cinco niveles de daño observable, los cuales van desde el daño nulo, correspondiente a 0, hasta el colapso, correspondiente a 5. Después de la analice y clasificación de los mecanismos según su grado de desarrollo, se puede hallar el índice de daño según la Ecuación (2.3).

$$i_d = \frac{d}{5n} \quad (2.3)$$

Donde:

- n es referente al número de mecanismos posibles ($n \leq 28$);
- $d = \sum_{k=1}^n d_k$;

Posteriormente al índice del daño es posible catalogar la iglesia según su resultado intrínseco, a partir de lo cual se puede caracterizar como accesible, inaccesible, parcialmente accesible, accesible con prevención y por último temporariamente inaccesible.

El manual NKER (2010) tal como el manual anteriormente mencionado, es una metodología de evaluación visual. El propósito de la metodología es estudiar el estado actual de la edificación que relaciona los mecanismos de falla inducidos por terremotos, los tipos de construcciones y materiales, las intervenciones sufridas y el asentamiento estructural. Los puntos principales pasan por la caracterización de los daños sísmicos que pueden tener lugar dentro o fuera del plano. A lo largo del manual, se demuestra el cálculo de la fuerza necesaria para la inestabilidad, según el modelo cinemático. En este manual solamente son presentados dieciocho mecanismos, por lo que podemos concluir que el manual anteriormente presentado es una versión reciente de los mecanismos típicos de colapso.

Otro manual similar es Fema (2015), el cual propone una metodología de evaluación que tiene como objetivo identificar edificaciones con potencial riesgo sísmico. El procedimiento consiste en llenar el formulario con base en una inspección visual. El proceso de registro de datos se divide en dos fases, cada una de las cuales tiene una puntuación que va a ser corregida posteriormente y, de esa manera obtendremos el riesgo sísmico. La principal diferencia entre los tres manuales consiste en que el primero y el segundo se enfocan específicamente en iglesias, mientras que el último abarca todo el tipo de edificaciones y estructuras.

Otra metodología que tiene las mismas bases es desarrollada por Novelli & D'Ayala (2014), que consiste en crear una herramienta de estudio de daño post-terremoto para edificaciones históricas. La herramienta interpreta el daño sufrido y la evaluación se basa en una jerarquía, LOG-IDEAH: "Logic trees for Identification of Damage due to Earthquakes for Architectural Heritage", ver Figura 2.11. En la cima, se ubican los asentamientos arquitectónicos, seguidos por los macro-elementos, los elementos estructurales y, por último, el asentamiento artístico.

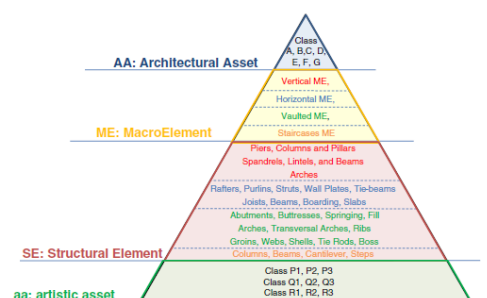


Figura 2.11: Jerarquía de la metodología LOG-IDEAH (Novelli & D'Ayala; 2014)

El método de análisis se basa en un estudio rápido y visual fundamentado en mecanismos de tipos de colapso, lo que nos va a informar cuál es el estado en que se encuentran los macro elementos de esas estructuras. Los mecanismos de colapso están clasificados según la vulnerabilidad presentada cuando tales estructuras son expuestas a una aceleración. En ese sentido, a través de este método de observación se podrá asignar un valor a los daños más probables para cada tipología, el cual será usado a posteriori para calcular el índice respectivo.

Una inspección visual consiste en definir todo lo que es observado con o sin ayuda de algunas herramientas que facilitarán la elaboración del informe final. El informe se presenta en un formato práctico que facilita el registro de los datos y se adapta a todas las tipologías. De esa manera, es posible valorar numéricamente los macro elementos más vulnerables de las iglesias en estudio. Una buena inspección se encuentra automáticamente ligada al inspector, a su calidad de observación, su capacidad de interpretar los daños y su nivel de atención a los detalles; además de otros factores externos como la iluminación de la zona.

Vicente (2008) desarrolló un método de evaluación de la vulnerabilidad sísmica teniendo en cuenta su función y su tipología constructiva. La metodología es constituida por 14 parámetros que se encuentran divididos en cinco categorías, lo que permite calcular la vulnerabilidad según una media ponderada, ver Figura 2.12. Las categorías son: 1) el sistema resistente, donde presenta 6 parámetros; 2) la interacción e irregularidades, con 4 parámetros; 3) pavimentos y cobertura, con 2 parámetros; 4) el estado de conservación, con 1 parámetro; y por último 5) los elementos no estructurales.

PARÂMETRO	Clase C_{vi}				Peso p_i	ÍNDICE DE VULNERABILIDADE
	A	B	C	D		
P1	Tipo e organização do sistema resistente	0	5	20	50	0.75
P2	Qualidade do sistema resistente	0	5	20	50	1.00
P3	Resistência convencional	0	5	20	50	1.50
P4	Distância máxima entre paredes	0	5	20	50	0.50
P5	Altura do edifício	0	5	20	50	1.50
P6	Posição do edifício e fundações	0	5	20	50	0.75
P7	Localização e interação	0	5	20	50	1.50
P8	Irregularidade em planta	0	5	20	50	0.75
P9	Irregularidade em altura	0	5	20	50	0.75
P10	Desalinhamento de aberturas	0	5	20	50	0.50
P11	Diafragmas horizontais	0	5	20	50	1.00
P12	Tipo de cobertura	0	5	20	50	1.00
P13	Danos estruturais identificados	0	5	20	50	1.00
P14	Elementos não-estruturais	0	0	20	50	0.50

$$I_v' = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} \times p_i$$

$$0 \leq I_v' \leq 650$$

(Índice normalizado, $0 \leq I_v' \leq 100$)

Figura 2.12: Índice de vulnerabilidad, los parámetros y respectivos pesos (Vicente; 2008)

Cada parámetro tiene asignado cuatro categorías de vulnerabilidad de acuerdo con el estado de conservación o características constructivas de la edificación, las cuales son descritas por el mismo autor en cada parámetro. Cada uno de esos parámetros según su grado de importancia tiene asignado un peso que varía entre 0.5, menos importante, y 1.5 para los que tienen una mayor influencia en la edificación. El índice de vulnerabilidad es calculado según la ecuación presentada en la Figura 2.12, y sus valores pueden variar entre 0 y 650, pero una vez obtenido el índice es posible utilizar valores normalizados que van entre 0 y 1.

2.4 LAS IGLESIAS COLONIALES

2.4.1 INTRODUCCIÓN

El patrimonio histórico es de gran importancia en el mundo moderno, en la medida en que genera interés turístico y de inversión, lo que beneficia a las comunidades circundantes. La importancia del patrimonio no se reduce al valor histórico, sino también a sus influencias en el presente y en el futuro de una comunidad o región. Se puede considerar patrimonio un bien o un conjunto de bienes que se transmite desde los antepasados. Los bienes son marcos culturales de una región determinada que reflejan su sabiduría, su historia y su forma de vivir. Según WHEAP (2012), unas de las expresiones de habilidad y originalidad humana son las construcciones en tierra. Para su construcción el hombre tuvo la necesidad de utilizar recursos

locales presentes. Debido al patrimonio existente en tierra en la ciudad de Cusco, el lugar fue designado patrimonio cultural en 1982, ver Figura 2.13.



Figura 2.13: Mapa de los países que presentan Patrimonio Cultural (WHEAP; 2012)

El patrimonio histórico puede manifestarse de forma visual, es decir, a través de las edificaciones se puede obtener conocimiento sobre los valores representativos de la cultura, la religión, la historia y la arquitectura. Por eso es de gran importancia hacer evaluaciones de edificaciones que sean testimonio de culturas pasadas.

Las iglesias en estudio forman parte del patrimonio histórico peruano. Estas edificaciones dan cuenta de marcos temporales que nos transmiten un conocimiento minucioso sobre una arquitectura específica y característica. Además, contienen pormenores y detalles que nos remiten a tiempos pasados, a diferentes formas de vivir y de ver el mundo. La arquitectura y la ingeniería fueron llevadas por los colonos españoles a América, pero sufrieron algunas alteraciones en el proceso de adaptación al nuevo Continente. Entre las modificaciones que tuvieron lugar en el Perú en este proceso de adaptación están las relacionadas con la ingeniería y la arquitectura. En el caso de la ingeniería se puede observar el cambio de los métodos y materiales empleados, ya que la gran actividad sísmica de la zona exigía estructuras más flexibles que las típicas estructuras españolas. A su vez, la adaptación relativa a la arquitectura se debió a la introducción de elementos tradicionales barrocos, que serán explicados con más detalle en las páginas que siguen.

2.4.2 CUSCO Y SU UBICACIÓN

Para la comprensión del propósito de la investigación, es de gran importancia reconocer su espacio geográfico. Según Cristóbal (1998), Cusco se encuentra a una altitud de 3350 m.s.n.m, con un clima de sierra. El valle se ubica en las coordenadas geográficas 13°30' latitud Sur a los 72°00' Latitud Oeste del Meridiano de Greenwich.

El Perú se encuentra ubicado en una zona denominada Cinturón de Fuego del Pacífico. Ese nombre se debe a la elevada actividad sísmica a la que se encuentra sujeto el territorio. Los terremotos en el Perú son consecuencia de la liberación de energía debido a la convergencia de placas. En este fenómeno denominado subducción ocurre el desplazamiento de la Placa de Nazca por debajo de la Placa Sudamericana. La subducción es una de las principales causas de los terremotos en el Perú. Tal como ha sido mencionado, las iglesias en estudio están ubicadas en la región de Cusco. Esta región en los últimos años presenció una elevada actividad sísmica, pero la actividad sísmica en este caso puede ser también producto de a las fallas normales activas que se encuentran ubicadas entre la Cordillera Oriental y las altiplanicies entre Cusco y Ayacucho. El sistema de fallas se desarrolla en un recorrido de 250km de largo y pasa a una distancia aproximada de 8Km de la ciudad de Cusco. Los temblores provocados debido a estas fallas son por lo general superficiales, es decir, tienen un máximo de profundidad de 60km y como consecuencia son muy destructivos.

Por los factores arriba mencionados y debido a la ubicación de las iglesias en una zona de elevada actividad sísmica, es de gran importancia realizar un análisis de vulnerabilidad para evitar futuras pérdidas.

2.4.3 LAS IGLESIAS COLONIALES

Las iglesias andinas y coloniales constituyen parte del patrimonio del Perú y del mundo y están localizadas en la Ruta Barroco Andino y sus alrededores, ver mapa en la Figura 2.14. Tal como Cristóbal (1998), menciona, el periodo barroco para el Perú fue el periodo de máxima riqueza del arte colonial.

2.4.4 IGLESIAS EN ESTUDIO: ENCUADRAMIENTO HISTÓRICO

La metodología de evaluación será aplicada a un gran número de iglesias coloniales. En este trabajo me enfoco únicamente en tres iglesias que serán descritas a continuación. En el Anexo I es presentado la ficha descriptiva formulada por Huaranga (2017). En consecuencia, esta investigación puede considerarse un punto de partida para trabajos posteriores que abarquen un mayor número de edificaciones y que, a su vez, validen los parámetros aquí propuestos.

2.4.4.1 Iglesia de San Pedro Apóstol, Andahuaylillas

La Iglesia de San Pedro Apóstol, se encuentra localizada en Andahuaylillas, poblado en la provincia de Quispicanchi. Debido a la riqueza arquitectónica y las pinturas morales que posee, la iglesia es también denominada como la Capilla Sixtina de los Andes, ver Figura 2.15. Esta denominación da cuenta de la importancia patrimonial, cultural e histórica de esta iglesia. Se dice que se empezó a construir a inicios del siglo XVII por los Jesuitas.

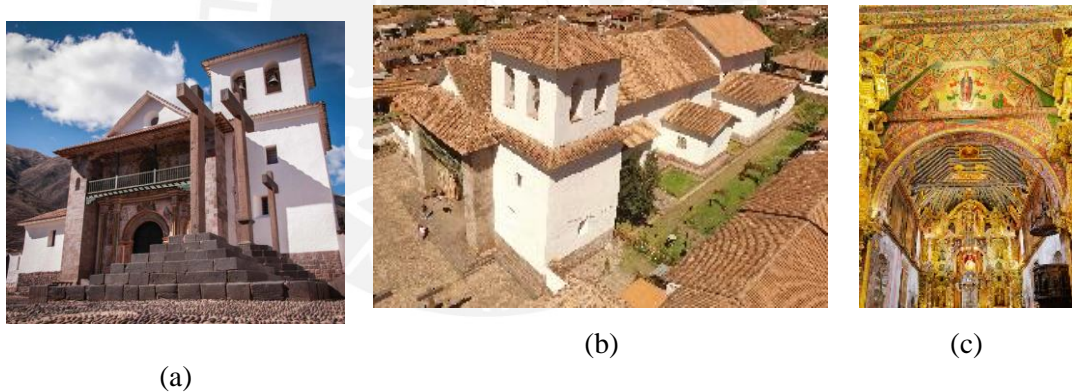


Figura 2.15: Iglesia de San Pedro Apóstol (a) Fachada Frontal; (b) Vista Panorámica (Laboratorio de Investigación Engineering and Heritage, PUCP); (c) Vista Interior (Asociación Sempa - Ruta del Barroco Andino)

El material utilizado para los muros de mampostería fue el adobe y presenta un sobrecimiento en piedra con una altura de 1.6 metros. La iglesia presenta una forma en planta de Cruz Latina con un total de 7 Capillas y 1 Torre. La nave principal tiene una longitud de 13.30 metros y un ancho de alrededor de 61.48 metros. Los muros presentan un ancho constante de 1.90, ver Figura 2.16.

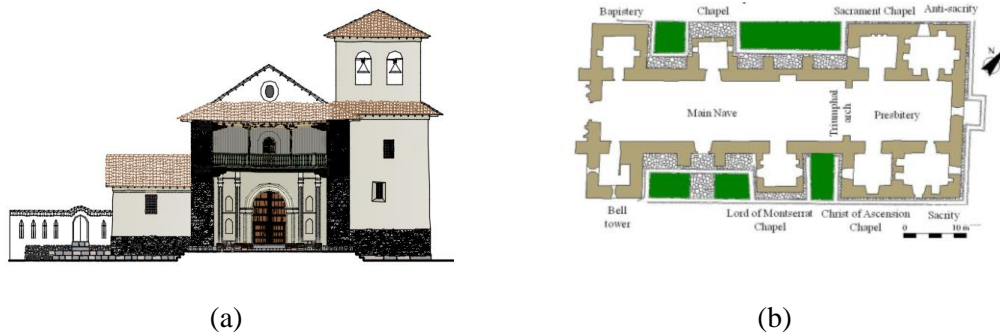


Figura 2.16: Iglesia San Pedro Apóstol, Planas Arquitectónicas (a) Plano Frontal; (b) Planta

2.4.4.2 Iglesia San Sebastián

La iglesia se encuentra ubicada en la plaza del distrito de San Sebastián, Cusco. En 1559 un orden proveniente de Lima inicia la construcción de la capilla de San Sebastián, con el objetivo, de evangelizar a más de 20 mil indios. En 1650 sucedió un terremoto que desmoronó la Iglesia de San Lázaro se desmoronó. En esa iglesia se encontraba la imagen de San Sebastián, por lo tanto, se procedió a construcción de una nueva iglesia, tal como lo plantea Cristóbal (1998). La construcción comenzó por la nave y se desarrolló en distintas etapas. Se estima que fue culminada entre 1673 y 1678, Figura 2.17. Cabe mencionar que el día 16 de septiembre de 2016, la iglesia sufrió una gran destrucción por efecto de un incendio.



Figura 2.17: Iglesia San Sebastián (a) Fachada Frontal; (b) Vista Lateral; (c) Vista Interior

Esta Iglesia presenta una forma basilical, constituida por tres naves. Como es posible observar en la Figura 2.17 (a) presenta dos torres de planta cuadrada, ver Figura 2.18 y el material dominante es el adobe, siendo la fachada construida en piedra.

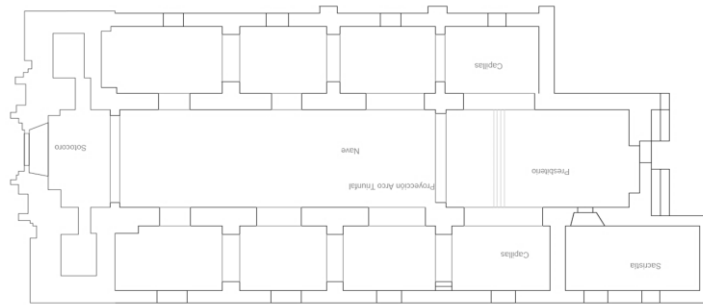


Figura 2.18: Forma en Planta, Iglesia de San Sebastián

2.4.4.3 Iglesia San Juan Bautista, Huaru

La Iglesia San Juan Bautista fue construida entre los siglos XVI y XVII y declarada Patrimonio Cultural de la Nación en 1972, en este hecho podemos verificar su importancia Figura 2.19. La iglesia, está ubicada en el distrito de Huaru, a 40 km de Cusco.



Figura 2.19: Iglesia San Juan Bautista (a) Fachada Principal; (b) Vista Interior

Huaranga (2017) caracterizó la iglesia como rectangular. A su vez, esta iglesia posee 6 capillas, es decir, 3 capillas situadas en los muros longitudinales simétricamente, ver Figura 2.20. El material dominante es adobe, pero presenta un sobrecimiento alrededor de la misma. Como podemos observar, esta Iglesia, presenta una espadaña con una

altura de alrededor de 11m y un espesor de 2m. La Iglesia cuenta con pinturas murales y cuadros que retratan lo mejor de la unión del arte indígena y el arte colonial.

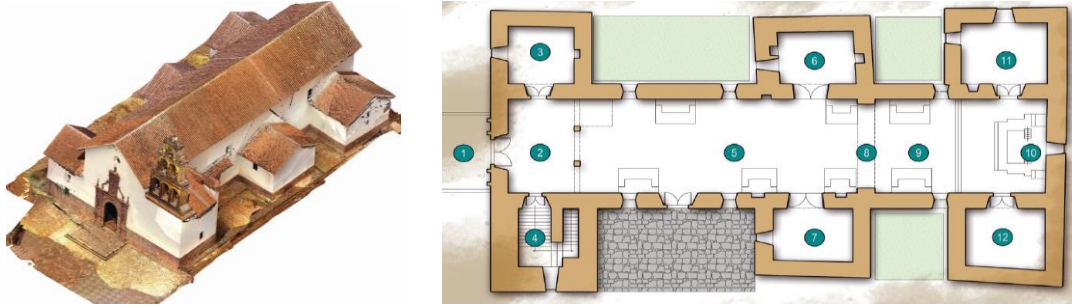


Figura 2.20: Iglesia San Juan Bautista (a) Vista Panorámica (Laboratorio de Investigación Engineering and Heritage, PUCP); (b) Planta

2.5 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentó una parte del estado del arte referente a la vulnerabilidad sísmica que es de gran relevancia para el desarrollo de esta tesis. Como nos fue posible de observar, la vulnerabilidad sísmica, en especial, la vulnerabilidad de edificaciones en adobe es un asunto muy estudiado no solo por las bajas características físicas y mecánicas del material, sino también porque existe un gran número de patrimonio histórico, o incluso viviendas, que presentan una cierta debilidad. Asimismo, es necesario el estudio constante de estas estructuras, en aras de preservar y evitar pérdidas de vidas humanas o de patrimonio histórico. De esa forma es posible también proporcionar confort y seguridad.

Con base en lo presentado podemos afirmar que la vulnerabilidad sísmica puede ser estudiada mediante el análisis de los elementos que constituyen la estructura, y de esa forma, observar los mecanismos típicos de colapso. También nos es posible enunciar que una de las principales causas de vulnerabilidad de las edificaciones es la baja conexión existente entre los elementos estructurales y, en algunos casos, la mala conexión entre los materiales. A partir de las recomendaciones expuestas, podemos observar la relevancia de la altura, el espesor y el ancho. En base a estos parámetros, nos es posible hacer una verificación global de la edificación y del cumplimiento de los parámetros, lo cual nos va a proveer información acerca de la estabilidad o vulnerabilidad estructural.

Como uno de los principales objetivos de la presente tesis es evaluar el mayor número de iglesias en un corto espacio de tiempo. Todas las metodologías presentadas tienen sus ventajas, por ejemplo, el Modelo A-DC (2011), es una metodología pensada específicamente para iglesias. Su análisis es ejecutado según la observación post-terremoto donde se identifican los macro elementos presentes y su grado de desarrollo. Por su vez, la última metodología presentada, metodología de Vicente (2008), se basa en parámetros que influyen en el desempeño frente a terremotos. Tales parámetros fueron pensados para ser aplicados en un núcleo antiguo urbano en Portugal. La ventaja inminente de esta metodología es que no solo considera la geometría y los macro elementos, sino también las características de los materiales, las irregularidades en altura y planta, entre otros. Es decir, la evaluación ejecutada a partir de esta metodología es una evaluación completa y global. Todas las metodologías presentadas son metodologías rápidas de aplicación post terremoto, por lo tanto, en esta tesis el objetivo es un análisis previo. Para lograr el objetivo principal vamos proceder a la adaptación de varios factores de las diferentes metodologías.





**CAPÍTULO III: PROPUESTA DE INDICADORES
DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA**

3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se va centrar en el estudio de los parámetros que tienen influencia en el desempeño sísmico de la edificación. Como ya ha sido mencionado, las iglesias a causa del material y las técnicas precoces, responden a una aceleración de manera fragmentada, como si no fuesen un solo elemento. Por lo tanto, es necesario hacer una evaluación localizada. En los parámetros estudiados se presenta el análisis global y localizado de las estructuras. El análisis localizado se enfoca en el estudio de los macro elementos de la estructura con el propósito de estudiar su grado de desarrollo.

En esta metodología, el objetivo es levantar el máximo de información sobre las edificaciones como, por ejemplo, material dominante, geometría en planta, estado de conservación, elementos más vulnerables, entre otros. Para ese propósito, la metodología desarrollada va a tener como base inicial la metodología de Vicente (2008). En la medida en que la metodología tiene el propósito de ser aplicada a iglesias coloniales en la zona de Cusco, los parámetros desarrollados por el autor necesitan ser readaptados.

Los parámetros son definidos según la naturaleza de las iglesias y sus características de construcción. El cambio principal de los parámetros se debe al hecho de que las edificaciones objeto de estudio sean iglesias. Con relación al material, nos fue posible observar la predominancia del adobe y la piedra. Otro aspecto interesante que podemos observar es que ciertos elementos de las iglesias fueron añadidos a posteriori, como es el caso de los contrafuertes. Con esta información podemos suponer que estos elementos fueron agregados con el objetivo de mejorar la performance de la iglesia frente a los terremotos. La adaptación y el reajuste de los parámetros a la situación en estudio va a ser dividida según las tipologías definidas por Huaranga (2017). Las tipologías fueron separadas en dos aspectos fundamentales, tales como lo son la forma en planta y el material predominante. Con base en esos factores se construyen los parámetros de evaluación más adecuados para un diagnóstico más riguroso.

3.2 PARÁMETROS DE EVALUACIÓN

P1: Sistema Estructural Resistente

El parámetro uno se destina a la verificación del sistema resistente y el análisis de la capacidad de desempeño de los elementos más vulnerables. Esta evaluación implica la necesidad de caracterización de los materiales dominantes y la geometría en planta. El parámetro puede ser caracterizado como el parámetro de análisis global, pues se basa en la definición y evaluación de la propensión al desarrollo de los macro elementos. NIKER (2010) menciona que las edificaciones de albañilería trabajan como un sistema estructural tipo caja. Este sistema es dividido por elementos verticales, como paredes, y elementos horizontales, como diafragmas. En este sistema, las cargas son transferidas de los elementos horizontales a los verticales. El mismo manual refiere que los elementos horizontales funcionan como elementos de flexión y los verticales, de compresión. Uno de los principales problemas es cuando las construcciones no presentan buenas ligaciones entre los elementos constituyentes, pues esto ocasiona que la edificación trabaje como elementos separados, es decir, macro elementos, lo que incrementa su vulnerabilidad.

Las iglesias Coloniales objeto de estudio, pueden ser caracterizadas según su tipología. Las tipologías son realizadas en base a dos parámetros que influyen directamente en el sistema resistente, como el material y la forma en planta. En la Figura 3.1 podemos observar una representación de las tipologías posibles y algunas de las iglesias correspondientes. Huaranga (2017)

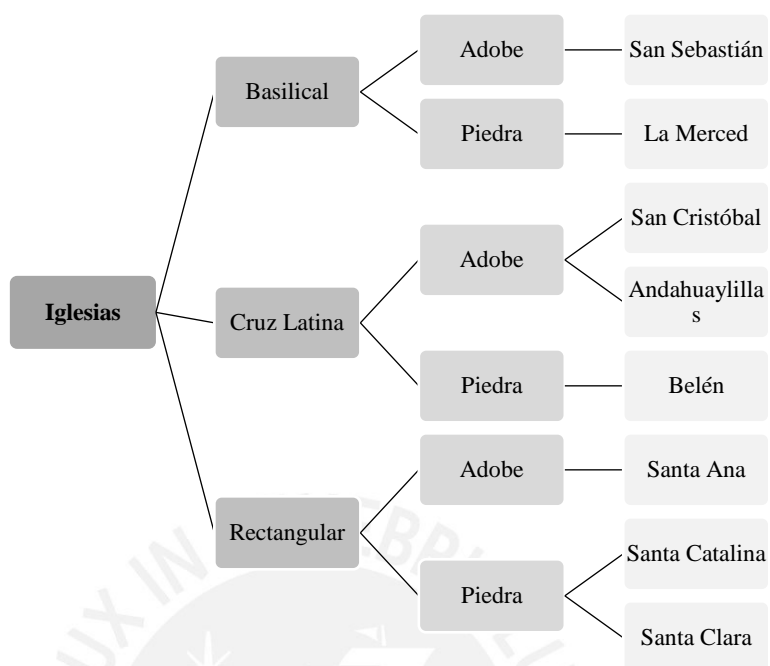


Figura 3.1 Demostración de las tipologías presentes (Huaranga, 2017)

Para la diferenciación de las tipologías, la autora empezó por la clasificación del material. Así, usa A para adobe, Mx para mixto (cuando la iglesia presenta un porcentaje aproximado en altura de los dos materiales) y R para piedra. Una vez caracterizado el material, prosigue la clasificación de la geometría en planta con las siglas R para Rectangular, CL para Cruz Latina y B para Basilical, ver Figura 3.2.

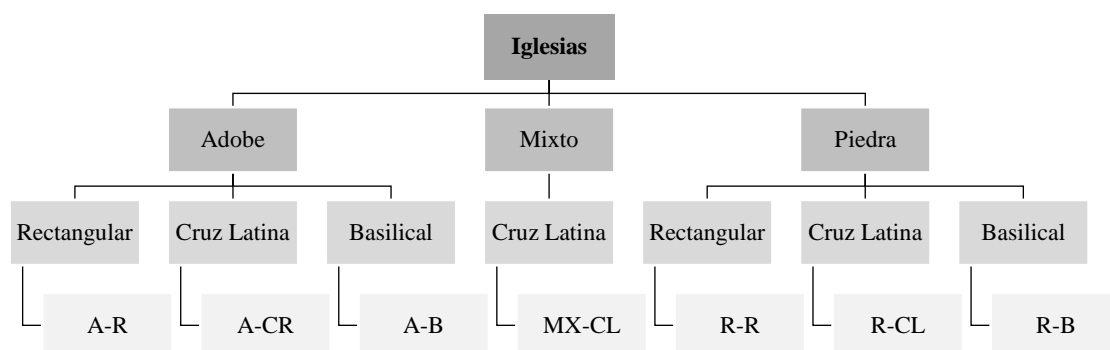


Figura 3.2: Caracterización de las Tipologías

Los macro elementos o mecanismos de colapso pueden ser representados según tres frentes principales, a saber, los directamente relacionados con el material, los relacionados con la geometría estructural y por últimos los que están relacionados con ciertos elementos estructurales. Con la identificación de las principales diferencias de los macro elementos para una misma tipología, es decir, según la influencia del material y geometría, es posible detallar y comparar los principales contrastes entre las distintas tipologías. Huaranga (2017) desarrolló una lista de mecanismos de colapso definidos en función de las iglesias objeto de estudio. La misma autora se centró en 12 macro elementos para el análisis de las Iglesias, ver Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Mecanismos de colapso referentes a cada tipología (Huaranga, 2017)

Ítem	Macro elementos	Nº Mecanismos de colapso	TIPOLOGÍAS						
			A-R	A-CL	A-B	MX-CL	R-R	R-CL	R-B
1	Cimentaciones	2	x	x	x	x	x	x	x
2	Muros de albañilería	16	x	x	x	x	x	x	x
3	Coro	2	x	x		x	x	x	
4	Columnas o pilares	3			x				x
5	Arcos triunfales	1		x				x	
6	Arcos transversales	2			x				x
7	Cubierta de par y nudillo	2	x	x	x	x			
8	Bóvedas	4					x	x	x
9	Domo (domo - cimborrio - cupulino)	2					x	x	x
10	Transepto	2		x		x		x	
11	Fachada	7	x	x	x	x	x	x	x
12	Escaleras	1			x				x
Total			29	32	34	31	33	36	37

En conclusión, podemos observar que la variación de macro elementos por tipología no es muy significativa, aun cuando las iglesias en piedra son las que presentan mayor número de mecanismos asociados. A partir de la comparación de estos valores, es posible determinar que la geometría Rectangular es la que presenta menor número en relación con las demás geometrías, ver Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Numero de mecanismos de colapso asociados a cada tipología

		Geometría		
		Rectangular	Cruz Latina	Basilical
Material	Adobe	29	32	34
	Mixto	-	31	-
	Piedra	33	36	37

Con base en la clasificación de las tipologías y según el número de mecanismos de colapso asociados, se definieron las clases de vulnerabilidad del parámetro P1. Esta clasificación se fundamenta en la sectorización de categorías propuesta en este trabajo. En esta sectorización, se asignó la categoría B para las tipologías comprendidas entre 25 y 30 mecanismos; la categoría C para las comprendidas entre 30 y 35; y por último, la categoría D para las comprendidas entre 35 y 40. En este parámetro no se considera la existencia de tipologías en la categoría A, una vez que no se puede considerar que una tipología responderá de forma eficiente sin que sufra cualquier tipo de daños estructurales. Con esta toma de decisión optamos por un enfoque conservador, en aras de garantizar una mejor evaluación de daño, ver Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Clase de vulnerabilidad del parámetro P1

		Geometría		
		Rectangular	Cruz Latina	Basilical
Material	Adobe	B	C	C
	Mixto	-	C	-
	Piedra	C	D	D

Parámetro P2: Calidad del Sistema Resistente

En la ciudad de Cusco, en particular las iglesias en estudio, se observa que el material presente en la mayoría de las construcciones es el adobe con un sobrecimiento en piedra. A su vez, contamos con iglesias donde el material predominante es la piedra. En la Tabla 3.4 se presentan algunas de las Iglesias Coloniales objeto de estudio y el material que las constituye.

Tabla 3.4: Caracterización de algunas iglesias según el material (Huaranga; 2017)

Iglesias con mampostería de piedra	Iglesias con mampostería de adobe
Belén	Checacupe
Catedral de Cusco	Combapata
Compañía de Jesús	Cusipata
La Merced	La Recoleta
San Francisco	Lucre
San Pedro	Oropesa
Santa Catalina	Quiquijana
Santa Clara	San Antonio Abad
Santa Teresa	San Blás
Santo Domingo	San Cristóbal
	San Jerónimo
	San Juan Bautista, Huaró
	San Pedro Apóstol, Andahuaylillas
	San Sebastián
	Santa Ana
	Santiago
	Tinta
	Virgen Purificada, Canincunca

A partir de la información presentada en la Tabla 3.4, se muestra un gráfico ilustrativo de la cantidad de iglesias en estudio de acuerdo con el material predominante en su construcción. En consecuencia, podemos observar que 64% de las edificaciones son de adobe y el 36% restante son de piedra, Figura 3.3.

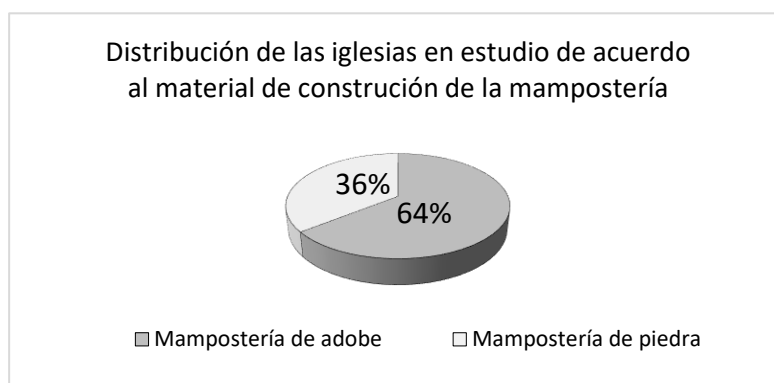


Figura 3.3: Distribución de las iglesias en estudio de acuerdo al material de construcción de la mampostería (Huaranga, 2017)

Como ya fue mencionado, en las iglesias de adobe es de gran importancia mencionar los pormenores del sobrecimiento, Figura 3.4. Es decir, la conexión entre la piedra proveniente de las fundaciones y el adobe. Este sobrecimiento influye en la caracterización de las paredes en altura, al tener en cuenta los cambios de propiedades mecánicas de los materiales. Una unión insuficiente de los materiales puede hacer de ese punto de conexión un punto crítico que desencadene el volteo de la pared. De igual forma, este cambio de material influye en la altura efectiva de la edificación.



Figura 3.4: Demostración de la separación de los materiales; (a) Iglesia Andahuaylillas; (b) Iglesia Canincunca; (c) Iglesia Lucre

A partir de lo anterior, podemos concluir que la altura del sobrecimiento no es significativa o suficiente, es decir, por lo general la altura del sobrecimiento no supera los 2 metros. En consecuencia, solo se entiende como una variable de influencia en el desempeño estructural cuando la altura presenta una relación de alrededor de 30% de la altura total, como por ejemplo, la Iglesia de San Cristóbal que presenta un sobrecimiento de 3.5 m en los ejes de la cruz latina y 1.8 m en los demás ejes, ver Figura 3.5. El porcentaje fue asignado tomando en consideración la geometría y las alturas regulares de las iglesias.

En Iglesias que presenten una variación del material en altura, con una variación superior a 30%, como ya fue mencionado, se considerarán y caracterizarán cada uno de los materiales por separado. Posteriormente, se elegirá la categoría más desfavorable y a esa misma categoría se le bajará un nivel de desempeño.



Figura 3.5: Demostración del sobrecimiento en la Iglesia de San Cristóbal (a) Exterior; (b) Interior

Este parámetro está destinado a la evaluación de la calidad de la albañilería y su estado de conservación, con base en tres factores: 1) la homogeneidad, la forma y la dimensión del material; 2) la configuración del asentamiento y su disposición; 3) el tipo de cruzamiento de los paneles del muro;

Las paredes de adobe tienen como característica ser paredes estructurales no monolíticas NIKER (2010), es decir, presentan una conexión perfecta. NIKER (2010), menciona que según CORPUS (2010a), la argamasa que representa la unión entre los bloques está constituida por tierra aglutinante y, en algunos casos, cal. En algunos casos es posible observar en los bloques la presencia de algunos agregados, tales como arena, grava, y palla, tal como se muestra en la Figura 3.6.

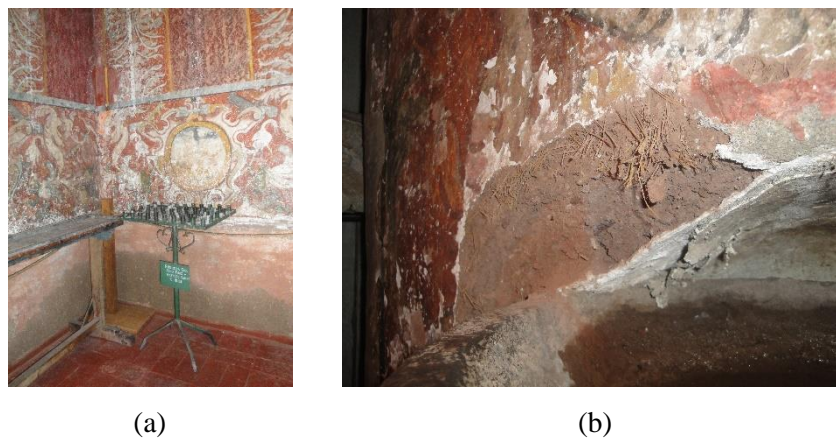


Figura 3.6: Demostración de palla presente en los bloques, en la Iglesia de Canincunca

En este parámetro, la primera fase consiste en la identificación del tipo del material, sus características físicas y mecánicas. El adobe, es un material de difícil catalogación, por lo tanto, las categorías presentadas no exhiben un gran número de diferenciación, ver Figura 3.7 y Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Ejemplos de albañilería de Adobe (Vicente; 2008)

A	-
B	Albañilería de adobe con una argamasa de buena calidad; (B1)
C	Albañilería de adobe con una argamasa de media calidad; (C1)
D	Tapial; (D1)

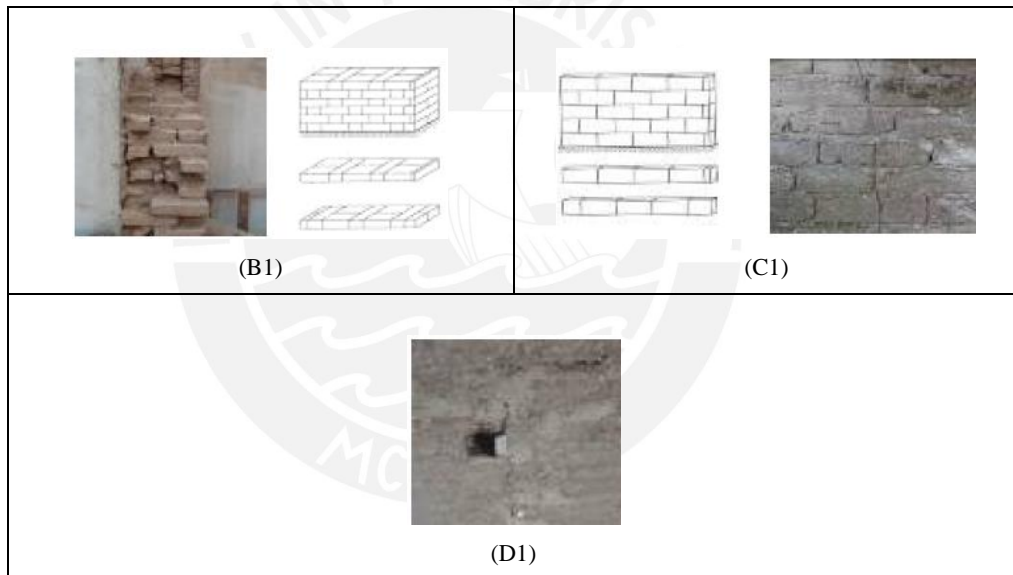


Figura 3.7: Ejemplos de albañilería de Adobe para las categorías B, C y D (Vicente; 2008)

Por otro lado, Vicente (2008) presenta una catalogación detallada para las construcciones en piedra. De las categorías expuestas por el autor, algunas fueron descartadas una vez que no se encontraba ese tipo de construcción en el Cusco. Las demás tipologías se pueden observar en la Figura 3.8. En la Tabla 3.6 se encuentra la descripción de las categorías a aplicar en la evaluación de las Iglesias Coloniales con construcción piedra.

Tabla 3.6: Ejemplos de albañilería de Piedra (Vicente; 2008)

A	Albañilería de piedra constituida por unidades homogéneas (material y dimensión) bien talladas (forma paralelepípedica), con un buen asentamiento y con utilización de una argamasa de buena calidad, presentando juntas verticales y horizontales; (A1)
	Albañilería de piedra de baja porosidad con un buen asentamiento y trabamiento. Presenta juntas verticales y horizontales bien argamasadas y definidas. Argamasa de buena calidad; (A2)
B	Albañilería de piedra construida por unidades no homogéneas (dimensiones), aunque presenta buen trabamiento y una superposición longitudinal y transversal. Argamasa de buena calidad; (B1)
	Albañilería de piedra (poco tallada) con uso de piedra o elementos cerámicos con dimensiones similares al espesor de las paredes. Esto tiene como finalidad crear una ligación transversal en todo su espesor. Argamasa de buena calidad; (B2)
	Albañilería en piedra de baja porosidad, con buen asentamiento y trabamiento, con juntas verticales y horizontales argamasadas. Argamasas de calidad mediana; (B3)
C	Albañilería de piedra tallada rudimentariamente, de forma irregular, con trabamiento y asentamiento irregulares. Argamasa de calidad mediana; (C1)
	Albañilería de piedra regular y arredondeada, con ligación transversal. Argamasa de calidad mediana; (C2)
	Albañilería de piedra irregular, sin ligación transversal. Asentamiento irregular y argamasa de mala calidad; (C3)
	Albañilería de dos paneles (parámetro externo e interno) compuesto por piedra irregular y fragmentos (piedra, elementos cerámicos, etc) con un núcleo de resistencia considerable. Asentamiento irregular y argamasa de calidad mediana; (C4)
D	Albañilería de piedra irregular no trabajada de elevada o mediana porosidad. Asentamiento deficiente (formación de vacíos) sin elementos o líneas de ligación transversal. Asentamiento y trabamiento deficientes. Argamasa de mala calidad; (D1)
	Albañilería de dos paneles, con núcleo parcialmente vacíos e inestables (sin consistencia). Argamasa de mala calidad; (D2)



Figura 3.8: Ejemplos de albañilería de Piedra para las categorías A, B, C y D (Vicente; 2008)

Según Vicente (2008) el año de construcción, las eventuales intervenciones sobre la iglesia y el estado de conservación, son factores que deberían ser tenidos en cuenta, pues constituyen factores de corrección. Las subdivisiones por año se basaron en dos marcos importantes para la ciudad de Cusco y, en especial, para las iglesias que sufrieron daños estructurales intensos. Esos marcos corresponden a dos grandes terremotos que ocurrieran en 1650 y en 1950. El hecho de que las iglesias ya hayan presenciado terremotos de grandes aceleraciones puede originar que el material ya haya sufrido cambios en su rango elástico; lo que ocasiona una variación de sus características iniciales y una disminución de su capacidad resistente. El templo de la Compañía es un ejemplo que demuestra daños estructurales muy agravados en este último terremoto, al igual que otras iglesias tal como podemos observar en la Figura 3.9.

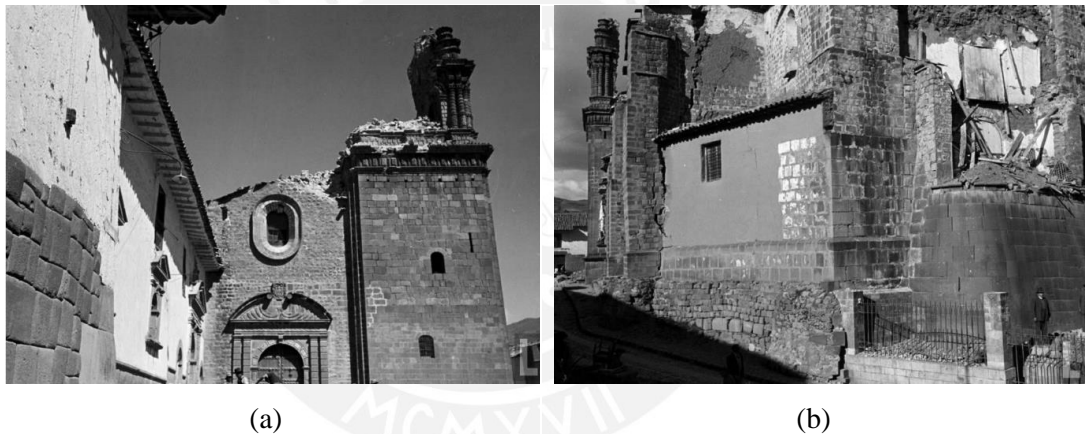


Figura 3.9: Demostración de los daños causados por el terremoto de 1950 (a) Templo de San Domingo; (b) Compañía de Jesús

La Tabla 3.7 se refiere a la evaluación del parámetro P2, y considera todas las variables de influencia.

Tabla 3.7: Corrección de la clase de vulnerabilidad del parámetro P2

Tipología Estructural		Clase de Vulnerabilidad				Sobrecimiento	Año de Construcción			Intervenciones Efectuadas	
		A	B	C	D		Anterior a 1650	1650-1950	>1950	Refuerzo Sísmico	Consolidación
Tipo	D				D	D	D	D	D	B	C
	C			C		D	D	C	C	B	C
	B		B			C	C	B	B	A	A
	A	A				B	C	B	B	A	A

En caso de cualquier incertidumbre, se optará por la categoría más desfavorable.

Parámetro P3: Localización e Interacción

La interacción entre los edificios influencia su respuesta frente a una acción horizontal. Cuando los edificios se encuentran acostados puede originarse el efecto Pounding, ocasionando por el aplastamiento de las edificaciones en el punto donde ha sido impactadas, ver Figura 3.10. A su vez, cuando se encuentran aislados se comportan como una sola estructura, sin interferir sobre las demás.

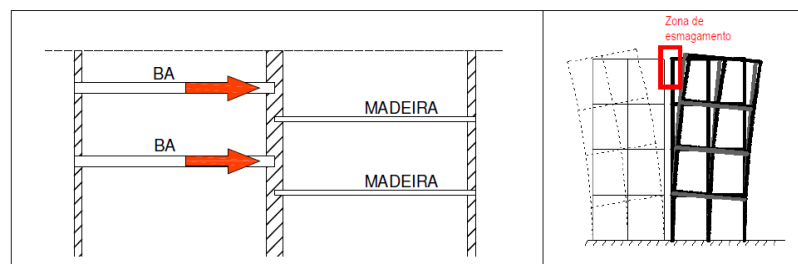


Figura 3.10: Efecto Pounding (Vicente, 2008)

Según Vicente (2008), el efecto Pounding sobre la construcción de una edificación es grave cuando el desnivel en relación a las demás edificaciones supera los 0.50 m. En consecuencia, la formulación inicial propuesta por Vicente (2008) se modificó para adaptarse a la situación más favorable. Se consideró como el caso más favorable el de la edificación aislada, seguido por la edificación ubicada en el medio. Otros factores de influencia se pueden observar en la Figura 3.11, como por ejemplo si la edificación se encuentra en zonas de riesgo, como de taludes acostados de grandes pendientes. En caso de observación de situaciones irregulares del terreno que puedan dañar la iglesia a largo plazo, tal como se muestra en las imágenes de la Figura 3.11, se bajará una categoría, ver Tabla 3.8.



Figura 3.11: Desnivelado del terreno (MODELLO A-DC)

En la Tabla 3.8 se presentan las clases de vulnerabilidad propuestas por el parámetro P3.

Tabla 3.8: Definición de las clases de vulnerabilidad P3

Localización	Clase	Desnivel en el Pavimento (Pendiente)	En Relevo, o con efecto Vaso Geológico, o en Peligro de Avalancha
Situado en el medio	B	-	C
		C	D
Aislado	A	-	B
Situado en la esquina	C	-	D
		D	D
Situado en el extremo	D	-	D

Parámetro P4: Irregularidad en Planta

Vicente (2008) señala que el desempeño estructural, o incluso, la vulnerabilidad de una edificación, están condicionados por la disposición en planta de los elementos estructurales. Este parámetro consiste en un análisis expedito, es decir, con base en relaciones geométricas. Las iglesias, tal como ya ha sido mencionado, presentan tres principales formas en planta. La cruz latina, la basilical y la rectangular, ver Figura 3.12.

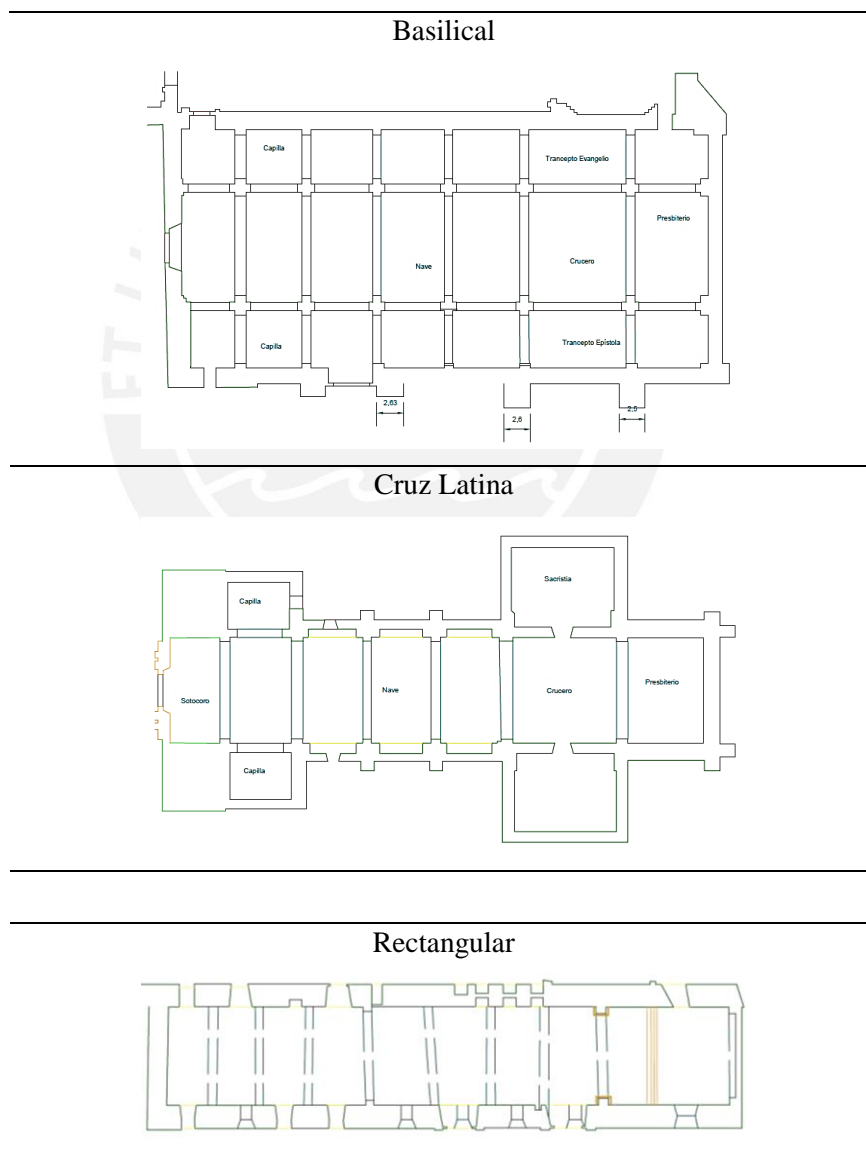


Figura 3.12: Geometrías en Planta típicas en las Iglesias Coloniales

Tal como fue representado en la Figura 3.12 en este parámetro solamente es considerada la estructura original, es decir, no se consideran los elementos secundarios como capillas que no posean una altura igual a la altura efectiva de la nave de la iglesia.

Vicente (2008) presenta seis relaciones geométricas basadas en criterios de simetría. De los parámetros presentados por el autor solo dos de ellos se encuadran en las tipologías en estudio, ver Figura 3.13, donde se relacionan según las ecuaciones (3.1) y (3.2).

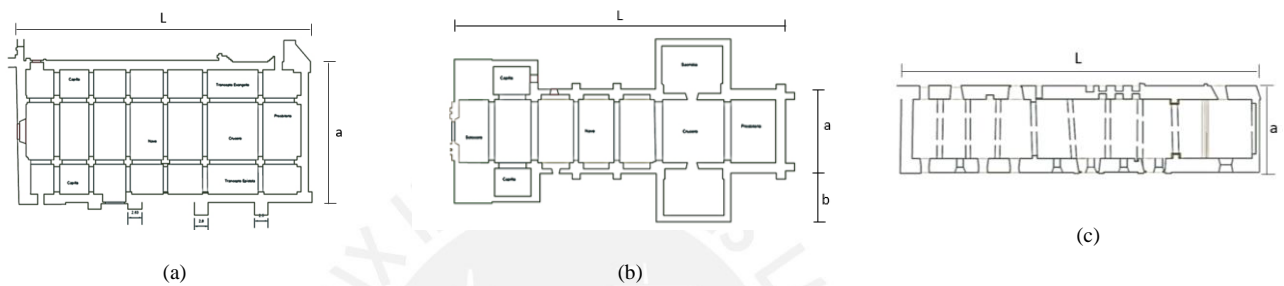


Figura 3.13: Relación Geométrica para cada tipología. (a) Basílica; (b) Cruz Latina; (c) Rectangular;

$$\beta_1 = \frac{a}{L} \quad (3.1)$$

$$\beta_2 = \frac{b}{L} \quad (3.2)$$

Donde:

L-mayor dimensión de la edificación;

a-menor dimensión de la edificación;

b-dimensión de la saliencia

El mismo autor presenta una evaluación más rigurosa que consiste en hallar la excentricidad entre el centro de masa y centro de rigidez. A su vez, este tipo de evaluación exige un mejor conocimiento de la edificación. Por lo tanto, después de un análisis y, como el método se basa en una evaluación rápida, a continuación, solo se exhibirá el análisis expedito, Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Definición de las clases de vulnerabilidad P8

Clase	Criterio Geométrico	
A	$\beta_1 \geq 0.75$	$\beta_2 \leq 0.1$
B	$0.5 \leq \beta_1 < 0.75$	$0.1 < \beta_2 \leq 0.2$
C	$0.25 \leq \beta_1 < 0.5$	$0.2 < \beta_2 \leq 0.3$
D	$\beta_1 < 0.25$	$\beta_2 < 0.2$

Parámetro P5: Resistencia al Corte

El parámetro P5 está destinado igualmente a un análisis global de la edificación, el cual verifica su resistencia global al corte. El análisis es realizado según un cálculo expedito de la resistencia a una acción lateral como la acción sísmica. En este parámetro es considerado que los pavimentos son infinitamente rígidos, lo que no se verifica en las iglesias objeto de estudio. Un pavimento infinitamente rígido significa que la transmisión de cargas es ejecutada perfectamente. Por observación, podemos concluir que las ligaciones presentes no siempre son las más eficientes, lo que implica una mala transmisión de las cargas. Las malas ligaciones también pueden desarrollar inestabilidad estructural, una vez que los tirantes son el medio de ligación entre paredes ortogonales. Esto ocasiona que la edificación tenga un solo movimiento. Así, es posible concluir que el diafragma ejerce una gran influencia sobre el comportamiento global de la edificación.

En la metodología de evaluación presentada por Vicente (2008), es mostrada la expresión de Tumšek e Čačovič (1971) que estima la última resistencia al corte, T_u , de una pared en función de su tensión característica, τ_k , y del nivel de tensión instalado, σ_0 , Tabla 3.11. Con esta resistencia última, se puede evaluar la resistencia a la acción horizontal de un panel de albañilería equivalente. La evaluación inicia con la definición de la fuerza sísmica en la base, según la Norma Técnica Peruana E.030 ver Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Fuerza sísmica en la base presente en la Norma Técnica Peruana (E.030)

Fuerza sísmica en la base de las edificaciones (Definida por la Norma Técnica Peruana E.030)

$$V = \frac{Z * U * C * S}{R} * P$$

Donde:

Z- Factor de Zona;

U-Categoría de las Edificaciones y Factor de Uso;

C- Factor de Ampliación Sísmica;

S- Factor del Suelo;

R- Coeficiente de Reducción de las Fuerzas Sísmicas;

P- Peso total de la edificación, incluyendo carga muerta y el 50% de carga viva;

Iglesias (Edificaciones Importantes):

$U = 1.3;$

Calculo del Periodo Fundamental de Vibración:

$$T = \frac{h_n}{C_T}$$

C_T - 60 (Para edificios de albañilería)

h_n - Altura total de la edificación en m (altura promedio de 10m);

$$T = \frac{10}{60} \approx 0.167$$

Para $T \approx 0.167$, independiente del tipo de suelo:

$C = 2.5;$

Coeficiente de Reducción de las Fuerzas Sísmicas:

$$R = R_0 * I_a * I_p$$

Según el OCPM 3274 (2003) en la sección 8.1.1 el factor de seguridad a utilizar para estructuras de albañilería será 2. Por lo tanto:

$$R = 2$$

$$V = \frac{Z * S * 1.3 * 2.5}{2} * P$$

$$V = 1.625 * Z * S * P$$

Para la Zona de Cusco:

$$Z = 0.25g;$$

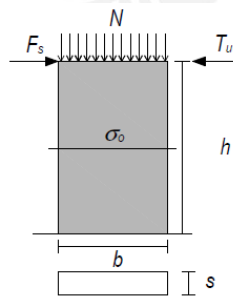
y considerando el tipo de suelo como Intermedio, S2:

$$S = 1.2;$$

$$V = 1.625 * 0.25 * 1.2 * P$$

$$V = 0.488 * P$$

Tabla 3.11: Resistencia al Corte (Vicente; 2008)



T_u - Resistência ao corte última

$A = b * s$ -Área de la sección de la pared;

τ_k -Resistencia al corte característica;

$\sigma_0 = N/A$ -Tension normal vertical;

$$T_u = A * \tau_k \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 * \tau_k}}$$

(Tumšek e Čačovič, 1971)

Verificación Sísmica

$$T_u \geq 0.488 * P;$$

La fuerza sísmica arriba presentada, está definida según la Norma Técnica Peruana E.030 (2016). En el trabajo de Vicente (2008), la fórmula arriba presentada es reescrita en función de la tensión tangencial característica τ_k y de la carga vertical σ_0 . Según el mismo autor, la evaluación de la capacidad de resistencia al corte va a resultar en valor de coeficiente C_{corte} .
Tabla 3.12.

Tabla 3.12: Coeficiente al corte (Vicente, 2008)

Calculo de la Resistencia al Corte (C_{corte})

$$C_{corte} = \frac{a_0 * \tau_k}{q * N} * \sqrt{1 + \frac{q * N}{1.5 * a_0 * \tau_k * (1 + \gamma)}}$$

Donde:

$$q = \frac{(A_x + A_y) * h * p_m}{A_t}$$

q – Peso medio de un piso por unidad de área cubierta

τ_k – Resistencia al corte kPa

N – Carga Aplicada kN

$A_{min} = \min(A_x, A_y)$;

$A_{m\acute{a}x} = \text{m}\acute{a}x(A_x, A_y) ;$ $a_0 = A_{min}/A_t ;$ $\gamma = A_{min}/A_{m\acute{a}x} ;$ A_{min} – Área mínima (m^2) ; $A_{m\acute{a}x}$ – Área máxima (m^2) ; A_t – Área Cubierta (m^2) ; A_x, A_y – Área total de pared resistente en la dirección XX y YY respectivamente (m^2); h – Altura media entre pisos; p_m – Peso específico de albañilería (kN/m^3); Tabla 3.13
--

El análisis deberá ser ejecutado en las dos direcciones. El valor final elegido será el más desfavorable.

Tabla 3.13: Ejemplo de valores característicos del peso específico y de la resistencia al corte

Peso Específico		
Adobe	15.1 kN/m^2	(Ivancic et al, 2014)
Piedra	24 kN/m^2	
Resistencia al Corte		
Adobe	24.52 kN/m^2	(Norma Técnica Peruana E.080)
Piedra		
• Piedra tallada y bien compacta	70 – 90 kN/m^2	(Vicente, 2008)
• Piedra Irregular en buenas condiciones	40 kN/m^2	
• Piedra en malas condiciones (forma irregular)	20 kN/m^2	

La definición de la clase de vulnerabilidad será establecida por el cociente representado en la siguiente ecuación:

$$\alpha = C_{conv}/\bar{C} \quad (3.3)$$

Donde:

C_{conv} – Resistencia Convencional;

\bar{C} – Valor correspondiente a la fuerza sísmica máxima para el Perú;

Entonces:

$$\alpha = \frac{C_{conv}}{1.625 * Z * S}$$

Para la Zona de Cusco y considerando el suelo tipo S2:

$$\alpha = C_{conv}/0.488$$

Tabla 3.14: Definición de las clases de vulnerabilidad para el parámetro P5

A	Iglesia con $\alpha \geq 1.0$
B	Iglesia con $0.6 \leq \alpha < 1.0$
C	Iglesia con $0.4 \leq \alpha < 0.6$
D	Iglesia con $0.4 \leq \alpha$

Parámetro P6: Distancia máxima entre paredes

El estudio de la distancia máxima entre paredes se refiere a la resistencia lateral, es decir, a la estabilización de la estructura. De esa forma, el objetivo es comprender la capacidad de resistencia frente a fuerzas laterales. Los principales parámetros para su análisis son la altura y la longitud de la pared, con la finalidad de verificar la estabilidad lateral. En este parámetro solamente es considerado un elemento estructural sísmo-resistente, en caso de que la altura del elemento sea igual a la de la nave de la iglesia.

Para la albañilería de adobe los valores asignados se basaron en la Norma Técnica Peruana de Adobe E.080 (2017), capítulo 6, sección 6.6. El análisis se fundamenta en dos parámetros recomendados para la albañilería de adobe, a saber, la esbeltez vertical y la esbeltez horizontal, ver Figura 3.14. La esbeltez consiste en la relación de la altura con el espesor y el ancho longitudinal con el espesor, respectivamente, ver ecuación (3.4) y (3.5).

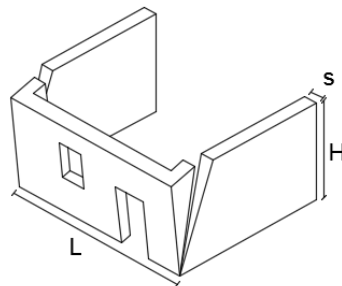


Figura 3.14: Representación de las variables de influencia en el parámetro P_6

$$\lambda_v = \frac{H}{s} \quad (3.4)$$

$$\lambda_h = \frac{L}{s} \quad (3.5)$$

La esbeltez de muros de adobe se puede clasificar como gruesos $\lambda < 6$, intermedios $6 < \lambda < 8$ y delgados $\lambda > 8$. Cancino et al (2012) constató que los muros gruesos tienen mayor posibilidad de supervivencia frente a los sismos en comparación con los muros delgados. Con base en la sección de los muros sabemos que, en el caso de paredes delgadas, estas resultan en una mayor inestabilidad tan pronto como se formen fisuras producidas por esfuerzos internos debido a los sismos.

Tal como ha sido mencionado en este parámetro, para la catalogación de las estructuras de adobe, se tiene en cuenta la esbeltez de las mismas y la ecuación propuesta en las recomendaciones, ver Figura 3.27.

Tabla 3.15: Definición de las clases de vulnerabilidad para edificaciones de Adobe P6

	λ_v	λ_h	$\lambda_h + 1.25\lambda_v \leq 17.5$
A	$\lambda_v \leq 6$	$\lambda_h \leq 10$	Cumple
B	$6 < \lambda_v \leq 8$	$\lambda_h \leq 10$	Cumple
C	$6 < \lambda_v \leq 8$	$\lambda_h \leq 10$	No Cumple
D	$\lambda_v > 8$	$\lambda_h > 10$	No Cumple

Igualmente, la albañilería de piedra también será catalogada según su esbeltez. La esbeltez vertical fue definida según el Eurocódigo 8 (CEN 2010) parte 1, sección 9.5.1 y la esbeltez horizontal fue presentada por Vicente (2008), ver Tabla 3.16.

Tabla 3.16: Definición de las clases de vulnerabilidad para edificaciones de Piedra P6

	λ_v	λ_h
A	$\lambda_v \leq 9$	$\lambda_h \leq 15$
B	$9 < \lambda_v \leq 12$	$15 < \lambda_h \leq 18$
C	$12 < \lambda_v \leq 15$	$18 < \lambda_h \leq 25$
D	$\lambda_v > 15$	$\lambda_h > 25$

Donde:

λ_v - Esbeltez vertical (Ecuación (3.4));

λ_h - Esbeltez horizontal (Ecuación (3.5));

Parámetro P7: Aberturas

La concentración de esfuerzos en las esquinas, en conjunción con la incompatibilidad de las propiedades mecánicas del adobe y del material presente en los dinteles, origina grietas comúnmente presentes en las esquinas superiores, tal como ha sido planteado por Torrealva (2003).

Peña y Lourenço (1996) mencionan tres recomendaciones referentes a las aberturas para edificaciones de tierra, que son:

- El ancho de una abertura no debe ser mayor de 1,2 m;
- La distancia entre una esquina exterior y la abertura no debe ser inferior a 1,2 m;
- La suma de los anchos de las aberturas en una pared no debe exceder 1/3 de la pared total longitudinal;

Lo mismo ha sido establecido para edificaciones en piedra, según UNESCO, *Guidelines For Earthquake Resistant Non-Engineered Construction* (2013), ver Figura 3.15.

- La suma de las aberturas ha de tener dimensiones inferiores a 0.3 del ancho total de la pared;
- La distancia entre la abertura al canto tiene que ser superior al 0.25 de la altura de la abertura de la mayor dimensión, y no debe superar los 0.6m.
- La distancia entre las aberturas tiene que ser superior a 0.5 de la altura de la abertura menor y no superior a 0.6m.

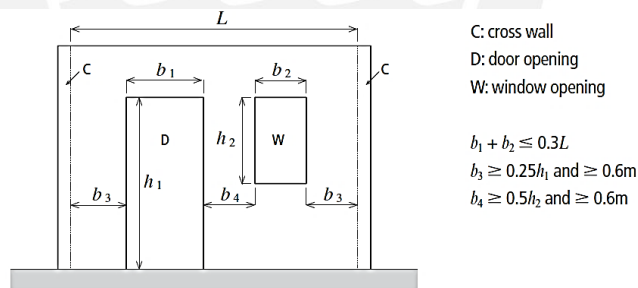


Figura 3.15: Representación de las recomendaciones para las aberturas en edificaciones de Piedra (UNESCO, *Guidelines For Earthquake Resistant Non-Engineered Construction*; 2013)

Vicente (2008) plantea que la desalineación vertical y horizontal influyen en los mecanismos de colapso fuera del plano cuando las estructuras se encuentran expuestas a una acción sísmica. El mismo autor señala que cuando expuestas a una aceleración, el efecto de desalineación de las aberturas se agrava, debido a la creación de cargas estáticas, tal como lo podemos observar en la Figura 3.16. Vicente (2008) también refiere que la desalineación es más grave cuando las aberturas se encuentran dispuestas irregularmente en plano vertical, en lugar de horizontal.

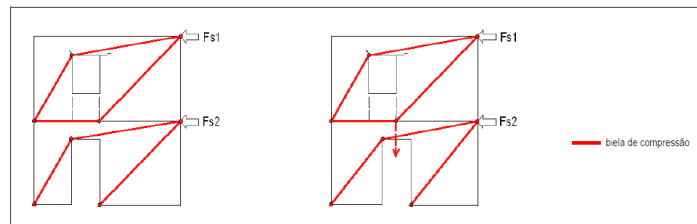


Figura 3.16: Efecto de desalineación de las aberturas (Vicente, 2008)

Las clases de vulnerabilidad asociadas a este parámetro están divididas según la influencia de la desalineación, la dimensión de la abertura, la sumatoria de las áreas de la abertura, y, por último, las distancias entre esquinas y aberturas para Iglesias de Adobe. En cuanto a las iglesias de Piedra, las clases de vulnerabilidad se determinan según la sumatoria de las aberturas, la distancia al canto y la distancia entre aberturas. La clase de vulnerabilidad asumida será de acuerdo con la peor opción posible, alegando siempre el peor caso, ver Tabla 3.17 y

Tabla 3.18.

Tabla 3.17: Parámetro de la clase de vulnerabilidad P7 para edificaciones de Adobe

		Ventanas	Puertas	Sumatorio de Aberturas	Distancia entre aberturas
A	Aberturas con dimensiones regulares y alineada en altura;	$< 1.2 m$	$< 1.2 m$	$\sum < \frac{1}{3} A_{total}$	$> 1.2 m$
B	Aberturas con dimensiones regulares o irregulares desalineadas horizontalmente en más de $\frac{1}{2}$ de su longitud;	$< 1.2 m$	$> 1.2 m$	$\sum < \frac{1}{3} A_{total}$	$> 1.2 m$
C	Aberturas con dimensiones regulares o irregulares desalineadas verticalmente en más de $\frac{1}{2}$ de su longitud;	$> 1.2 m$	$> 1.2 m$	$\sum < \frac{1}{3} A_{total}$	$< 1.2 m$
D	Aberturas de dimensiones regulares o irregulares totalmente desalineadas;	$> 1.2 m$	$> 1.2 m$	$\sum > \frac{1}{3} A_{total}$	$< 1.2 m$

Tabla 3.18: Parámetro de la clase de vulnerabilidad P7 para edificaciones de Piedra

		Sumatorio de Aberturas	Distancia al canto	Distancia entre aberturas
A	Aberturas con dimensiones regulares y alineadas en altura;	$\sum < 0.3L$	$> 0.25 * h_1 \wedge \geq 0.6m$	$> 0.5 * h_2 \wedge \geq 0.6m$
B	Aberturas con dimensiones regulares o irregulares desalineadas horizontalmente en más de ½ de su longitud;	$\sum < 0.3L$	$> 0.25 * h_1 \wedge \geq 0.6m$	$< 0.5 * h_2 \wedge \geq 0.6m$
C	Aberturas con dimensiones regulares o irregulares desalineadas verticalmente en más de ½ de su longitud;	$\sum < 0.3L$	$< 0.25 * h_1 \wedge \geq 0.6m$	$< 0.5 * h_2 \wedge \geq 0.6m$
D	Aberturas de dimensiones regulares o irregulares totalmente desalineadas;	$\sum > 0.3L$	$< 0.25 * h_1$	$< 0.5 * h_2$

Donde:

h_1 es la altura de mayor dimensión (Figura 3.15);

h_2 es la altura de menor dimensión (Figura 3.15);

L es el ancho de la pared (Figura 3.15);

Parámetro P8: Tipo de Cobertura

Este parámetro se basa en el análisis de la configuración estructural de la cobertura que consiste en el conocimiento de la tipología, la evaluación de las condiciones de apoyo y la cuantificación de las áreas de apoyo perimetral. Una conexión eficiente es de gran relevancia, pues evita la impulsión de la cobertura, lo que provocaría el colapso hacia afuera del plano de las paredes laterales, ver Figura 3.17. El principal objetivo es una eficiente transmisión de las cargas del techo de la edificación hacia las paredes.

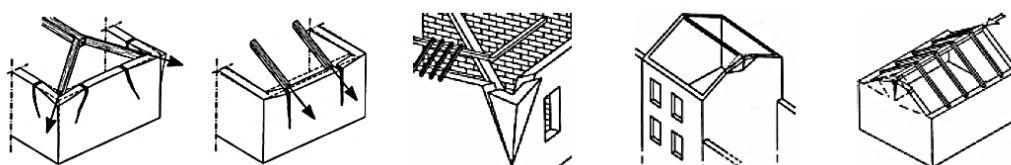


Figura 3.17: Demostración del movimiento impulsivo en las paredes (NIKER,2010)

Según Vicente (2008) las deformaciones en la parte superior de las paredes se deben a la mala conexión entre los diafragmas y paredes, lo que impide la distribución continua de los esfuerzos. El mismo autor refiere que en situaciones de mala conexión se genera una falta de bloqueo de las paredes y esto aumenta su inestabilidad estructural. Figura 3.18



Figura 3.18: Daño provocado y visible en una albañilería de piedra (NIKER,2010)

Para la evaluación de este parámetro vamos tener en cuenta algunos puntos principales de análisis, como la presencia de una viga que funciona como cinta, que se considerará bien conectada alrededor de la edificación. Estos elementos, cintas y tirantes, incrementan la capacidad de resistencia frente a una aceleración. Los elementos de apoyo consisten básicamente en elementos estructurales de amarre. La columna referente es válida cuando se verifica la presencia de cintas o tirantes de amarre en todo el perímetro en número y sección suficientes. Estos elementos de ligación deben presentar respectivamente una buena condición de amarre y tensión. Igualmente, deben presentar una buena capacidad para transmitir cargas verticales y de corte.

En las iglesias en estudio, es posible observar diferentes sistemas de apoyo de las coberturas, los cuales presentan características tradicionales. NIKER (2011) menciona que el daño de la cobertura puede ser sufrido por el deslizamiento de la conexión, lo que normalmente sucede

por la falla de las vigas. El mismo manual señala que el decaimiento ocurre debido a agentes ambientales o humedad. Las vigas de madera conforman la estructura tradicional de estos sistemas de apoyo tal como es mostrado en la Figura 3.19 y la Figura 3.20.

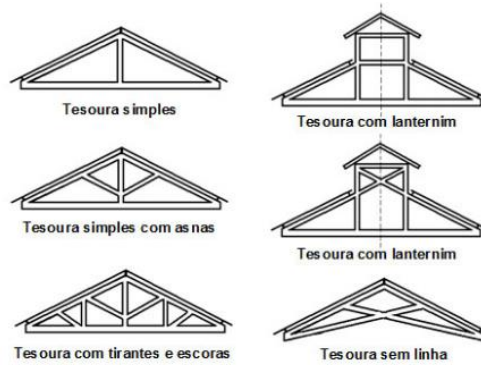


Figura 3.19: Ilustraciones típicas de techos en madera

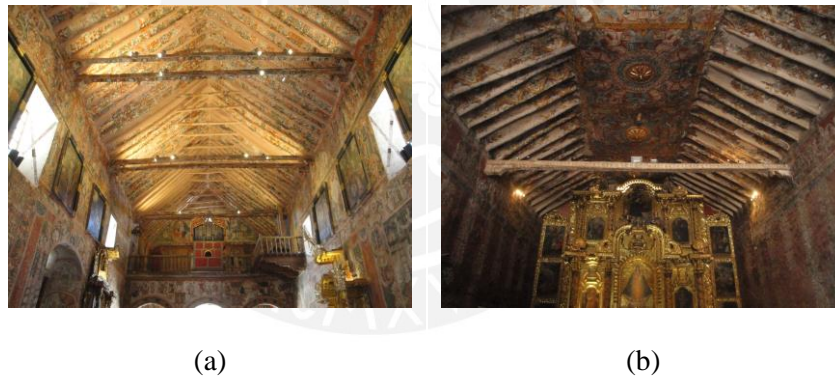


Figura 3.20: Representación del techo (a) Iglesia de Huaru; (b) Iglesia Canicunca

Vicente (2008) hace la distinción entre los diferentes tipos de cobertura según su impulsión. Así propone las categorías de no impulsivo, poco impulsivo e impulsivo, ver Figura 3.21. La caracterización de este parámetro será realizada según la catalogación del techo de acuerdo con su tipología estructural. Como ya ha sido mencionado, la presencia de cintas y tirantes es de gran importancia en las ligaciones, pues funciona como un factor correctivo del parámetro.

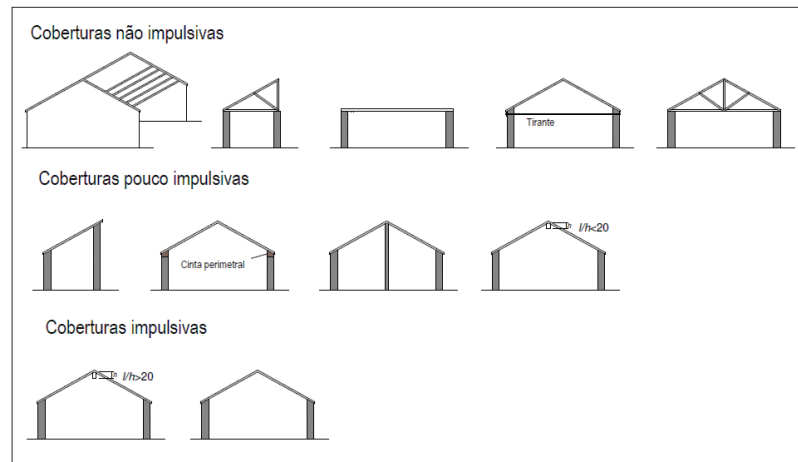


Figura 3.21: Caracterización tipológica de las coberturas (Vicente, 2008)

En la Tabla 3.19 se representan las clases de vulnerabilidad determinadas por el parámetro P7. En la caracterización de las cintas y tirantes, 1 corresponde a presencia de cintas y tirantes y 0 a su ausencia.

Tabla 3.19: Definición del parámetro de vulnerabilidad P12 (Vicente, 2008)

Impulso	Cinta Perimetral	Tirantes	Clase de Vulnerabilidad	Estado de Conservación	
				Malo	Muy malo
No Impulsivo	1	1	A	B	C
	1-0	1-0	A	B	C
	0	0	B	C	D
Poco Impulsivo	1	1	B	C	D
	1-0	1-0	B	C	D
	0	0	C	D	D
Impulsivo	1	1	C	D	D
	1-0	1-0	C	D	D
	0	0	D	-	-

Parámetro P9: Evaluación de la Fachada

El colapso de la fachada hacia afuera del plano es una de las principales causas de gran parte de los daños sufridos en la edificación, como fue posible observar en sismos anteriores. (Vicente; 2008, según Messina, 1908; Carlentini, 1990; en Italia).

Este parámetro se debe al hecho de que la fachada pueda presentar tres mecanismos de colapso diferentes, ver Figura 3.22. El primer mecanismo se refiere al volteo de la fachada, Figura 3.22 (a). La vulnerabilidad de este mecanismo responde a la mala conexión entre la fachada y las paredes laterales y, también, a la ausencia de tirantes longitudinales. El segundo mecanismo se refiere al volteo del tímpano, donde la vulnerabilidad ocurre debido a la presencia de aberturas anchas que debilitan la estructura y, igualmente, a la mala conexión con la cobertura, ver Figura 3.22 (b). El tercer mecanismo asociado es el mecanismo de corte, el cual se puede desarrollar debido a aberturas anchas o al empuje del techo sobre las paredes laterales y, también, a la falta de vigas laterales, Figura 3.22(c). (Langomarsino y Podostá; 2004)

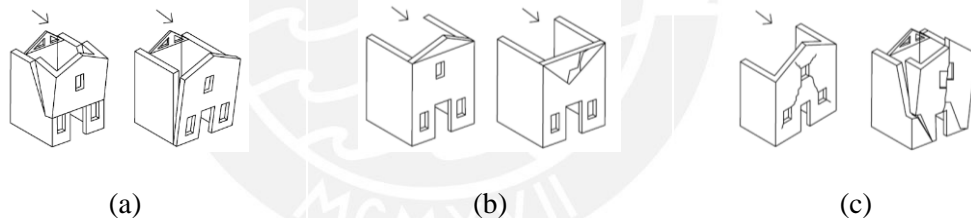
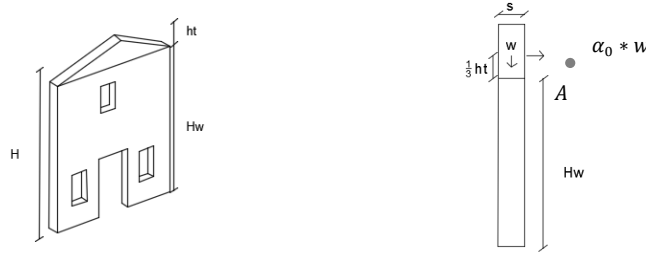


Figura 3.22: Mecanismos de colapso referente a los tres mecanismos de colapso; (a) volcamiento de la fachada; (b) volteo del tímpano; (c) mecanismo de corte (Langomarsino y Podostá; 2004)

Para la evaluación de todos los mecanismos de colapso posibles en este parámetro, se considerarán la geometría, la esbeltez vertical y el volteo del tímpano hacia fuera del plano. Para la contabilización del volteo del tímpano se recurrió al método cinemático de bloques, como podemos observar a continuación, ver Tabla 3.20.

Tabla 3.20: Definición de la influencia del tímpano

Calculo del volteo del tímpano para fuera del plan:



Legenda:

H – Altura total;

H_w – Altura hasta la línea de formación del mecanismo;

h_t – Altura del tímpano;

1. Calculo de la aceleración que el muro puede resistir (Capacidad):

Según la ecuación de momentos:

$$\sum M_A = 0$$

$$w * \frac{s}{2} = \alpha_0 * w * \frac{1}{3} * h_t$$

$$\alpha_0 = \frac{3 * s}{2 * h_t}$$

Transformación en 1GDL (grado de libertad):

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i * \delta_{xi})^2}{g * \sum_{i=1}^{n+m} P_i * \delta_{xi}^2} = \frac{(w * \frac{1}{3})^2}{g * w * (\frac{1}{3})^2} = \frac{w}{g}$$

Factor de participación:

$$e^* = \frac{g * M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = \frac{g * w/g}{w} = 1$$

Aceleración espectral:

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 * g}{e^* * f_c} = \frac{3 * s}{2 * h_t} * g$$

2. Cálculo de la Solicitación que puede estar sujeto:

Donde:

f_c – factor de conocimiento ≈ 1

a_0^* – límite de salvaguarda de vidas

$$a_0^* \geq \frac{Se(T1)' * \Psi(H_w) * \gamma}{q}$$

$$\Psi(z) = \frac{H_w}{H} \sim 1.2$$

Tal como ya fue mencionado, según la Norma Italiana el factor reductor asume el valor:

$$q = 2$$

$$\gamma = \frac{3N}{2N + 1}$$

considerando que una iglesia tiene aproximadamente 3 pisos $\sim 10m$

$$\gamma = 1.29$$

Periodo de la Iglesia del 1° modo de vibración:

$$T1 = C * H_w^{3/4} = 0.05 * 10^{3/4} \sim 0.28s$$

Como $T1 < T_p$ de la Norma Técnica Peruana E.030, $C = 2.5$

Para una Iglesias, $U = 1.3$

$$Se(T1)' = ZUSC$$

$$= Z * 1.3 * S * 2.5$$

$$= 3.25 * Z * S$$

Substituyendo valores:

$$a_0^* \geq \frac{3.25 * Z * S * 1.2 * 1.29}{2}$$

$$a_0^* \geq 2.52 * Z * S$$

Igualando la capacidad a la sollicitación:

$$\frac{3 * s}{2 * h_t} * g \geq 2.52 * Z * S$$

$$\frac{s}{h_t} \geq 2.52 * \frac{2}{3} * \frac{1}{g} * Z * S$$

Con base en los cálculos ejecutados, la condición general es:

$$\frac{s}{h_t} \geq 1.68 * Z * S$$

Donde:

$$\frac{s}{h_t} - \text{Elbeltez del timpano};$$

Podemos observar que la esbeltez está directamente dependiente de la zona y del tipo del suelo;

Para la Zona de Cusco:

$$Z = 0.25g;$$

y considerando el tipo de suelo como Intermedio, S2:

$$S = 1.2;$$

$$\frac{S}{h_t} = 1.68 * 0.25 * 1.2$$

Con base en los cálculos ejecutados, la condición tomada para Cusco será:

$$\frac{S}{h_t} = 0.50$$

La verificación ocurrió según el método de la Norma Italiana NTC 2008 y la Norma Técnica Peruana E.030.

Consideraciones aplicadas:

- Los parámetros fueron determinados para $H_w = 10 \text{ m}$ y $H = 12 \text{ m}$;
- Coeficientes de comportamiento $f_c = 1$ y $q = 2$;
- El peso una carga vertical permanente;
- Se considera una rotula en el extremo exterior de la espesura;

Este parámetro está dividido en dos puntos principales de evaluación. El primero se refiere a la geometría de la fachada, ver Figura 3.23 que es la medida indirecta entre el peso y la altura y la esbeltez vertical máxima. (Vicente, 2008)

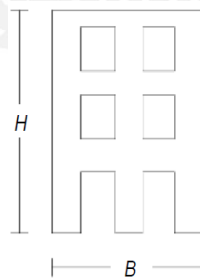


Figura 3.23: Relación de la geometría en la fachada

Las Tabla 3.21 y Tabla 3.22 presentan la definición de las clases de vulnerabilidad del parámetro 5 para adobe y piedra, respectivamente.

Tabla 3.21: Definición de las clases de vulnerabilidad para edificaciones de adobe P9

Geometría de la Fachada	λ_v	Tímpano $\frac{s}{h_t} \geq 1.68 * Z * S$
$\frac{H}{B} < 0.40$	$\lambda_v < 6$	A
		B
$0.40 < \frac{H}{B} < 0.60$	$6 < \lambda_v < 8$	B
		C
$0.60 < \frac{H}{B} < 1.00$	$6 < \lambda_v < 8$	C
		D
$\frac{H}{B} \geq 1.00$	$\lambda_v > 8$	D

Tabla 3.22: Definición de las clases de vulnerabilidad para edificaciones de piedra P9

Geometría de la Fachada	λ_v	Tímpano $\frac{s}{h_t} \geq 1.68 * Z * S$
$\frac{H}{B} < 0.40$	$\lambda_v < 9$	A
		B
$0.40 < \frac{H}{B} < 0.60$	$9 < \lambda_v < 12$	B
		C
$0.60 < \frac{H}{B} < 1.00$	$12 < \lambda_v < 15$	C
		D
$\frac{H}{B} \geq 1.00$	$\lambda_v > 15$	D

Donde:

$\frac{H}{B}$ - Criterio geométrico (Figura 3.23);

λ_v - Esbeltez vertical (Ecuación (3.4));

h_t – altura del espadaña;

s – espesor;

Parámetro P10: Campanario

Las torres son elementos estructurales caracterizados según su esbeltez, Figura 3.24. Según el manual NIKER (2011), las torres son un macro elemento donde la relación geométrica y estructural, altura, es descrita como la dimensión predominante. Esta característica geométrica, determina la performance dinámica y el comportamiento de la edificación, Sepe et al (2008).



Figura 3.24: Demostración de los diferentes tipos de torres. (a) Iglesia de San Pedro; (b) Iglesia de San Pablo; (c) Iglesia de Canincunca

Este macro elemento es caracterizado según el daño aparente de grietas en los puntos de conexión con la iglesia, o grietas verticales por debajo de la campana. La vulnerabilidad se debe al limitado espesor de las paredes del campanario esbelto y al tipo de albañilería utilizada, la cual presenta bajas características mecánicas y mala conexión entre paredes, Lagomarsino & Podestá (2004), Figura 3.25.

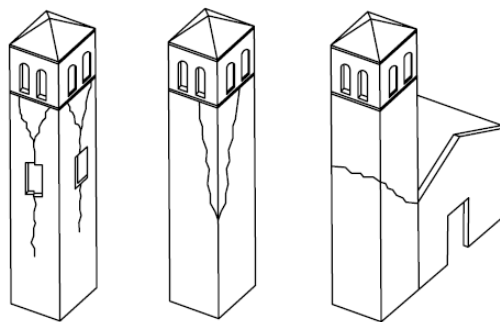


Figura 3.25: Macro elemento del Campanario (Lagomarsino & Podestá; 2004)

Sepe et al (2008) así como NIKER (2010) revelan la importancia de la posición de la torre en su comportamiento dinámico. Consideran que su posición está directamente relacionada con el daño que puede sufrir frente a un terremoto, Figura 3.26.

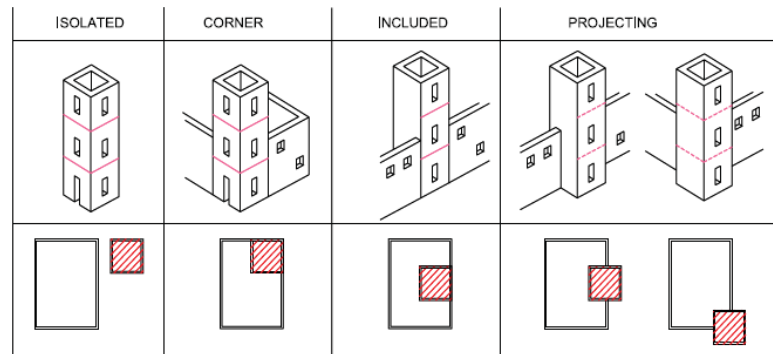


Figura 3.26: Posicionamiento de las Torres en el contexto urbano (Sepe, Vincenzo et al; 2008)

Podemos concluir, que el mejor escenario posible es la torre aislada, pues de esa forma puede moverse sola, sin ejercer un impacto sobre el resto de la estructura. Cuando está aislada, la torre asumirá directamente la Categoría A. Vicente (2008) para el caso particular de las torres, propone su evaluación según la relación de alturas, tal como se muestra en la Figura 3.27.

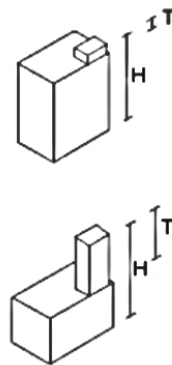


Figura 3.27: Criterio de evaluación de las torres (Vicente, 2008)

Para la subsección del parámetro, el primer factor en consideración es la presencia o ausencia de torres. La ausencia de torres se considerará el mejor escenario. El segundo mejor escenario es la presencia de torres con simetría en planta, lo que confiere mayor estabilidad. En la Tabla 3.23 se presentan las clases de vulnerabilidad establecidas en el parámetro P9.

Tabla 3.23: Definición de la clase de vulnerabilidad P9

Nº Torres	Relación de Altura	Aberturas	Clase de Vulnerabilidad
Sin Torre	-	-	A
1	$\frac{T}{H} < 10\%$	NO	B
		SI	C
	$10\% \leq \frac{T}{H} < 40\%$	NO	C
		SI	D
	$\frac{T}{H} > 40\%$	NO	D
		SI	D
2	$\frac{T}{H} < 10\%$	NO	A
		SI	B
	$10\% \leq \frac{T}{H} < 40\%$	NO	B
		SI	C
	$\frac{T}{H} > 40\%$	NO	C
		SI	D

Donde:

$\frac{T}{H}$ Relación de Alturas (Figura 3.27);

Parámetro P11: Espadaña

Las iglesias objeto de estudio presentan varios elementos que pueden tener funciones estructurales o no estructurales que, frente a un terremoto, pueden desarrollar mecanismos localizados de colapso. Entre estos elementos se encuentra la espadaña. La iglesia de San Juan Bautista de Huaro es un ejemplo de la presencia de una espadaña en piedra, ver Figura 3.28 (a). Al observar la espadaña podemos concluir que es un elemento independiente que se encuentra apoyado en un muro de adobe y que posee un peso elevado debido al material que contiene. Su espesor puede ser correspondiente con el del muro, lo que incrementa la estabilidad de la espadaña, pues se trata de muros anchos. La conexión presente entre el muro y la espadaña es prácticamente nula pues al estar superpuesta, la estabilidad es establecida por el peso propio del elemento.



Figura 3.28: Representación del Espadaño (a) Iglesia San Juan Bautista de Huaru; (b) Iglesia de Oropesa

Lagomarsino & Podestá (2004) caracterizaron dos mecanismos de colapso asociados como los son: el volteo de los elementos superiores que se debe a una rotación permanente global, Figura 3.29 (a) y el mecanismo en el campanario, Figura 3.29 (b) donde se observan fisuras en los arcos y rotación y deslizamiento de los pilares.

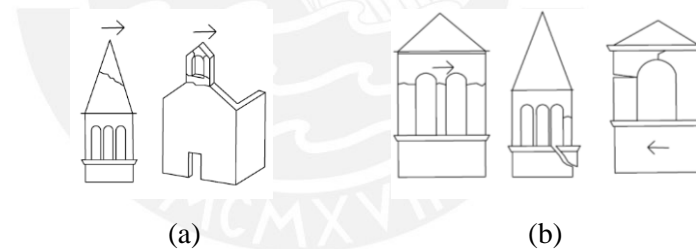


Figura 3.29: Mecanismos posibles de colapso asociados al espadaño (a) Volteo de los elementos superiores; (b) mecanismos del campanario

Para la catalogación de el parámetro P10, se consideran la influencia de la esbeltez vertical del elemento y la ecuación del volteo demostrada en el parámetro del análisis de la fachada, ver Tabla 3.24.

Para la zona de Cusco y un suelo tipo S2, considerar:

$$\frac{s}{h_t} = 0.50$$

Tabla 3.24: Definición de las clases de vulnerabilidad del parámetro P10

λ_v		$\frac{s}{h_t} \geq 1.68 * Z * S$
Adobe	Piedra	
$\lambda_v < 6$	$\lambda_v < 9$	A
		B
$6 < \lambda_v < 8$	$9 < \lambda_v < 12$	B
		C
$6 < \lambda_v < 8$	$12 < \lambda_v < 15$	C
		D
$\lambda_v > 8$	$\lambda_v > 15$	D
		D

Donde:

λ_v - Esbeltez vertical (Ecuación (3.4));

s – espesor;

h_t – altura del espadaña;

Parámetro P12: Capillas y Contrafuertes

Estos elementos no estructurales constituyen un parte resistente que impide el volteo hacia afuera del plano de las paredes. En el caso de los contrafuertes, algunos de ellos fueron introducidos después de la construcción inicial, lo que lleva a concluir que su implementación se debió a la necesidad de la existencia de un elemento que contrarreste el volteo, por lo que se consideran elementos sismo-resistentes. Estos elementos automáticamente disminuyen el ancho efectivo de la pared, lo que a su vez reduce el área efectiva y también la probabilidad de ocurrir un mecanismo de colapso localizado. Los dos elementos solo trabajan de forma efectiva cuando presentan una buena conexión a las paredes ortogonales, ya que cuando están mal conectados una aceleración sísmica ocasiona el aplastamiento de uno sobre el otro.

Los mecanismos de colapso posibles referentes a estos dos elementos pueden ser diferentes, una vez que la capilla puede sufrir un mayor número de mecanismos principalmente debido a la presencia de ventanas, las cuales propician daños por corte. Para la evaluación de este

parámetro, los factores a tener en cuenta son la distancia entre contrafuertes, la distancia perpendicular a la pared y la presencia de aberturas. Los valores aplicados estuvieron basados en las recomendaciones mencionadas por la UNESCO Guidelines For Earthquake Resistant Non-Engineered Construction (2013), ver Tabla 3.25.

Tabla 3.25: Definición de las clases de vulnerabilidad del parámetro P11 para edificaciones de Adobe

Distancia entre Contrafuertes o Capillas	Distancia perpendicular a la pared	Aberturas	Clase de Vulnerabilidad
$L \leq 10 * s$	$c \geq 3 * s$	NO	A
		SI	B
$L \leq 10 * s$	$c \geq 3 * s$	NO	B
		SI	C
$L \leq 10 * s$	$c < 3 * s$	NO	C
		SI	D
$L > 10 * s$	$c \geq 3 * s$	NO	C
		SI	D
$L > 10 * s$	$c < 3 * s$	NO	D
		SI	D

Las edificaciones en piedra solo exigen la utilización de elementos sismo-resistentes cuando sus paredes presenten una dimensión superior a 7 m de ancho. (UNESCO, Guidelines For Earthquake Resistant Non-Engineered Construction; 2013), ver Tabla 3.26.

Tabla 3.26: Definición de las clases de vulnerabilidad del parámetro P11 para edificaciones de Piedra

Distancia entre Contrafuertes o Capillas	Distancia perpendicular a la pared en la base	Distancia perpendicular a la pared en el tope	Aberturas	Clase de Vulnerabilidad
$L \leq 3m$	$c \geq h/6$	$b = s$	NO	A
			SI	B
$L \leq 3m$	$c \geq h/6$	$b = s$	NO	B
			SI	C
$L \leq 3m$	$c < h/6$	$b \neq s$	NO	C
			SI	D
$L > 3m$	$c \geq h/6$	$b \neq s$	NO	C
			SI	D
$L > 3m$	$c < h/6$	$b \neq s$	NO	D
			SI	D

Donde:

L - distancia entre contrafuertes;

$\frac{T}{H}$ – relación entre alturas (Figura 3.27);

c - el ancho en la base;

h - la altura del contrafuerte o capilla;

b - ancho en el tope;

s – espesor del muro;

Parámetro P13: Daños Estructurales

Por observación local nos es posible determinar la presencia de algunas patologías que influyen sobre la capacidad de resistencia, como es el caso de la humedad, los hongos y la vegetación. Esas patologías afectan directamente el desempeño estructural, ver Figura 3.30.



Figura 3.30: Patologías presentes en las Iglesias (a) Iglesia de Canincunca; (b) Iglesia Checacupe;

El parámetro se va centrar en la evaluación de las patologías observadas en la estructura, que, como consecuencia, ejercen influencia sobre los daños que pueden sufrir frente a una sollicitación sísmica. Las categorías están divididas por grado de desarrollo de las patologías y se basaron en el parámetro 13 de la metodología desarrollada por Vicente (2008), ver Tabla 3.27.

Tabla 3.27: Definición del parámetro de vulnerabilidad P13 (Vicente, 2008)

A	Paredes de albañilería en buen estado, sin daños visibles;
B	Paredes con grietas pequeñas (menos de 0,5 mm de ancho) no generalizado; Presencia de humedad, hongos o vegetación lo que deteriora las características de albañilería y conduce a la degradación del recubrimiento de madera y desglose de mampostería; Las grietas en el revestimiento no se propagan al soporte;
C	Paredes con grietas de abertura superior a 1.5 cm o que presentan grietas de forma generalizada (lo que puede ser el resultado de una acción sísmica anterior); Estructuras con un mal estado de conservación en los muros de albañilería, lo que compromete su resistencia global; Deformaciones graves tales como deformación de pavimentos, grietas inclinadas en paredes interiores de tabique, grietas a medio vano de aberturas; Presencia de hongos y vegetación en elementos estructurales de gran importancia;
D	Paredes con deterioro y agrietamiento severo, a pesar de que no se ha generalizado; Paredes con características físicas y materiales muy degradados que muestran una grave disminución de la resistencia; Arietamiento en lugares sensibles, como por ejemplo cerca de las esquinas (señales de discontinuidad entre paredes ortogonales); Daños introducidos por impulsos transmitidos por las coberturas, abultamiento de paredes resistentes, agrietamiento debido al asentamiento de la cimentación; Deslizamiento del marco de madera en relación con el marco de las paredes, la putrefacción y la degradación de la madera a lo largo de las paredes; Señales de rotación de las paredes hacia afuera del plano;

Parámetro P14: Elementos no Estructurales

Las iglesias objeto de estudio presentan una arquitectura cusqueña muy rica. Por lo tanto, para invertir en el turismo y para no tener pérdidas en el patrimonio histórico, cultural y religioso es necesario preservar los elementos que poseen. En estas iglesias es posible observar que existen elementos de gran valor y que es necesario hacer un análisis con el propósito de contribuir con su preservación. Los elementos decorativos como los cuadros son un buen ejemplo de esto, pues se trata de piezas que transmiten el valor cultural y demuestran el sincretismo cultural. Lo mismo ocurre con las pinturas o murales presentes en las paredes. En el caso de los cuadros, es necesario tener en cuenta la conexión a la pared, por otro lado, los

murales serán afectados por patologías que se pueden presentar en las paredes y techos, tales como la humedad y las grietas.

Elementos a tener en cuenta en el interior de la iglesia:

- Pinturas;
- Retablos
- Estatuas;
- Púlpito;
- Otros elementos;

Elementos a tener en cuenta en el exterior de la iglesia:

- Fachadas decorativas;
- Campana;
- Balcón decorativo;
- Elementos suspendidos;
- Otros elementos;

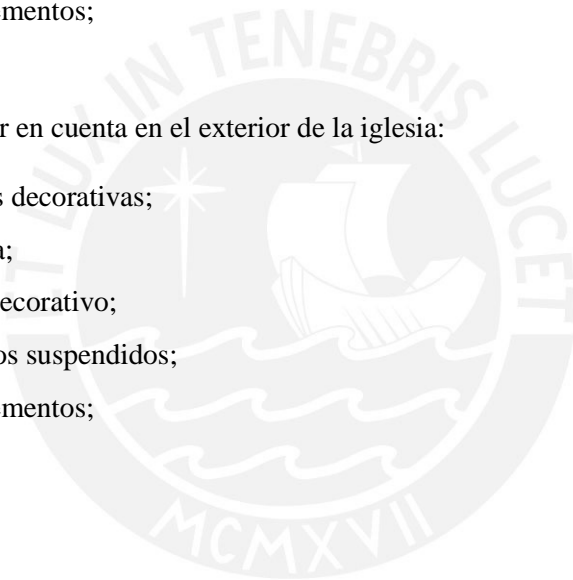


Tabla 3.28: Definición del parámetro de vulnerabilidad P14

A	Iglesias sin elementos decorativos; Los revestimientos en madera de los techos presentan un buen amarre;
B	Iglesias con elementos decorativos muy bien ligados a las paredes; Balcones integrados en la estructura del pavimento o paredes;
C	Iglesia con elementos externos a la estructura de pequeña dimensión y mal unidos a la estructura principal; Iglesias con recubrimientos / revestimientos de extensión reducida mal ligados o recubrimientos de gran extensión y bien conectados a la estructura;
D	Iglesia con elementos externos a la estructura de un peso considerable, mal conectados; Iglesia con balcones con mala conexión con los elementos horizontales, construidos después de las paredes con mala conexión a las paredes de albañilería; Iglesia con recubrimiento/ techos de gran extensión mal conectados;

3.3 DISCUSIÓN DE LOS PARÁMETROS

Tal como lo menciona Ferreira (2010), la metodología utilizada deberá estar ajustada a la naturaleza de la edificación, su función y su tipología de construcción. Con el objetivo de proponer un nivel de pormenorización aplicado directamente a iglesias coloniales, hemos reformulado algunos de los parámetros propuestos por Vicente (2008).

- El primer cambio notorio es la orden de presentación de los parámetros. Este cambio responde a una organización fundamentada en su diferenciación a partir de criterios como la influencia local, la influencia global, el estado de conservación y el análisis de los elementos no estructurales, ver Tabla 3.29 y Tabla 3.30 .

Tabla 3.29: Parámetros de Vulnerabilidad propuestos por Vicente (2008)

Parámetros de Evaluación		Clase				Peso p_i
		C_{vi}				
		A	B	C	D	
P1	Sistema Estructural Resistente	0	5	20	50	0.75
P2	Cualidad del Sistema Resistente	0	5	20	50	1.00
P3	Resistencia al Corte	0	5	20	50	1.50
P4	Distancia máxima entre paredes	0	5	20	50	0.50
P5	Altura del Edificio	0	5	20	50	1.50
P6	Posición del Edificado y sus Fundaciones	0	5	20	50	0.75
P7	Localización e Interacción	0	5	20	50	1.50
P8	Evaluación de la geometría en Planta	0	5	20	50	0.75
P9	Evaluación de la geometría en Altura	0	5	20	50	0.75
P10	Desalineación de las aberturas	0	5	20	50	0.50
P11	Diagramas horizontales	0	5	20	50	1.00
P12	Tipo de Cobertura	0	5	20	50	1.00
P13	Daños Estructurales	0	5	20	50	1.00
P14	Elementos no Estructurales	0	5	20	50	0.50

Tabla 3.30: Parámetros de Evaluación

Parámetros de Evaluación		Clase				Peso p_i
		C_{vi}				
		A	B	C	D	
Análisis Global						
P1	Sistema Estructural Resistente	0	5	20	50	0.75
P2	Cualidad del Sistema Resistente	0	5	20	50	1.00
P3	Localización e Interacción	0	5	20	50	1.50
P4	Irregularidad en Planta	0	5	20	50	1.50
P5	Resistencia al Corte	0	5	20	50	0.50
P6	Distancia Máxima entre Paredes	0	5	20	50	0.75
P7	Aberturas	0	5	20	50	0.50
P8	Tipo de Cobertura	0	5	20	50	1.00
Análisis Local						
P9	Evaluación de la Fachada	0	5	20	50	1.50
P10	Campanario	0	5	20	50	0.75
P11	Espadaña	0	5	20	50	0.75
P12	Capillas y Contrafuertes	0	5	20	50	1.00
Estado de Conservación						
P13	Daños Estructurales	0	5	20	50	1.00
Análisis de Elementos No Estructurales						
P14	Elementos no Estructurales	0	5	20	50	0.50

Los parámetros que sufrirán cambios drásticos respecto a los propuestos inicialmente por Vicente (2008) fueron los parámetros P1, P9, P10, P11 y P12. En los últimos 4 parámetros los cambios fueron pensados con el objetivo de realizar una evaluación más exhaustiva de algunos macro-elementos estructurales que ejercen una gran influencia en los sistemas estructurales de las iglesias objeto de estudio y que, sin embargo, no fueron considerados en ninguno de los otros parámetros.

- En el parámetro P1, Evaluación del Sistema Estructural Resistente, la modificación realizada tiene que ver con la adaptación del parámetro según la evaluación de las tipologías y sus mecanismos de colapso asociados en las Iglesias Coloniales. El estudio, basado en la propuesta de Huaranga (2017), consiste en la caracterización de

las tipologías según 12 macro elementos asignados, con un total de 44 mecanismos de colapso.

- El parámetro P5 de la anterior metodología, Altura del Edificio, fue reemplazado por el parámetro P9, Evaluación de la Fachada. Este parámetro se modificó una vez que las iglesias estudiadas no presentan cambios muy drásticos en altura, por lo que todas pertenecían en una misma categoría. En consecuencia, con la evaluación de la fachada podemos evaluar uno de los mecanismos de colapso localizados de las iglesias según sus relaciones geométricas y el análisis del tímpano.
- El parámetro P6, Posición del Edificado y sus Fundaciones y el parámetro P9, Evaluación de la Geometría en Altura fueron cambiados para el parámetro P10 y P11, Campanario y Espadaña respectivamente. Estos parámetros fueron reemplazados por macro-elementos asociados a las iglesias coloniales donde se evaluó sus características geométricas. El cambio del parámetro P6 se debió a la falta de información acerca de las bases de estas edificaciones. A su vez, el parámetro P9 fue reemplazada debido a la ausencia de cambios drásticos en la geometría en altura de las iglesias.
- Por último, el parámetro P11, Diafragmas Horizontales, fue reemplazado por la evaluación de Capillas y Contrafuertes, una vez que los diafragmas presentes en todas las edificaciones son diafragmas flexibles, por lo que todas las iglesias entrarían en una misma categoría. A su vez, este parámetro fue propuesto, pues tal como ha sido mencionado previamente, los elementos sismo-resistentes como contrafuertes y capillas, son elementos que impiden el volteo de la pared cuando presentan buenas conexiones. No obstante, la desventaja asociada es que una mala conexión puede tener un impacto negativo sobre la pared, lo que reitera la necesidad de una evaluación.

Los cambios propuestos presentan ciertos niveles de incertidumbre, puesto que no existen datos históricos ni investigaciones pasadas que sustenten parámetros geométricos de su vulnerabilidad estructural. Todas las modificaciones presentadas requieren ser validadas, para garantizar que la metodología sea la más adecuada posible. Del mismo modo, todos estos parámetros necesitan sustentaciones y validaciones futuras, es decir, esta metodología es un punto de partida para trabajos posteriores orientados a alcanzar mejores valores en los índices de vulnerabilidad y daño.

3.4 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

La metodología en estudio, se rige por un esquema de trabajos que determina las etapas de la evaluación. El estudio de la vulnerabilidad sísmica adaptado fue previamente desarrollado por Vicente en 2008, el cual consiste en el análisis de 14 parámetros según una media ponderada. A esta metodología se le añade el esquema de trabajo propuesto por Romão et al (2017), que consiste en hallar el índice de vulnerabilidad según los parámetros y compararlos, a posteriori, con la zona sísmica. Así se hallará el daño esperado para diferentes tipos de sismos. Tal como ha sido mencionado, el principal objetivo de esta metodología es establecer una lista jerarquizada de iglesias según el daño esperado. Para la verificación se esquematizó la metodología a utilizar, como podemos ver en las figuras, Figura 3.31 y Figura 3.32.

Tal como se muestra en la Figura 3.31, el esquema de trabajos empieza por la definición de los objetivos de performance, es decir, la introducción del nivel de desempeño pretendido frente a los diferentes tipos de sismos, ver Figura 3.33. En esta etapa se tiene la opción de elegir tres niveles de desempeño distintos para tres diferentes periodos de retorno. Posteriormente, se recolectan los datos de la edificación para proseguir con su evaluación. Al final de la evaluación, se verifica si los objetivos pretendidos han sido cumplidos. En caso de cumplirse, la iglesia responderá de acuerdo con lo esperado. De lo contrario, la edificación entrará en la lista de iglesias estudiadas que ameritan una evaluación posterior y que se encuentran dispuestas según su índice de vulnerabilidad.

La lista jerarquizada de iglesias será el punto de partida para la evaluación de la performance detallada, la cual consiste en un estudio avanzado analítico, ver Figura 3.32. Con este estudio se verificará si la iglesia cumple con los niveles de desempeño pretendidos. En caso afirmativo, la metodología se considerará concluida. De lo contrario, se procederá al estudio de intervenciones para que presente una mejor performance frente a una aceleración sísmica.

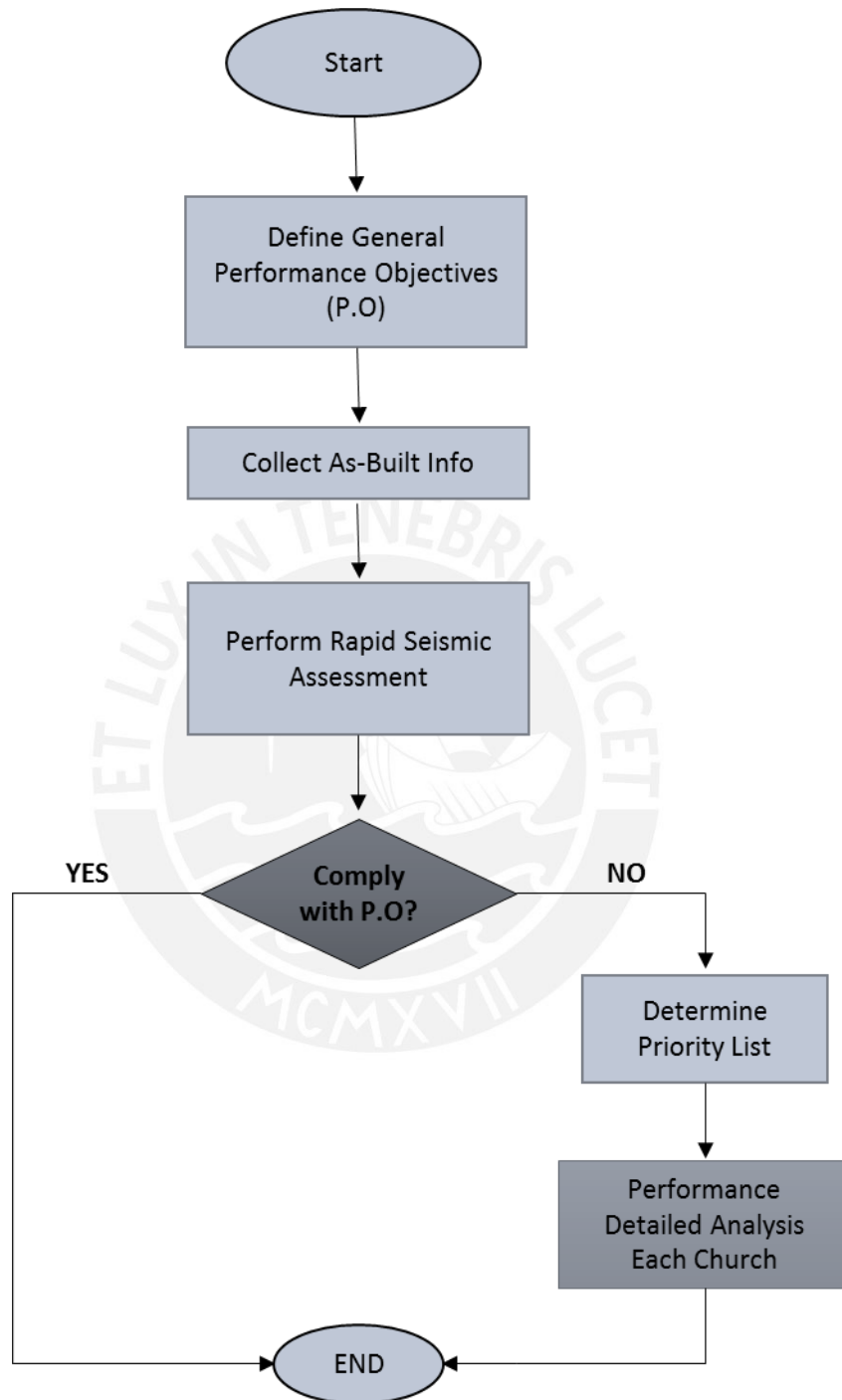


Figura 3.31: Esquema de Trabajos – Parte I

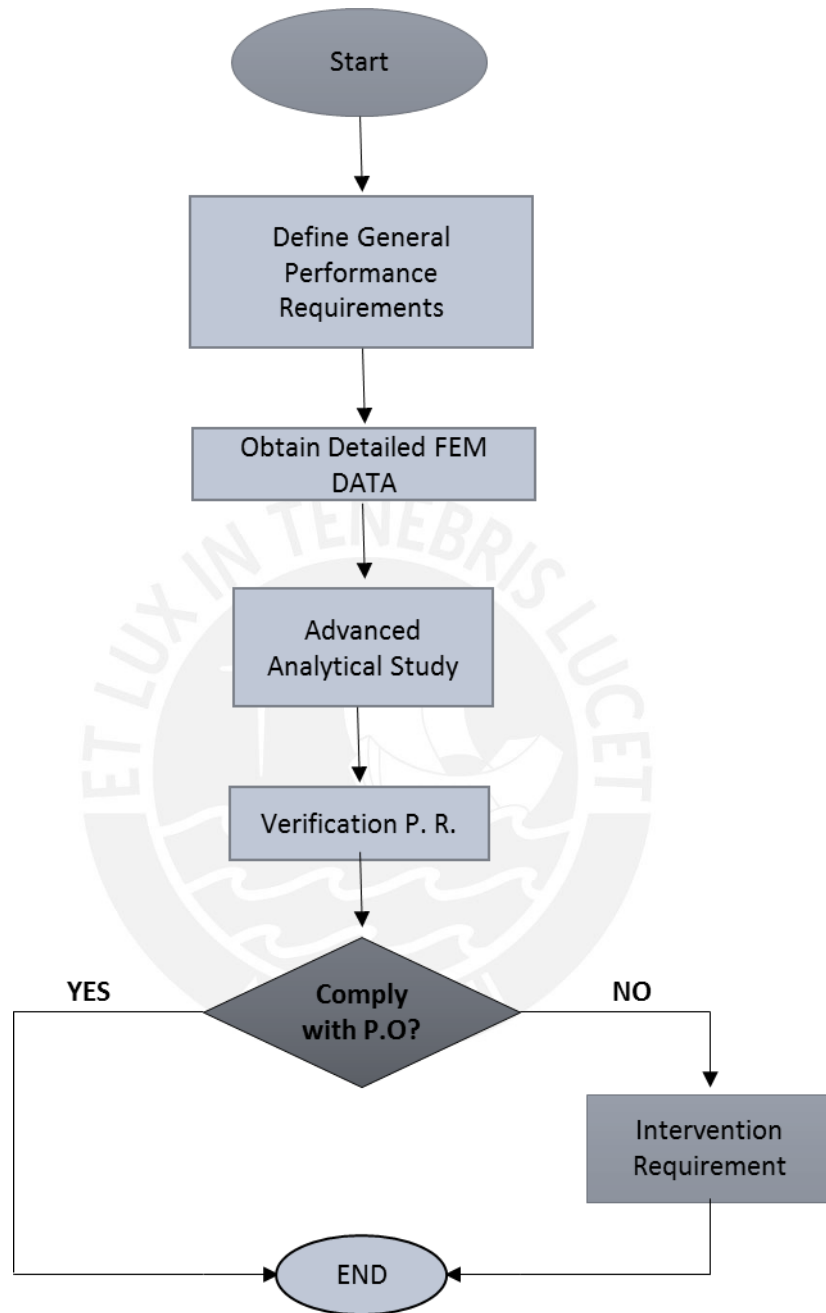


Figura 3.32: Esquema de Trabajos - Parte II

Tal como ya fue mencionado, el primer paso de la metodología de trabajo es la introducción del nivel de desempeño pretendido frente a los diferentes tipos de sismo, ver Figura 3.33.

		Matriz de Entrada		
		Intensidad del Terremoto		
		Frecuente	Ocasional	Raro
Daño Esperado	Daño Insignificante	L1	L2	L3
	Daño Moderado	M1	M2	M3
	Daño Fuerte	H1	H2	H3

Criterio: 1
2
3

Figura 3.33: Matriz de Entrada

Para la evaluación de desempeño sísmico, es recomendado el análisis según el daño esperado presentado por el SEAOC (1995). Las propuestas de desempeño definidas en el manual son caracterizadas según la importancia de la edificación y el nivel de amenaza, es decir, los periodos de retorno para los diferentes sismos. En la medida en que la metodología desarrollada está enfocada en iglesias, es decir, edificaciones esenciales, se esperará que la edificación se encuentre completamente operacional en caso de sismos ocasionales; operacional frente a sismos raros y, por último, en estatus de resguardo de vida frente a un sismo muy raro.

	Completamente Operacional	Operacional	Resguardo de Vida	Cerca al Colapso
Frecuente				
Ocasional				
Raro				
Muy Raro				

Edificaciones Comunes Edificaciones Esenciales Edificaciones de Seguridad Crítica

En ese sentido, el estatus completamente operacional implica la presencia de daños insignificantes; mientras que, al estar operacional, presentaría daños reducidos o moderados; y resguardo de vida implicaría un daño entre moderado y fuerte. En el punto cercano al colapso se considera un nivel de daño fuerte. (Priestley, 2000)

El paso que sigue es el cálculo del índice de vulnerabilidad según el análisis de los parámetros estudiados. La fórmula utilizada es la presentada en la Ecuación (3.7), la cual consiste en la

suma de la multiplicación del peso del parámetro por la categoría asignada, tal como ha sido expuesto por Vicente (2008).

$$I_v^* = \sum_{i=1}^{14} C_{vi} * p_i \quad (3.7)$$

Donde:

$$0 \leq I_v^* \leq 650$$

Índice de vulnerabilidad normalizado:

$$0 \leq I_v^* \leq 100$$

Con el valor obtenido, y según los valores presentados por Romão et al (2017), determinamos el color relacionado con la clase de fragilidad según la zona en estudio y el índice de vulnerabilidad. Los valores correspondientes son los siguientes: baja clase de fragilidad para valores de vulnerabilidad inferiores a 0.25; clase media de fragilidad para valores comprendidos entre 0.25 y 0.40 y clase alta de fragilidad para valores superiores a 0.40, Figura 3.34.

	i_v^*
Bajo	<0.25
Medio	$0.25 < i_v^* < 0.40$
Alto	>0.40

Figura 3.34: Rango de valores de la clase de fragilidad

Las aceleraciones del suelo (PGA) asignadas a las diferentes zonas del Perú para diferentes sismos, fueron halladas según factores de escala que se corresponderán con los diferentes periodos de retorno. Los factores de escala fueron calculados utilizando el programa CRISIS, el cual consiste en un modelo probabilístico que determina el Riesgo Sísmico. Los valores determinados por Noel (2017) son los mostrados en la Tabla 3.31.

Tabla 3.31: Factores escala para diferentes periodos de retorno (Noel, 2017)

Escenario Sísmico	Factores de escala
Frecuente	0.46
Ocasional	0.55
Raro	1
Muy Raro	1.22

La caracterización mediante colores de la clase de fragilidad se basa en las propuestas presentadas por Romão et al (2017). A partir de estas propuestas se ha adaptado el PGA presente en el Eurocódigo 8 (CEN 2010) al PGA establecido en la Norma Técnica Peruana E.030 (2016). Romão et al (2017) señalan que para clases de fragilidad bajas con aceleración comprendida entre 0.25g y 0.17g, el daño sería moderado; y para clases de fragilidad baja con aceleración comprendida entre los 0.11g y los 0.08g, el daño esperado será insignificante. Por otro lado, el daño esperado será fuerte para clases de fragilidad alta con aceleraciones comprendidas entre 0.25g y 0.11; mientras que para aceleraciones de 0.8g, el daño esperado será moderado. Es importante destacar que para toda aceleración mayor a 0.25g, se considerará daño esperado fuerte.

CFS	Sismo Frecuente				CFS	Sismo Ocasional				CFS	Sismo Raro			
	Z1	Z2	Z3	Z4		Z1	Z2	Z3	Z4		Z1	Z2	Z3	Z4
	0.05	0.12	0.16	0.21		0.06	0.14	0.19	0.25		0.10	0.25	0.35	0.45
Bajo	Yellow	Orange	Orange	Orange	Bajo	Yellow	Orange	Orange	Orange	Bajo	Yellow	Orange	Red	Red
Medio	Yellow	Orange	Orange	Red	Medio	Yellow	Orange	Red	Red	Medio	Orange	Red	Red	Red
Alto	Orange	Red	Red	Red	Alto	Orange	Red	Red	Red	Alto	Red	Red	Red	Red

Figura 3.35: Determinación del color que indica el daño esperado

Después de hallar la clase de fragilidad, se introducen los datos en la matriz de daño. El color asignado informará si el daño esperado será insignificante, moderado o fuerte, ver Figura 3.36.

Daño Esperado		
Insignificante	Moderado	Fuerte
Yellow	Orange	Red

Figura 3.36: Matriz de daño esperado

Esta verificación nos permite determinar si la Iglesia pasará y se aprobará según el desempeño pretendido.



CAPÍTULO IV: CASOS DE ESTUDIO

La aplicación práctica de esta metodología será ejecutada en tres Iglesias. En el estado de arte ya fue presentado un pequeño resumen de las características de las Iglesias y su historia. En el Anexo serán presentadas las fichas de las Iglesias con toda la información correspondiente.

4.1. IGLESIA DE SAN PEDRO APÓSTOL, ANDAHUAYLILLAS

En la Iglesia de estudio, el desempeño pretendido frente a los diferentes sismos es, ver Tabla 4.1:

Tabla 4.1: Datos de Entrada - Iglesia San Pedro Apóstol

		Matriz de Entrada		
		Intensidad del Terremoto		
		Frecuente	Ocasional	Raro
Daño Esperado	Daño Insignificante	L1	L2	L3
	Daño Moderado	M1	M2	M3
	Daño Fuerte	H1	H2	H3

Criterio: 1 **L1**
2 **M2**
3 **H3**

Parámetro P1

Material Dominante: Adobe

Forma en Planta: Cruz Latina

Tipología A-CL

Como la tipología de la Iglesia en estudio es Tipología A-CL, la categoría asignada es la categoría C.

Parámetro P2

Material Dominante: Adobe

Categoría B: Albañilería de adobe con una argamasa de buena calidad;

Como podemos observar, la iglesia presenta un sobrecimiento de 1.60 m de altura, por lo tanto, la categoría decrece un nivel y, como la iglesia fue construida en el siglo XVI, la categoría se mantiene como C. En suma, la clase de vulnerabilidad asignada al parámetro P4 es clase C.

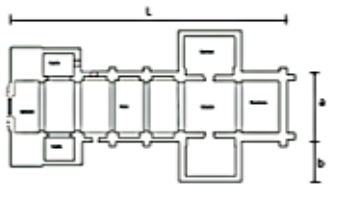
Parámetro P3

Localización:	Aislada
En Relevó:	NO
Sobre Efecto Vaso Geológico:	NO
En Peligro de Avalancha:	NO

Así, la categoría asignada al parámetro P3 es la categoría A.

Parámetro P4

Tabla 4.2: Relación Geométrica para la San Pedro Apóstol (a) Figura (b) Ecuación

 <p>(a)</p>	<p>Ecuaciones:</p> $\beta_1 = \frac{a}{L}$ $\beta_2 = \frac{b}{L}$ <p>(b)</p>
---	---

Datos:

- $a = 13.43 \text{ m}$
- $b = 7.06 \text{ m}$
- $L = 61.48 \text{ m}$

$$\beta_1 = 0.22 \text{ y } \beta_2 = 0.11$$

Como $\beta_1 < 0.22$ y $\beta_2 < 0.11$, la categoría de este parámetro será la categoría D.

Parámetro P5

Datos auxiliares:

A_{min}	$54.52 m^2$
$A_{máx}$	$236.96 m^2$
A_t	$807.44 m^2$
a_0	0.0675
γ	0.23
h	$10 m$
p_m (adobe)	$15.1 kN/m^2$

$$q = \frac{(54.52 + 236.96) * 10 * 15.1}{807.44} = 54.509 kN/m^2$$

Según la información hallada:

$$C_{corte} = \frac{0.0675 * 24.52}{54.509 * 1} * \sqrt{1 + \frac{54.509 * 1}{1.5 * 0.0675 * 24.5 * (1 + 0.23)}}$$

$$C_{corte} = 0.13$$

Así:

$$\alpha = \frac{0.13}{0.488} = 0.266$$

Con base en el resultado obtenido, la categoría asignada al parámetro P5 es la categoría D.

Parámetro P6

Ecuaciones:

$$\lambda_v = \frac{H}{s} \quad y \quad \lambda_h = \frac{L}{s}$$

Datos:

- $H = 10\text{ m}$
- $s = 1.90\text{ m}$
- $L = 11.60\text{ m}$

$$\lambda_v = 6.10 \rightarrow \text{Categoría A}$$

$$\lambda_h = 5.26 \rightarrow \text{Categoría A, B o C}$$

$$\lambda_h + 1.25\lambda_v \leq 17.5$$

$$5.26 + 1.25 * 6.10 \leq 17.5$$

$$12.885 \leq 17.5 \rightarrow \text{Cumple}$$

Con base en los resultados obtenidos, la categoría asignada, como cumple la ecuación requerida es la categoría A.

Parámetro P7

Como la fachada es la que presenta mayor número de aberturas y una menor área, es la más desfavorecida. Por consiguiente, pasamos a la evaluación de las aberturas en la fachada.

Ventanas:	0.93 m
Puerta:	2.90 m
Sumatorio das Aberturas	Puerta: 12.90 m ²
	Puerta Coro: 2.65 m ²
	Ventana Tímpano: 0.53m ²
Área da Fachada:	178.25 m ²
Distancia entre aberturas:	> 1.2 m



Figura 4.1: Representación de la Fachada con mayor número de aberturas, Iglesia San Pedro Apóstol

Según la información obtenida en las plantas arquitectónicas se puede decir que las dimensiones de las ventanas cumplen con el requisito, así como la condición de la sumatoria de las aberturas y la distancia entre estas a excepción de la puerta. Así, la categoría asignada es la categoría B.

Parámetro P8

Tipo de Cobertura: No Impulsiva

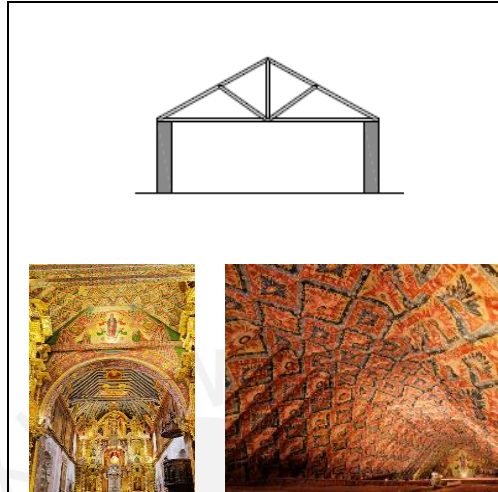


Figura 4. 2: Representación del tipo de cobertura, Iglesia San Pedro Apóstol

Por observación, concluimos que la cobertura es no impulsiva y que posee tirantes, de este modo, se clasifica como A. Relativamente a su estado de conservación se asignó que era malo con el objetivo de ser más conservativos. Al final, la categoría asignada es la categoría B.

Parámetro P9

Datos:

- $H = 10 \text{ m}$
- $B = 13.43 \text{ m}$
- $s = 1.9 \text{ m}$
- $h_t = 5.45 \text{ m}$

$$\frac{H}{B} = 0.75$$

$$\lambda_v = 5.26$$

$$\frac{s}{h_t} \geq 0.50 \text{ y } \frac{s}{h_t} = 0.35 \rightarrow \text{No cumple!}$$

Con base en los cálculos ejecutados, la categoría asumirá la categoría D.

Parámetro P10

Datos:

- N° de Torres: 1
- $T = 5.4 m$
- $H = 18.8 m$
- Aberturas: SI

$$\frac{T}{H} = 28.72\%$$



Figura 4.3: Representación de la torre, San Pedro Apóstol

En suma, la categoría asignada, es la categoría C.

Parámetro P11

La Iglesia no presenta Espadaña, por lo tanto, la categoría asignada es la categoría A.

Parámetro P12

Distancia entre Capillas:	4.11 m
Datos:	$T = 5.20m$
	$H = 10 m$
	$s = 1.90m$
Distancia Perpendicular:	$c = 6.68m$
Ventanas	SI

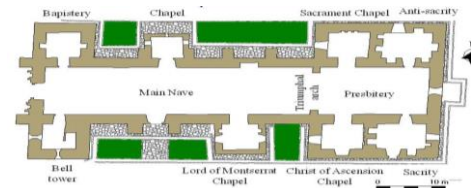


Figura 4. 4: Planta de la Iglesia San Pedro Apóstol

$$L = 10 * 1.9 = 19 \text{ y } 4.11 < 19 \rightarrow A, B \text{ o } C$$

$$c = 3 * 1.9 = 5.7 \text{ y } 6.68 > 5.7 \rightarrow A, B \text{ o } C$$

Con base en los cálculos asociados las categorías posibles serian A, B o C. Por lo tanto, la mejor era la A, pero como existe ventanas la categoría decreció para B.

Parámetro P13

Se asignó la categoría B, pues se considera la presencia de algunas patologías aun cuando estén en estado inicial.

Tabla 4.3: Categoría asignada al parámetro P13 para la Iglesia San Pedro Apóstol

B	Paredes con grietas pequeñas (menos de 0,5 mm de ancho) no generalizado; Presencia de humedad, hongos o vegetación lo que deteriora las características de albañilería y conduce a la degradación del recubrimiento de madera y desglose de mampostería; Las grietas en el revestimiento no se propagan al soporte;
---	---

Parámetro P14

La iglesia cuenta con un balcón en la fachada principal que lo consideramos como bien conectado, así como en sus paredes presentan una gran cantidad de cuadros de grandes dimensiones. En consecuencia, la categoría asignada fue la categoría B.



Figura 4. 5: Representación de los elementos no estructurales de Iglesia San Pedro Apóstol (a) Pormenor de los cuadros; (b) Vista interior en dirección a la fachada principal

Tabla 4.4: Categoría asignada al parámetro P14 para la Iglesia San Pedro Apóstol

B	Iglesias con elementos decorativos muy bien ligados a las paredes; Balcones integrados en la estructura del pavimento o paredes;
---	---

Según las categorías obtenidas se halló el índice de vulnerabilidad, ver Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Tabla de calificación del índice de vulnerabilidad para la Iglesia de San Pedro Apóstol

Índice de Vulnerabilidad							
Parámetros de Evaluación		Puntuación				p_i	$C_{vi} * p_i$
Análisis Global							
P1	Sistema Estructural Resistente	A	B	C	D	0.75	15
		0	5	20	50		
P2	Cualidad del sistema resistente	A	B	C	D	1.00	20
		0	5	20	50		
P3	Localización e Interacción	A	B	C	D	1.50	0
		0	5	20	50		
P4	Irregularidad en Planta	A	B	C	D	1.50	75
		0	5	20	50		
P5	Resistencia al Corte	A	B	C	D	0.50	25
		0	5	20	50		
P6	Distancia Máxima entre Paredes	A	B	C	D	0.75	0
		0	5	20	50		
P7	Aberturas	A	B	C	D	0.50	2.5
		0	5	20	50		
P8	Tipo de Cobertura	A	B	C	D	1.00	5
		0	5	20	50		
Análisis Local							
P9	Evaluación de la Fachada	A	B	C	D	1.50	75
		0	5	20	50		
P10	Campanario	A	B	C	D	0.75	15
		0	5	20	50		
P11	Espadaña	A	B	C	D	0.75	0
		0	5	20	50		
P12	Capillas y Contrafuertes	A	B	C	D	1.00	5
		0	5	20	50		
Estado de Conservación							
P13	Daños estructurales	A	B	C	D	1.00	5
		0	5	20	50		
Elementos no Estructurales							
P14	Elementos no estructurales	A	B	C	D	0.50	2.5
		0	5	20	50		

I_v	245.00	$I_v *$	0.38
-------	--------	---------	------

Como el índice de vulnerabilidad que se obtuvo es de 0.38, la clase de fragilidad asociada es media. Igualmente, como la zona referente a Cusco es la zona Z2, se obtuvo:

Tabla 4.6: Asignación de la clase de fragilidad para diferentes periodos de retorno para la Iglesia San Pedro Apóstol

CFS	Sismo Frecuente				CFS	Sismo Ocasional				CFS	Sismo Raro			
	Z1	Z2	Z3	Z4		Z1	Z2	Z3	Z4		Z1	Z2	Z3	Z4
	0.05	0.12	0.16	0.21		0.06	0.14	0.19	0.25		0.10	0.25	0.35	0.45
Bajo					Bajo					Bajo				
Medio		x			Medio		x			Medio		x		
Alto					Alto					Alto				

¿Se verifica? Si No ¿Se verifica? Si No ¿Se verifica? Si No

Tal como podemos observar, el daño es moderado frente a sismos frecuentes y sismos ocasionales y fuerte frente a sismos raros. También se verifica que se cumplieron los requisitos inicialmente esperados con excepción de sismos frecuentes.

4.2 IGLESIA SAN SEBASTIÁN

En la Iglesia en estudio, el desempeño pretendido, así como en la iglesia anteriormente presentada, frente a los diferentes sismos es:

Tabla 4.7: Datos de Entrada - Iglesia San Sebastián

		Matriz de Entrada			Criterio:
		Intensidad del Terremoto			
		Frecuente	Ocasional	Raro	
Daño Esperado	Daño Insignificante	L1	L2	L3	1 <input type="checkbox"/> L1
	Daño Moderado	M1	M2	M3	2 <input type="checkbox"/> M2
	Daño Fuerte	H1	H2	H3	3 <input type="checkbox"/> H3

Parámetro P1

Material Dominante: Adobe
Forma en Planta: Basilical

Tipología A-B

Datos:

- $a = 28.00 \text{ m}$
- $L = 62.80 \text{ m}$

$$\beta_1 = 0.44 \text{ y } \beta_2 = 0$$

Como $\beta_1 < 0.44$ y $\beta_2 < 0$, la categoría de este parámetro será la categoría C.

Parámetro P5

Datos:

A_{min}	94.24 m^2
$A_{máx}$	288.22 m^2
A_t	1298.74 m^2
a_0	0.073
γ	0.33
h	14.35 m
p_m (adobe)	15.1 kN/m^2

$$q = \frac{(94.24 + 288.22) * 14.35 * 15.1}{1298.74} = 63.81 \text{ kN/m}^2$$

Según la información hallada:

$$C_{corte} = \frac{0.073 * 24.52}{63.81 * 1} * \sqrt{1 + \frac{63.81 * 1}{1.5 * 0.073 * 24.5 * (1 + 0.33)}}$$

$$C_{corte} = 0.12$$

Así:

$$\alpha = \frac{0.12}{0.488} = 0.25$$

En suma, la categoría asignada es la categoría D.

Parámetro P6

Ecuaciones:

$$\lambda_v = \frac{H}{s} \quad y \quad \lambda_h = \frac{L}{s}$$

En este parámetro, para el cálculo de la distancia máxima entre paredes, como es una Iglesia Basilical, las dimensiones a tener en consideración son las de una de las naves laterales, puesto son las más susceptibles a sufrir el volteo.

Datos:

- $H = 7.03 \text{ m}$
- $s = 1.10 \text{ m}$
- $L = 50.52 \text{ m}$

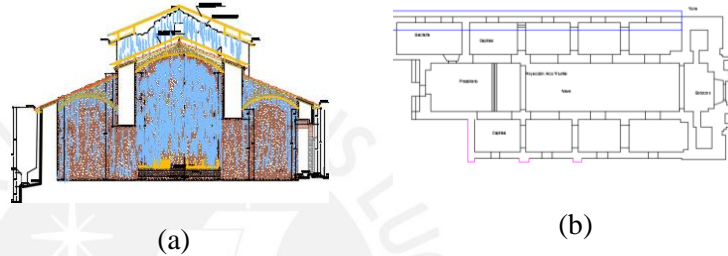


Figura 4.6: Representación del muro en análisis en la Iglesia San Sebastián (a) Corte de la Iglesia; (b) Identificación del muro en la planta estructural;

$$\lambda_v = 6.39 \rightarrow \text{Categoría B o C}$$

$$\lambda_h = 45.93 \rightarrow \text{Categoría D}$$

$$\lambda_h + 1.25\lambda_v \leq 17.5$$

$$6.39 + 1.25 * 45.93 \leq 17.5$$

$$64.28 \leq 17.5 \rightarrow \text{No cumple}$$

Con base en los resultados obtenidos, la categoría asignada es la D.

Parámetro P7

La fachada a ser evaluada en esta iglesia será la fachada lateral derecha, pues es la que presenta mayor número de puertas y ventanas. Se observa que las aberturas no presentan mucha irregularidad horizontal.

Ventanas:	1.50 m
Puerta:	2.67 m
Sumatorio das Aberturas	Puerta: 13.20 m ² Ventanas: 6.9 m ²
Área da Fachada:	215.00 m ²
Distancia entre aberturas:	> 1.2 m

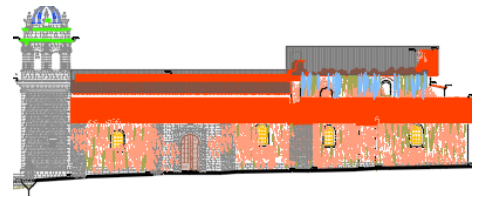


Figura 4.7: Representación de la fachada en análisis de las aberturas en la Iglesia San Sebastián

Con base en los valores presentados, vemos que el área de las aberturas es menor que 1/3 del área, y que las ventanas y puertas tienen dimensiones superiores a 1.2m, de esa forma la categoría asignada es la categoría C.

Parámetro P8

Tipo de Cobertura: No Impulsiva

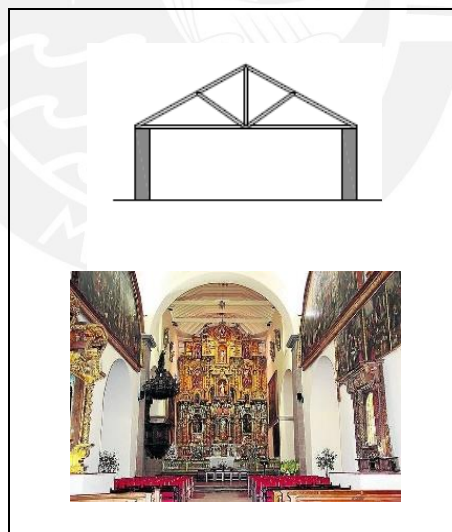


Figura 4.8: Representación del tipo de cobertura, Iglesia San Sebastián

Por observación, concluimos que la cobertura es de dos aguas con par y nudillo y tirantes que traspasan la nave. Por ende, se puede decir que la cubierta es no impulsiva. Con relación al estado de conservación, asignamos como muy malo, pues debido al incendio sufrido

recientemente la iglesia no presenta cualquier tipo de conservación. Al final, la categoría asignada es la categoría C.

Parámetro P9

Datos:

- $H = 16.55 \text{ m}$
- $B = 13.55 \text{ m}$
- $s = 2.40 \text{ m}$
- $h_t = 2.20 \text{ m}$

$$\frac{H}{B} = 1.22$$

$$\lambda_v = 6.89$$

$$\frac{s}{h_t} \geq 0.50 \text{ y } \frac{s}{h_t} = 1.09 \text{ (OK)}$$

Como la fachada de la iglesia es en piedra, y según los resultados ejecutados, la categoría es la D.

Parámetro P10

Datos:

- $N^{\circ} \text{ de Torres: } 2$
- $T = 10.27 \text{ m}$
- $H = 24.42 \text{ m}$
- Aberturas: SI

$$\frac{T}{H} = 42.05\%$$



Figura 4.9: Representación de las torres de la Iglesia San Sebastián

Como $\frac{T}{H} > 40\%$ y tiene aberturas, la categoría asignada, es la categoría D.

Parámetro P11

La Iglesia no presenta Espadaña, por lo tanto, la categoría asignada es la categoría A.

Parámetro P12

La Iglesia en estudio, no presenta capillas, pero presenta contrafuertes.

Distancia máxima entre Contrafuertes:	17.40 m
Datos:	$T = 0 \text{ m}$
	$H = 7.03 \text{ m}$
	$s = 1.90 \text{ m}$
Distancia Perpendicular:	$c = 0.6 \text{ m}$
Ventanas	NO



Figura 4.10: Representación de los contrafuertes en la Iglesia San Sebastián

$$L < 3m \rightarrow D$$

$$c = \frac{7.06}{6} = 1.17 \text{ y } 1.17 > 0.6 \rightarrow A \text{ o } B$$

$$b = s \text{ y } 0.6 \neq 1.9 \rightarrow D$$

Como el Parámetro Geométrico de la evaluación de la capilla asignó un valor D, el parámetro se concluye con una evaluación global D.

Parámetro P13

Se asignó la categoría D, pues se considera efectos del incendio.



(a)



(b)

Figura 4. 11: Representación del estado de conservación de la Iglesia San Sebastián (a) y (b) efectos del incendio

Tabla 4.9: Categoría asignada al parámetro P13 para la Iglesia San Sebastián

D	<p>Paredes con deterioro y agrietamiento severo, a pesar de que no se ha generalizado;</p> <p>Paredes con características físicas y materiales muy degradados que muestran una grave disminución de la resistencia;</p> <p>Agrietamiento en lugares sensibles, como por ejemplo cerca de las esquinas (señales de discontinuidad entre paredes ortogonales);</p> <p>Daños introducidos por impulsos transmitidos por las coberturas, abultamiento de paredes resistentes, agrietamiento debido al asentamiento de la cimentación;</p> <p>Deslizamiento del marco de madera en relación con el marco de las paredes, la putrefacción y la degradación de la madera a lo largo de las paredes;</p> <p>Señales de rotación de las paredes hacia afuera del plano;</p>
----------	--

Parámetro P14

La iglesia cuenta con algunos elementos decorativos en la fachada y algunos cuadros en el interior, tal como ya fue referido. Por lo tanto, se asigna la categoría B.

Tabla 4. 10: Categoría asignada al parámetro P14 para la Iglesia San Sebastián

B	<p>Iglesias con elementos decorativos muy bien ligados a las paredes;</p> <p>Balcones integrados en la estructura del pavimento o paredes;</p>
----------	--

Según las categorías obtenidas se halló el índice de vulnerabilidad, ver Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Tabla de calificación del índice de vulnerabilidad para la Iglesia San Sebastián

Índice de Vulnerabilidad							
Parámetros de Evaluación		Puntuación				p_i	$C_{vi} * p_i$
Análisis Global							
P1	Sistema Estructural Resistente	A	B	C	D	0.75	15
		0	5	20	50		
P2	Cualidad del sistema resistente	A	B	C	D	1.00	5
		0	5	20	50		
P3	Localización e Interacción	A	B	C	D	1.50	0
		0	5	20	50		
P4	Irregularidad en Planta	A	B	C	D	1.50	30
		0	5	20	50		
P5	Resistencia al Corte	A	B	C	D	0.50	25
		0	5	20	50		
P6	Distancia Máxima entre Paredes	A	B	C	D	0.75	37.5
		0	5	20	50		
P7	Aberturas	A	B	C	D	0.50	10
		0	5	20	50		
P8	Tipo de Cobertura	A	B	C	D	1.00	20
		0	5	20	50		
Análisis Local							
P9	Evaluación de la Fachada	A	B	C	D	1.50	75
		0	5	20	50		
P10	Campanario	A	B	C	D	0.75	37.5
		0	5	20	50		
P11	Espadaña	A	B	C	D	0.75	0
		0	5	20	50		
P12	Capillas y Contrafuertes	A	B	C	D	1.00	50
		0	5	20	50		
Estado de Conservación							
P13	Daños estructurales	A	B	C	D	1.00	50
		0	5	20	50		
Elementos no Estructurales							
P14	Elementos no estructurales	A	B	C	D	0.50	2.5
		0	5	20	50		

I_v	357.5	I_v^*	0.55
-------	-------	---------	------

El índice de vulnerabilidad obtenido fue de 0.55 lo que significa que la clase de fragilidad asociada es alta. Además, como la zona referente a Cusco es la zona Z2, se obtuvo:

Tabla 4.12: Asignación de la clase de fragilidad para diferentes periodos de retorno para la Iglesia San Sebastián

CFS	Sismo Frecuente				CFS	Sismo Ocasional				CFS	Sismo Raro			
	Z1	Z2	Z3	Z4		Z1	Z2	Z3	Z4		Z1	Z2	Z3	Z4
	0.05	0.12	0.16	0.21		0.06	0.14	0.19	0.25		0.10	0.25	0.35	0.45
Bajo					Bajo					Bajo				
Medio					Medio					Medio				
Alto		x			Alto		x			Alto		x		

¿Se verifica? Si No ¿Se verifica? Si No ¿Se verifica? Si No

Tal como podemos observar, el daño es fuerte frente a sismos frecuentes y ocasionales y raros. También se verifica que no se cumplieron los requisitos inicialmente esperados para todos los periodos de retorno en análisis con la excepción de sismos raros.

4.3. IGLESIA SAN JUAN BAUTISTA, HUARO

En la Iglesia de estudio, el desempeño pretendido frente a los diferentes sismos es:

Tabla 4.13: Datos de Entrada - Iglesia San Juan Bautista

		Matriz de Entrada			Criterio:
		Intensidad del Terremoto			
		Frecuente	Ocasional	Raro	
Daño Esperado	Daño Insignificante	L1	L2	L3	1 <input type="checkbox"/> L1
	Daño Moderado	M1	M2	M3	2 <input type="checkbox"/> M2
	Daño Fuerte	H1	H2	H3	3 <input type="checkbox"/> H3

Parámetro P1

Material Dominante: Adobe Tipología A-R
Forma en Planta: Cruz Latina

Según la tipología, la categoría asignada es la categoría B.

Parámetro P2

Material Dominante: Adobe

Categoría B: Albañilería de adobe con una argamasa de buena calidad;

Como podemos observar, la iglesia presenta sobrecimiento, así, la categoría decrece un nivel y, como la iglesia fue construida entre los siglos XVI y XVII, la categoría se mantiene como C.

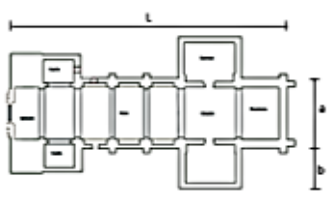
Parámetro P3

Localización:	Aislada
En Relevó:	NO
Sobre Efecto Vaso Geológico:	NO
En Peligro de Avalancha:	NO

Así, la categoría asignada al parámetro P3 es la categoría A.

Parámetro P4

Tabla 4.14: Relación Geométrica para la San Juan Bautista (a) Figura (b) Ecuación

 <p>El diagrama muestra la planta de una iglesia con tres naves. La longitud total de la nave central se indica como 'L'. El ancho de la nave central se indica como 'a'. El ancho de las naves laterales se indica como 'b'.</p>	<p>Ecuaciones:</p> $\beta_1 = \frac{a}{L}$ $\beta_2 = \frac{b}{L}$
--	--

Datos:

- $a = 12.40 \text{ m}$
- $b = 7.07 \text{ m}$
- $L = 50.10 \text{ m}$

$$\beta_1 = 0.25 \text{ y } \beta_2 = 0.14$$

Como $\beta_1 < 0.25$ y $\beta_2 < 0.14$, la categoría de este parámetro será la categoría C.

Parámetro P5

Datos auxiliares:

A_{min}	20.46 m^2
$A_{máx}$	76.52 m^2
A_t	193.96 m^2
a_0	0.106
γ	0.27
h	11.58 m
p_m (adobe)	15.1 kN/m^2

$$q = \frac{(20.46 + 76.52) * 11.58 * 15.1}{193.96} = 87.43 \text{ kN/m}^2$$

Según la información hallada:

$$C_{corte} = \frac{0.106 * 24.52}{87.43 * 1} * \sqrt{1 + \frac{87.43 * 1}{1.5 * 0.106 * 24.5 * (1 + 0.27)}}$$

$$C_{corte} = 0.13$$

Así:

$$\alpha = \frac{0.13}{0.488} = 0.266$$

Con base en el resultado obtenido, la categoría asignada al parámetro P5 es la categoría D.

Parámetro P6

Ecuaciones:

$$\lambda_v = \frac{H}{s} \quad y \quad \lambda_h = \frac{L}{s}$$

Datos:

- $H = 11.58 \text{ m}$
- $s = 1.65 \text{ m}$
- $L = 12.4 \text{ m}$

$$\lambda_v = 6.54 \rightarrow \text{Categoría B y C}$$

$$\lambda_h = 7.51 \rightarrow \text{Categoría A, B o C}$$

$$\lambda_h + 1.25\lambda_v \leq 17.5$$

$$7.51 + 1.25 * 6.54 \leq 17.5$$

$$15.658 \leq 17.5 \rightarrow \text{Cumple}$$

Con base en los resultados obtenidos, la categoría asignada, como cumple la ecuación requerida es la categoría B.

Parámetro P7

La parte en análisis de las aberturas es el muro lateral derecho, el espacio entre las dos primeras capillas, una vez que es donde se localiza una puerta y aberturas en un área reducida.

Ventanas:	1.28 m
Puerta:	3.0 m
Sumatorio das Aberturas	Puerta: 13.50 m ²
	Ventanas: 4.44 m ²
Área da Fachada:	164.89 m ²
Distancia entre aberturas:	> 1.2 m



Figura 4.12: Vista Panorámica

Según el análisis efectuada en el área de estudio, a saber, que las dimensiones de las ventanas y puertas no cumplen con el requisito la categoría asignada es la categoría C.

Parámetro P8

Tipo de Cobertura: No Impulsiva

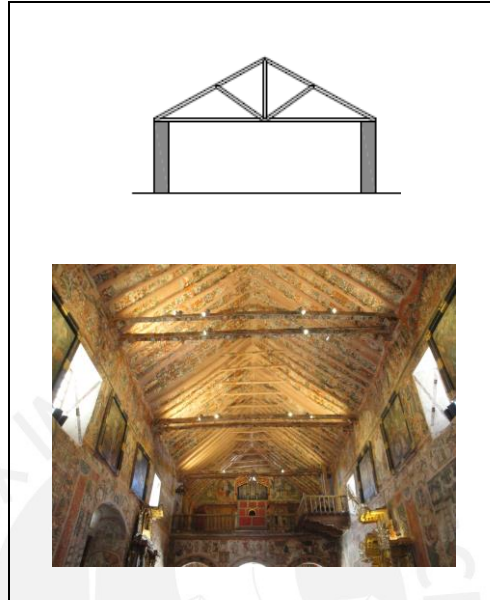


Figura 4.13: Representación del tipo de cobertura, Iglesia San Juan Bautista

La cobertura es no impulsiva y que posee tirantes, de este modo, se clasifica como A. Relativamente a su estado de conservación se asignó que era malo con el objetivo de ser más conservativos. Al final, la categoría asignada es la categoría B.

Parámetro P9

Datos:

- $H = 10.58 \text{ m}$
- $B = 12.40 \text{ m}$
- $s = 1.65 \text{ m}$
- $h_t = 4.9 \text{ m}$

$$\frac{H}{B} = 0.85$$

$$\lambda_v = 6.41$$

$$\frac{s}{h_t} \geq 0.50 \text{ y } \frac{s}{h_t} = 0.33 \rightarrow \text{No cumple!}$$



Figura 4.14: Representación de la fachada principal de la Iglesia San Juan Bautista

Con base en los cálculos ejecutados, la categoría asumirá la categoría D.

Parámetro P10

La Iglesia no presenta Torre, por lo tanto, la categoría asignada es la categoría A.

Parámetro P11

Datos:

- $h_{\text{espadaña}} = 11.31 \text{ m}$
- $s_{\text{espadaña}} = 2.0 \text{ m}$

$$\lambda_v = 5.65$$

$$\frac{s}{h_t} \geq 0.50 \text{ y } \frac{s}{h_t} = 0.16 \rightarrow \text{No culpe}$$

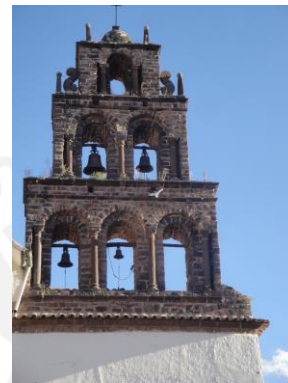


Figura 4.15: Representación de la Espadaña de la Iglesia San Juan Bautista

Con base en los cálculos ejecutados y según el material de la espadaña, piedra, la categoría tomará la categoría B.

Parámetro P12

Distancia entre Capillas:	14.23 m
Datos:	$T = 5.20 \text{ m}$
	$H = 10 \text{ m}$
	$s = 1.00 \text{ m}$
Distancia Perpendicular:	$c = 7.70 \text{ m}$
Ventanas	SI

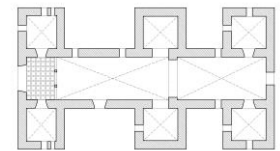


Figura 4.16: Planta Estructural de la Iglesia San Juan Bautista

$$L = 10 * 1.0 = 10 \text{ y } 14.24 > 10 \rightarrow C \text{ o } D$$

$$c = 3 * 1.0 = 3 \text{ y } 7.70 > 3 \rightarrow A, B, C \text{ o } D$$

Con base en los cálculos, las categorías posibles serían C o D. Por lo tanto, la mejor sería la C, pero como existe ventanas la categoría decreció para D.

Parámetro P13

Se asignó la categoría B, pues se considera la presencia de algunas patologías aun cuando estén en estado inicial.



Figura 4.17: Demostración de algunas patologías presentes en la Iglesia San Juan Bautista (a) Fachada Principal; (b) Interior

Tabla 4. 15: Categoría asignada al parámetro P13 para la Iglesia San Juan Bautista

B	Paredes con grietas pequeñas (menos de 0,5 mm de ancho) no generalizado; Presencia de humedad, hongos o vegetación lo que deteriora las características de albañilería y conduce a la degradación del recubrimiento de madera y desglose de mampostería; Las grietas en el revestimiento no se propagan al soporte;
---	---

Parámetro P14

La iglesia cuenta con pinturas murales en las paredes, así como un gran número de cuadros no muy bien conectados. Como podemos observar en las figuras Figura 4.18.

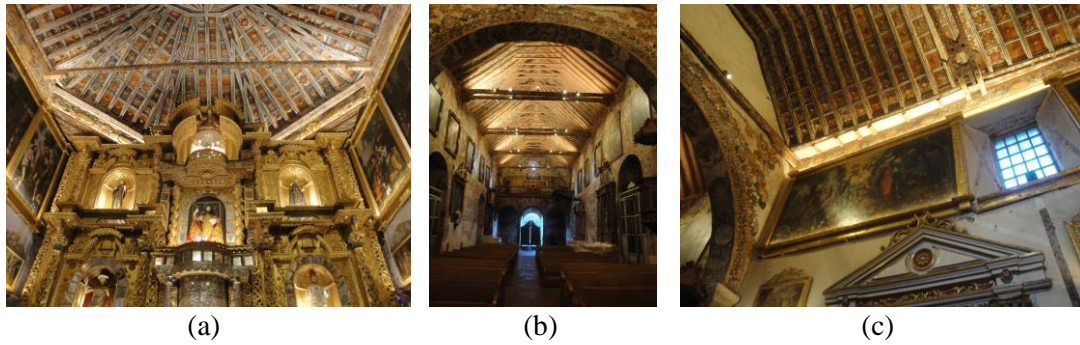


Figura 4.18: Representación de los elementos no estructurales de Iglesia San Jun Bautista (a) Elementos decorativos del altar; (b) Vista interior en dirección a la fachada principal; (c) Pormenor de los cuadros;

Tabla 4.16: Categoría asignada al parámetro P14 para la Iglesia San Juan Bautista

C	Iglesia con elementos externos a la estructura de pequeña dimensión y mal unidos a la estructura principal; Iglesias con recubrimientos / revestimientos de extensión reducida mal ligados o recubrimientos de gran extensión y bien conectados a la estructura;
---	---

Según las categorías obtenidas se halló el índice de vulnerabilidad, ver Tabla 4.17.

Tabla 4.17: Tabla de calificación del índice de vulnerabilidad para la Iglesia San Juan Bautista

Índice de Vulnerabilidad							
Parámetros de Evaluación		Puntuación					
Análisis Global							
P1	Sistema Estructural Resistente	A 0	B 5	C 20	D 50	0.75	3.75
P2	Cualidad del sistema resistente	A 0	B 5	C 20	D 50	1.00	20
P3	Localización e Interacción	A 0	B 5	C 20	D 50	1.50	0
P4	Irregularidad en Planta	A 0	B 5	C 20	D 50	1.50	30
P5	Resistencia al Corte	A 0	B 5	C 20	D 50	0.50	25
P6	Distancia Máxima entre Paredes	A 0	B 5	C 20	D 50	0.75	3.75
P7	Aberturas	A 0	B 5	C 20	D 50	0.50	10
P8	Tipo de Cobertura	A 0	B 5	C 20	D 50	1.00	5
Análisis Local							
P9	Evaluación de la Fachada	A 0	B 5	C 20	D 50	1.50	75
P10	Campanario	A 0	B 5	C 20	D 50	0.75	0
P11	Espadaña	A 0	B 5	C 20	D 50	0.75	3.75
P12	Capillas y Contrafuertes	A 0	B 5	C 20	D 50	1.00	50
Estado de Conservación							
P13	Daños estructurales	A 0	B 5	C 20	D 50	1.00	5
Elementos no Estructurales							
P14	Elementos no estructurales	A 0	B 5	C 20	D 50	0.50	10

I_v	241.25	I_v^*	0.37
-------	--------	---------	------

Tabla 4.18: Asignación de la clase de fragilidad para diferentes periodos de retorno para la Iglesia San Juan Bautista

CFS	Sismo Frecuente				CFS	Sismo Ocasional				CFS	Sismo Raro			
	Z1	Z2	Z3	Z4		Z1	Z2	Z3	Z4		Z1	Z2	Z3	Z4
	0.05	0.12	0.16	0.21		0.06	0.14	0.19	0.25		0.10	0.25	0.35	0.45
Bajo					Bajo					Bajo				
Medio		x			Medio		x			Medio		x		
Alto					Alto					Alto				

¿Se verifica?

Si

No

¿Se verifica?

Si

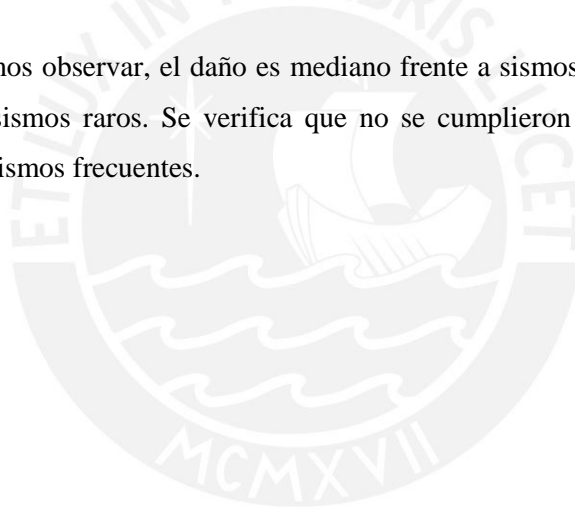
No

¿Se verifica?

Si

No

Tal como podemos observar, el daño es mediano frente a sismos frecuentes y ocasionales y fuerte frente a sismos raros. Se verifica que no se cumplieron los requisitos inicialmente esperados para sismos frecuentes.





CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

La Metodología de Evaluación Visual propuesta y desarrollada para Iglesias Coloniales en Cusco, consiste en el desarrollo y la adaptación de parámetros de rápida aplicación con el objetivo de lograr un índice de vulnerabilidad y, de esa forma, hallar el daño esperado frente a diferentes periodos de retorno.

En cuanto a la metodología, podemos concluir de forma general que:

- Debido a falta de información asociada a las iglesias coloniales en términos de las características mecánicas de los materiales y a su difícil caracterización, algunos parámetros presentan un mayor grado de incertidumbre. Igualmente, los cambios propuestos relativos a los macro elementos, puesto que no existen datos históricos ni investigaciones pasadas que sustenten parámetros geométricos de su vulnerabilidad estructural.
- Todas las modificaciones presentadas requieren ser validadas, para garantizar que la metodología sea la más adecuada posible. Del mismo modo, todos estos parámetros necesitan sustentaciones y validaciones futuras;
- El hecho de que la metodología sea rápida, constituye una ventaja fundamental pues posibilita la evaluación de un gran número de iglesias y también permite determinar cuáles ameritan una evaluación más urgente.

Según los casos en estudio, podemos concluir que:

- Los índices de vulnerabilidad hallados en estas edificaciones son índices que se clasifican en una clase de fragilidad media para las Iglesias San Pedro Apóstol y San Juan Bautista y alta para la Iglesia San Sebastián, ver Tabla 5.1. Según la definición de zona, zona 2 para Cusco, y la clase de fragilidad se determina el daño esperado. Se verifica que ninguna iglesia cumple con los requisitos para sismos frecuentes, San Pedro Apóstol y San Juan Bautista cumplen para sismos ocasionales y todas las iglesias en estudio cumplen para sismos raros donde el objetivo pasa por sufrir daño fuerte.

Tabla 5.1: Categorías asignadas al respectivo parámetro para las tres iglesias en estudio

Parámetros		Iglesia San Pedro Apóstol	Iglesia San Sebastián	Iglesia San Juan Bautista
P1	Sistema Estructural Resistente	C	C	B
P2	Cualidad del sistema resistente	C	B	C
P3	Localización e Interacción	A	A	A
P4	Irregularidad en Planta	D	C	C
P5	Resistencia al Corte	D	D	D
P6	Distancia Máxima entre Paredes	A	D	B
P7	Aberturas	B	C	C
P8	Tipo de Cobertura	B	C	B
P9	Evaluación de la Fachada	D	D	D
P10	Campanario	C	D	A
P11	Espadaña	A	A	B
P12	Capillas y Contrafuertes	B	D	D
P13	Daños estructurales	B	D	B
P14	Elementos no estructurales	B	B	B
I_v^*		0.38	0.55	0.37

- Según los valores obtenidos de índice de vulnerabilidad podemos afirmar que la Iglesia San Juan Bautista es la que presentará un mejor desempeño global, se siguiendo por la Iglesia San Pedro Apóstol y por último San Sebastián. Un punto importante es para un índice de vulnerabilidad más bajo, tendremos una menor clase de fragilidad y, consecuentemente, el daño esperado. Por tanto, podremos esperar mejores respuestas frente a diferentes tipos de aceleraciones.
- Noel (2017) en su estudio, concluyo que la Iglesia San Juan Bautista presentará daño leve para los ejes +X, -X y +Y para sismos frecuentes ocasionales y raros, para -Y leve para frecuente y ocasional y fuerte para raro. En comparación con el obtenido, su evaluación es más favorable lo que podremos consumir como una metodología conservativa.
- Es posible verificar que todas las iglesias en estudio presentan una gran vulnerabilidad asociada a la fachada. Este parámetro se evalúa según el parámetro geométrico hallado

por Vicente (2008), la esbeltez y la ecuación del volteo del tímpano. De todos los parámetros considerados en el estudio, este es el que presenta mayor influencia en las dos iglesias, lo que puede significar que está demasiado conservativo.

- También podemos concluir que el hecho de que la Iglesia San Pedro Apóstol tenga la planta en forma de cruz latina es un factor que incrementa su vulnerabilidad, en comparación con la forma basilical estudiada y la forma rectangular. Por otro lado, la forma basilical presenta una mayor vulnerabilidad asociada a la distancia máxima entre paredes por el hecho de no contar con contrafuertes o capillas en uno de los muros perpendiculares a la fachada, lo que incrementa el ancho efectivo de la pared.

5.2. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Con base en lo arriba presentado, es posible recomendar algunos puntos importantes a considerar en investigaciones futuras.

- Como ya fue planteado, una parte central de la incertidumbre de la metodología se debe a falta de estudios anteriores que ahonden en los elementos estructurales en las iglesias coloniales, lo que dificulta una caracterización de los efectos geométricos. De esa forma, recomendamos el estudio y la verificación de los efectos de elementos como contrafuertes, capillas, espadaña y campanario en las edificaciones.
- En el parámetro P1, la evaluación es ejecutada según el número de macro-elementos para las iglesias según su material dominante y geometría en planta. Se recomienda que se evalúe el efecto de elementos considerados como arcos triunfales o cúpulas en las iglesias coloniales. A saber, algunos de estos elementos enunciados en estas edificaciones únicamente presentan una función estética, por lo que su material interior es de caña.
- Se recomienda también un estudio detallado de los materiales constitutivos, así como la influencia del sobrecimiento en el volteo de la pared hacia afuera del plano.
- Una alternativa a la evaluación basada en parámetros geométricos, sería el cálculo de los mecanismos de colapso posibles para cada tipología según el método cinemático. Con este método es posible obtener ecuaciones que describen los posibles daños que podrá sufrir la edificación frente a diferentes terremotos. En este caso, se recomendaría la combinación de los dos métodos, en aras de lograr una evaluación eficaz y rápida.

- Otra recomendación de gran importancia es que se proceda a la validación de los parámetros propuestos en este trabajo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, R. (2015). Investigations on structural behaviour of archaeological heritage in Perú: From survey to seismic assessment. *Engineering Structures* 95, 94-111.
- Araújo, A. S., & Lourenço, P. B. (2011). Avaliação da Segurança Sísmica de Igrejas: Aplicação a Dois Casos de Estudo. *Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*. Coimbra.
- Asteris, P. G. (2014). Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural. *Engineering Structures* , 62-63.
- Calvi, G. M. (2006, September). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET Journal of Earthquake Technology* N°473, Vol 43, 75-104.
- Cancino, C. (2011). Damage Assessment of Historic Earthen Buildings after the August 15, 2007 Pisco Peru Earthquake . Getty Conservation Institute, L.A., USA.
- Cancino, Claudia, and Sara Lardinois. 2012. Seismic Retrofitting Project: Assessment of Prototype Buildings. 2 vols. Los Angeles, CA: Getty Conservation Institute. http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/assess_prototype
- Cristóbal, A. S. (1998). Esplendor del Barroco en Ayacucho. Retablo y arquitectura religiosa en Huamanga. Lima, Perú: Banco Latino: Ediciones Peisa.
- E.030, N. T. (2016). Siseño Sismorresistente . Lima-Perú.
- FEMA. (2015). Rapid Visual Screening of buildings for potential seismic hazards: A Handbook. Washington, D.C.
- Huaranga, S. (2017) Definición y descripción de tipologías estructurales y mecanismos de colapso de Iglesias Andinas del Perú. Lima, Perú: PUCP
- ICOMOS. (2004). Recomendaciones para el Análisis, Conservación y Restauración Estructural Del Patrimonio Arquitectónico .
- Kubler, G. (1951). Cuzco, Reconstrucción de la Ciudad y Restauración de sus monumentos. UNESCO.
- Lourenço, P. B. (2006). Recommendations for restoration of ancient buildings. *Construction and Building Materials* 20 , 239–251.
- Lourenço, P. B. (2013). Simplified indexes for the seismic of masonry buildings: International database and validation. *Engineer Failure Analysis* 34.

- Ministri, P. d. (2011). Manuale per la compilazione della scheda per il rilievo del danno ai beni culturali, Chiese. Dipartimento della Protezione Civile.
- Moreira, S. T. (2015). Seismic retrofit of masonry-to-timber connections in historical constructions. Tese de Douturamento. Universidade do Minho.
- NIKER. (2010). Inventory of earthquake-induced failure mechanisms related to construction types, structural elements and materials. Italy: Università di Padova .
- Novelli, V. I., & D'Ayala, D. (2015). LOG-IDEAH: LOGic trees for identification of damage due to earthquakes for architectural heritage. Bull Earthquake Eng , 153-176.
- Peña, F., & Lourenço, P. B. (s.f.). Estruturas em Terra: Comportamento e Patologias.
- Priestley, M. J. (2000). Performance Based Seismic Design. Bulletin of the New Zealand society for earthquake engineering 33.3, 325-346.
- Quinn, N., Fonseca Ferreira, C., & D'Ayala, D. (July 2015). Perfomance- Based Approach For The Seismic Diagnosis of Historical Building . SECED 2015 Conference: Earthquakes Risk and Engineering towards a Resilient World, (págs. 9-10). Cambridge UK.
- Romão, X., Paupério, E., & Pereira, N. (2017). Screening Proceening Procedure for the Risk Analysis of Cultural Heritage Assets. 16th World Conference on Earthquake.
- Sarilyn R. Ivancic, C. B. (2014). Seismic Assessment of the St. Peter Apostle Church of Andahuaylillas in Cusco, Peru. SAHC2014 - 9th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Mexico City.
- SEAOC. (1995). Performance based seismic engineering of Buildings. Vision 2000.
- Tapia, M. N. (2017). Integración de ingeniería inversa y modelamiento numérico para la evaluación sísmica de construcciones históricas de adobe . Lima, Perú: PUCP.
- Torrealva, D. (2003). Caracterización de daños en construcciones de adobe. Serie cuadernos de adobe. Pontifica Universidad Católica del Perú, Perú.
- Valluzzi, M., Cardini, G., Binda, L., & Modena, C. (2004). Seismic Vulnerability Methods For Masonry Buildings In Historical Centres: Validation For Prediction Analyses And Intervention Proposals. 13th World Conference on Earthquakes Engineering. Vancouver, B.C., Canada.
- Vicente, R. d. (2008). Estratégias e metodologias para intervenções de reabilitação urbana. Avaliação da vulnerabilidade e do risco sísmico do edificado da Baixa de Coimbra. Universidade de Aveiro .

Anexo I


Formularios de las Iglesias (Huaranga, 2017):

Iglesia San Pedro Apóstol	I.1
Iglesia San Sebastián	I.2
Iglesia San Juan Bautista	I.3

Iglesia San Pedro Apóstol, Andahuaylillas:

IGLESIA SAN PEDRO APÓSTOL DE ANDAHUAYLILLAS		A-CL-1
		Fecha de actualización: 29/05/20
DATOS GENERALES (1)		
Fecha de construcción	s. XVI – s. XVII	
Provincia / Distrito	Quispicanchi - Huaró	
Dirección:	Al suroeste de la Plaza de armas de Andahuaylillas, a 41km al sureste de la ciudad de Cusco.	
RECONOCIMIENTO CULTURAL E HISTÓRICO (2)		
Es un monumento artístico integrante del Patrimonio Cultural de Perú en virtud de la Ley N° 13437, de fecha 02 de setiembre de 1960.		
DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA		
<p>Composición en planta: La iglesia tiene forma de cruz latina, con una nave principal alargada rectangular (59m x 12m) y una nave secundaria perpendicular (26m x 12m). Además posee 4 ambientes adosados a la nave principal y contrafuertes a ambos lados de la nave principal. La iglesia se encuentra sobre un atrio, por encima del nivel de la plaza de Armas.</p> <p>Ambientes adosados a la nave central: Hay una capilla y una anti sacristía adosadas a ambos lados de la nave principal. Estos ambientes son de menor altura que la nave central, también tienen cubierta de par y nudillo y muros de mampostería de adobe.</p> <p>Valor patrimonial: Esta iglesia es reconocida como "La Capilla Sixtina de América", debido a su sorprendente arquitectura y decoración interna. Los muros interiores son lo más representativo de la iglesia. Están decorados con pinturas de escenas o representaciones cristianas con simbología andina. Por otro lado, el techo está recubierto por decoración mural y es revestido con pan de oro.</p> <p>Restauración: La restauración de la iglesia duró 4 años (2008-2012) y contó con la participación del WMF, las autoridades locales y la compañía de Jesús. Este proyecto incluyó la restauración integral de la edificación arquitectónica, las obras de arte y los bienes muebles de la iglesia. (4)</p>		
DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL		
<p>Sobrecimientos: Las naves de la iglesia cuentan con sobrecimientos de piedra de 1.5-2m. Los muros de las capillas laterales también cuentan con sobrecimientos, pero de menor altura.</p> <p>Muros: La iglesia tiene muros de mampostería de adobe con espesor promedio de 1.1m-2m, con un valor promedio general de 1.8m, a excepción de la fachada frontal, donde el espesor es de 2m. Por detrás del imafrente se cuenta con un coro de madera de forma en "U" sostenido por ménsulas de madera.</p> <p>Frontispicio: El imafrente es de estilo renacentista. Está reforzada por columnas cuadrangulares de piedra que soportan el peso de la cubierta de la fachada. Hay una puerta con arco de punto medio y, sobre ella, un balcón corrido que une las columnas. Este balcón está sostenido por 4 pilastras y ménsulas.</p> <p>Arco triunfal: La iglesia posee un arco triunfal ubicado en el encuentro de la nave con el presbiterio. Este arco está rematado con adobe en su parte superior, lo cual lo hace pesado. Sin embargo, esta parte alta fue reformada para volver al arco más ligero.</p> <p>Contrafuertes: Los muros del evangelio y de la epístola cuentan con contrafuertes, los cuales tienen un núcleo de adobe y están cubiertos por albañilería de piedra.</p> <p>Cubierta: Compuesta por par y nudillo y sobre-par. El techo está finamente decorado con un cielorraso que recubre el par y nudillo.</p> <p>Campanario: Presenta una torre campanario de piedra, ubicada en el extremo derecho del imafrente. El campanario tiene dos cuerpos: una base hasta la altura del imafrente y, por encima, hay 8 vanos de arco de medio punto para las campanas.</p>		
<p>Referencias de la descripción:</p> <p>(1) https://www.wmf.org/project/san-pedro-ap%C3%B3stol-de-andahuaylillas-church</p> <p>(2) http://repositorio.archivos.cultura.gob.pe/bim_files/anexos/bim-430752121.pdf</p> <p>(2) https://www.wmf.org/project/san-pedro-ap%C3%B3stol-de-andahuaylillas-church</p> <p>(3) Asociación Sempa – Ruta del barroco Andino</p> <p>(4) http://responsabilidadsocialdesarrollosostenible.org.pe/aport-e-a-la-cultura-rsd/12-especiales/pdf/4-restauraci%C3%B3n-de-la-iglesia-de-san-pedro-apostol-de-andahuaylillas.html</p>		
ESQUEMA EN PLANTA (3)		
		
Forma en planta	Cruz latina	
EDIFICACIONES ADYACENTES		
Alrededor de la iglesia no se encuentra ninguna edificación adyacente.		
IMÁGENES		
		
<p>Figura 1a: Baptisterio, Imafrente y torre campanario (izq-der) sobre un atrio de piedra</p> <p>Figura 1b: Imafrente</p>		
		
<p>Figura 2: Vistas de los muros laterales de la nave y las capillas adosadas</p>		
		
<p>Figura 3a: Vista del arco triunfal y el presbiterio iglesia</p> <p>Figura 3b: Vista de la cubierta de par y nudillo</p>		
<p>Referencias de las imágenes</p> <p>(1) https://www.flickr.com/photos/rafaelgomez/sets/72157639847795605/with/11980609636/</p> <p>(2) Laboratorio de investigación Engineering and heritage</p> <p>(3) Asociación Sempa – Ruta del barroco andino</p>		

Iglesia San Sebastián:

IGLESIA SAN SEBASTIÁN		A-B-1
		Fecha de actualización: 29/05/20
DATOS GENERALES (1)		ESQUEMA EN PLANTA
Fecha de construcción	s. XVI – s. XVII	
Provincia / Distrito	Cusco - San Sebastián	
Dirección:	Av. Pacífico 216, al lado de la Plaza de San Sebastián	
RECONOCIMIENTO CULTURAL E HISTÓRICO (2)		Forma en planta Basilical
Es un monumento integrante del Patrimonio Cultural de Perú en virtud de la Resolución Suprema No. 2900, de fecha 28 de diciembre de 1972.		EDIFICACIONES ADYACENTES
DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA		Alrededor de la iglesia no se encuentra ninguna edificación adyacente.
<p>Composición en planta: La iglesia es de forma basilical, con tres naves, las cuales tienen diferente dimensión de longitud y de altura. Es la nave central la que es de mayor altura que las demás. En promedio, la iglesia tiene una dimensión longitudinal de (53m x 25m). La iglesia se encuentra sobre un atrio con barda y está bordeada de grandes pináculos.</p> <p>Ambientes adosados a la nave central: No hay ambientes adosados a la iglesia.</p> <p>Valor patrimonial: La iglesia de San Sebastián es uno de los grandes exponentes de la arquitectura barroca en América Latina. En su decoración interna se encontraban célebres cuadros de Diego Quispe Tito, reconocido como el mejor pinto indígena de la escuela cusqueña (3).</p> <p>Restauración: En el 2016 un incendio destruyó el altar mayor, esculturas y pinturas de la iglesia. Esta fue declarada inhabitable. De esta manera, actualmente se está trabajando en su restauración (4).</p>		IMÁGENES
DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL (1)		 <p style="text-align: center;">Figura 1: Imafrente y 2 torres campanario sobre atrio</p>  <p style="text-align: center;">Figura 2a: Vistas de las caras laterales de la iglesia. En la imagen de la izquierda se observa una puerta secundaria.</p>  <p style="text-align: center;">Figura 2b: En la imagen de la derecha se observan contrafuertes de piedra.</p>  <p style="text-align: center;">Figura 3: Vista del interior de la iglesia. Se observa el presbiterio y parte de la mobilería de la iglesia</p>
<p>Sobrecimientos:</p> <p>Muros: Los muros de la nave son de mampostería de adobe. Además, poseen contrafuertes en el muro de la epístola y en el muro de cabeza. Detrás del imafrente está el sotocoro y el coro, el cual es sostenido por un arco rebajado. Por el coro hay un acceso al campanario.</p> <p>Frontispicio: Tiene una composición de tres calles, dos cuerpos y un remate en arco carpanel. En el primer cuerpo se encuentra la puerta de ingreso, rodeada de un arco de medio punto. En el segundo cuerpo hay una ventana con forma de ojo de buey. Estos elementos están bien ornamentados. El material de construcción fue piedra, cal y canto.</p> <p>Arco triunfal: La iglesia posee un arco triunfal antes del presbiterio. Este arco marca el cambio de altura de las naves.</p> <p>Contrafuertes: Los muros del evangelio cuentan con contrafuertes rectangulares. (Ver imagen 2b). Además, el muro de cabeza tiene contrafuertes escalonados de grandes dimensiones.</p> <p>Cubierta: La iglesia tiene una cubierta a dos aguas con par y nudillo. Siendo la nave central la cubierta de mayor altura. La cubierta está sujeta a una secuencia de arcos de piedra, desde el muro de pies hasta el arco de triunfo</p> <p>Campanario: Presenta dos torre campanario en el imafrente. Tiene planta cuadrada y están hechos de piedra rústica canteada que descansa sobre un basamento llano. El primer tercio tiene pequeñas ventanas. Por la parte superior se encuentra el campanario, los cuales tienen base cuadrada, y seguido hay 8 columnas con arco de medio punto que terminan en pináculos.</p> <p>Referencias:</p> <p>(1) Chará Zereceda, Oscar, and Viviana Caparó Gil. 1998. Iglesias Del Cusco : Historia Y Arquitectura. 1era edici. ed. UNSAAC. Cusco: Cusco : Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, 1998. Book.</p> <p>(2) http://repositorioarchivos.cultura.gob.pe/bim_files/anexos/bim726526594.pdf</p> <p>(3) http://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-37392179</p> <p>(4) http://elcomercio.pe/sociedad/cusco/cusco-asi-queda-iglesia-san-sebastian-voraz-incendio-noticia-1932247</p>		<p>Referencias de las imágenes</p> <p>(1) http://www.machupicchu.biz/iglesia-de-san-sebastian-cusco</p> <p>(2) Google maps</p> <p>(3) http://diariocorreo.pe/edicion/a-reguipa/cusco-incendio-destruye-la-arquitectura-colonial-de-la-iglesia-san-sebastian-698950/</p>

Iglesia San Juan Bautista, Huaro:

IGLESIA SAN JUAN BAUTISTA DE HUARO		A-R-2
		Fecha de actualización: 29/05/20
DATOS GENERALES (1)		ESQUEMA EN PLANTA (3)
Fecha de construcción	s. XVI – s. XVII	
Provincia / Distrito	Quispicanchi / Huaro	
Dirección:	Al suroeste de la plaza principal del distrito de Huaro, a 40km al sureste de la ciudad de Cusco.	
RECONOCIMIENTO CULTURAL E HISTÓRICO (1)		Forma en planta
Es un monumento integrante del Patrimonio Cultural del Perú en virtud de la Resolución Suprema No. 2900, de fecha 28 de diciembre de 1972.		Rectangular
DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA (1)		EDIFICACIONES ADYACENTES
<p>Composición en planta: La capilla posee una nave alargada rectangular (50m x 13.11m). Además, posee elementos adosados perpendicularmente a la nave central y ubicados a la altura del centro de la nave y por el presbiterio. La iglesia se encuentra sobre un pequeño atrio de piedra labrada, el cual se eleva pocos centímetros del nivel de la plaza.</p> <p>Ambientes adosados a la nave central: En forma perpendicular a la nave central se halla un baptisterio, dos capillas laterales, la sacristía y el depósito de andas.</p> <p>Valor patrimonial: La decoración principal en todo el espacio interior (muros, techos, cielo raso, columnas, etc) es lo característico en esta iglesia. Los trabajos realizados son la obra cumbre de Tadeo Escalante, refina do artista del siglo XVIII, quien tuvo la tarea de reconstruir el templo con arte mural. Además el templo es rico en detalles de carpintería como las cancelas y los retablos.</p> <p>Restauración: Se realizó un proyecto de restauración de las pinturas murales desde el 2004 hasta el 2006. (2)</p>		Alrededor de la iglesia no se encuentra ninguna edificación adyacente.
DESCRIPCIÓN ESTRUCTURAL (1)		IMÁGENES
<p>Sobrecimientos: Todos los muros cuentan con cimiento de piedra simple y sobrecimiento de piedra labrada de altura 1.5m en promedio.</p> <p>Muros: Posee muros de adobe de espesor entre 1-2m con revoque de barro seleccionado y encalado al interior y exterior. Cerca al muro de pies se encuentran tres columnas que, mediante arcos, sostienen el coro alto, el cual tiene forma de "L". En el muro testero se ubica una ventana con derrame.</p> <p>Fachada: El imafronte tiene una portada de piedra labrada, la cual está formada por un arco de medio punto que descansa sobre dos pilastras simples pareadas. En los intercolumnios hay hornacinas vacías. En la parte superior de la portada se ubica un óculo que ilumina el interior del coro alto.</p> <p>Arco triunfal: Ubicado antes del presbiterio, en la nave central.</p> <p>Contrafuertes: La iglesia no posee contrafuertes.</p> <p>Cubierta: Compuesta por par y nudillo y cubierto con teja tipo colonial. Por dentro, tiene un artesonado estructurado con madera rolliza y cañas tipo kur-kur, el cual está cubierto con pintura mural a nivel del cielo raso.</p> <p>Campanario: Presenta un campanario en forma de espadaña escalonada de tres niveles con arcos de medio punto. La base está constituida por un cuerpo de factura mestiza, trabajado en adobe, con embarre y encalado.</p>		  <p style="text-align: center;">Figura 1a: Baptisterio, Imafronte, fachada y espadaña campanario (izq-der) sobre un atrio de piedra Figura 1b: Vista lateral de la iglesia</p>  <p style="text-align: center;">Figura 2: Vistas interior de la nave central. Se observa el arco triunfal y, al fondo, el presbiterio</p>   <p style="text-align: center;">Figura 3a: Vista del techo de par y nudillo Figura 3b: Vista de las columnas y arcos que sostienen el coro alto ubicado cerca al muro de pies.</p>
<p>Referencias de la descripción:</p> <p>(1) http://arteycultura9.blogspot.pe/p/temple-colonial-de-huaro.html http://repositorio.archivos.cultura.gob.pe/bim_files/an_exos/bim726526594.pdf (2) https://www.wmf.org/project/san-juan-bautista-huaro-church (3) Asociación Sempa - Ruta del Barroco Andino.</p>		<p>Referencias de las imágenes</p> <p>(1a), (2), (3b) Asociación Sempa – Ruta del barroco andino (1b) Grupo de investigación Engineering & Heritage - PUCP (3a) http://elcomercio.pe/sociedad/cusco/iglesia-huaro-reabre-sus-puertas-iluminacion-ornamental-noticia-1766714/9</p>





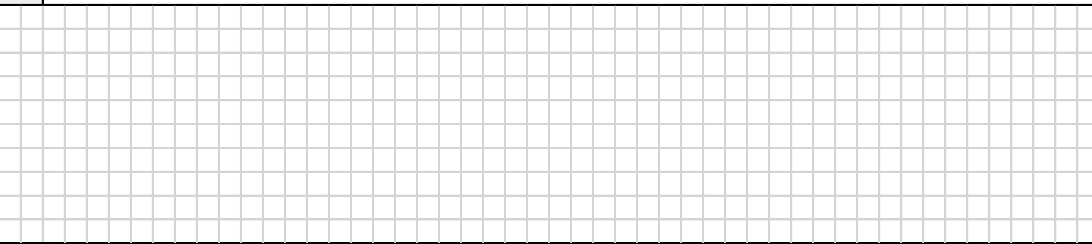

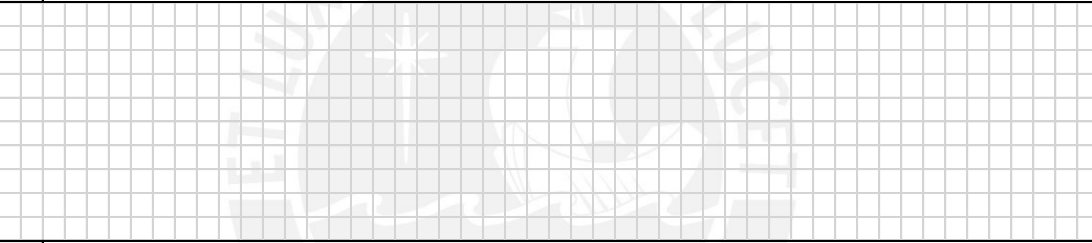
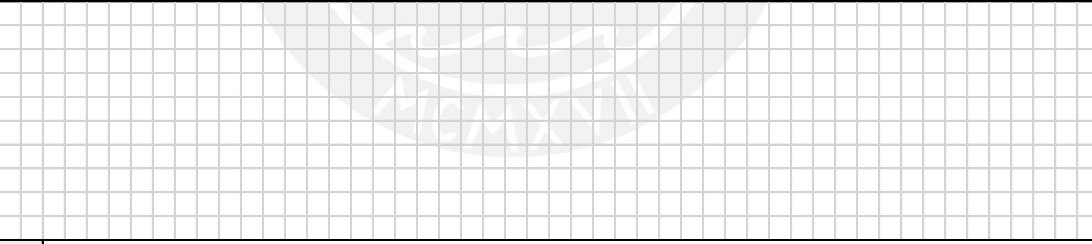
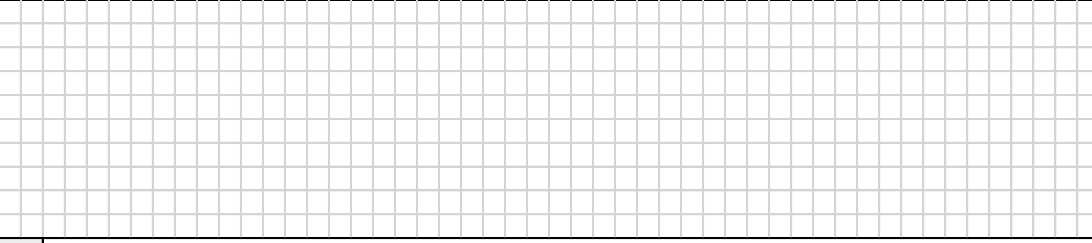

Modelo



Anexo II



Formulario de la metodología:



II.1

	<p>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</p>		<p>Metodología de Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica en las Iglesias Coloniales en la Zona de Cuzco</p>	<p>H1</p>
<p>Fotografía</p>		<p>Data de inspección: ____ . ____ . ____</p>		
		<p>1. Datos Generales</p> <p>Nombre de la Iglesia: _____</p> <p>Dirección: _____</p> <p>Año de Construcción: _____ Área Construida: _____</p> <p>Inspección realizada por: _____</p>		
<p>Esbozo de Plan</p>		<p>1.1 Clasificación de la Iglesia</p> <p><input type="checkbox"/> Público <input type="checkbox"/> Privado</p>		
		<p>1.2 Uso</p> <p><input type="checkbox"/> Religioso <input type="checkbox"/> Museo <input type="checkbox"/> Otro ¿Cuál? _____</p>		
		<p>1.3 Interés Arquitectónico e Histórico</p> <p><input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No</p>		
		<p>1.3 Geometría en Planta</p> <p><input type="checkbox"/> Rectangular <input type="checkbox"/> Basilical <input type="checkbox"/> Cruz Latina <input type="checkbox"/> Otro ¿Cuál? _____</p>		
		<p>1.4 Material Dominante</p> <p><input type="checkbox"/> Adobe <input type="checkbox"/> Piedra <input type="checkbox"/> Mixto</p>		
		<p>1.5 Numero de Fachadas con Aberturas <input type="text"/></p> <p>Descripción: _____</p>		
<p>2. Posibilidad de Alteración de Uso</p> <p><input type="checkbox"/> Uso / Función <input type="checkbox"/> Compartimentación</p>		<p>3. Intervenciones Realizadas</p> <p><input type="checkbox"/> Conservación <input type="checkbox"/> Remodelación <input type="checkbox"/> Ampliación <input type="checkbox"/> Otro ¿Cuál? _____</p> <p>Descripción: _____</p>		
<p>4. Observaciones</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>				

	<p>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</p>	 <p>Universidade do Minho Escola de Engenharia</p>	<p>Metodología de Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica en las Iglesias Coloniales en la Zona de Cuzco</p>	<p>H2</p>
<p>Hojas de Cálculo</p>				
<p>P1</p>	<p>Sistema Estructural Resistente</p>			
				
<p>P2</p>	<p>Cualidad del sistema resistente</p>			
				
<p>P3</p>	<p>Localización e Interacción</p>			
				
<p>P4</p>	<p>Irregularidad en Planta</p>			
				
<p>P5</p>	<p>Resistencia al Corte</p>			
				
<p>P6</p>	<p>Distancia Máxima entre Paredes</p>			
				

	 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	Metodología de Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica en las Iglesias Coloniales en la Zona de Cuzco	H3
P7	Aberturas		
P8	Tipo de Cobertura		
P9	Evaluación de la Fachada		
P10	Campanario		
P11	Espadaña		
P12	Capillas y Contrafuertes		

	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	 Universidade do Minho Escola de Engenharia	Metodología de Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica en las Iglesias Coloniales en la Zona de Cuzco	H4
P13	Daños estructurales			
P14	Elementos no estructurales			

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	 Universidade do Minho Escola de Engenharia	Metodología de Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica en las Iglesias Coloniales en la Zona de Cuzco	H5																																																																										
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><th colspan="4">Matriz de Entrada</th></tr> <tr><th colspan="4">Intensidad del Terremoto</th></tr> <tr><th></th><th>Frecuente</th><th>Ocasional</th><th>Raro</th></tr> <tr><th rowspan="3">Daño Esperado</th><td>Daño Insignificante</td><td>L1</td><td>L2</td><td>L3</td></tr> <tr><td>Daño Moderado</td><td>M1</td><td>M2</td><td>M3</td></tr> <tr><td>Daño Fuerte</td><td>H1</td><td>H2</td><td>H3</td></tr> </table>		Matriz de Entrada				Intensidad del Terremoto					Frecuente	Ocasional	Raro	Daño Esperado	Daño Insignificante	L1	L2	L3	Daño Moderado	M1	M2	M3	Daño Fuerte	H1	H2	H3	Criterio: 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/>																																																		
Matriz de Entrada																																																																													
Intensidad del Terremoto																																																																													
	Frecuente	Ocasional	Raro																																																																										
Daño Esperado	Daño Insignificante	L1	L2	L3																																																																									
	Daño Moderado	M1	M2	M3																																																																									
	Daño Fuerte	H1	H2	H3																																																																									
Índice de Vulnerabilidad																																																																													
Parámetros de Evaluación		Puntuación	p_i	$C_{vi} * p_i$	Notas y Esquemas																																																																								
Análisis Global																																																																													
P1	Sistema Estructural Resistente	A 0	B 5	C 20	D 50	0.75																																																																							
P2	Cualidad del sistema resistente	A 0	B 5	C 20	D 50	100																																																																							
P3	Localización e Interacción	A 0	B 5	C 20	D 50	150																																																																							
P4	Irregularidad en Planta	A 0	B 5	C 20	D 50	150																																																																							
P5	Resistencia al Corte	A 0	B 5	C 20	D 50	0.50																																																																							
P6	Distancia Máxima entre Paredes	A 0	B 5	C 20	D 50	0.75																																																																							
P7	Aberturas	A 0	B 5	C 20	D 50	0.50																																																																							
P8	Tipo de Cobertura	A 0	B 5	C 20	D 50	100																																																																							
Análisis Local																																																																													
P9	Evaluación de la Fachada	A 0	B 5	C 20	D 50	150																																																																							
P10	Campanario	A 0	B 5	C 20	D 50	0.75																																																																							
P11	Espadaña	A 0	B 5	C 20	D 50	0.75																																																																							
P12	Capillas y Contrafuertes	A 0	B 5	C 20	D 50	100																																																																							
Estado de Conservación																																																																													
P13	Daños estructurales	A 0	B 5	C 20	D 50	100																																																																							
Elementos no Estructurales																																																																													
P14	Elementos no estructurales	A 0	B 5	C 20	D 50	0.50																																																																							
		I_v	0			$I_v *$	0																																																																						
				$I_v *$																																																																									
				Bajo	<0.25																																																																								
				Medio	$0.25 < I_v * < 0.40$																																																																								
				Alto	>0.40																																																																								
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><th rowspan="2">CFS</th><th colspan="4">Sismo Frecuente</th></tr> <tr><th>Z1</th><th>Z2</th><th>Z3</th><th>Z4</th></tr> <tr><td>Bajo</td><td style="background-color: yellow;"></td><td style="background-color: orange;"></td><td style="background-color: red;"></td><td style="background-color: red;"></td></tr> <tr><td>Medio</td><td style="background-color: yellow;"></td><td style="background-color: orange;"></td><td style="background-color: red;"></td><td style="background-color: red;"></td></tr> <tr><td>Alto</td><td style="background-color: yellow;"></td><td style="background-color: orange;"></td><td style="background-color: red;"></td><td style="background-color: red;"></td></tr> </table>		CFS	Sismo Frecuente				Z1	Z2	Z3	Z4	Bajo					Medio					Alto					<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><th rowspan="2">CFS</th><th colspan="4">Sismo Ocasional</th></tr> <tr><th>Z1</th><th>Z2</th><th>Z3</th><th>Z4</th></tr> <tr><td>Bajo</td><td style="background-color: yellow;"></td><td style="background-color: orange;"></td><td style="background-color: red;"></td><td style="background-color: red;"></td></tr> <tr><td>Medio</td><td style="background-color: yellow;"></td><td style="background-color: orange;"></td><td style="background-color: red;"></td><td style="background-color: red;"></td></tr> <tr><td>Alto</td><td style="background-color: yellow;"></td><td style="background-color: orange;"></td><td style="background-color: red;"></td><td style="background-color: red;"></td></tr> </table>		CFS	Sismo Ocasional				Z1	Z2	Z3	Z4	Bajo					Medio					Alto					<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><th rowspan="2">CFS</th><th colspan="4">Sismo Raro</th></tr> <tr><th>Z1</th><th>Z2</th><th>Z3</th><th>Z4</th></tr> <tr><td>Bajo</td><td style="background-color: yellow;"></td><td style="background-color: orange;"></td><td style="background-color: red;"></td><td style="background-color: red;"></td></tr> <tr><td>Medio</td><td style="background-color: yellow;"></td><td style="background-color: orange;"></td><td style="background-color: red;"></td><td style="background-color: red;"></td></tr> <tr><td>Alto</td><td style="background-color: yellow;"></td><td style="background-color: orange;"></td><td style="background-color: red;"></td><td style="background-color: red;"></td></tr> </table>		CFS	Sismo Raro				Z1	Z2	Z3	Z4	Bajo					Medio					Alto				
CFS	Sismo Frecuente																																																																												
	Z1	Z2	Z3	Z4																																																																									
Bajo																																																																													
Medio																																																																													
Alto																																																																													
CFS	Sismo Ocasional																																																																												
	Z1	Z2	Z3	Z4																																																																									
Bajo																																																																													
Medio																																																																													
Alto																																																																													
CFS	Sismo Raro																																																																												
	Z1	Z2	Z3	Z4																																																																									
Bajo																																																																													
Medio																																																																													
Alto																																																																													
¿Se verifica?		¿Se verifica?		¿Se verifica?																																																																									
<input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No		<input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No		<input type="checkbox"/> Si <input type="checkbox"/> No																																																																									
Daño Esperado																																																																													
Insignificante		Moderado		Fuerte																																																																									