

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**MÉTODO MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS
DE REFORZAMIENTO SÍSMICO MEDIANTE EL USO DE
CRITERIOS DE TRANSPARENCIA Y HERRAMIENTAS BIM**

Tesis para optar por el Grado de **Magíster en Ingeniería Civil**, que presenta:

Lisselyn Cristina Córdova Arias

Asesores:

Dra. Sandra Cecilia Santa Cruz Hidalgo

Dr. Xavier Max Brioso Lescano

Lima, junio de 2019



A MI MAMÁ

Soy la hija de mi madre, siempre.

Cuando me veas volar recuerda que tú me dibujaste las alas.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, todo honor y toda gloria.

A mi abuelito Pedro Arias en el cielo, mi mayor ejemplo de vida.

A mi papá, por nunca cortarme las alas.

A mi hermana, por enseñarme a ser una buena persona de risa contagiosa.

A mi familia, por ser mi respaldo y mi fuente inagotable de amor e inspiración.

A mi familia vasca, mi tío Jon Guarrotxena, por mis más bellos recuerdos de infancia y juventud.

A mi profesor, Rafael Iriarte, por enseñarme a vivir una vida con significado.

A mis asesores, quienes son un ejemplo de que la excelencia se construye a base de esfuerzo constante.

A la Dra. Sandra Santa Cruz, por ser mi mentora, al Dr. Xavier Brioso, por impulsarme a buscar nuevas oportunidades, y al Dr. Ian Vásquez, por las lecciones compartidas.

A todas aquellas personas que forman parte de mi historia, que me enseñaron que la educación es algo por lo que vale la pena esforzarse. La victoria no llega sola.

Al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC), por impulsar el desarrollo de la investigación en el país a través de sus programas de financiamiento, de manera particular al Convenio de gestión N°232-2015 FONDECYT por el soporte brindado durante la investigación.

Al Ministerio de Educación y funcionarios del PRONIED, por el apoyo brindado en la realización del taller participativo “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs”.

A los participantes del taller participativo, funcionarios públicos y representantes de la industria y academia, por su buena disposición y cooperación desde el primer momento.

¡Qué la fuerza siempre nos acompañe!

RESUMEN

Muchos edificios escolares localizados en zonas sísmicas fueron diseñados con criterios sísmicos obsoletos y construidos bajo estándares de calidad inadecuados. Experiencias pasadas han dejado en evidencia la alta vulnerabilidad sísmica de los edificios escolares debido a fallas estructurales. Ante la necesidad de mitigar consecuencias futuras se han propuesto diversas técnicas de reforzamiento sísmico con el fin de alcanzar niveles de desempeño sísmico requeridos. Sin embargo, la selección de la mejor técnica de reforzamiento entre todas las alternativas disponibles es una tarea compleja debido a la variedad de criterios que influyen en la decisión. Esta tarea resulta aún más difícil cuando la reglamentación sobre reforzamiento sísmico a nivel mundial no propone un método de selección racional.

En ese sentido, la investigación tiene como objetivo general mejorar la toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico mediante el uso de criterios de transparencia y herramientas BIM. Para afrontar el objetivo planteado, se propone una metodología para la toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico con un enfoque de transparencia. La metodología propuesta consta de cinco pasos en los que se apuesta por la innovación a través de la incorporación de tecnologías de información y comunicación en la construcción, como BIM, desde el inicio. El uso de BIM favorece la transparencia de la información y mejora el desempeño de la edificación a lo largo de todo su ciclo de vida. De esta manera, BIM se presenta como una estrategia prometedora para combatir las prácticas corruptas en la construcción, que afectan drásticamente la calidad de los proyectos, por ende, la salud y el bienestar de la población.

La metodología propuesta se aplicó al estudio de caso “Reforzamiento Sísmico de Colegios Públicos Sistema Modular 780-PRE de Lima Metropolitana”. Los colegios 780-PRE fueron construidos con criterios de diseño sísmico obsoletos y baja calidad constructiva. Como parte de la metodología se llevó a cabo el taller participativo “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs”, al que asistieron todos los stakeholders con participación en infraestructura educativa. Durante el taller, los stakeholders fueron partícipes de una experiencia de aprendizaje inmersivo a través del recorrido virtual por los modelos 3D y 4D de las alternativas de reforzamiento. Al mismo tiempo, los stakeholders participaron activamente en la coproducción de criterios de decisiones sobre reforzamiento sísmico dentro de entornos de trabajos colaborativos y multidisciplinares. Finalmente, los stakeholders manifestaron que las actividades desarrolladas en el taller contribuyeron positivamente al incremento de la transparencia en la toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	i
TABLA DE CONTENIDOS.....	ii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABLAS	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
HIPÓTESIS	3
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 TRANSPARENCIA COMO ESTRATEGIA ANTICORRUPCIÓN.....	4
2.2 MÉTODOS MULTI-CRITERIO DE TOMA DE DECISIONES.....	6
2.2.1 Método TOPSIS	6
2.2.2 Método CBA.....	10
2.3 BUILDING INFORMATION MODELING.....	12
2.4 OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS.....	14
2.4.1 Procedimiento para el cálculo de Indicadores de Optimización.....	15
2.5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	18
2.5.1 Metodología del ACV	19
3. ESTADO DEL ARTE.....	22
3.1 REGLAMENTACIÓN SOBRE REFORZAMIENTO SÍSMICO A NIVEL MUNDIAL.....	22
3.2 CRITERIOS DE DECISIONES EN LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO SÍSMICO.....	26
3.3 USO DE BIM EN LA ETAPA DE TOMA DE DECISIONES	28
4. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA TOMA DE DECISIONES DE PROYECTOS DE REFORZAMIENTO SÍSMICO CON ENFOQUE DE TRANSPARENCIA.....	30
PASO 1: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS	32
PASO 2: MODELACIÓN VIRTUAL BIM DE ALTERNATIVAS.....	32
PASO 3: SELECCIÓN DE CRITERIOS MEDIANTE LA PARTICIPACIÓN DE STAKEHOLDERS.....	34
Criterio de transparencia	36
PASO 4: CÁLCULO DE INDICADORES DE CRITERIOS DE DECISIONES MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS BIM.....	37
PASO 5: EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE REFORZAMIENTO SÍSMICO	39

5. ESTUDIO DE CASO: REFORZAMIENTO SÍSMICO DE COLEGIOS PÚBLICOS SISTEMA MODULAR 780-PRE DE LIMA METROPOLITANA.....	40
5.1 DIAGNÓSTICO SITUACIONAL	40
5.2 METODOLOGÍA PROPUESTA.....	42
PASO 1: Recopilación de información e Identificación de alternativas	42
PASO 2: Modelación virtual BIM de alternativas	43
PASO 3: Selección de criterios mediante la participación de stakeholders	46
PASO 4: Cálculo de indicadores de criterios de decisiones mediante el uso de herramientas BIM	53
PASO 5: Evaluación de alternativas de reforzamiento sísmico	59
5.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	61
5.3.1 Análisis de la valoración de los criterios de la matriz de toma de decisiones	61
5.3.2 Análisis del ranking de las alternativas de reforzamiento sísmico	64
5.4 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA MEDIANTE ENCUESTAS	66
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
REFERENCIAS	70
ANEXO 1: Taller participativo “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs”	80
ANEXO 2: Construcción de la Matriz de Toma de Decisiones para la Selección de Técnicas de Reforzamiento Sísmico.....	95
ANEXO 3: Reporte del Análisis de Ciclo de Vida de Tres Técnicas de Reforzamiento Sísmico.....	100
ANEXO 4: Aplicación del Método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution).....	116
ANEXO 5: Aplicación del Método CBA (Choosing By Advantages).....	125
ANEXO 6: Validación de la Metodología Propuesta mediante Encuestas.....	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Representación de la distancia Euclidiana a las soluciones ideal y no ideal en un espacio bidimensional	7
Figura 2.2. Pasos del método CBA (Traducido de Arroyo <i>et al.</i> [57]).....	12
Figura 2.3. Aplicaciones y beneficios BIM.....	14
Figura 2.4. Fases del Análisis de Ciclo de Vida [80]	19
Figura 2.5. Representación de las categorías de impacto: midpoint y endpoint (Traducido de ReCiPe 2016).....	21
Figura 3.1. Proceso de creación de formatos BIM (Traducido de Volk [28]).....	28
Figura 4.1. Esquema de la Metodología Propuesta	31
Figura 4.2. Flujo de proceso para la creación de un modelo 4D (Adaptado de Khawaja y Schmeits [117])	33
Figura 4.3. Medición de la transparencia como criterio de decisión cuantificable	36
Figura 4.4. Representación de la correlación entre la transparencia y la factibilidad de la construcción.....	37
Figura 5.1. (a) Distribución de edificaciones educativas según antigüedad (b) Distribución de edificaciones educativas por ejecutor de obra [122]	41
Figura 5.2. Porcentaje de edificaciones por tipo de intervención [122]	41
Figura 5.3. Problema de columna corta – Sismo Nazca 1996 (Muñoz <i>et al.</i> [124])	42
Figura 5.4. Modelo 3D de la técnica de reforzamiento sísmico MARM (Autodesk® Revit™)	43
Figura 5.5. Modelo 4D: Modelo 3D + programación de la técnica de reforzamiento sísmico MARM-Fase 1 (Software Autodesk® Navisworks™)	43
Figura 5.6. Modelo 3D de la técnica de reforzamiento sísmico IMACA (Autodesk® Revit™)	44
Figura 5.7. Modelo 4D: Modelo 3D + programación de la técnica de reforzamiento sísmico IMACA-Fase 1 (Autodesk® Navisworks™)	44
Figura 5.8. Modelo 3D de la técnica de reforzamiento sísmico ACMAC (Autodesk® Revit™)	45
Figura 5.9. Modelo 4D: Modelo 3D + programación de la técnica de reforzamiento sísmico ACMAC-Fase 1 (Autodesk® Navisworks™)	45
Figura 5.10. Foto grupal con los stakeholders del taller participativo	46
Figura 5.11. Presentación del Arq. Rodrigo Sayán del PRONIED – Ministerio de Educación	47
Figura 5.12. Sesión de coproducción – Locación: Sala UNO - PUCP.....	48
Figura 5.13. Experiencia inmersiva a través de visores de Realidad Virtual	48
Figura 5.14. Sesión de coproducción - Conclusiones de las mesas de trabajo respecto a los criterios para la toma de decisiones en reforzamiento sísmico.....	49
Figura 5.15. Comparación del costo de ejecución de las técnicas de reforzamiento sísmico.....	55
Figura 5.16. Tabla de metrados de la técnica de reforzamiento sísmico IMACA (Autodesk® Revit™)	55
Figura 5.17. Comparación del tiempo de ejecución de las técnicas de reforzamiento sísmico	56
Figura 5.18. Indicadores de transparencia.....	57
Figura 5.19. Método ReCiPe 2016 – Contribuciones de las etapas del ciclo de vida a las emisiones de CO ₂ equivalente de las tres técnicas de reforzamiento	58
Figura 5.20. Método ReCiPe 2016 – Contribuciones de las etapas del ciclo de vida a las emisiones de material particulado de las tres técnicas de reforzamiento.....	58

Figura 5.21. Método ReCiPe 2016 – Comparación de los daños en la salud humana de las tres técnicas de reforzamiento	59
Figura 5.22. Valoración de criterios en la Mesa de trabajo 1	60
Figura 5.23. Valoración de criterios en la Mesa de trabajo 4	60
Figura 5.24. Stakeholders respondiendo la encuesta de salida	60
Figura 5.25. Pesos de los criterios de decisiones por categorías – Método TOPSIS	61
Figura 5.26. Pesos de los criterios de decisiones por categorías – Método CBA	62
Figura 5.27. Perfil de los stakeholders	63
Figura 5.28. Ránking de las técnicas de reforzamiento sísmico – Método TOPSIS	65
Figura 5.29. Ránking de las técnicas de reforzamiento sísmico – Método CBA	65
Figura 5.30. Respaldo de la hipótesis por parte de la Mesa de trabajo 4	67



LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Escala de importancia relativa de Saaty [53]	8
Tabla 2.2. Formato para la evaluación de la modulación, estandarización e industrialización [69]	17
Tabla 3.1. Reglamentación existente sobre reforzamiento sísmico en el mundo	24
Tabla 3.2. Criterios de Decisiones de la revisión de la literatura	27
Tabla 5.1. Criterios de decisiones para la selección de técnicas de reforzamiento propuestos en el taller participativo	50
Tabla 5.2. Criterios de evaluación de las técnicas de reforzamiento sísmico incremental	53
Tabla 5.3. Matriz de toma de decisiones para las tres técnicas de reforzamiento sísmico	54
Tabla 5.4. Pesos de los criterios de decisiones - Método TOPSIS	61
Tabla 5.5. Pesos de los criterios de decisiones – Método CBA	62
Tabla 5.6. Relación entre el perfil de los stakeholders y los escenarios de análisis	63
Tabla 5.7. Puntajes totales de las técnicas de reforzamiento sísmico - Método TOPSIS	64
Tabla 5.8. Puntajes totales de las técnicas de reforzamiento sísmico – Método CBA	64
Tabla 5.9. Puntajes normalizados de las técnicas de reforzamiento sísmico – Métodos TOPSIS y CBA	65

1. INTRODUCCIÓN

Un gran número de edificios educativos se encuentran en alto riesgo en regiones sísmicas debido a que fueron diseñadas con criterios obsoletos o construidos con control de calidad inadecuado. Prueba de ello, son los graves daños ocurridos en los edificios educativos en los últimos sismos [1]. Para combatir esta situación, se han planteado campañas masivas de reforzamiento de colegios en varias ciudades ubicadas en zonas sísmicas [2]. Por ejemplo, desde el 2010, las Naciones Unidas a través de la Estrategia Internacional para Reducción de Desastres (ISDR, por sus siglas en inglés) promueve la campaña “A million of schools and hospitals safe from disasters”.

Con el propósito de lograr un adecuado desempeño sísmico de edificios educativos existentes, se han propuesto diversas técnicas de reforzamiento estructural en una o más fases de intervención (reforzamiento incremental) [3]. Las técnicas de reforzamiento pueden dividirse en convencionales (rellenos, tirantes, abrazaderas para marcos de acero existentes) [4], [5] y no convencionales (adición de diagonales de acero en pórticos de concreto armado [6], elementos de disipación de energía [7]–[9], elementos post-tensados y aisladores sísmicos de base [10]. Cada una de las técnicas propuestas tienen ventajas y limitaciones y la selección de la técnica más óptima para una intervención masiva en los colegios requiere de un enfoque racional.

Estudios previos han empleado métodos Multi-Criterio de Toma de Decisiones (MCDM, por sus siglas en inglés) para la selección racional de técnicas de reforzamiento sísmico tomando en cuenta criterios de decisiones económicos, sociales, medioambientales y físicos [11], [12], [21], [13]–[20]. Lamentablemente, ninguno de estos métodos ha sido adoptado por normas de diseño sísmico internacionales. Por otro lado, la calidad de los proyectos disminuye drásticamente debido a la existencia de prácticas corruptas en la construcción, que afecta directamente la salud y el bienestar de las personas [22], [23]. A pesar de que no existe una única solución para eliminar la corrupción en los proyectos de construcción, se han planteado diferentes estrategias anticorrupción, una de ellas es la transparencia [23]–[25]. Bajo esta problemática parece razonable incluir la transparencia como un criterio cuantificable en la toma de decisiones en reforzamiento sísmico. De igual manera, este criterio de decisiones no ha sido tomado en cuenta dentro de la normatividad de diseño sísmico.

Sumado a ello, en la industria de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC, por sus siglas en inglés) existe una constante búsqueda de soluciones que permitan reducir los costos y el tiempo de entrega, e incrementar la productividad y la calidad del proyecto [26]. En ese sentido, Building Information Modeling (BIM) se ha posicionado como una metodología prometedora para la consecución de esos objetivos y como “un componente importante para la innovación y la transparencia de la información” [27]. BIM es entendido como un proceso y tecnología correspondiente que mejora la eficiencia y efectividad de la entrega de un proyecto desde la concepción hasta la operación/mantenimiento [28]. BIM simula el proyecto de construcción en un entorno virtual [26] mediante la representación de modelos digitales con información que permiten a los stakeholders visualizar la secuencia constructiva, identificar interferencias, cuantificar cantidades de los elementos, estimar el costo, entre otras aplicaciones [29]. Por otro lado, la implementación de BIM en edificaciones existentes es menos frecuente que en nuevas edificaciones, como consecuencia de la falta de documentación en formato BIM de las existentes [28], [30]–[33].

A la luz de estas necesidades es necesario incluir un criterio que cuantifique el nivel de transparencia en la ejecución del proyecto de reforzamiento sísmico. Asimismo, es deseable incorporar herramientas BIM dentro del proceso de toma de decisiones de reforzamiento sísmico con el propósito de incrementar la transparencia de la decisión.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del proyecto de investigación es mejorar la toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico mediante el uso de criterios de transparencia y herramientas BIM para reducir el riesgo de corrupción.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Proponer una metodología para la toma de decisiones transparentes en proyectos de reforzamiento sísmico
- ii) Incorporar herramientas BIM como modelación 3D y simulación 4D para mejorar el entendimiento de los stakeholders en la toma de decisiones
- iii) Incluir la transparencia como un criterio cuantificable en la toma de decisiones en proyectos de reforzamiento sísmico

iv) Aplicar el estudio de caso: selección de la mejor técnica de reforzamiento sísmico incremental para infraestructura educativa pública en Lima Metropolitana

HIPÓTESIS

El uso de criterios de transparencia y herramientas BIM en la toma de decisiones mejora el entendimiento de los stakeholders, permite seleccionar la técnica que mejor mitigue el riesgo de corrupción e incrementa la transparencia en la toma de decisiones.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

En primer lugar, se realiza la revisión de la literatura con el fin de obtener un panorama general sobre el estado actual de la toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico. Inicialmente, se revisa la reglamentación existente a nivel mundial sobre reforzamiento sísmico existente para su posterior clasificación. Luego, se recopilan estudios previos sobre toma de decisiones de reforzamiento sísmico para identificar los criterios de decisiones empleados. Después de ello, se busca información sobre el uso de BIM en la fase de toma de decisiones.

En segundo lugar, se desarrolla la metodología cuyo objetivo principal es incrementar la transparencia de la toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico. La metodología consta de cinco pasos en los que se incorpora herramientas BIM y se incluye a la transparencia como un criterio cuantificable. La metodología propuesta se asienta sobre las bases de (1) ser aplicada con homogeneidad en cualquier proyecto de reforzamiento sísmico, (2) permita medir su efectividad de manera cuantitativa mediante encuestas, y (3) permita desarrollar líneas de estudio y mejora continua.

Por último, la metodología propuesta es aplicada al estudio de caso que analiza la infraestructura educativa pública construida bajo los lineamientos de la Norma de Diseño Sismorresistente de 1977. El estudio de caso se centra en el reforzamiento sísmico de los colegios públicos sistema modular 780-PRE, que representan el 25% del total de edificios educativos peruanos [34]. Dadas sus condiciones no garantizan la seguridad de la población estudiantil debido a que en sismos pasados sufrieron graves daños por la limitada rigidez lateral que desencadena el problema de columna corta [35].

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se describe brevemente cada uno de los temas desarrollados durante la investigación. Entre ellos se encuentran: transparencia como estrategia anticorrupción, métodos de toma de decisiones TOPSIS y CBA, BIM, optimización de procesos constructivos, y Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

2.1 TRANSPARENCIA COMO ESTRATEGIA ANTICORRUPCIÓN

El Banco Mundial ha identificado a la corrupción como uno de los mayores obstáculos para el desarrollo económico y social tanto en países desarrollados como en países en vías de desarrollo. De acuerdo con la definición de la Real Academia de la Lengua Española (RAE), la corrupción “en las organizaciones, especialmente en las públicas, es una práctica que consiste en la utilización de las funciones y medios de aquellas en provecho, económico o de otra índole, de sus gestores”. Asimismo, la organización Transparencia Internacional define a la corrupción como ‘el abuso o el mal uso del poder confiado para beneficio propio’.

De acuerdo con el “Índice de Fuentes de Sobornos 2011” (*Bribers Payers Index 2011*, por sus siglas en inglés), la industria de construcción y contratos de obras públicas se perciben como uno de los sectores con mayor grado de corrupción [36]. Esto se debe principalmente a las características particulares de los proyectos de construcción, por ejemplo, la dimensión y complejidad de los mismos, la singularidad, las numerosas aprobaciones y permisos, las oportunidades de retrasos y excesos, y la posibilidad de ocultar la calidad del trabajo [37]. Ante esta situación, la corrupción en el sector de construcción es un problema complejo, que se manifiesta en prácticas corruptas, como soborno, fraude, colusión, malversación, nepotismo y extorsión [38]. Estas malas prácticas se pueden presentar en cualquier etapa del proyecto (identificación, planificación, financiamiento, diseño, licitación, ejecución, operación y mantenimiento) [23], [37].

En países con mayores índices de corrupción, los daños y pérdidas ocasionados por terremotos son mayores [36]. Los terremotos no matan a las personas, los edificios colapsados lo hacen [37]. La existencia de prácticas corruptas en proyectos de construcción reduce la calidad [39], eficiencia, efectividad y equidad de los servicios de infraestructura, que afecta directamente la salud y el bienestar de las personas [22]. En ese sentido, es posible afirmar que es responsabilidad de las autoridades garantizar la seguridad sísmica de los edificios. Sin embargo, alcanzar este fin resulta difícil dada la

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

relación cercana entre grupos de interés corruptos, como contratistas, supervisores de construcción y funcionarios públicos, que se coluden para ignorar las normas de construcción y minimizar las inspecciones locales [37]. Por ejemplo, una de las razones del incumplimiento de los requisitos y especificaciones de seguridad puede ser el soborno a los inspectores públicos [22]. Añadido a ello, el nivel de desarrollo del país también tiene una implicancia porque conlleva a que se utilicen materiales y métodos de ensamblaje por debajo de los estándares [40].

En países con mayores índices de corrupción, los daños y pérdidas ocasionados por terremotos son mayores, principalmente las pérdidas humanas [36]. Los terremotos no matan a las personas, los edificios colapsados lo hacen [37]. En ese sentido, es posible afirmar que es responsabilidad de las autoridades garantizar la seguridad sísmica de los edificios. Sin embargo, alcanzar este fin puede estar limitado a la existencia de prácticas corruptas y al nivel de desarrollo del país, ya que ello conlleva a que se utilicen materiales y métodos de ensamblaje por debajo de los estándares [40]. Asimismo, la relación cercana entre stakeholders corruptos como contratistas, supervisores de construcción y funcionarios públicos termina generando que se ignoren las normas de construcción y se minimicen las inspecciones locales, que resulta siendo mortal en zonas de riesgo sísmico [37].

En los últimos años, se ha incrementado el compromiso de una agenda contra la corrupción en el sector construcción [39]. Al respecto, se sugiere que la corrupción en proyectos de construcción solo podrá ser eliminada si todos los involucrados en los proyectos cooperan en el desarrollo e implementación de acciones efectivas contra la corrupción que aborden tanto la oferta como la demanda de corrupción [41]. A pesar de que no existe una única solución para eliminar la corrupción en los proyectos de construcción se han propuesto algunas iniciativas o acciones para erradicar estas malas prácticas, por ejemplo, mecanismos de transparencia, código ético de conducta anticorrupción, lista negra de empresas corruptas, auditoría y tecnología de la información, entre otros [23]–[25]. En otras palabras, si el objetivo es que los proyectos sean completados de manera justa y transparente es necesario que se cumplan con las normas anticorrupción y que los gastos se ajusten a las regulaciones financieras [42].

Finalmente, es posible afirmar que la transparencia es una estrategia importante para prevenir la corrupción en proyectos de construcción [43] y es clave para mejorar el servicio público [23]. Por esa razón, a pesar de que tradicionalmente el éxito de un proyecto de construcción se mide mediante el desempeño de indicadores de tiempo, costo y calidad [42], es necesario considerar otros criterios adicionales como eficiencia, imparcialidad y transparencia [44]. Al respecto, los mecanismos de transparencia pueden proveer al público acceso a la información sobre los proyectos de construcción con el propósito de monitorear el desempeño de los mismos y responsabilizar a las autoridades por sus

decisiones [23]. De esta manera se garantiza que los funcionarios públicos, gerentes, miembros de la junta y empresarios actúen de manera visible y comprensible, e informen sobre sus actividades [44], [45].

2.2 MÉTODOS MULTI-CRITERIO DE TOMA DE DECISIONES

El término MCDM hace referencia a todos los métodos existentes que ayudan a las personas a tomar decisiones de acuerdo con sus preferencias cuando hay más de un criterio en conflicto [46]. Los métodos de toma de decisiones son procedimientos de apoyo a la decisión usados en muchos campos para evaluar y comparar entre un conjunto de alternativas, que luego de ser rankeados permitirá identificar la solución óptima respecto a los objetivos trazados [12]. Este modelo de decisión está constituido por los siguientes elementos: un conjunto de alternativas que necesitan ser puntuadas por el tomador de decisiones, un conjunto de criterios de decisiones, típicamente medidas en diferentes unidades, y un conjunto de medidas de desempeño [47].

Los métodos de toma de decisiones constituyen un campo avanzado en la investigación operativa dedicado al desarrollo e implementación de herramientas y metodologías de apoyo a las decisiones para enfrentar problemas de decisión complejos que involucran múltiples criterios, metas u objetivos de naturaleza conflictiva [48]. Estas herramientas y metodologías pueden ser matemáticas y computacionales, especialmente, cuando la evaluación del desempeño del criterio es subjetiva [49].

En relación a la evaluación de proyectos, cuando las decisiones tienen implicancias sociales y ambientales es más apropiado emplear un análisis multi-criterio en reemplazo del tradicional Análisis Costo/Beneficio (CBA) cuyo principal enfoque es la eficiencia económica [50], [51]. Los métodos de toma de decisiones son capaces de mejorar la transparencia, la auditabilidad y el rigor analítico de las decisiones [52], [53]. Al respecto, la transparencia se logra estableciendo y ponderando los criterios de decisiones, y fomentando la participación de los stakeholders en las decisiones. Mas aún cuando las razones de la elección son explícitas y las decisiones anteriores son fácilmente auditables [47].

2.2.1 Método TOPSIS

El método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) fue desarrollado por Hwang & Yoon en 1981. El principio básico es que la alternativa escogida debería ser aquella cuya distancia sea la más corta a la solución ideal y la más alejada a la solución no ideal.

La solución ideal está compuesta por los mejores atributos, mientras que la solución no ideal por los peores atributos. Desde un sentido geométrico, la alternativa escogida será la que tenga la distancia

euclidiana mínima a la solución ideal. Al mismo tiempo, esta alternativa debe estar más alejada de la solución no ideal (ver Figura 2.1). TOPSIS ordena las preferencias tomando en cuenta las distancias a la solución ideal y no ideal simultáneamente con la proximidad relativa a la solución ideal.

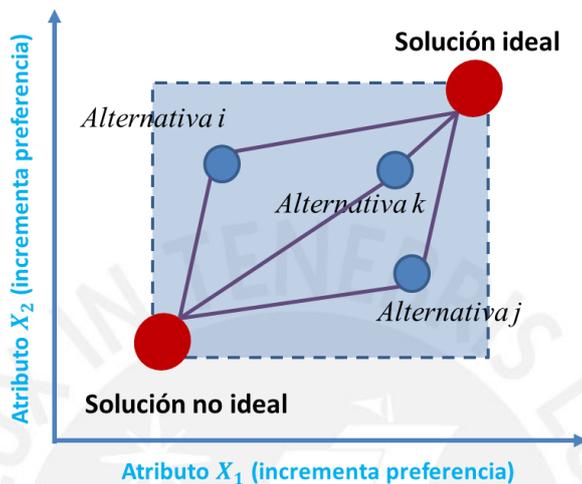


Figura 2.1. Representación de la distancia Euclidiana a las soluciones ideal y no ideal en un espacio bidimensional

El método TOPSIS consiste en la evaluación de la Matriz de Toma de Decisiones $D = [x_{ij}]$ compuesta por m alternativas asociadas con n criterios.

$$D = \begin{matrix} & \begin{matrix} x_1 & x_2 & \dots & x_j & \dots & x_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Donde:

- x_{mn} , valoración de la alternativa A_m respecto al criterio C_n
- Cada criterio tiene su peso w_i

a) Ponderación de los criterios de decisiones

Con el propósito de tomar en cuenta la importancia relativa de cada criterio, es necesario la definición de un peso w_j . El método propuesto para la ponderación de los criterios es la escala de importancia relativa planteado por Saaty [54].

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Tabla 2.1. Escala de importancia relativa de Saaty [54]

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Moderada importancia	La experiencia sobre el juicio favorece levemente a una actividad sobre otra.
5	Importancia fuerte	La experiencia sobre el juicio favorece fuertemente a una actividad sobre otra.
7	Muy fuerte o demostrada importancia	Una actividad es mucho más favorecida que la otra, su predominancia se demostró en la práctica.
9	Extrema importancia	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta y totalmente clara.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes.

La matriz de comparación de pares A está compuesto de elementos a_{ij} , que representan la importancia relativa del criterio C_i respecto a C_j utilizando una escala del 1 al 9 (Tabla 2.1).

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

b) Construcción de la matriz de toma de decisiones normalizada

Tomando en cuenta que los atributos tienen diferentes dimensiones es necesario transformarlos en atributos adimensionales para poder compararlas entre ellas. Los elementos r_{ij} de la matriz de toma de decisiones normalizada R pueden ser obtenidos mediante la Ecuación 2.1.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

Ecuación 2.1

c) Construcción de la matriz de toma de decisiones normalizada y ponderada

A partir del conjunto de pesos W (Ecuación 2.2) asociado a cada criterio x_n se construye la matriz de toma de decisiones normalizada y ponderada V a partir de la multiplicación de cada columna de la matriz R con los pesos asociados w_j .

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n), \sum_{j=1}^n w_j = 1$$

Ecuación 2.2

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

d) *Determinación de la solución ideal y no-ideal*

Las soluciones son ficticias, A^+ representa la solución ideal que contiene los mejores atributos de entre las alternativas (A_i) y A^- , la solución no-ideal con los peores atributos. Ambas soluciones son obtenidas mediante la Ecuación 2.3 y la Ecuación 2.4, respectivamente.

$$A^* = \{(max_1 v_{ij} | j \in J), (min_1 v_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_j^*, \dots, v_n^*\}$$

Ecuación 2.3

$$A^- = \{(min_1 v_{ij} | j \in J), (max_1 v_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\}$$

Ecuación 2.4

Donde:

$J = \{j = 1, 2, \dots, n | j\}$ asociado con los criterios a maximizar

$J' = \{j = 1, 2, \dots, n | j\}$ asociado con los criterios a minimizar

e) *Cálculo de la medición de separación*

La separación entre cada alternativa puede ser medida con la distancia Euclidiana. La distancia de cada alternativa a la solución ideal y no ideal está dada por la Ecuación 2.5 y la Ecuación 2.6, respectivamente.

$$S_{i^*} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Ecuación 2.5

$$S_{i^-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Ecuación 2.6

f) Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

La proximidad relativa de A_i con respecto a A^* es definido mediante la Ecuación 2.7.

$$C_{i^*} = S_{i^-} / (S_{i^*} + S_{i^-}), \quad 0 < C_{i^*} < 1, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Ecuación 2.7

g) Orden de las alternativas

Las alternativas pueden ser ordenadas preferentemente de mayor a menor valor del C_{i^*} . Siendo la mejor alternativa aquella con el valor más alto, ya que representará la distancia relativa más pequeña a la solución ideal A^* .

2.2.2 Método CBA

El sistema de toma de decisiones de elección por ventajas o *Choosing by Advantages* (CBA) desarrollado por Suhr [55] toma en cuenta las ventajas de las alternativas para compararlas y decidir por la mejor opción. En el CBA se define un vocabulario común, adaptando los siguientes términos: alternativa, factor, criterio, atributo, ventaja e importancia de la ventaja. Una alternativa es una posible decisión (por ejemplo, elegir entre alternativa 1 o alternativa 2) [56]. Un factor es un contenedor de criterios, atributos, ventajas, importancia, y otro tipo de datos [55]. Un criterio es una regla de decisión o pauta establecida por el tomador de decisión. Los criterios pueden ser obligatorios, representado por las condiciones que cada alternativa debe tener, o deseados, por las preferencias de cada tomador de decisión.

El CBA considera el costo por separado de otros factores, y no lo trata como un criterio. Un atributo es “una característica, cualidad o consecuencia de una alternativa”. Una ventaja es una diferencia beneficiosa entre dos y solo dos atributos. En el sistema CBA solo se usan ventajas, en otras palabras, una desventaja de una alternativa es expresada como una ventaja de la otra.

El sistema de toma de decisiones CBA incluye métodos para prácticamente todo tipo de decisiones, desde muy simples hasta muy complejas. El método Tabular es usado para decisiones complejas y recomendado en proyectos de construcción. El proceso del sistema de toma de decisiones CBA comprende cinco fases: (1) Puesta en Escena, (2) Innovación, (3) Toma de Decisiones, (4) Reconsideración, y (5) Implementación.

La tercera fase es el tema principal del libro de Suhr, *The Choosing By Advantages Decisionmaking System* [55]. En el método Tabular, la Fase 3 comprende cuatro pasos: (3.1) Resumir los atributos de cada alternativa, (3.2) Determinar las ventajas de cada alternativa, (3.3) Asignar un grado de importancia a cada ventaja, y (3.4) Escoger la alternativa con la importancia de ventajas total más grande.

A partir del método Tabular descrito en el ítem 2.2.2, Arroyo *et al.* [57] proponen los siguientes pasos para la aplicación del método CBA, que se representan gráficamente en la Figura 2.2:

1. Identificar alternativas

Los interesados eligen alternativas que puedan generar importantes ventajas sobre otras.

2. Definir factores

El propósito de identificar factores es seleccionar aquellos que permitan diferenciar las alternativas.

3. Definir si el criterio de cada factor es obligatorio o deseable

Los interesados definen los criterios sobre los que se evaluarán los atributos de las alternativas. En muchos casos, los factores se desglosan en varios criterios. Los criterios de decisiones serán los seleccionados en el Paso 1.

4. Describir los atributos de cada alternativa

Los atributos o indicadores son obtenidos siguiendo los procedimientos del Paso 2.

5. Decidir las ventajas de cada alternativa

La preferencia de los interesados por maximizar o minimizar cada criterio determinará la ventaja sobre los atributos. Por ejemplo, si uno de los criterios es el tiempo de ejecución se preferirá la alternativa con el atributo menor a la que le corresponderá la ventaja mayor, a diferencia de la que no porque no tendrá ventaja.

6. Decidir la importancia de cada ventaja (IofA)

A partir de esta actividad se requiere el trabajo en colaboración, ya que las decisiones se alcanzan a través de la discusión. Las mesas de trabajo dentro del taller participativo tienen como uno de sus propósitos colocar la importancia de cada ventaja a los criterios. La IofA se usa en una escala de 0 a 100, asignado el mayor valor a la ventaja primordial. A continuación, se asigna una puntuación de importancia a las otras ventajas más importantes para cada criterio comparándola con la ventaja primordial, y de esta manera con las otras ventajas.

7. Evaluar costos

Finalmente, los interesados evalúan el costo de cada alternativa comparándolo con los puntajes totales obtenidos.

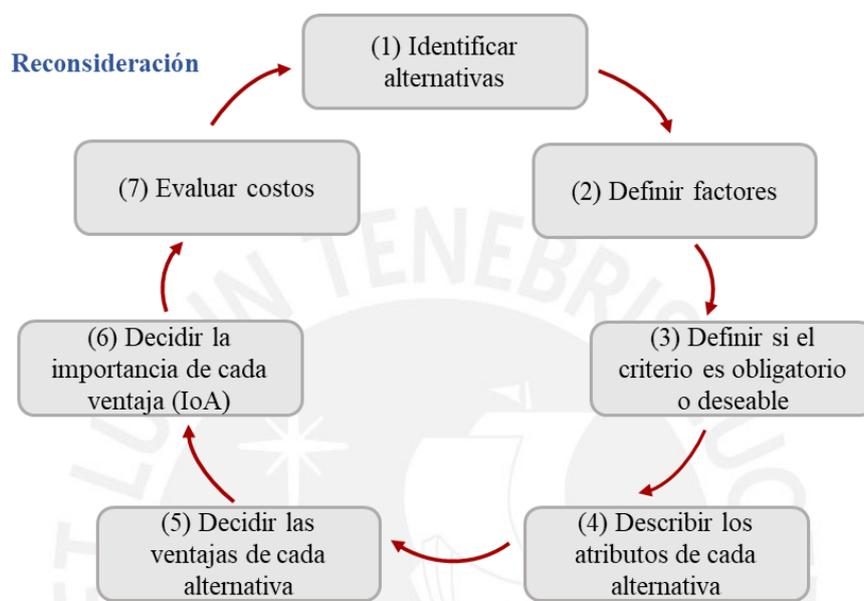


Figura 2.2. Pasos del método CBA (Traducido de Arroyo *et al.* [57])

2.3 BUILDING INFORMATION MODELING

BIM es una metodología y un proceso revolucionario que brinda a los profesionales de la arquitectura, ingeniería y construcción la visión y las herramientas para diseñar, planificar, construir y gestionar edificios e infraestructura de manera más eficiente [58]. BIM representa un nuevo paradigma dentro de la industria AEC porque promueve el trabajo colaborativo y la integración de los stakeholders desde etapas tempranas [59]. Esto genera cambios positivos en los roles y las relaciones dentro del equipo [30], [60]. Asimismo, contribuye a reducir el riesgo de corrupción en la industria de la construcción debido a la fragmentación existente entre los stakeholders de un proyecto [24].

De acuerdo con estándares internacionales, BIM es definido como “la representación digital compartida de las características físicas y funcionales de cualquier objeto construido [...] que forma una base confiable para las decisiones” [61]. Según el glosario del libro de Eastman [30], BIM es un término que se utiliza para describir herramientas, procesos y tecnologías que proporcionan documentación digital sobre un edificio, relacionados a su rendimiento, su planificación, su construcción y, posteriormente, su

funcionamiento. BIM presenta los edificios virtualmente como modelos de construcción digitales que comprenden todo su ciclo de vida [28] compuestos de objetos paramétricos con información.

El concepto de objetos paramétricos de BIM es una de las principales diferencias con los objetos tradicionales del 2D [30]. Los dibujos 2D son usados solo como elementos de visualización dado que sus componentes son líneas, arcos y círculos. Mientras que, los objetos de los modelos BIM reciben la denominación de “inteligentes”, porque son provistos de información relevante sobre cada elemento del edificio y facilitan la integración de datos y el análisis del diseño [30], [62], [63]. El resultado de la actividad de modelación se conoce como “modelo de información de construcción” que se caracteriza por contener información geométrica, relaciones espaciales y geográficas, cantidades y propiedades de los elementos del edificio, estimación de costos, inventario de materiales, y programación del proyecto, que pueden ser fácilmente extraídos [26].

Algunos conceptos y aplicaciones BIM han sido desarrollados con diferentes propósitos en la industria de la construcción, por ejemplo, los modelos BIM 4D, 5D, 6D y 7D [64]. El modelo 4D es una vista dependiente del tiempo de un modelo BIM, en el cual los objetos están asociados con actividades dentro de un plan de construcción [30]. En este modelo se representa la secuencia constructiva mediante una animación [65], que resulta de la sincronización del modelo 3D con la programación [66]. Por otro lado, el modelo 5D busca integrar en un solo sistema el análisis de constructabilidad 3D, los metrados y la programación, ya que se puede cargar los costos directamente al modelo [67].

Koskela [68] planteaba que la implementación de tecnologías de información en la construcción beneficiaría la mejora de procesos. Estos beneficios hacían referencia a la automatización de los procesos de conversión y los subflujos, la reducción de la variabilidad, la disminución de los tiempos, y la adición de transparencia. El principal beneficio de BIM es su representación geométrica de las partes de un edificio dentro de un entorno de información integrada [62]. En la Figura 2.3, se presenta una recopilación de algunas aplicaciones y beneficios BIM sugeridos por Azhar [26].

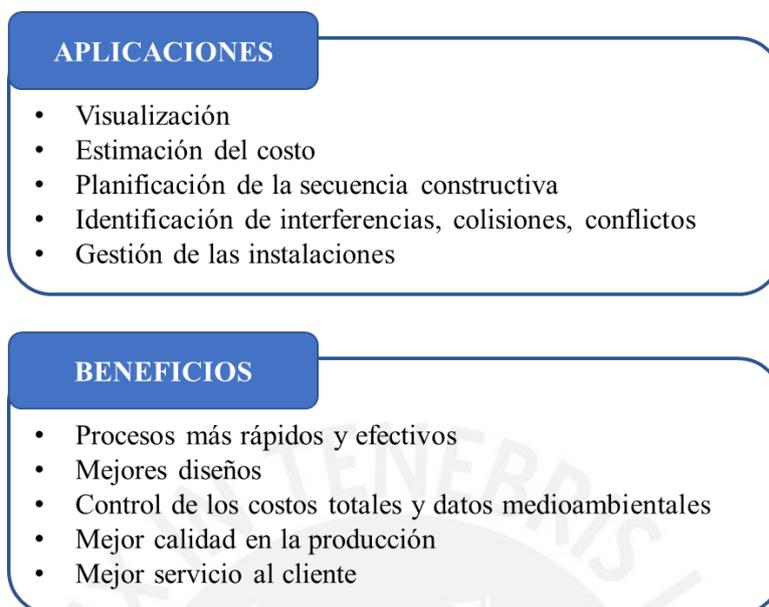


Figura 2.3. Aplicaciones y beneficios BIM

2.4 OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS CONSTRUCTIVOS

La optimización de procesos constructivos se logra mediante el cumplimiento progresivo de métricas de modulación, estandarización e industrialización. Brioso et al. [69] señalan que si la edificación es mejor modulada, estandarizada e industrializada se generaría menos residuos en la obra y en las plantas de fabricación de los proveedores. En ese sentido, se podría planificar los trabajos de mano de obra de mejor manera, y se reduciría los recursos usados en ella [69]. Todo esto contribuiría a que la edificación sea más sostenible y mejor controlada, lo que incrementaría positivamente la transparencia de la construcción de la técnica de reforzamiento. A pesar que las métricas de modulación, estandarización e industrialización se encuentran muy relacionados entre sí, es necesario evaluarlos de forma independiente [70].

Modulación

La coordinación modular es un sistema de normalización basado en un sistema de coordinación dimensional para dimensionar los componentes del edificio y colocarlos dentro de un sistema de referencia [71]. La prefabricación y el sistema de producción industrializada utilizan esta coordinación dimensional para optimizar el número de tamaños para un componente particular [72], reducir los residuos in situ y facilitar la intercambiabilidad de los componentes [73].

Estandarización

La estandarización consiste en elaborar productos y procesos con características similares, para fabricar modelos repetidos que cumplan una misma función, con el fin de simplificar y reducir el costo de la producción de componentes de la construcción, los cuales podrían ser fabricados industrialmente. Este proceso se facilita y se hace posible si previamente usamos la modulación [70].

Industrialización

La industrialización es la utilización de tecnología que sustituye la habilidad del artesano por el uso de una máquina. La esencia y la base de la industrialización es producir un objeto con reducida mano de obra artesanal, con máquinas utilizadas por obreros especializados o con máquinas automáticas [74]. El objetivo de la industrialización en la construcción es la reducción de las actividades in-situ [75].

2.4.1 Procedimiento para el cálculo de Indicadores de Optimización

El procedimiento para obtener los indicadores del grado de modulación, grado de estandarización y nivel de industrialización ha sido adaptado de la propuesta de Orihuela & Orihuela [70] para la evaluación cuantitativa del diseño y la construcción de cualquier proyecto de vivienda. A diferencia de dicha propuesta enfocada en el diseño arquitectónico, en esta investigación el procedimiento consistirá en la evaluación del diseño estructural de las tres técnicas de reforzamiento sísmico incremental.

a) Evaluación del Grado de Modulación

En primer lugar, se registra las diferentes dimensiones de las unidades estructurales como la altura y el ancho. En segundo lugar, se contabilizan las dimensiones modulares múltiplos de 10 cm. El porcentaje de modulación por cada unidad estructural es obtenido de la división de la cantidad de dimensiones modulares entre la cantidad total de dimensiones registradas. Finalmente, el grado de modulación de dimensiones del diseño estructural resulta siendo el promedio de estos porcentajes.

b) Evaluación del Grado de Estandarización

Primero, se registra el número de unidades estructurales totales. Luego, se contabiliza el número de tipos diferentes por cada unidad y se registra la cantidad de cada tipo ordenándolas de mayor a menor. El porcentaje de estandarización se obtiene calculando el porcentaje de cada unidad estructural mediante la Ecuación 2.8. Finalmente, el grado de estandarización del diseño estructural es el promedio de estos porcentajes.

$$\% \text{ de Estandarización} = \frac{\%T_1}{1} + \frac{\%T_2}{10} + \dots + \frac{\%T_n}{10^{n-1}}$$

Ecuación 2.8

c) Nivel de Industrialización

El procedimiento comienza con la selección del nivel de industrialización asociado al proyecto de acuerdo a las diferentes etapas de innovación tecnológica en la construcción propuestas por Ghio [74]. Entre ellas se encuentran la construcción in situ tradicional, construcción in situ optimizada, construcción in situ tecnificada, construcción parcialmente prefabricada in situ, construcción parcialmente prefabricada en fábrica, y construcción ampliamente industrializada. Cada una de las etapas tiene un valor asignado correspondiente a una escala exponencial, cuyos valores son 0, 1, 4, 9, 16 y 25.

La Tabla 2.2 muestra el Formato para la evaluación de los indicadores de optimización de acuerdo al procedimiento anteriormente descrito para calcular el grado de modulación, grado de estandarización y nivel de industrialización según la propuesta Orihuela & Orihuela [70].

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Tabla 2.2. Formato para la evaluación de la modulación, estandarización e industrialización (Extraído de Orihuela & Orihuela [70])

UNIDADES ESTRUCTURALES		DISEÑO / CONSTRUCCIÓN								CONSTRUCCIÓN								
		MODULACIÓN				ESTANDARIZACIÓN				INDUSTRIALIZACIÓN								
		N° Dimensiones	N° Dimensiones Modulares	% de Modulación	Calificación	N° Unidades Totales	N° Tipos	Cantidades de cada tipo	% de Estandarización	Calificación	Construcción In Situ Tradicional	Construcción In Situ Optimizada	Construcción In Situ Tecnificada	Construcción Parcialmente Prefabricada In Situ	Construcción Parcialmente Prefabricada en Fábrica	Construcción Ampliamente Industrializada	% de Industrialización	Calificación
0	1	4	9	16	25													
Técnica de reforzamiento 1	Zapatas	3	3	100%		4	1	4	100%								1%	
	Columnetas																	
	Vigas																	
	Muros																	
Técnica de reforzamiento 2	Zapatas																	
	Vigas																	
	Columnetas																	
	Columnas																	
	Placas																	

2.5 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El sector construcción es una de las industrias con mayor producción de cargas ambientales a nivel mundial debido al alto consumo de recursos y generación de residuos. Se estima que esta industria es responsable del 30-40% del consumo de energía y del 40-50% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo [76]–[78]. Dada esta situación, resulta necesario plantear estrategias que reduzcan los impactos ambientales generados durante el ciclo de vida de un producto o proceso de esta industria. Para ello, antes será importante analizar y cuantificar los impactos mediante herramientas, técnicas y metodologías como el ACV, que en los últimos 20 años ha experimentado un crecimiento en la comunidad científica [79].

El ACV es una técnica que sirve para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales de un producto o proceso a través de la compilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, la evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, y la interpretación de los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio” [80]. Respecto al alcance, el ACV comprende el ciclo de vida completo de un producto o proceso desde la extracción y adquisición de materia prima, hasta la producción y fabricación de energía y materiales, el uso y el tratamiento al final de la vida útil y la disposición final [81], [82].

El ACV se utiliza para identificar oportunidades de mejora en las etapas de ciclo de vida de un producto que permita disminuir su impacto ambiental a escala global. Asimismo, el ACV es una herramienta muy útil de toma de decisiones debido a que su enfoque de ciclo de vida otorga rigor científico a las decisiones de los encargados de la planificación estratégica y elaboración de políticas públicas porque están mejor capacitados para comparar alternativas, identificar mejores tecnologías y técnicas disponibles, seleccionar indicadores de desempeño ambiental, y estimar los posibles efectos de un cambio desde el diseño de un producto o proceso (ver Figura 2.4) [83]–[85].

Tomando en cuenta los impactos ambientales negativos del ciclo de vida de los productos y procesos de la industria de la construcción, el ACV es una herramienta muy útil para los tomadores de decisiones a la hora de seleccionar productos o procesos que minimicen las emisiones de sustancias y consumo de recursos [86]. A pesar de que el enfoque del ACV se centra en la identificación, cuantificación y caracterización de aspectos ambientales es posible incorporarlo a evaluaciones más exhaustivas que incluyan aspectos económicos, sociales y técnicos para considerar los efectos a escala global.

2.5.1 Metodología del ACV

El ACV se estructura en torno a una unidad funcional que define lo que se está estudiando a través de la descripción de la función principal del sistema. Las normas ISO 14040 e ISO 14044 establecen dentro del marco metodológico del ACV cuatro fases: (1) definición del objetivo y alcance, (2) inventario, (3) evaluación de impacto, e (4) interpretación (ver Figura 2.4).

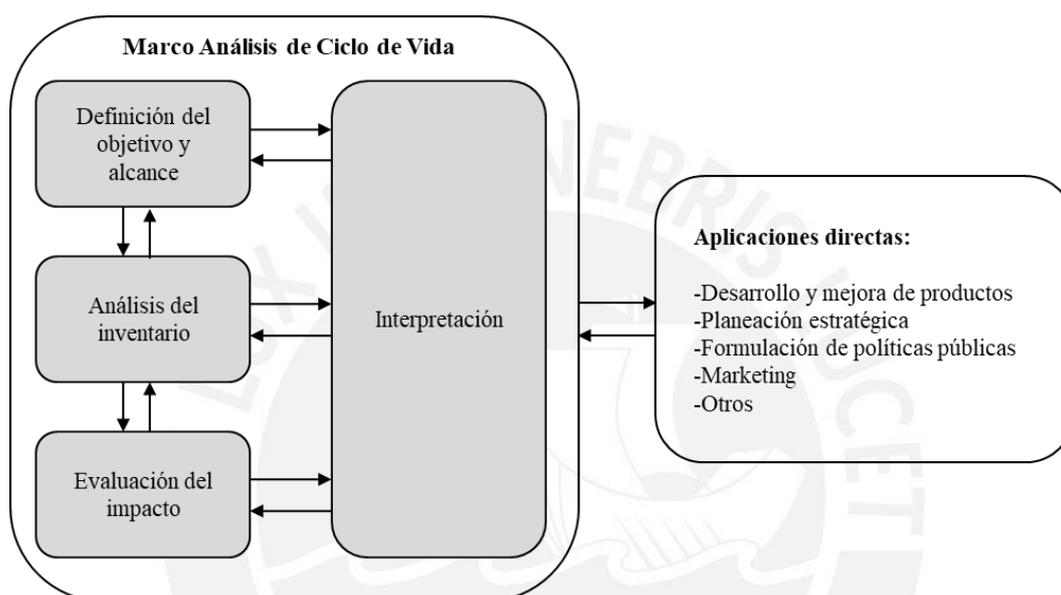


Figura 2.4. Fases del Análisis de Ciclo de Vida [80]

En la **fase de definición del objetivo y alcance** se establece el objetivo general del estudio, además de la unidad funcional, los límites del sistema, y la fuente de datos para el inventario [80], [85]. Los límites del sistema determinan los procesos unitarios incluidos en el ACV. Al mismo tiempo estas se dividen en subprocesos unitarios, que engloban a todos los elementos, materiales y componentes del edificio que son afectados por flujos de materia y energía durante las etapas de su vida [87]. Asimismo, en esta fase se plantean preguntas que serán resueltas al finalizar la metodología del ACV con el propósito de mejorar la toma de decisiones. Por ejemplo, la selección entre alternativas con menores emisiones o conocer cuál es el proceso de un producto con mayores impactos ambientales.

La **fase inventario del ciclo vida** (LCI, por sus siglas en inglés) comprende la recopilación y síntesis de información con el objetivo de hacer una descripción detallada de todos los insumos y salidas del sistema del producto [82], [87]. El inventario es una lista de todos los materiales, energía, sustancias, emisiones involucrados en el proceso. En otras palabras, el inventario propociona la cuantificación de los intercambios entre los procesos del sistema y el medioambiente representados a través de la entrada de recursos y las emisiones de sustancias [88].

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En la tercera fase, **la evaluación del impacto del ciclo de vida** (LCIA, por sus siglas en inglés) tiene como propósito traducir los flujos del inventario de ciclo de vida en sus posibles contribuciones a los impactos ambientales que se consideran en el ACV [88]. En general en esta fase se identifican y asocian los resultados del inventario con sus posibles efectos sobre el medioambiente mediante categorías e indicadores ambientales [80], [82].

De acuerdo con el ISO 14040, la evaluación del impacto del ciclo de vida está comprendido por cinco elementos, distinguiéndose entre obligatorios y opcionales. Las tres primeras obligatorias son selección, clasificación, caracterización, mientras que las opcionales son normalización, y agrupación y ponderación. En general, primero se seleccionan las categorías de impacto, luego se clasifican los resultados del inventario asignándolos a cada categoría de impacto según el efecto ambiental esperado para dar paso a la modelación a través de factores de caracterización. Según Garraín Cordero [84], una categoría de impacto es una representación de las consecuencias ambientales generadas por los procesos o sistemas de productos.

Las categorías de impacto varían de acuerdo al método de evaluación del análisis de ciclo de vida seleccionado, por ejemplo, algunos de los métodos más utilizados son Eco-indicator 99, ReCiPe, IPCC GWP 100 años implementados en softwares que han sido desarrollados en diferentes países para este fin como SimaPro (Holanda) (PRe), GaBi (Alemania) (PE international), BEES (USA) (National Institute of Standards and Technology, USA), Athena (Canadá) (Athena Sustainability Canada), LCAid (Australia) (NSW DPWS), ENVEST (Reino Unido) (BEE) [86].

Uno de los métodos de evaluación más utilizados para la evaluación del análisis de ciclo de vida es ReCiPe 2016, versión actual, que provee factores de caracterización expresados como categorías de impacto en dos niveles: *midpoint* y *endpoint*. La categoría *midpoint* o punto intermedio se centra en impactos ambientales puntuales como toxicidad, cambio climático, etc [89]. La categoría *endpoint* corresponde a tres áreas de protección: salud humana, calidad de los ecosistemas y agotamiento de recursos. Ambas categorías son complementarias como se observa en la Figura 2.5, en el método ReCiPe hay 15 indicadores *midpoint* y 3 indicadores *endpoint*.

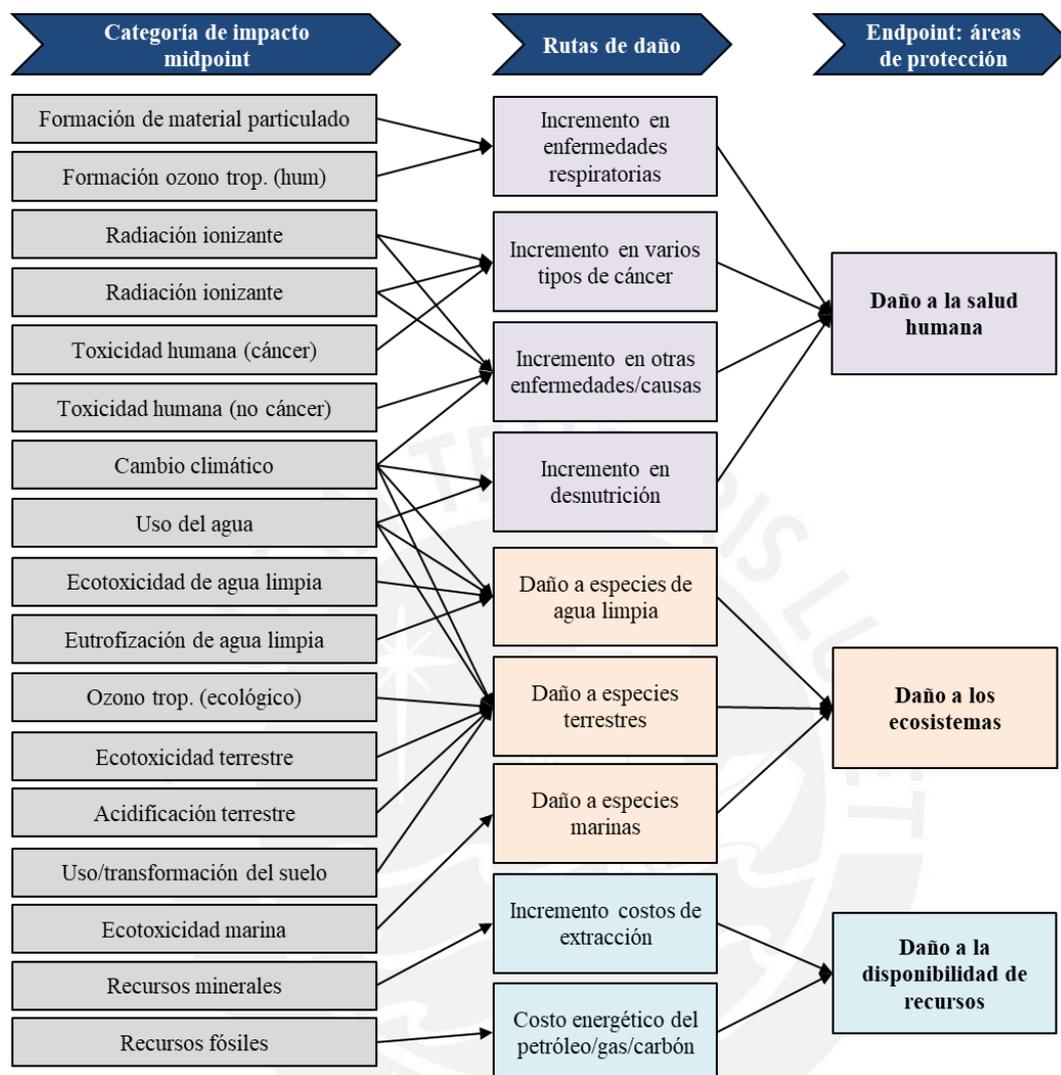


Figura 2.5. Representación de las categorías de impacto: midpoint y endpoint (Traducido de ReCiPe 2016)

Otro método de evaluación es el desarrollado por el *International Panel on Climate Change* (IPCC) enfocado únicamente en el análisis de cambio climático. Este método consiste en la clasificación de las diferentes emisiones de acuerdo con sus contribuciones al efecto invernadero, cuyo indicador es el calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) representado mediante la unidad kg CO₂-eq (kilogramos de CO₂ equivalente) [87].

Por último, en **la fase de interpretación** se proponen conclusiones y recomendaciones para los tomadores de decisiones que sean consistentes con los objetivos del estudio [80], mediante el análisis de aspectos críticos, evaluación de escenarios alternativos, e introducción de optimizaciones de procesos [87]. Además, es importante verificar la integridad, sensibilidad y coherencia de los resultados [83].

3. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo, se detallan los hallazgos de la revisión de la literatura referidos al estado actual de la reglamentación sobre reforzamiento sísmico a nivel mundial y los criterios de decisiones empleados en la selección de técnicas de reforzamiento sísmico.

3.1 REGLAMENTACIÓN SOBRE REFORZAMIENTO SÍSMICO A NIVEL MUNDIAL

Los países más vulnerables y propensos a actividad sísmica han centrado sus esfuerzos en el desarrollo de guías y códigos de reforzamiento sísmico con el propósito de mitigar la vulnerabilidad de las edificaciones existentes. En la Tabla 3.1 se lista los diferentes tipos de reglamentación existentes a nivel mundial sobre reforzamiento sísmico, por ejemplo, normas, códigos, guías, capítulos. Asimismo, como parte de la revisión del contenido de la reglamentación, se realizó una clasificación de acuerdo con las etapas comprendidas en la guía y el tipo de material de construcción.

Respecto a las etapas que comprende un proyecto de reforzamiento sísmico, se afirma que el 100% establece la evaluación sísmica de los edificios existentes. Por otro lado, el 90% propone técnicas de reforzamiento y sus respectivos diseños. Sin embargo, solo un 30% abarca la planificación, la construcción y el mantenimiento de estas técnicas. Asimismo, ninguna de ellas describe un método de toma de decisiones para la selección de técnicas de reforzamiento sísmico [90]. En relación al tipo de material de la estructura a reforzar, se concluye que el 100% es sobre concreto, mientras que el 50%, acero, albañilería y madera. Solo un 20% abarca el adobe y un 5% aisladores.

En general, es posible afirmar que las guías más completas, en términos del alcance, son las de Estados Unidos, Grecia, Rusia y Japón. Una situación opuesta ocurre con la mayoría de países de Latinoamérica, dado que la reglamentación existente sobre reforzamiento sísmico corresponde a adaptaciones de normativas extranjeras. Cabe mencionar que no siempre es posible adaptar criterios de guías extranjeras porque las condiciones geográficas son diferentes. Sumado a ello, el alcance es limitado, ya que forman parte de capítulos o acápites breves dentro de las normas de diseño sísmico del país.

En Estados Unidos, las agencias gubernamentales de gestión de riesgos de desastres se han enfocado en desarrollar guías y manuales con el propósito de reducir los riesgos. Entre ellas, la Agencia Federal de Gestión de Emergencias o *Federal Emergency Management Agency* (FEMA, por sus siglas en inglés)

cuyos esfuerzos se centran en la reducción del riesgo de edificios prioritarios, como colegios. En la guía *Incremental Seismic Rehabilitation of School Buildings – FEMA 395* [91], se destaca el planteamiento del reforzamiento progresivo o sísmico incremental, como parte de la rehabilitación sísmica. Este reforzamiento consiste en incrementos que se implementan progresivamente para tratar edificaciones con alto riesgo sísmico, especialmente aquellos cuyo uso no puede ser interrumpido ante una emergencia, como colegios y hospitales.

En relación con el Perú, la Norma Técnica de Diseño Sismorresistente E-030 [92] contempla un capítulo que abarca el reforzamiento de edificaciones esenciales mediante el reforzamiento progresivo. El capítulo en mención corresponde al Capítulo 8: Evaluación, Reparación y Reforzamiento de Estructuras de la Norma Técnica, cuyo contenido informativo es insuficiente. Debido a que solo se limita a recomendar los criterios propuestos en la guía americana *Engineering Guideline for Incremental Seismic Rehabilitation* [3], y no plantea una metodología que abarque las fases mencionadas anteriormente.

Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar una guía de reforzamiento sísmico que contemple el procedimiento detallado respecto a las fases de selección, diseño, ejecución y mantenimiento.

Tabla 3.1. Reglamentación existente sobre reforzamiento sísmico a nivel mundial

PAÍS	NOMBRE	ALCANCE											
		Etapas					Tipo de material						
		Evaluación Sísmica	Selección de técnicas de reforzamiento	Diseño de técnicas de reforzamiento	Planificación	Construcción	Gestión del mantenimiento	Concreto	Acero	Albañilería	Madera	Adobe	Aislamiento sísmico y sistemas de energía de disipación
Estados Unidos	ATC 40 "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings" [93]	x		x				x					
	FEMA 356 "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings" [94]	x	x	x				x	x				
	FEMA P-420 "Engineering Guideline for Incremental Seismic Rehabilitation" [3]	x			x		x						
	ASCE/SEI Standard 41-06 Seismic Rehabilitation of Existing Buildings [95]	x	x	x				x	x	x	x		x
México	Norma Técnica Complementaria de Diseño por Sismo - NTC - Distrito Federal [96]	x						x					
Perú	Norma Técnica Peruana E030 "Diseño Sismorresistente" [92]	x						x					
	Norma Técnica Peruana E080 "Diseño y Construcción con Tierra reforzada" [97]											x	
Colombia	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR-10 [98]	x	x	x		x		x		x			
Ecuador	Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-SE-RS: Riesgo Sísmico, Evaluación, Rehabilitación de Estructuras [99]	x	x	x				x					
Venezuela	COVENIN 1756:2001, Partes 1 y 2, titulada Edificaciones Sismorresistentes, requisitos y comentarios [100]	x	x	x				x					

CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE

Europa	Euro Code 8 – Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures – Part 1-4 General Rules for Strengthening and Repair of Buildings [101]	x	x	x			x	x	x	x	x	x		
	EC 8-Part3, “Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings”. Draft No 5 [102]	x	x	x					x	x	x			
Italia	Italian Seismic Code: OPCM 3431													
Grecia	GCSI, “Greek Code of Structural Interventions” [103]	x	x	x	x	x	x	x						
Nueva Zelanda	"Assessment and Improvement of the Structural Performance of Earthquake Risk Buildings" [104]	x	x					x	x	x	x			
China	JGJ 116-2009: Technical specification for seismic strengthening of buildings [105]	x	x	x				x	x	x				x
Rusia	Recommendations for Preventive Seismic Strengthening of Buildings [106]	x	x	x			x		x					
Japón	Standard for Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings [107]	x							x					
	Guidelines for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings [107]		x	x	x	x			x					
	Technical Manual for Seismic Evaluation and Seismic of Existing Reinforced Concrete Buildings [107]													
Irán	Guideline for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (GSREB) [108]	x							x					
Turquía	Istanbul Seismic Risk Mitigation and Emergency Preparedness Project (ISMEP) [109]	x	x	x					x	x	x			
Filipinas	Guidelines for Earthquake Strengthening of Public Schools and Hospitals in Metro Manila [110]	x	x	x					x					
India	IS 13935:1993 Repair and Seismic Strengthening of Buildings – Guidelines [111]		x	x					x		x	x		
Nepal	Seismic Retrofitting Guidelines of Buildings in Nepal: Compilation of Adobe, Masonry and RCC [112]	x	x	x					x		x		x	
Algeria	Catalogue for repair and strengthening of buildings [113]	x	x	x					x					

3.2 CRITERIOS DE DECISIONES EN LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO SÍSMICO

Después de una revisión detallada de la literatura, se encontró 11 artículos científicos sobre la aplicación de métodos MCDM en la selección de técnicas de reforzamiento sísmico en edificaciones existentes [11], [12], [21], [13]–[20]. Los criterios de decisión fueron clasificados en tres categorías: económicos/sociales, medioambientales y físicos (ver Tabla 3.2).

En relación con la frecuencia de uso de los criterios en los artículos revisados, los más empleados son el costo de instalación, el tiempo de ejecución, el costo de mantenimiento, la funcionalidad y compatibilidad arquitectónica y la factibilidad de la construcción. Estos criterios pertenecen principalmente a las categorías económicos/sociales y físicos. A diferencia de los ambientales, cuya frecuencia es muy baja (menos de 10%). La solución ideal debería usar todos estos, pero dependerá de la disponibilidad de la información existente, así como de cada proyecto y de los stakeholders para validar los criterios y definir los pesos.

Por otro lado, dentro de este listado no se incluye ningún criterio relacionado con la transparencia de los procesos constructivos en la selección de técnicas de reforzamiento. Aunque se observa que el criterio de decisión “Factibilidad de construcción” definido como el requerimiento de mano de obra calificada, nivel de tecnología necesaria o disponibilidad de materiales como maquinarias y materiales de construcción está relacionado con los indicadores de optimización de procesos constructivos [90].

CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE

Tabla 3.2. Criterios de Decisiones de la revisión de la literatura

Categoría	Criterios de Decisiones	Descripción
Económicos / Sociales	Costo de instalación	Costo de todos los materiales y trabajos relacionados al diseño, demolición y construcción
	Duración del trabajo / Interrupción del uso	Tiempo requerido para cada etapa, comenzando en la demolición hasta la finalización del trabajo
	Costo de mantenimiento	Costo de cualquier actualización, tratamiento e inspección durante el tiempo de vida de la técnica de reforzamiento
	Importancia histórica/cultural	Valor patrimonial del edificio en la sociedad
	Importancia del edificio post-desastre	Edificios esenciales después de algún desastre no pueden quedar inoperativos, por ejemplo, hospitales, colegios
Medioambiente	Sostenibilidad	Emisiones de dióxido de carbono durante el transporte y producción de materiales
	Índice de Rendimiento Energético	Consumo energético de la calefacción y/o aire acondicionado
Técnicos	Compatibilidad Funcional y Arquitectónica	Impactos de los cambios en el diseño arquitectónico y en el uso del edificio actual
	Factibilidad de la construcción	Requerimiento de mano de obra calificada, nivel de tecnología necesaria o disponibilidad de materiales como maquinarias y materiales de construcción
	Estados de Daño	Objetivos de desempeño requeridos de la edificación ante determinado movimiento sísmico
	Incremento de Capacidad	Capacidad de resistir fuerzas generadas durante el movimiento sísmico
	Intervención en las cimentaciones	Cambios en la capacidad del sistema de cimentación
	Seguridad en las operaciones de construcción	Condiciones de seguridad adecuadas durante la implementación de la técnica de reforzamiento
	Rehabilitación Incremental	Acciones discretas que se van implementando en un período de tiempo sin interrumpir con las actividades programadas, mantenimiento o mejoras

3.3 USO DE BIM EN LA ETAPA DE TOMA DE DECISIONES

BIM se puede implementar en todas las etapas del ciclo de vida de un proyecto. Al respecto, Wong & Yang [60] señalan que el uso de BIM se puede clasificar en dos direcciones: (1) planificación del diseño y construcción y (2) gestión post-construcción. En ese sentido, es posible afirmar que el mayor uso de BIM se presenta en las etapas más tempranas como la pre-planificación, el diseño y la construcción. A pesar de ello, existe un creciente énfasis en el empleo de BIM en la gestión de activos e instalaciones [60]. Por ejemplo, algunas investigaciones recientes se han enfocado en las etapas posteriores del ciclo de vida, como mantenimiento, reacondicionamiento, demolición y fin de uso [30]–[33].

La implementación de BIM en edificaciones existentes es menos frecuente que en nuevas edificaciones. Debido a que el uso de BIM en las etapas posteriores es relativamente reciente como consecuencia de la falta de documentación en formato BIM de edificaciones existentes [28], [30]–[33]. Este hecho implica que los esfuerzos, primero, se deben centrar en la actualización de la información disponible a estándares BIM, generando incertidumbre sobre los datos obtenidos [28]. Para ejemplificar esta situación en la Figura 3.1 se muestra el proceso de creación de formatos BIM de edificaciones nuevas y existentes. Una de las principales dificultades para lograr este objetivo es la disponibilidad de información preexistente BIM.

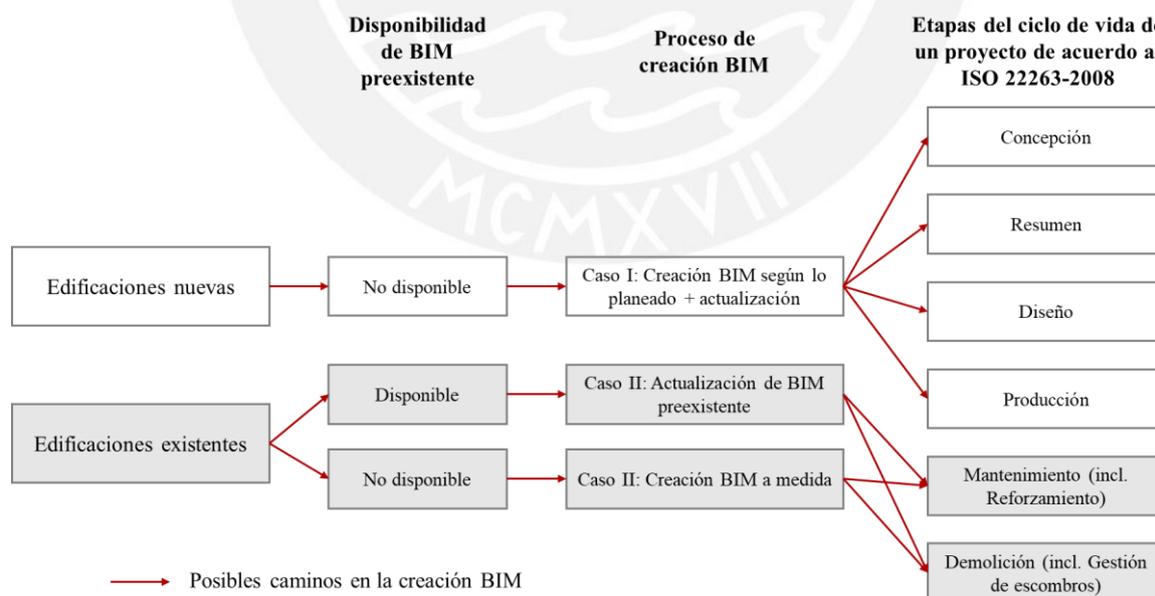


Figura 3.1. Proceso de creación de formatos BIM (Traducido de Volk [28])

Por otro lado, existe evidencia respecto al uso de BIM en la gestión de riesgos. Al respecto Welch et al. [114] señalan tres aplicaciones de BIM dentro de esta área de estudio: (1) evaluación y mitigación del riesgo sísmico, (2) inspecciones y reconocimiento post-terremoto, y (3) BIM como parte del sistema de gestión-administración del edificio orientada al monitoreo y control de las instalaciones de emergencia. Tomando en cuenta que los modelos BIM proporcionan información valiosa y rápida sobre los elementos estructurales y no-estructurales es importante aprovechar esta ventaja para alcanzar los objetivos trazados.

En ese sentido, la evaluación y mitigación del riesgo sísmico se puede realizar mediante la sincronización de la información proporcionada por los modelos con los softwares especializados de evaluación del riesgo sísmico. De esta manera, gracias a esta sincronización se pueden llevar a cabo procesos de autodiagnóstico de las edificaciones post-terremoto, lo que favorece la disminución del número de inspecciones físicas. Por último, los daños de una edificación se incrementan a medida que se afecten las instalaciones, por ejemplo, ruptura de cañerías, apagones, incendios, etc.

Por todo lo anterior, se promueve el uso de BIM en la etapa de gestión de instalaciones y/o mantenimiento [115] con la finalidad de controlar y monitorear los sistemas. Asimismo, favorece la toma de decisiones oportunas después de un desastre, como restringir el funcionamiento del edificio [114]. Sin embargo, un aspecto que ha faltado considerar son herramientas de visualización que faciliten la comprensión y el seguimiento a los propietarios, clientes y otros interesados [116]. Finalmente, es posible afirmar que el uso de BIM en la etapa de toma de decisiones es menos frecuente en edificaciones existentes, en comparación con edificaciones nuevas.

4. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA TOMA DE DECISIONES DE PROYECTOS DE REFORZAMIENTO SÍSMICO CON ENFOQUE DE TRANSPARENCIA

En este capítulo se describe detalladamente la metodología propuesta cuyo propósito es incrementar la transparencia de la toma de decisiones en reforzamiento sísmico mediante la incorporación de herramientas BIM y la inclusión de indicadores de transparencia. La metodología propuesta está compuesta de cinco pasos, tal como se indica en el diagrama de flujo de la Figura 4.1. El primer paso “Recopilación de información e Identificación de alternativas” revisa la existencia de guías, normas, expedientes de reforzamiento sísmico propuestos para la estructura a reforzar. A partir de esto, se identifica las alternativas posibles.

En el segundo paso “Modelación virtual BIM de alternativas”, se transforman los planos 2D a modelos virtuales 3D para obtener tablas de metrados y, posteriormente, realizar la simulación 4D de la secuencia constructiva de cada alternativa. En el tercer paso “Selección de criterios mediante la participación de los stakeholders” se desarrolla un taller participativo cuyo objetivo es reunir a todos los stakeholders vinculados con la infraestructura educativa para trabajar colaborativamente respecto al tema de reforzamiento sísmico. Como parte de las actividades del taller se encuentran la visualización de modelos BIM 3D y 4D y la coproducción de criterios de decisiones.

En el cuarto paso se procede al “Cálculo de indicadores de los criterios de decisiones mediante el uso de herramientas BIM”. En otras palabras, a partir de la tabla de metrados se calculan indicadores de los criterios de decisiones para construir la matriz de toma de decisiones. Finalmente, en el quinto paso “Evaluación de alternativas de reforzamiento sísmico” se aplican los métodos de toma de decisiones TOPSIS y CBA a la matriz de toma de decisiones para obtener la técnica de reforzamiento sísmico ganadora.

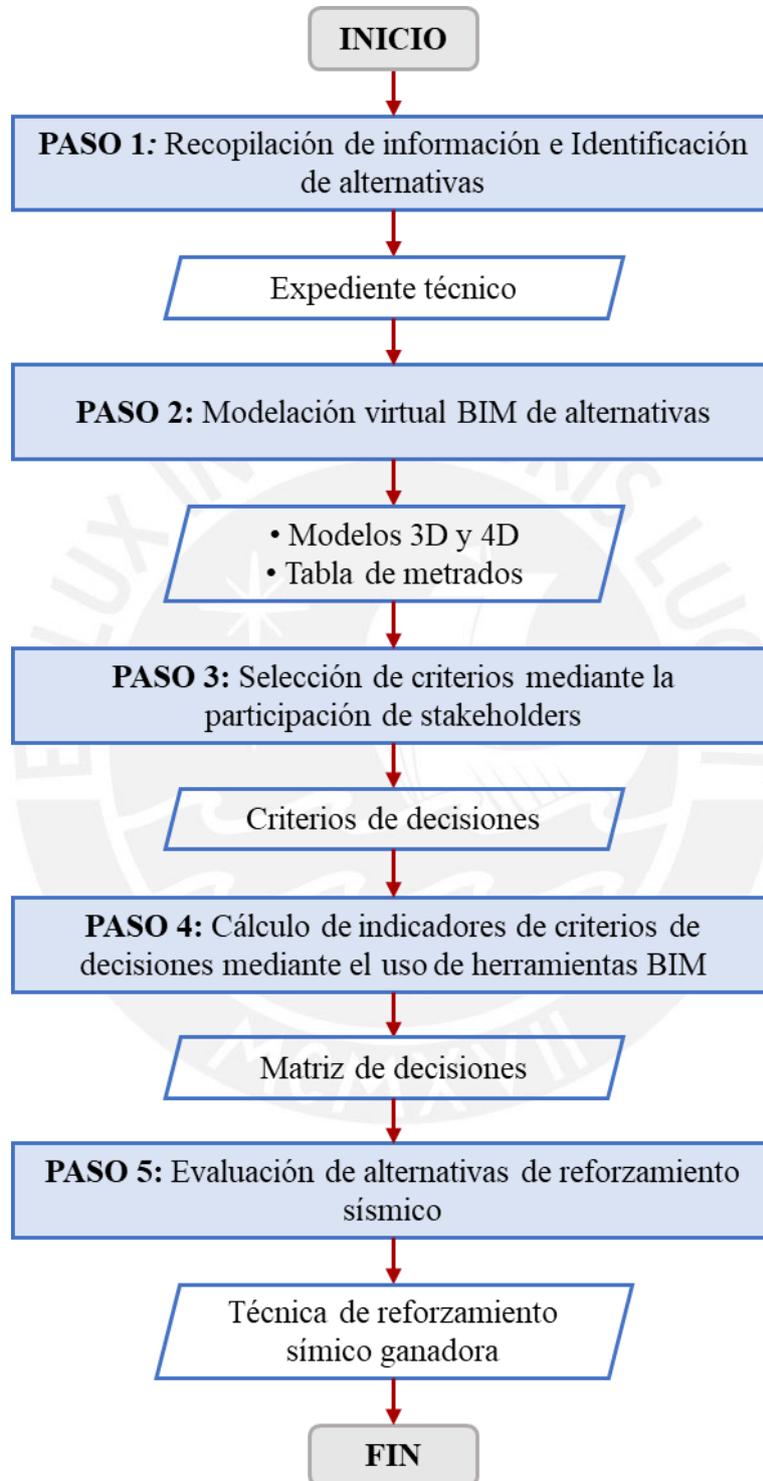


Figura 4.1. Esquema de la Metodología Propuesta

PASO 1: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ALTERNATIVAS

Objetivos:

- Identificar las técnicas de reforzamiento sísmico para la toma de decisiones
- Obtener documentación sobre las técnicas de reforzamiento sísmico

Recursos/Materiales:

- Guías de reforzamiento sísmico y/o normas de diseño sísmico

Descripción:

En primer lugar, se procede a revisar las normas de diseño sísmico y/o guías de reforzamiento sísmico con el propósito de identificar las alternativas propuestas para el reforzamiento sísmico de edificios e infraestructuras existentes. Como parte de la revisión se recopila información referente a las alternativas, por ejemplo, expedientes técnicos, planos, memorias de cálculo de cada una de ellas. De esta manera, la toma de decisiones para la selección de técnicas de reforzamiento sísmico se realiza con base en la información disponible de las alternativas.

Resultados:

- Expedientes técnicos y planos de las alternativas de reforzamiento sísmico

PASO 2: MODELACIÓN VIRTUAL BIM DE ALTERNATIVAS

Objetivos:

- Modelar virtualmente las alternativas de reforzamiento sísmico utilizando herramientas BIM
- Obtener tablas de metrados de los componentes de las alternativas de reforzamiento sísmico

Recursos/Materiales:

- Planos 2D de las alternativas de reforzamiento sísmico
- Softwares de diseño: Autodesk® AutoCAD™, Autodesk® Revit™, Autodesk® Navisworks™

Descripción:

Una vez que las alternativas de reforzamiento sísmico han sido identificadas se procede con la modelación virtual BIM. En líneas generales, la modelación virtual consiste en transformar digitalmente planos 2D a modelos 3D inteligentes. El término ‘modelos inteligentes’ hace referencia a que cada

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA

elemento del modelo contiene información específica, como sus dimensiones, su tipo de material, sus características estructurales, entre otros, que permite generar documentos de manera automática.

Los datos de entrada para el proceso de modelación virtual BIM son las especificaciones técnicas y los planos de las distintas especialidades de un proyecto de construcción. De esta manera, el primer paso de la modelación consiste en exportar los planos CAD al software Autodesk® Revit™ para utilizarlos como referencia. Después de ello, se comienza a modelar los elementos estructurales y arquitectónicos de acuerdo con las especificaciones técnicas del proyecto. Como resultado, se obtienen los modelos 3D de las alternativas de reforzamiento sísmico.

Como se mencionó anteriormente, a partir de los modelos 3D es posible generar documentos de manera automática, como tablas de metrados de los componentes del proyecto. Los componentes se refieren a elementos estructurales, arquitectónicos, instalaciones, etc. Un aspecto a tomar en cuenta es el nivel de detalle del modelo 3D, ya que está relacionado con la exactitud de la información. Por ejemplo, un nivel de detalle alto implica mayor exactitud en los metrados de los componentes.

Por otro lado, el modelo 4D muestra la secuencia constructiva de un proyecto. Como se observa en la Figura 4.2, el modelo 4D se crea mediante la sincronización del modelo 3D con la programación de la alternativa de reforzamiento sísmico. Dentro del expediente técnico, es posible encontrar la programación representada gráficamente como un Diagrama de Gantt, que se exporta al software Autodesk® Navisworks™ para la animación del modelo 4D.



Figura 4.2. Flujo de proceso para la creación de un modelo 4D (Adaptado de Khawaja y Schmeits [117])

Resultados:

- Modelos 3D y 4D de las alternativas de reforzamiento sísmico
- Tablas de metrados de los componentes de las alternativas de reforzamiento sísmico

PASO 3: SELECCIÓN DE CRITERIOS MEDIANTE LA PARTICIPACIÓN DE STAKEHOLDERS

Objetivos:

- Mejorar el entendimiento de los stakeholders sobre la toma de decisiones mediante la visualización de los modelos BIM de las técnicas de reforzamiento sísmico
- Fomentar la participación activa de los stakeholders en la toma de decisiones mediante la coproducción de criterios de decisiones relacionados a reforzamiento sísmico

Recursos/Materiales:

- Modelos 3D de las alternativas de reforzamiento sísmico
- Modelos 4D de la secuencia constructiva de las alternativas de reforzamiento sísmico

Descripción:

Tomando en cuenta que el enfoque de la metodología propuesta es incrementar la transparencia de la decisión, es necesario que el ambiente o contexto donde se lleve a cabo la toma de decisiones fomente la participación de los stakeholders. Por ello, se propone la realización de un taller participativo en el que se reúnan todas aquellas personas involucradas con la problemática a tratar para trabajar colaborativamente con el propósito de alcanzar los objetivos propuestos de manera dinámica. A continuación, se detallan algunas consideraciones para la óptima realización de un taller participativo, entre ellas, la definición de los objetivos y enfoque del taller, la identificación de los stakeholders y el diseño de las actividades y uso del espacio.

La **definición de los objetivos** se basa en los resultados futuros que esperan alcanzarse tras la realización de una acción o actividad. Consecuentemente, las actividades deben ser diseñadas de tal manera que faciliten la consecución de dichos objetivos. Por ejemplo, los objetivos del taller participativo son mejorar el entendimiento de los stakeholders sobre las alternativas de reforzamiento sísmico, y fomentar la participación activa de los stakeholders en la toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico.

Respecto al **enfoque del taller participativo**, se recomienda que tenga un enfoque interdisciplinario y multisectorial. Especialmente cuando la interdisciplinariedad propicia el diálogo abierto entre personas de diferentes disciplinas y cuyos resultados son más integrales y holísticos [118]. Al ser la transparencia el eje central de la metodología propuesta, el enfoque interdisciplinario del taller participativo garantiza esta condición mediante el intercambio de opiniones de los diferentes stakeholders.

En relación con la **identificación de los stakeholders**, este proceso visibiliza y destaca el papel de ellos en la toma de decisiones. Por esa razón, es importante que los stakeholders sean seleccionados tomando en cuenta su nivel de participación en las distintas etapas de una obra pública, es decir, desde la etapa de planeamiento hasta la de mantenimiento. De manera especial, cuando se trata de resolver problemas públicos es necesario el trabajo en conjunto entre el Estado, la industria y la academia. Tal es así que se recomienda que al taller participativo se inviten a representantes de ministerios, municipalidades, comités técnicos, instituciones gubernamentales, profesionales del sector privado, y académicos.

Como se mencionó anteriormente, el **diseño de las actividades** debe estar alineado con los objetivos planteados. Para el cumplimiento del primer objetivo del taller participativo de mejorar el entendimiento de los stakeholders, la actividad propuesta es la sesión de recorrido virtual a través de los modelos BIM. Mientras que, para el segundo objetivo de fomentar la participación de los stakeholders, la actividad propuesta es la sesión de coproducción de criterios de decisiones.

La **sesión de recorrido virtual** propone un formato novedoso que guía a los stakeholders a través de un aprendizaje inmersivo por los modelos 3D y 4D de cada alternativa de reforzamiento sísmico. Esta experiencia es concebida para ofrecer al stakeholder la posibilidad de un disfrute participativo dentro de un espacio de divulgación multidisciplinaria. Durante el recorrido virtual, los modelos BIM serán proyectados de manera ininterrumpida en equipos audiovisuales interactivos. La finalidad de esta actividad es mejorar el entendimiento y comprensión de los stakeholders de forma natural respecto a las características y particularidades de cada alternativa de reforzamiento.

La **sesión de coproducción** ofrece un entorno de trabajo que propicia la generación de ideas de forma colectiva y el desarrollo de la creatividad en la búsqueda de soluciones a problemas complejos. Durante esta sesión, se conformarán mesas de trabajo bajo un enfoque multidisciplinario tomando en cuenta el perfil de los stakeholders. Las mesas de trabajo estarán lideradas por un facilitador, quien se encargará de mantener una reunión bien estructurada y enfocada en el objetivo común. Es responsabilidad del facilitador proveer herramientas efectivas para lograr consensos y resultados productivos.

Finalmente, como parte del diseño del taller es importante tomar en cuenta el uso del espacio y la logística. El lugar donde se lleve a cabo el taller debe propiciar el trabajo de coproducción, prefiriendo espacios grandes que permitan configurar mesas de trabajo que garanticen la facilidad al movilizarse. Respecto a la logística, es importante verificar el correcto funcionamiento de los equipos electrónicos y audiovisuales, las conexiones necesarias y los útiles de escritorio un día antes de la realización del taller.

Resultados:

- Lista de criterios de decisiones para proyectos de reforzamiento sísmico

Criterio de transparencia

La transparencia en la ejecución de un proyecto no se incluye explícitamente como un criterio de decisiones en la selección de técnicas de reforzamiento sísmico, como se observa en la Tabla 3.2. De acuerdo al estudio “Infraestructura en la región” realizado por Datum [119], ocho de cada diez personas consideran que la corrupción y las obras públicas son dos conceptos que van de la mano. Los resultados de dicho estudio evidencian que el 78% de encuestados perciben que “en la ejecución de obras públicas siempre hay corrupción” [119]. Bajo esta problemática, se propone utilizar indicadores que evalúen el índice de transparencia en la ejecución de una obra pública.

Como parte de la investigación, se propone que los indicadores de transparencia sean medidos con las métricas de optimización. La optimización de procesos constructivos se alcanza mediante la consecución progresiva de las métricas de modulación, estandarización e industrialización, conceptos relacionados con el criterio de decisiones “Factibilidad de la construcción” (Tabla 3.2). En la Figura 4.3 se observa que el diseño de elementos modulares facilita la estandarización de productos y procesos. Como consecuencia, la industrialización es el punto más alto en la escala de optimización de procesos constructivos.



Figura 4.3. Medición de la transparencia como criterio de decisión cuantificable

De esta manera, el principio que rige la propuesta es la correlación entre el nivel de factibilidad de la construcción y el índice de transparencia, como se observa en la Figura 4.4. Al respecto, los niveles de factibilidad se miden con los niveles de industrialización propuestos por Ghio [74], ya que hacen referencia al requerimiento de mano de obra calificada y al nivel de tecnología necesaria. A medida que los niveles de factibilidad sean más altos se favorecerá, en gran medida, la transparencia en la ejecución

del proyecto. Por lo tanto, la alternativa de reforzamiento sísmico que alcance calificaciones más altas en dichos indicadores será aquella cuyos procesos constructivos serán más transparentes.



Figura 4.4. Representación de la correlación entre la transparencia y la factibilidad de la construcción

Resultados:

- Indicadores de transparencia en la toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico

PASO 4: CÁLCULO DE INDICADORES DE CRITERIOS DE DECISIONES MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS BIM

Objetivo:

- Construir la matriz de toma de decisiones de las alternativas de reforzamiento sísmico

Recursos/Materiales:

- Tablas de metrados de los componentes de las alternativas de reforzamiento sísmico
- Lista de criterios de decisiones para proyectos de reforzamiento sísmico
- Formato de evaluación de métricas de optimización
- Software de Análisis de Ciclo de Vida: SimaPro®

Descripción:

A partir de la lista de criterios de decisiones para proyectos de reforzamiento sísmico coproducida en el taller participativo, se identifican los indicadores que le corresponde a cada criterio. Como parte de la investigación, se propone que los indicadores, en la medida de lo posible, sean calculados utilizando

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PROPUESTA

herramientas BIM. Al respecto, el uso de herramientas BIM en la toma de decisiones constituye una propuesta disruptiva porque reemplaza la forma tradicional de calcular indicadores, garantizando mayor grado de exactitud en los resultados.

A continuación, se explican los procedimientos para calcular los indicadores de costo de ejecución, índice de transparencia y medioambiente.

El costo de ejecución o presupuesto se puede obtener de manera más exacta con los documentos generados automáticamente a partir de los modelos 3D en Revit™, como las tablas de metrados. Estas tablas contienen información sobre cada componente del edificio, por ejemplo, sus dimensiones, sus áreas, sus volúmenes, etc. De esta manera, en el Análisis de Precios Unitarios se colocan los metrados de acuerdo a cada partida de trabajo y, luego, se obtiene el presupuesto.

Por otro lado, el procedimiento para calcular los indicadores de transparencia se encuentra descrito en el Paso 3 de la metodología propuesta. La propuesta establece la correlación entre el nivel de transparencia con el nivel de factibilidad de la construcción. El procedimiento de evaluación de los indicadores de transparencia se encuentra detallado en el ítem Optimización de procesos constructivos del Capítulo 2. Los datos de entrada del procedimiento como las mediciones de las unidades estructurales se ingresan al formato de evaluación desarrollado por Orihuela & Orihuela [70].

De igual manera, los indicadores del criterio medioambiental se calculan con la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Los datos de entrada son los metrados de las etapas de demolición y de reforzamiento, que serán procesados en el software SimaPro®. Los datos de salida se dividen en tres categorías de impacto ambiental, las dos primeras denominadas midpoint: (1) emisiones de CO₂ equivalente mediante el método IPCC y (2) emisiones de material particulado mediante el método ReCiPe, mientras que la última denominada endpoint es el daño en la salud humana mediante el método ReCiPe.

Resultados:

- Matriz de toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico

PASO 5: EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE REFORZAMIENTO SÍSMICO

Objetivo:

- Seleccionar la mejor alternativa de reforzamiento sísmico

Recursos/Materiales:

- Matriz de toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico
- Hojas de cálculo programadas con los algoritmos o procedimientos de cada método de toma de decisiones (TOPSIS y CBA)

Descripción:

Por último, se propone la realización de un segundo taller participativo que convoque a los mismos stakeholders que participaron en el primer taller. La finalidad de esta actividad es seleccionar la mejor técnica de reforzamiento sísmico aplicando los métodos de toma de decisiones TOPSIS y CBA. La duración del segundo taller es menor que la del primero, ya que básicamente la tarea de los stakeholders es discutir sobre los pesos que asignarán a cada criterio de decisiones. Es responsabilidad del facilitador liderar estas discusiones para lograr consensos respecto a la valoración de los criterios.

Los procedimientos para la aplicación de los métodos de toma de decisiones [TOPSIS](#) y [CBA](#) se encuentran detallados en el Capítulo 2. En ambos métodos, la primera actividad consiste en la valoración de los criterios de la matriz de toma de decisiones. En ese sentido, los stakeholders deben asignar un peso u orden de prioridad a cada criterio según la escala de valoración empleada en cada método. Luego de la valoración, el ranking de las alternativas se obtiene de manera automática debido a que los algoritmos de cada método están programados en las hojas de cálculo.

Al finalizar el taller, se recomienda que se realice una encuesta de salida como parte de un proceso de feedback.

Resultados:

- Ránking de técnicas de reforzamiento sísmico o Técnica de reforzamiento sísmico ganadora

5. ESTUDIO DE CASO: REFORZAMIENTO SÍSMICO DE COLEGIOS PÚBLICOS SISTEMA MODULAR 780-PRE DE LIMA METROPOLITANA

En este capítulo, se aplica la metodología propuesta al estudio de caso “Reforzamiento Sísmico de Colegios Públicos Sistema Modular 780-PRE de Lima Metropolitana”. Los colegios 780-PRE fueron construidos entre los años 1992 y 1997 con criterios de diseño sísmico obsoletos y baja calidad constructiva [120]. A continuación, se realiza el diagnóstico situacional sobre el estado de la infraestructura educativa pública. Luego, se presentan y discuten los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología.

5.1 DIAGNÓSTICO SITUACIONAL

El Censo de Infraestructura Educativa 2014 (CIE) realizado por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) en colaboración con el Ministerio de Educación permitió conocer por primera vez el estado real de la infraestructura educativa pública del país [121]. Respecto a la antigüedad, el 58% de las edificaciones educativas existentes en la actualidad han sido diseñadas con criterios sísmicos más rigurosos propuestos en la Norma de Diseño Sismorresistente de 1998 [122]. Sin embargo, el 42% restante fueron diseñados con criterios de diseño sísmico obsoletos y pocos rigurosos, anterior a la norma de 1998 [122], como se observa en la Figura 5.1 (a).

El ejecutor de obra es relevante cuando la construcción de las edificaciones educativas está a cargo de la Asociación de Padres de Familia (APAFA) o de las comunidades, debido a la incertidumbre respecto al cumplimiento de criterios de diseño y procesos constructivos adecuados. Este tipo de edificaciones educativas autoconstruidas representan el 41% de edificaciones educativas [122], como se observa en la Figura 5.1.(b).

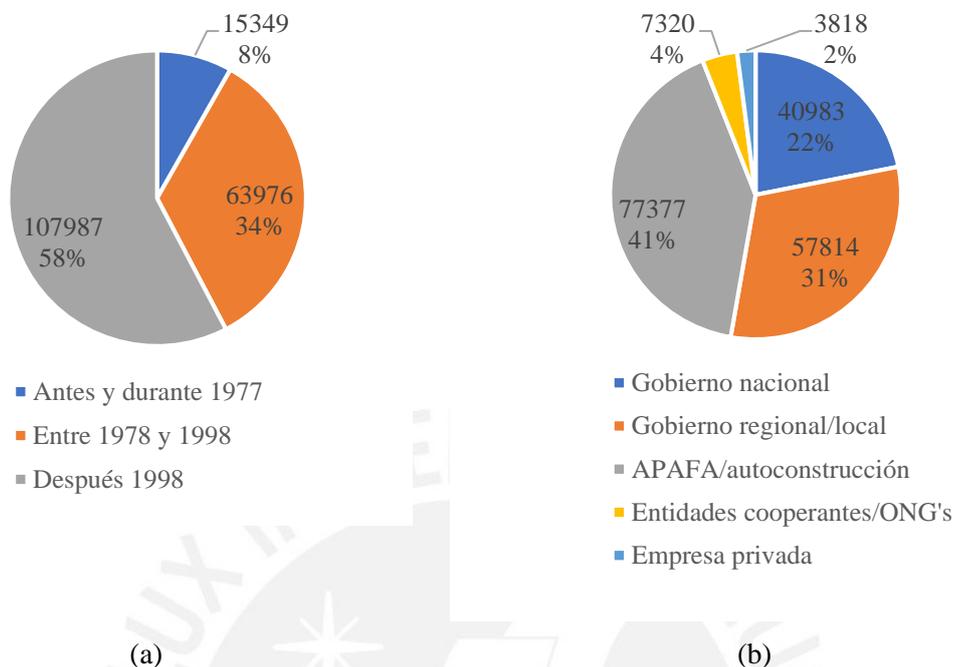


Figura 5.1. (a) Distribución de edificaciones educativas según antigüedad (b) Distribución de edificaciones educativas por ejecutor de obra [122]

Estudios previos han demostrado que si ocurriera un sismo en Lima de las mismas características que el sismo de Pisco del 2007, el 92% de edificaciones educativas públicas quedarían inoperativas y el 89% de estudiantes serían afectados [123]. Esta situación exige el establecimiento de prioridades y estrategias de intervención para reducir la vulnerabilidad existente de acuerdo con las necesidades de las edificaciones educativas. Los tipos de intervención estructural necesarias para reducir la vulnerabilidad estructural de las edificaciones educativas son i) sustitución, ii) reforzamiento, iii) intervención contingente, y iv) sin intervención, como se observa en la Figura 5.2 [122].

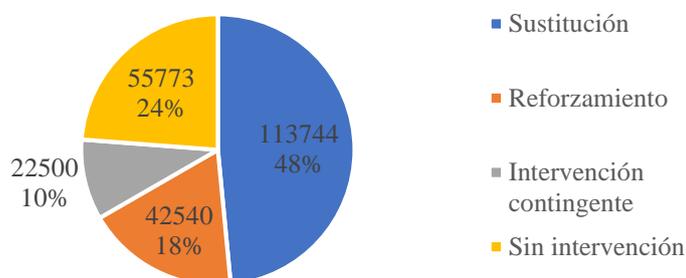


Figura 5.2. Porcentaje de edificaciones por tipo de intervención [122]

5.2 METODOLOGÍA PROPUESTA

A continuación, la metodología propuesta se aplica al estudio de caso “Reforzamiento sísmico de colegios públicos sistema modular 780-PRE de Lima Metropolitana”.

PASO 1: Recopilación de información e Identificación de alternativas

En el Perú, se han identificado cuatro tipos de edificios educativos como los más representativos a nivel nacional, entre ellos se encuentran: edificio 780-actual, edificio 780 pre NDSR-1997, edificio Gran Unidad Escolar y edificio Adobe [35]. El estudio de caso se centrará en el reforzamiento sísmico de los edificios 780 construidos antes del cambio de norma de diseño sismorresistente de 1997 (sistema modular 780-PRE). Estos edificios representan el 25% del total de edificios educativos peruanos [34] y dadas sus condiciones no garantizan la seguridad de la población estudiantil debido a que en sismos pasados sufrieron graves daños por la limitada rigidez lateral desencadenando el problema de columna corta [35] como se observa en la Figura 5.3.



Figura 5.3. Problema de columna corta – Sismo Nazca 1996 (Muñoz *et al.* [124])

Bajo este panorama, el Banco Mundial desarrolló el proyecto “Proposed update of the National Building Regulations to incorporate the incremental reinforcement in type 780 school buildings built before 1997”. En este proyecto se propusieron tres técnicas de reforzamiento incremental de bajo costo [120] para reducir la vulnerabilidad de las edificaciones 780-PRE. Cada técnica fue desarrollada siguiendo las sugerencias de la metodología de Reforzamiento Incremental propuesto por FEMA 395 [91]. Las tres técnicas de reforzamiento incremental se implementarán en dos fases con el fin de incrementar la resistencia, rigidez y ductilidad de la estructura.

La primera técnica es el “Reforzamiento con muro de albañilería reforzada con malla (MARM)” que consiste en la colocación de muros de albañilería con un refuerzo de malla electrosoldada en ambas caras. La segunda, el “Reforzamiento con incorporación de muros acoplados de concreto armado (IMACA)” que consiste en la incorporación de muros y vigas de concreto armado en la dirección

longitudinal. Por último, el “Reforzamiento con marco y arriostres concéntricos de acero (ACMAC)” que consiste en la inserción de marcos de acero con arriostres concéntricos en los paños entre ejes.

PASO 2: Modelación virtual BIM de alternativas

A continuación, se presentan los modelos 3D, que fueron creados en el software Autodesk® Revit™ y los modelos 4D, en el software Autodesk® Navisworks™. Cabe mencionar que los modelos 4D son animaciones de corta duración, en las siguientes figuras se muestran capturas de pantallas correspondientes a la Fase 1, mientras que las de la de Fase 2 se encuentran en el ANEXO 2.

- **MARM: “Reforzamiento con muro de albañilería reforzada con malla”**



Figura 5.4. Modelo 3D de la técnica de reforzamiento sísmico MARM (Autodesk® Revit™)

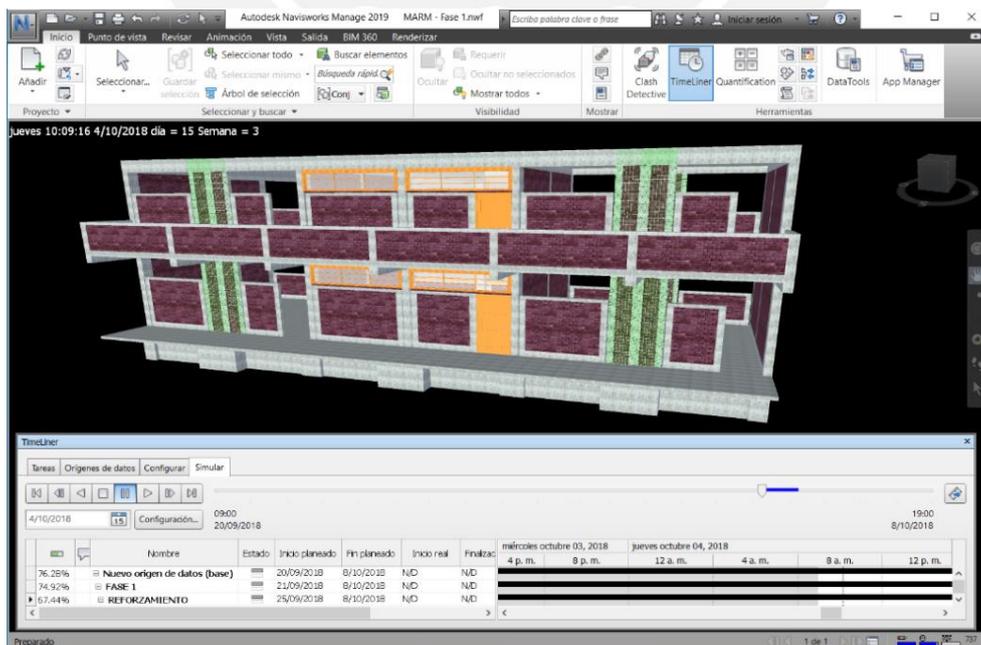


Figura 5.5. Modelo 4D: Modelo 3D + programación de la técnica de reforzamiento sísmico MARM-Fase 1 (Software Autodesk® Navisworks™)

- **IMACA: “Reforzamiento con incorporación de muros acoplados de concreto armado”**



Figura 5.6. Modelo 3D de la técnica de reforzamiento sísmico IMACA (Autodesk® Revit™)

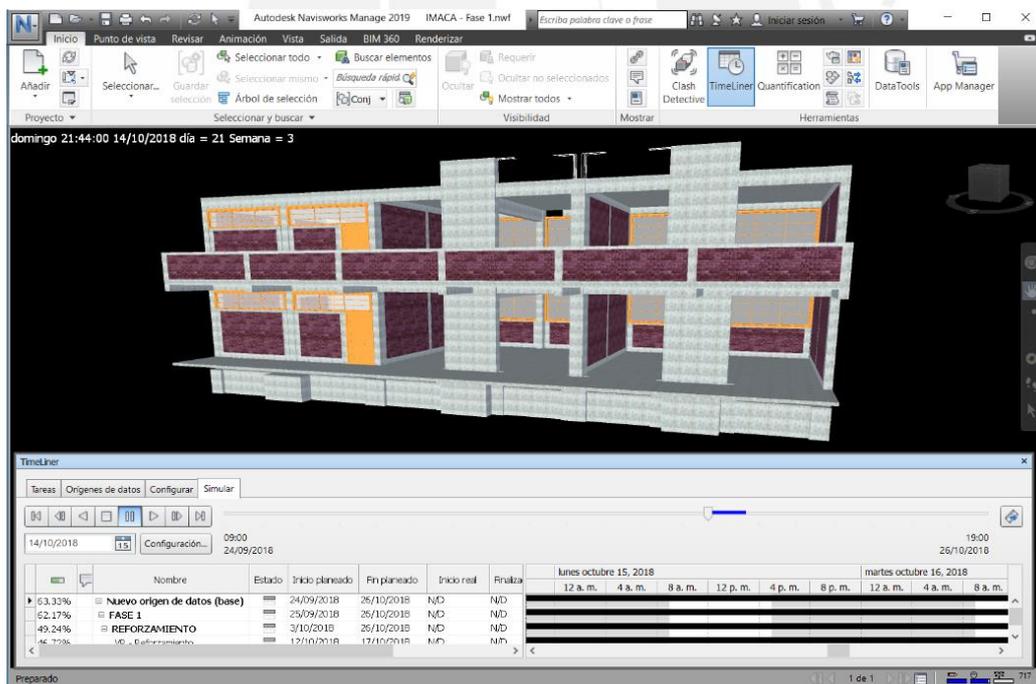


Figura 5.7. Modelo 4D: Modelo 3D + programación de la técnica de reforzamiento sísmico IMACA-Fase 1 (Autodesk® Navisworks™)

- **ACMAC: “Reforzamiento con marco y arriostres concéntricos de acero”**

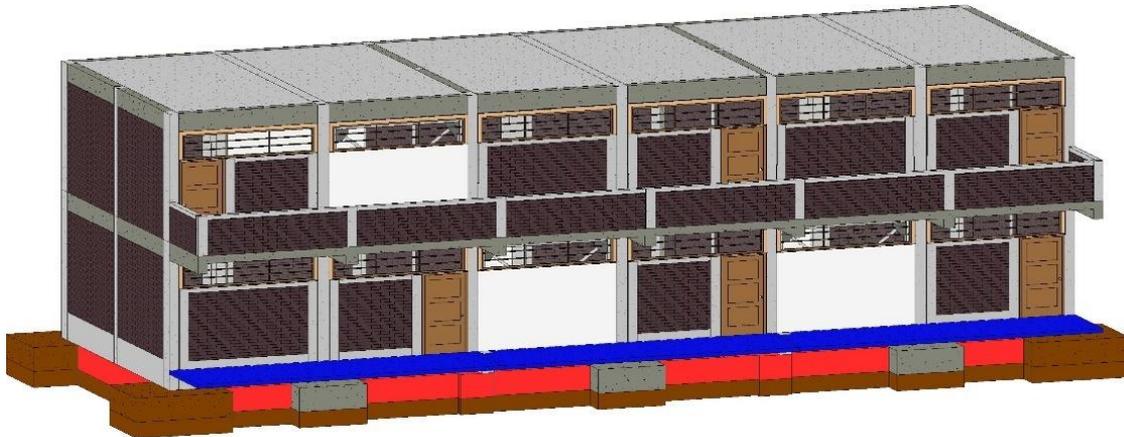


Figura 5.8. Modelo 3D de la técnica de reforzamiento sísmico ACMAC (Autodesk® Revit™)

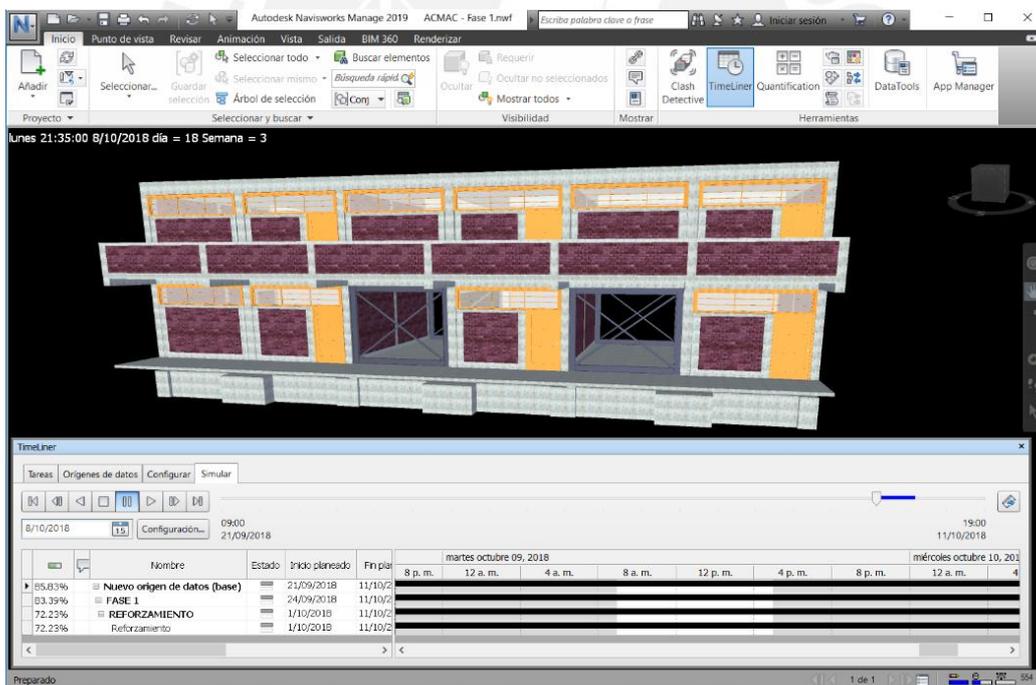


Figura 5.9. Modelo 4D: Modelo 3D + programación de la técnica de reforzamiento sísmico ACMAC-Fase 1 (Autodesk® Navisworks™)

PASO 3: Selección de criterios mediante la participación de stakeholders

El taller participativo “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs” fue realizado en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) en octubre del 2018. Asistieron al taller funcionarios del Ministerio de Educación, Vivienda, SENCICO, DRELM, Municipalidad de Comas, Colegio de Arquitectos y representantes de la academia y empresas privadas (ver Figura 5.10). El taller participativo apostó por la innovación a través del uso de tecnologías de información y comunicación (TIC) y el aprendizaje inmersivo.



Figura 5.10. Foto grupal con los stakeholders del taller participativo

En la primera parte del taller se llevó a cabo la sesión plenaria cuya finalidad era presentar los temas a desarrollar durante el taller. Las ponencias estuvieron a cargo de los profesores Sandra Santa Cruz, Xavier Brioso y la becaria de CONCYTEC Cristina Córdova. Asimismo, la presentación de la Guía de Reforzamiento Sísmico Incremental de Colegios Públicos estuvo a cargo del Arq. Rodrigo Aurelio García-Sayán, Coordinador de Estrategias de Intervenciones del Programa Nacional de Infraestructura Educativa (PRONIED) del Ministerio de educación (ver Figura 5.11).



Figura 5.11. Presentación del Arq. Rodrigo Sayán del PRONIED – Ministerio de Educación

Visualización de los modelos BIM de las técnicas de reforzamiento sísmico

En la segunda parte del taller, los stakeholders se trasladaron a una sala acondicionada para el desarrollo de las sesiones de recorrido virtual y coproducción. El taller participativo apostó por el aprendizaje inmersivo como recurso de interacción entre los stakeholders y el contenido que se quería transmitir, en este caso, las técnicas de reforzamiento sísmico. Durante el recorrido virtual, los stakeholders navegaron en tiempo real a través de los modelos 3D y 4D: MARM (Figura 5.4 y Figura 5.5), IMACA (Figura 5.6 y Figura 5.7) y ACMAC (Figura 5.8 y Figura 5.9). El procedimiento para visualizar los modelos 3D consistió en escanear los códigos QR, generados en la aplicación Kubity®, para luego navegar a través de ellos utilizando los iPads. Mientras que, los modelos 4D de las secuencias constructivas estuvieron proyectados, de manera ininterrumpida, en los televisores portátiles.

Al finalizar el recorrido virtual, se dio inicio a la sesión de coproducción mediante la conformación de mesas de trabajo bajo un enfoque multidisciplinario (ver Figura 5.12). Cada mesa de trabajo estuvo a cargo de los facilitadores Sandra Santa Cruz, Xavier Brioso, Antonio Zeballos, y la becaria Cristina Córdova. Las actividades realizadas en cada mesa fueron las siguientes: (1) coproducción de la matriz de toma de decisiones y (2) aplicación de los métodos multicriterio TOPSIS y CBA para seleccionar la mejor técnica de reforzamiento sísmico. Finalmente, el taller culminó con otra experiencia inmersiva, los stakeholders tuvieron la oportunidad de visualizar los modelos de las técnicas de reforzamiento a través de visores de Realidad Virtual (ver Figura 5.13). En el ANEXO 1 se describe con mayor detalle la realización de cada actividad del taller participativo.



Figura 5.12. Sesión de coproducción – Locación: Sala UNO - PUCP



Figura 5.13. Experiencia inmersiva a través de visores de Realidad Virtual

Coproducción de criterios para la toma de decisiones en reforzamiento sísmico

La segunda actividad del taller participativo consistió en la sesión de coproducción, en donde se conformaron mesas de trabajo con el propósito de que los stakeholders trabajen colaborativamente sobre la problemática planteada. Dicha problemática se refería a la identificación de criterios para la toma de decisiones en reforzamiento sísmico. La discusión y el debate de ideas fue enriquecido a través del planteamiento de ejemplos concretos y el compartir de experiencias de los sectores involucrados. El liderazgo de los facilitadores durante el desarrollo de las actividades contribuyó a llevar una reunión bien estructurada y enfocada en el cumplimiento de los objetivos.

Durante la actividad, los stakeholders propusieron diferentes criterios para la toma de decisiones en reforzamiento sísmico, que fueron plasmados en materiales pedagógicos, como papelógrafos y pizarras (ver ANEXO 1). En la Figura 5.14 se observan las conclusiones de cada mesa de trabajo. Finalmente,

CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE CASO

el listado de criterios de decisiones de la Tabla 5.1 es el resultado del análisis y convergencia/síntesis de dichas conclusiones. Los criterios fueron agrupados, tomando en cuenta su familiaridad y proximidad, en cuatro categorías: económico/social, medioambiente, técnico y transparencia.

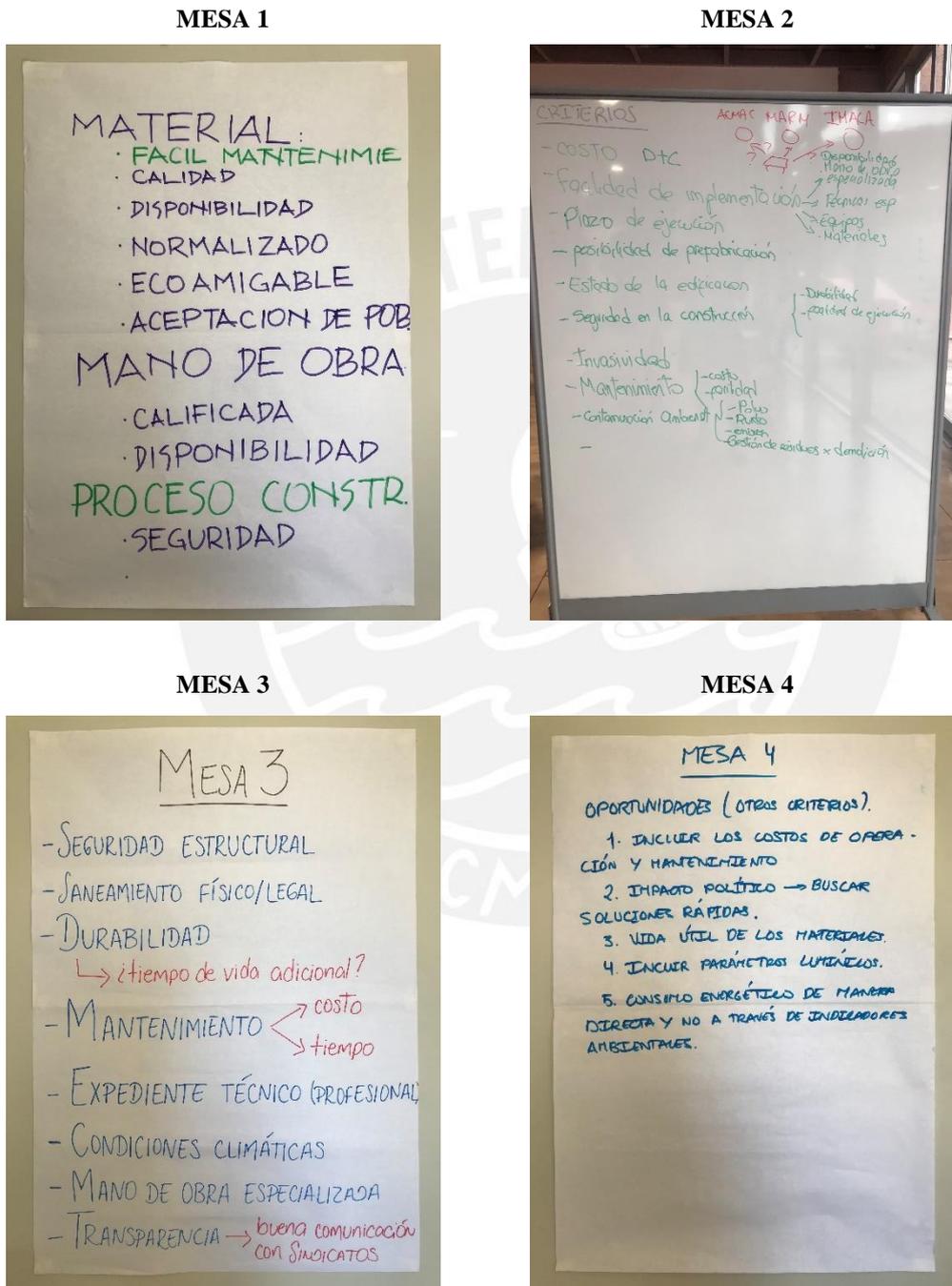


Figura 5.14. Sesión de coproducción - Conclusiones de las mesas de trabajo respecto a los criterios para la toma de decisiones en reforzamiento sísmico

CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE CASO

Los resultados de la Tabla 5.1 muestran que existe alrededor de 62% de similitud entre los criterios propuestos en el taller participativo y los identificados en la Tabla 3.2 para la toma de decisiones en reforzamiento sísmico. Especialmente los criterios relacionados a las categorías económico/social y técnicos, entre ellos el costo de ejecución, tiempo de ejecución, costo de mantenimiento, contaminación ambiental, consumo energético, factibilidad de la construcción, seguridad en los procesos constructivos, y compatibilidad funcional y arquitectónica. El 38% restante corresponde a criterios nuevos como uso de materiales sostenibles, durabilidad de los materiales, frecuencia del mantenimiento, estado de la infraestructura, tiempo de vida de la estructura reforzada, condiciones climáticas, y tipo de contratación.

Tabla 5.1. Criterios de decisiones para la selección de técnicas de reforzamiento propuestos en el taller participativo

Categorías	Criterios de decisiones	Revisión de la literatura	Taller participativo
Económico / Social	Costo de ejecución	x	
	Tiempo de ejecución	x	
	Costo de mantenimiento	x	
	Frecuencia del mantenimiento		x
	Tiempo de vida de la infraestructura reforzada		x
	Compatibilidad funcional y arquitectónica	x	
	Adaptación a las condiciones climáticas		x
Medioambiente	Contaminación ambiental	x	
	Consumo energético	x	
	Uso de materiales sostenibles		x
Técnico	Factibilidad de la construcción	x	
	Seguridad durante la construcción	x	
Transparencia	Proceso de contratación de obras públicas		x

Respecto a la categoría económico/social, el mantenimiento de las infraestructuras educativas reforzadas fue uno de los criterios con mayor incidencia en las propuestas de las mesas de trabajo. El mantenimiento es una actividad cuya frecuencia depende de la durabilidad de los materiales de construcción y cuyo costo es proporcional a la facilidad de la actividad debido al tipo de material empleado.

Por otro lado, tanto el tiempo de ejecución como la frecuencia del mantenimiento son criterios especialmente importantes, porque interrumpen, en diferente proporción, el uso continuo de la

infraestructura educativa. Por esta razón, son actividades cuya duración debe ser la menor posible para no afectar a la población estudiantil.

De igual manera, los stakeholders resaltaron la necesidad de cuantificar el tiempo de vida adicional, medida en años, que le otorga el reforzamiento sísmico a la infraestructura. Especialmente cuando el uso de las edificaciones esenciales, como instituciones educativas y hospitales, no debe ser interrumpido inmediatamente tras la ocurrencia de un sismo severo [92].

El criterio compatibilidad funcional y arquitectónica hace referencia al grado de intervención de la técnica de reforzamiento respecto a posibles cambios o alteraciones en el uso de la infraestructura educativa, especialmente la iluminación natural. En otras palabras, el diseño de las técnicas puede implicar la reducción de los espacios destinados a ventanas, como consecuencia se disminuiría el ingreso de luz natural a las aulas. Por otro lado, el criterio de adaptación a las condiciones climáticas es especialmente valorado en países cuya diversidad geográfica propicia la existencia de climas extremos bien diferenciados en todo su territorio.

En el estudio “The impact of school infrastructure in learning” desarrollado por el Banco Mundial [125] se señala que existen factores relacionados a la infraestructura educativa que impactan positivamente en los resultados académicos de los estudiantes. Uno de ellos hace referencia a las buenas condiciones de iluminación natural, aire acondicionado, control de temperatura, acústica, y enlaces con la naturaleza. Otro de ellos resalta la importancia de que en el diseño se tome en cuenta las condiciones locales climáticas y culturales. Ambos factores están relacionados con los criterios de compatibilidad funcional y arquitectónica, y adaptación a las condiciones climáticas, respectivamente. Es destacable la inclusión de criterios con una visión pedagógica en la toma de decisiones en reforzamiento sísmico de infraestructura educativa.

Por otro lado, la consideración de criterios medioambientales en la toma de decisiones resulta destacable, tomando en cuenta el compromiso firmado por el Perú en el Acuerdo de París de reducir el 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) proyectadas para el 2030 [126]. Las siguientes afirmaciones destacan el impacto de la construcción en el medioambiente. Dada su naturaleza, la construcción es uno de los procesos menos amigables con el medioambiente, tal es así que constituye una de las industrias más contaminantes debido al uso constante de maquinarias, equipos y recursos en los procesos [127].

Resulta oportuno que los stakeholders hayan recomendado criterios relacionados con la contaminación ambiental producida por las construcciones, como la cuantificación de las emisiones de polvo y la

contaminación sonora, además del tratamiento de escombros y residuos. Otro criterio propuesto fue la medición del consumo energético durante las etapas de demolición y construcción del reforzamiento. Asimismo, se recomendó el uso preferente de materiales ecoamigables o sostenibles desde la concepción y el diseño de las técnicas de reforzamiento sísmico.

En relación a la categoría de criterios técnicos, la factibilidad de construcción fue otro criterio que suscitó el interés de todas las mesas de trabajo. Por esta razón, los stakeholders recomendaron la priorización de este criterio en la valoración de la matriz de toma de decisiones. Especialmente cuando la evaluación de este criterio comprende aspectos que favorecen la optimización de los procesos constructivos, como el requerimiento de mano de obra calificada, la disponibilidad de materiales y equipos, y la implementación de técnicas especiales, entre las que destacan la prefabricación y el uso de materiales normalizados.

A partir de ello, es posible afirmar que la concepción de los stakeholders sobre el criterio factibilidad de construcción respalda la metodología propuesta de incluir indicadores que midan la transparencia del proceso constructivo asociado a la industrialización del sector. De esta manera, la industrialización además de favorecer la optimización de los procesos constructivos y todos los beneficios que conlleva, contribuye a disminuir el riesgo de corrupción en la contratación de proveedores y evitar la informalidad laboral.

Por otro lado, la importancia de la designación del criterio “Seguridad durante la construcción” se expresa en velar por que las actividades de construcción se desarrollen en estricto cumplimiento de los lineamientos técnicos de las normas de seguridad y salud con el fin de evitar accidentes de trabajo y enfermedades ocupacionales [128]. Los indicadores de transparencia propuestos son una buena forma de evaluar preliminarmente este criterio, debido a que la preferencia de técnicas de reforzamiento que prioricen la optimización de los procesos constructivos implica la reducción de actividades in-situ, lo que conlleva a la disminución del riesgo de accidentes laborales.

Finalmente, el criterio de transparencia en la construcción se enfocó en el proceso de contratación de obras públicas. Debido a que el riesgo de corrupción en el proceso de selección es alto como consecuencia de prácticas inadecuadas de gestión pública por parte de funcionarios públicos, sumado a ello, los vacíos normativos, las decisiones políticas y la corrupción existente [129].

PASO 4: Cálculo de indicadores de criterios de decisiones mediante el uso de herramientas BIM

Los criterios de decisiones que seleccionaron para la evaluación de las técnicas de reforzamiento sísmico incremental se agruparon en tres categorías económicos/sociales, transparencia y medioambientales. En la categoría económico/social se encuentran los criterios de costo y tiempo de ejecución. Mientras que, en la categoría transparencia, los criterios de modulación, estandarización e industrialización. Por último, en la categoría medioambiente, los criterios emisiones de CO₂ equivalentes, emisiones de material particulado, y daño en la salud humana. En la Tabla 5.2 se muestran los criterios de evaluación que se emplearán en la toma de decisiones del estudio de caso.

Tabla 5.2. Criterios de evaluación de las técnicas de reforzamiento sísmico incremental

CATEGORÍAS	CRITERIOS DE EVALUACIÓN
Económico / Social	C1: Costo de ejecución
	C2: Tiempo de ejecución
Transparencia	C3: Grado de Modulación
	C4: Grado de Estandarización
	C5: Nivel de Industrialización
Medio Ambiente	C6: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
	C7: Emisiones de Material Particulado
	C8: Impacto en la Salud Humana

Por otro lado, en la Tabla 5.3 se presenta la matriz de toma de decisiones de las técnicas de reforzamiento sísmico incremental según los criterios de decisiones seleccionados. El resultado de la evaluación de las técnicas se expresa mediante indicadores cuantitativos, que se obtuvieron empleando diferentes métodos.

CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE CASO

Tabla 5.3. Matriz de toma de decisiones para las tres técnicas de reforzamiento sísmico

CATEGORÍAS	CRITERIOS	Unidad	INDICADORES		
			MARM	IMACA	ACMAC
Económico / Social	C1: Costo de ejecución	S/. mil	166	225	230
	C2: Tiempo de ejecución	Días	71	89	57
Transparencia	C3: Grado de Modulación	% Modulación	78	90	100
	C4: Grado de Estandarización	% Estandarización	60	51	100
	C5: Nivel de Industrialización	% Industrialización	1	4	16
Medio Ambiente	C6: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	t CO ₂	33,381	58,565	97,459
	C7: Emisiones de Material Particulado	Kg PM2.5eq	42	72	168
	C8: Impacto en la Salud Humana	DALYS	5.76E-02	9.98E-02	19.6E-02

A continuación, se describe brevemente la implicancia de los resultados de la evaluación de los indicadores de la matriz de toma de decisiones.

Criterio económico/social: Costo de ejecución

Los costos de ejecución de las técnicas de reforzamiento sísmico MARM, IMACA y ACMAC se obtuvieron de los presupuestos presentados en la Guía de Reforzamiento Sísmico Incremental [120]. Como se observa en la Figura 5.15, la técnica ligeramente más costosa es ACMAC, lo cual era previsible considerando que el diseño de esta técnica contempla el uso de elementos prefabricados, como vigas y columnas metálicas, y diagonales de acero. Mientras que la técnica más económica es MARM cuya construcción es bastante tradicional, debido a que las actividades predominantes son realizadas de manera manual, por ejemplo, los trabajos de albañilería.

CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE CASO

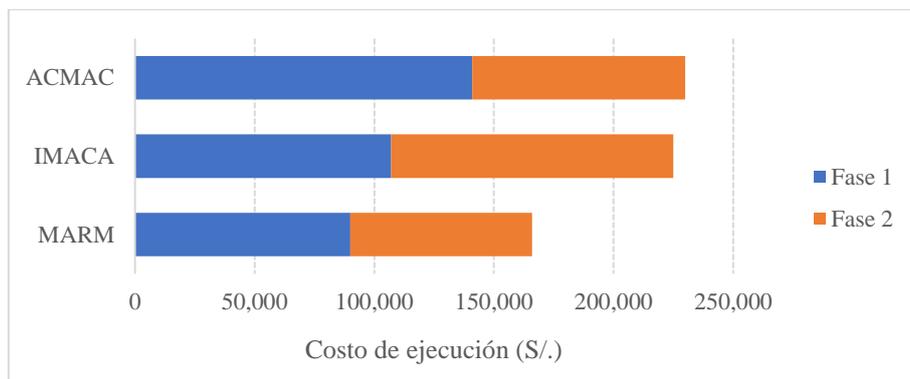


Figura 5.15. Comparación del costo de ejecución de las técnicas de reforzamiento sísmico

A partir de las tablas de metrados de los componentes del edificio que se generan automáticamente tras la modelación 3D en el software Revit® (ver Figura 5.16) es posible elaborar los presupuestos de manera más exacta y rápida. Cabe mencionar que dichas tablas de metrados se actualizan continuamente de acuerdo a las modificaciones que se realicen en los modelos.

Family	Type	Volume	Length	Count	Comments	Phase Created
Fase 1						
Concrete-Rectangul	CT 0.25 x 0.45	0.59 m³	6.90 m	2	Columnas - Fase 1	Fase 1
Concrete-Rectangul	CT 0.25 x 0.45: 2	0.59 m³	6.90 m	2		
Concrete-Rectangul	C2 0.30 x 0.45	0.11 m³	10.60 m	3	Columnas Existentes	Fase 1
Concrete-Rectangul	C2 0.30 x 0.45: 3	0.11 m³	10.60 m	3		
Concrete-Rectangul	CA-2 h=2.00m	0.88 m³	29.40 m	16	CA-2 - Fase 1	Fase 1
Concrete-Rectangul	CA-2 h=2.00m: 16	0.88 m³	29.40 m	16		
Concrete-Rectangul	CR-1 0.25 x 0.50	0.65 m³	6.50 m	2	CR-1 - Fase 1	Fase 1
Concrete-Rectangul	CR-1 0.25 x 0.50: 2	0.65 m³	6.50 m	2		
Concrete-Rectangul	CR-1 0.45 x 0.65	1.89 m³	6.50 m	2	CR-1 - Fase 1	Fase 1
Concrete-Rectangul	CR-1 0.45 x 0.65: 2	1.89 m³	6.50 m	2		
Fase 2						
Concrete-Rectangul	CT 0.25 x 0.45	0.59 m³	6.90 m	2	Columnas - Fase 2	Fase 2
Concrete-Rectangul	CT 0.25 x 0.45: 2	0.59 m³	6.90 m	2		
Concrete-Rectangul	C4 0.30 x 0.45	0.11 m³	13.80 m	4	Columnas Existentes	Fase 2
Concrete-Rectangul	C4 0.30 x 0.45: 4	0.11 m³	13.80 m	4		
Concrete-Rectangul	CA-2 h=1.30m	0.55 m³	18.25 m	16	CA-2 - Fase 2	Fase 2
Concrete-Rectangul	CA-2 h=1.30m: 16	0.55 m³	18.25 m	16		
Concrete-Rectangul	CR-1 0.25 x 0.50	0.66 m³	6.55 m	2	CR-1 - Fase 2	Fase 2
Concrete-Rectangul	CR-1 0.25 x 0.50: 2	0.66 m³	6.55 m	2		

Figura 5.16. Tabla de metrados de la técnica de reforzamiento sísmico IMACA (Autodesk® Revit™)

Criterio económico/social: Tiempo de ejecución

Los tiempos de ejecución de las técnicas de reforzamiento sísmico MARM, IMACA y ACMAC se obtuvieron de los cronogramas presentados en la Guía de Reforzamiento Sísmico Incremental [120]. El tiempo de ejecuciones en edificaciones de uso continuo es un criterio crítico debido a la interrupción durante el reforzamiento. Como se observa en la Figura 5.17, la técnica cuya ejecución es más rápida es

ACMAC, al igual que en el costo también era previsible, debido al uso de elementos prefabricados que optimiza los procesos al reducir las actividades in-situ. Mientras que la técnica de ejecución más lenta es MARM, por la misma razón que en el costo, debido a su forma de construcción tradicional que no prioriza el uso de nuevas tecnologías.

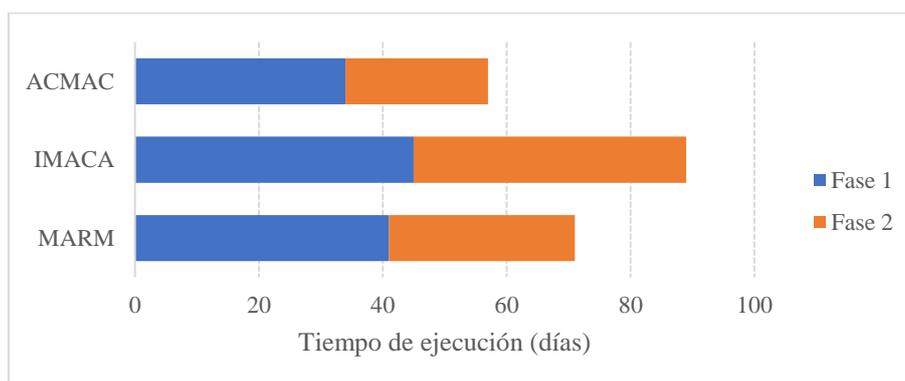


Figura 5.17. Comparación del tiempo de ejecución de las técnicas de reforzamiento sísmico

Criterio de transparencia: Modulación, estandarización e industrialización

En el ANEXO 3 se encuentra el formato de evaluación con los datos de las tres técnicas de reforzamiento sísmico (MARM, IMACA y ACMAC). Las unidades estructurales consideradas en la evaluación del grado de modulación y grado de estandarización fueron cimentaciones, columnetas, columnas, vigas, muros, placas.

La Figura 5.18 muestra los resultados de la evaluación de los indicadores de transparencia. La técnica de reforzamiento ACMAC fue la que obtuvo el puntaje más alto (100%) tanto en modulación como en estandarización, debido a que sus unidades estructurales, como vigas y columnas metálicas, tienen dimensiones modulares y son elementos estándares. Estas condiciones favorecieron a que el nivel de industrialización alcanzado en la construcción sea el segundo nivel más alto (16%) según la escala propuesta por Ghio [74], principalmente porque los elementos metálicos serán prefabricados.

Un escenario opuesto ocurrió con la técnica de reforzamiento MARM, sus unidades estructurales tienen dimensiones modulares e incluso alguno de ellos son elementos estándares, alcanzando en esas métricas puntajes de alrededor de 80% y 60%, en modulación y estandarización, respectivamente. Sin embargo, esto no implica que sean fabricados industrialmente, por el contrario, de forma tradicional in-situ. Por esa razón, el nivel de industrialización alcanzado fue el más bajo (0%) de acuerdo a la escala empleada.

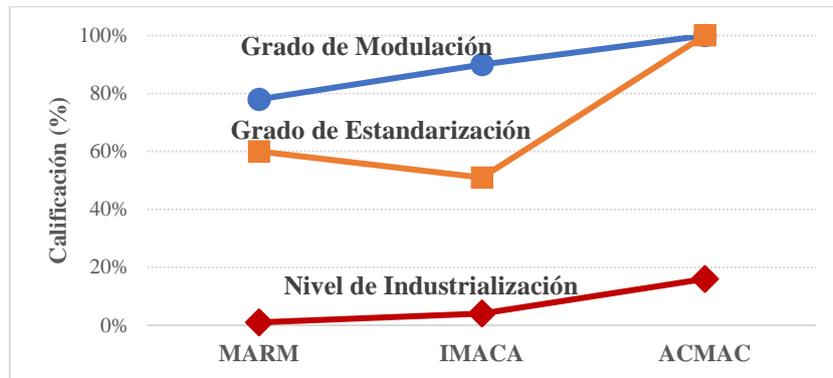


Figura 5.18. Indicadores de transparencia

De acuerdo al principio que rige la decisión sobre la correlación entre los índices de transparencia y los niveles de factibilidad de la construcción, se observa que la alternativa ACMAC tiene las calificaciones más altas en los tres indicadores de transparencia. Por el contrario, la alternativa MARM fue la que obtuvo las calificaciones más bajas, situación que no favorece la transparencia en la ejecución del proyecto, principalmente por la priorización del sistema de construcción tradicional.

Criterio medioambiental: Análisis de Ciclo de Vida

La evaluación de los criterios medioambientales fue llevada a cabo mediante el ACV para las etapas de demolición y reforzamiento. El reporte del procedimiento detallado del Análisis de Ciclo de Vida y los resultados obtenidos se encuentran en el ANEXO 3.

En la Figura 5.19 se presentan los resultados de las emisiones de CO₂ equivalente del sistema de estudio. La técnica ACMAC produce las emisiones de CO₂ equivalente más altas (97,106 kg CO₂-eq) y la técnica MARM las más bajas (32,792 kg CO₂-eq). Respecto a la comparación en las contribuciones de las etapas de demolición y reforzamiento, se observa que las mayores emisiones de CO₂ eq se generan en la etapa de reforzamiento de las tres técnicas, más del 50% de emisiones.

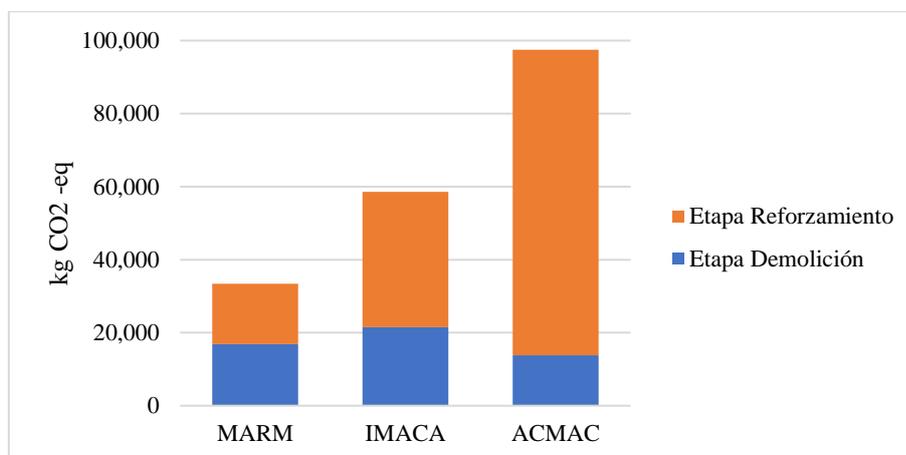


Figura 5.19. Método ReCiPe 2016 – Contribuciones de las etapas del ciclo de vida a las emisiones de CO₂ equivalente de las tres técnicas de reforzamiento

En la Figura 5.20 se presentan los resultados de las emisiones de material particulado fino del sistema de estudio. La técnica ACMAC produce las emisiones de material particulado más altas (168 kg PM_{2.5}eq) y la técnica MARM las más bajas (42 kg PM_{2.5}eq). Respecto a la comparación de las contribuciones de las etapas de demolición y reforzamiento, se observa que las mayores emisiones de material particulado fino se generan en la etapa de reforzamiento de las tres técnicas, más del 45% de emisiones.

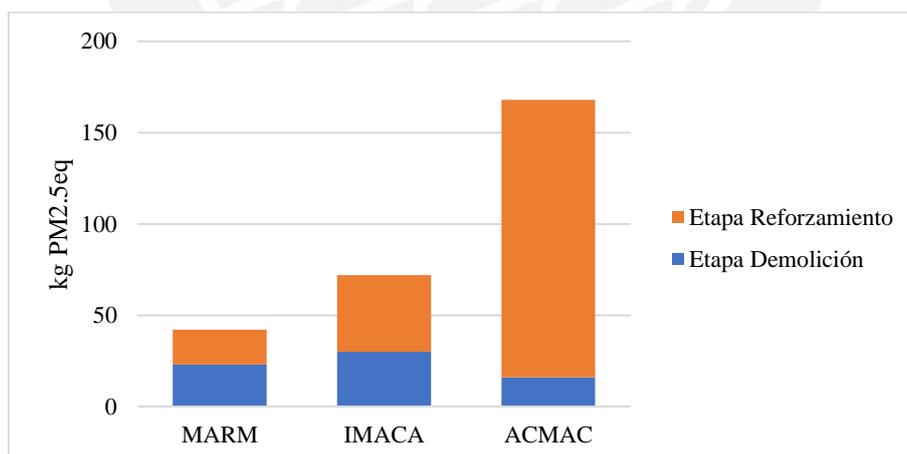


Figura 5.20. Método ReCiPe 2016 – Contribuciones de las etapas del ciclo de vida a las emisiones de material particulado de las tres técnicas de reforzamiento

En la Figura 5.21, se muestran los resultados del daño en la salud humana del sistema de estudio. Como se observa, la técnica que tiene mayores impactos negativos en la salud humana es ACMAC, especialmente por el incremento de enfermedades respiratorias por la emisión de material particulado

fino y desnutrición por la alteración de la temperatura debido a las emisiones de CO₂ eq, seguido por IMACA y, por último, MARM.

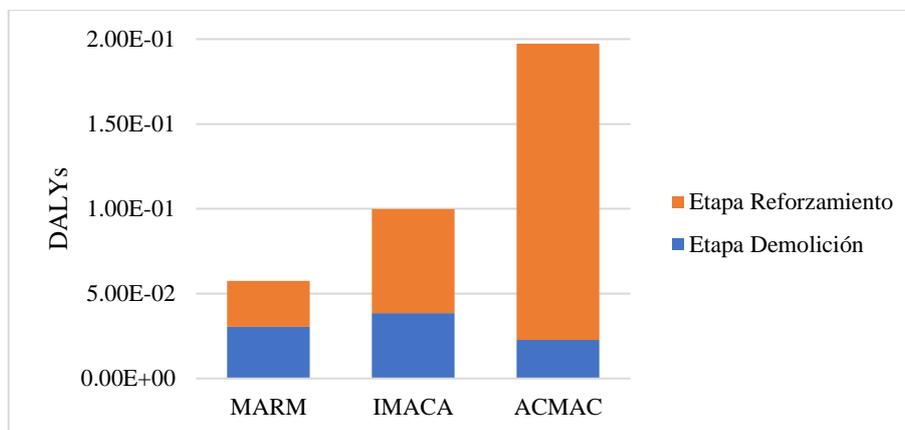


Figura 5.21. Método ReCiPe 2016 – Comparación de los daños en la salud humana de las tres técnicas de reforzamiento

En las tres categorías ambientales analizadas, la alternativa de reforzamiento más perjudicial para el medioambiente y la salud humana, tanto en la etapa de demolición como reforzamiento, es ACMAC. Mientras que la técnica MARM es la que presenta menores impactos ambientales.

PASO 5: Evaluación de alternativas de reforzamiento sísmico

La tercera y última actividad desarrollada en el taller participativo consistió en la evaluación de las técnicas de reforzamiento sísmico mediante la aplicación de los métodos de toma de decisiones TOPSIS y CBA. Estos métodos se aplicaron a la matriz de toma de decisiones de la Tabla 5.3 con la finalidad de seleccionar la técnica de reforzamiento sísmico ganadora. El primer paso de cualquier método de toma de decisiones es la valoración de los criterios de evaluación de la matriz de toma de decisiones. Por esa razón, en cada mesa de trabajo, los stakeholders comenzaron a conversar y discutir sobre el peso que se asignaría a cada criterio. Una de las tareas de los facilitadores era contribuir a lograr consensos para la valoración de dichos criterios (ver Figura 5.22 y Figura 5.23). Como resultado de la aplicación de cualquier método de toma de decisiones se obtiene un ranking u orden jerárquico de las alternativas. En el ANEXO 4 y el ANEXO 5 se encuentran los resultados de la aplicación de los métodos TOPSIS y CBA, respectivamente.



Figura 5.22. Valoración de criterios en la Mesa de trabajo 1



Figura 5.23. Valoración de criterios en la Mesa de trabajo 4

Antes de finalizar el taller participativo, se les entregó a los stakeholders la encuesta de salida para comparar las respuestas con la encuesta de entrada y validar la metodología propuesta (ver Figura 5.24).



Figura 5.24. Stakeholders respondiendo la encuesta de salida

5.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La discusión de los resultados de la aplicación de los métodos de toma de decisiones TOPSIS y CBA comienza con el análisis de la valoración de los criterios de la matriz de toma de decisiones y termina con el análisis del ranking de las técnicas de reforzamiento. Por un tema de uniformidad en el análisis, las mesas de trabajo conformadas durante el taller participativo se denominan escenarios, es decir, la mesa de trabajo 1 se identifica como el escenario 1.

5.3.1 Análisis de la valoración de los criterios de la matriz de toma de decisiones

Respecto a la valoración, los stakeholders asignaron pesos a los criterios de la matriz de toma de decisiones según la escala empleada en cada método. En el método TOPSIS, la valoración se realizó mediante la escala de importancia relativa de Saaty (ver ANEXO 4). Los pesos o vectores de prioridad se presentan de manera resumida en la Tabla 5.4. Para un mejor análisis, los pesos fueron agrupados en cuatro categorías: costo, tiempo, transparencia y medioambiente, como se observa en la Figura 5.25.

Tabla 5.4. Pesos de los criterios de decisiones - Método TOPSIS

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Escenario 1	3%	16%	6%	6%	9%	19%	19%	22%
Escenario 2	35%	22%	11%	11%	11%	5%	5%	2%
Escenario 3	4%	33%	6%	6%	9%	14%	14%	15%
Escenario 4	4%	33%	8%	15%	15%	9%	7%	10%

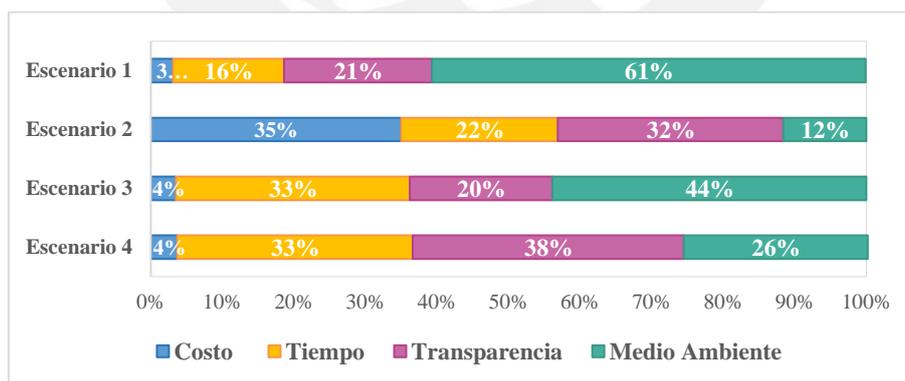


Figura 5.25. Pesos de los criterios de decisiones por categorías – Método TOPSIS

Mientras que en el método CBA, la valoración se realizó mediante la escala de importancia de cada ventaja (ver ANEXO 5). Con el propósito de comparar las valoraciones de ambos métodos, se normalizaron los pesos del método CBA (ver Tabla 5.5). En la Figura 5.26 se observan los pesos de los

CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE CASO

criterios agrupados en tres categorías: tiempo, transparencia y medioambiente. Cabe mencionar que el costo se evalúa al final con los puntajes totales obtenidos.

Tabla 5.5. Pesos de los criterios de decisiones – Método CBA

	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Escenario 1	17%	13%	13%	15%	11%	9%	22%
Escenario 2	43%	13%	13%	13%	7%	7%	4%
Escenario 3	19%	10%	9%	11%	16%	15%	21%
Escenario 4	29%	13%	15%	13%	10%	8%	11%

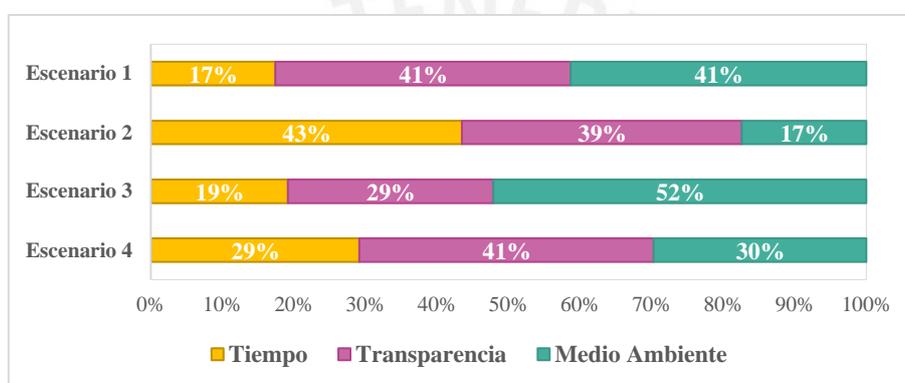


Figura 5.26. Pesos de los criterios de decisiones por categorías – Método CBA

A la luz de los resultados de la valoración de los criterios se observa una tendencia diferenciada en la asignación de pesos alineada al perfil de los stakeholders. Al respecto, se identificaron tres tipos de perfiles asociadas a los intereses de los stakeholders, como se observa en la Figura 5.27. En el perfil ambiental, el interés es preservar el bienestar y la salud de las personas. En el perfil ingenieril, el interés es asegurar la eficiencia y la productividad de la construcción. Mientras que, en el perfil holístico, el interés es garantizar el cumplimiento de todos los aspectos vinculados al proyecto de reforzamiento sísmico.

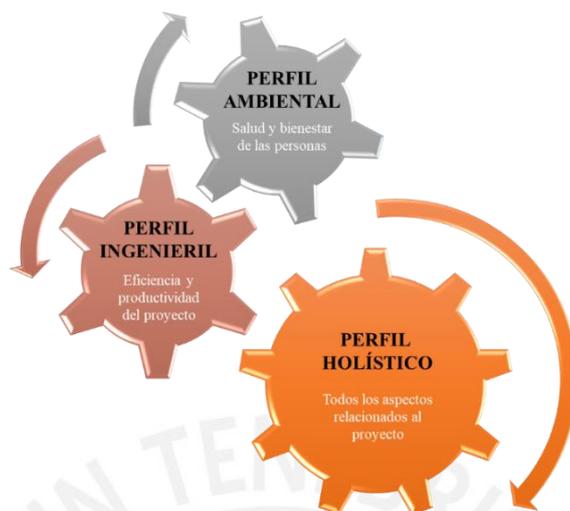


Figura 5.27. Perfil de los stakeholders

A partir de la identificación de los tres tipos de perfiles de los stakeholders, es posible relacionarlos con los escenarios de análisis, como se muestra en la Tabla 5.6. De esta manera, se afirma que los escenarios 1 y 3 tienen un perfil ambiental porque en ellos se prioriza el criterio medio ambiental. El escenario 2 tiene un perfil ingenieril debido a la priorización de criterios de tiempo y costo de ejecución. Por último, el escenario 4 tiene un perfil holístico porque toma en cuenta de manera equitativa todos los criterios identificados.

Tabla 5.6. Relación entre el perfil de los stakeholders y los escenarios de análisis

Escenarios	Perfiles	Intereses	Criterios más valorados
Escenarios 1 y 3	Ambiental	Priorización de aspectos relacionados con la salud y el bienestar de las personas	- Medioambiente
Escenario 2	Ingenieril	Priorización de aspectos técnicos, como la eficiencia y la productividad del proyecto de reforzamiento	- Costo de ejecución - Tiempo de ejecución - Transparencia
Escenario 4	Holístico	Contempla equitativamente todos los aspectos relacionados al proyecto de reforzamiento sísmico	- Costo de ejecución - Tiempo de ejecución - Transparencia - Medioambiente

A pesar de esta diferenciación, es preciso mencionar que en todos los escenarios de análisis los stakeholders valoraron con un buen puntaje al criterio de transparencia. En el método TOPSIS la valoración fue de más del 20% del total y en el método CBA, más del 29%.

5.3.2 Análisis del ranking de las alternativas de reforzamiento sísmico

Como resultado de la aplicación de los métodos de toma de decisiones se obtiene el ranking de las alternativas. En el método TOPSIS, la mejor alternativa es aquella que alcanza el puntaje más alto, ya que representa la proximidad o cercanía de la alternativa a la solución ideal. En la Tabla 5.7 se muestran los puntajes alcanzados de las técnicas de reforzamiento sísmico. La mejor alternativa en los escenarios 1 y 3 es la técnica MARM, mientras que en los escenarios 2 y 4, la técnica ACMAC.

Tabla 5.7. Puntajes totales de las técnicas de reforzamiento sísmico - Método TOPSIS

Técnica de reforzamiento sísmico	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
MARM	0.71	0.43	0.61	0.40
IMACA	0.58	0.22	0.45	0.29
ACMAC	0.32	0.63	0.47	0.67

Por otro lado, en el método CBA, la mejor alternativa es aquella con el puntaje más alto producto de la sumatoria de las importancias de cada ventaja de las alternativas. En la Tabla 5.8 se muestran los puntajes totales obtenidos de las técnicas. La mejor alternativa en los escenarios 1 y 3 es la técnica MARM, mientras que en los escenarios 2 y 4, la técnica ACMAC.

Tabla 5.8. Puntajes totales de las técnicas de reforzamiento sísmico – Método CBA

Técnica de reforzamiento sísmico	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
MARM	275	110	320	188
IMACA	180	44	185	105
ACMAC	270	190	225	241

Los resultados muestran que en ambos métodos el ranking de las alternativas estuvo alineado al perfil de los stakeholders. Para un mejor análisis, los puntajes se normalizaron con el propósito de compararlos, como se observa en la Tabla 5.9. En ambos métodos, el ranking u orden las alternativas en los escenarios 1 y 3 es similar, es decir, la alternativa con mayor puntaje fue la técnica MARM y con menor puntaje, la técnica ACMAC. Por el contrario, en el ranking de los escenarios 2 y 4, la alternativa con mayor puntaje fue la técnica ACMAC y con menor puntaje, la técnica MARM. Por esa razón, los puntajes normalizados de los escenarios 1 y 3 y los escenarios 2 y 4 se promediaron y agruparon para ambos métodos, como se muestra en la Figura 5.28 y la Figura 5.29.

Tabla 5.9. Puntajes normalizados de las técnicas de reforzamiento sísmico – Métodos TOPSIS y CBA

Método	Técnica de reforzamiento sísmico	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
TOPSIS	MARM	0.44	0.33	0.40	0.29
	IMACA	0.36	0.17	0.29	0.21
	ACMAC	0.20	0.49	0.31	0.49
CBA	MARM	0.38	0.32	0.44	0.35
	IMACA	0.25	0.13	0.25	0.20
	ACMAC	0.37	0.55	0.31	0.45

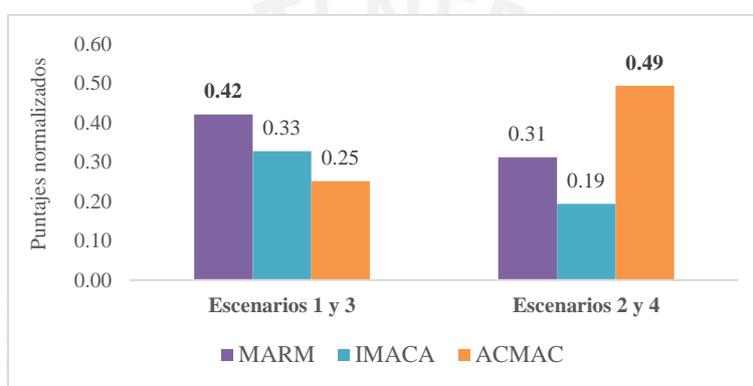


Figura 5.28. Ránking de las técnicas de reforzamiento sísmico – Método TOPSIS

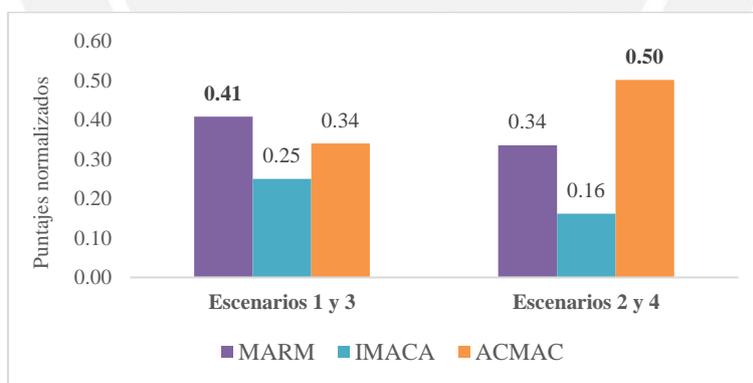


Figura 5.29. Ránking de las técnicas de reforzamiento sísmico – Método CBA

Como se mencionó anteriormente, en todos los escenarios los stakeholders valoraron con un buen puntaje al criterio de transparencia. Sin embargo, en algunos escenarios, la priorización del criterio ambiental modificó la decisión final. Por ejemplo, en los escenarios 1 y 3, el perfil ambientalista de los stakeholders hizo que se priorizara la alternativa con menores impactos ambientales perjudiciales a la salud y el bienestar de las personas, lo que justifica la elección de la técnica MARM. Por otro lado, en los escenarios 2 y 4, el perfil ingenieril y holístico hizo que se garantizara el cumplimiento de todos los criterios evaluados de manera proporcional, dando como ganadora a la técnica ACMAC.

5.4 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA MEDIANTE ENCUESTAS

La validación se realizó mediante la comparación de los resultados de las encuestas de entrada y la de salida, que fueron respondidas por los stakeholders antes y al finalizar el taller. Ambas encuestas contenían las mismas preguntas (ver ANEXO 6). Para un mejor análisis, las preguntas de la encuesta se dividieron en tres bloques de acuerdo a la estructura del taller. La finalidad del primer bloque fue conocer el nivel de difusión de la guía de reforzamiento sísmico incremental. En el segundo bloque se evaluó la efectividad de las sesiones de capacitación en BIM y en los métodos de toma de decisiones durante el taller. Mientras que, en el tercer bloque se planteó evaluar la percepción de los stakeholders sobre la transparencia en la toma de decisiones.

Respecto al primer bloque sobre la difusión de la guía de reforzamiento sísmico incremental, luego de informar a los stakeholders sobre la existencia de la guía, la aprobación se elevó a 96%, produciéndose un incremento de 71 puntos porcentuales respecto de la encuesta de entrada. Al inicio del taller, solo el 25% identificaban correctamente las técnicas de reforzamiento propuestas en la guía. Sin embargo, luego de ser informados estos números se incrementaron en más de 70 puntos porcentuales.

En relación al segundo bloque sobre la capacitación en la aplicación de BIM, después del taller la percepción de los stakeholders sobre conceptos relacionados a BIM se incrementó en más del 45%. Por ejemplo, la mayoría de los stakeholders estuvieron de acuerdo que BIM permite el trabajo colaborativo y que es un cambio en los procesos de trabajo. Sin embargo, a pesar del incremento porcentual, la afirmación sobre los cambios en las políticas de las empresas que requiere la implementación BIM no fue asimilado completamente por los stakeholders, el respaldo fue menor a 45%. Esta situación puede representar una barrera para la implementación de BIM en el sector construcción en vista de los esfuerzos del Gobierno peruano por “incorporar progresivamente las herramientas de modelamiento digital de la información para la ejecución de obra pública” (Diario Oficial “El Peruano”).

En cuanto al tercer bloque sobre la validación de la hipótesis de la investigación, los stakeholders mayoritariamente afirmaron que la visualización de las técnicas de reforzamiento a través de los modelos 3D y 4D incrementa la transparencia en la toma de decisiones, en comparación con los métodos tradicionales (más del 96%). Por ejemplo, en la mesa de trabajo 4, los stakeholders respaldaron esta afirmación colocándolo como una fortaleza de la propuesta, como se observa en la Figura 5.30. Asimismo, luego de ser informados más del 86% de los stakeholders valoraron favorablemente el impacto de la modulación, estandarización e industrialización en el incremento de la transparencia en los proyectos de construcción. Por último, luego del taller, el 100% de los stakeholders respaldaron la

importancia de incluir y medir la transparencia en la toma de decisiones de proyectos de construcción con la finalidad de contribuir a reducir el riesgo de corrupción

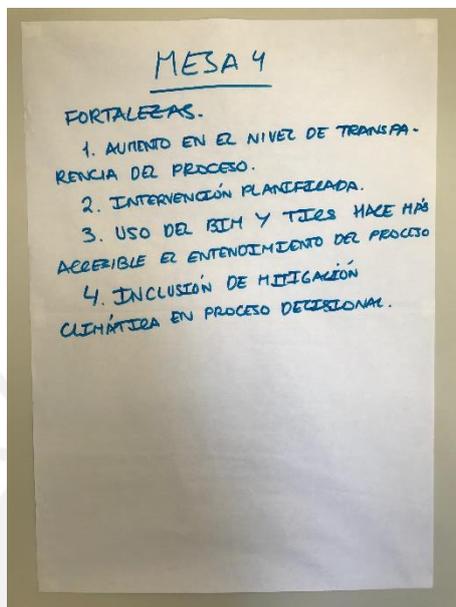


Figura 5.30. Respaldo de la hipótesis por parte de la Mesa de trabajo 4

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como pone de manifiesto la literatura del marco teórico de la investigación, la transparencia es una importante estrategia anticorrupción. Por esa razón, se propuso una metodología cuyo objetivo principal es incrementar la transparencia de la toma de decisiones de proyectos de reforzamiento sísmico mediante la incorporación de BIM desde las etapas iniciales y la inclusión de la transparencia como un criterio cuantificable. Dicha metodología consta de cinco pasos que se establecen alrededor de tres pilares: (1) mejorar el entendimiento de los stakeholders mediante la visualización de los modelos BIM, (2) fomentar la participación de los stakeholders mediante la coproducción de criterios de decisiones, y (3) seleccionar la mejor alternativa mediante la aplicación de métodos de toma de decisiones.

Respecto al uso de BIM en la etapa de toma de decisiones de edificaciones existentes, es posible afirmar que su uso es menos frecuente que en edificaciones nuevas. Debido a ello, la metodología propuesta incorpora el uso de BIM desde el inicio con el propósito de aprovechar sus ventajas, especialmente al ser una herramienta importante para la transparencia de la información. En ese sentido, además de la visualización de los modelos 3D y 4D de las técnicas de reforzamiento sísmico, se empleó BIM para el cálculo de indicadores de los criterios de transparencia y de medioambiente.

En relación con los criterios de decisiones empleados en estudios previos, se concluye que no existe un criterio que evalúe explícitamente la transparencia en la ejecución de un proyecto de reforzamiento sísmico. Debido a ello, la metodología propuesta incluye indicadores de transparencia con la finalidad de contribuir con la reducción del riesgo de corrupción en la industria de la construcción. En ese sentido, el principio que rige la decisión es la correlación entre los índices de transparencia y el nivel de factibilidad de la construcción, que se calcula con métricas de optimización (modulación, estandarización e industrialización).

La metodología propuesta se aplicó al estudio de caso “Reforzamiento Sísmico de Colegios Públicos Sistema Modular 780-PRE de Lima Metropolitana”. La realización del taller participativo “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs” contribuyó positivamente en el incremento de la transparencia de la toma de decisiones. Las actividades desarrolladas durante el taller participativo estuvieron alineadas con los pilares de la metodología propuesta. Durante la actividad de coproducción de criterios de decisiones

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

sobre reforzamiento sísmico se identificaron criterios que no habían sido considerados en estudios previos.

Los resultados de los métodos de toma de decisiones TOPSIS y CBA muestran que la decisión final dependió del perfil de los stakeholders. Se identificaron tres tipos de perfiles: ambiental, ingenieril y holístico asociados a los intereses de los stakeholders. A pesar de esta diferenciación según los perfiles, los stakeholders peruanos otorgaron un buen puntaje al criterio de transparencia. De esta manera, en los escenarios donde los intereses de los stakeholders favorecieron la priorización del criterio de transparencia, la alternativa ganadora fue la técnica ACMAC. Por consiguiente, no considerar a la transparencia en la decisión podría dar como resultado la selección de una técnica de reforzamiento con riesgo de corrupción.

Los resultados de las encuestas evidencian la percepción positiva y favorable de los stakeholders respecto a la metodología propuesta desarrollada en el taller participativo. Por ejemplo, los stakeholders sostuvieron mayoritariamente que la visualización de los modelos 3D y las animaciones de los modelos 4D incrementan la transparencia en la toma de decisiones. Asimismo, los stakeholders valoraron favorablemente el impacto de las métricas de optimización en el incremento de la transparencia en la ejecución de proyectos de construcción.

Por todo lo anterior, se puede afirmar que el uso de herramientas BIM y la inclusión del criterio de transparencia mejora el entendimiento de los stakeholders, permite seleccionar la técnica de reforzamiento sísmico que mejor mitigue el riesgo de corrupción e incrementa la transparencia en la toma de decisiones.

Se recomienda ampliar el alcance de las guías de reforzamiento sísmico existentes con el fin de que abarquen todas las etapas de un proyecto. En relación al Perú, a pesar de estar ubicado en una región altamente sísmica no cuenta con una guía de reforzamiento sísmico. En ese sentido siguiendo la recomendación, la futura guía peruana debería comprender dentro de su alcance todas las etapas involucradas en un proyecto de reforzamiento sísmico, es decir, desde la evaluación sísmica hasta la gestión del mantenimiento y uso. Asimismo, incorporar el modelo BIM desde las etapas iniciales de un proyecto de reforzamiento sísmico de acuerdo con el Decreto Legislativo N°1444 que modifica la Ley de Contrataciones con el Estado.

REFERENCIAS

- [1] UNCRD, “Reducing Vulnerability of School Children to Earthquakes Reducing Vulnerability of School Children to Earthquakes,” 2009.
- [2] A. Fujieda, B. H. Pandey, and S. Ando, “Safe Schools to Reduce Vulnerability of Children to Earthquakes,” in *14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.
- [3] Building Seismic Safety Council (BSSC), *Engineering Guideline for Incremental Seismic Rehabilitation, FEMA P-420*. Federal Emergency Management Agency. Washington, DC, 2009.
- [4] H. Fukuyama and S. Sugano, “Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu earthquake,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 1, pp. 59–79, 2000.
- [5] A. Smyth, G. Deodatis, G. Franco, Y. He, and T. Gurvich, “Evaluating Earthquake Retrofitting Measures for Schools: A Cost Benefit Analysis,” in *OECD, School Safety and Security Keeping Schools Safe in Earthquakes*, 2004, pp. 208–216.
- [6] B. M. Badoux and J. O. Jirsa, “Steel bracing for seismic retrofitting,” *J. Struct. Eng.*, vol. 116, no. 1, pp. 55–74, 1990.
- [7] C. Durucan and M. Dicleli, “Analytical study on seismic retrofitting of reinforced concrete buildings using steel braces with shear link,” *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 10, pp. 2995–3010, 2010.
- [8] S. Sorace, “Dissipative Bracing-Based Seismic Retrofit of R/C School Buildings,” *Open Constr. Build. Technol. J.*, vol. 6, no. 1, pp. 334–345, 2012.
- [9] S. Sorace and G. Terenzi, “Motion control-based seismic retrofit solutions for a R/C school building designed with earlier Technical Standards,” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 12, no. 6, pp. 2723–2744, 2014.
- [10] A. Tena-Colunga, “Some Retrofit Options for the Seismic Upgrading of Old Low-Rise School Buildings in Mexico,” *Earthq. Spectra*, vol. 12, no. 4, pp. 883–902, 1996.
- [11] S. Giovinazzi and S. Pampanin, “Multi-Criteria Approaches for Earthquake Retrofit Strategies At Regional Scale,” in *Proceedings 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering*,

REFERENCIAS

- Singapore*, 2007.
- [12] N. Caterino, I. Iervolino, G. Manfredi, and E. Cosenza, “Multi-Criteria Decision Making for Seismic Retrofitting of RC Structures,” *J. Earthq. Eng.*, vol. 12, no. January 2014, pp. 555–583, 2008.
- [13] N. Caterino, I. Iervolino, G. Manfredi, and E. Cosenza, “Comparative analysis of multi-criteria decision-making methods for seismic structural retrofitting,” *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 24, no. 6, pp. 432–445, 2009.
- [14] S. Tesfamariam, R. Sadiq, and H. Najjaran, “Decision making under uncertainty - An example for seismic risk management,” *Risk Anal.*, vol. 30, no. 1, pp. 78–94, 2010.
- [15] A. Bradshaw, P. Rajeev, and S. Tesfamariam, “Multi Criteria Decision Making Tool for the Selection of Seismic Retrofitting Techniques,” *Significance*, vol. 50, pp. 18–20, 2011.
- [16] M. Raissi, M. Yekrangnia, M. Eghbali, and A. Mahdizadeh, “Report on Retrofit Procedure of School Buildings in Islamic Republic of Iran,” in *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 2014, pp. 1–11.
- [17] A. H. M. M. Billah and M. S. Alam, “Performance-based prioritisation for seismic retrofitting of reinforced concrete bridge bent,” *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 10, no. 8, pp. 929–949, 2014.
- [18] A. Formisano and F. M. Mazzolani, “On the selection by MCDM methods of the optimal system for seismic retrofitting and vertical addition of existing buildings,” *Comput. Struct.*, vol. 159, pp. 1–13, 2015.
- [19] G. Terracciano, G. Di Lorenzo, A. Formisano, and R. Landolfo, “Cold-formed thin-walled steel structures as vertical addition and energetic retrofitting systems of existing masonry buildings,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 7, pp. 850–866, 2015.
- [20] M. T. Pour, “Prioritization of methods for seismic retrofitting of structures,” *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 10, no. Spec. Issue on Advances in Civil and Environmental Engineering ACEE 2015, August 2015, pp. 64–80, 2015.
- [21] A. Anelli, M. Vona, S. Santa-Cruz, M. Laterza, and N. Tarque, “Mcdm Methods for the Identification of Intervention Strategies for Seismic Retrofitting of School Buildings,” in *World Engineering Conference on Disaster Risk Reduction*, 2016, pp. 1–10.

REFERENCIAS

- [22] C. Injess and M. Chiocha, "CORRUPTION AND ITS EFFECTS ON THE DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY IN CORRUPTION AND ITS EFFECTS ON THE DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION INDUSTRY IN," 2009.
- [23] M. Sohail and S. Cavill, "Corruption in construction projects," in *Proceedings of the CIB W107 Construction in Developing Countries Symposium "Construction in Developing Economies: New Issues and Challenges,"* 2006.
- [24] Y. Le and A. P. C. Chan, "Overview of Corruption Research in Construction," vol. 30, no. 4, pp. 1–7, 2014.
- [25] H. Goldie-scot and S. Wilson, "Briefing : Corruption in construction in developing countries," no. December, pp. 211–213, 2008.
- [26] S. Azhar, "Building Information Modeling (BIM): Trends, Benefits, Risks, and Challenges for the AEC Industry," *Leadersh. Manag. Eng.*, vol. 11, no. Bazjanac 2006, pp. 241–252, 2011.
- [27] D. Murguía, "PRIMER ESTUDIO DE ADOPCIÓN BIM EN PROYECTOS DE EDIFICACIÓN EN LIMA Y CALLAO 2017," Lima, Peru, 2017.
- [28] R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs," *Autom. Constr.*, vol. 38, no. April, pp. 109–127, 2014.
- [29] D. Murguía and X. Brioso, "Using 'Choosing by Advantages' and 4D Models to Select the Best Construction-Flow Option in a Residential Building," *Procedia Eng.*, vol. 196, no. June, pp. 470–477, 2017.
- [30] R. Sacks, C. Eastman, G. Lee, and P. Teicholz, *BIM Handbook - A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. 2018.
- [31] B. Becerik-Gerber and S. Rice, "The perceived value of building information modeling in the US building industry," *J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 15, no. February, pp. 185–201, 2010.
- [32] B. Becerik-Gerber, A.M.ASCE, K. Ku, and F. Jazizadeh, "BIM-Enabled Virtual and Collaborative Construction Engineering and Management," *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.*, vol. 138, no. 3, pp. 234–245, 2012.

REFERENCIAS

- [33] A. Akbarnezhad, K. C. G. Ong, and L. R. Chandra, "Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling," *Autom. Constr.*, vol. 37, pp. 131–144, 2014.
- [34] Instituto Nacional de Estadística e Informática and Ministerio de Educación, "Censo de Infraestructura Educativa 2013," Lima, Peru, 2013.
- [35] A. Muñoz and M. Blondet, "Reducción de la vulnerabilidad sísmica de Edificaciones Escolares Peruanas en alto riesgo," Lima, 2007.
- [36] Transparency International, "Bribe Payers Index 2011," 2011.
- [37] Transparency International, "Global Corruption Report 2005. Special Focus: Corruption in Construction and Post-Conflict Reconstruction," 2005.
- [38] A. P. C. Chan and E. K. Owusu, "Corruption Forms in the Construction Industry : Literature Review," vol. 143, no. Johnston 1996, pp. 1–12, 2017.
- [39] M. Sohail and S. Cavill, "Accountability to Prevent Corruption," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 134, no. 9, pp. 729–738, 2008.
- [40] N. Ambraseys and R. Bilham, "Corruption kills," *Nature*, vol. 469, no. June, p. 153, 2014.
- [41] Transparency International, "PREVENTING CORRUPTION ON CONSTRUCTION PROJECTS." [Online]. Available: https://www.transparency.org/news/feature/preventing_corruption_on_construction_projects.
- [42] S. Z. S. Tabish and K. N. Jha, "Identification and evaluation of success factors for public construction projects," vol. 6193, 2011.
- [43] X. Deng *et al.*, "Transparency in the Procurement of Public Works Transparency in the Procurement of Public Works," vol. 0962, no. 2003, pp. 954–962, 2003.
- [44] S. Z. S. Tabish and K. N. Jha, "The impact of anti-corruption strategies on corruption free performance in public construction projects The impact of anti-corruption strategies on corruption free performance in public construction projects," vol. 6193, pp. 20–35, 2012.
- [45] Transparency International, "What is corruption?" [Online]. Available: <https://www.transparency.org/>.

REFERENCIAS

- [46] W. Ho, "Integrated analytic hierarchy process and its applications - A literature review," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 186, no. 1, pp. 211–228, 2008.
- [47] S. Hajkovicz and K. Collins, "A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management," *Water Resour. Manag.*, vol. 21, no. 9, pp. 1553–1566, 2007.
- [48] C. Zopounidis and M. Doumpos, "Multicriteria classification and sorting methods: A literature review," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 138, no. 2, pp. 229–246, 2002.
- [49] A. Mardani, A. Jusoh, K. M. D. Nor, Z. Khalifah, N. Zakwan, and A. Valipour, "Multiple criteria decision-making techniques and their applications - A review of the literature from 2000 to 2014," *Econ. Res. Istraz.*, vol. 28, no. 1, pp. 516–571, 2015.
- [50] K. Brown, W. Neil Adger, E. Tompkins, P. Bacon, D. Shim, and K. Young, "Trade-off analysis for marine protected area management," *Ecol. Econ.*, vol. 37, no. 3, pp. 417–434, 2001.
- [51] A. R. Joubert, A. Leiman, H. M. de Klerk, S. Katua, and J. C. Aggenbach, "Fynbos (fine bush) vegetation and the supply of water: a comparison of multi-criteria decision analysis and cost-benefits analysis," *Ecol. Econ.*, vol. 22, pp. 123–140, 1997.
- [52] D. J. Dunning, Q. E. Ross, and M. W. Merkhofer, "Multiattribute utility analysis for addressing Section 316(b) of the Clean Water Act," *Environ. Sci. Policy*, vol. 3, no. Supplement 1, pp. 7–14, 2000.
- [53] C. Romero and R. Tahir, "Natural resource management and the use of multiple criteria decision-making techniques: A review," *Eur. Rev. Agric. Econ.*, vol. 14, no. 1, pp. 61–89, 1987.
- [54] T. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hil. 1980.
- [55] J. Suhr, *The choosing by advantages decision making system*, Quorum, We. 1999.
- [56] K. Parrish and I. Tommelein, "Making Design Decisions Using Choosing By Advantages," in *17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC17*, 2009.
- [57] P. Arroyo, I. D. Tommelein, and G. Ballard, "Using ' Choosing By Advantages ' To Select Ceiling Tile From a Global," *Proc. 21st Annu. Conf. Int. Gr. Lean Constr.*, vol. 1, no. 510, 2013.
- [58] B. Hardin, *BIM and construction management: proven tools, methods, and workflows*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

REFERENCIAS

- [59] S. Azhar, “Building Information Modeling (BIM): A New Paradigm for Visual Interactive Modeling and Simulation for Construction Projects,” in *First International Conference on Construction in Developing Countries (ICCIDC-1)*, 2008, vol. 1.
- [60] J. Wong and J. Yang, “Research and application of Building Information Modelling (BIM) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry: a review and direction for future research,” *Proc. 6th Int. Conf. Innov. Archit. Eng. Constr.*, vol. 1, pp. 356–365, 2010.
- [61] ISO 19650-1:2018, *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) -- Information management using building information modelling -- Part 1: Concepts and principles*. 2018.
- [62] CRC Construction Innovation, *Adopting BIM for facilities management: Solutions for managing the Sydney Opera House*, Cooperativ. Brisbane, Australia, 2007.
- [63] B. T. Wheatley, T. W. Brown, A. Introduction, B. B. T. Wheatley, and T. W. Brown, “An Introduction to Building Information Modeling,” *Constr. Lawyer*, vol. 27, p. 33, 2007.
- [64] C. T. Pérez, L. L. A. Fernandes, and D. B. Costa, “A literature review on 4D BIM for logistics operations and workspace management,” *Proc. 24th Ann. Conf. Int’l. Gr. Lean Constr.*, vol. 55, pp. 53–62, 2016.
- [65] R. Sacks, L. Koskela, B. A. Dave, and R. Owen, “Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 136, no. 9, pp. 968–980, 2010.
- [66] K. McKinney and M. Fischer, “Generating, evaluating and visualizing construction schedules with CAD tools,” *Autom. Constr.*, vol. 7, pp. 433–447, 1998.
- [67] T. Kala, O. Seppanen, and C. Stein, “Case Study of Using an Integrated 5D System in a Large Hospital Construction Project,” *18th Annu. Conf. Int. Gr. Lean Constr.*, no. July, pp. 664–673, 2010.
- [68] L. Koskela, *Application of the new production philosophy to construction*. Stanford: Stanford university, 1992.
- [69] X. Brioso, A. E. Humero, L.-M. Sanz-Rodriguez, V. Herrera, M. Castellanos, and R. García-casares, “Aplicando scoring y elección por ventajas en la toma de decisiones multicriterio de edificaciones sostenibles,” *CITE 2017*, pp. 1–17, 2017.

REFERENCIAS

- [70] P. Orihuela and J. Orihuela, "Evaluación de la estandarización en proyectos de vivienda," in *ELAGEC 2008*, 2008, pp. 1–8.
- [71] Indian Standards Institution, "IS 10600: Recommendations for Modular Coordination - Principles and Rules," Bureau of Indian Standards. New Delhi, 2005.
- [72] B. Olasov, "A Model for Design and Analysis of Systems Built Buildings by," Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1987.
- [73] M. M. Singh, A. Sawhney, and A. Borrmann, "Modular Coordination and BIM: Development of Rule Based Smart Building Components," *Procedia Eng.*, vol. 123, pp. 519–527, 2015.
- [74] V. Ghio, *Guía para la innovación tecnológica en la construcción*. 1997.
- [75] L. Koskela, "Is structural change the primary solution to the problems of construction?," *Build. Res. Inf.*, vol. 31, no. 2, pp. 85–96, 2003.
- [76] I. Agustí-Juan and G. Habert, "Environmental design guidelines for digital fabrication," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 2780–2791, 2017.
- [77] P. Vitale, N. Arena, F. Di Gregorio, and U. Arena, "Life cycle assessment of the end-of-life phase of a residential building," *Waste Manag.*, vol. 60, pp. 311–321, 2017.
- [78] B. Soust-Verdager, C. Llatas, and A. García-Martínez, "CRITICAL REVIEW OF BIM-BASED LCA METHOD TO BUILDINGS Bernardette," pp. 1–31, 2016.
- [79] J. C. Gómez de Cózar, A. G. Martínez, Í. A. López, and M. R. Alfonsea, "Life cycle assessment as a decision-making tool for selecting building systems in heritage intervention: Case study of Roman Theatre in Itálica, Spain," *J. Clean. Prod.*, vol. 206, pp. 27–39, 2019.
- [80] ISO 14040, "Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework," vol. 2006, 2006.
- [81] S. Butera, T. Christensen, and T. Astrup, "Life cycle assessment of construction and demolition waste management," *Waste Manag.*, vol. 44, pp. 196–205, 2015.
- [82] A. Sharma, A. Saxena, M. Sethi, V. Shree, and Varun, "Life cycle assessment of buildings: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 11, pp. 871–875, 2011.

REFERENCIAS

- [83] G. Benveniste *et al.*, “Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas,” *Inf. la Construcción*, vol. 63, no. 522, pp. 71–81, 2011.
- [84] D. Garraín Cordero, “Desarrollo y aplicación de las categorías de impacto ambiental de ruido y de uso de suelo en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida,” Universitat Jaume I, 2009.
- [85] ISO 14044, “Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines,” vol. 332, no. 7555, pp. 1418–1418, 2006.
- [86] M. Sandanayake, G. Zhang, and S. Setunge, “Estimation of environmental emissions and impacts of building construction – A decision making tool for contractors,” *J. Build. Eng.*, vol. 21, pp. 173–185, 2019.
- [87] F. Asdrubali, C. Baldassarri, and V. Fthenakis, “Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings,” *Energy Build.*, vol. 64, pp. 73–89, 2013.
- [88] M. Z. Hauschild and M. A. J. Huijbregts, “Introducing life cycle impact assessment,” in *Life Cycle Impact Assessment*, Springer,., no. October 2017, 2015, pp. 1–16.
- [89] D. Aguilar and F. Loo, “Análisis de Eco-Eficiencia de la Demolición de una Edificación en Lima,” Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017.
- [90] S. Santa-Cruz, X. Brioso, and C. Córdova-Arias, “SELECTION OF SEISMIC RETROFITTING TECHNIQUES THROUGH A MULTI- CRITERIA METHODOLOGY AND BIM TOOLS TO IMPROVE TRANSPARENCY,” in *Proceedings of the 11th National Conference in Earthquake Engineering*, 2018.
- [91] Building Seismic Safety Council (BSSC), *Incremental Seismic Rehabilitation of School Buildings (K-12)*, FEMA 395. Federal Emergency Management Agency. Washington, DC, 2003.
- [92] SENCICO, *Norma Técnica Peruana E.030 Diseño Sismorresistente*. Peru, 2016.
- [93] ATC. 40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Applied Technology Council. Redwood City, California, 1996.
- [94] Building Seismic Safety Council (BSSC), *Prestandard and Commentary for the Seismic*

REFERENCIAS

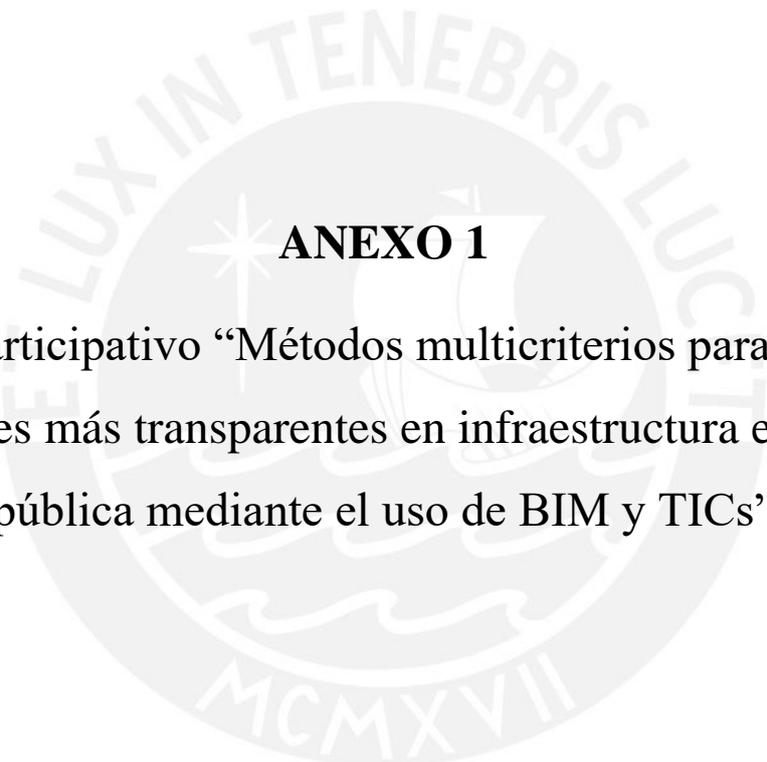
- Rehabilitation of Buildings, FEMA 356*. Federal Emergency Management Agency. Washington, DC, 2000.
- [95] ASCE 41-06, *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia, 2006.
- [96] Gobierno del Distrito Federal, *Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones*, vol. II. Mexico, 2004.
- [97] SENCICO, *Norma Técnica Peruana E.080 Diseño y Construcción Con Tierra Reforzada*. Peru, 2017.
- [98] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, “Título A – Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente,” *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Colombia, 1997.
- [99] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, “NEC-SE-RE: Riesgo sísmico, evaluación, rehabilitación de estructuras,” *NEC-Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Ecuador, 2014.
- [100] FUNVISIS, “NORMA VENEZOLANA COVENIN 1756:2001, Edificaciones Sismorresistentes, Partes 1 y 2, Requisitos y Comentarios.” Venezuela, 2001.
- [101] Eurocode 8, “European Standard EN 1998-1-4:1995: Design of structures for earthquake resistance -Part 1-4 Strengthening and repair of buildings.pdf,” *Comite Europeen de Normalisation, Brussels*. 1995.
- [102] Eurocode 8, “European Standard EN 1998-3:2005: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings,” *Comite Europeen de Normalisation, Brussels*. 2005.
- [103] EPPO, “Greek Code of Structural Interventions (GCSI).” Greece, 2012.
- [104] New Zealand National Society for Earthquake Engineering, “Assessment and Improvement of the Structural Performance of Earthquake Risk Buildings,” 2006.
- [105] JGJ 116-2009, *Technical specification for seismic strengthening of building*. Beijing: China Building Industry Press, 2009.
- [106] CENDR, “Recommendations for Preventive Aseismic Strengthening of Buildings.” Russia,

REFERENCIAS

- 1993.
- [107] Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA), *Standard, Guidelines and Technical Manual - Seismic retrofit of existing concrete buildings*. 2001.
- [108] GSREB, “Guideline for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings,” *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*. Iran, 2002.
- [109] Ministry of Public Works and Housing, “Regulation for buildings in seismic areas,” *Official Gazette*. Turkey, 2007.
- [110] World Bank Group, “Guidelines for Earthquake Strengthening of Public Schools and Hospitals in Metro Manila,” in *Safe and Resilient Infrastructure in the Philippines*, Washington, DC, USA, 2014.
- [111] Bureau of Indian Standards, “Repair and Seismic Strengthening of Buildings – Guidelines,” *Indian Standard*. New Delhi, Indian, 2002.
- [112] Ministry of Urban Development, “Seismic Retrofitting Guidelines of Buildings in Nepal: Compilation of Adobe, Masonry and RCC.” Kathmandu, Nepal, 2016.
- [113] C.G.S., “Catalogue for repair and strengthening of buildings,” *National Earthquake Engineering Centre*. Algiers, Algeria, 1994.
- [114] D. P. Welch, T. J. Sullivan, and A. Filiatrault, “Potential of Building Information Modelling for Seismic Risk Mitigation in Buildings,” *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.*, no. December, 2014.
- [115] A. Akcamete, B. Akinci, and J. H. Garrett, “Potential utilization of building information models for planning maintenance activities,” in *Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, no. March 2015, pp. 151–157.
- [116] C. Georgiou and S. Christodoulou, “BIM-based Damage Assessment and Scheduling for Post-Earthquake Building Rehabilitation,” *eWork Ebus. Archit. Eng. Constr.*, pp. 187–193, 2014.
- [117] N. Khwaja and C. Schmeits, “Improving the Transparency of Construction Projects Through Visualization Technology,” no. 2408, pp. 34–43, 2014.
- [118] L. Lopez, “La importancia de la interdisciplinariedad en la construcción del conocimiento desde la filosofía de la educación,” *Sophia, Colección Filos. la Educ.*, vol. 13, pp. 367–377, 2012.

REFERENCIAS

- [119] Datum, “Estudios. Temas de fondo: Infraestructura en la región,” 2018. [Online]. Available: <http://www.datum.com.pe/estudios>.
- [120] World Bank, “Proposed update of the National Building Regulations to incorporate the incremental reinforcement in type 780 school buildings built before 1997,” Lima, Peru, 2016.
- [121] Ministerio de Educación, *Inversión en infraestructura educativa 2011-2016*. Lima, 2016.
- [122] Ministerio de Educación, *Plan Nacional de Infraestructura Educativa al 2025*. Lima, 2017.
- [123] S. Santa-Cruz, “Evaluación Probabilística del Riesgo Sísmico de Escuelas y Hospitales de la Ciudad de Lima: Componente 2 (Probabilistic Seismic Risk Evaluation of Schools and Hospitals in the City of Lima: Part 2),” 2013.
- [124] A. Muñoz, D. Quiun, and M. Tinman, “REPARACIÓN Y REFORZAMIENTO SISMICO DE EDIFICIOS EDUCATIVOS Y HOSPITALES AFECTADOS POR EL TERREMOTO DE JUNIO 2001 EN EL SUR DEL PERÚ,” vol. 5, 2013.
- [125] M. Barrett, P., Treves, A., Shmis, T., Ambasz, D., & Ustinova, *The Impact of School Infrastructure on Learning: A Synthesis of the Evidence*. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank, 2019.
- [126] Ministerio del Ambiente, “El Acuerdo de París: El largo proceso hacia el éxito. Rol, retos y oportunidades para el Perú,” 2016.
- [127] A. Enshassi, B. Kochendoerfer, and E. Rizq, “Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción,” *Rev. Ing. construcción*, vol. 29, pp. 234–254, 2014.
- [128] SENCICO, “Norma Técnica Peruana G.050 Seguridad durante la construcción,” *Reglamento Nacional de Edificaciones*. 2010.
- [129] S. Hernández Diez, “Estructura de las redes de corrupción en los procesos de selección de obras públicas en el sector Transportes y Comunicaciones entre los años 2005 y 2010,” Pontificia Universidad Católica del Perú, 2012.



ANEXO 1

Taller participativo “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs”

La planificación del taller participativo “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs” consistió en la definición de los objetivos, revisión de antecedentes, identificación de los stakeholders, y diseño de las actividades a desarrollar durante el taller.

Objetivos

- Difundir las técnicas de reforzamiento propuestas en la Guía de Reforzamiento Sísmico Incremental de Colegios Públicos
- Capacitar a los stakeholders encargados de la planificación, diseño, construcción, mantenimiento y uso de la infraestructura educativa pública sobre la aplicación de métodos multicriterio, BIM y TICs para toma de decisiones más transparentes

Antecedentes

En el 2015, se llevó a cabo el taller “Selección preliminar de tres técnicas de reforzamiento sísmico para el módulo tipo 780-PRE” como parte del proyecto “Propuesta de actualización del Reglamento Nacional de Edificaciones para incorporar el Reforzamiento Incremental en Edificaciones Escolares Tipo 780 construidas antes de 1997” impulsado por el Banco Mundial [114]. El diseño del taller tuvo como objetivo la selección preliminar de tres técnicas de reforzamiento sísmico incremental a través de la aplicación del método multicriterio de toma de decisiones TOPSIS. La valoración de la matriz de toma de decisiones fue realizada por juicio de expertos conformados por investigadores de la PUCP y del CISMID.

A partir de la realización de este taller, se sentaron las bases para la selección de las técnicas de reforzamiento sísmico incremental a través de métodos multicriterio de toma de decisiones. Recientemente, se ha comprobado que la transparencia en la toma de decisiones con respecto a la selección de técnicas de reforzamiento puede ser mejorada sustancialmente mediante la incorporación de herramientas como Modelamiento Digital de la Información (BIM) y Tecnologías de Información y Comunicación (TIC). Bajo esta premisa el Decreto Legislativo N° 1444, propone “la incorporación progresiva de herramientas de modelamiento digital de la información para la ejecución de obra pública” publicado en el Diario Oficial “El Peruano.

Identificación de Stakeholders

La identificación de stakeholders y disciplinas permitió conocer a todos aquellos con un nivel alto de participación en las etapas la gestión de un proyecto de infraestructura educativa pública. Entre ellos, ministerios, instituciones públicas, organismos gubernamentales, comités técnicos, colegios

profesionales, municipalidades, directores de los colegios, profesionales y empresas del sector privado, y académicos. Uno de los principios básicos en la identificación fue el trabajo colaborativo interdisciplinario que promoviera el intercambio de opiniones, visiones y experiencias. Tomando en cuenta que el trabajo conjunto entre Estado, academia e industria es necesario para lograr objetivos mayores como la reducción del riesgo sísmico de la infraestructura educativa pública (ver Tabla 10).

Tabla 10. Identificación de stakeholders

ETAPA	ENTIDAD / INSTITUCIÓN
Planificación	Ministerio de Economía y Finanzas Ministerio de Educación PRONIED – Ministerio de Educación Ministerio de Vivienda Municipalidad de San Juan de Lurigancho Municipalidad de San Juan de Miraflores Municipalidad de Comas
Diseño	SENCICO CISMID Colegio de Ingenieros Colegio de Arquitectos Calculistas estructurales Grupo de investigación PELCAN
Construcción	CAPECO Empresas privadas
Mantenimiento	PRONIED – Ministerio de Educación
Uso	Dirección Regional de Educación de Lima Metropolitana
Gestión del Riesgo de Desastres	Autoridad para la Reconstrucción con Cambios CENEPRED INDECI Acuerdo Nacional

Diseño y estructura del taller

El taller se dividirá en dos sesiones, en la primera sesión se presentará de manera general los temas a abordar durante el taller. En la segunda sesión se coproducirá criterios de decisiones sobre reforzamiento sísmico bajo un enfoque de trabajo colaborativo mediante la conformación de mesas de trabajo. A continuación, se detalla las actividades que comprenderá cada sesión con sus respectivos objetivos, recursos, descripción y resultados esperados.

A. Sesión Plenaria

1. Encuestas de entrada

En el momento del registro de participantes se les entregará la encuesta de entrada para que sea completada antes de comenzar el taller.

2. Palabras de bienvenida e introducción al taller

Dra. Sandra Santa Cruz y Dr. Xavier Brioso

Objetivos:

- Explicar el alcance, los objetivos y la metodología del taller participativo
- Resaltar la participación de los stakeholders en la toma de decisiones sobre infraestructura educativa

Recursos/Materiales:

- Presentación 1: Introducción Taller participativo
- Proyector
- Programa impreso

Descripción:

Los presentadores detallarán el alcance, los objetivos y la metodología del taller participativo. Asimismo, se resaltarán la importancia de cada uno de los stakeholders invitados durante la planificación, diseño, construcción, mantenimiento y uso de la infraestructura educativa pública. Tomando en cuenta, que esto incrementará el interés y facilitará la formación de mesas de trabajo multisectoriales. Se destacará que el éxito del taller dependerá del trabajo colaborativo de los participantes durante las diferentes actividades programadas. Teniendo como pilares el fortalecimiento del aprendizaje mutuo, el enriquecimiento de las propuestas y la obtención de resultados transparentes. Finalmente, a modo de introducción, se mencionarán las herramientas empleadas y sus contribuciones.

Resultado:

- Concientización sobre la relevancia del taller y de su participación en la toma de decisiones sobre infraestructura educativa pública.

3. Presentación de la Guía de Reforzamiento

Arq. Rodrigo Aurelio García-Sayán

Coordinador de Estrategias de Intervenciones - PRONIED MINEDU

Objetivo:

- Difundir la Guía de Reforzamiento Incremental y los avances en su implementación

Recursos:

- Presentación 2: Guía de Reforzamiento Incremental – PRONIED
- Proyector

Descripción:

El presentador presentará la Guía de Reforzamiento Incremental desarrollada como respuesta a los problemas de desempeño sísmico de los edificios típicos educativos peruanos módulos 780-PRE.

Resultados:

- Difusión de las técnicas de reforzamiento sísmico incremental para los módulos 780-PRE.
- Integración y colaboración entre los stakeholders involucrados en la planificación, diseño, construcción, mantenimiento y uso de la infraestructura educativa.

4. Presentación de las técnicas de reforzamiento sísmico incremental de colegios mediante el uso de TICs

Cristina Córdova – PUCP

Objetivos:

- Promover la discusión sobre la creación de soluciones tecnológicas a las necesidades del país
- Mostrar las ventajas del Modelamiento Digital de la Información (BIM) y Realidad Virtual (VR) en la ejecución de obras públicas
- Fomentar las buenas prácticas en el uso de las TICs y la transparencia en la administración pública

Recursos:

- Presentación 3: BIM
- Proyector

- Modelos 3D – Software Revit
- Modelos 4D – Software Navisworks
- Códigos QR – Software Kubity
- Lentes de Realidad Virtual
- Pantallas móviles
- Notebooks
- iPads con aplicaciones instaladas: Kubity Go, Kubity VR, Kubity Mirror

Descripción:

En primer lugar, se realizará una breve presentación sobre las principales contribuciones del Modelamiento Digital de la Información (BIM) en la ejecución de obras públicas. En segundo lugar, se procederá a mostrar los modelos 3D de cada técnica de reforzamiento sísmico incremental generados en el Software Revit. A cada participante se le entregará hojas con los Códigos QR de los modelos 3D en sus diferentes fases (Existente, Demolición, Fase 1, Fase 2) y cortes (cimentaciones, reforzamiento). En los iPads estarán instaladas las aplicaciones: Kubity Go, Kubity VR, Kubity Mirror. El Kubity Mirror permite visualizar los modelos 3D en una pantalla grande mientras es manipulado por un celular. Durante el taller, la opción Mirror será utilizada de manera sincronizada entre las pantallas móviles, que estarán conectadas a las Notebooks, y los iPads. El Kubity VR se visualizará a través de los Lentes de Realidad Virtual usando los iPads.

En tercer lugar, se presentará los procesos constructivos en formato de video usando los modelos 4D obtenidos en el Software Navisworks. Los participantes tendrán una experiencia real dado que podrán detener, avanzar y/o retroceder los videos que se visualizarán en las pantallas móviles. Una de las principales ventajas será incrementar la gestión visual y el flujo de información.

En la misma línea, se explicará la facilidad con la que usando el BIM se obtienen los metrados, destacando la importancia de estos resultados para la elaboración del presupuesto y la obtención de los indicadores de impacto ambiental como la emisión de gases de efecto invernadero y emisión de material particulado.



Figura 31. Códigos QR de las técnicas de reforzamiento sísmico incremental generados en el software Kubity

Resultados:

- Conocimiento de las herramientas y las ventajas del Modelamiento Digital de la Información (BIM) 3D y 4D frente a los métodos tradicionales.
- Visualización e interacción con los modelos 3D de cada técnica de reforzamiento sísmico incremental mediante el uso de TICs: iPads, Realidad Virtual, Lentes de Realidad Virtual.
- Contribución con la incorporación progresiva de herramientas de modelamiento digital de la información para la ejecución de obra pública. En concordancia con el Decreto Legislativo N° 1444 publicado en el Diario Oficial “El Peruano.

5. Presentación de métodos multicriterio para toma de decisiones transparentes: TOPSIS y CBA

Dra. Sandra Santa-Cruz (TOPSIS) y Dr. Xavier Brioso (CBA)

Objetivos:

- Promover el uso de métodos multicriterio de toma de decisiones transparentes
- Explicar los conceptos y las metodologías de los métodos multicriterio seleccionados

Recursos:

- Presentación 4: Métodos Multicriterio de Toma de Decisiones TOPSIS y CBA
- Excel: Hojas de cálculo programadas con los métodos TOPSIS y CBA
- Fichas informativas: Métodos TOPSIS y CBA
- Ficha de trabajo: Ejemplo práctico

Descripción:

En esta presentación, se explicarán los métodos Multicriterio de Toma de Decisiones (MCDM): TOPSIS y CBA, sus diferencias y áreas de uso más comunes. Paralelamente, se entregarán fichas informativas sobre los métodos MCDM a cada participante. Por último, con el fin de validar la comprensión de los métodos se desarrollará un ejemplo práctico.

Resultado:

- Conocimiento y aplicación de los métodos Multicriterio de Toma de Decisiones: TOPSIS y CBA.

B. Sesión de coproducción

Conformación de mesas de trabajo multidisciplinarios y multisectoriales

Facilitadores: *Dra. Sandra Santa Cruz, Dr. Xavier Brioso, Mg. Antonio Zeballos e Ing. Cristina Córdova*

6. Debate y discusión sobre los objetivos y criterios de la toma de decisiones

Objetivos:

- Mostrar los objetivos de las técnicas de reforzamiento sísmico incremental
- Coproducir la matriz de toma de decisiones para el reforzamiento de edificaciones educativas públicas
- Promover la identificación de un criterio de decisión asociado a la transparencia

Recursos/Materiales:

- Pregunta de entrada 1: Plataforma Poll Everywhere
- iPads/Notebooks con la aplicación instalada Poll Everywhere
- Pizarras movibles
- Papelógrafos
- Post-it
- Plumones

Descripción:

- Discusión 1

Pregunta de entrada: ¿Cuáles son los criterios de decisión que deberían ser considerados en la selección de técnicas de reforzamiento sísmico? (Responda con una palabra)

La respuesta a esta pregunta se realizará mediante la plataforma virtual Poll Everywhere. Previamente, los facilitadores crearán una sesión para esta pregunta escogiendo la opción Word Cloud que permite proyectar los resultados en la pantalla en forma de una nube destacando las opciones más repetitivas.

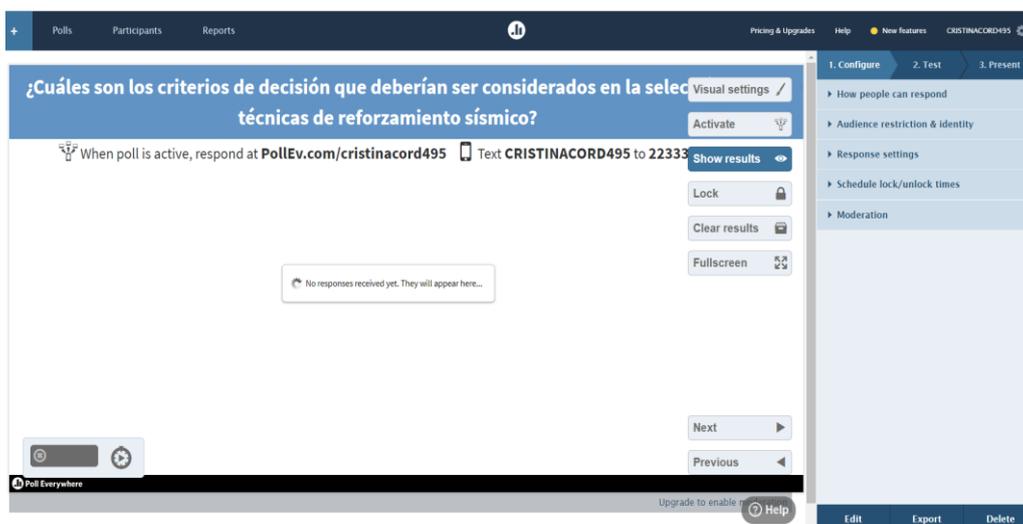


Figura 32. Pregunta de discusión generada en la plataforma digital Poll Everywhere

Al iniciar la discusión, se les entregará una ficha con el “Nombre de la sesión” de manera que los participantes ingresen a la aplicación Poll Everywhere instaladas en los iPads/Notebooks con el fin de responder a la Pregunta de entrada 1. Las respuestas se proyectarán en tiempo real en una presentación en Power Point.

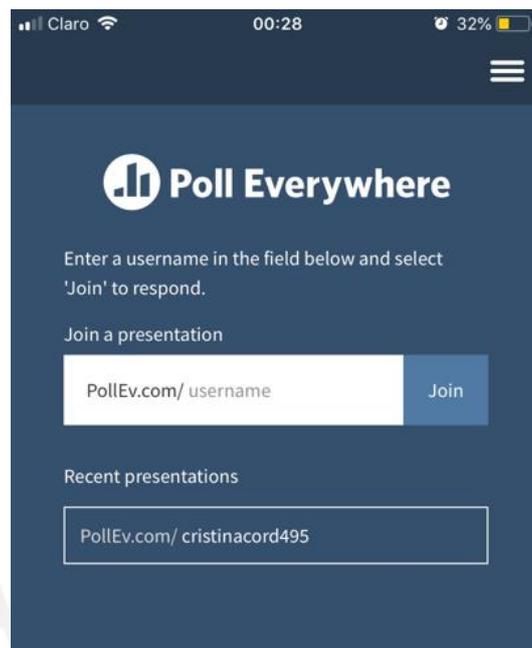


Figura 33. Interfaz de la plataforma Poll Everywhere

Después de ello, los participantes comenzarán a discutir sobre las propuestas. Todas las ideas se plasmarán en los papelógrafos. Los facilitadores moderarán la discusión y tomarán notas.

Resultado:

Coproducción de la matriz de toma de decisiones para el reforzamiento de edificaciones educativas públicas.

Discusión 2

Pregunta de entrada: ¿Cómo usted considera que se podría medir el nivel de transparencia en un proyecto de construcción?

Los participantes discutirán sobre las posibles formas de medir la corrupción en los procesos constructivos a partir de su experiencia. Todas las propuestas o posibles soluciones se anotarán en los papelógrafos.

Resultado:

- Definición del criterio de decisión asociado a la transparencia de los procesos constructivos a través de los conceptos de optimización de procesos.

7. Selección de técnica de reforzamiento sísmico incremental de colegios mediante el uso de los métodos multicriterio, BIM y TICs

Objetivo:

- Aplicar los métodos multicriterio de toma de decisiones TOPSIS y CBA para la selección la técnica de reforzamiento sísmico incremental más transparente

Recursos/Materiales:

- Presentación 5: Matriz de toma de decisiones para el reforzamiento de edificaciones educativas públicas
- Ficha informativa: Matriz de toma de decisiones
- Excel: Hojas de cálculo programadas con los métodos MCDM: TOPSIS y CBA
- iPads/Notebooks con Microsoft Office instalados
- Laptop central

Descripción:

En primer lugar, los facilitadores presentarán la matriz de toma de decisiones producto de las propuestas de la actividad anterior con la recopilación de la revisión de la literatura. A cada participante, se les entregará la ficha con la matriz.

En segundo lugar, los criterios de decisión: Costo de ejecución, Tiempo de ejecución, Factibilidad de la construcción y Análisis de Ciclo de Vida tendrán sus indicadores cuantitativos respectivos. Brevemente, se explicará cómo se obtuvieron dichos valores.

Finalmente, siguiendo los pasos de cada método MCDM explicado en la Actividad 5, los participantes procederán a colocar sus valoraciones y puntuaciones usando los formatos programados en Excel que se encontrarán disponibles en los iPads/Notebooks. De manera sincronizada, todas las respuestas serán recopiladas en la computadora central de cada facilitador con el propósito de promedia todos los valores y obtener la técnica de reforzamiento más transparente.

Resultado:

- Selección de la técnica de reforzamiento sísmico incremental más transparente usando ambos métodos MCDM de acuerdo a los criterios establecidos.

8. Reflexiones finales

9. Encuesta de Salida

ANEXO 1: Taller Participativo

Al culminar el taller, se entregará a cada participante la encuesta de salida para que sea completada antes de retirarse.

Programa

Sesión plenaria Aula Polivalente A-100	
8:45 - 9:00	Registro de participantes – Encuestas de entrada
9:00 - 9:15	Palabras de bienvenida e Introducción al taller - PUCP
9:15 - 9:45	Presentación de la Guía de Reforzamiento – PRONIED MINEDU
10:00 – 10:30	Presentación de métodos multicriterio para toma de decisiones transparentes – PUCP
10:30 - 11:00	Presentación de las técnicas de reforzamiento sísmico incremental de colegios mediante el uso de TICs - PUCP
11:00 – 11:15	Sesión de preguntas
Mesas de trabajo Sala UNO	
11:15 – 11:30	Traslado a la Sala UNO
11:30 – 12:00	Recorrido virtual
12:00 – 13:30	Almuerzo en el comedor Central - PUCP
13:30 - 14:30	Actividad: Debate y discusión sobre los objetivos y criterios de la toma de decisiones
14:30 - 16:00	Selección de técnica de reforzamiento sísmico incremental de colegios mediante el uso de los métodos multicriterio, BIM y TICs
Sesión plenaria Sala UNO	
16:00 – 16:30	Coffee Break – Recorrido virtual
16:30 - 17:00	Reflexiones finales – Encuestas de salida

Fotos del Taller Participativo

En las siguientes figuras se muestran algunas fotos del Taller participativo “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs” realizado en la PUCP.



Figura 34. Banner del taller participativo



Figura 35. Foto taller participativo – Sesión de coproducción 1



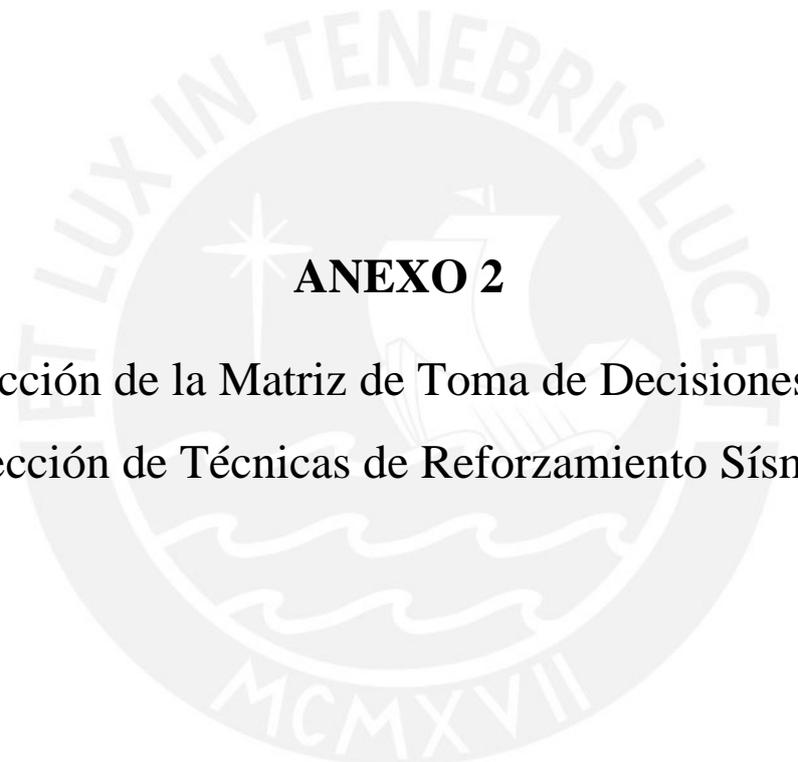
Figura 36. Foto taller participativo – Sesión de coproducción 2



Figura 37. Foto taller participativo – Aplicación de los métodos TOPSIS y CBA

Sesión de coproducción: Brainstorming online

La actividad introductoria a la sesión de coproducción fue el *brainstorming online* o lluvia de ideas, debido a que se utilizó tecnologías de información y comunicación (TIC), como iPads y laptops. La actividad consistió en responder con una sola palabra a la pregunta ¿Cuáles son los criterios de decisión que deberían ser considerados en la selección de técnicas de reforzamiento sísmico? ingresando a la aplicación Poll Everywhere instalada en los iPads. En la Figura 38 se muestra las respuestas de los participantes.



ANEXO 2

Construcción de la Matriz de Toma de Decisiones para la
Selección de Técnicas de Reforzamiento Sísmico

SIMULACIÓN 4D DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LAS TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO SÍSMICO INCREMENTAL

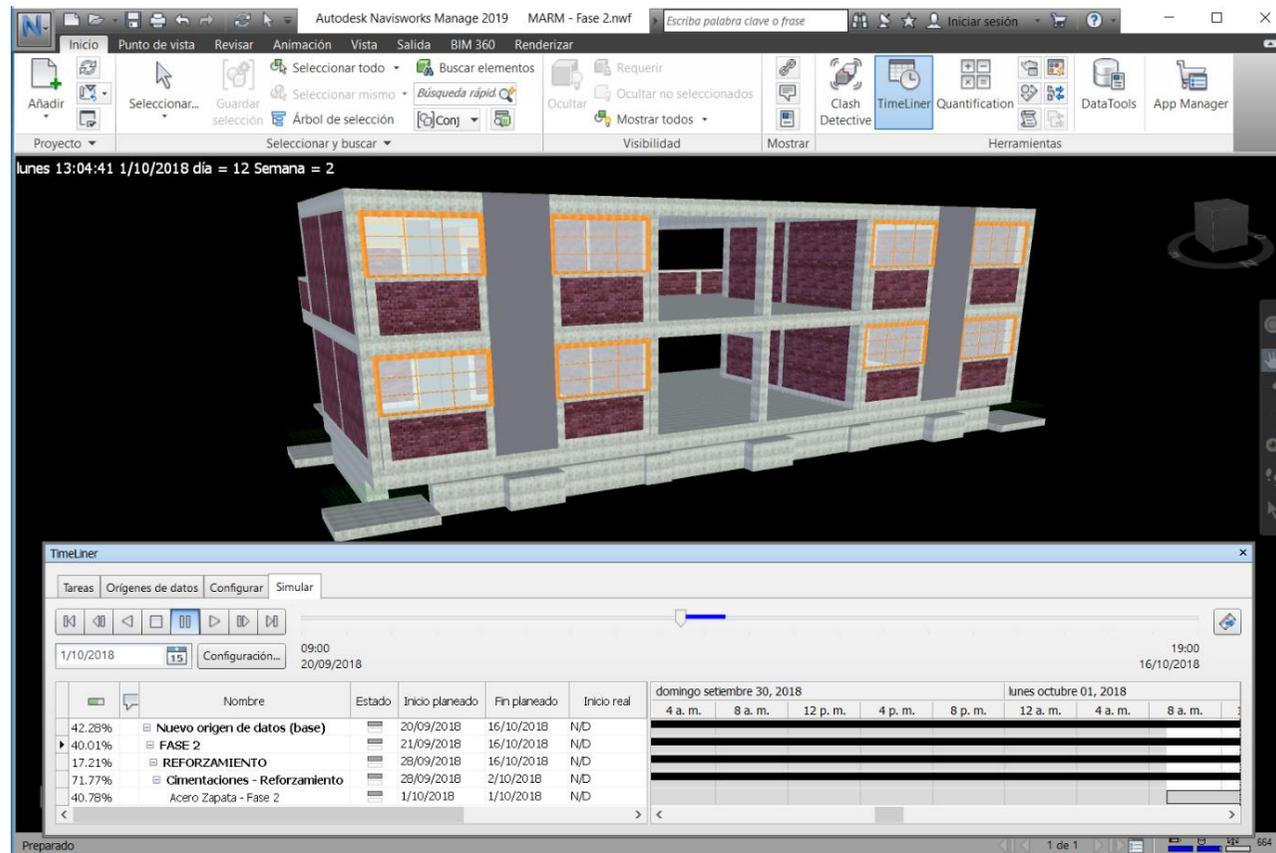


Figura 39. Modelo 4D: Modelo 3D + programación de la técnica de reforzamiento sísmico MARM-Fase 2 (Autodesk® Naviswork™)

ANEXO 2: Construcción de la Matriz de Toma de Decisiones

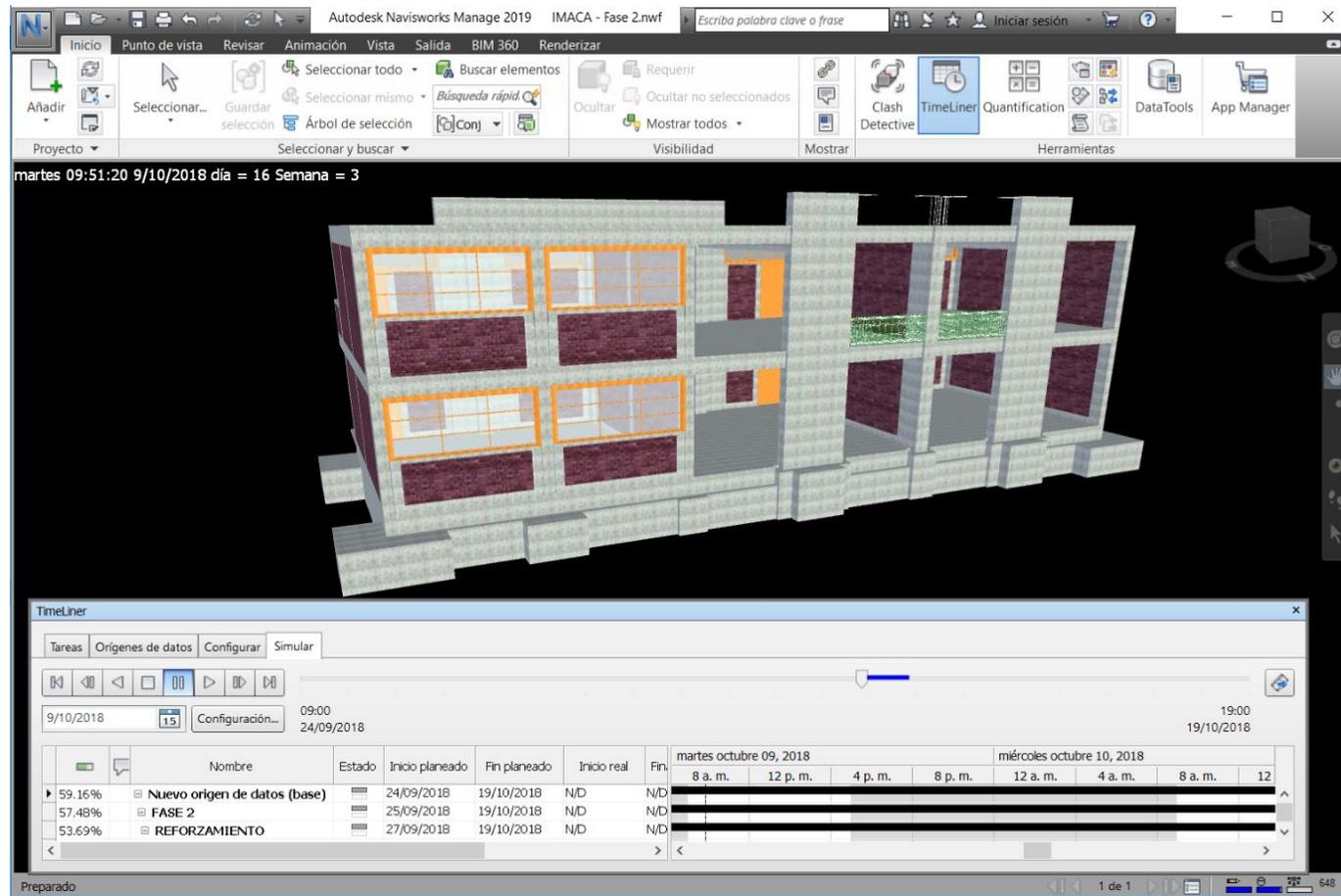


Figura 40. Modelo 4D: Modelo 3D + programación de la técnica de reforzamiento sísmico IMACA-Fase 2 (Autodesk® Naviswork™)

ANEXO 2: Construcción de la Matriz de Toma de Decisiones

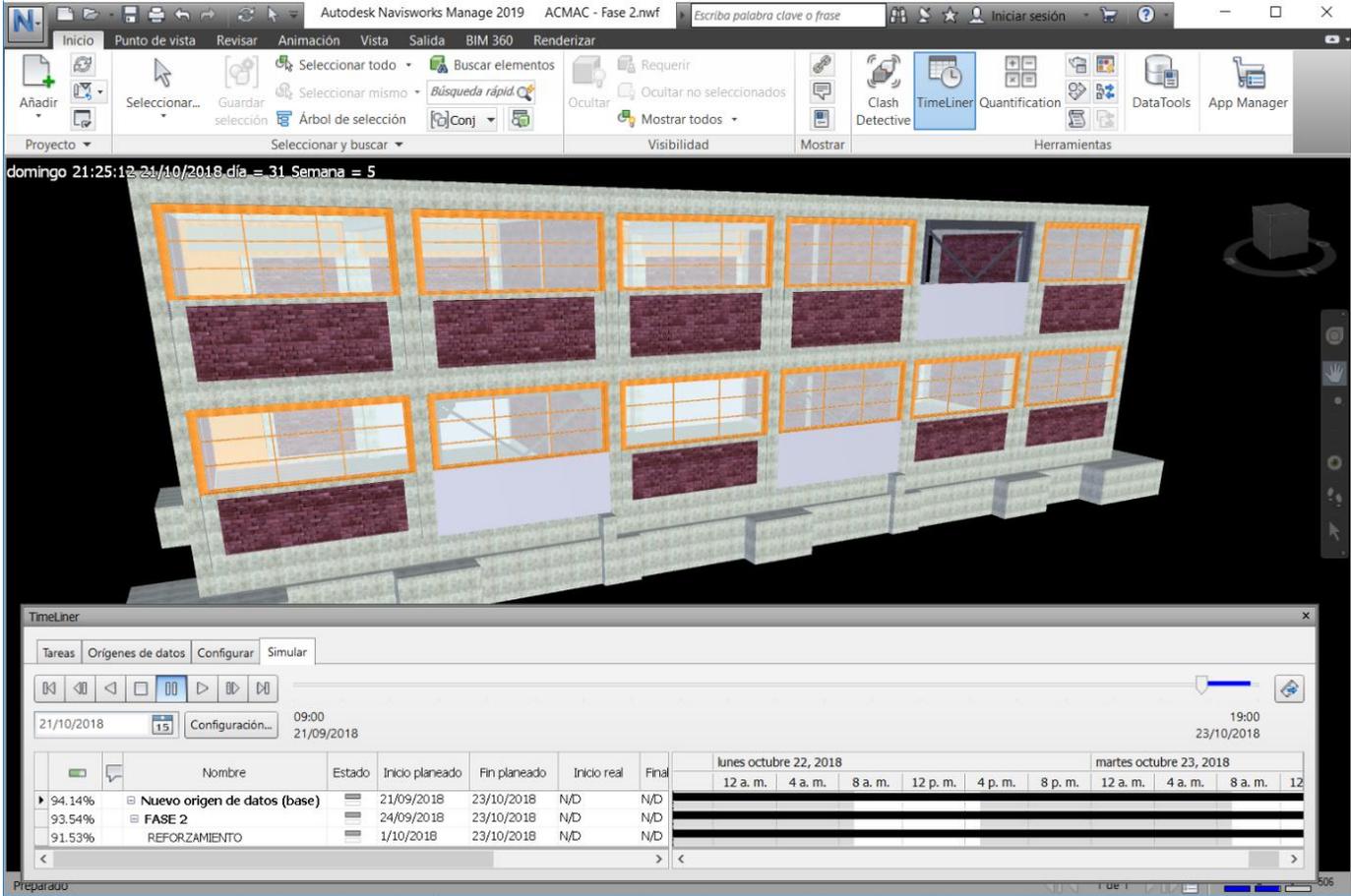
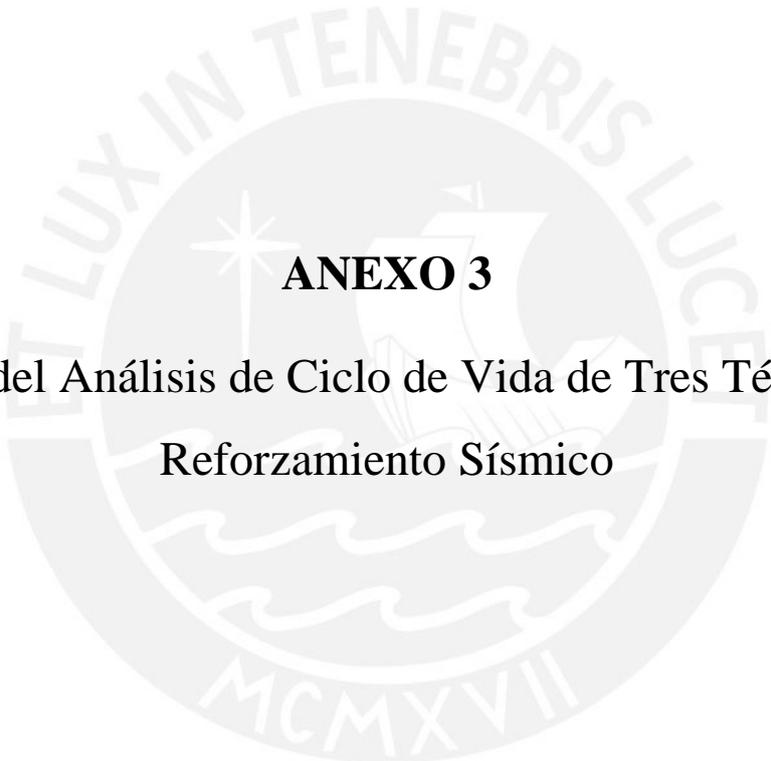


Figura 41. Modelo 4D: Modelo 3D + programación de la técnica de reforzamiento sísmico ACMAC-Fase 2 (Autodesk® Naviswork™)

INDICADORES DE GRADO DE MODULACIÓN, GRADO DE ESTANDARIZACIÓN Y NIVEL DE INDUSTRIALIZACIÓN (Formato adaptado de Orihuela & Orihuela, 2008)

UNIDADES ESTRUCTURALES		DISEÑO / CONSTRUCCIÓN								CONSTRUCCIÓN									
		MODULACIÓN				ESTANDARIZACIÓN				INDUSTRIALIZACIÓN									
		N° Dimensiones	N° Dimensiones Modulares	% de Modulación	Calificación	N° Unidades Totales	N° Tipos	Cantidades de cada tipo	% de Estandarización	Calificación	Construcción In Situ Tradicional	Construcción In Situ Optimizada	Construcción In Situ Tecnificada	Construcción Parcialmente Prefabricada In Situ	Construcción Parcialmente Prefabricada en Fábrica	Construcción Ampliamente Industrializada	% de Industrialización	Calificación	
0	1	4	9	16	25														
MARM	Zapatas	3	3	100%	78%	4	1	4	100%	60%		1					1%	1%	
	Columnetas	9	9	100%		72	3	24,24,24	37%			1							1%
	Vigas	6	4	67%		24	2	12,12	55%			1							1%
	Muros	14	10	71%		48	7	24,6,6,3,3,3,3	51%			1							1%
	Ventanas	4	2	50%		24	2	12,12	55%			1							1%
IMACA	Zapatas	9	9	100%	90%	12	3	4,4,4	37%	51%			4				4%	4%	
	Vigas	9	7	78%		24	3	8,8,8	37%				4						4%
	Columnetas	12	12	100%		32	4	12,12,4,4	41%				4						4%
	Columnas	3	3	100%		4	1	4	100%				4						4%
	Placas	3	3	100%		4	1	4	100%				4						4%
	Muros	14	7	50%		16	7	4,2,2,2,2,2,2	13%				4						4%
	Ventanas	8	8	100%		16	4	4,4,4,4	28%				4						4%
ACMAC	Zapatas	3	3	100%	100%	4	1	4	100%	100%					16		16%	16%	
	Marcos	2	2	100%		24	1	24	100%						16		16%		
	Perfiles	2	2	100%		6	1	6	100%						16		16%		
	Drywall	2	2	100%		6	1	6	100%						16		16%		



ANEXO 3

Reporte del Análisis de Ciclo de Vida de Tres Técnicas de
Reforzamiento Sísmico

FASE 1: DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo fue analizar y cuantificar los impactos ambientales de tres técnicas propuestas para el reforzamiento sísmico de colegios públicos peruanos durante las etapas de demolición y reforzamiento. La unidad funcional escogida para el estudio fue un colegio sistema módulo 780-PRE. Por consiguiente, todos los flujos de entrada, de salida y energía estuvieron referidos a esta unidad. La Figura 42 muestra los límites del sistema para cada una de las etapas comprendidas en el caso de estudio. En cada una de ellas solo se considerarán los procesos unitarios más relevantes para el análisis. Por ejemplo, en la etapa de demolición: demolición manual, demolición con maquinaria pesada y transporte de escombros, mientras que en la etapa de reforzamiento: producción de materiales, transporte de materiales de fábrica al proyecto, y reforzamiento del colegio.

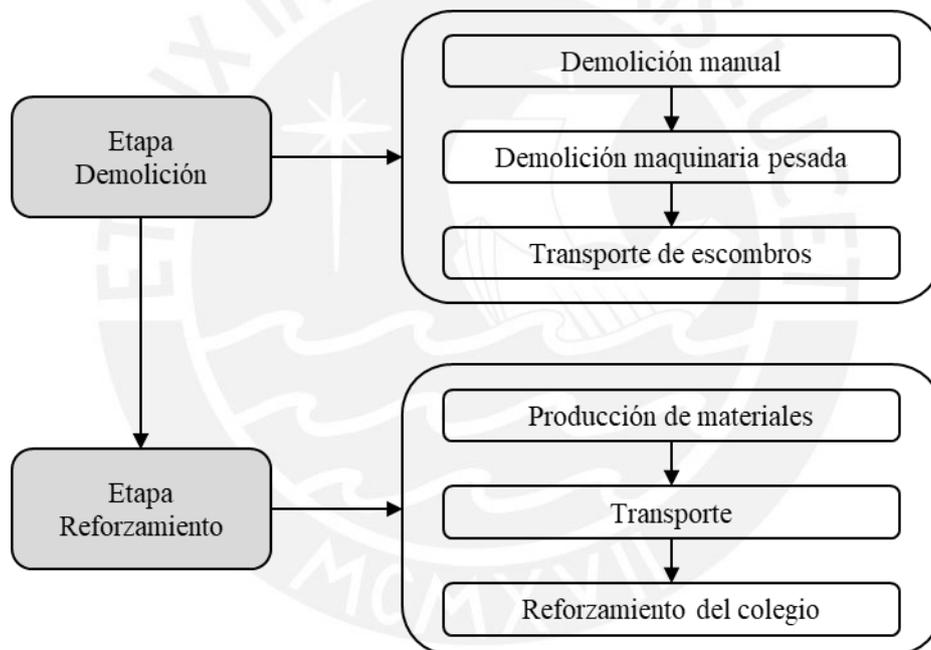


Figura 42. Límites del sistema ACV del estudio

Un aspecto importante a considerar fue la calidad de los datos utilizados dentro del sistema. Todos los datos listados en el inventario de ciclo de vida (LCI) fueron obtenidos de la cuantificación de los modelos BIM 3D de cada una de las técnicas de reforzamiento sísmico. Una de las ventajas de los modelos BIM es la precisión y exactitud de la información otorgada. La herramienta utilizada para la cuantificación de los impactos del ciclo de vida fue el software SimaPro [119].

FASE 2: INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

Tomando en cuenta que los resultados del inventario son insumos para las siguientes fases es importante verificar la calidad y precisión de la información. Las etapas de demolición y reforzamiento del sistema son evaluadas independientemente.

(1) Etapa de demolición

Los datos para el análisis ambiental en la etapa de demolición fueron obtenidos de los modelos BIM 3D y otros datos como emisiones de partículas fueron modelados siguiendo lineamientos de estándares internacionales. La duración de la demolición varía según cada técnica de reforzamiento, considerando que la jornada laboral fue de 8 horas. El procedimiento propuesto en la tesis de Aguilar & Loo (2017) fue tomado como referencia.

El primer paso consistió en la cuantificación de la cantidad de escombros generados en la demolición de acuerdo a las especificaciones de las técnicas de reforzamiento. En la Tabla 11 se muestra las cantidades de escombros, información que fue obtenida de los modelos BIM 3D.

Tabla 11. Cantidad de escombros generados en la demolición

Técnica de reforzamiento	Volumen demolición (m ³)	Volumen demolición (t)
MARM	23.3	49.2
IMACA	27.5	60.8
ACMAC	12.3	27.3

El siguiente paso fue el modelamiento del transporte de escombros representado por los kilómetros recorridos durante el traslado entre los puntos de referencia. A partir de esta información fue posible calcular (1) las emisiones de material particulado cuando la tolva estaba cargada totalmente, y (2) el consumo de combustible cuando la tolva estaba vacía.

Respecto a los puntos de referencia, estos fueron el colegio sistema modular 780-PRE, ubicado en Jr. Quillabamba 281, San Juan de Lurigancho, el depósito de Volquetes Maquinarias S.A., ubicado en alameda sur Mz. H-1 lote 22 Urb. Villa Marina, Chorrillos, y el centro de disposición final Arenera San Martín, ubicado en Av. Monteverde 197, Ate. Estos dos últimos puntos fueron tomados de la tesis de Aguilar & Loo (2017). En la Figura 43 se muestra un mapa con la locación de los tres puntos de referencia generados en Google Maps con el propósito de obtener las distancias y el tiempo de viaje entre ellos.

Transporte de demolición

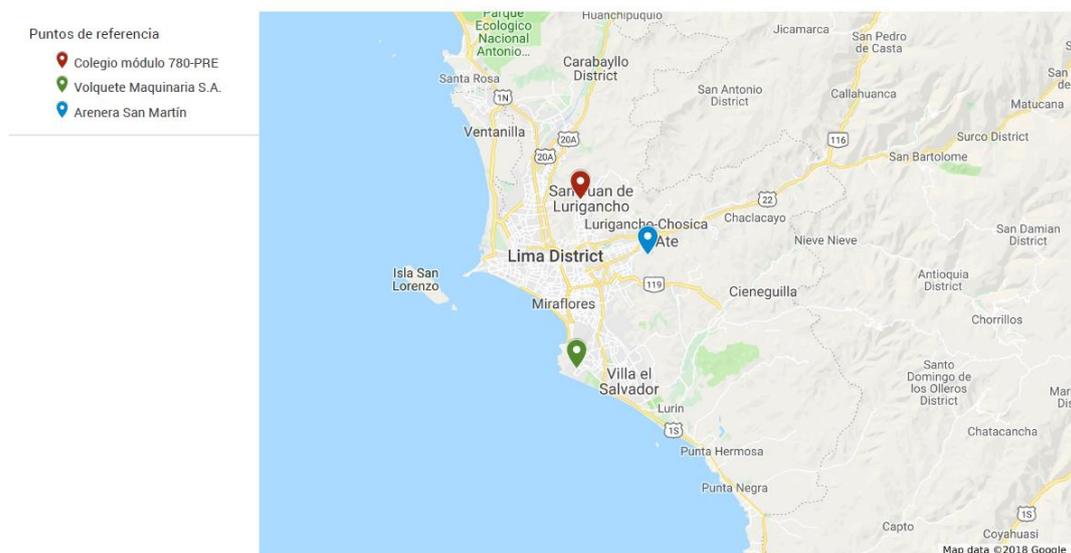


Figura 43. Mapa 1: Transporte de escombros de demolición (Google Maps)

Con la información del volumen de demolición y capacidad del volquete se procedió a calcular los viajes teóricos como la relación de estos valores. Los viajes cargados por día fueron calculados mediante la división de los viajes teóricos y el tiempo de la eliminación, como no es posible realizar una fracción de viaje el número resultante fue redondeado hacia el valor mayor. Finalmente, los viajes cargados totales fueron los viajes teóricos reales durante los días de eliminación de escombros. En la Tabla 12 se muestran los resultados finales.

Tabla 12. Cálculo de los viajes teóricos

Descripción	Unidad	MARM	IMACA	ACMAC
		Cantidad		
Volumen demolición	m ³ /volquete	34.9	41.3	18.5
Capacidad por cada volquete	m ³ /volquete	6	6	6
Viajes teóricos	viajes	6	7	4
Duración de la eliminación de escombros	días	4	2	2
Viajes cargados cada día	viajes/día	1.5	3.5	2
Viajes cargados totales	viajes	8	8	4

A continuación, se procedió a calcular el tiempo usado en el transporte de escombros durante la demolición. Este valor resulta importante para el cálculo del consumo de combustible de la maquinaria pesada (ver Tabla 12). Las horas laborables para los volquetes fueron 7 horas que corresponde al tiempo de traslado exclusivo de material. Los volquetes por día son equivalentes a los viajes teóricos de la tabla anterior. Tomando en cuenta que los volúmenes de demolición son pequeños se consideró que los

ANEXO 3: Análisis de Ciclo de Vida

volquetes solo hacen un carguío. A partir de esta información se calculó los viajes diarios entre los tres puntos de referencia, tomando en cuenta que los volquetes salen una sola vez de cada punto, es decir, no regresan. Asimismo, los viajes totales como el producto del número de días de demolición por los viajes diarios. La distancia entre cada punto de referencia fue multiplicada por el número de viajes totales dando como resultado los kilómetros recorridos durante la eliminación de escombros. Finalmente, para obtener el tiempo total se multiplicó la cantidad de viajes totales por el tiempo requerido por un viaje. Los resultados finales se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Cálculo del tiempo usado en el transporte de los escombros de la demolición

Descripción	Unidad	MARM	IMACA	ACMAC
		Cantidad		
Horas laborales diarias por volquete	hrs/día/volquete	7	7	7
Volquetes/día	volq/día	2	4	2
Volquetes que hacen 1 carguío	volq/día	2	4	2
Viajes diarios entre colegio SJL y Arenera San Martín	viajes/día	2	4	2
Viajes diarios entre colegio SJL y depósito	viajes/día	2	4	2
Viajes diarios entre Arenera San Martín y depósito	viajes/día	2	4	2
Viajes totales entre colegio SJL y Arenera San Martín	viajes	8	8	4
Viajes totales entre colegio SJL y depósito	viajes	8	8	4
Viajes totales entre Arenera San Martín y depósito	viajes	8	8	4
Distancia del colegio SJL a Arenera San Martín	km	24.1	24.1	24.1
Distancia del colegio SJL a depósito	km	36.8	36.8	36.8
Distancia de Arenera San Martín a depósito	km	32.0	32.0	32.0
Kilometros recorridos cargados	km	192.8	192.8	96.4
Kilómetros recorridos sin carga	km	550.4	550.4	275.2
Kilometros recorridos totales	km	743.2	743.2	371.6
Tiempo total	horas	31.0	31.0	15.5

El tercer paso fue el cálculo de las emisiones por fabricación representado por la fracción de tiempo de vida útil de las maquinarias pesadas y equipos menores durante la etapa de demolición. La jornada laboral considerada fue de ocho horas. En las Tabla 14 y Tabla 15 se presenta como resultado la fracción de tiempo de vida de las maquinarias pesadas y los equipos menores empleados durante la demolición, respectivamente. Este resultado fue obtenido de la división entre el tiempo total usado en la eliminación de escombros (maquinaria pesada) y el tiempo durante la etapa de demolición (equipos menores) y el

tiempo de vida de la maquinaria y/o equipo. Esto último fue obtenido de la Cámara Peruana de la Construcción (Salazar, 2011).

Tabla 14. Fracción de tiempo de vida útil de las maquinarias pesadas respecto a la unidad funcional

Técnica de reforzamiento	Maquinaria	Horas en demolición(hrs)	Tiempo de vida de la maquinaria (hrs)	Fracción de tiempo de vida
MARM	Volquete	62	6900	8.99E-03
IMACA	Volquete	124	6900	1.80E-02
ACMAC	Volquete	32	6900	4.64E-03

Tabla 15. Fracción de tiempo de vida útil de los equipos menores respecto a la unidad funcional

Técnica de reforzamiento	Equipo	Horas en demolición(hrs)	Tiempo de vida de la maquinaria (hrs)	Fracción de tiempo de vida
MARM	Martillo demoledor	146.08	3000	4.87E-02
	Amoladora	146.08	10000	1.46E-02
IMACA	Martillo demoledor	185.92	3000	6.20E-02
	Amoladora	185.92	10000	1.86E-02
ACMAC	Martillo demoledor	119.52	3000	3.98E-02
	Amoladora	119.52	10000	1.20E-02

A continuación, se calculó el consumo de combustible de la maquinaria pesada con la cantidad de horas empleadas por los volquetes durante el traslado de los escombros (ver Tabla 16). Seguidamente, el consumo de energía eléctrica de los equipos menores con la potencia absorbida de cada uno durante la demolición (ver Tabla 17).

Tabla 16. Consumo de combustible de maquinaria pesada

Técnica de reforzamiento	Equipo	Factor (Gal/hora)	Total (galones)	Total (litros)	Total (kg)
MARM	Camión Volquete 4x2	5.59	173	655	544
IMACA	Camión Volquete 4x2	5.59	173	655	544
ACMAC	Camión Volquete 4x2	5.59	87	328	272

Tabla 17. Consumo de energía eléctrica de equipos menores

Técnica de reforzamiento	Equipo	Potencia absorbida (kW)	Horas totales (horas)	Consumo (kW.h)
MARM	Martillo Eléctrico de 24kg	1.60	176	282
	Martillo Neumático de 29Kg	2.00	176	352
	Compresora Neumática 93 HP 335-375 PCM	69.35	176	12206
	Amoladora	2.60	176	458
IMACA	Martillo Eléctrico de 24kg	1.60	224	358
	Martillo Neumático de 29Kg	2.00	224	448
	Compresora Neumática 93 HP 335-375 PCM	69.35	224	15534
	Amoladora	2.60	224	582
ACMAC	Martillo Eléctrico de 24kg	1.60	144	230
	Martillo Neumático de 29Kg	2.00	144	288
	Compresora Neumática 93 HP 335-375 PCM	69.35	144	9986
	Amoladora	2.60	144	374

Por último, se realizó el modelado de las emisiones de material particulado del proceso de demolición de escombros. El procedimiento propuesto por Aguilar & Loo (2017) fue seguido paso a paso para calcular las emisiones de cuatro actividades que generan polvo en la fase de demolición según la *Environmental Protection Agency* (EPA), entre ellas la demolición de la estructura, limpieza de terreno, carga y descarga de escombros dentro de volquetes, y transporte de escombros. Como parte del procedimiento, se adoptaron los lineamientos de la *California Emission Estimator Model (CalEEMod)*, cuya base de datos de referencia es la *AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, compilación principal de factores de emisión de la EPA.

- **Demolición de la estructura**

Los factores de emisión directos de la demolición de una estructura fueron calculados con la ecuación de la *AP-42* para operaciones de carga y descarga de material de un volquete [83].

$$EF_D = k * (0.0032) * \frac{\left(\frac{U}{5}\right)^{1.3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1.4}}$$

Ecuación 0.1

Donde:

EF_D = factor de emisión (lb PM/tonelada de escombros)

$EF_{D-PM_{10}}$ = 1.10E-03 lb PM10/ tonelada de escombros

$EF_{D-PM_{2.5}}$ = 1.7E-04 lb PM2.5/ tonelada de escombros

k = multiplicador de tamaño de partícula. Por defecto PM10 = 0.35 y PM2.5 = 0.053 (AP-42)

U = velocidad media del viento, valor predeterminado 5 m/s

M = contenido de humedad promedio del material, valor predeterminado 2%

De esta manera, las emisiones totales de la demolición de la estructura fueron obtenidas de la multiplicación de los factores de emisión por la cantidad total de escombros utilizando la siguiente relación:

$$E_D = EF_D \times W$$

Ecuación 0.2

Donde:

E_D = emisiones (lb de PM)

EF_D = factor de emisión (lb PM/tonelada de escombros)

W = desperdicio de la edificación (tonelada de escombros)

- **Carga y descarga de escombros**

CalEEMod ofrece un método simplificado como resultado de la combinación del documento de EPA y la compilación AP-42, añadiendo el valor del factor de emisión de las Partículas Suspensas Totales (PST) mediante la siguiente relación:

$$EF_L = k * EF_{L-TSP}$$

Ecuación 0.3

Donde:

EF_L = factor de emisión (lb PM/tonelada de escombros)

k = multiplicador por tamaño de partícula. Valores por defecto para PM10 de 0.35 y para PM2.5 de 0.053 (AP-42)

EF_{L-TSP} = 0.58 lb/ton (valor predeterminado)

De esta manera, las emisiones de carga/descarga de escombros en volquete se obtienen con la siguiente ecuación:

$$E_L = EF_L * SF * 0.046 \left(\frac{ton}{ft^2} \right)$$

Ecuación 0.4

Donde:

E_L = emisiones (lb)

EF_L = factor de emisión (lb/ton)

SF = metros cuadrados de construcción

Empleando el método de las tablas de Pacheco-Torgal et al. la ecuación final será la siguiente:

$$E_L = EF_L * \text{Peso de desperdicio}$$

Ecuación 0.5

- **Transporte de escombros**

El factor de emisión del transporte de escombros fue determinado con la expresión descrita en el AP-42 para caminos pavimentados:

$$E = k * (sL)^{0.91} * W^{1.02}$$

Ecuación 0.6

Donde:

E = factor de emisión de material particulado

k = factor multiplicador según tamaño de partículas

sL = carga de limos presente en el camino (en gramos por metro cuadrado)

W = peso promedio de los vehículos que transitan por el camino (toneladas)

Los valores del factor multiplicador según tamaño de partículas se muestran en la Tabla 18. Respecto al valor de sL, este también está relacionado con el número de vehículos según la EPA. Por tal motivo, el valor asumido fue de 0.06 gramos por metro cuadrado que corresponde a vías donde transitan de 5000 a 10000 vehículos, que corresponde a las zonas por donde transitarán los volquetes al ir del colegio (San Juan de Lurigancho) hasta la arenera (Vitarte). Por otro lado, el análisis se realizó para el vehículo vacío y con carga, en ambos casos el peso fijo es del volquete que es de 15 toneladas, pero con carga se le sumó el volumen de la demolición dependiendo de la técnica.

Tabla 18. Factor multiplicador k

Tamaño de material particulado	Multiplicador k (g/VKTa)
PM - 2.5	0.15
PM - 10	0.62

En la Tabla 19 se muestra los resultados de las emisiones de material particulado PM 2.5 y PM 10 para las fases de demolición de la estructura, carga y descarga de escombros, y transporte de escombros para vehículos cargados y vehículos vacíos.

Tabla 19. Emisiones de material particulado

Técnica de reforzamiento	Fases del sistema	Emisión PM 2.5 (kg)	Emisión PM 10 (kg)
MARM	Demolición de la estructura	3.79E-03	2.45E-02
	Carga/Descarga de escombros	6.86E-02	4.53E-01
	Emisiones totales (kg)	7.23E-02	4.77E-01
IMACA	Demolición de la estructura	4.69E-03	3.04E-02
	Carga/Descarga de escombros	8.48E-02	5.60E-01
	Emisiones totales (kg)	8.95E-02	5.90E-01
ACMAC	Demolición de la estructura	2.10E-03	1.36E-02
	Carga/Descarga de escombros	3.80E-02	2.51E-01
	Emisiones totales (kg)	4.01E-02	2.65E-01
Transporte de escombros			
	Vehículo cargado	1.84E-01	7.59E-01
	Vehículo vacío	4.10E-01	1.70E+00
	Emisiones totales (kg)	5.94E-01	2.45E+00

(2) Etapa de reforzamiento

Los datos como las cantidades requeridas de materiales de construcción para el análisis ambiental fueron obtenidos de los modelos BIM 3D de las técnicas de reforzamiento y se encuentran resumidas en la Tabla 20. Las unidades de las cantidades fueron seleccionadas tomando como referencia lo establecido en la base de datos ReCiPe.

Tabla 20. Cantidad de materiales requerida por técnica de reforzamiento

Técnica de Reforzamiento		MARM	IMACA	ACMAC
Material	Unidad	Cantidad	Cantidad	Cantidad
Concreto	m ³	23	66	23
Ladrillo	kg	11464	4043	394
Acero estructural	kg	1375	3870	34453
Vidrio	kg	191	105	6
Madera	kg	3041	3892	445
Agua	kg	100926	12094	6122

Además de tomar en cuenta la producción de materiales de construcción, se analizó el impacto del transporte de la fábrica al sitio de obra representado por el colegio sistema modular 780-PRE. De acuerdo a la Tabla 20, los materiales de construcción predominantes en las técnicas de reforzamiento fueron concreto, ladrillo y acero estructural. Por esta razón, las empresas proveedoras seleccionadas fueron UNICON, Ladrillos Lark y Aceros Arequipa, respectivamente. Estos puntos de referencia fueron ubicados en Google Maps, generando el mapa de la Figura 44, que permitió obtener las distancias recorridas entre estos puntos respecto al colegio, que se detalla en la Tabla 21.

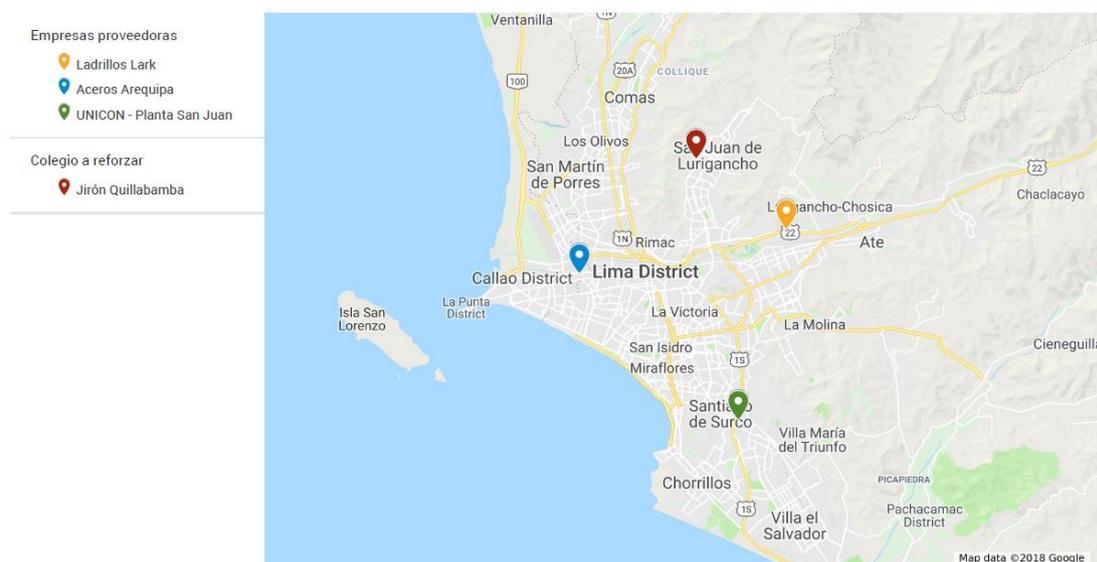


Figura 44. Mapa del transporte de materiales de construcción

Tabla 21. Cálculo de distancias recorridas

Puntos de referencia	Unidad	Distancia ida y vuelta		
		UNICON	Ladrillos Lark	Aceros Arequipa
Módulo 780-PRE - San Juan de Lurigancho	km	47.2	29	34.7

FASES 3 Y 4: ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

El análisis del impacto del ciclo de vida y la interpretación de los resultados se realizará en tres bloques, las dos primeras relacionadas a la categoría de impacto midpoint: cambio climático y emisiones de material particulado y, la última, categoría de impacto endpoint: daño en la salud humana.

(1) Categoría de impacto midpoint: Cambio climático

La Tabla 22 muestra los resultados de las emisiones de CO₂ equivalente (kg CO₂ .eq) de las etapas de demolición y reforzamiento para las tres técnicas de reforzamiento sísmico de acuerdo al método IPCC GWP₁₀₀. Como se esperaba, en la etapa de demolición, las emisiones de gases de efecto invernadero son directamente proporcionales al volumen de demolición de cada técnica. Tal es así que la técnica con menores emisiones fue ACMAC, seguido por MARM, luego por IMACA.

Por otro lado, en la etapa de reforzamiento los procesos unitarios analizados están vinculados con el ciclo de vida de los materiales de construcción predominantes de cada técnica. De esta manera, la técnica con mayores emisiones fue ACMAC, seguido por IMACA y, por último, MARM. Estos resultados demuestran que el acero, material de construcción característico de la técnica ACMAC, genera mayores impactos ambientales negativos que otros materiales como concreto (IMACA) y ladrillo (MARM).

Tabla 22. Emisiones de CO₂ equivalente de acuerdo al método IPCC GWP₁₀₀ de las tres técnicas de reforzamiento

IPCC GWP ₁₀₀	Etap Demolición	Etap Reforzamiento	Demolición + Reforzamiento
Emisiones de CO₂ equivalente	kg CO ₂ .eq	kg CO ₂ .eq	kg CO ₂ .eq
MARM	7,077	16,466	24,063
IMACA	8,650	37,094	47,123
ACMAC	4,675	83,643	99,680

Asimismo, en la Tabla 22 se presentan los resultados del sistema de estudio completo comprendido por las etapas de demolición y reforzamiento. La técnica ACMAC produce las emisiones de CO₂ equivalente más altas (99,680 kg CO₂.eq) y la técnica MARM las más bajas (24,063 kg CO₂.eq). Al respecto, en la Figura 45 se compara las contribuciones de cada una de las etapas en las emisiones de CO₂ equivalente. Por ejemplo, el impacto de la etapa de demolición es relativamente bajo, variando de 5% del impacto total de la técnica ACMAC a un 29% de la técnica MARM. Sin embargo, los impactos negativos de la etapa de reforzamiento superan el 68% de emisiones en las tres técnicas.

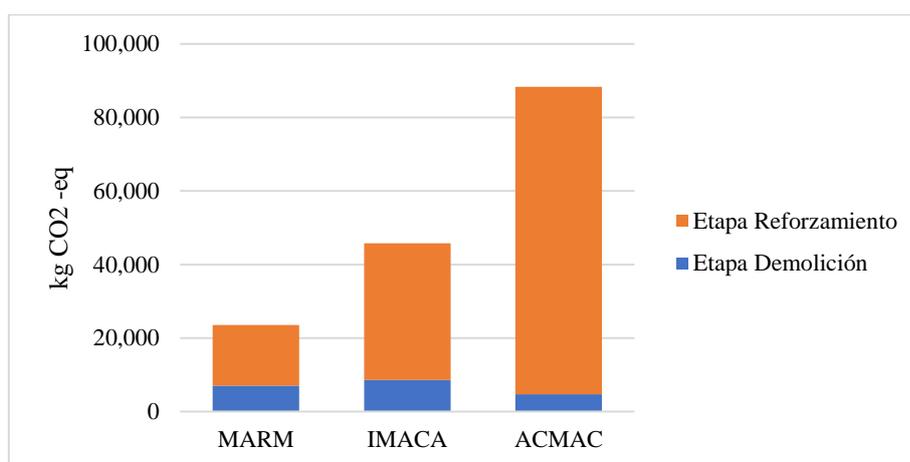


Figura 45. Método IPCC GWP₁₀₀ – Contribuciones de las etapas del ciclo de vida al impacto de cambio climático de las tres técnicas de reforzamiento

(2) Categoría de impacto midpoint: Formación de material particulado

La Tabla 23 muestra los resultados de las emisiones de material particulado fino (kg PM_{2.5}eq) de las etapas de demolición y reforzamiento para las tres técnicas de reforzamiento sísmico de acuerdo al método ReCiPe 2016. De igual manera que en la categoría de cambio climático, las emisiones de material particulado incrementaron con el volumen de demolición de cada técnica. Tal es así que la técnica que generó menores emisiones fue ACMAC (5 kg PM_{2.5}eq), seguido por MARM (8 kg PM_{2.5}eq), luego por IMACA (9 kg PM_{2.5}eq).

Por otro lado, en la etapa de reforzamiento los procesos unitarios analizados están vinculados con el ciclo de vida de los materiales de construcción predominantes de cada técnica. De esta manera, la técnica con mayores emisiones fue ACMAC, seguido por IMACA y, por último, MARM. Estos resultados demuestran que el acero, material de construcción característico de la técnica ACMAC, genera mayores impactos ambientales negativos que otros materiales como concreto (IMACA) y ladrillo (MARM).

Tabla 23. Emisiones de material particulado fino de acuerdo al método ReCiPe 2016 de las tres técnicas de reforzamiento

ReCiPe 2016	Etapa Demolición	Etapa Reforzamiento	Demolición + Reforzamiento
Emisiones de material particulado fino	kg PM2.5eq	kg PM2.5eq	kg PM2.5eq
MARM	8	20	28
IMACA	9	45	56
ACMAC	5	162	167

Asimismo, en la Tabla 23 se presentan los resultados del sistema de estudio completo comprendido por las etapas de demolición y reforzamiento. La técnica ACMAC produce las emisiones de material particulado más altas (167 kg PM2.5eq) y la técnica MARM las más bajas (28 kg PM2.5eq). Al respecto, en la Figura 46 se compara las contribuciones de cada una de las etapas en las emisiones de material particulado. Por ejemplo, el impacto de la etapa de demolición es relativamente bajo, incluso en el caso de la técnica ACMAC despreciable por ser 3%. Sin embargo, los impactos negativos de la etapa de reforzamiento superan el 71% de emisiones en las tres técnicas.

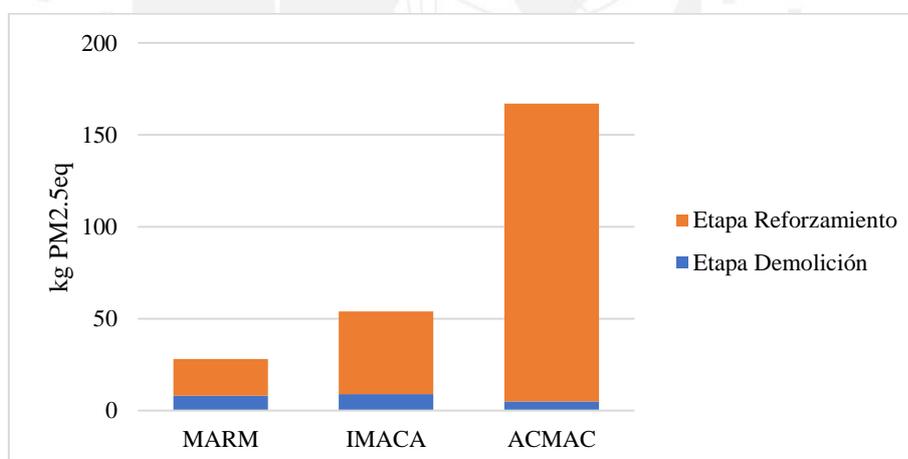


Figura 46. Método ReCiPe 2016 – Contribuciones de las etapas del ciclo de vida a las emisiones de material particulado de las tres técnicas de reforzamiento

(3) Categoría de impacto endpoint: Daño en la salud humana

Una de las razones para analizar los impactos ambientales de nuestras decisiones son debido a las consecuencias que estas tienen en la salud humana. De acuerdo al método ReCiPe 2016, la forma de cuantificar el Daño en la salud humana es a través de la métrica DALYs (*Disability-Adjusted Life Years*), que representa los años que se pierden o que una persona está discapacitada debido a una enfermedad o accidente [120].

Asimismo, en el método ReCiPe 2016 existen 8 categorías de impacto midpoint cuyas rutas de impacto afectan directamente a la categoría endpoint Daño en la salud humana, como se observa en la Figura 2.3. Tomando en consideración las características y condiciones del sistema de estudio, solo dos de las 8 categorías fueron analizadas, las cuales son formación de material particulado y cambio climático de las etapas de demolición y reforzamiento, respectivamente.

En la Tabla 24 se muestran los resultados del daño en la salud humana de las etapas de demolición y reforzamiento para las tres técnicas de reforzamiento sísmico medidos con la métrica DALYs. Como se observa en la Figura 47, la técnica que genera mayores impactos negativos en la salud humana fue ACMAC, seguido por IMACA y, por último, MARM.

Los impactos negativos de las emisiones de material particulado fino en la salud humana se manifiestan en el incremento de enfermedades respiratorias debido a la contaminación del aire. Mientras que los impactos del cambio climático representado por las emisiones de gases de efecto invernadero incrementan la temperatura que origina el aumento de enfermedades, además del incremento de la desnutrición.

Tabla 24. Daño en la salud humana de acuerdo al método ReCiPe 2016 de las técnicas de reforzamiento

Etapa	Demolición - Material particulado	Reforzamiento - Cambio Climático	Demolición + Reforzamiento
Daño en la Salud Humana	DALYs	DALYs	DALYs
MARM	1.16E-02	2.86E-02	4.02E-02
IMACA	1.38E-02	6.47E-02	7.85E-02
ACMAC	7.80E-03	1.91E-01	1.99E-01

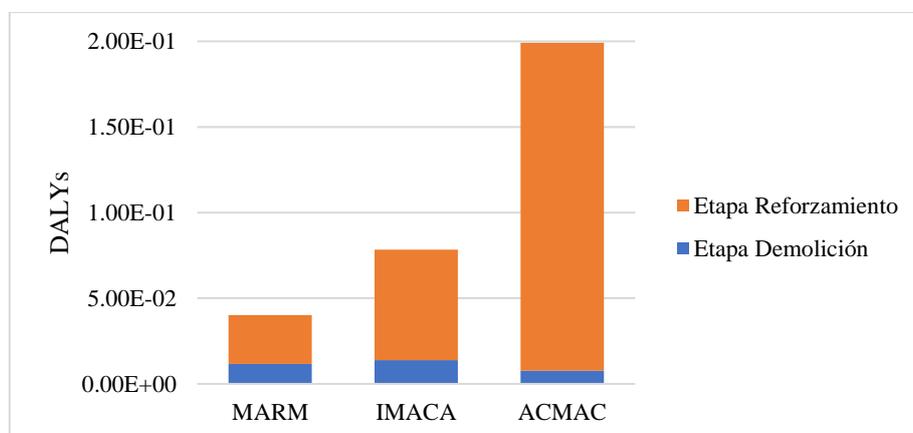


Figura 47. Método ReCiPe 2016 – Comparación de los daños en la salud humana de las tres técnicas de reforzamiento

En la Figura 48 se comparan los impactos negativos de las etapas de demolición y reforzamiento en la salud humana para cada técnica. De las categorías midpoint analizadas para la categoría daño en la salud humana, la formación de material particulado fino impacta negativamente con más del 44% de emisiones en la salud humana. Tomando en cuenta que en este sistema de estudio solo se analizaron dos categorías de impacto, el impacto negativo del cambio climático resulta de la diferencia del porcentaje total debido a que como se ha indicado anteriormente la categoría cambio climático fue analizada con el método IPCC GWP₁₀₀ por ser la más actualizada. Finalmente, los resultados muestran que los daños a la salud humana son principalmente debido a la formación de material particulado y el cambio climático.

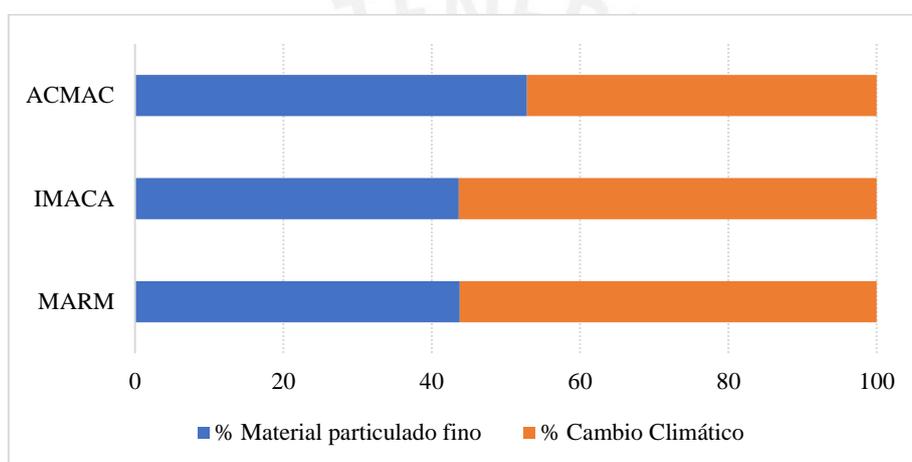
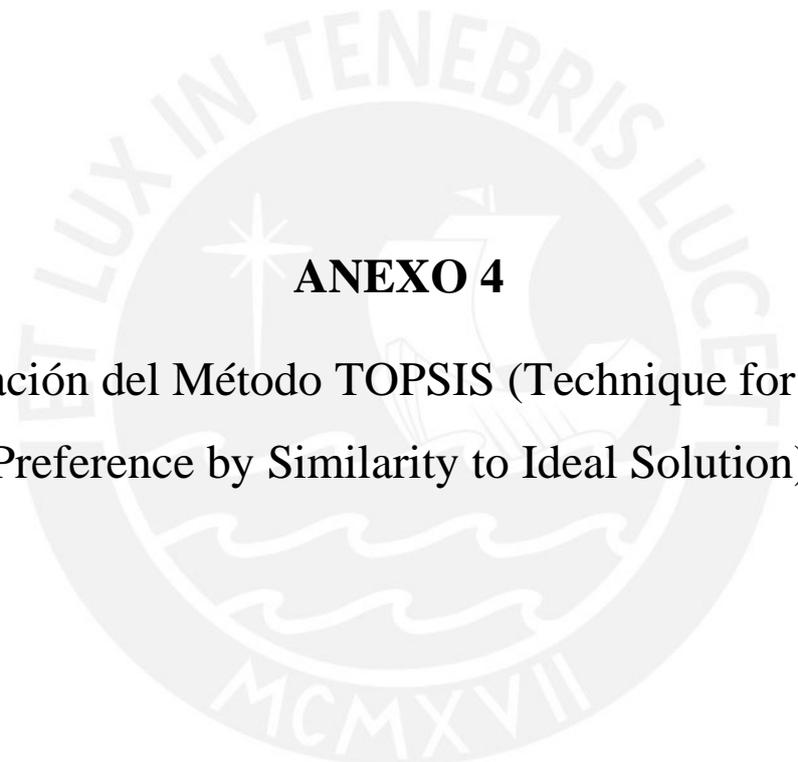


Figura 48. Método ReCiPe 2016 - Distribución de las categorías de impacto midpoint en los daños en la salud humana



ANEXO 4

Aplicación del Método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

FORMATO PARA EL INGRESO DE ESCALA DE IMPORTANCIA RELATIVA SEGÚN EL MÉTODO DE ANÁLISIS DE PROCESOS JERÁRQUICOS (Saaty, 1980)

ANÁLISIS DE PROCESOS JERÁRQUICOS (Saaty, 1980)									
Item	CRITERIOS	Costo de ejecución	Tiempo de ejecución	Grado de Modulación	Grado de Estandarización	Nivel de Industrialización	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	Emisiones de Material Particulado	Impacto en la Salud Humana
1	Costo de ejecución	1							
2	Tiempo de ejecución		1						
3	Grado de Modulación			1					
4	Grado de Estandarización				1				
5	Nivel de Industrialización					1			
6	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero						1		
7	Emisiones de Material Particulado							1	
8	Impacto en la Salud Humana								1
TOTAL		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

ESCENARIO 1

Facilitador: Dra. Sandra Santa Cruz

ANÁLISIS DE PROCESOS JERÁRQUICOS (Saaty, 1980)										
Item	CRITERIOS	Costo de ejecución	Tiempo de ejecución	Grado de Modulación	Grado de Estandarización	Nivel de Industrialización	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	Emisiones de Material Particulado	Impacto en la Salud Humana	VECTOR PRIORIDAD (W)
1	Costo de ejecución	1	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.20	0.031
2	Tiempo de ejecución	4.00	1	5.00	5.00	5.00	0.33	0.33	0.33	0.155
3	Grado de Modulación	4.00	0.20	1	1.00	0.33	0.33	0.33	0.25	0.059
4	Grado de Estandarización	4.00	0.20	1.00	1	0.33	0.33	0.33	0.25	0.059
5	Nivel de Industrialización	4.00	0.20	3.00	3.00	1	0.33	0.33	0.25	0.089
6	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	4.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1	1.00	1.00	0.194
7	Emisiones de Material Particulado	4.00	3.00	3.00	3.00	3.00	1.00	1	1.00	0.194
8	Impacto en la Salud Humana	5.00	3.00	4.00	4.00	4.00	1.00	1.00	1	0.218
TOTAL		30.00	10.85	20.25	20.25	16.92	4.58	4.58	4.28	1.00

ESCENARIO 2

Facilitador: Mg. Antonio Zeballos

ANÁLISIS DE PROCESOS JERÁRQUICOS (Saaty, 1980)										
Item	CRITERIOS	Costo de ejecución	Tiempo de ejecución	Grado de Modulación	Grado de Estandarización	Nivel de Industrialización	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	Emisiones de Material Particulado	Impacto en la Salud Humana	VECTOR PRIORIDAD (W)
1	Costo de ejecución	1	3.00	4.00	4.00	4.00	6.00	6.00	8.00	0.350
2	Tiempo de ejecución	0.33	1	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	6.00	0.219
3	Grado de Modulación	0.25	0.33	1	1.00	1.00	3.00	3.00	5.00	0.105
4	Grado de Estandarización	0.25	0.33	1.00	1	1.00	3.00	3.00	5.00	0.105
5	Nivel de Industrialización	0.25	0.33	1.00	1.00	1	3.00	3.00	5.00	0.105
6	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	0.17	0.20	0.33	0.33	0.33	1	1.00	3.00	0.046
7	Emisiones de Material Particulado	0.17	0.20	0.33	0.33	0.33	1.00	1	3.00	0.046
8	Impacto en la Salud Humana	0.13	0.17	0.20	0.20	0.20	0.33	0.33	1	0.024
TOTAL		2.54	5.57	10.87	10.87	10.87	22.33	22.33	36.00	1.00

ESCENARIO 3

Facilitador: Ing. Cristina Córdova Arias

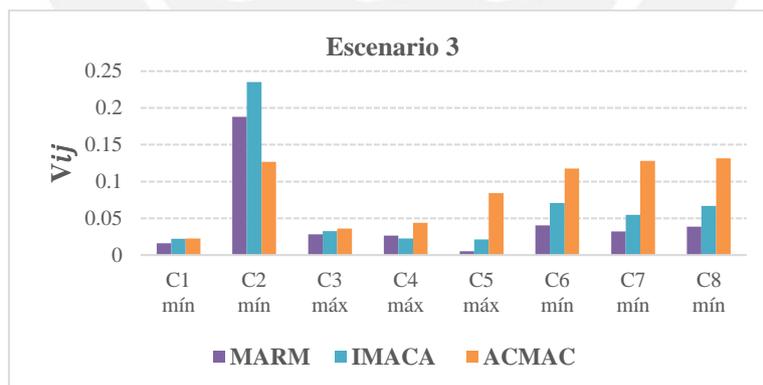
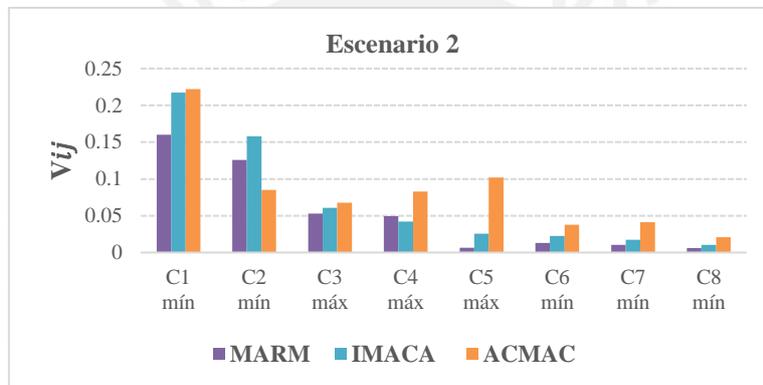
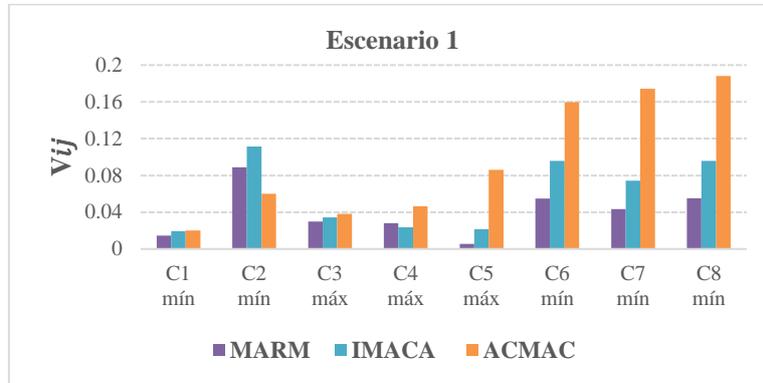
ANÁLISIS DE PROCESOS JERÁRQUICOS (Saaty, 1980)										
Item	CRITERIOS	Costo de ejecución	Tiempo de ejecución	Grado de Modulación	Grado de Estandarización	Nivel de Industrialización	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	Emisiones de Material Particulado	Impacto en la Salud Humana	VECTOR PRIORIDAD (W)
1	Costo de ejecución	1	0.20	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.20	0.035
2	Tiempo de ejecución	5.00	1	5.00	5.00	5.00	3.00	3.00	3.00	0.327
3	Grado de Modulación	3.00	0.20	1	1.00	0.33	0.33	0.33	0.33	0.056
4	Grado de Estandarización	3.00	0.20	1.00	1	0.33	0.33	0.33	0.33	0.056
5	Nivel de Industrialización	3.00	0.20	3.00	3.00	1	0.33	0.33	0.33	0.087
6	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	3.00	0.33	3.00	3.00	3.00	1	1.00	1.00	0.143
7	Emisiones de Material Particulado	3.00	0.33	3.00	3.00	3.00	1.00	1	1.00	0.143
8	Impacto en la Salud Humana	5.00	0.33	3.00	3.00	3.00	1.00	1.00	1	0.153
TOTAL		26.00	2.80	19.33	19.33	16.00	7.33	7.33	7.20	1.00

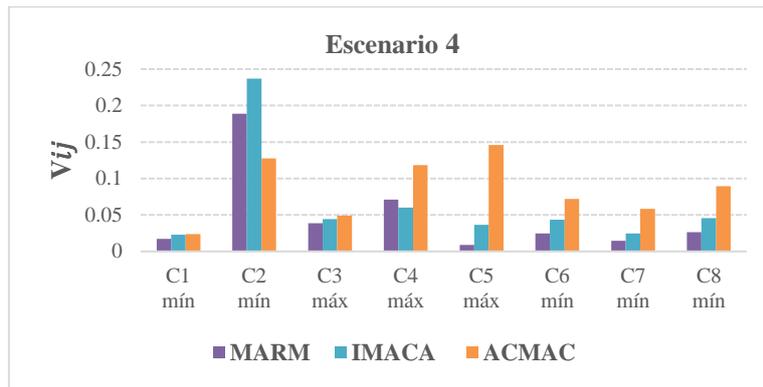
ESCENARIO 4

Facilitador: Dr. Xavier Brioso Lescano

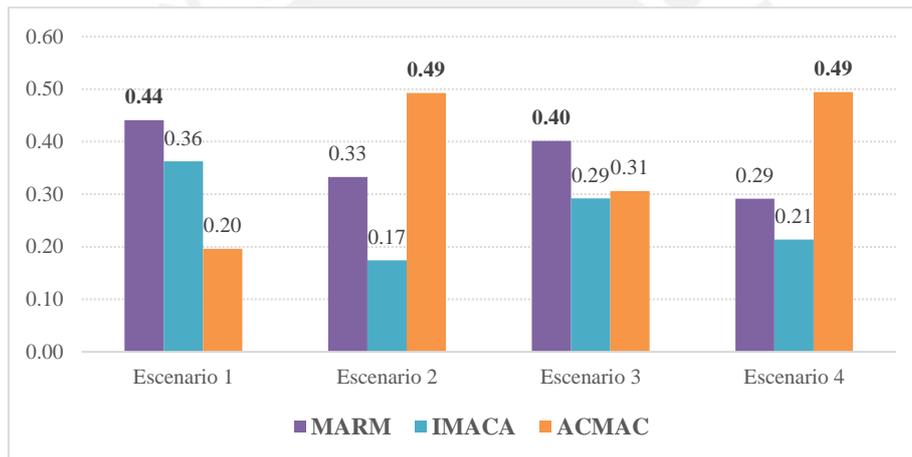
ANÁLISIS DE PROCESOS JERÁRQUICOS (Saaty, 1980)										
Item	CRITERIOS	Costo de ejecución	Tiempo de ejecución	Grado de Modulación	Grado de Estandarización	Nivel de Industrialización	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	Emisiones de Material Particulado	Impacto en la Salud Humana	VECTOR PRIORIDAD (W)
1	Costo de ejecución	1	0.20	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.037
2	Tiempo de ejecución	5.00	1	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	0.329
3	Grado de Modulación	3.00	0.33	1	0.33	0.33	1.00	1.00	1.00	0.077
4	Grado de Estandarización	3.00	0.33	3.00	1	1.00	1.00	3.00	3.00	0.151
5	Nivel de Industrialización	3.00	0.33	3.00	1.00	1	1.00	3.00	3.00	0.151
6	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero	3.00	0.20	1.00	1.00	1.00	1	1.00	0.33	0.088
7	Emisiones de Material Particulado	3.00	0.20	1.00	0.33	0.33	1.00	1	0.33	0.065
8	Impacto en la Salud Humana	3.00	0.20	1.00	0.33	0.33	3.00	3.00	1	0.104
TOTAL		24.00	2.80	13.33	7.33	7.33	13.33	17.33	14.00	1.00

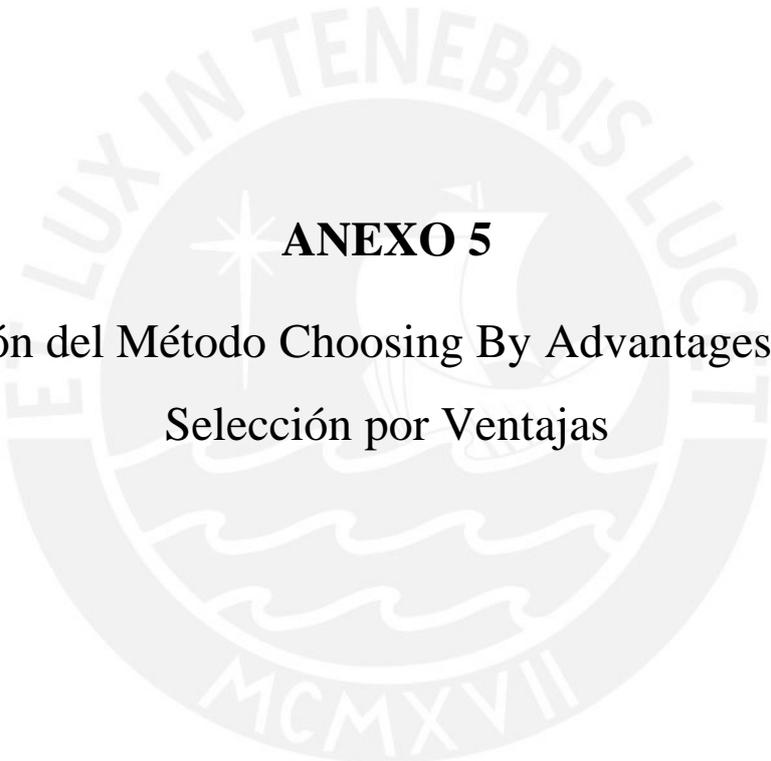
REPRESENTACIÓN DE LA MATRIZ DE TOMA DE DECISIONES NORMALIZADA Y PONDERADA PARA CADA ESCENARIO





RANKING DE ALTERNATIVAS





ANEXO 5

Aplicación del Método Choosing By Advantages (CBA) o
Selección por Ventajas

FORMATO PARA EL INGRESO DE LA IMPORTANCIA DE LA VENTAJA (IofA)

ID	FACTORES Y CRITERIOS	ATRIBUTOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
			LADRILLO - MARM			CONCRETO - IMACA			ACERO - ACMAC		
1	TIEMPO DE EJECUCIÓN CRIT: Menor es mejor	Número de días	ATR:	71		ATR:	89		ATR:	57	
			VENT:	18		VENT:	0		VENT:	32	
2	GRADO DE MODULACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Modulación	ATR:	78		ATR:	90		ATR:	100	
			VENT:	0		VENT:	12		VENT:	22	
3	GRADO DE ESTANDARIZACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Estandarización	ATR:	60		ATR:	51		ATR:	100	
			VENT:	40		VENT:	0		VENT:	49	
4	NIVEL DE INDUSTRIALIZACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Industrialización	ATR:	1		ATR:	4		ATR:	16	
			VENT:	0		VENT:	3		VENT:	15	
5	EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO CRIT: Menos es mejor	kg CO2 eq	ATR:	33381		ATR:	58565		ATR:	97459	
			VENT:	64078		VENT:	38894		VENT:	0	
6	EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO CRIT: Menos es mejor	kg PM2.5eq	ATR:	42		ATR:	72		ATR:	168	
			VENT:	126		VENT:	97		VENT:	0	
7	IMPACTO EN LA SALUD HUMANA CRIT: Menos es mejor	DALYS	ATR:	5.76E-02		ATR:	9.98E-02		ATR:	19.6E-02	
			VENT:	1.38E-01		VENT:	9.62E-02		VENT:	0	
				0		0		0			
COSTO DE EJECUCIÓN		S/.	166,000			225,000			230,000		

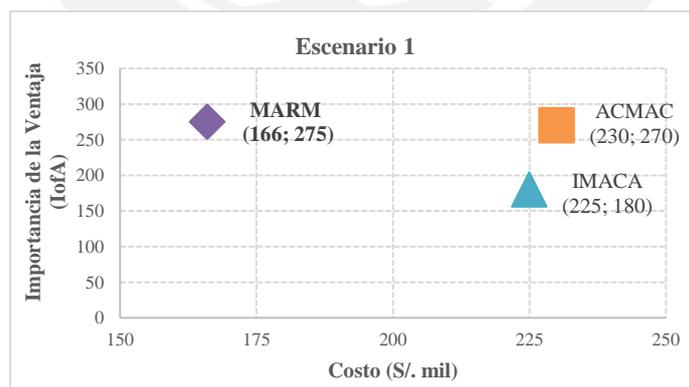
ESCENARIO 1

Facilitador: Dra. Sandra Santa Cruz

ID	FACTORES Y CRITERIOS	ATRIBUTOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
			LADRILLO - MARM			CONCRETO - IMACA			ACERO - ACMAC		
1	TIEMPO DE EJECUCIÓN CRIT: Menor es mejor	Número de días	ATR:	71	35	ATR:	89	0	ATR:	57	80
			VENT:	18		VENT:	0		VENT:	32	
2	GRADO DE MODULACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Modulación	ATR:	78	0	ATR:	90	30	ATR:	100	60
			VENT:	0		VENT:	12		VENT:	22	
3	GRADO DE ESTANDARIZACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Estandarización	ATR:	60	50	ATR:	51	0	ATR:	100	60
			VENT:	40		VENT:	0		VENT:	49	
4	NIVEL DE INDUSTRIALIZACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Industrialización	ATR:	1	0	ATR:	4	15	ATR:	16	70
			VENT:	0		VENT:	3		VENT:	15	
5	EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO CRIT: Menos es mejor	kg CO2 eq	ATR:	33381	50	ATR:	58565	25	ATR:	97459	0
			VENT:	64078		VENT:	38894		VENT:	0	
6	EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO CRIT: Menos es mejor	kg PM2.5eq	ATR:	42	40	ATR:	72	30	ATR:	168	0
			VENT:	126		VENT:	97		VENT:	0	
7	IMPACTO EN LA SALUD HUMANA CRIT: Menos es mejor	DALYS	ATR:	5.76E-02	100	ATR:	9.98E-02	80	ATR:	19.6E-02	0
			VENT:	1.38E-01		VENT:	9.62E-02		VENT:	0	
			275			180			270		

COSTO DE EJECUCIÓN	S/.	166,000	225,000	230,000

Evaluación del costo

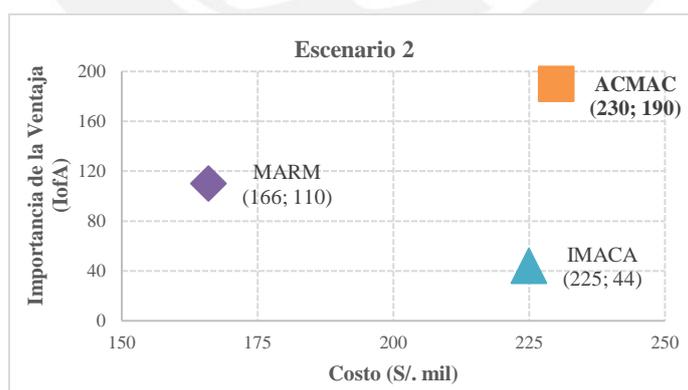


ESCENARIO 2

Facilitador: Mg. Antonio Zeballos

ID	FACTORES Y CRITERIOS	ATRIBUTOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
			LADRILLO - MARM			CONCRETO - IMACA			ACERO - ACMAC		
1	TIEMPO DE EJECUCIÓN CRIT: Menor es mejor	Número de días	ATR:	71	45	ATR:	89	0	ATR:	57	100
			VENT:	18		VENT:	0		VENT:	32	
2	GRADO DE MODULACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Modulación	ATR:	78	0	ATR:	90	15	ATR:	100	30
			VENT:	0		VENT:	12		VENT:	22	
3	GRADO DE ESTANDARIZACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Estandarización	ATR:	60	25	ATR:	51	0	ATR:	100	30
			VENT:	40		VENT:	0		VENT:	49	
4	NIVEL DE INDUSTRIALIZACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Industrialización	ATR:	1	0	ATR:	4	5	ATR:	16	30
			VENT:	0		VENT:	3		VENT:	15	
5	EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO CRIT: Menos es mejor	kg CO2 eq	ATR:	33381	15	ATR:	58565	8	ATR:	97459	0
			VENT:	64078		VENT:	38894		VENT:	0	
6	EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO CRIT: Menos es mejor	kg PM2.5eq	ATR:	42	15	ATR:	72	10	ATR:	168	0
			VENT:	126		VENT:	97		VENT:	0	
7	IMPACTO EN LA SALUD HUMANA CRIT: Menos es mejor	DALYS	ATR:	5.76E-02	10	ATR:	9.98E-02	6	ATR:	19.6E-02	0
			VENT:	1.38E-01		VENT:	9.62E-02		VENT:	0	
			110			44			190		
COSTO DE EJECUCIÓN		S/.	166,000			225,000			230,000		

Evaluación del costo



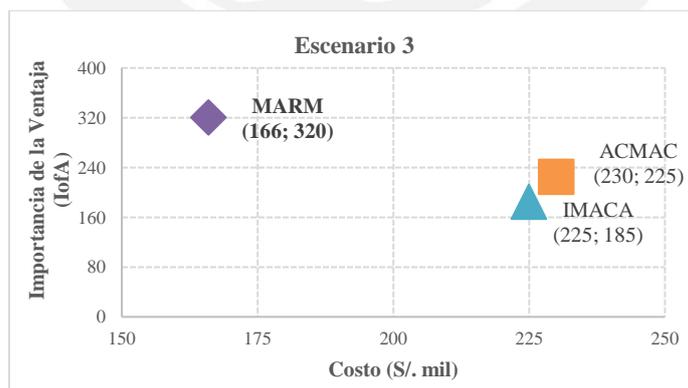
ESCENARIO 3

Facilitador: Ing. Cristina Córdova Arias

ID	FACTORES Y CRITERIOS	ATRIBUTOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
			LADRILLO - MARM			CONCRETO - IMACA			ACERO - ACMAC		
1	TIEMPO DE EJECUCIÓN CRIT: Menor es mejor	Número de días	ATR:	71	40	ATR:	89	0	ATR:	57	90
			VENT:	18		VENT:	0		VENT:	32	
2	GRADO DE MODULACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Modulación	ATR:	78	0	ATR:	90	20	ATR:	100	45
			VENT:	0		VENT:	12		VENT:	22	
3	GRADO DE ESTANDARIZACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Estandarización	ATR:	60	35	ATR:	51	0	ATR:	100	40
			VENT:	40		VENT:	0		VENT:	49	
4	NIVEL DE INDUSTRIALIZACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Industrialización	ATR:	1	0	ATR:	4	10	ATR:	16	50
			VENT:	0		VENT:	3		VENT:	15	
5	EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO CRIT: Menos es mejor	kg CO2 eq	ATR:	33381	75	ATR:	58565	55	ATR:	97459	0
			VENT:	64078		VENT:	38894		VENT:	0	
6	EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO CRIT: Menos es mejor	kg PM2.5eq	ATR:	42	70	ATR:	72	50	ATR:	168	0
			VENT:	126		VENT:	97		VENT:	0	
7	IMPACTO EN LA SALUD HUMANA CRIT: Menos es mejor	DALYS	ATR:	5.76E-02	100	ATR:	9.98E-02	50	ATR:	19.6E-02	0
			VENT:	1.38E-01		VENT:	9.62E-02		VENT:	0	
			320			185			225		

COSTO DE EJECUCIÓN	S/.	166,000	225,000	230,000
--------------------	-----	---------	---------	---------

Evaluación del costo



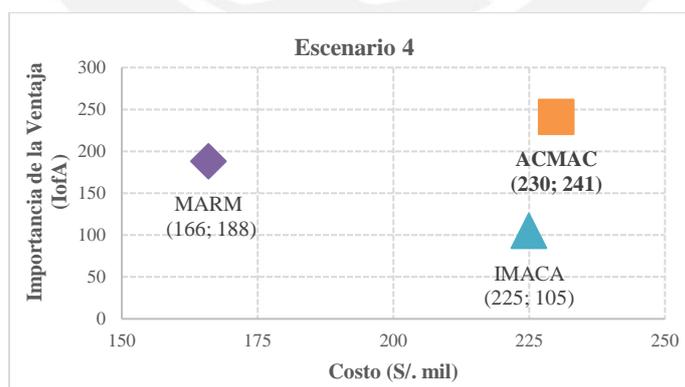
ESCENARIO 4

Facilitador: Dr. Xavier Brioso Lescano

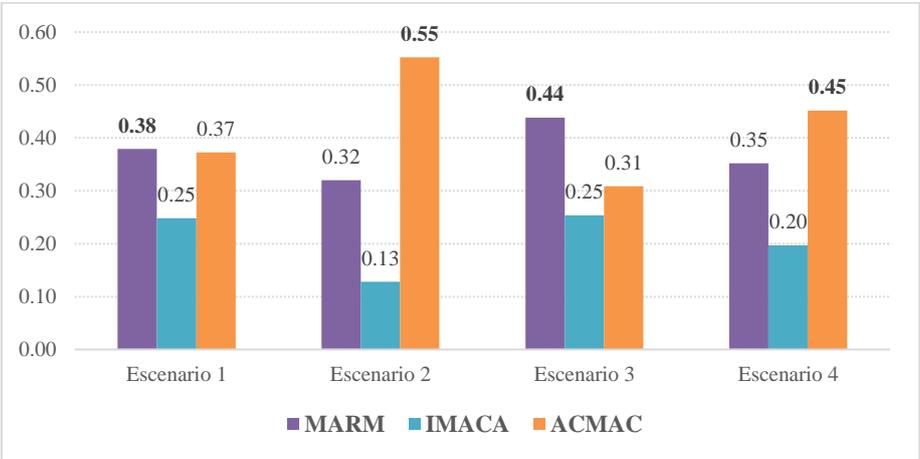
ID	FACTORES Y CRITERIOS	ATRIBUTOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
			LADRILLO - MARM			CONCRETO - IMACA			ACERO - ACMAC		
1	TIEMPO DE EJECUCIÓN CRIT: Menor es mejor	Número de días	ATR:	71	44	ATR:	89	0	ATR:	57	100
			VENT:	18		VENT:	0		VENT:	32	
2	GRADO DE MODULACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Modulación	ATR:	78	0	ATR:	90	23	ATR:	100	43
			VENT:	0		VENT:	12		VENT:	22	
3	GRADO DE ESTANDARIZACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Estandarización	ATR:	60	42	ATR:	51	0	ATR:	100	52
			VENT:	40		VENT:	0		VENT:	49	
4	NIVEL DE INDUSTRIALIZACIÓN CRIT: Mayor es mejor	% Industrialización	ATR:	1	0	ATR:	4	15	ATR:	16	46
			VENT:	0		VENT:	3		VENT:	15	
5	EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO CRIT: Menos es mejor	kg CO2 eq	ATR:	33381	36	ATR:	58565	19	ATR:	97459	0
			VENT:	64078		VENT:	38894		VENT:	0	
6	EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO CRIT: Menos es mejor	kg PM2.5eq	ATR:	42	27	ATR:	72	21	ATR:	168	0
			VENT:	126		VENT:	97		VENT:	0	
7	IMPACTO EN LA SALUD HUMANA CRIT: Menos es mejor	DALYS	ATR:	5.76E-02	39	ATR:	9.98E-02	27	ATR:	19.6E-02	0
			VENT:	1.38E-01		VENT:	9.62E-02		VENT:	0	
			188			105			241		

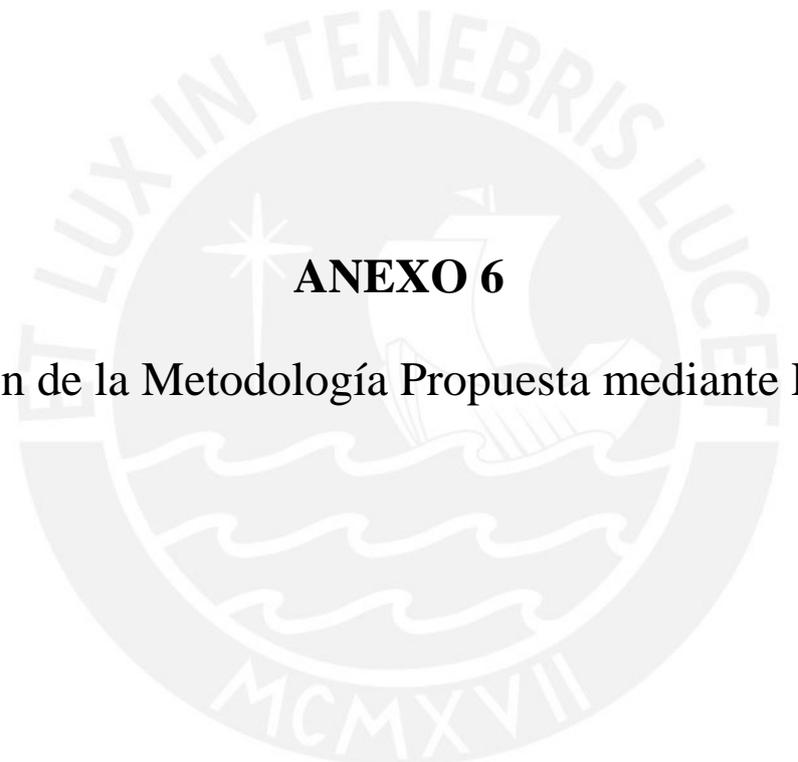
COSTO DE EJECUCIÓN	S/.	166,000	225,000	230,000
---------------------------	-----	---------	---------	---------

Evaluación del costo



RANKING DE ALTERNATIVAS





ANEXO 6

Validación de la Metodología Propuesta mediante Encuestas

La validación de la metodología propuesta se realizó mediante encuestas que fueron respondidas por los stakeholders al iniciar y finalizar el taller participativo “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs”. A continuación, se muestra la encuesta con las ocho preguntas formuladas. Esta encuesta fue creada utilizando la herramienta Google Form.

Ficha Técnica: Encuesta de Entrada

- Universo : Participantes del taller participativo: “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs”
- Muestra : 36 participantes
- Técnica : Encuesta presencial al iniciar el taller
- Fecha de aplicación : 05 de octubre de 2018
- Hora : 9:00 am

Ficha Técnica: Encuesta de Salida

- Universo : Participantes del taller participativo: “Métodos multicriterios para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs”
- Muestra : 36 participantes
- Técnica : Encuesta presencial al iniciar el taller
- Fecha de aplicación : 05 de octubre de 2018
- Hora : 17:00 pm

Taller Participativo “Método Multi-Criterio para toma de decisiones más transparentes en infraestructura educativa pública mediante el uso de BIM y TICs”

1. ¿Conoce usted la Guía de Reforzamiento Incremental de Colegios Públicos del Perú?

- Sí
- No

2. Si su respuesta fue afirmativa ¿Cuáles de las siguientes opciones son las técnicas de reforzamiento incremental propuestas en la Guía?

- Reforzamiento mediante incorporación de muros de concreto armado
- Reforzamiento mediante el cierre de paños con muros de albañilería
- Reforzamiento mediante adición de componentes de marco y arriostres de acero
- Reforzamiento con encamisetado de fibras de carbono
- Reforzamiento mediante muretes de albañilería reforzados con mallas en ambas caras

3. ¿Cuáles de las siguientes afirmaciones sobre el Modelado Digital de la Información (BIM) son ciertas? Selección múltiple.

- BIM permite el trabajo colaborativo
- BIM requiere cambios en las políticas de las empresas
- BIM es un cambio en los procesos de trabajo de las empresas
- BIM es una tecnología para hacer modelos 3D

4. ¿Considera usted que la visualización de las técnicas de reforzamiento mediante modelos 3D podría incrementar la transparencia en la selección de alternativas frente a métodos tradicionales?

	1	2	3	4	5	
Totalmente en desacuerdo	<input type="radio"/>	Totalmente de acuerdo				

5. ¿Cuáles de los siguientes métodos MCDM conoce?

- Saaty - Análisis de Procesos Jerárquicos
- TOPSIS
- Análisis Costo - Beneficio
- CBA - Selección por ventajas
- BIM

6. ¿La Modulación, Estandarización e Industrialización contribuyen al incremento de transparencia en un proyecto de construcción?

	1	2	3	4	5	
Totalmente en desacuerdo	<input type="radio"/>	Totalmente de acuerdo				

7. ¿Con qué frecuencia usted utiliza Tecnologías de Información y Comunicación en su trabajo?

	1	2	3	4	5	
Nunca	<input type="radio"/>	Casi siempre				

8. ¿Considera usted que es importante incluir criterios de decisión que midan la transparencia en un proyecto de construcción?

	1	2	3	4	5	
Totalmente en desacuerdo	<input type="radio"/>	Totalmente de acuerdo				

ENVIAR

Página 1 de 1

A continuación, se muestran los resultados de las encuestas agrupadas en tres bloques.

Primer bloque: Preguntas 1 y 2

Pregunta N°1: ¿Conoce usted la Guía de Reforzamiento Incremental de Colegios Públicos del Perú?

Se consultó a los participantes sobre la existencia de la Guía de Reforzamiento Incremental de Colegios Públicos, si la conocían o no y se obtuvo los siguientes resultados:

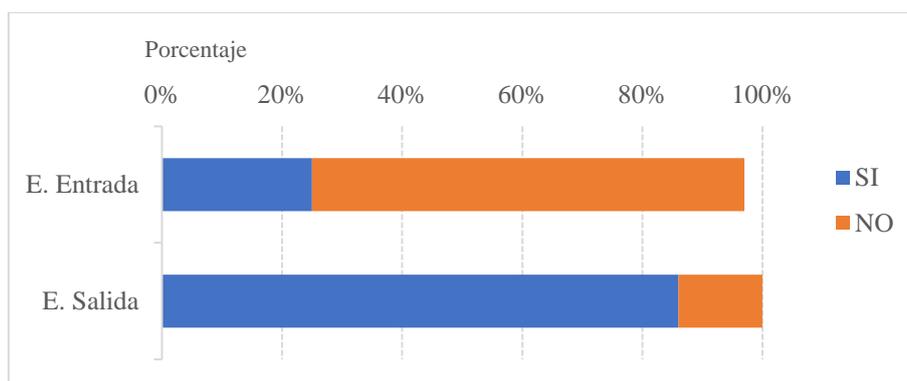


Figura 49. Encuestas: Resultados de la pregunta N°1

Como indica la Figura 49, al inicio del taller, solo el 25% de los encuestados afirmaba conocer la guía. Mientras que luego de informar a los participantes sobre la existencia de la guía la aprobación se elevó a 96%. El impacto de la difusión de la guía se midió mediante el incremento de 71 puntos porcentuales.

Pregunta N°2: Si su respuesta fue afirmativa ¿Cuáles de las siguientes opciones son las técnicas de reforzamiento incremental propuestas en la Guía?

Se consultó a los participantes sobre las técnicas de reforzamiento propuestas en la guía y se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 25. Encuestas: Resultados de la pregunta N°2

Opciones múltiples	E. Entrada		E. Salida		Incremento (%)
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje	
a) Reforzamiento mediante incorporación de muros de concreto armado	7	19%	24	83%	63%
b) Reforzamiento mediante el cierre de paños con muros de albañilería	3	8%	19	66%	57%
c) Reforzamiento mediante adición de componentes de marco y arriostres de acero	8	22%	25	86%	64%
d) Reforzamiento con encamisetado de fibras de carbono	0	0%	0	0%	0%
e) Reforzamiento mediante muretes de albañilería reforzados con mallas en ambas caras	4	11%	7	24%	13%

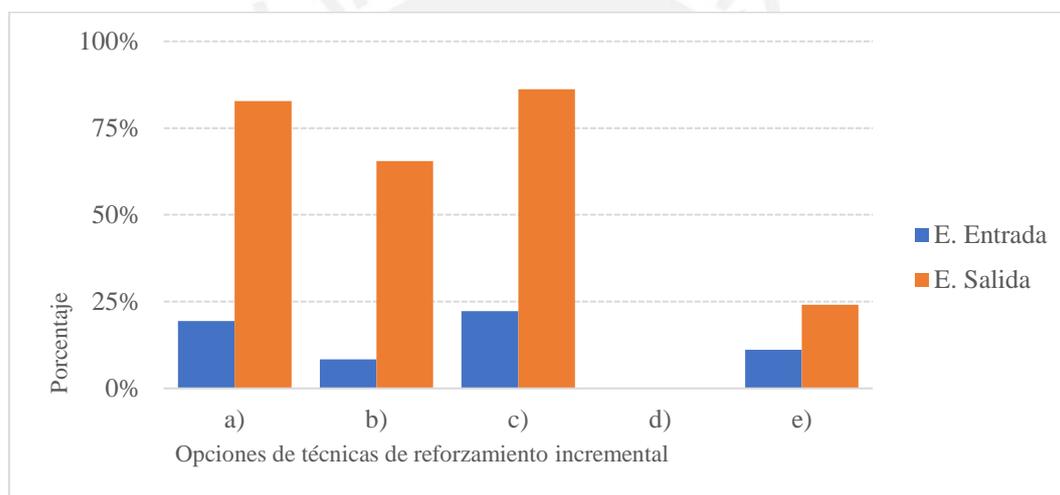


Figura 50. Encuestas: Resultados de la pregunta N°2

La pregunta 2 tenía opciones múltiples, cuyas respuestas correctas eran (a) Reforzamiento mediante incorporación de muros de concreto armado, (c) Reforzamiento mediante adición de componentes de marco y arriostres de acero, y (e) Reforzamiento mediante muretes de albañilería reforzados con mallas en ambas caras. En la Figura 50 se observa que, al inicio del taller, menos del 25% de los participantes identificaron correctamente las técnicas de reforzamiento propuestas en la guía. Sin embargo, luego de ser informados estos números se incrementaron en más de 70 puntos porcentuales, siendo las técnicas más recordadas las opciones (a) y (c). A pesar de que la opción (e) fue confundida con la opción (b), debido a que ambas incluían en su descripción el reforzamiento con muros de albañilería, juntas alcanzaron un puntaje de 90%.

Segundo bloque: Preguntas 3, 5 y 7

Pregunta N°3: ¿Cuáles de las siguientes afirmaciones sobre el Modelado Digital de la Información (BIM) son ciertas? Selección múltiple

Se consultó a los participantes sobre las afirmaciones que conocían respecto a BIM y se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 26. Encuestas: Resultados de la pregunta N°3

Opciones múltiples	E. Entrada		E. Salida		Incremento (%)
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje	
BIM permite el trabajo colaborativo	24	67%	24	83%	16%
BIM requiere cambios en las políticas de las empresas	9	25%	13	45%	20%
BIM es un cambio en los procesos de trabajo de las empresas	21	58%	21	72%	14%
BIM es una tecnología para hacer modelos 3D	16	44%	23	79%	35%

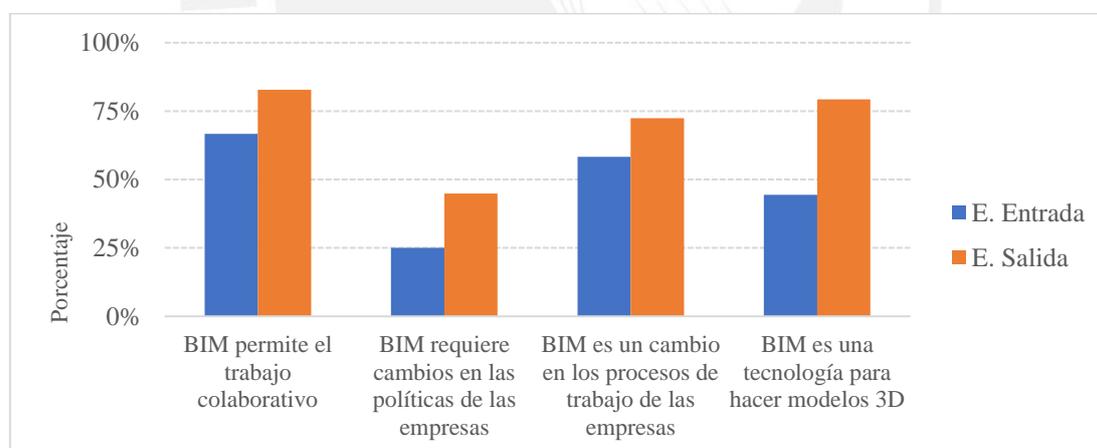


Figura 51. Encuestas: Resultados de la pregunta N°3

En la Figura 51 se observa que todas las afirmaciones respecto a BIM presentan un incremento favorable después del taller de más de 14 puntos porcentuales. Por ejemplo, un aspecto que destaca a simple vista se presenta tanto en la encuesta de entrada como en la de salida, en las que más del 65% de los participantes considera que BIM permite el trabajo colaborativo. De igual manera, más del 55% identifica que BIM es un cambio en los procesos de trabajo en las empresas. En otras palabras, los participantes contaban con una percepción bastante clara sobre estos dos conceptos relacionados a BIM. En esta situación, el incremento en promedio fue de 15 puntos porcentuales.

Sin embargo, el mayor impacto del taller se produjo en los otros dos conceptos relacionados a BIM. Al inicio del taller, solo el 25% de los participantes consideraba que BIM requería cambios en las políticas de las empresas. Luego de ser informados, se produjo un incremento de 20 puntos porcentuales a favor de esta afirmación. De igual manera ocurrió con la afirmación que señalaba que BIM es una tecnología para hacer modelos 3D, aunque el incremento fue mayor, alrededor de 35 puntos porcentuales.

A pesar del impacto positivo, la afirmación sobre los cambios en las políticas de las empresas que requiere BIM no fue asimilado completamente por los participantes, el respaldo fue menor a 45%. Esta situación puede representar una barrera para la implementación de BIM en el sector construcción en vista de los esfuerzos del Gobierno peruano por “incorporar progresivamente las herramientas de modelamiento digital de la información para la ejecución de obra pública” (Diario Oficial “El Peruano”).

Pregunta N°5: ¿Cuáles de los siguientes métodos MCDM conoce?

Se consultó a los participantes sobre los métodos multicriterio (MCDM) que conocían y se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 27. Encuestas: Resultados de la pregunta N°5

Opciones múltiples	E. Entrada		E. Salida		Incremento (%)
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje	
Saaty – Análisis de Procesos Jerárquicos	2	6%	19	66%	60%
TOPSIS	1	3%	24	83%	80%
Análisis Costo – Beneficio	18	50%	11	38%	-12%
CBA – Selección por ventajas	4	11%	25	86%	75%
BIM	9	25%	11	38%	13%

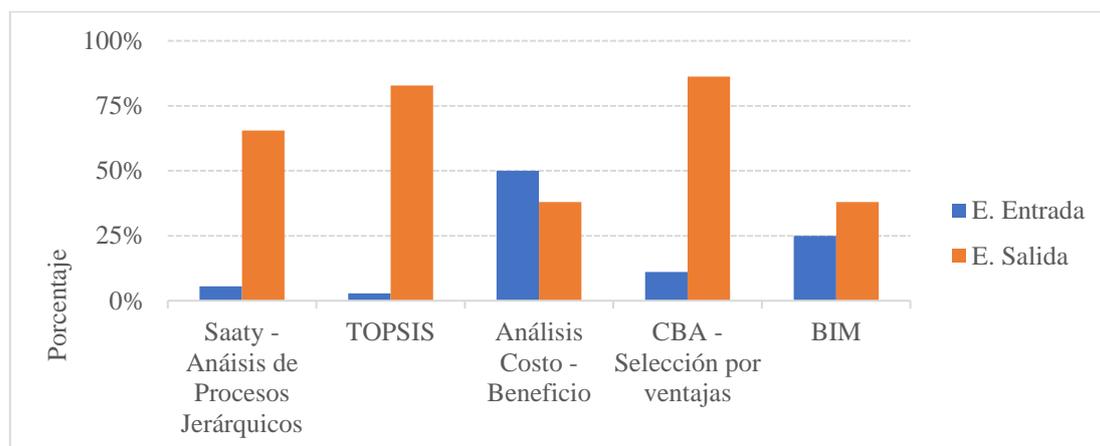


Figura 52. Encuestas: Resultados de la pregunta N°5

De las opciones planteadas, los métodos multicriterio MCDM eran Saaty – Análisis de procesos jerárquicos, TOPSIS y CBA. Como se observa en la Figura 52, luego de capacitar a los participantes en dichos métodos se produjo un incremento en su reconocimiento y uso de más de 60 puntos porcentuales.

Pregunta N°7: ¿Con qué frecuencia usted utiliza Tecnologías de Información y Comunicación en su trabajo?

Se consultó a los participantes sobre la frecuencia del uso de TICs y se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 28. Encuestas: Resultados de la pregunta N°7

Escala de preferencia	E. Entrada		E. Salida		Incremento (%)
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje	
Nunca	0	0%	0	0%	0%
Muy pocas veces	7	19%	6	21%	1%
Algunas veces	7	19%	6	21%	1%
Casi siempre	12	33%	10	34%	1%
Siempre	8	22%	7	24%	2%

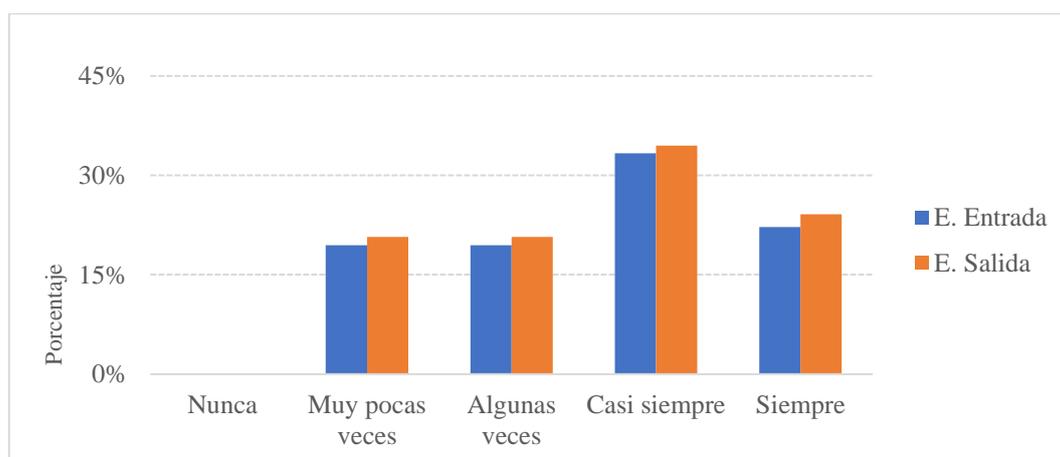


Figura 53. Encuestas: Resultados de la pregunta N°7

En la Figura 53 se observa que la frecuencia en el uso de TICs en el trabajo no es muy alta. Los resultados muestran que menos del 35% de participantes emplean con regularidad alguna herramienta TIC en sus centros de trabajo. La trascendencia de esta pregunta se manifiesta en la importancia de la tecnología en el soporte de metodologías transparentes como BIM. Por ello, a la luz de los resultados será necesario implementar estrategias que conduzcan a incrementar la frecuencia en el uso de TIC, especialmente en el sector público.

Las siguientes preguntas fueron valoradas por los participantes mediante una escala de preferencia (Likert) que permitió validar la hipótesis de la investigación sobre el enfoque de transparencia en la toma de decisiones a través de la incorporación de herramientas BIM y TICs, y de la medición de la transparencia como criterio de decisión.

Tercer bloque: Preguntas 4, 6 y 7

Pregunta N°4: ¿Considera usted que la visualización de las técnicas de reforzamiento mediante modelos 3D podría incrementar la transparencia en la selección de alternativas frente a métodos tradicionales?

Se consultó a los participantes sobre qué percepción tienen del impacto de la visualización en el incremento de la transparencia en la toma de decisiones, y se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 29. Encuestas: Resultados de la pregunta N°4

Escala de preferencia	E. Entrada		E. Salida		Incremento (%)
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje	
Totalmente en desacuerdo	0	0%	1	3%	3%
En desacuerdo	0	0%	0	0%	0%
Ni acuerdo ni desacuerdo	3	8%	0	0%	-8%
De acuerdo	17	47%	10	34%	-13%
Totalmente de acuerdo	14	39%	18	62%	23%

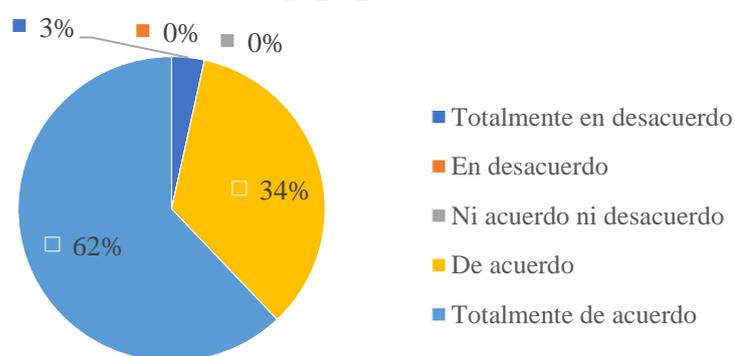


Figura 54. Encuestas: Resultados de la pregunta N°4

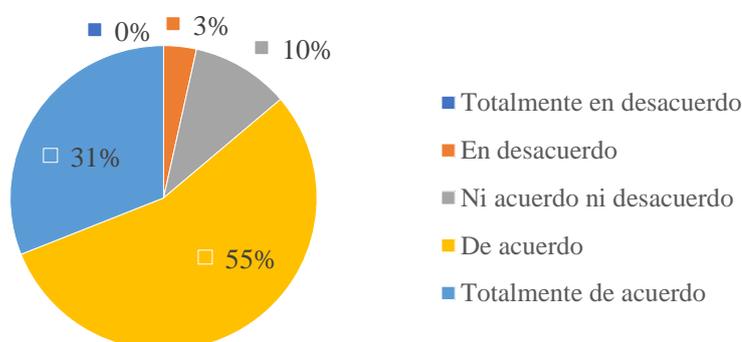
En la Figura 54, se observa que luego de la sesión virtual, los participantes mayoritariamente afirmaron que la visualización de las técnicas de reforzamiento mediante modelos 3D puede incrementar la transparencia en la toma de decisiones frente a los métodos tradicionales (más del 96%).

Pregunta N°6: ¿La Modulación, Estandarización e Industrialización contribuyen al incremento de transparencia en un proyecto de construcción?

Se consultó a los participantes sobre qué percepción tienen del impacto de los conceptos de optimización en proyectos de construcción en el incremento de la transparencia del sector, y se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 30. Encuestas: Resultados de la pregunta N°6

Escala de preferencia	E. Entrada		E. Salida		Incremento (%)
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje	
Totalmente en desacuerdo	1	3%	0	0%	-3%
En desacuerdo	0	0%	1	3%	3%
Ni acuerdo ni desacuerdo	2	6%	3	10%	5%
De acuerdo	14	39%	16	55%	16%
Totalmente de acuerdo	15	42%	9	31%	-11%

**Figura 55. Encuestas: Resultados de la pregunta N°6**

En la Figura 55, se observa que luego de ser informados más del 86% de los participantes valoraron favorablemente el impacto de la modulación, estandarización e industrialización en el incremento de la transparencia en los proyectos de construcción.

Pregunta N°8: ¿Considera usted que es importante incluir criterios de decisión que midan la transparencia en un proyecto de construcción?

Se consultó a los participantes sobre qué percepción tienen de la medición de la transparencia como un criterio de decisiones, y se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 31. Encuestas: Resultados de la pregunta N°8

Escala de preferencia	E. Entrada		E. Salida		Incremento (%)
	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia	Porcentaje	
Totalmente en desacuerdo	1	3%	0	0%	-3%
En desacuerdo	0	0%	0	0%	0%
Ni acuerdo ni desacuerdo	0	0%	0	0%	0%
De acuerdo	7	19%	6	21%	1%
Totalmente de acuerdo	25	69%	23	79%	10%

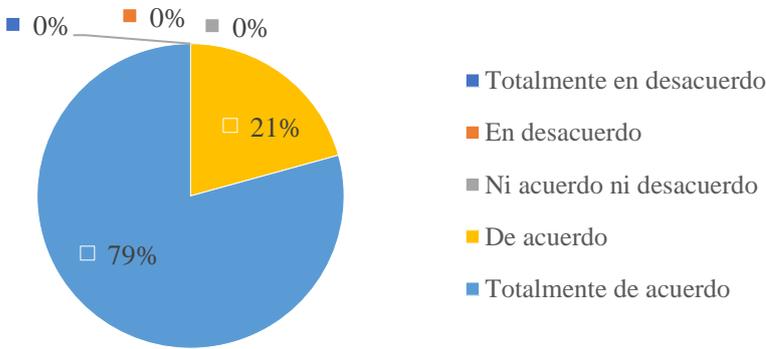


Figura 56. Encuestas: Resultados de la pregunta N°8

En la Figura 56, se observa que luego del taller, el 100% de los participantes respaldaron la importancia de incluir y medir la transparencia en la toma de decisiones de proyectos de construcción con el propósito de reducir el riesgo de corrupción.