



Informe Técnico

Estrategia de Reducción del Riesgo Sísmico de Edificaciones Escolares Públicas del Perú

Febrero 2017

Proyecto dirigido por El Banco Mundial y elaborado por:



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Luis Eduardo Yamin

Dirección General del Proyecto

José Raúl Rincón

Coordinación Técnica

Juan Carlos Reyes

Asesor Externo

Álvaro Iván Hurtado

Ingeniero Especialista

Julián Tristanch

Ingeniero Especialista

Andrés Felipe Becerra

Ingeniero

Laura Lunita López

Ingeniera

Jonathan Estrada

Asistente administrativo

BANCO MUNDIAL

Fernando Ramírez

Dirección General

Juan Carlos Atoche

Dirección Técnica

Laisa Daza Obando

Apoyo técnico y administrativo

© 2017 Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento/Banco Mundial
1818 H St. NW
Washington, DC, 20433 EE. UU.
Teléfono: 202-473-1000
Sitio web: www.worldbank.org

Esta obra ha sido realizada por el personal del Banco Mundial con contribuciones externas. Las opiniones, interpretaciones y conclusiones aquí expresadas no son necesariamente reflejo de la opinión del Banco Mundial, de su Directorio Ejecutivo ni de los países representados por este.

El Banco Mundial no garantiza la exactitud de los datos que figuran en esta publicación. Las fronteras, los colores, las denominaciones y demás datos que aparecen en los mapas de este documento no implican juicio alguno, por parte del Banco Mundial, sobre la condición jurídica de ninguno de los territorios, ni la aprobación o aceptación de tales fronteras.

Derechos y autorizaciones

El material contenido en este trabajo está registrado como propiedad intelectual. El Banco Mundial alienta la difusión de sus conocimientos y autoriza la reproducción total o parcial de este informe para fines no comerciales en tanto se cite la fuente.

Cualquier consulta sobre derechos y licencias, incluidos los derechos subsidiarios, deberá enviarse a la siguiente dirección: World Bank Publications, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, EE. UU.; fax: 202-522-2625; correo electrónico: pubrights@worldbank.org.

Foto de la portada: "Institución educativa emblemática Alfonso Ugarte, construida en 1927, reforzada estructuralmente en 2010"
Diseño de la portada: FCI Creative

PRESENTACIÓN

En agosto de 2007 un terremoto de magnitud 7.8 (M_w) impactó el sur del Perú con un saldo de 550 personas muertas, 2,000 personas afectadas y pérdidas económicas del orden de US\$1 billón. A partir de este desastre el Banco Mundial inició un nuevo proceso de apoyo y asistencia técnica al gobierno del Perú para el diseño de políticas que permitan reducir el impacto de los terremotos sobre la población y la economía. En particular, se estableció como prioritaria la reducción de la vulnerabilidad sísmica de la infraestructura esencial la cual incluye entre otras, las edificaciones de los sectores salud, educación, transporte y gobierno.

Así, desde el 2007 hasta la fecha, el Banco Mundial y el gobierno de Perú han suscrito un número importante de operaciones y proyectos de asistencia técnica que en conjunto apoyan principalmente tres ejes de política: i) fortalecer la planificación y asignación de recursos para programas de reducción de riesgo de desastre, ii) fortalecer la reducción de vulnerabilidad de infraestructura esencial y iii) fortalecer la capacidad del Estado para la recuperación pos desastre.

En este contexto, en el 2012 el Banco Mundial financió el estudio para la evaluación del riesgo sísmico de 2,000 locales escolares en el área metropolitana de Lima y el Callao y capacitó oficiales de gobierno, profesores y estudiantes universitarios en el uso de la plataforma para la evaluación probabilista del riesgo (CAPRA). Los resultados de este primer estudio permitieron por una parte estimar los daños y pérdidas que podrían generarse en caso de futuros terremotos, y de otra, poner en evidencia la alta vulnerabilidad sísmica de miles de edificios escolares. Entre el 2013 y 2014 el Ministerio de Educación (MINEDU) llevó a cabo el censo de la infraestructura educativa a nivel nacional. Desde el 2014 el Banco Mundial ha prestado asistencia técnica a MINEDU para el análisis de dichos resultados, el diseño de un programa de reducción de la vulnerabilidad sísmica y la formulación del Plan Nacional de Infraestructura Educativa.

Este reporte presenta la evaluación del riesgo sísmico de la infraestructura educativa a nivel nacional y la estrategia para la reducción de su vulnerabilidad. Hace parte de los resultados principales de un programa financiado por el gobierno de Japón y el GFDRR cuyo objetivo principal es integrar la gestión de riesgo de desastre en los sectores de infraestructura. Por primera vez Perú cuenta con un análisis cuantitativo de potenciales daños y pérdidas en la red de infraestructura escolar en el país en caso de terremoto y con una estrategia de reducción de riesgo. Considerando el reto que representa para el Perú la necesidad de intervenir en decenas de miles de edificios escolares, bien sea para reforzamiento estructural o remplazo, el presente estudio constituye un ejemplo de enfoque, metodología y diseño de una estrategia de reducción del riesgo sísmico que sirve de modelo para otros países con condiciones similares.

TABLA DE CONTENIDO

PRESENTACIÓN	i
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	1
1.3 OBJETIVOS DE LA ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO	2
1.4 ALCANCE Y LIMITACIONES	2
2. SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA	4
2.1 GENERALIDADES	4
2.2 COMPONENTES DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO	4
2.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DEL PERÚ	5
3. AMENAZA SÍSMICA	7
3.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE	7
3.2 AMENAZA SISMICA EN TERRENO FIRME	7
3.3 EFECTOS LOCALES DEL SUELO	9
4. EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD	12
4.1 CONSISTENCIA Y COMPLETITUD DE LA INFORMACIÓN	12
4.2 BASE DE DATOS DE EXPOSICIÓN	13
4.2.1 Ubicación geográfica del local escolar	13
4.2.2 Escenario educativo	14
4.2.3 Amenaza sísmica según normativa peruana	15
4.2.4 Antigüedad de la construcción	16
4.2.5 Ejecutor de la obra	17
4.2.6 Altura de la edificación	18
4.2.7 Área construida	19
4.2.8 Sistemas estructurales y tipologías constructivas	20
4.2.9 Uso de la edificación	24
4.2.10 Número de estudiantes beneficiados	25
4.3 VALOR ECONÓMICO DE REPOSICIÓN DEL PORTAFOLIO	25
4.4 VULNERABILIDAD DE LAS TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS	29
4.4.1 Funciones de vulnerabilidad para el análisis	29
4.4.2 Asignación de funciones de vulnerabilidad a tipologías constructivas	31

5. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO	33
5.1 INTRODUCCION	33
5.2 RESULTADOS BASICOS DE LA EVALUACIÓN RIESGO	34
5.3 CATEGORIZACION DE TIPOLOGIAS CONSTRUCTIVAS SEGÚN EL NIVEL DE RIESGO	39
6. ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO	40
6.1 PROCESO PARA DEFINIR LA ESTRATEGIA	40
6.2 DEFINICIÓN DE INTERVENCIONES SEGÚN TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS	40
6.3 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE LAS INTERVENCIONES	41
6.3.1 Costo total estimado	41
6.3.2 Costo de las intervenciones para un programa de reducción del riesgo sísmico a 10 años	43
6.4 ESTRATEGIA DE INTERVENCIÓN PRIORIZADA A 10 AÑOS	43
6.5 PRIORIZACIÓN DE LOCALES ESCOLARES POR SUBPROGRAMAS DE INTERVENCIÓN	48
6.6 DESAGREGACION DE INTERVENCIONES POR REGIONES	51
7. CONCLUSIONES	57
REFERENCIAS	59
ANEXO 6.1	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1	Esquema general del análisis del riesgo probabilista	4
Figura 3-1	Mapas probabilistas de amenaza sísmica	7
Figura 3-2	Espectro de respuesta representativo para Lima, Arequipa, Trujillo, Chiclayo, Pisco e Iquitos según el archivo .AME de referencia para un periodo de retorno de 500 años amortiguamiento con respecto al crítico del 5%	8
Figura 3-3	Mapa de amenaza sísmica, versión 2016	8
Figura 3-4	Espectros de amplificación finales para los ocho tipos de suelo definidos	10
Figura 3-5	Clasificación de los suelos del Perú según metodología V_{S30}	11
Figura 4-1	Interfaz principal del software de visualización y ajuste de la información de la base de datos	13
Figura 4-2	Distribución del total de edificaciones escolares por departamento	14
Figura 4-3	Distribución de edificaciones escolares según escenario educativo	15
Figura 4-4	Distribución de edificaciones escolares según amenaza sísmica de la normativa	16
Figura 4-5	Distribución de edificaciones escolares según la antigüedad asignada en el CIE	17
Figura 4-6	Distribución de edificaciones escolares según el ejecutor de la obra asignado en el CIE	18
Figura 4-7	Distribución de edificaciones escolares según la altura de la edificación asignada en el CIE	19
Figura 4-8	Distribución de edificaciones escolares según rangos de área de techo	20
Figura 4-9	Distribución de edificaciones escolares según el sistema estructural asignado en el CIE	22
Figura 4-10	Diagrama de flujo para la asignación de la tipologías constructivas	23
Figura 4-11	Distribución de edificaciones escolares según la tipologías constructiva	24
Figura 4-12	Valor económico de reposición según tipología constructiva	27
Figura 4-13	Mapa de valores de reposición de edificaciones escolares por departamento	28
Figura 4-14	Funciones de vulnerabilidad para edificaciones de baja altura	30
Figura 4-15	Funciones de vulnerabilidad para edificaciones de altura media	31

Figura 5-1	Curva de pérdidas máximas probables, PMP, para el portafolio de exposición nacional	34
Figura 5-2	Pérdida anual esperada total y promedio por tipología constructiva para el portafolio de exposición nacional	36
Figura 5-3	Pérdida anual esperada por escenario educativo	37
Figura 5-4	Distribución geográfica de pérdidas anuales esperadas físicas directas por departamento	38
Figura 5-5	Distribución geográfica de pérdidas anuales esperadas por departamento	38
Figura 6-1	Brecha total según subprogramas	43
Figura 6-2	Plan de intervención de edificaciones según subprograma de intervención, zona de amenaza sísmica y escenario educativo	45
Figura 6-3	Plan de intervención de edificaciones según subprograma de intervención, zona de amenaza sísmica y escenario educativo para el programa a 10 años	46
Figura 6-4	Costos de intervención según los Subprogramas y el tipo de intervención	47
Figura 6-5	Número de locales escolares intervenidos según monto de inversión	49
Figura 6-6	Número de estudiantes beneficiados según número de locales escolares intervenidos	49
Figura 6-7	Reducción porcentual de la PAE según número de locales escolares intervenidos	50
Figura 6-8	Comparación de resultados para Lima y Amazonas	53-56

LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1	Rangos de pendientes para clasificación de suelos según Wood y Allen (2009)	9
Tabla 4-1	Sistemas estructurales definidos en el CIE	21
Tabla 4-2	Usos especificados para las edificaciones del CIE	25
Tabla 4-3	Valores promedio representativos de exposición de edificaciones escolares en el Perú (año 2015)	26
Tabla 4-4	Resumen del portafolio de exposición de edificaciones escolares	28
Tabla 4-5	Tipologías constructivas y funciones de vulnerabilidad definidas	30
Tabla 5-1	Pérdida anual esperada y pérdidas máximas probables para el portafolio de exposición nacional	34
Tabla 5-2	Pérdidas anuales esperadas de los locales escolares críticos del portafolio de exposición nacional	35
Tabla 5-3	Pérdida anual esperada por tipología constructiva para el portafolio de exposición nacional	35
Tabla 6-1	Posibles tipos de intervención estructural	41
Tabla 6-2	Resumen del costo total de las intervenciones	42
Tabla 6-3	Resumen del portafolio de exposición de edificaciones escolares	44
Tabla 6-4	Resumen de las intervenciones recomendadas para cada tipo de edificación	44
Tabla 6-5	Resumen de la brecha financiera para el programa a 10 años de reducción del riesgo sísmico	47
Tabla 6-6	Valoración de intervenciones por departamento	51
Tabla 6-7	Priorización de locales escolares para Amazonas	52
Tabla 6-8	Desagregación de edificaciones de locales escolares priorizados en Amazonas	52

ACRÓNIMOS

780-POST	Módulo 780 u otro módulo similar construido después de 1998
780-PRE	Módulo 780 construido con anterioridad a 1998
A	Sistema estructural de Adobe
AAL	<i>Average annual loss</i> (pérdida anual esperada, PAE)
AC	Albañilería confinada o armada
APAFA	Asociación de Padres de Familia
APD	Edificaciones con alto potencial de daño
AP y/o PROV	Aulas provisionales
ARC	Edificaciones con alto riesgo de colapso
ASC	Albañilería sin confinar
BDS	Edificaciones con buen desempeño sísmico
CAPRA	Plataforma para la evaluación probabilista del riesgo
CIE	Censo de Infraestructura Escolar
CP y/o P	Construcciones precarias (triplay, quinchá, tapial, similares)
DEM y/o MED	<i>Digital elevation model</i> (modelo de elevación digital)
DIGEIE	Dirección General de Infraestructura Educativa
EA	Estructura de acero
FEMA	<i>Federal Emergency Management Agency</i>
GUE	Gran unidad escolar
INDECI	Instituto Nacional de Defensa Civil
INEI	Instituto Nacional de Estadística Informática
LEC y/o CEP	<i>Loss exceedance curve</i> (curva de excedencia de pérdidas)
M	Sistema estructural de madera (normalizada)
MINEDU	Ministerio de Educación
NEHRP	<i>National Earthquake Hazards Reduction Program</i>
NR	Sin asignar
OINFE	Oficina de Infraestructura Educativa
ONG	Organización no gubernamental
PAE	Pérdida anual esperada
PCA	Pórticos de concreto armado y muros de albañilería (dual)
PCM	Pórticos de concreto resistentes a momento
PML	<i>Probable maximum loss</i> (pérdida máxima probable)
PRONIED	Programa Nacional de Infraestructura Educativa
PUCP	Pontificia Universidad Católica de Perú
RNE	Reglamento Nacional de Edificaciones
SE	Sistema estructural
SIFE	Software de inspección fotográfica para locales escolares
SIRAD	Sistema de Información de Recursos para Atención de Desastres
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UGEL	Unidad de Gestión Educativa Local
UNIANDÉS	Universidad de los Andes de Bogotá, Colombia

GLOSARIO

Amenaza sísmica: Es la probabilidad de que se presente un fenómeno natural potencialmente dañino, en este caso un evento sísmico.

Aulas provisionales: Las aulas provisionales hacen referencia a infraestructuras de orden temporal de material desarmable. No se debe confundir este nombre con el dado en Lima al plan de sustitución y uso de “aulas provisionales” que presentan un mejor desempeño sísmico.

Brecha financiera: Es el monto de inversión requerido para alcanzar los objetivos planteados en un proyecto dado.

Cédula censal: Corresponde al número de identificación de los locales escolares censados de acuerdo con el CIE.

Curva de probabilidad de excedencia de pérdidas: Representa las pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno considerados o frecuencias anuales de excedencia.

Edificación sismo resistente: Edificación que cumple con la totalidad de los lineamientos de la norma sismo resistente y por ende presentaría un buen desempeño sísmico.

Efectos de sitio: Es la amplificación de la respuesta espectral de una señal sísmica debido a las características del suelo en la zona de estudio.

Elementos no estructurales: Elementos de la edificación que no hacen parte del sistema principal de resistencia de cargas verticales u horizontales. Corresponden a fachadas, muros divisorios, cielo rasos, líneas de servicios y otras instalaciones de la edificación. Estos deben ser diseñados para soportar la demanda sísmica (aceleración, desplazamiento u otros) impuesta por la estructura principal.

Escenario educativo: Es una categorización de los locales escolares en diferentes escenarios dependiendo de las características demográficas de la región donde se encuentre el local y a su cercanía con centros urbanos. Se contemplan cinco posibles categorías: grandes ciudades, ciudades capitales, centros urbanos, pueblos conectados y comunidades dispersas.

Evaluación probabilista del riesgo sísmico: Se refiere a la integración de la amenaza con la vulnerabilidad sísmica de los elementos expuestos, de forma que se obtiene la probabilidad de ocurrencia de niveles de pérdidas asociadas a eventos sísmicos en una región determinada.

Funciones de vulnerabilidad sísmica: Funciones que relacionan el daño medio esperado en una estructura individual con la intensidad del evento sísmico. En el presente caso se utiliza la aceleración espectral al periodo estructural estimado como el parámetro de intensidad.

Local escolares: corresponde a la agrupación geográfica de varias edificaciones escolares públicas en un solo lote de terreno y que incluye edificaciones de varios usos (educativo, administrativo, baños, cocinas, etc.).

Microzonificación sísmica: Es un estudio de amenaza donde se analiza la respuesta sísmica de diferentes lugares de una ciudad o región pequeña, agrupando en micro-zonas los lugares con características similares en función de las características geológico-geotécnicas de la misma y especificando en cada una de ellas el espectro de diseño sismo resistente para varias condiciones estructurales y de periodos de retorno.

Nivel de código: Evalúa el nivel o grado de cumplimiento de los requerimientos de diseño y construcción de la normativa vigente de la edificación bajo consideración.

PAE (pérdida anual esperada): Es la suma del producto entre las pérdidas esperadas para un conjunto estocástico de escenarios sísmicos y la frecuencia anual de ocurrencia de cada uno. En términos probabilistas, la PAE es la esperanza matemática de la pérdida anual.

Portafolio de exposición: Base de datos de los componentes o activos que pueden ser afectados por la amenaza.

Reforzamiento incremental: Reforzamiento de la edificación para prevenir el colapso y proteger la vida de los ocupantes. Se requiere más de una etapa para cumplir a cabalidad los objetivos integrales del reforzamiento sísmico de edificaciones tal como lo establecen los reglamentos de diseño.

Reforzamiento integral: Reforzamiento de la edificación en una única etapa en la cual se logra a cabalidad el cumplimiento de los objetivos integrales de los reglamento de diseño. Implica un mayor esfuerzo económico y un mayor tiempo de interrupción del uso de la edificación.

Riesgo: Es la probabilidad de daño o pérdidas de los elementos expuesto frente a una amenaza.

Sistema estructural: Sistema de elementos diseñados para soportar las cargas (verticales o sísmicas) a las que se verá sometida la edificación en su vida útil.

Sustitución: Demolición y reconstrucción total de edificaciones con alto riesgo de colapso.

Tipología constructiva 780: Módulo educativo típico utilizado en el Perú con luces de 7.80 m en sentido transversal, que generalmente tienen dos pisos y tres aulas educativas por piso. Este tipo de estructuras fueron inicialmente construidas por intermedio del Instituto Nacional de Infraestructura Educativa (INFES). Posteriormente, esta tipología fue adaptada por las demás instituciones del Estado para la construcción de infraestructura escolar. Por estos motivos, este tipo de edificaciones han sido construidas antes de la realización del código de diseño sismo resistente de 1998 (a las cuales se les denomina en adelante como 780-PRE) en cuyo caso presentan problemas de columna corta, o después de dicha norma (a las cuales se les denomina en adelante como 780-POST).

Tipología constructiva: Grupos de edificaciones que reúnen características similares en su sistema estructural, tanto en los materiales como en la geometría de elementos, para efectos de la calificación de su vulnerabilidad.

Valor de reposición: Valor del elemento expuesto equivalente al costo de reponer dicho elemento por uno nuevo.

Vulnerabilidad sísmica: Es la susceptibilidad de componentes expuestos específicos a ser afectados de alguna manera por la amenaza sísmica. Se representa usualmente por medio de las funciones de vulnerabilidad sísmica o alternativamente por funciones de fragilidad.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El Ministerio de Educación de Perú (MINEDU), a través de la Dirección General de Infraestructura Educativa (DIGEIE), viene formulando el Plan Nacional de Infraestructura Educativa (PNIE). En el marco de dicho esfuerzo, encargó al Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) la ejecución del Censo de Infraestructura Educativa (CIE) [1] el cual se inició en septiembre del 2013 y se entregó en el año 2014.

El análisis de resultados de la información que ha sido recogida por el CIE constituye la base para el desarrollo del PNIE en relación al establecimiento de una línea base de trabajo, la definición de las medidas de intervención para el mejoramiento de la infraestructura en el ámbito urbano y rural y la priorización de acciones en el corto, mediano y largo plazo. Todo esto con el fin de contribuir a un mejor planeamiento, eficiencia y sostenibilidad del desarrollo de la infraestructura escolar del país.

En ese sentido, MINEDU solicitó al Banco Mundial asistencia técnica para el análisis de los resultados del CIE, el diseño de una estrategia o programa de reducción de vulnerabilidad sísmica y la formulación del PNIE. En el marco de este programa se desarrollaron diferentes iniciativas y estudios que incluyen los siguientes:

- El estudio de las edificaciones escolares en Lima Metropolitana y Callao desarrollado por la Universidad de los Andes (Colombia) bajo la coordinación y dirección del Banco Mundial por pedido del MINEDU [2].
- La complementación y revisión de la base de datos completa del CIE con base en los archivos fotográficos disponibles.
- Recopilación y documentación de información de costos de construcción y costos y metodologías de reforzamiento de estructuras escolares en diferentes ubicaciones del Perú.
- Recopilación de reportes realizados en estudios similares de evaluación de tipos de intervención y otros documentos relacionados con la reducción del riesgo sísmico en el Perú.

Con base en esta documentación de referencia se desarrolla la evaluación probabilista del riesgo sísmico de la infraestructura educativa a nivel nacional, lo cual constituye la base para definir la estrategia de reducción del riesgo sísmico y establecer las prioridades de intervención, como componentes fundamentales en el PNIE. Este documento presenta un resumen ejecutivo técnico de dicho estudio el cual fue realizado por la Universidad de los Andes (Colombia) bajo la coordinación y dirección del Banco Mundial.

1.2 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El objetivo principal del estudio consiste en llevar a cabo la evaluación del riesgo sísmico de la infraestructura educativa del Perú a nivel nacional, con base en lo cual se definan las estrategias de reducción del riesgo y se establezcan las prioridades de intervención con miras a optimizar las inversiones futuras que permitan una reducción efectiva de la vulnerabilidad de las edificaciones del sector. La evaluación del riesgo por otras amenazas naturales tales como inundaciones o deslizamientos no hace parte del alcance del presente estudio.

Los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

- a) Complementar la información de amenazas para tener en cuenta de manera simplificada los efectos de sitio generados por condiciones geotécnicas esperadas en los diferentes tipos de suelo en el país.
- b) Mejorar la base de datos de exposición con base en la información del CIE de 2013 utilizando para tal efecto las fotografías recopiladas por el INEI y los resultados de las diferentes inspecciones de campo realizadas por la Universidad de los Andes.
- c) Mejorar la clasificación de tipologías constructivas con el fin de tener en cuenta la vulnerabilidad de cada una de ellas y las posibles medidas de intervención que pudiesen considerarse.
- d) Generar información del riesgo sísmico de la infraestructura educativa pública del país con el fin de cuantificarlo, entenderlo y conocer su distribución geográfica.
- e) Plantear una estrategia de intervención a nivel nacional y regional, proponer criterios de optimización y cuantificar el monto de las inversiones requeridas para una reducción efectiva de la vulnerabilidad de las edificaciones del sector.
- f) Proponer una metodología para la priorización de las intervenciones en locales escolares de manera que se maximice la reducción del riesgo optimizando los recursos disponibles por regiones.

1.3 OBJETIVOS DE LA ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

La estrategia para la reducción del riesgo de la infraestructura educativa del Perú se diseña para cumplir con los siguientes objetivos específicos y prioridades:

- 1) Reducir el riesgo de muerte o heridas en la comunidad educativa por eventos sísmicos (maximizando el número de estudiantes beneficiados).
- 2) Reducir los daños en la infraestructura y proteger la propiedad.
- 3) Reducir la interrupción del servicio educativo.

En consecuencia se definen las siguientes prioridades en relación a la afectación directa de la infraestructura educativa:

- a) Disminuir el número de edificaciones con alta probabilidad de colapso.
- b) Intervenir en las edificaciones con alto potencial de daño.

1.4 ALCANCE Y LIMITACIONES

En la realización del presente estudio, se tienen las siguientes limitaciones:

- a) El presente informe fue desarrollado utilizando la información más reciente posible de amenaza, de exposición y de vulnerabilidad de las tipologías principales que hacen parte de la base de datos para evaluación del riesgo sísmico del país. Los análisis se basan en el mejor criterio de experto para la estimación de los parámetros requeridos para lo cual se utiliza la información secundaria disponible.

- b) Los análisis desarrollados permiten estimar las pérdidas económicas esperadas asociadas a los eventos sísmicos probables y a la vulnerabilidad de las edificaciones de la infraestructura educativa del Perú. Estos resultados solo pueden utilizarse para efectos del diseño de la estrategia de intervención que se presenta y no deben utilizarse para otras aplicaciones diferentes.
- c) Los tipos de intervención, seleccionados según la vulnerabilidad reconocida en las edificaciones y el orden de priorización que permite optimizar las intervenciones, permiten cuantificar el monto total de inversión requerida para la disminución del riesgo sísmico y la toma de decisiones respecto a la cantidad posible de edificaciones escolares públicas a intervenir.
- d) La base de datos tomada a partir de la información del CIE contiene limitaciones en cuanto a: precisión de parámetros (por ejemplo, áreas de edificaciones), clasificación de tipologías estructurales y completitud en ciertos locales escolares, principalmente.
- e) Los efectos de sitio considerados para la evaluación de la amenaza sísmica en la superficie del terreno se lleva a cabo con métodos simplificados indirectos. Para el presente estudio no se han tenido en cuenta los estudios de microzonificación sísmicas disponibles para algunas de las ciudades principales del Perú, debido a que no existen para todas las ciudades y estos no han sido validados ni armonizados a nivel nacional, lo cual generaría importantes desviaciones del resultado esperado.
- f) La estimación del riesgo posterior a una posible intervención estructural en la infraestructura educativa se ha realizado considerando un comportamiento sísmico esperado de las edificaciones en función del tipo de intervención recomendada en el presente estudio.
- g) Considerando la resolución del estudio, la calidad de la información disponible y las incertidumbres asociadas, la posterior etapa de implementación deberá incluir la realización de campañas de inspección de campo que permitan validar la información y ajustar el plan de implementación propuesto.

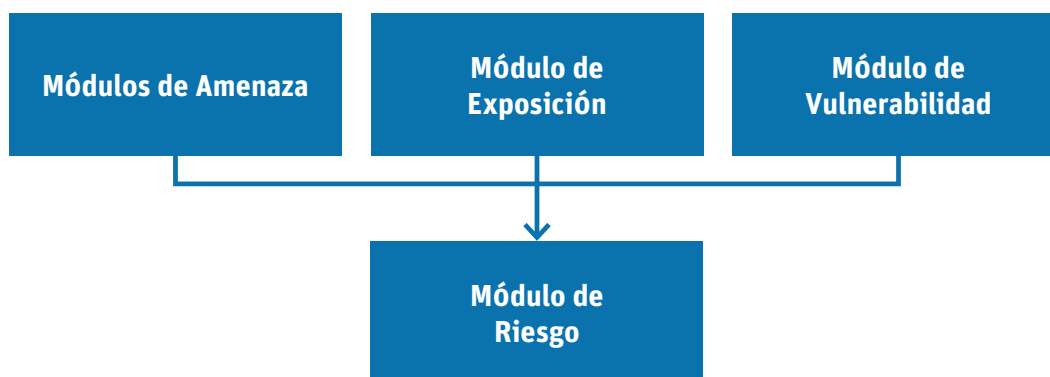
2. SÍNTESIS DE LA METODOLOGÍA

2.1 GENERALIDADES

El presente estudio se centra en la evaluación probabilista del riesgo sísmico de la infraestructura educativa pública del Perú. Para esto se requiere cuantificar la amenaza sísmica en el área de estudio, conocer en detalle los componentes expuestos y su valor de reposición, y contar con información detallada sobre la vulnerabilidad sísmica de las tipologías constructivas dominantes.

La estimación del riesgo probabilista considera el conjunto de todos los posibles eventos que pueden ocurrir en el futuro. Debido a las altas incertidumbres inherentes a los modelos de análisis con respecto a la severidad y a la frecuencia de ocurrencia de los eventos, los modelos probabilistas incorporan dicha incertidumbre en la evaluación del riesgo. El modelo de riesgo probabilista, construido a partir de una secuencia de componentes, cuantifica las pérdidas potenciales tal como se ilustra en la figura 2-1. La referencia [2] presenta la metodología detallada para el análisis del riesgo debido a eventos sísmicos.

Figura 2-1 Esquema general del análisis del riesgo probabilista



2.2 COMPONENTES DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

Los principales componentes de una evaluación probabilista del riesgo son los siguientes:

- a) Amenaza sísmica: Se representa mediante mapas de distribución de parámetros de intensidad sísmica como son la aceleración máxima del terreno o las aceleraciones espectrales para diferentes periodos de vibración estructural y un amortiguamiento estructural específico. La amenaza sísmica debe incluir en lo posible los efectos de la respuesta dinámica de los depósitos de suelo en cada ubicación particular lo que puede generar cambios importantes en las amplitudes máximas, contenido frecuencial y duración de las señales. Los mapas de intensidad se evalúan para un conjunto suficientemente completo de posibles eventos que pueden llegar a ocurrir en la zona de influencia teniendo en cuenta los rangos de magnitudes posibles en las diferentes fuentes sísmicas y las distancias relativas entre estas y las construcciones a analizar. Cada evento se caracteriza además con la frecuencia media anual de ocurrencia que se obtiene con base en el análisis de

la frecuencia de eventos históricos. La información de amenaza se agrupa y maneja con base en archivos digitales tipo AME (.ame de amenaza bajo el software de modelamiento CAPRA [3]) que contiene los mapas de parámetros de intensidad para cada uno de los escenarios estocásticos definidos. Para este caso el parámetro de intensidad de amenaza sísmica seleccionado corresponde a la máxima aceleración espectral para una serie de periodos estructurales elegidos para todas las ubicaciones geográficas.

- b) Base de datos de exposición: Se hace necesario conformar una base de datos geo-referenciada de las edificaciones expuestas que pueden llegar a sufrir daño por la ocurrencia de los eventos sísmicos mencionados. La información se almacena en archivos con formato tipo “shape” y debe contener como mínimo los siguientes campos: identificación, localización geográfica, valor de reposición y función de vulnerabilidad sísmica asociada. Adicionalmente y para efectos de calificar la vulnerabilidad de cada componente se hace necesario contar con información relacionada con el tipo estructural, la altura, el nivel de diseño sismo-resistente, la calidad del diseño y de la construcción e información complementaria de cada edificación escolar.
- c) Información de vulnerabilidad: Se representa por medio de funciones que relacionan el daño o pérdida esperada en porcentaje y la intensidad sísmica seleccionada (aceleración espectral para cada edificación). Estas funciones de vulnerabilidad representan el comportamiento esperado de las edificaciones de cada tipo estructural particular, por lo que su uso es adecuado en términos estadísticos cuando existe un inventario amplio de activos expuestos. Cada función de vulnerabilidad está definida por un valor medio de daño y su varianza, con lo cual es posible estimar la función de probabilidad de las pérdidas respectivas.
- d) Módulo de riesgo: Este módulo realiza la integración de la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de evaluar el riesgo que se representa mediante diferentes parámetros indicativos del nivel de daño, impactos físicos y afectación general a la infraestructura o a los ocupantes de la misma. Una vez estimado el daño físico esperado (valor potencial promedio y su dispersión) en porcentaje o en valor absoluto para cada una de las edificaciones expuestas, es posible realizar estimativos de diferentes parámetros o métricas útiles para el análisis propuesto tales como la curva de excedencia de pérdidas (LEC o loss exceedance curve en inglés), la pérdida anual esperada, PAE, en términos absolutos o relativos y las pérdidas máximas esperadas en términos absolutos o relativos.

La evaluación del riesgo con técnicas probabilistas con el enfoque tipo CAPRA está ampliamente documentado. Las referencias [3], [4], [5] y [6] presentan en detalle las bases metodológicas de los procedimientos empleados en el presente estudio.

2.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL CASO DEL PERÚ

La aplicación de la metodología mencionada para la evaluación del riesgo en la infraestructura escolar del Perú incluye los siguientes aspectos:

- a) Amenaza sísmica: Se basa en la información disponible y las evaluaciones realizadas en estudios previos (ver [2] y [7]) complementados con evaluaciones aproximadas de efectos de sitio a nivel nacional como se presenta en el sección 3.3.

- b) Base de datos de edificaciones: Se basa en la información disponible del Censo de Infraestructura Escolar [1], la cual incluye la siguiente información específica: área construida, número de pisos, sistema estructural, ejecutor de la obra, antigüedad de la construcción y ubicación geográfica.
- c) Análisis de costos de reposición a nuevo: Se evalúa para la infraestructura escolar según el nivel educativo, la ubicación geográfica y la zona bioclimática. Este valor corresponde aproximadamente al valor de reposición en caso de afectación parcial o total y fue definido con base en información proporcionada por expertos locales.
- d) Funciones de vulnerabilidad: Los diferentes tipos constructivos identificados en las zonas críticas de estudio se caracterizan mediante una función de vulnerabilidad que da cuenta de la capacidad de las edificaciones para resistir la acción sísmica en los diferentes eventos considerados. Para el caso del Perú se ha utilizado información pre-existente de la vulnerabilidad de las tipologías constructivas típicas [8] [9], modificada con base en los criterios de especialistas del estudio para tener en cuenta las prácticas constructivas y calidad de la construcción típica del Perú [10]. La asignación de la función de vulnerabilidad a cada uno de los componentes de la base de datos de exposición se realiza directamente sobre la información de exposición.
- e) Evaluación del riesgo: Se evalúa el porcentaje de daños esperado en cada una de las edificaciones expuestas para cada uno de los escenarios planteados y para el análisis probabilista integral. La valoración del riesgo en el caso de la infraestructura escolar del Perú se presenta en términos del porcentaje de afectación física de las edificaciones reportadas en el CIE, las PAE para cada edificación y las pérdidas económicas máximas probables (PML) para el portafolio de edificaciones.

3. AMENAZA SÍSMICA

3.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE

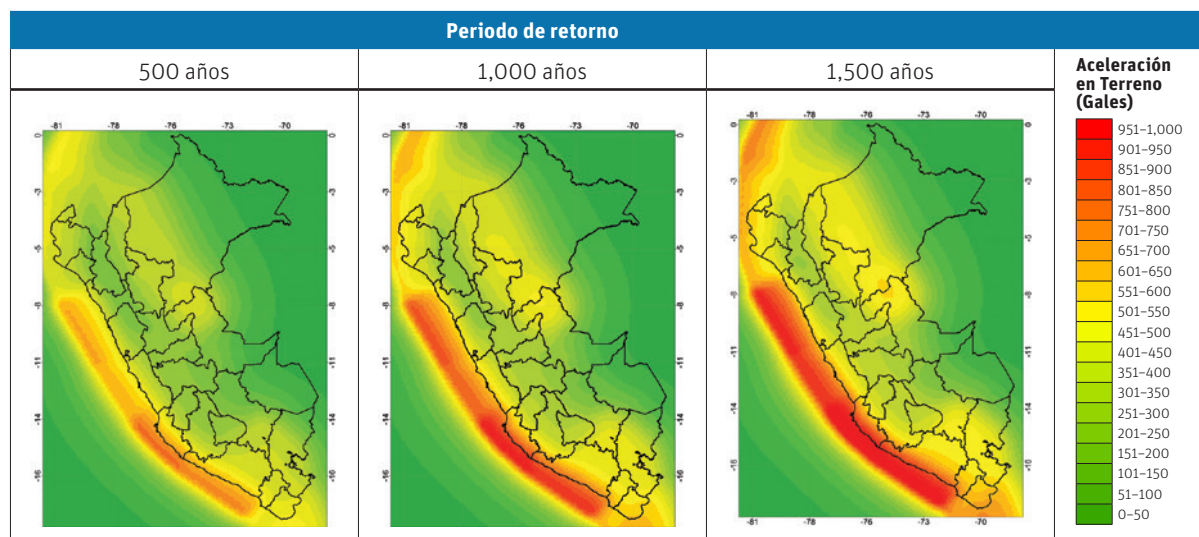
La amenaza sísmica para el presente estudio corresponde a la información disponible en estudios previos [7] y es equivalente a la utilizada en el estudio previo de referencia [2]. La amenaza sísmica a nivel país está representada en un archivo de información con las siguientes características:

- Nombre: *AME-Nacional 31 intensidades*
- Número de escenarios estocásticos: 14,574
- Número de fuentes sismogénicas: 21 fuentes sismogénicas del Perú
- Parámetros de intensidad disponibles: aceleraciones espectrales para los siguientes periodos estructurales de vibración: 0.1 segundos a 3 segundos en incrementos de 0.1 segundos

3.2 AMENAZA SÍSMICA EN TERRENO FIRME

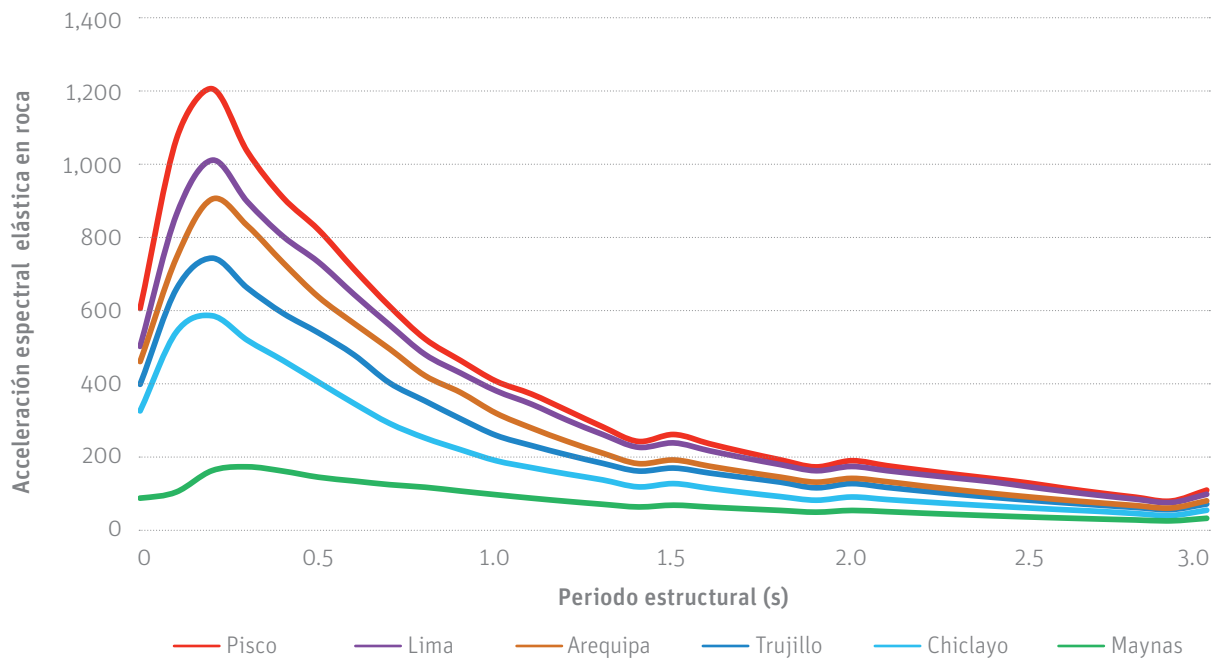
La figura 3-1 presenta los mapas probabilistas de amenaza sísmica obtenidos a partir del archivo de amenaza anterior. Se presentan los mapas de amenaza de aceleración en terreno firme para los periodos de retorno de 500 años, 1000 años y 1500 años.

Figura 3-1 Mapas probabilistas de amenaza sísmica



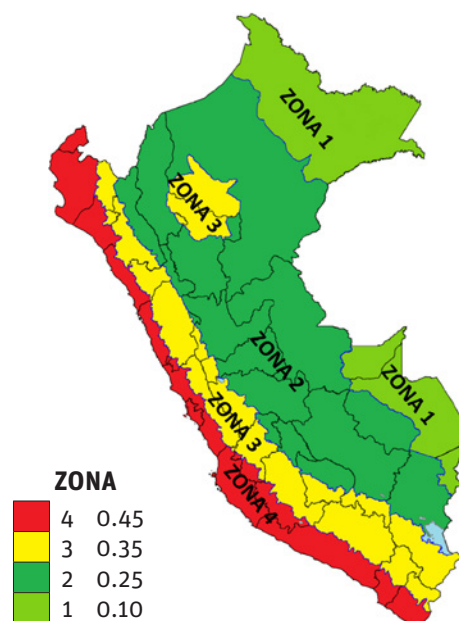
A manera ilustrativa la figura 3-2 presenta el espectro de respuesta para un periodo de retorno de 500 años en puntos representativos central de la ciudades de Lima, Arequipa, Trujillo, Chiclayo, Pisco e Iquitos. El espectro es para un amortiguamiento con respecto al crítico del 5%.

Figura 3-2 Espectro de respuesta representativo para Lima, Arequipa, Trujillo, Chiclayo, Pisco e Iquitos según el archivo .AME de referencia para un periodo de retorno de 500 años amortiguamiento con respecto al crítico del 5%



Por otro lado la figura 3-3 presenta las zonas de amenaza sísmica definidas por el Reglamento Nacional de Edificaciones [11] actualizado en el 2016.

Figura 3-3 Mapa de amenaza sísmica, versión 2016



Nota: Tomado del RNE 2016.

3.3 EFECTOS LOCALES DEL SUELO

La amenaza en roca definida en el sección 3.2 debe modificarse para tener en cuenta los efectos de respuesta dinámica local debida a los depósitos de suelo dominantes en cada ubicación geográfica. Ante las grandes dificultades que tendría una evaluación detallada de este tipo y considerando el posible impacto que esta consideración puede llegar a tener en la evaluación del riesgo sísmico del portafolio de edificaciones del sector escolar del Perú, se decide para el presente estudio considerar estos efectos mediante una metodología aproximada que puede aplicarse a nivel del país.

Para zonificar la respuesta sísmica local de los suelos mediante modelos simplificados, se utilizó la metodología propuesta en la referencia [12]. Esta metodología se basa en la estimación de un valor de la velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 m de profundidad de los depósitos de suelo (V_{s30}) a través de una relación directa con la sismicidad de la zona, la topografía y la pendiente topográfica. La premisa de esta metodología es que la pendiente topográfica puede ser usada como una fuente de información base para la definición del tipo de suelo predominante en una zona de estudio. De esta manera, una vez se realiza la clasificación del suelo se puede definir una velocidad de onda de corte promedio para los primeros 30 m de cualquier ubicación. Este tipo de análisis simplificado es comúnmente aceptado cuando no se cuenta con estudios detallados de las condiciones de sitio basados en información geológica y geotécnica.

La metodología propuesta se basa en el modelo de elevación digital (MED) específicos según su resolución. Para el presente caso se utilizó un modelo de elevación digital SRMT (*Shuttle Radar Topography Mission – SRTM*) con resolución de 30 arcsec (1 km x 1 km aproximadamente), de acuerdo con la recomendación de la literatura.

La clasificación de los suelos se realiza a partir de los rangos definidos en la tabla 3-1.

Tabla 3-1 Rangos de pendientes para clasificación de suelos según Wood y Allen (2009)

Tipo de suelo	Clasificación NEHRP	Rango de V_{s30} (m/s)	Rango de Pendientes (m/m)	
			Tectónica Activa	Tectónicamente estable
1	B	> 760	> 0.14	> 0.025
2	C	620–760	0.10–0.14	0.018–0.025
3		490–620	0.05–0.10	0.013–0.018
4		360–490	0.018–0.05	7.2E-3–0.013
5	D	300–360	0.010–0.018	4E-3–7.2E-3
6		240–300	3.5E-3–0.010	2E-3–4E-3
7		180–240	3E-4–3.5E-3	6E-6–2E-3
8	E	< 180	< 3E-4	< 6E-6

Esta clasificación depende del tipo de sismicidad representativa de cada zona: región tectónica activa y región continental tectónicamente estable. Para clasificar las zonas en uno de estos dos tipos, la metodología simplificada incluye las siguientes recomendaciones:

- Región tectónica activa: Comprende zonas de relieve topográfico dinámico. Se define a partir de una pendiente media de la región mayor a 5%.

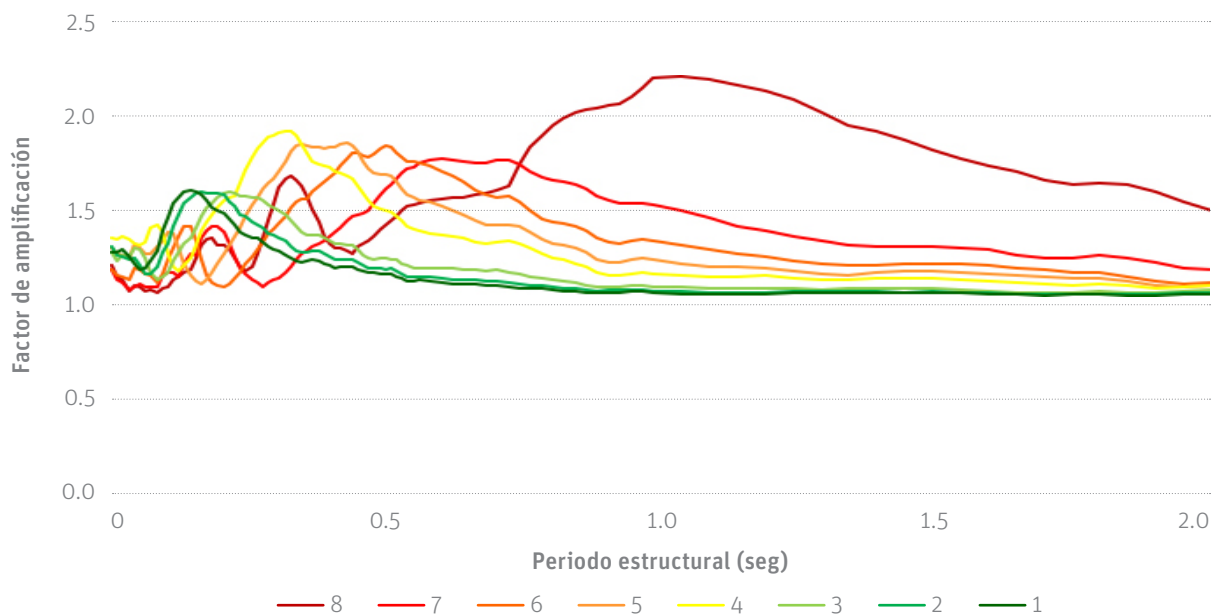
- Región continental estable: Comprende zonas donde la topografía es relativamente baja. Se define a partir de una pendiente media de la región menor a 5%.

Los efectos de amplificación local dados por los depósitos de suelos en las zonas de estudio se especifican mediante un archivo tipo “shape” en el cual se definen las zonas de similar comportamiento sísmico y se define en cada una de ellas los espectros de amplificación en la respuesta dinámica para diferentes intensidades sísmicas de análisis y que consideran el comportamiento no lineal de los suelos.

Por otra parte, para la definición de los factores de amplificación para cada uno de los tipos de suelos se han realizado una serie de análisis de respuesta dinámica no lineal de estratigrafías características considerando como variables aleatorias los siguientes parámetros: las señales sísmicas representativas de la región de análisis, la velocidad de onda del basamento, el perfil de velocidad de onda de corte en los rangos indicados para los tipos de suelos y las variaciones en las propiedades de degradación de resistencia y de amortiguamiento con la deformación de corte de los suelos que conforman el perfil estratigráfico.

La figura 3-4 presenta los factores de amplificación espectral propuestos para cada uno de los tipos de suelos.

Figura 3-4 Espectros de amplificación propuestos para los ocho tipos de suelo definidos



Nota: Los números de la leyenda hacen referencia a los suelos relacionados en la tabla 3-1.

La figura 3-5 presenta el mapa de clasificación de los suelos del Perú obtenidos a partir de la metodología presentada anteriormente.

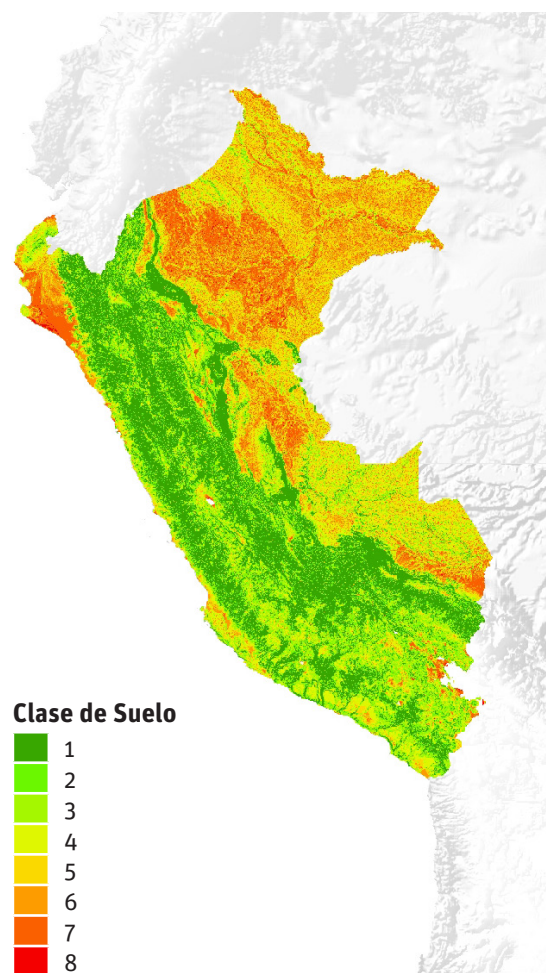
Con esta información el procedimiento de análisis es el siguiente:

- Se selecciona la ubicación de cada edificación.
- Se evalúa la intensidad sísmica en roca para dicha ubicación y para el periodo de vibración fundamental indicado para cada estructura.

- c) Se evalúa el tipo de suelo en que se ubica la edificación según la figura 3-5.
- d) Para el mismo período estructural indicado y según el tipo de suelo evaluado en el ítem anterior, se evalúa el factor de amplificación sísmica por efectos de sitio usando la figura 3-4.
- e) Se evalúa la intensidad sísmica incluyendo efectos locales mediante la multiplicación de la aceleración espectral en roca por el factor de amplificación correspondiente.

Este parámetro se utiliza posteriormente para la evaluación de las pérdidas económicas para cada componente definido en el portafolio de exposición.

Figura 3-5 Clasificación de los suelos del Perú según metodología V_{s30}



Nota: Los números de la leyenda hacen referencia a los tipos de suelos relacionados en la tabla 3-1.

4. EXPOSICIÓN Y VULNERABILIDAD

4.1 CONSISTENCIA Y COMPLETITUD DE LA INFORMACIÓN

En los capítulos VI y VII del CIE [1] se encuentra la información principal utilizada para conformar el portafolio de exposición para la evaluación del riesgo. En estos se presentan las características principales ingenieriles de las edificaciones escolares. Dado que el número de edificaciones y el número de locales escolares varían entre las distintas cédulas censales (ver Glosario), se seleccionó la información que reportará la mayor completitud en los datos consignados. Se hicieron análisis de completitud y consistencia para revisión de los valores consignados en el CIE.

La revisión de la información del CIE permitió identificar deficiencias tales como vacíos en campos o registros específicos, valores anómalos o inadecuados en algunos campos, limitaciones de la ficha censal en cuanto a información estructural de más detalle. Para mejorar esto, se llevó a cabo un proceso de eliminación de registros o campos no confiables y de ajuste en campos específicos que presentaran información inconsistente.

Para agilizar y optimizar la revisión de la información para cada local escolar se desarrolló en el marco del presente estudio un software de visualización y ajuste de la información contenida en la base datos que utiliza principalmente la inspección de las fotografías disponibles. Este software permite revisar de manera visual los datos consignados para cada una de las edificaciones incluidas en un local escolar y la información de las variables relevantes para la evaluación del riesgo. Adicionalmente, permite revisar la totalidad de las fotografías que contiene el CIE, lo que garantiza la máxima consistencia posible de la base de datos con la información disponible.

La figura 4-1 muestra la interfaz principal del software desarrollado.

Figura 4-1 Interfaz principal del software de visualización y ajuste de la información de la base de datos

The screenshot shows the 'IT-Estructuras' software interface. At the top, there's a header with 'Id del Local' set to '665' and 'Municipio' set to 'AMAZONAS'. Below this is a table with the following columns: Edificación, Pisos, Área, Fecha Construcción, Ejecutor de la Obra, SE_CIE, SE_Uniandes, Sistema Estructural, and Comentarios. The table contains five rows of data. Below the table is a gallery of eight photographs showing different views of school buildings and their surroundings. At the bottom right of the gallery, it says '17 - 24 de 34'.

Edificación	Pisos	Área	Fecha Construcción	Ejecutor de la Obra	SE_CIE	SE_Uniandes	Sistema Estructural	Comentarios
1	1	91	después de 1998	gobierno regional / local	pórticos de concreto armado y/o muros de albañilería (dual)	MOD_POST_780	No Hay Modifica	
2	1	15	después de 1998	gobierno regional / local	pórticos de concreto armado y/o muros de albañilería (dual)	MOD_POST_780		
3	1	63	después de 1998	gobierno regional / local	pórticos de concreto armado y/o muros de albañilería (dual)	MOD_POST_780		
4	2	368	antes y durante 1977	apafa / autoconstrucción	construcciones precarias (triplay, quincha, tapial, similares)	PRECARIAS		
5	1	16	antes y durante 1977	apafa / autoconstrucción	construcciones precarias (triplay, quincha, tapial, similares)	PRECARIAS		

Los supuestos consignados para el ajuste de la base de datos consideran el criterio de experto de los distintos grupos de trabajo que participaron en el estudio. Una vez llevados a cabo los procesos de eliminación de registros y de corrección y complementación de información se logró la conformación de una base de datos a nivel nacional con los siguientes registros totales y que constituye la base de exposición para la evaluación del riesgo sísmico:

- Códigos de locales escolares: 40,475
- Edificaciones individuales asignadas a locales escolares: 187,312.

La información recogida para estos 40,475 locales escolares, constituye una importante línea base correspondiente al 92% de los locales escolares registrados en el Ministerio de Educación del Perú en el 2014.

4.2 BASE DE DATOS DE EXPOSICIÓN

4.2.1 Ubicación geográfica del local escolar

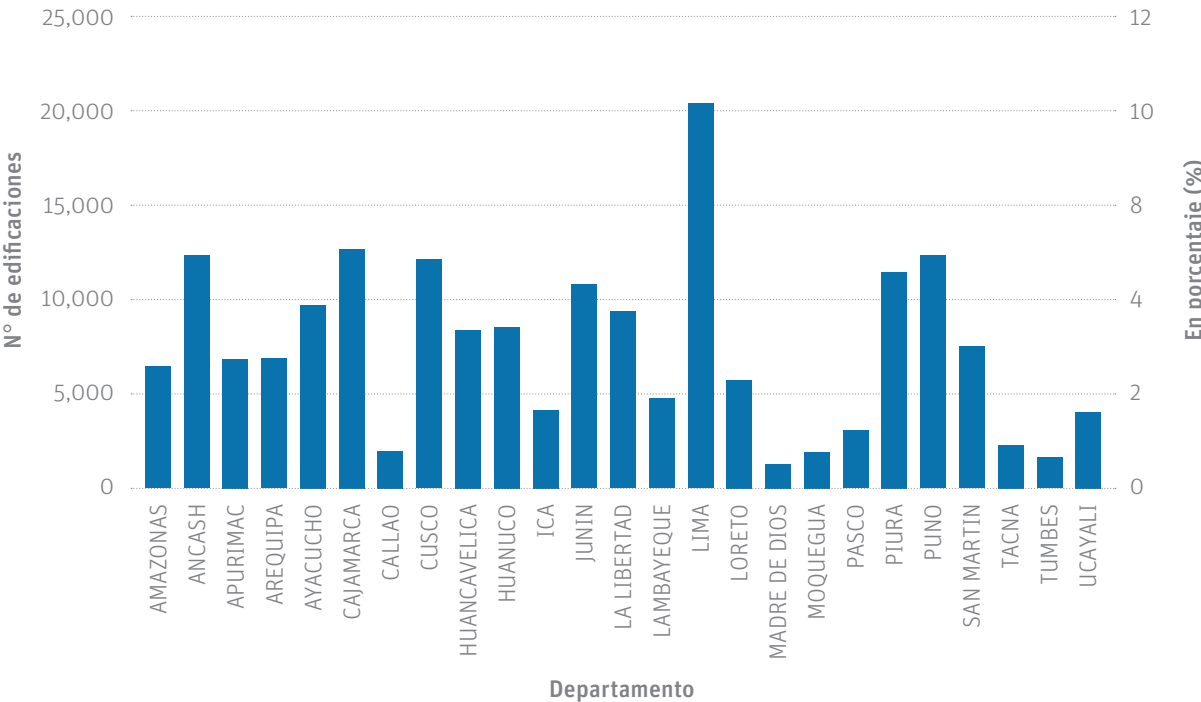
Cada local escolar tiene una única ubicación geográfica (longitud, latitud) para la totalidad de sus edificaciones. La latitud se refiere al ángulo, en grados, de la línea que une a un punto en la superficie terrestre con el centro de la tierra medido desde el ecuador. En el caso de la cedula censal, la latitud del local escolar se mide en el patio central del local o frente al local en caso de no tener acceso al patio central del mismo. La longitud se refiere al ángulo, en grados, de la línea que une a un punto en la superficie terrestre con el centro de la tierra medido a partir del meridiano de Greenwich. En el caso de la cedula censal, la latitud del local escolar se mide en el patio central del local o frente al local en caso de no tener acceso al patio central del mismo.

Otros parámetros de localización son el departamento y la provincia dentro del departamento consignado, en la cual se encuentra ubicado el local escolar.

Con la ubicación geográfica se determinan campos adicionales de la base de datos de exposición, tales como el departamento, el escenario educativo, la zona bioclimática y la zona de amenaza sísmica.

Para la cuantificación y agrupación de resultados por región se ha utilizado la información de “departamento” de cada local escolar consignada en el CIE. La figura 4-2 presenta la distribución total del número de edificaciones por departamento.

Figura 4-2 Distribución del total de edificaciones escolares por departamento



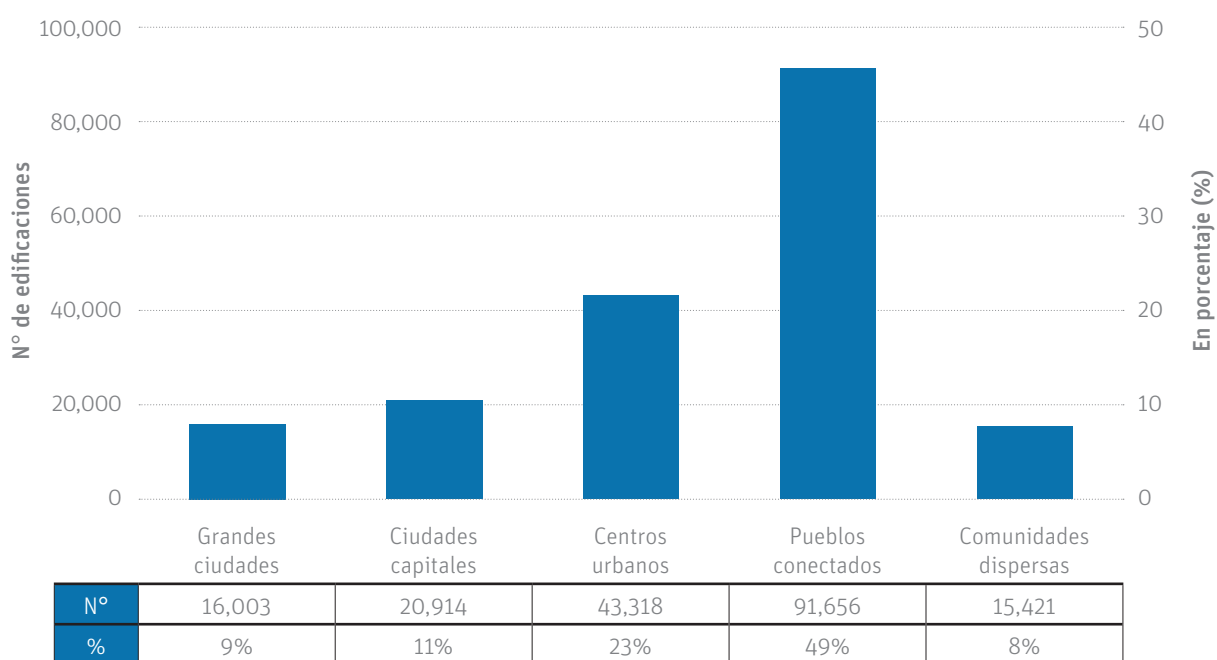
4.2.2 Escenario educativo

Los “escenarios educativos” (Kudo y Székely 2015) hacen referencia a una categorización de los locales escolares en diferentes escenarios dependiendo de las características demográficas de la región donde se encuentre el local y a su cercanía con centros urbanos. Los escenarios educativos se clasifican de la siguiente manera:

- Grandes ciudades: Ciudades con más de 500,000 habitantes al 2015 (Lima metropolitana y Callao).
- Ciudades capitales: Instituciones educativas urbanas en ciudades capitales y algunas ciudades de mayor volumen.
- Centros urbanos: Instituciones educativas urbanas ubicadas en otras ciudades principales, en la capital de provincia, a menos de una hora de la UGEL, o en un centro poblado con más de 200 estudiantes en área urbana.
- Pueblos conectados: Instituciones educativas clasificadas como rurales en distritos que forman parte de una ciudad o en un centro poblado que es capital de provincia o cualquier institución educativa (urbana o rural) que no está en una ciudad o centro urbano y que se ubica a menos de 5 horas de UGEL, tiene 100 o más alumnos, o está en un centro poblado con más de 300 estudiantes.
- Comunidades dispersas: Cualquier institución educativa que se encuentra a 5 o más horas de la UGEL y 2 o más horas del municipio y que no está cerca de una ciudad principal, o que se ubica en distritos con densidad menor a 100 habitantes por km², o que tiene menos de 100 estudiantes y no está conectada a o en una ciudad.

La figura 4-3 presenta la distribución de las edificaciones escolares según el escenario educativo.

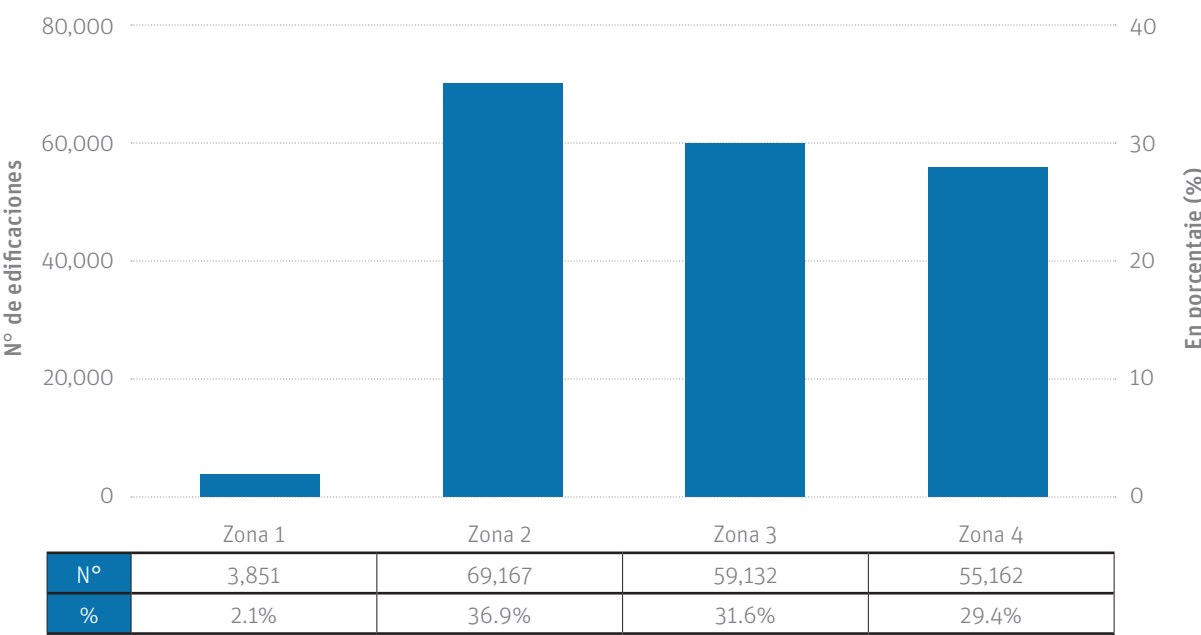
Figura 4-3 Distribución de edificaciones escolares según escenario educativo



4.2.3 Amenaza sísmica según normativa peruana

El Reglamento Nacional de Edificaciones (actualizado en el 2016) [11] contempla cuatro zonas de amenaza sísmica. Se realiza la asignación de la zona de amenaza en la que se ubica cada local escolar según la ubicación geográfica reportada en el CIE. Para el efecto se utiliza el mapa de amenaza sísmica presentado en la figura 4-3. La distribución final de edificaciones según la ubicación en zonas de amenaza sísmica de la normativa se presenta en la figura 4-4. La figura permite concluir que la mayoría de edificaciones escolares se encuentran ubicadas en las zonas sísmicas 2, 3 y 4, y que su distribución es aproximadamente uniforme en estas tres zonas.

Figura 4-4 Distribución de edificaciones escolares según amenaza sísmica de la normativa

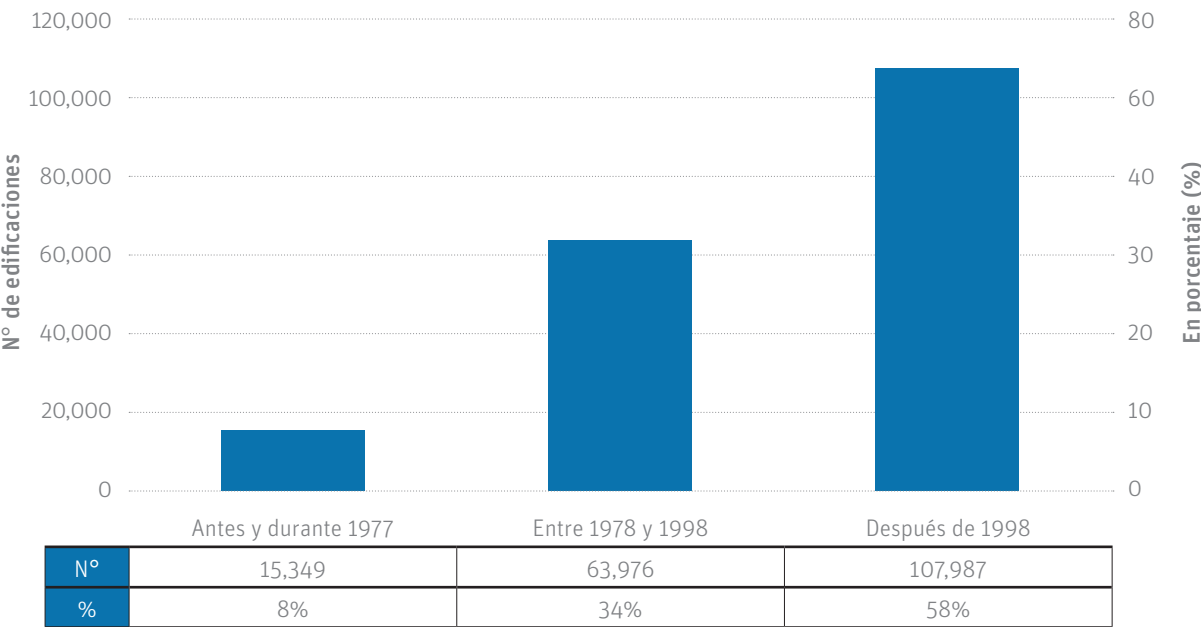


4.2.4 Antigüedad de la construcción

La antigüedad de la construcción se relaciona con el tipo de norma de diseño sismo-resistente al momento de la construcción y por lo tanto define la calidad del diseño y la construcción. Se tienen tres niveles de antigüedad definidas por el CIE: “Antes y durante 1977”, “Entre 1977 y 1998” y “Después de 1998”. Estos niveles, aun cuando comprenden rangos muy amplios de años, permiten reconocer la aparición y posteriores modificaciones de las normas de diseño sismo-resistente del Perú.

La distribución de los elementos expuestos respecto a la antigüedad de la construcción a nivel del país se presenta en la figura 4-5. La figura permite concluir que la mayoría de las construcciones están registradas en el periodo después de 1998.

Figura 4-5 Distribución de edificaciones escolares según la antigüedad asignada en el CIE

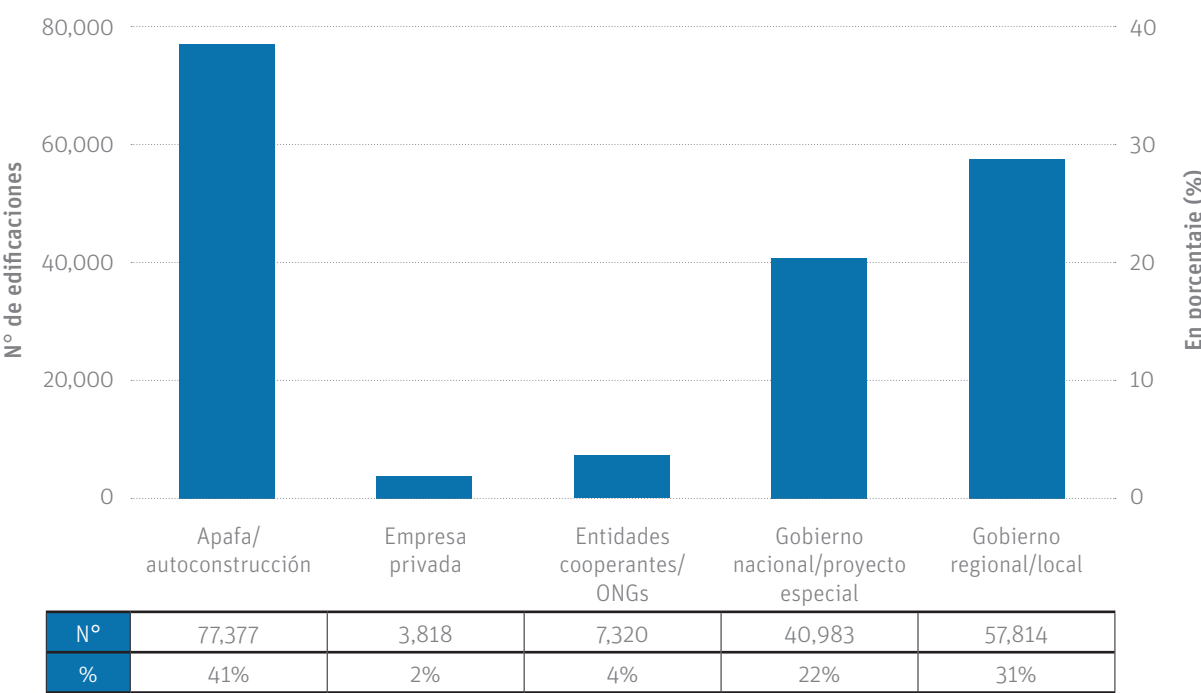


4.2.5 Ejecutor de la obra

El ejecutor de la obra es aquel que desarrolla la organización necesaria para garantizar el proceso y la calidad final de la obra que se está realizando. Este corresponde a otro campo importante para la definición de un nivel de calidad en el diseño y la construcción dado que este parámetro permite identificar las edificaciones en las que se pudo haber tenido supervisión en los procesos de diseño y construcción por parte del Estado. En la verificación del campo “Ejecutor de la Obra” se encontraron cinco posibilidades: gobierno nacional y proyecto especiales, gobierno regional y local, Asociación de Padres de Familia (APAFA) y/o autoconstrucción, entidades cooperantes, ONGs y empresas privadas.

La distribución según el “Ejecutor de la Obra” a nivel nacional se presenta en la figura 4-6.

Figura 4-6 Distribución de edificaciones escolares según el ejecutor de la obra asignado en el CIE

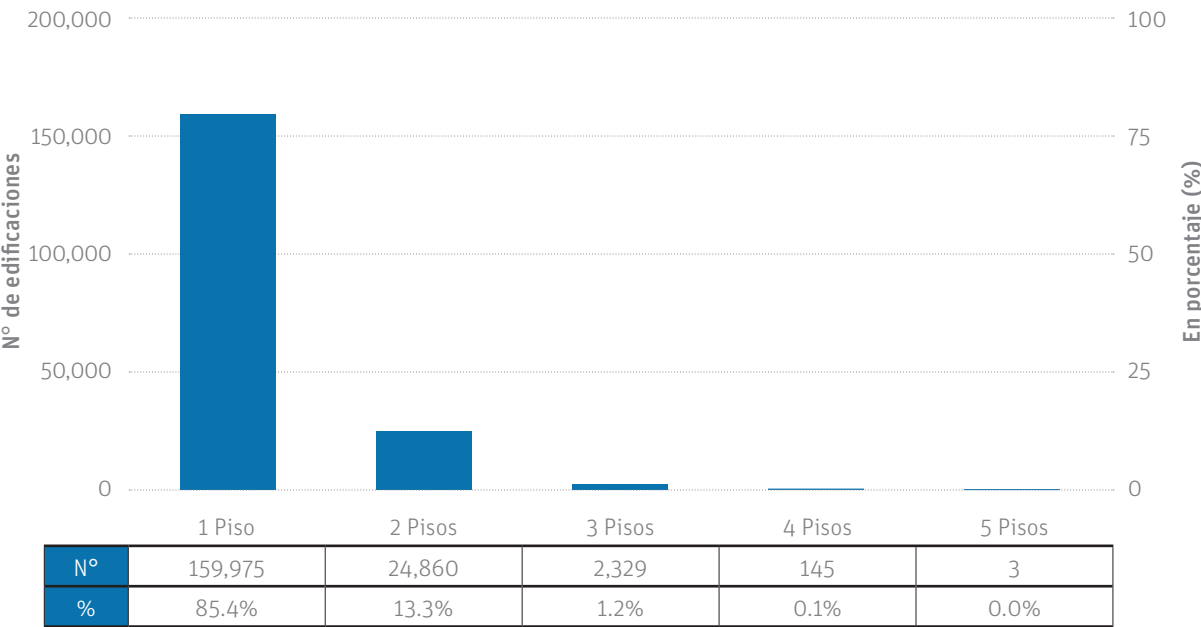


En el presente estudio se ha considerado que las edificaciones con mejor calidad constructiva son aquellas que tienen por ejecutor de la obra al gobierno local y/o gobierno nacional. Se consideró incierta la calidad de la construcción para edificaciones construidas por las APAFAS.

4.2.6 Altura de la edificación

El número de pisos permite diferenciar la vulnerabilidad de edificaciones que presentan un mismo sistema estructural pero que por su altura, presentan un comportamiento dinámico diferente. Se encuentra que a nivel país la mayoría de edificaciones son de uno y dos pisos. La distribución de elementos expuestos según el número de pisos en la base de datos del CIE se presenta en la figura 4-7.

Figura 4-7 Distribución de edificaciones escolares según la altura de la edificación asignada en el CIE

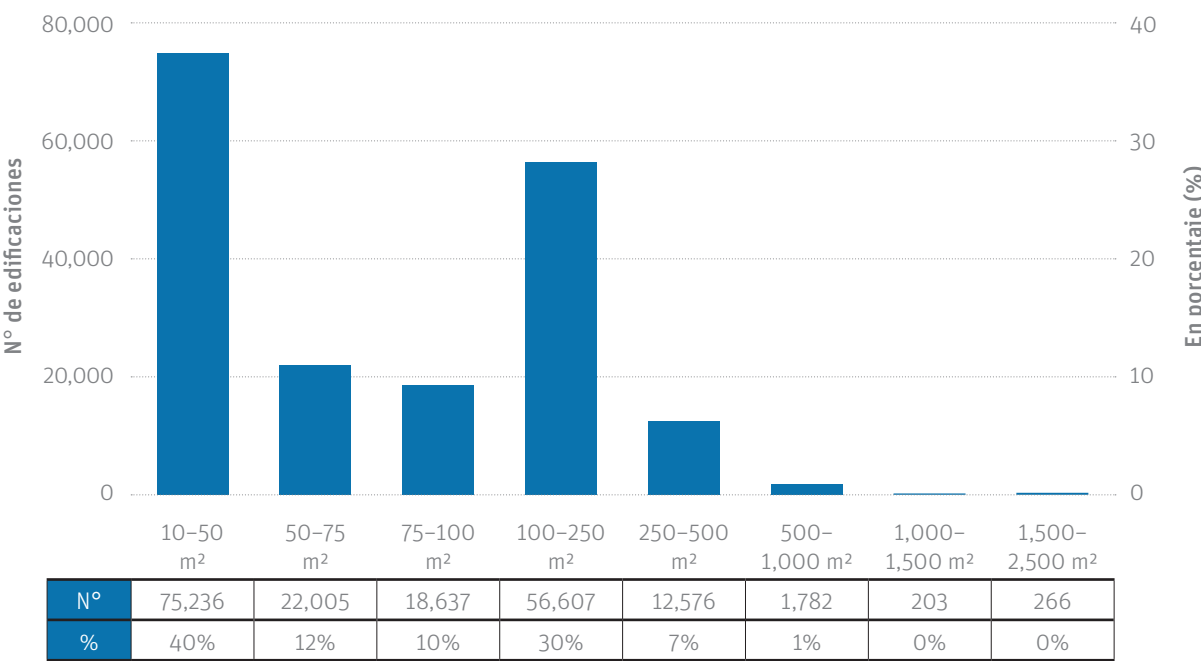


4.2.7 Área construida

El área construida es obtenida usando el “área de techo” consignada en el CIE. Esta área es definida como el área construida en el primer piso de la edificación y se asume que la estructura tiene el mismo tamaño en planta en los niveles superiores. El área construida total es entonces la multiplicación del número de pisos por el área de techo.

Todos los valores que se encuentran fuera de rango se ajustan con los anteriores valores límites.¹ La figura 4-8 presenta la distribución de los valores de las áreas de techo para las edificaciones analizadas a nivel nacional.

Figura 4-8 Distribución de edificaciones escolares según rangos de área de techo



1. Una revisión detallada del área de techo permite encontrar que el CIE tiene valores inconsistentes tales como áreas nulas, negativas o exageradamente grandes. Los valores inconsistentes se ajustan mediante un filtro definiendo un mínimo de área de techo de 10 m² para edificaciones con usos educativos y administrativos. Por otro lado se define un valor máximo de área de techo consistente con el número total de alumnos por jornada escolar. La edificación con mayor área construida corresponde a un local escolar con una sola edificación, una única jornada de enseñanza, alrededor de 3,313 estudiantes y un área de techo de 2,500 m² en dos pisos (área construida total del orden de 5,000 m²).

4.2.8 Sistemas estructurales y tipologías constructivas

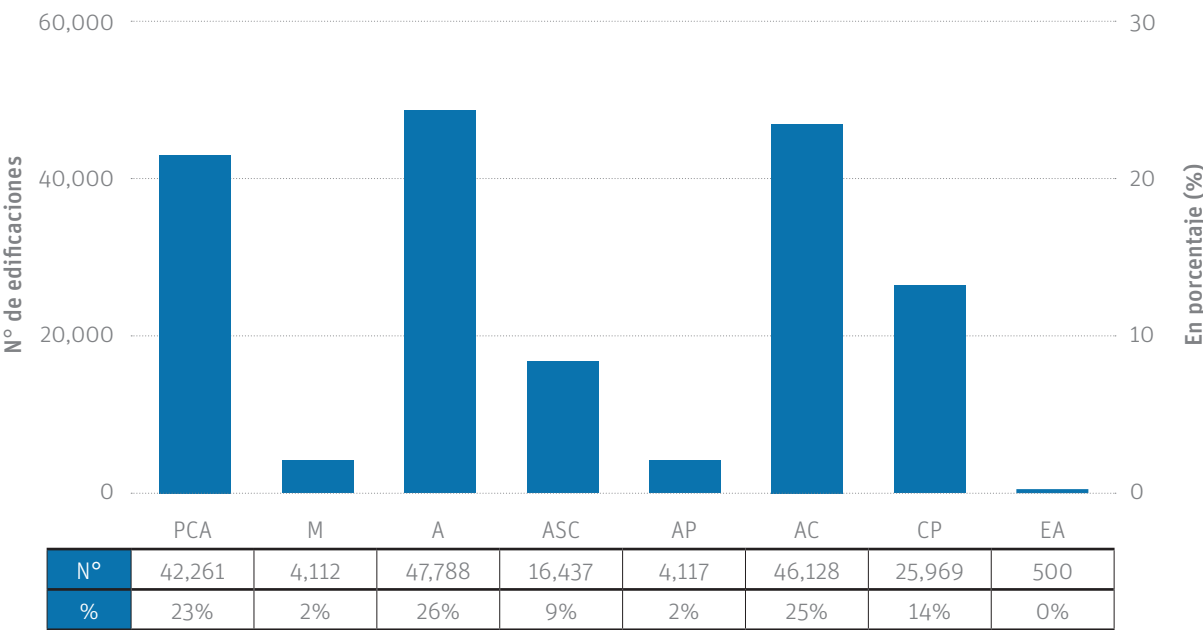
La base de datos del CIE contiene una asignación general de “Sistema Estructural”. Estos sistemas estructurales fueron verificados en campo y mediante los registros fotográficos realizados durante el CIE. Los sistemas estructurales definidos para el CIE y las observaciones respecto a estos se presentan en la tabla 4-1:

Tabla 4-1 Sistemas estructurales definidos en el CIE

Código	Sistema estructural	Descripción
PCA	Pórticos de concreto armado y muros de albañilería (dual)	No hay una distinción clara entre edificaciones en pórticos de concreto y edificaciones de albañilería confinada reportadas en el CIE. De acuerdo con esto y considerando que esta asignación no fue realizada por especialistas, se proponen funciones de vulnerabilidad acorde con la opinión de los especialistas del proyecto.
AC	Albañilería confinada o armada	La clasificación definitiva requerirá una inspección de campo. En este sentido las edificaciones que se clasifican como de albañilería confinada pudieran incluir edificaciones que de otra manera se clasifiquen como pórticos de concreto armado para el presente estudio.
AP y/o PROV	Aulas provisionales	Las aulas provisionales construidas posteriormente a 1998, a diferencia de las anteriores a esta fecha, presentan un buen comportamiento sísmico si fueron realizadas por entidades gubernamentales. El resto de aulas provisionales presentan una alta incertidumbre. Esto sucede porque en muchos casos los sistemas de reemplazo temporal mediante edificaciones precarias fueron asumidos como “aulas provisionales”.
CP y/o P	Construcciones precarias (triplay, quinchá, tapial, similares)	Las edificaciones precarias se clasifican en general como de alta vulnerabilidad sísmica ya que la recomendación general para estas es la de sustituirlas por edificaciones sismo-resistentes.
ASC	Albañilería sin confinar	Las edificaciones en albañilería simple sin refuerzo son en general de alta vulnerabilidad sísmica ya que no cuentan con elementos de confinamiento o amarre en la zona de cubierta lo que los hace muy susceptibles a daño en el plano perpendicular al plano del muro.
M	Madera (normalizada)	Las edificaciones en madera y otros materiales livianos son en general de baja vulnerabilidad sísmica. Sin embargo, posterior a la revisión en campo de las edificaciones clasificadas en estos sistemas se observa que generalmente son edificaciones precarias, carentes de un sistema claro de resistencia sísmica, no fueron diseñados bajo ninguna normativa o son construidos sin control alguno en la selección de los materiales o de sus componentes, entre otros problemas. Por lo tanto, se asigna una vulnerabilidad intermedia o alta según el sistema estructural dada su alta incertidumbre.
EA	Estructura de acero	Estructuras realizadas en material de acero para el caso de edificaciones construidas por el gobierno, posterior a 1998. Sin embargo, se observa que generalmente son edificaciones carentes de un sistema de resistencia sísmica, construidas sin ningún control de obra y/o diseño estructural. Por lo tanto, se asigna una vulnerabilidad intermedia o alta según el sistema estructural, dada su alta incertidumbre.
A	Adobe	Las edificaciones de adobe son de alta vulnerabilidad sísmica por su alto peso y la falta de amarre y confinamiento.
NR	Sin asignar	No tienen asignación de sistema estructura; es decir el campo se encuentra vacío.

La figura 4-9 presenta la distribución de sistemas estructurales según la información contenida en el CIE.

Figura 4-9 Distribución de edificaciones escolares según el sistema estructural asignado en el CIE



Para la evaluación del riesgo, además de la clasificación anterior, se hace necesario identificar la tipología constructiva completa, la cual se asigna utilizando los siguientes parámetros:

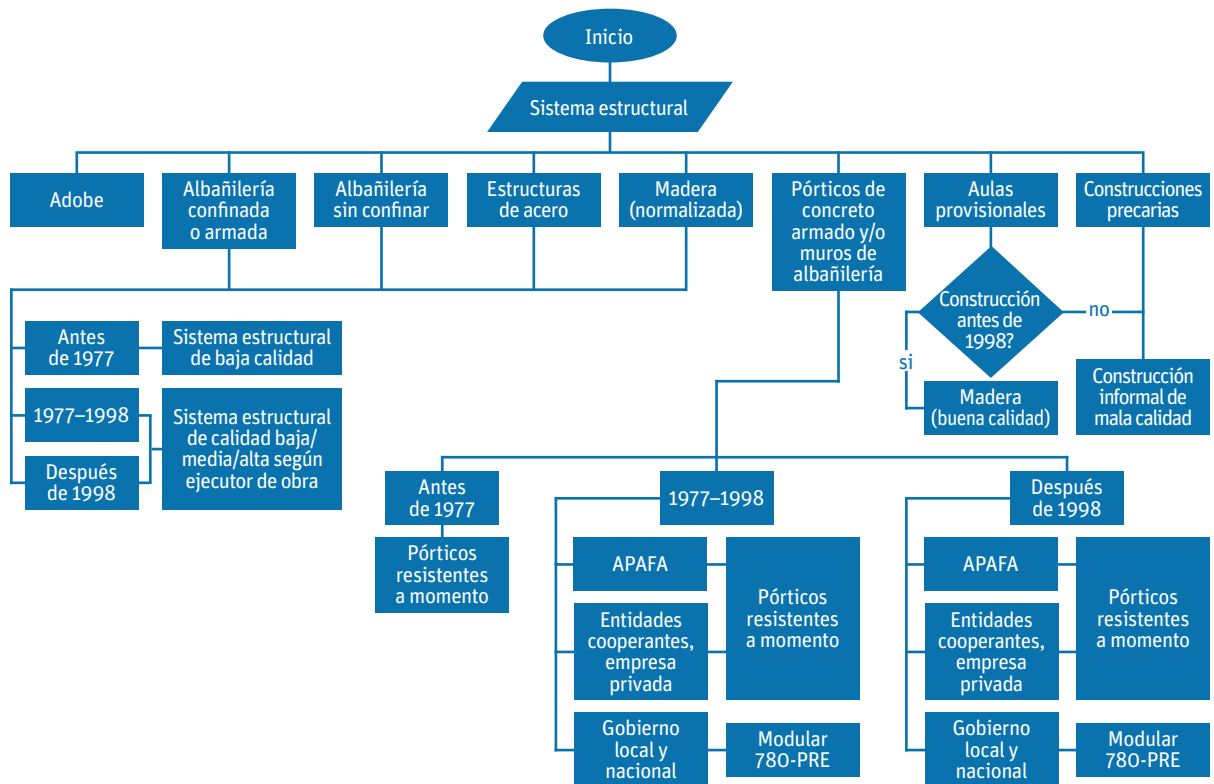
- El sistema estructural
- El material de construcción principal
- La altura de la edificación
- La calidad de la construcción o nivel de diseño

La asignación de la tipología constructiva se realiza a partir de un procedimiento semiautomático de asignación de parámetros que utiliza la información disponible en el CIE para determinar los parámetros anteriores. En la asignación se tiene en cuenta además la siguiente información complementaria:

- Visitas de inspección técnica por parte de los especialistas del proyecto a diferentes sitios
- El “Manual del evaluador Técnico” [10] en el que se consignan diferentes descripciones referentes a la calidad de las obras, los ejecutores, los sistemas estructurales considerados y otros
- La revisión detallada de fotografías para la asignación de sistemas estructurales considerando las inconsistencias observadas en la clasificación de los mismos por parte del CIE, en particular con la asignación del sistema “albañilería confinada o armada” y los “pórticos de concreto armado y/o muros de albañilería (dual)”

La figura 4-10 ilustra el tipo de algoritmo utilizado para dicha asignación de tipología definitiva para el análisis.

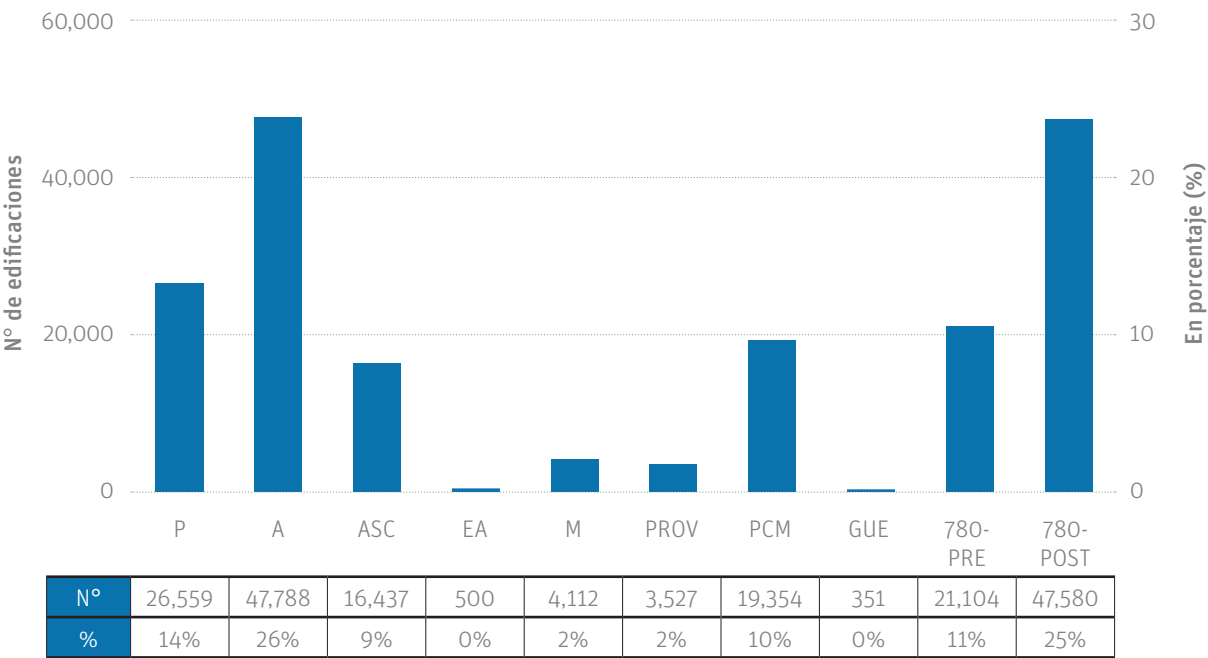
Figura 4-10 Diagrama de flujo para la asignación de las tipologías constructivas



Para detalles adicionales en la asignación de tipologías constructivas ver numeral 4.4.2.

La distribución por tipologías constructivas definitivas se presenta en la figura 4-11.

Figura 4-11 Distribución de edificaciones escolares según la tipología constructiva



4.2.9 Uso de la edificación

En la base de datos del CIE se consigna el tipo de uso destinado para cada una de las edificaciones. La tabla 4-2 presenta los usos reportados en la base de datos. Se ha definido en esta tabla aquellos usos considerados como “usos educativos” y que dada su configuración pueden albergar la mayor cantidad de estudiantes, docentes y demás participantes del local escolar, y que por lo tanto representan el grupo de edificaciones relevantes para intervención.

Tabla 4-2 Usos especificados para las edificaciones del CIE

Listado de usos de edificaciones considerados educativos	Listado de usos de edificaciones considerados no educativos
Aula común	Despensa
Dirección	Cocina
Ss. hh de niños y niñas (inicial)	Otro
Ss. hh alumnado	Guardianía
Ss. hh personal	Tópicos y servicios sociales
Vivienda de docentes	Impresiones
Sub-dirección	Casela de guardianía
Biblioteca	Cafetería/kiosco
Vivienda para alumnos	Vestuario
Sala de descanso	Comedor
Asesoría	Escaleras
Sala de profesores	Depósito de material educativo
Sala de higienización	Sala de servicios complementarios
Sala de lactancia	Limpieza y mantenimiento
Total edificaciones: 152,660	Área de espera
	Secretaría y área de espera
	Archivo
	Ascensor
	Total edificaciones: 34,652

4.2.10 Número de estudiantes beneficiados

El CIE incluye como uno de sus campos el número de estudiantes en cada local escolar. Este parámetro será utilizado más adelante para efectos de priorizar la intervención de las edificaciones escolares públicas. Este permite priorizar aquellos locales escolares que pueden tener una capacidad para un mayor número de estudiantes que los que están haciendo uso hoy en día de este. Sin embargo, vale la pena destacar que el número de estudiantes reportados según el CIE en cada local será utilizado para la cuantificación del número de estudiantes beneficiados.

4.3 VALOR ECONÓMICO DE REPOSICIÓN DEL PORTAFOLIO

Para la asignación del valor económico de reposición de los componentes del portafolio de exposición se desarrolló un modelo de costos que considera la ubicación geográfica del local escolar, el escenario educativo, la zona bioclimática y el nivel educativo.

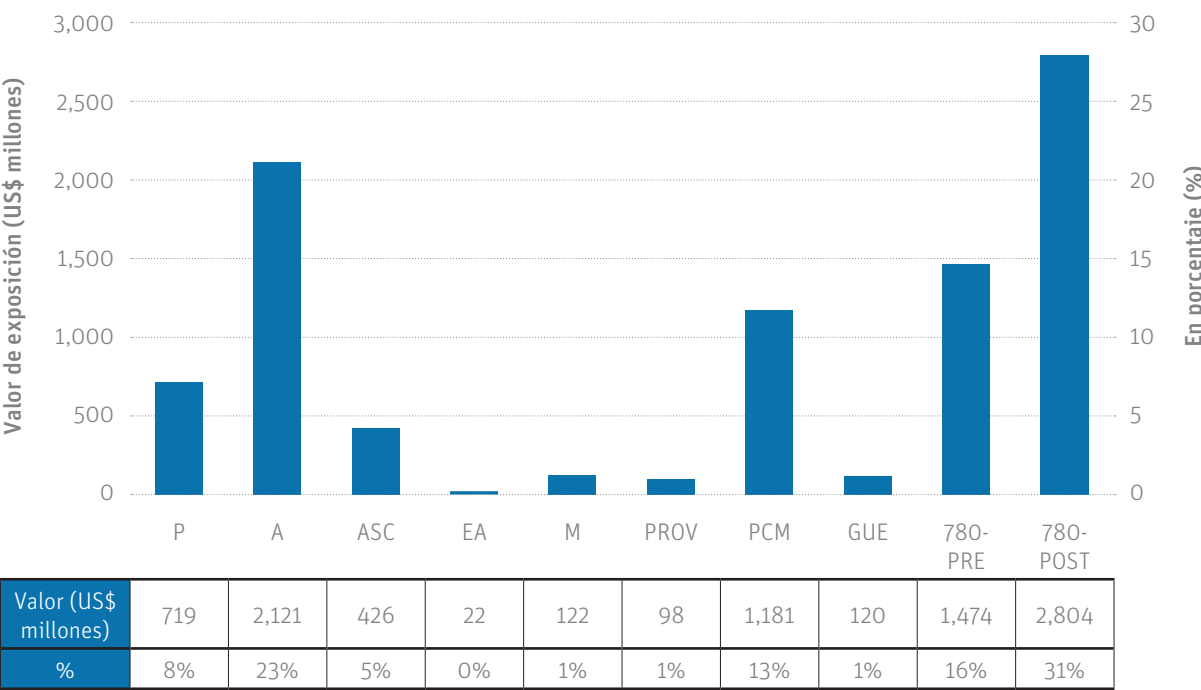
Dado que se requiere cuantificar de manera aproximada el costo de reposición de los locales escolares, se procede a definir valores promedio para los diferentes escenarios educativos. Estos valores corresponden al costo de obra nueva por metro cuadrado construido en cada una de las zonas definidas. Para su estimación se ha utilizado el escenario educativo y la zona bioclimática en que se encuentra. La zona bioclimática corresponde a la clasificación de las regiones según altitud en metros sobre el nivel del mar, precipitación anual, temperatura media anual y humedad relativa. La tabla 4-3 representa el valor promedio definido para las distintas combinaciones posibles de escenario educativo y zona bioclimática y se presentan en nuevos soles (S/.) y en dólares estadounidenses (US\$). Para la definición de estos valores se contó con la participación del MINEDU, de consultores locales e internacionales y de especialistas del Banco Mundial.

Tabla 4-3 Valores promedio representativos de exposición de edificaciones escolares en el Perú (año 2015)

Escenarios educativos	Zona Bioclimática	Costo de obra nueva USD/m²
Grandes ciudades	Desértico costero	303
Ciudades capitales	Desértico costero/Desértico	331
	Interandino bajo/Mesoandino	339
	Alto andino/Nevado	377
	Ceja de montaña/Subtropical húmedo/Tropical húmedo	333
Centros urbanos	Desértico costero/Desértico	353
	Interandino bajo/Mesoandino	362
	Alto andino/Nevado	399
	Ceja de montaña/Subtropical húmedo/Tropical húmedo	355
Pueblos conectados	Desértico costero/Desértico	364
	Interandino bajo/Mesoandino	373
	Alto andino/Nevado	411
	Ceja de montaña/Subtropical húmedo/Tropical húmedo	366
Comunidades dispersas	Desértico costero/Desértico	404
	Interandino bajo/Mesoandino	414
	Alto andino/Nevado	451
	Ceja de montaña/Subtropical húmedo/Tropical húmedo	407

Los valores económicos de reposición esperados se asignan en función del área total construida de cada una de las edificaciones contenidas en la base de datos y son independientes del tipo estructural de la edificación. La figura 4-12 presenta la distribución de los valores económicos de reposición por tipología constructiva para el portafolio completo de edificaciones. El valor de reposición del portafolio completo resulta en US\$ 9.1 billones.

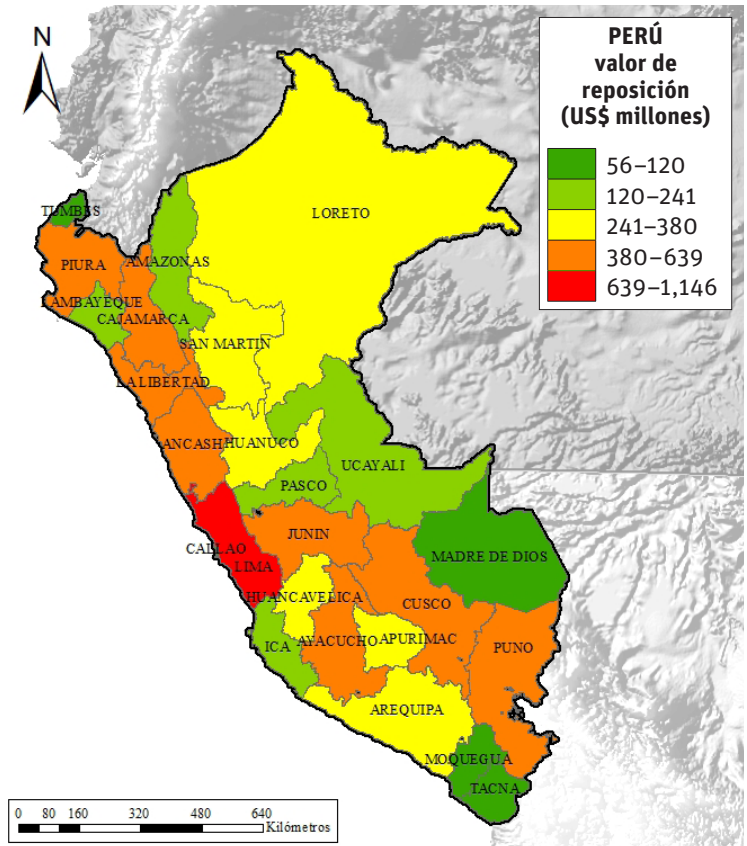
Figura 4-12 Valor económico de reposición según tipología constructiva



Nota: Ver descripción de sistemas estructurales en tabla 6-1.

La distribución geográfica por departamentos del valor de reposición del portafolio se puede observar en la figura 4-13. Esta figura permite identificar que el departamento con mayor valor de reposición es Lima, seguido de algunos departamentos costeros. Es importante destacar esto dado que la amenaza sísmica es mayor en la zona costera del Perú. Para la elaboración de este mapa se han tenido en cuenta todas las edificaciones expuestas en el portafolio sin discriminar por uso, zona sísmica o ningún otro parámetro.

Figura 4-13 Mapa de valores de reposición de edificaciones escolares por departamento



En resumen el portafolio de locales y edificaciones escolares definitivo tiene las características principales listado en la tabla 4-4:

Tabla 4-4 Resumen del portafolio de exposición de edificaciones escolares

Característica	Valor
Número de locales escolares públicos	40,475
Número total de edificaciones	187,312
Número de edificaciones de uso educativo	152,660
Valoración económica del total de edificaciones	US\$ 9.1 billones
Valoración económica de las edificaciones de uso educativo	US\$ 8.4 billones

4.4 VULNERABILIDAD DE LAS TIPOLOGIAS CONSTRUCTIVAS

4.4.1 Funciones de vulnerabilidad para el análisis

La vulnerabilidad de las tipologías constructivas predominantes identificadas y caracterizadas anteriormente dependen de varios factores relevantes tales como los sistemas estructurales, los materiales estructurales dominantes, la altura de la edificación y la calidad de construcción que se asocia con el nivel de cumplimiento de especificaciones de diseño sísmo-resistente (nivel de código sísmico), lo cual define su comportamiento ante eventos sísmicos específicos. De esta manera es posible definir el nivel de daños que pueden esperarse tanto para la estructura principal de la edificación como en los elementos no estructurales. A partir del nivel de daño estimado para diferentes eventos sísmicos de análisis, es posible establecer las pérdidas económicas esperadas para cada una de las edificaciones ante el conjunto de eventos sísmicos que conforman la amenaza sísmica en la zona de estudio.

En la representación de las funciones de vulnerabilidad, la intensidad sísmica de análisis seleccionada en este estudio es la aceleración espectral para el periodo estructural estimado para cada tipología constructiva específica. Las funciones de vulnerabilidad que se utilizan están basadas en la metodología propuesta en [8] y [13]. El nivel de vulnerabilidad para un mismo sistema y material estructural de construcción varía según el número de pisos o altura total y la calidad de la construcción, o nivel de código sísmico. Para la asignación del nivel de código se evaluaron los niveles de requisitos sísmicos y la aplicabilidad de la norma de sismo resistencia peruana.

Las funciones de vulnerabilidad usadas para el análisis de riesgo se presentan en la figura 4-14 y la figura 4-15. Las dos figuras permiten visualizar las diferencias según la altura de la edificación.

En la tabla 4-5, la columna “Nivel de código sísmico” hace referencia al grado de cumplimiento con respecto a la normativa, definiendo el nivel de demanda sísmica y la capacidad de deformación lateral para los cuales la edificación fue diseñada. Las categorías seleccionadas son las siguientes:

- Pre-código (P): No cumple con ningún requisito mínimo de resistencia sísmica.
- Bajo (L): No cumple de manera general con las mínimas especificaciones de resistencia sísmica.
- Medio (M): Cumple de manera general con las especificaciones de resistencia sísmica.
- Alto (H): Cumple totalmente con las especificaciones de resistencia sísmica de códigos internacionales de diseño sísmico de edificios en términos de capacidad de carga y capacidad de deformación horizontal o ductilidad para zonas de alta amenaza sísmica.

Tabla 4-5 Tipologías constructivas y funciones de vulnerabilidad definidas

No.	Tipo estructural	Descripción	Altura típica		Nivel de código sísmico			
			Rango	No. pisos	P	L	M	H
1	Adobe (A)	Adobe	Baja	1+	X	X	—	—
2	Albañilería sin confinar (ASC)	Muros de carga en mamposterías simple	Baja	1–2	X	X	—	—
			Media	3–5	X	X	—	—
3	Precarias (P)	Construcciones informales precarias (triplay, quincha, etc.)	Baja	1+	X	—	—	—
4	Estructuras de acero (EA)	Pórticos en acero	Baja	1–3	X	X	X	—
5	Estructuras de madera (M)	Construcciones de madera	Baja	1+	X	X	—	—
6	Pórticos de concreto reforzado (PCM)	Estructuras de concreto con pórticos de concreto; alta incertidumbre en su comportamiento sísmico	Baja	1–3	X	X	X	—
			Media	4–7	X	X	X	—
7	Gran unidad escolar (GUE)	Pórticos de concreto construidos previos a las normas de construcción peruana	Baja	1–3	—	X	X	—
			Media	4–7	—	X	—	—
8	Módulos 780 pre-código (PRE)	Módulo 780, previo a la norma de 1998; tiene problemas de columna corta	Baja	1–3	—	X	X	—
9	Módulos 780 post-código (POST)	Módulo 780, posterior a la norma de 1998	Baja	1–3	—	—	X	X
			Media	4–7	—	—	X	X
10	Aulas provisionales (PROV)	Aulas provisionales, realizadas por el gobierno posterior a la norma de 1998	Baja	1–3	—	X	X	—
			Media	4–7	—	X	X	—

Nota: P: pre-código, L: código bajo, M: código medio, H: código alto.

Figura 4-14 Funciones de vulnerabilidad para edificaciones de baja altura

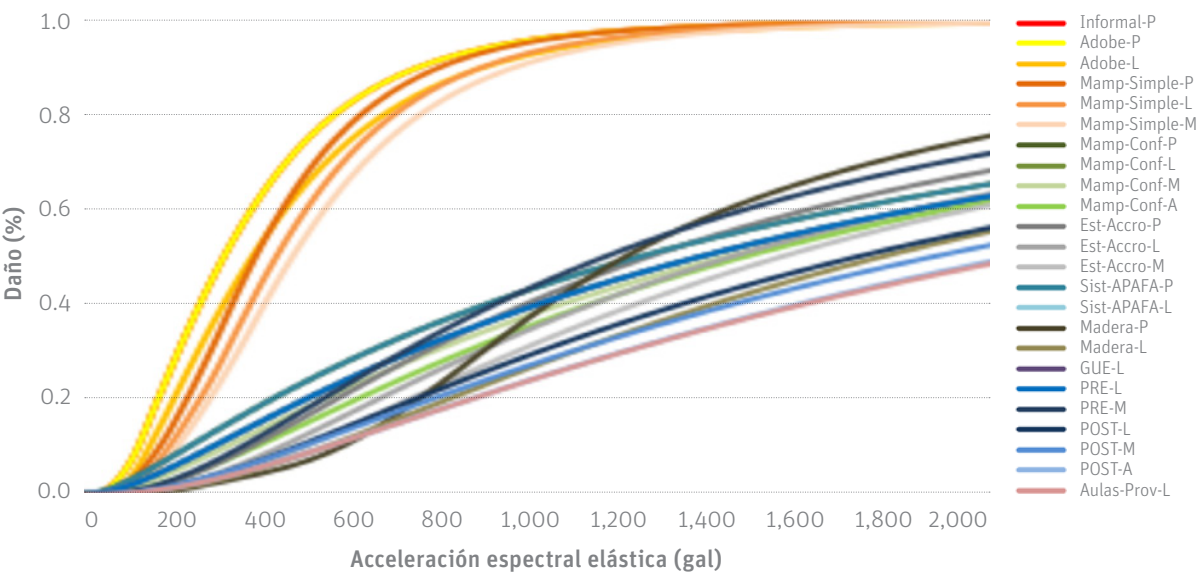
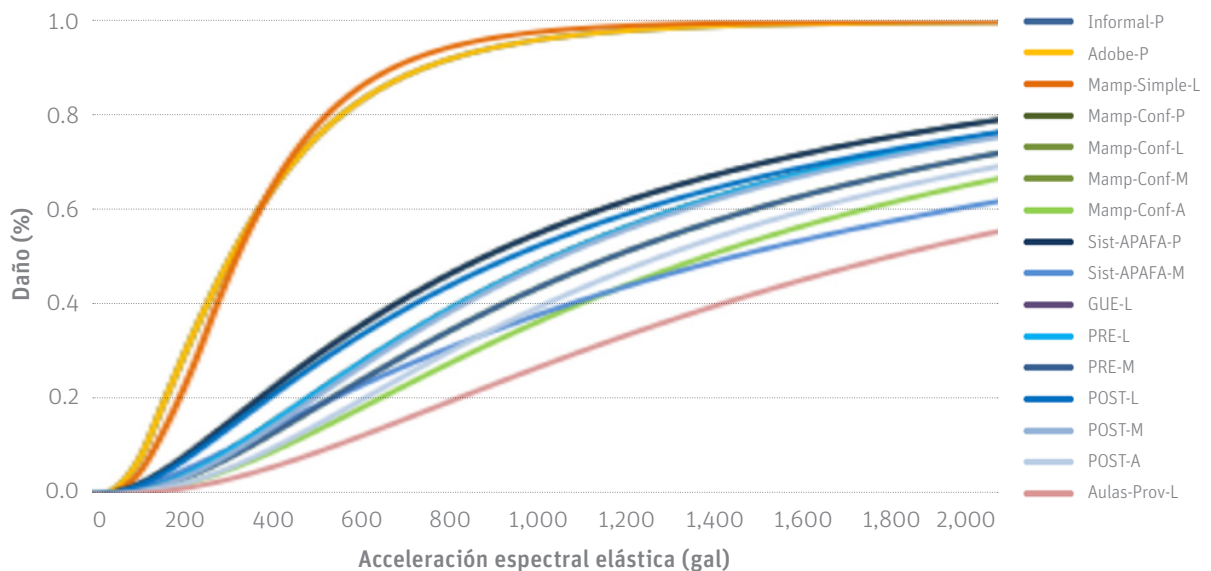


Figura 4-15 Funciones de vulnerabilidad para edificaciones de altura media



4.4.2 Asignación de funciones de vulnerabilidad a tipologías constructivas

Para la asignación de funciones de vulnerabilidad a las tipologías constructivas identificadas se utilizan algunos criterios complementarios relacionados con la calidad de los sistemas típicos en el Perú. Algunas de estas consideraciones son las siguientes:

- Las edificaciones en albañilería simple sin refuerzo son en general de alta vulnerabilidad sísmica ya que no cuentan con elementos de confinamiento o amarre en la zona de cubierta, lo que los hace muy susceptibles a daño en el plano perpendicular al plano del muro.
- Edificaciones de adobe son de alta vulnerabilidad sísmica por su alto peso y la falta de amarre y confinamiento.
- Las edificaciones precarias se clasifican en general como de alta vulnerabilidad sísmica.
- Las aulas provisionales construidas posteriormente a 1998, a diferencia de las anteriores a esta fecha, presentan un buen comportamiento sísmico si fueron realizadas por entidades gubernamentales.
- De acuerdo con las visitas de inspección realizadas, no hay una distinción clara entre edificaciones en pórticos de concreto y edificaciones de albañilería confinada reportadas en el CIE. De acuerdo con esto y considerando que esta asignación no fue realizada por especialistas, se proponen funciones de vulnerabilidad acorde con la opinión de los especialistas del proyecto. La clasificación definitiva requerirá una inspección de campo. En este sentido las edificaciones que se clasifican como de albañilería confinada pudieran incluir edificaciones que de otra manera se clasifiquen como pórticos de concreto armado.
- Las edificaciones tipo modular 780 se han clasificado de acuerdo con el criterio que son todas aquellas que se presentan en el CIE como sistema de pórticos de concreto y que han sido construidas por entes gubernamentales. Se reconoce que estas edificaciones han cambiado en la historia de

la construcción de infraestructura escolar, sin embargo el comportamiento estructural de estas ha sido similar. Para las edificaciones anteriores al año 1998 y construidas por el gobierno (nacional o regional), se clasifican como 780 PRE y son de vulnerabilidad media principalmente debido a la presencia de columnas cortas, mientras que las posteriores a este año y construidas por este ejecutor de obra se clasifican como 780 POST, las cuales son de menor vulnerabilidad sísmica dadas las modificaciones estructurales que se introdujeron a este sistema en esa fecha.

- g) Las edificaciones clasificadas como grandes unidades escolares (GUE) se clasifican como de vulnerabilidad sísmica intermedia debido a la presencia de columnas cortas. Estas construcciones fueron realizadas durante 1950–1970 aproximadamente; por esto hay consenso en que las secciones de los elementos estructurales fue más generosa y la estructuración misma tenía mayor redundancia que las construcciones más modernas con lo cual se logra un mejor comportamiento sísmico que por ejemplo para los sistemas 780 PRE. En los resultados del presente informe se han señalado las edificaciones que ya fueron reforzadas y que por lo tanto no deben ser intervenidas de nuevo.
- h) Las edificaciones en madera, acero y otros materiales livianos son en general de baja vulnerabilidad sísmica. Sin embargo, posterior a la revisión en campo de las edificaciones clasificadas en estos sistemas se observa que generalmente son edificaciones precarias, carentes de un sistema claro de resistencia sísmica, no fueron diseñados bajo ninguna normativa o son construidos sin control alguno en la selección de los materiales o de sus componentes, entre otros problemas. Por lo tanto, se asigna una vulnerabilidad intermedia o alta según el sistema estructural dada su alta incertidumbre.
- i) Las construcciones tipo “pórticos resistentes a momento (PCM)”, son todas aquellas edificaciones de sistemas PCA o AC según el CIE y que no fueron construidas por el gobierno y que por ende presentan una incertidumbre asociada a su vulnerabilidad. Se asume que generalmente no cuentan con diseños o controles de calidad durante la construcción. Por esta razón la vulnerabilidad de estas construcciones se castiga con respecto a construcciones equivalente construidas por el Estado.

5. EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

5.1 INTRODUCCIÓN

Con base en la información de amenaza sísmica (capítulo 3), en el portafolio de exposición de locales y edificaciones escolares y en la vulnerabilidad de las tipologías constructivas dominantes (capítulo 4) se lleva a cabo la evaluación probabilista del riesgo sísmico del portafolio de edificaciones escolares del Perú. El riesgo se expresa a través de las pérdidas económicas directas en términos del puede valor económico absoluto o valor relativo con respecto al valor de reposición asociado a cada edificación. En este último caso, este mismo parámetro refleja un grado o nivel de daño o afectación que puede asociarse al impacto físico directo. No se consideran en el presente análisis las pérdidas económicas en contenidos ni las pérdidas indirectas que resultan de la interrupción del funcionamiento del servicio educativo tales como afectación a terceros o impactos a la economía o al nivel de desarrollo de una región o del país.

Las métricas de riesgo principales utilizadas en el presente análisis son las siguientes:

- Pérdida anual esperada (PAE) : La PAE se calcula para cada uno de los componentes expuestos y para el conjunto de los mismos como la suma del producto entre las pérdidas esperadas para un determinado escenario y la frecuencia anual de ocurrencia de dicho evento y para todos los eventos estocásticos considerados. En términos probabilistas, la PAE es la esperanza matemática de la pérdida anual.
- Pérdida máxima probable (PMP): La PMP representa el valor de pérdida para un nivel de excedencia determinada. Corresponde a las pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno considerados y se obtiene a partir de la curva de excedencia de pérdidas, la cual se puede calcular a partir de las pérdidas asociadas de todos los eventos posibles, en función de su período de retorno.
- Pérdida esperada para escenario crítico: Un escenario crítico puede definirse como aquel escenario que mayor participación tiene en la PAE o el escenario que representa el sismo de mayor intensidad o daño esperado en la zona de análisis, teniendo en cuenta tanto la pérdida económica como la frecuencia anual de ocurrencia de cada uno de los eventos. Seleccionado el escenario crítico, se pueden determinar los porcentajes de daños esperados y las pérdidas económicas asociadas sobre cada uno de los elementos expuestos del portafolio de análisis.

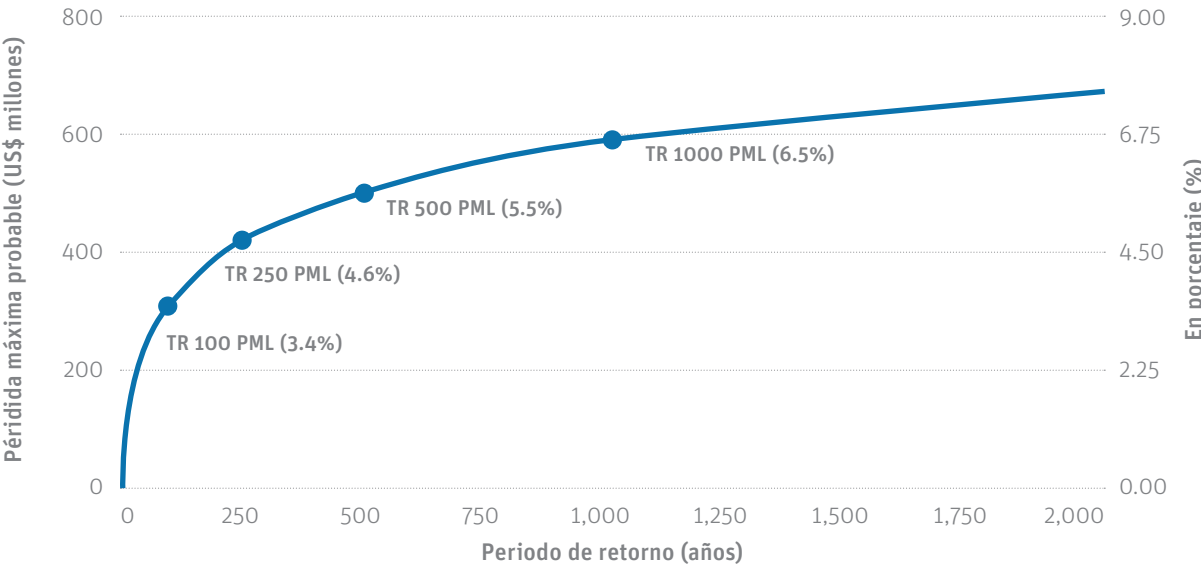
5.2 RESULTADOS BASICOS DE LA EVALUACIÓN RIESGO

En la tabla 5-1 y en la figura 5-1 se presentan el resumen de resultados del análisis probabilista en términos de pérdida esperada y pérdida máxima probable.

Tabla 5-1 Pérdida anual esperada y perdidas máximas probables para el portafolio de exposición nacional

Resultados		
Valor expuesto	US\$ x10 ⁶	9,087
Pérdida anual esperada	US\$ x10 ⁶	190.0
	‰	20.91
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 ⁶	%
100	308	3.4
250	408	4.5
500	497	5.5
1,000	590	6.5

Figura 5-1 Curva de pérdidas máximas probables, PMP, para el portafolio de exposición nacional



En la tabla 5-2 se presentan los valores de PAE de los locales escolares críticos (los de mayor pérdida esperada absoluta) incluyendo la identificación, el número de edificaciones, los tipos estructurales que comprende y el valor de reposición correspondiente a todo el local escolar. La referencia [14] presenta los resultados para la totalidad de las edificaciones agrupadas además por locales escolares.

Tabla 5-2 Pérdidas anuales esperadas de los locales escolares críticos del portafolio de exposición nacional

ID_Local	Longitud	Latitud	VALFIS (US\$)	PAE (US\$)	PAE VALFIS (‰)	N° de edificaciones en el Local Escolar por Tipo Estructural										
						P	A	ASC	EA	M	PROV	PCM	GUE	780-PRE	780-POST	TOTAL
68212	-72.494	-16.078	9,317,777	275,591	30	0	0	0	0	0	0	1	0	8	1	10
315279	-77.066	-12.099	8,109,391	666,873	82	2	26	2	0	7	0	6	0	3	0	46
65770	-71.517	-16.42	3,437,026	205,040	60	3	0	5	0	0	0	28	0	0	5	41
462166	-69.355	-15.49	12,616,816	334,024	26	1	12	1	0	0	0	0	0	0	2	16
400079	-71.339	-17.615	3,193,694	124,223	39	5	0	0	0	0	1	18	0	0	10	34
68924	-72.164	-14.996	4,167,556	145,400	35	1	2	1	0	0	0	0	0	1	1	6
59241	-71.544	-16.361	2,447,697	149,725	61	0	0	0	0	0	1	20	0	0	0	21
55460	-71.544	-16.396	2,464,667	148,986	60	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	9
58859	-71.549	-16.388	2,146,317	134,311	63	0	0	1	0	0	1	12	0	0	0	14
288370	-77.056	-12.043	2,543,819	26,130	10	1	0	1	0	0	0	3	0	0	4	9

Nota:

ID_Local: Código identificador del local escolar.

Latitud, Longitud: Coordenadas geográficas.

VALFIS: Valor expuesto total por local escolar.

PAE: Pérdida anual esperada para el local escolar.

PAE/VALFIS: Pérdida anual relativa esperada para el local escolar.

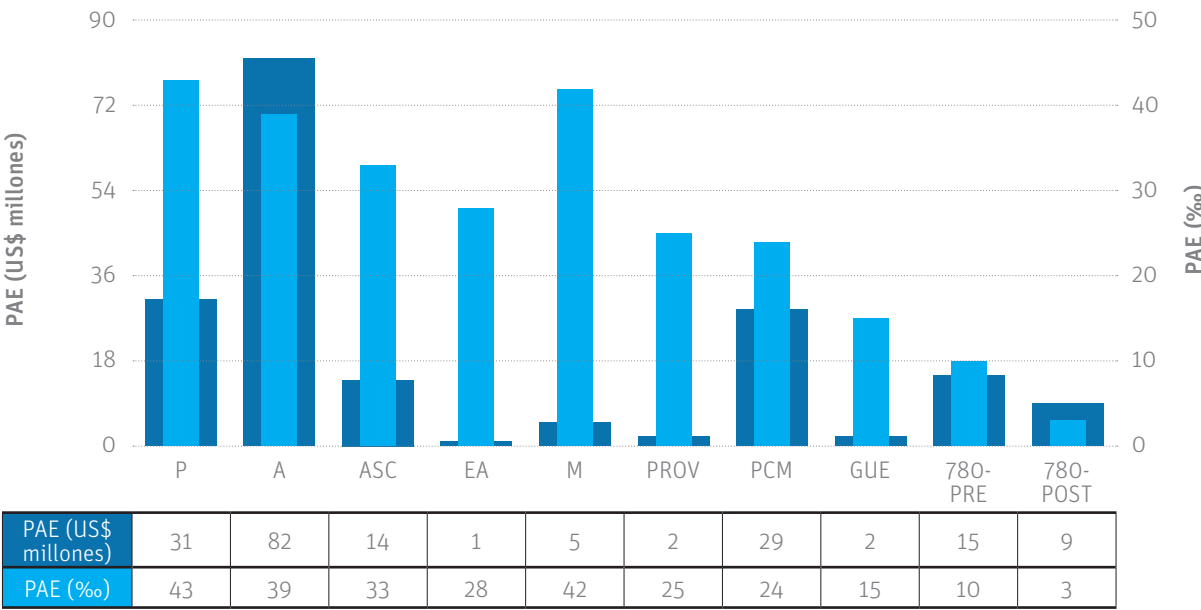
Tipos Estructurales: Los indicados en la tabla 4-5.

En la tabla 5-3 y en la figura 5-2 se presentan los valores de PAE para la totalidad del portafolio agrupadas según la tipología constructiva. Esta tabla permite establecer el nivel de riesgo relativo que concentra cada una de las tipologías y es relevante para definir una estrategia de intervención estructural.

Tabla 5-3 Pérdida anual esperada por tipología constructiva para el portafolio de exposición nacional

Tipo estructural	Valor expuesto (\$USD)	Porcentaje del total expuesto (%)	Pérdida anual esperada (\$USD)	Pérdida porcentual respecto a la pérdida total (%)	Pérdida anual esperada (‰)
Adobe (A)	2,121,032,365	23.3%	82,380,845	43.4%	39
Albañilería sin confinar (ASC)	426,105,389	4.7%	14,179,890	7.5%	33
Precarias (P)	719,472,341	7.9%	30,936,713	16.3%	43
Estructuras de acero (EA)	22,261,436	0.2%	612,315	0.3%	28
Estructuras de madera (M)	121,622,702	1.3%	5,157,853	2.7%	42
Pórticos de concreto reforzado (PCM)	1,181,068,616	13.0%	28,729,096	15.1%	24
Gran unidad escolar (GUE)	119,948,968	1.3%	1,811,792	1.0%	15
Módulos 780 pre-código (PRE)	1,473,738,383	16.2%	15,116,499	8.0%	10
Módulos 780 post-código (POST)	2,803,627,701	30.9%	8,616,630	4.5%	3
Aulas provisionales (PROV)	98,090,886	1.1%	2,431,430	1.3%	25
Total	9,086,968,786	100%	189,973,063	100%	21

Figura 5-2 Pérdida anual esperada total y porcentual por tipología constructiva para el portafolio de exposición nacional

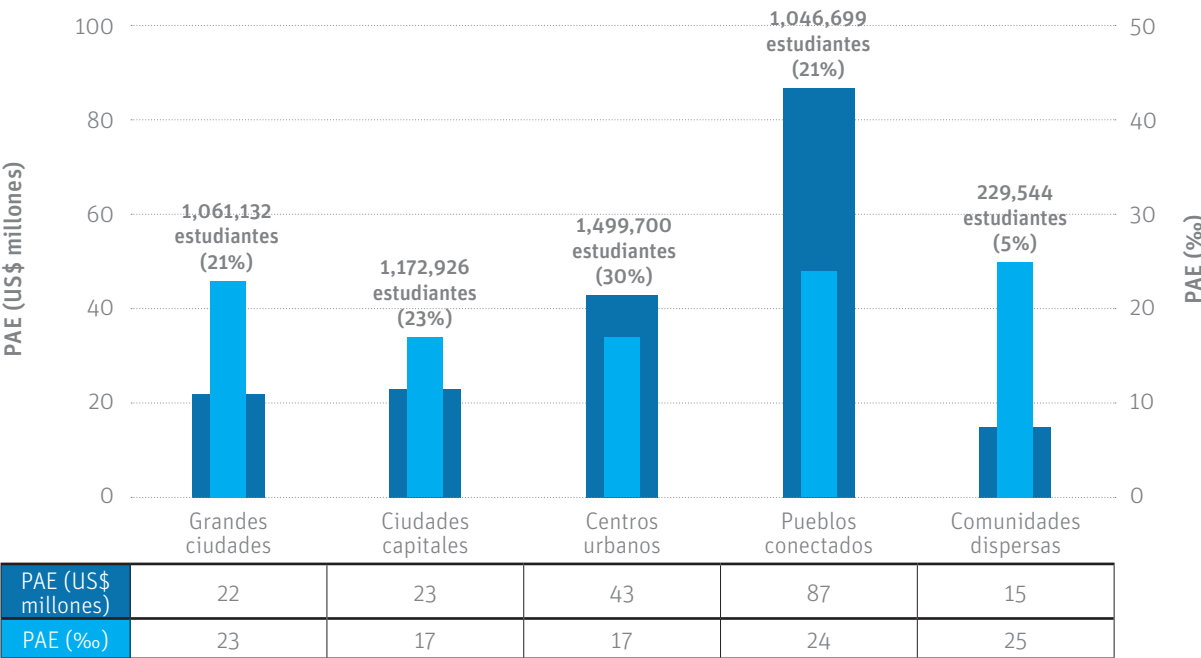


Sistema estructural

Nota: Ver descripción de tipologías constructivas en la tabla 4-5.

También se presentan los resultados del riesgo clasificado por escenario educativo. La figura 5-3 presenta los resultados de PAE en millones de dólares.

Figura 5-3 Pérdida anual esperada por escenario educativo



Escenario educativo

La figura 5-4 presenta las PAE para cada una de las regiones del país. La figura 5-5 presenta la distribución geográfica de las pérdidas físicas en términos de la PAE en cada departamento en términos absolutos y porcentuales.

Figura 5-4 Distribución geográfica de pérdidas anuales esperadas físicas directas por departamento

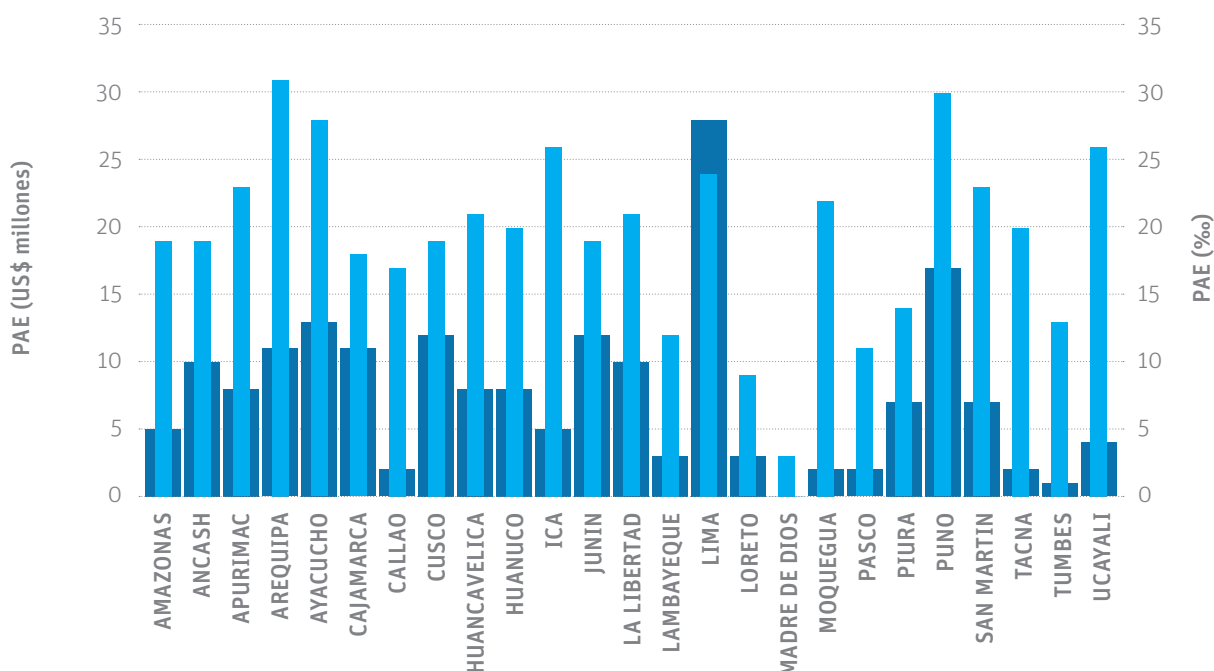
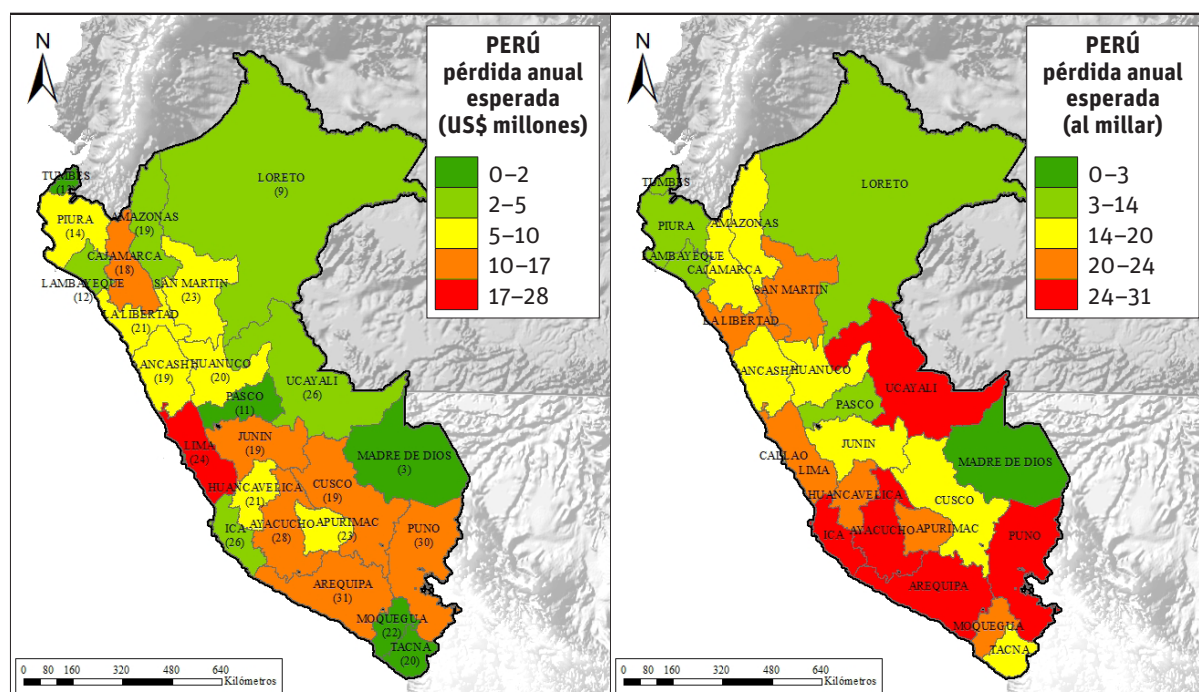


Figura 5-5 Distribución geográfica de pérdidas anuales esperadas por departamento



5.3 CATEGORIZACIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS SEGÚN EL NIVEL DE RIESGO

Los resultados del análisis del riesgo permiten establecer la siguiente categorización de tipologías constructivas:

- a) **Edificaciones con alto riesgo de colapso (ARC):** Son aquellas edificaciones que de manera frecuente presentan un deficiente comportamiento sísmico y que por esta razón su eventual intervención presenta grandes dificultades técnicas, altos costos y pocas garantías de funcionalidad. Dentro de estas edificaciones se encuentran las siguientes tipologías constructivas: edificaciones precarias, aulas provisionales, adobe y albañilería sin confinar.
- b) **Edificaciones con alto potencial de daño (APD):** Son aquellas edificaciones que ante eventos sísmicos de magnitud media-alta presentan un comportamiento sísmico deficiente; sin embargo, presentan viabilidad técnica, funcional y económica para su intervención. Dentro de estas edificaciones se encuentran los siguientes sistemas estructurales: grandes unidades escolares, pórticos resistentes a momento y modulares 780 PRE.
- c) **Edificaciones con buen desempeño sísmico esperado (BDS):** Son edificaciones diseñadas y construidas con criterios sísmo-resistentes y se considera que no requieren ningún tipo de intervención de acuerdo con los objetivos del programa. En este grupo sólo se ha considerado la tipología constructiva identificada como modulares 780 POST.

Esta categorización de tipologías constructivas de acuerdo con el nivel de riesgo se utiliza más adelante como parte de la estrategia de intervención propuesta.

6. ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO

6.1 PROCESO PARA DEFINIR LA ESTRATEGIA

El diseño de la estrategia de reducción de riesgo sísmico incluye el siguiente proceso:

1. Definición de las intervenciones por tipologías constructivas identificadas según su nivel de riesgo
2. Estimación del costo de las intervenciones para el portafolio total de edificaciones escolares públicas en el país
3. Priorización de intervenciones y estimación de costos para un período de 10 años
4. Optimización de la estrategia de intervención y priorización de los subprogramas de intervención
5. Desagregación de intervenciones por regiones

6.2 DEFINICIÓN DE INTERVENCIONES SEGÚN TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS

La intervención de edificios escolares está orientada a corregir posibles defectos estructurales y dotar a la estructura de una combinación adecuada de rigidez, resistencia y ductilidad que garantice su buen comportamiento en eventos sísmicos futuros en los términos establecidos en la Reglamentación Nacional de Edificaciones E030 del Código Nacional de Edificaciones de Perú. Se definen cuatro principales líneas de intervención:

- **Reforzamiento convencional:** La intervención de reforzamiento se realiza en una sola fase de tal manera que la edificación escolar alcanza el nivel de comportamiento sísmico establecido en la Norma E030 [11].
- **Reforzamiento incremental:** La intervención estructural se realiza en dos o más fases logrando en cada una de ellas niveles de desempeño predefinidos. Los niveles de desempeño se definen para cada tipología estructural en particular de acuerdo con lo dispuesto en la referencia [15]. En la última fase el edificio escolar alcanza el nivel de comportamiento sísmico establecido en la Norma E030.
- **Sustitución de edificios escolares por nuevas edificaciones sísmo-resistentes:** Tiene lugar cuando no hay factibilidad técnica y/o financiera para el reforzamiento estructural. Supone la demolición del edificio existente, la instalación de aulas temporales y el diseño y construcción del nuevo edificio.
- **Intervención contingente para prevenir colapso:** Es un tipo de reforzamiento de muros de adobe mediante mallas eslabonadas, elementos de madera o cualquier otra técnica aprobada que se implementa para prevenir el colapso dado que la sustitución de dichos edificios resulta compleja y de largo plazo.

Para cada una de las tipologías constructivas categorizadas según el nivel de riesgo (ver sección 5.3), se definen los siguientes posibles líneas de intervención:

- a) **Edificaciones con alto riesgo de colapso (ARC):** Se recomienda la sustitución de la edificación y/o la intervención contingente.
- b) **Edificaciones con alto potencial de daño (APD):** Se definen dos opciones: reforzamiento incremental para edificios escolares tipo 780 PRE y reforzamiento convencional para otras tipologías estructurales.
- c) **Edificaciones con buen desempeño sísmico (BDS):** No se considera ningún tipo de intervención de acuerdo con los alcances y objetivos planteados en el presente proyecto.

La tabla 6-1 resume los tipos de intervención propuestos en función de las tipologías constructivas.

Tabla 6-1 Posibles tipos de intervención estructural

Tipos de intervención	Edificaciones con alto riesgo de colapso (ARC)	Edificaciones con alto potencial de daño (APD)	Edificaciones con buen desempeño sísmico
Definición y características	Presentan un deficiente comportamiento sísmico y cuya intervención implica grandes dificultades técnicas, altos costos y pocas garantías de funcionalidad.	Presentan un comportamiento sísmico regular ante eventos sísmicos de magnitud media-alta. Presentan viabilidad técnica, funcional y económica para su intervención.	Edificaciones sísmo-resistentes
Tipología estructural que comprende	• Adobe (A) • Albañilería sin confinar (ASC) • Precarias (P) • Provisionales (PROV)	• Grandes unidades escolares (GUE) • Pórticos resistentes a momento (PCM) • Módulos 780 PRE	• 780 POST
Opciones de intervención	a) Sustitución por edificaciones sísmo-resistentes. b) Sustitución por aulas provisionales (corto plazo) mientras se definen alternativas modulares. c) Intervención contingente para prevenir colapso.	a) Reforzamiento incremental con intervenciones graduales y en etapas, logrando cumplimiento de los requerimientos fundamentales de la normativa en la etapa inicial b) Reforzamiento convencional con la intervención en una sola etapa para lograr el cumplimiento total de la normativa c) Intervención contingente en las edificaciones ubicadas en zona de amenaza media y baja.	No requieren

6.3 ESTIMACIÓN DEL COSTO DE LAS INTERVENCIONES

6.3.1 Costo total estimado

A partir de los grupos de tipologías estructurales definidos anteriormente y las líneas de intervención asociadas, se definieron subprogramas de intervención y sus costos aproximados como se explica a continuación:

- a) **Subprograma de intervención no. 1 — Sustitución:** Incluye todas las edificaciones con alto riesgo de colapso (ARC) ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta o intermedia. La estimación del costo de intervención se realiza con la siguiente ecuación:

$$\text{Costo de sustitución} = [300,450] \text{ US$/m}^2 + 25\% (\text{Aulas provisionales reutilizables}) + 10\% (\text{demolición})$$

- b) **Subprograma de intervención no. 2 — Reforzamiento convencional:** Incluye todas las edificaciones con alto potencial de daño (APD) ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta o intermedia. La estimación del costo intervención se realiza con la siguiente ecuación:

$$\text{Costo de reforzamiento integral} = 50\% \text{ del costo de reposición}$$

- c) **Subprograma de intervención no. 3 — Edificaciones en zona de amenaza sísmica baja:** Incluye todas las edificaciones de los tipos ARD o APD, pero que estén ubicadas en zonas de amenaza sísmica baja y las cuales se propone intervenir de manera contingente para evitar colapsos totales o parciales. En estos casos la estimación del costo de intervención se realiza con la siguiente ecuación:

$$\text{Costo de intervención contingente} = 15\% \text{ del costo de reposición}$$

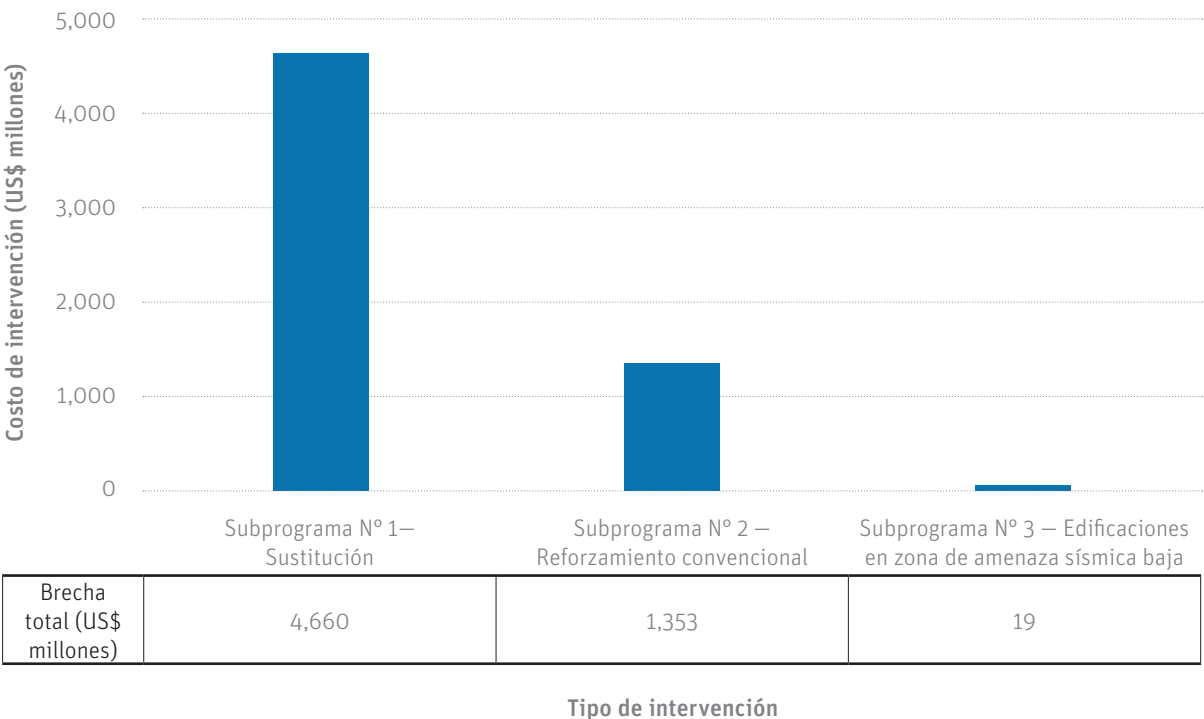
Los costos de intervención asociados a cada una se han calculado como porcentajes del costo de reposición basados en datos estadísticos de proyectos existentes. Los costos de reposición, como se mencionó en el numeral 6.3, tienen en cuenta la variación del valor de acuerdo con la ubicación geográfica del local y al escenario educativo. Los costos asociados a las sustituciones contemplan la necesidad de reubicar los estudiantes en aulas provisionales mientras se lleva a cabo la construcción de la nueva edificación. También se considera el valor aproximado de la demolición de la edificación existente. El valor del reforzamiento incremental es conservador y su evaluación se presenta con mayor detalle en las referencias [14] y [16].

De acuerdo con los anteriores subprogramas de intervención, el tipo estructural y costo de reposición de cada edificación y los procedimientos de costeo definidos, se estimó el costo total de las intervenciones como se presenta en la tabla 6-2 y figura 6-1.

Tabla 6-2 Resumen del costo total de las intervenciones

	No. de edificaciones	Costo total US\$ (millones)
Programa de reducción de vulnerabilidad sísmica de infraestructura educativa	139,732	6,032
Costo por subprogramas		
Subprograma N° 1 — Sustitución	97,110	4,660
Subprograma N° 2 — Reforzamiento convencional	39,933	1,353
Subprograma N° 3 — Edificaciones en zonas amenaza sísmica baja	2,689	19

Figura 6-1 Brecha total según subprogramas



6.3.2 Costo de las intervenciones para un programa de reducción del riesgo sísmico a 10 años

Dado que el PNIE se formuló para un período de 10 años, se definió un programa de reducción de riesgo para el mismo período.

Con el fin de optimizar los recursos para el programa a 10 años, se incluyen únicamente las edificaciones que clasifiquen según el uso educativo en aulas comunes, los baños de niños y niñas, alumnado y personal, las bibliotecas, las salas de profesores y las oficinas de dirección, entre otros. Según esto quedan en segunda prioridad las siguientes edificaciones:

- Edificaciones con usos específicos no educativos tales como despensas, cocinas, comedores, salas de espera, depósitos de material educativo, escaleras, impresiones, guardianía y casetas de guardianía, entre otros
- Edificaciones de buen desempeño sísmico esperado, tipo BDS
- Edificaciones ubicadas en zonas de amenaza sísmica baja

De acuerdo con esto se tienen las estadísticas para el programa a 10 años que se presentan en la tabla 6-3.

Tabla 6-3 Resumen del portafolio de exposición de edificaciones escolares

Característica	Valor
Número de locales escolares públicos	40,475
Número total de edificaciones	187,312
Número de edificaciones de buen desempeño	44,031
Número de edificaciones excluidas	34,652
Número total de edificaciones a intervenir	108,629
Valoración total del portafolio a intervenir	US\$ 8,435 (millones)

6.4 ESTRATEGIA DE INTERVENCIÓN PRIORIZADA A 10 AÑOS

Los siguientes son los criterios utilizados para el programa a 10 años:

- Se da prioridad a las edificaciones escolares ubicadas en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta. Se priorizan en este grupo aquellas que tengan un uso que involucre alta ocupación de personas.
- A cada edificación se asigna un nivel de intervención único en función a su ubicación y a su tipología estructural.

La tabla 6-4 resume las intervenciones recomendadas para cada tipo de edificación con base en las consideraciones anteriores. La tabla también presenta el valor o costo a tener en cuenta en cada una de las intervenciones.

Tabla 6-4 Resumen de las intervenciones recomendadas para cada tipo de edificación

Tipo de amenaza (según RNE 2016)	Ámbito	Grupo a intervenir	Intervención	Costo por metro cuadrado (US\$/m²) o valor relativo al costo de reposición (%)
Alta (zonas 3 y 4)	Urbana	Alto potencial de colapso (ARC)	Sustitución	[300,450] USD/m² + 25% (Aulas provisionales) +10% (demolición)
		Alto potencial de daño (APD)	Reforzamiento incremental	30% del costo de reposición
	Rural	Alto potencial de colapso (ARC)	Sustitución	30% del costo de reposición+ 10% (demolición)
			Intervención temporal contingente	30% del costo de reposición
		Alto potencial de daño (APD)	Reforzamiento incremental	30% del costo de reposición
Intermedia (zona 2)	Urbana	Alto potencial de colapso (ARC)	Sustitución	[300,450] USD/m² + 25% (Aulas provisionales) +10% (demolición)
		Alto potencial de daño (APD)	Reforzamiento incremental	30% del costo de reposición
	Rural	Alto potencial de colapso (ARC)	Sustitución por sistemas temporales	30% del costo de reposición+ 10% (demolición)
			Intervención temporal contingente.	30% del costo de reposición
		Alto potencial de daño (APD)	Reforzamiento incremental	30% del costo de reposición
Baja (zona 1)	Urbana y rural	Todos	No se incluyen en este plan de intervención	No aplica

La figura 6-2 presenta la distribución de las edificaciones escolares según el subprograma de intervención, la zona de amenaza sísmica y el escenario educativo. La figura 6-3 presenta lo correspondiente al programa a 10 años.

Figura 6-2 Plan de intervención de edificaciones según subprograma de intervención, zona de amenaza sísmica y escenario educativo

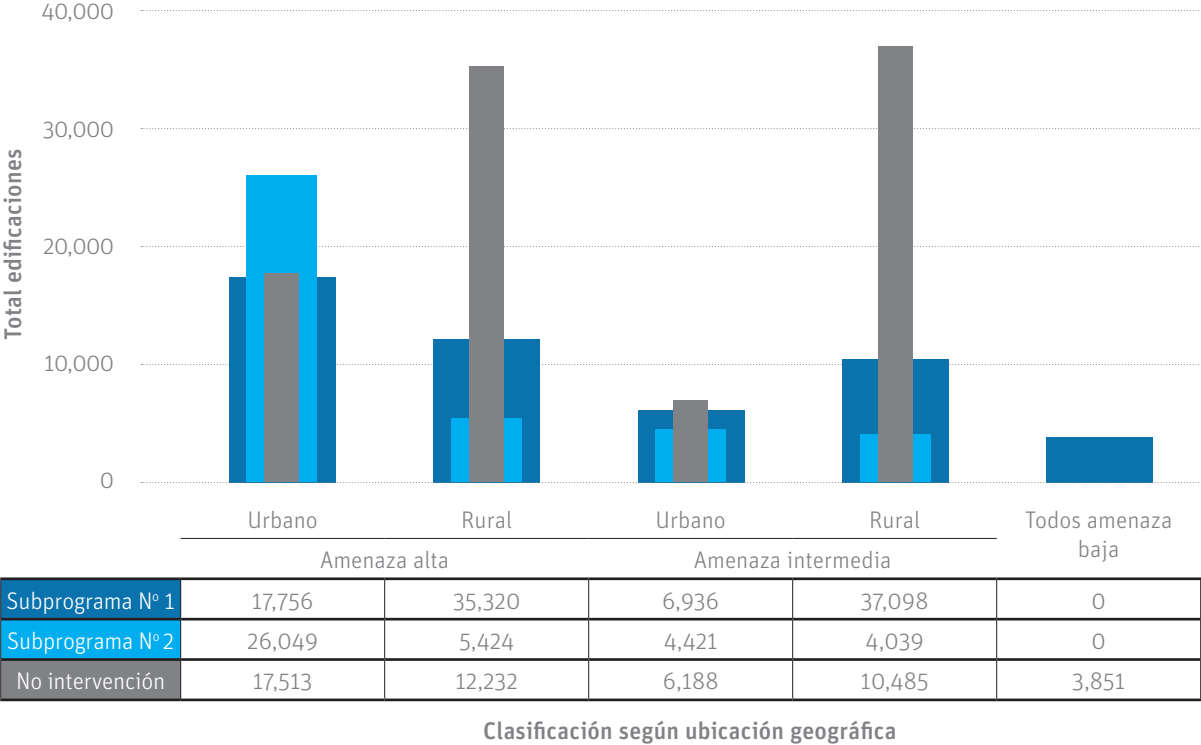
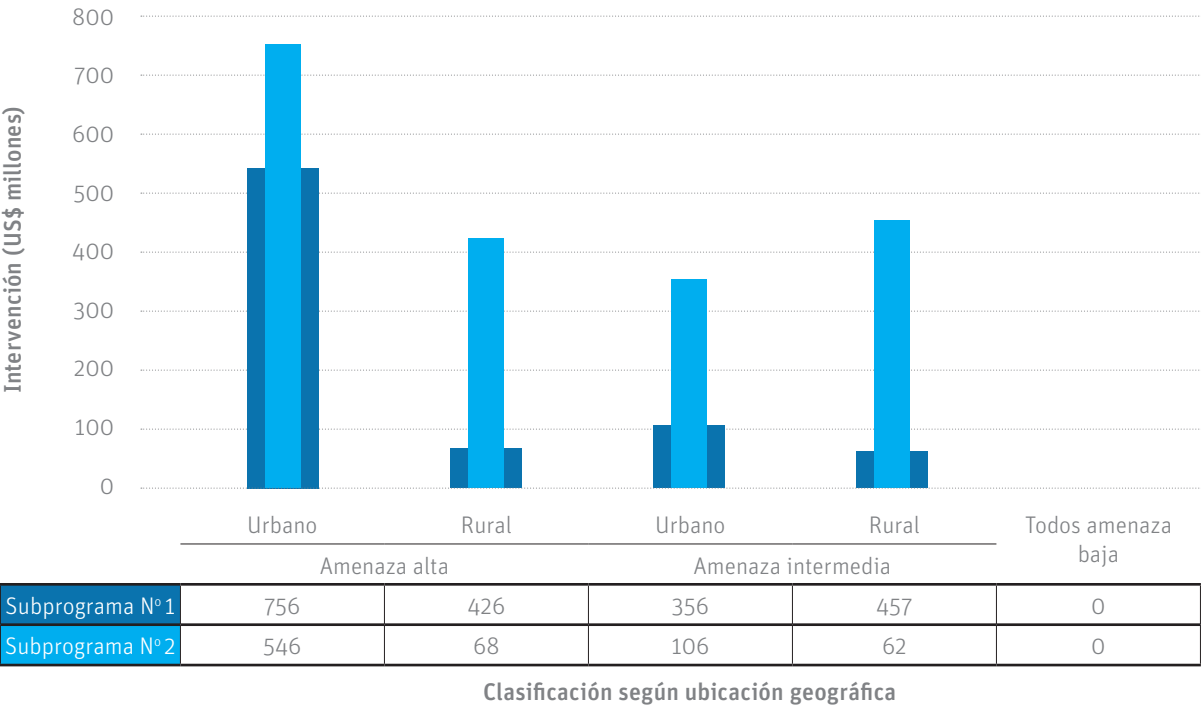
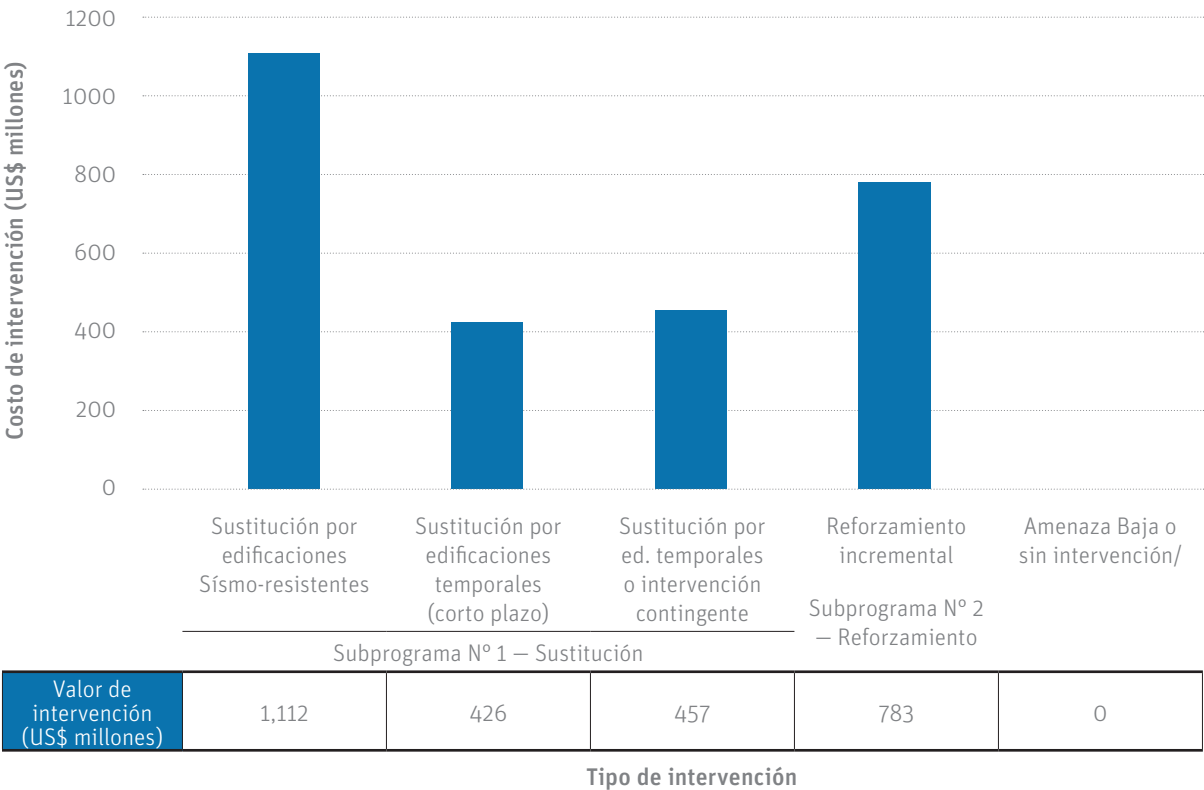


Figura 6-3 Plan de intervención de edificaciones según subprograma de intervención, zona de amenaza sísmica y escenario educativo para el programa a 10 años



Adicionalmente, la figura 6-4 presenta los costos de intervención según los subprogramas considerados y el tipo de intervención en cada caso. Esta tabla es representativa de los tipos de intervención recomendados en la tabla 6-2, la cual tiene en cuenta la ubicación geográfica y el nivel de riesgo.

Figura 6-4 Costos de intervención según los subprogramas y el tipo de intervención



Finalmente la tabla 6-5 presenta la brecha financiera para el programa a 10 años de reducción del riesgo sísmico.

Tabla 6-5 Resumen de la brecha financiera para el programa a 10 años de reducción del riesgo sísmico

Programa	N° de edificaciones	Valoración de la intervención (US\$ millones)
Costo del programa a 10 años		
Programa de reducción del riesgo sísmico	108,629	2,778
Brecha “programa a 10 años” discriminada por subprogramas		
Subprograma N° 1 – Sustitución	73,645	1,995
Subprograma N° 2 – Reforzamiento incremental	34,984	783

6.5 PRIORIZACIÓN DE LOCALES ESCOLARES POR SUBPROGRAMAS DE INTERVENCIÓN

Dado el número de edificios escolares a intervenir en un período de 10 años, es necesario definir un criterio de priorización de los locales escolares. Se busca maximizar la relación efectividad – costo de las intervenciones que se ejecuten con respecto a los objetivos planteados, en particular el de aumentar el número de estudiantes beneficiados por la reducción del riesgo. Para tal fin se sigue el siguiente proceso:

- a) Se agrega a nivel de local escolar el costo de las intervenciones requeridas en cada una de las edificaciones escolares.
- b) Se cuantifican los estudiantes que utilizan las edificaciones de un determinado local escolar (CIE).
- c) Se lleva a cabo el análisis probabilista de riesgo sísmico que permite valorar las pérdidas económicas esperadas por edificación y por local escolar.
- d) Se re-evalúa el riesgo sísmico considerando la intervención priorizada propuesta para cada tipología de edificación.
- e) Se evalúa la relación efectividad/costo de las intervenciones:

$$\frac{E}{C} = \frac{\text{Estudiantes}_{\text{potenciales local}} * (PAE\%_{\text{antes de intervenir}} - PAE\%_{\text{postintervención}})}{\text{Costo de intervención}}$$

Según esto se establece el orden prioritario de intervención por local escolar que permita maximizar los beneficios de reducción del riesgo según el número de estudiantes. Es necesario que la relación E/C se cuantifique paracada local escolar y no para edificaciones individuales, dado que el local escolar es la unidad de intervención.

Los criterios de priorización se aplican consistentemente a cada uno de los programas de intervención propuestos.

Las figuras 6-5, 6-6 y 6-7 presentan el impacto de las edificaciones intervenidas dentro del Subprograma No. 1 (sustituciones) y el Subprograma No. 2 (reforzamiento incremental) en términos del costo de intervención, el número de estudiantes beneficiados y la reducción porcentual de la PAE a nivel nacional. Dicho impacto se mide al definir el número de locales escolares a intervenir según el monto de dinero disponible para utilizar en la intervención de la infraestructura educativa.

Figura 6-5 Número de locales escolares intervenidos según monto de inversión

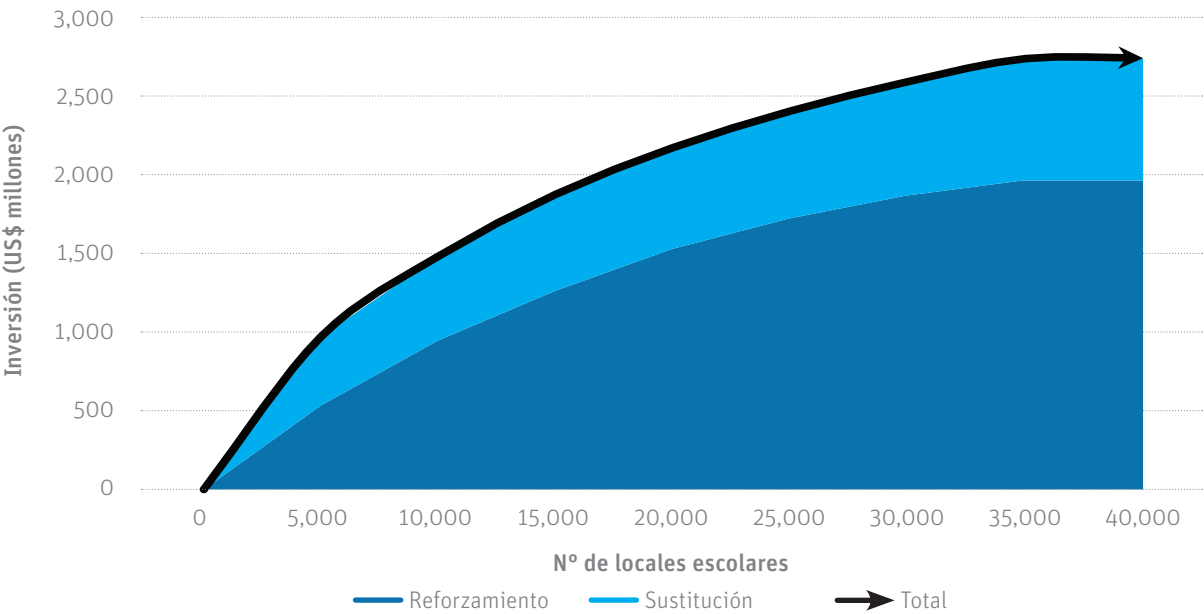


Figura 6-6 Número de estudiantes beneficiados según número de locales escolares intervenidos

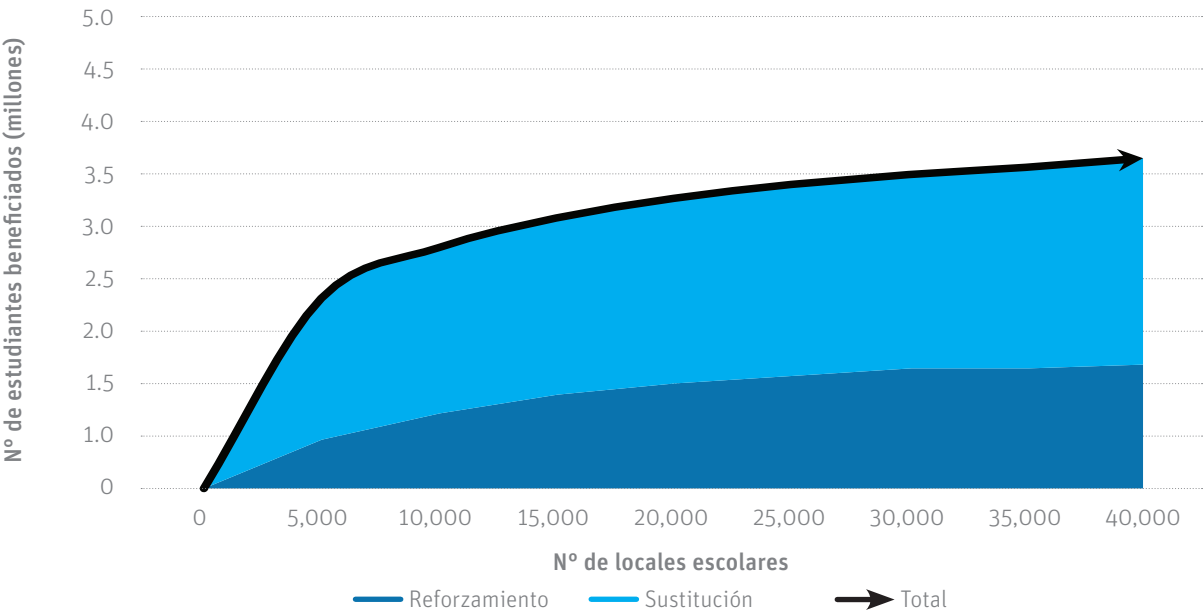
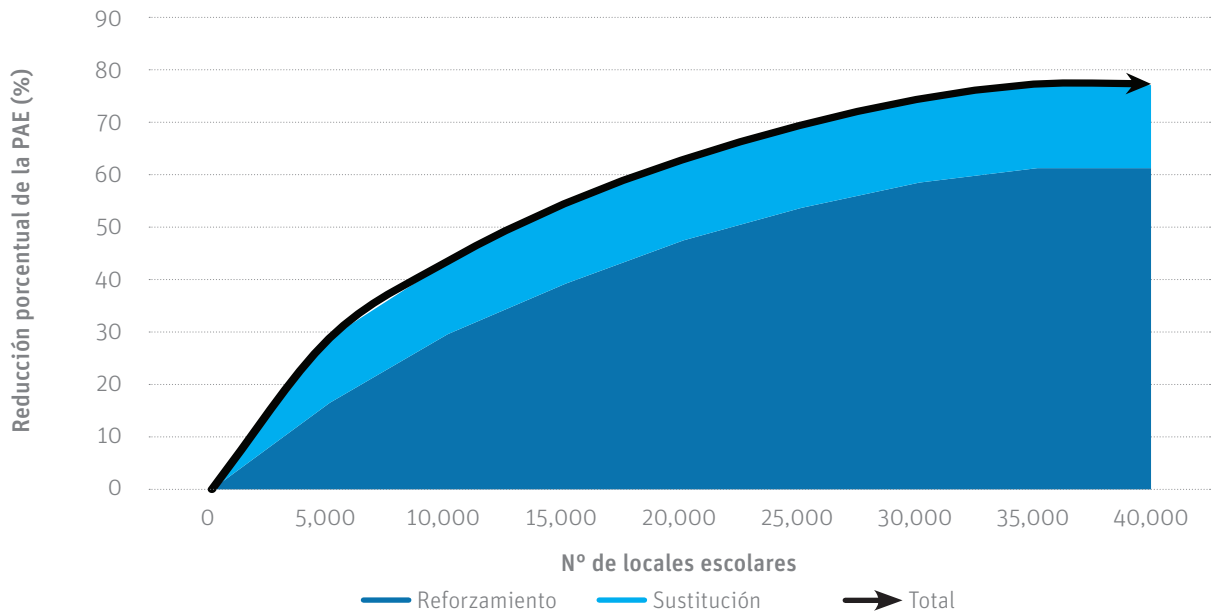


Figura 6-7 Reducción porcentual de la PAE según número de locales escolares intervenidos



6.6 DESAGREGACIÓN DE INTERVENCIONES POR REGIONES

Utilizando el mismo procedimiento de priorización de intervenciones para cada región se obtuvieron los resultados de la tabla 6-6.

Tabla 6-6 Valoración de intervenciones por departamento

Departamento	N° total de locales escolares	N° total de edificaciones	N° de edificaciones con ARC	N° de edificaciones con APD	Valoración total (US\$ millones)			
					Portafolio	Subpro-grama 1	Subpro-grama 2	Plan 10 años
AMAZONAS	1,648	6,474	3,261	594	241	63	12	75
ANCASH	2,444	12,368	5,331	1,500	559	136	32	168
APURIMAC	1,622	6,879	3,911	526	339	114	13	128
AREQUIPA	1,153	6,902	1,298	2,403	362	32	56	88
AYACUCHO	2,218	9,757	5,154	906	477	142	20	162
CAJAMARCA	3,381	12,710	6,976	1,207	639	188	25	213
CALLAO	236	1,996	205	880	120	7	24	31
CUSCO	2,378	12,159	6,026	1,137	634	176	28	204
HUANCAVELICA	2,068	8,424	3,672	539	379	80	12	92
HUANUCO	2,042	8,572	4,161	799	380	92	17	109
ICA	718	4,147	862	1,283	190	28	24	52
JUNIN	2,577	10,840	4,716	2,075	629	176	62	237
LA LIBERTAD	1,995	9,403	3,798	1,985	484	118	42	160
LAMBAYEQUE	980	4,775	1,504	1,440	214	38	28	66
LIMA	2,910	20,445	4,195	9,139	1,147	174	214	388
LORETO	2,375	5,750	1,507	648	290	22	15	36
MADRE DE DIOS	266	1,303	168	49	59	5	1	6
MOQUEGUA	288	1,930	365	436	83	8	10	17
PASCO	997	3,083	839	651	198	19	19	38
PIURA	2,602	11,494	4,010	3,013	470	105	52	157
PUNO	2,201	12,365	6,273	1,063	567	164	25	190
SAN MARTIN	1,672	7,534	3,041	1,304	312	62	31	93
TACNA	327	2,313	318	311	92	7	6	13
TUMBES	299	1,644	379	582	56	10	7	17
UCAYALI	1,078	4,045	1,675	514	164	30	9	38

Para cada región se definió:

- El listado priorizado preliminar² de intervenciones por local escolar
- Las propuestas de intervención para cada una de las edificaciones y el costo estimado
- El costo agregado de cada uno de los subprogramas propuestos

2. La priorización final será con la incorporación de otros criterios no ingenieriles definidos por MINEDU.

A manera ilustrativa, la tabla 6-7 presenta una parte del listado de locales escolares priorizada según los criterios anteriores para el Departamento de Amazonas. Además la tabla 6-8 presenta el listado detallado de edificaciones que hay en los locales críticos.

Tabla 6-7 Priorización de locales escolares para Amazonas

ID local escolar	N° de estudiantes	Valor de reposición	PAE local	PAE local	N° de edificaciones	Costo total de intervención (US\$)	Relación E/C
6083	180	477,548	16,232	34	5	64,800	3,373
10725	149	387,900	3,145	8	6	10,800	3,357
4442	35	697,789	6,246	9	8	23,200	3,348
6969	438	524,958	9,717	19	11	45,000	3,031
11386	50	1,055,519	15,630	15	5	244,900	2,919
9798	169	677,532	10,094	15	4	62,400	2,890
14281	319	1,524,016	20,659	14	11	236,800	2,792
12630	55	1,344,720	29,460	22	4	300,000	2,789
3225	154	644,345	6,928	11	9	109,500	2,437
8708	236	502,977	4,562	9	8	48,100	2,250

Tabla 6-8 Desagregación de edificaciones de locales escolares priorizados en Amazonas

ID local escolar	Provincia	Área (m² construidos)	Tipología estructural	Valor expuesto	Tipo de intervención	Costo intervención	Estudiantes por edificación
6083	CONDORCANQUI	240	780-POST	103,440	Ninguna	—	39
6083	CONDORCANQUI	400	P	172,400	Sustitución con otros sistemas	40,000	65
6083	CONDORCANQUI	200	P	86,200	Sustitución con otros sistemas	20,000	32
6083	CONDORCANQUI	48	P	20,688	Sustitución con otros sistemas	4,800	8
6083	CONDORCANQUI	220	780-POST	94,820	Ninguna	—	36
10725	RODRIGUEZ DE MENDOZA	80	780-POST	34,480	Ninguna	—	13
10725	RODRIGUEZ DE MENDOZA	480	780-POST	206,880	Ninguna	—	79
10725	RODRIGUEZ DE MENDOZA	40	780-POST	17,240	Ninguna	—	7
10725	RODRIGUEZ DE MENDOZA	64	780-POST	27,584	Ninguna	—	11
10725	RODRIGUEZ DE MENDOZA	128	780-POST	55,168	Ninguna	—	21
10725	RODRIGUEZ DE MENDOZA	108	A	46,548	Sustitución con otros sistemas	10,800	18
4442	CONDORCANQUI	50	P	21,550	Sustitución con otros sistemas	5,000	9
4442	CONDORCANQUI	10	M	4,310	Sustitución con otros sistemas	1,000	2
4442	CONDORCANQUI	15	P	6,465	Sustitución con otros sistemas	1,500	3
4442	CONDORCANQUI	126	780-POST	54,306	Ninguna	—	22

Según esto se han desarrollado las siguientes figuras que hacen parte del plan de implementación para cada una de las regiones. Para efectos ilustrativos se presentan las gráficas comparativas entre dos

regiones, Lima y Amazonas, en las cuales se hace evidente las diferencias regionales que pueden llegar a presentarse en la implementación del plan.

Figura 6-8 Comparación de resultados para Lima y Amazonas

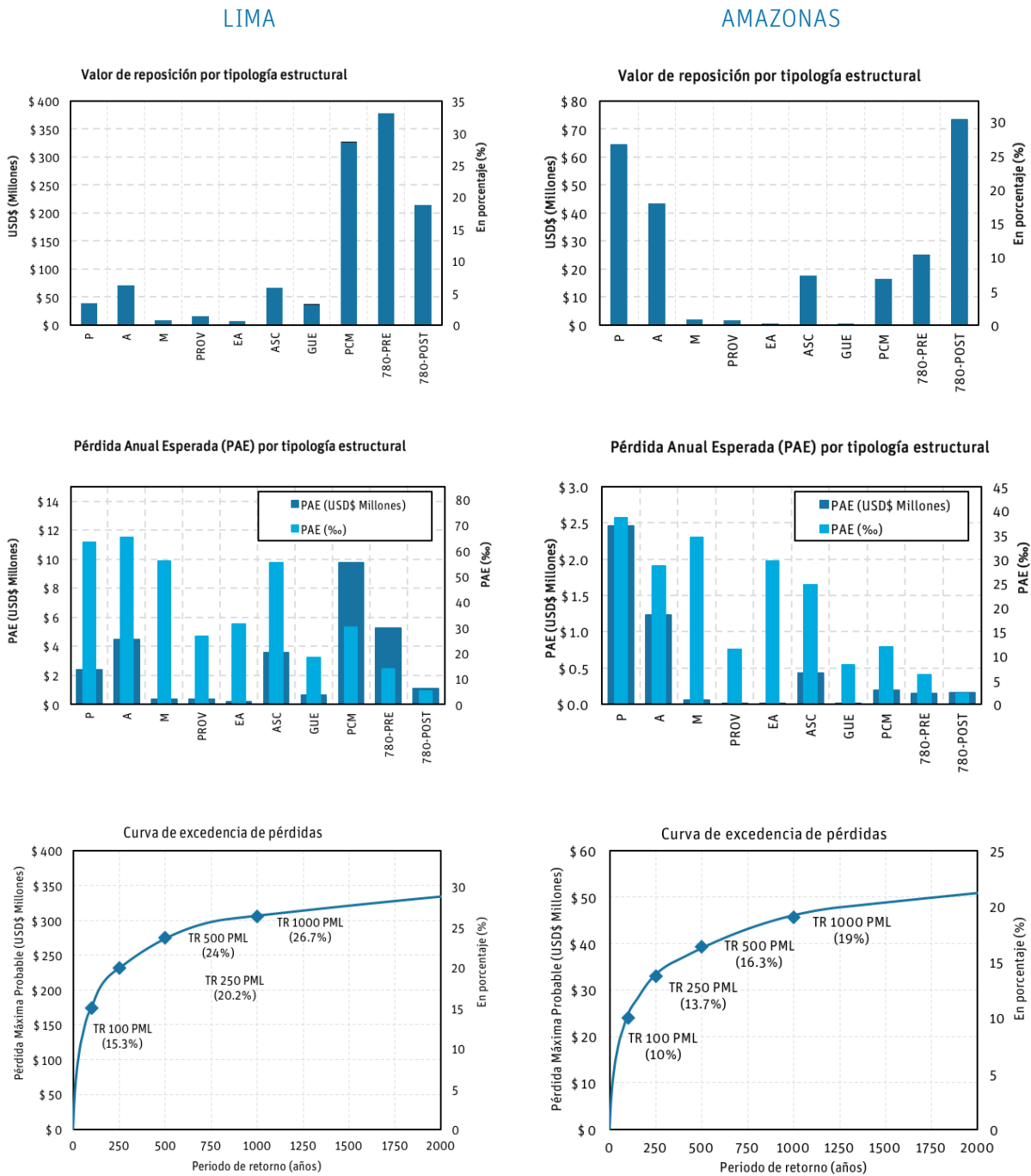
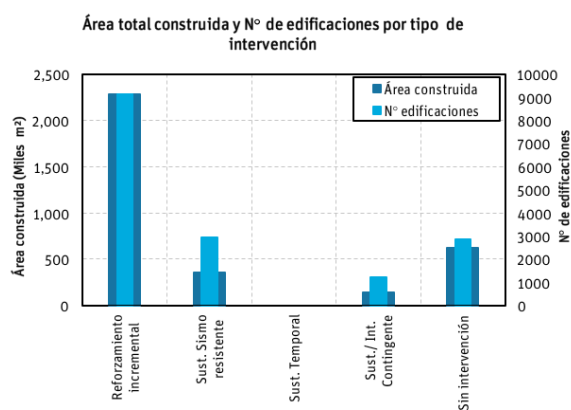
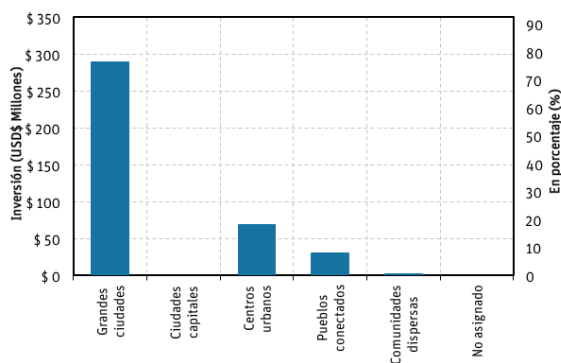


Figura 6-8 Comparación de resultados para Lima y Amazonas

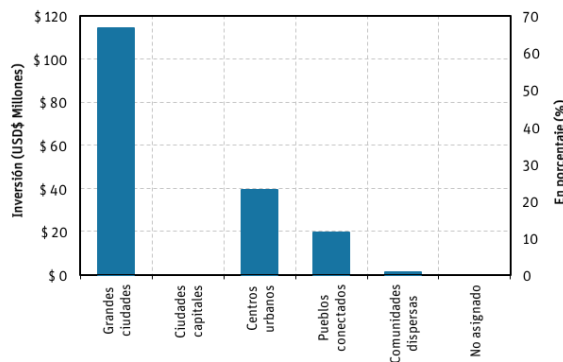
LIMA



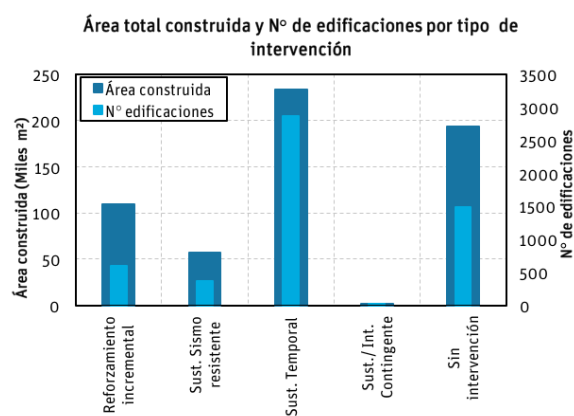
Inversión por escenario educativo para intervenciones totales



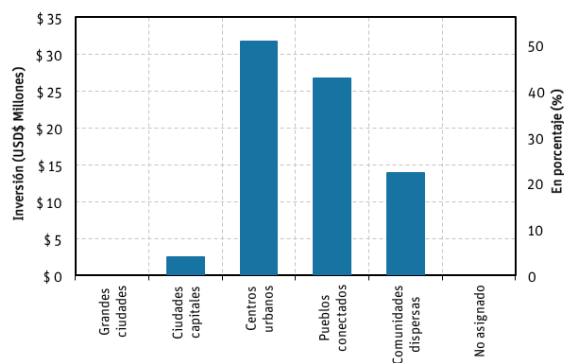
Inversión por escenario educativo para sustituciones



AMAZONAS



Inversión por escenario educativo para intervenciones totales



Inversión por escenario educativo para sustituciones

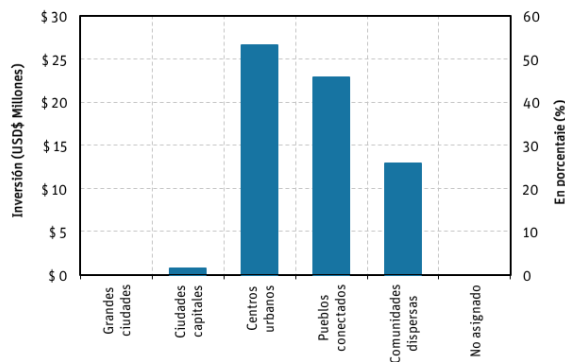
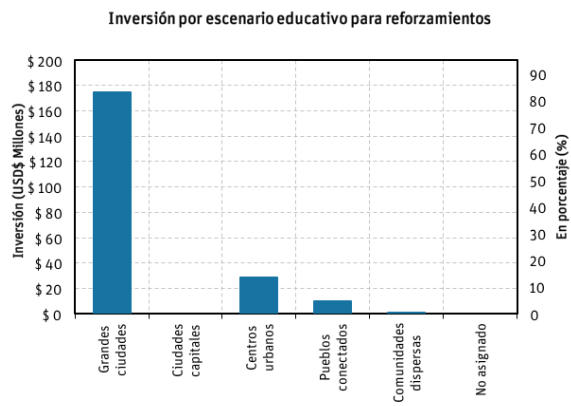


Figura 6-8 Comparación de resultados para Lima y Amazonas

LIMA



AMAZONAS

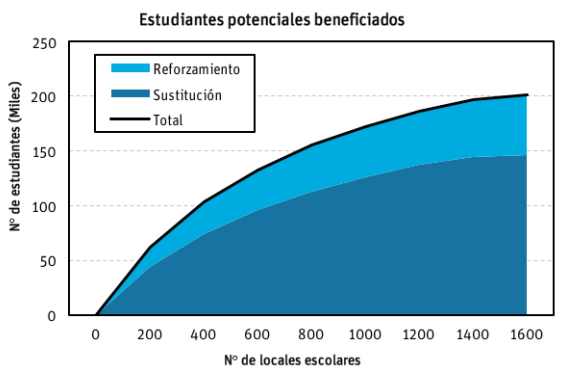
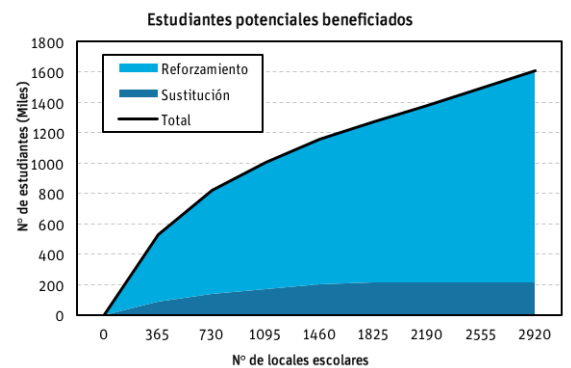
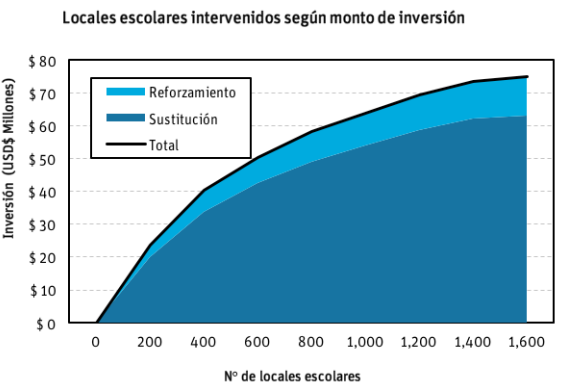
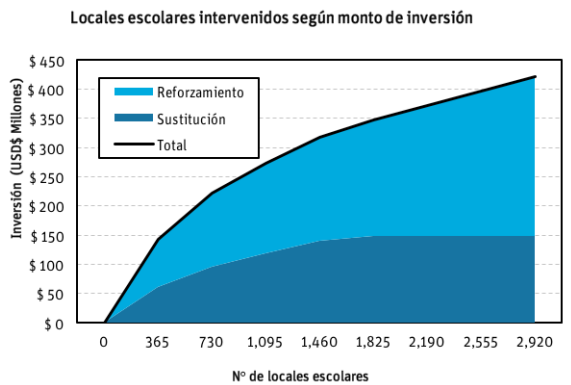
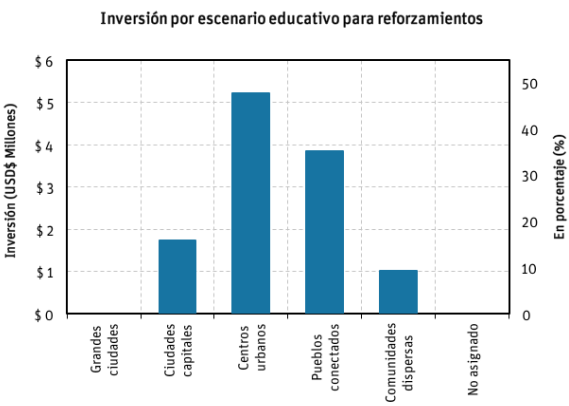
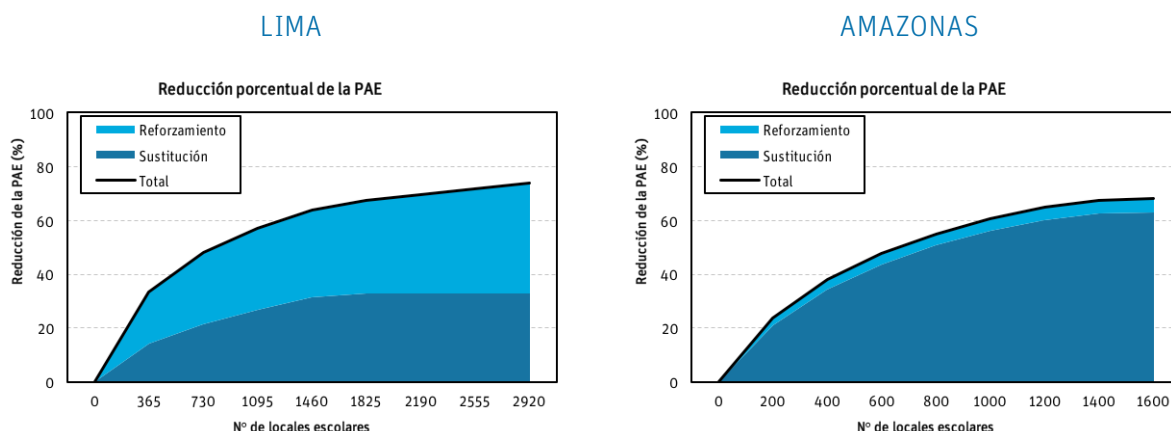


Figura 6-8 Comparación de resultados para Lima y Amazonas



A partir de esta información los gobiernos regionales pueden:

1. Dado un monto de recursos disponibles, realizar una distribución tentativa inicial entre los subprogramas de intervención propuestos.
2. Cuantificar los siguientes tres parámetros según la inversión deseada en cada programa:
 - Impacto en número de estudiantes beneficiados por las intervenciones
 - Reducción porcentual del riesgo con respecto al riesgo inicial
 - Número de locales escolares o edificaciones intervenidas
3. Redistribuir los montos por programas hasta llegar a una solución de alto impacto con los criterios propios.
4. Consultar la lista de priorización de locales escolares para identificar la ubicación geográfica y las características de los locales incluidos. En particular, la lista indica para cada edificación el tipo de intervención recomendado y el presupuesto estimado.
5. Conformar los términos para la ejecución de proyectos de intervención específicos y proceder con la contratación de diseños definitivos y obras de intervención.

Para simplificar y facilitar la organización de la información y su divulgación se diseñaron unos formatos con la información básica en cada una de las regiones. En el anexo 6.1 se presenta un formato típico con propósitos ilustrativos.

CONCLUSIONES

Los análisis realizados en el presente estudio permiten establecer una serie de conclusiones con respecto a los elementos a considerar en el diseño e implementación de una estrategia para la reducción del riesgo sísmico de edificaciones escolares. A continuación se enumeran dichos aspectos.

- a) Los objetivos principales del plan de reducción del riesgo sísmico para la infraestructura escolar son los siguientes:
 - Reducir el riesgo de muerte o heridas de la comunidad educativa por eventos sísmicos (maximizar el número de estudiantes beneficiados).
 - Reducir los daños en la infraestructura y proteger la propiedad.
 - Reducir la interrupción del servicio educativo.
- b) El nivel de riesgo sísmico identificado en el estudio, permite clasificar el portafolio de infraestructura escolar en edificaciones con alto potencial de colapso, con alto potencial de daño, y con buen desempeño sísmico.
- c) El Gobierno de Perú tiene un reto importante ya que el 51% de las edificaciones corresponden a tipológicas constructivas que tienen alto potencial de colapso, y el 21% de las edificaciones tienen alto potencial de daño.
- d) A partir de esta agrupación, el estudio propone los respectivos programas de sustitución, de reforzamiento, y de intervención contingente como estrategias para reducir el riesgo sísmico. Como parte del programa de reforzamiento, se propone implementar el reforzamiento incremental como una técnica innovadora y económica promovida por el Banco Mundial.
- e) Los costos directos asignados en función del programa, de la zona climática y del escenario educativo, permiten estimar que la brecha financiera que deberá superar el Gobierno de Perú en los próximos 10 años es de US\$2778 millones.
- f) La pérdida anual esperada, permite cuantificar el riesgo a nivel de edificaciones, locales, distritos, provincias y regiones. Con esta información, se dispone de una línea base distribuida en el territorio y constituye una herramienta para la toma de decisiones de política nacional y subnacional.
- g) La pérdida anual esperada antes y después de la intervención, el número de estudiantes, y el costo de la intervención; se pueden combinar en un criterio de priorización que maximiza la costo-efectividad, dado el tamaño del portafolio (187,312 edificaciones) y las limitaciones económicas del país.
- h) La pérdida anual esperada del portafolio es de US\$190 millones que en términos relativos corresponde al 2.1% de su valor de reposición. Estas pérdidas, no consideran pérdidas en contenidos ni las pérdidas indirectas como las que resultan de la interrupción del funcionamiento y lucro cesante. En comparación con el análisis de otros portafolios similares esta cifra resulta relativamente alta, lo cual se atribuye a la alta amenaza sísmica y a la alta vulnerabilidad de la mayoría de los componentes del portafolio.

- i) El riesgo no está distribuido uniformemente en el portafolio. Los primeros 15,000 locales escolares (38%) concentran algo más del 55% del riesgo. La distribución de la pérdida anual esperada en el país refleja que la mayoría de regiones del sur, la capital y una región en el norte tienen el riesgo sísmico más alto (entre US\$10 y 28 millones). La pérdida anual esperada es crítica en los edificios escolares de adobe, y en las zonas rurales del país clasificadas como pueblos conectados.
- j) La pérdida máxima probable, para los eventos cuyo periodo de retorno es de 1000 años, es US\$739 millones que corresponden aproximadamente al 8% del valor de reposición del portafolio. Esta cifra es igualmente alta al compararla con portafolios equivalentes en otras regiones y países.
- k) Las métricas de riesgo estimadas para cada región, son sistematizadas en formatos con gráficos y mapas que facilitan la comunicación y la preparación de estrategias de intervención.
- l) Los principales componentes del plan de intervención son los siguientes:
 - Los criterios para la definición de las intervenciones para las diferentes tipologías constructivas identificadas.
 - Una estimación de la inversión económica para la mitigación del riesgo sísmico (brecha financiera) y la definición de un plan de inversiones acorde con la disponibilidad presupuestal.
 - La definición de la estrategia de intervención óptima
 - Los criterios de priorización para cada línea de intervención propuesta que permitan maximizar los objetivos planteados de reducción del riesgo
 - La organización de la información técnica que se requiere para emprender los planes de acción por regiones.

REFERENCIAS

1. Instituto Nacional de Estadística Informática (INEI) y Ministerio de Educación (MINEDU), “*Censo de Infraestructura Escolar (CIE)*”. 2013, Lima, Perú.
2. Universidad de los Andes, “*la evaluación del riesgo sísmico del portafolio de edificaciones en locales escolares en Lima Metropolitana y Callao a partir de los resultados del CIE*”. 2014, Bogotá D.C: Colombia.
3. ERN-AL. Metodología de Modelación Probabilista de Riesgos Naturales. Informe Técnico ERN-CAPRA-T1-1. Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales — América Latina; 2011.
4. Cardona, O.D., M. Ordaz, L. Yamin, M. Marulanda, A. Barbat, Earthquake Loss Assessment for Integrated Disaster Risk Management. Journal of Earthquake Engineering, 2008. 12(sup2): p. 48–59.
5. Cardona, O.D. and L.E. Yamin, *Seismic Microzonation and Estimation of Earthquake Loss Scenarios: Integrated Risk Mitigation Project of Bogotá, Colombia*. Earthquake Spectra, 1997. 13(4): p. 795–814.
6. Yamin, L., F. Ghesquiere, O. Cardona, M. Ordaz, Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre, El caso de Bogotá Colombia. 2013, Bogotá, Colombia: Banco Mundial, Universidad de los Andes.
7. Pontificia Universidad Católica de Perú (PUCP), “*Evaluación probabilista del riesgo sísmico de locales escolares en la ciudad de Lima*”. 2014, Lima: Perú.
8. Yamin, L., A. Hurtado, A. Barbat, G. Bernal, O. Cardona, *Earthquake Vulnerability Assessment of Buildings for Catastrophic Risk: Analysis in Urban Areas*, in 15 World Conference on Earthquake Engineering (WCEE). 2012, Lisboa, Portugal.
9. Yamin LE, Hurtado A, Barbat AH, Cardona OD. Seismic and wind vulnerability assessment for the GAR-13 global risk assessment. International Journal of Disaster Risk Reduction. 2014;10:452–60.
10. Instituto Nacional de Estadística Informática (INEI) y Ministerio de Educación (MINEDU), “*Manual del Evaluador Técnico*” Censo de Infraestructura Escolar (CIE). 2013, Lima: Perú.
11. Norma E-030. 2015 “Diseño Sismorresistente. Lima: Ministerio de Construcción, Vivienda y Saneamiento — SENCICO.
12. Allen T, and D. Wald D (2009). Short Note. On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 2009
13. ISDR, U.N., UNISDR. GAR13: Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. 2013: Geneva, Switzerland.

14. Universidad de los Andes. *“Asesoría técnica en la definición y establecimiento de criterios de intervención y priorización que contribuyan a un mejor planeamiento, eficiencia y sostenibilidad en materia de infraestructura educativa”*. Centro de investigaciones y obras civiles (CIMOC), 2016.
15. Building Seismic Safety Council. 2009. FEMA 420. “Engineering Guideline for Incremental Seismic Rehabilitation”. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
16. Pontificia Universidad Católica del Perú, Universidad Nacional de Ingeniería, 2016: *“Evaluación simplificada de las tres técnicas de reforzamiento más apropiadas. Propuesta de actualización del reglamento nacional de edificaciones para incorporar el reforzamiento incremental en edificaciones escolares tipo 780 construidas antes de 1997”*. Lima, Perú.

ANEXO 6.1

Formato típico para una región con la información de la estrategia de reducción del riesgo sísmico

ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO DE LA INFRAESTRUCTURA EDUCATIVA DEL PERÚ

Región: Amazonas

RESUMEN DE LA ESTRATEGIA ÓPTIMA DE INTERVENCIÓN PROPUESTA

Objetivo general y alcance

Este documento presenta una síntesis de las bases para el diseño e implementación de programas regionales de reducción del riesgo sísmico de la infraestructura educativa del Perú con el fin de alcanzar los siguientes objetivos y prioridades:

1. Reducir el riesgo de muerte o heridas de la comunidad educativa por eventos sísmicos
2. Reducir los daños en la infraestructura y proteger la propiedad
3. Reducir la interrupción del servicio educativo
4. Beneficiar la mayor cantidad de estudiantes desde el punto de vista de reducción del riesgo sísmico.

En consecuencia se definen las siguientes prioridades en relación con la afectación directa de la infraestructura educativa:

- Reducir el riesgo de colapso total o parcial
- Reducir la afectación de elementos no estructurales
- Reducir la afectación de contenidos y equipos

Los programas regionales de reducción de riesgo sísmico de la infraestructura educativa se proponen en el marco de la formulación del Plan Nacional de Infraestructura Educativa 2015. Los programas se fundamentan en una estrategia óptima de intervención para la reducción del riesgo de las edificaciones principales en locales escolares críticos. Para cada una de las regiones del país se plantea el orden de intervención prioritario por local escolar con el fin de lograr la máxima relación eficiencia-costos en el logro de los objetivos y prioridades antes mencionadas. Con base en un presupuesto disponible de referencia, cada Gobierno Regional podrá seleccionar uno o más programas de intervención prioritaria y definir el número de edificaciones y locales escolares que puede alcanzar a intervenir en cada programa.

La metodología permite responder las siguientes preguntas específicas:

1. ¿Cómo se deben invertir los recursos de manera racional y eficiente para maximizar el logro de los objetivos de reducción del riesgo sísmico en la infraestructura educativa de cada región de Perú?
2. ¿A qué locales escolares y edificaciones se debe dar prioridad?
3. ¿Cuántos recursos se requieren para realizar la intervención de todo el portafolio?
4. ¿Cómo se puede seleccionar el programa de intervenciones y cuál es el alcance con el presupuesto disponible?
5. ¿Cómo se conforman los términos para la eventual contratación de diseños finales y obras de reforzamiento?

Limitaciones y consideraciones

La estrategia de intervención para la reducción del riesgo sísmico en la infraestructura educativa del Perú se plantea con base en las siguientes limitaciones y consideraciones:

- a) Se utiliza la información disponible del Censo de Infraestructura Escolar (CIE, 2013).
 - b) Para el análisis del riesgo sísmico se utilizan valores de reposición de referencia que tienen en cuenta la ubicación geográfica y la facilidad de llevar a cabo una sustitución en dicha zona.
 - c) Se utilizan valoraciones económicas para los distintos tipos de intervención posibles. Se utilizan los siguientes valores nominales de referencia:

– Sustitución por edificaciones sismo resistentes (uso de aulas temporales)	300–450 USD/m ² + Adicionales
– Sustitución por cualquier sistema estructural aceptable (corto plazo)	30% del costo de reposición +Adicionales
– Sustitución temporal aceptable (corto plazo) o intervención contingente	30% del costo de reposición +Adicionales
– Reforzamiento incremental ³	30% del costo de reposición
 - d) No se han tenido en cuenta variaciones en los costos asociados a condiciones macroeconómicas particulares como por ejemplo las que se presentan después de la ocurrencia de eventos catastróficos ante la escasez de materiales y mano de obra calificada.
 - e) No se han tenido en cuenta variaciones en los costos asociados a condiciones macroeconómicas particulares como por ejemplo las que se presentan después de la ocurrencia de eventos catastróficos ante la escasez de materiales y mano de obra calificada.
 - f) Se consideran alternativas de intervención típicas según la experiencia de PRONIED. No se han investigado nuevas opciones de intervención excepto el reforzamiento incremental propuesto para los sistemas 780 PRE.
3. Reforzamiento incremental sistemas 780-PRE: Reforzamiento de la edificación para prevenir el colapso y proteger la vida. Se requiere más de una etapa para cumplir a cabalidad el reglamento de diseño.

Estrategia de intervención óptima recomendada

La estrategia de intervención recomendada se basa en lo siguiente:

- a) Se seleccionan las edificaciones que ameritan algún tipo de intervención y que generen una reducción efectiva del riesgo sísmico:
 - No se incluyen las edificaciones ubicadas en amenaza sísmica baja.
 - Solo se incluyen edificaciones que tengan un uso que involucre alta ocupación de personas.
- b) A cada edificación se asigna un nivel de intervención único en función a su **ubicación** y a su **tipología estructural** y que puede ser alguno de los siguientes:
 - **Alto riesgo de colapso (ARC):** se define la sustitución como el nivel de intervención requerido dado el **alto riesgo de colapso** ante eventos sísmicos de intensidad intermedia o alta y que la experiencia demuestra que su eventual intervención implica grandes dificultades técnicas, altos costos y pocas garantías de alcanzar niveles aceptables de sismo resistencia. Principalmente las ubicadas en amenaza sísmica alta.
 - **Alto potencial de daño (APD):** se define el reforzamiento como el nivel de intervención para tipologías con **alto potencial de daño** cuya intervención estructural es viable desde el punto de vista técnico, funcional y económico. Dentro de este nivel de intervención se considera como solución viable al reforzamiento incremental (que permitiría reducir la probabilidad de colapso y de pérdida de vidas humanas, sin que necesariamente se cumplan la totalidad de los requerimientos de la normativa actual).
- c) La **priorización** se plantea por la relación efectividad-costo esperada (**E/C**) que es un indicador que permite evaluar la eficiencia en reducción de la afectación sobre los estudiantes debidos al riesgo sísmico ante inversiones económicas determinadas por Local Escolar en obras de sustitución o reforzamiento.
- d) Se plantea el plan de intervención a 10 años de la siguiente manera
 - Programa de reducción del riesgo sísmico-Intervención por local escolar:
 - Subprograma de Intervención No. 1: sustitución de edificaciones de alto riesgo de colapso.
 - Subprograma de Intervención No. 2: reforzamientos de edificaciones con alto potencial de daño.
- e) Se propone el siguiente **procedimiento para definir el alcance del programa de inversiones:**
 1. Definición el monto total de recursos disponibles y dividirlo tentativamente en los subprogramas en que se desee invertir.
 2. Usar las figuras anexas para cuantificar los siguientes tres parámetros según la inversión deseada en cada Programa:
 - Reducción porcentual del riesgo con respecto al riesgo inicial.
 - Impacto en número de estudiantes beneficiados por las intervenciones
 - Número de locales escolares o edificaciones intervenidas.

3. Redistribuir los montos por programas hasta llegar a una solución de alto impacto con los criterios propios.
4. Consultar la lista de priorización de locales escolares para identificar las características de los locales incluidos. En particular, la lista indica para cada edificación el tipo de intervención recomendado y el presupuesto estimado.
5. Conformar con base en esto los términos para la ejecución de proyectos de intervención específicos y proceder con la contratación de diseños definitivos y obras de intervención.

CONVENCIONES UTILIZADAS EN EL DOCUMENTO

Convención de nombres de sistemas estructurales	
Nombre sistema estructural	Código sistema estructural
Precarias	P
Adobe	A
Madera	M
Aula provisional	PROV
Estructura de acero	EA
Albañilería sin confinar	ASC
Gran unidad escolar	GUE
Porticos de concreto reforzado con o sin muros de mampostería	PCM
Módulo 780-PRE	780-PRE
Módulo 780-POST	780-POST

Convención de nombres de provincias		
Nombre provincia	Código provincia	N° de alumnos
CHACHAPOYAS	CHAC	13033
BAGUA	BAG	24742
UTCUBAMBA	UTC	28802
CONDORCANQUI	COND	21827
BONGARA	BONG	6043
LUYA	LUYA	12602
RODRIGUEZ DE MENDOZA	ROD	6029

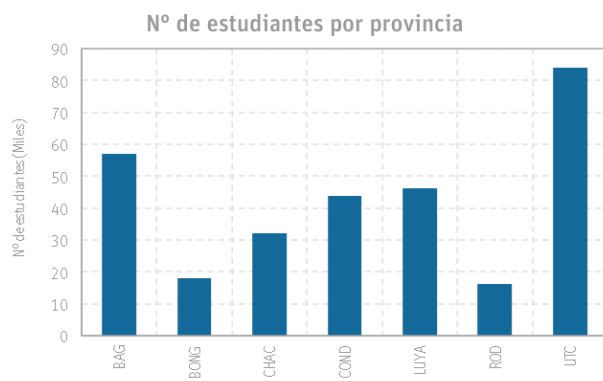
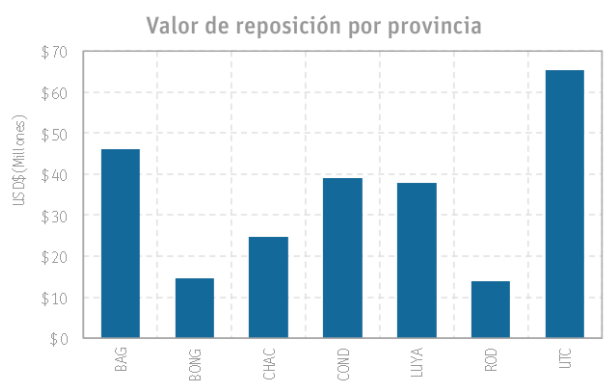
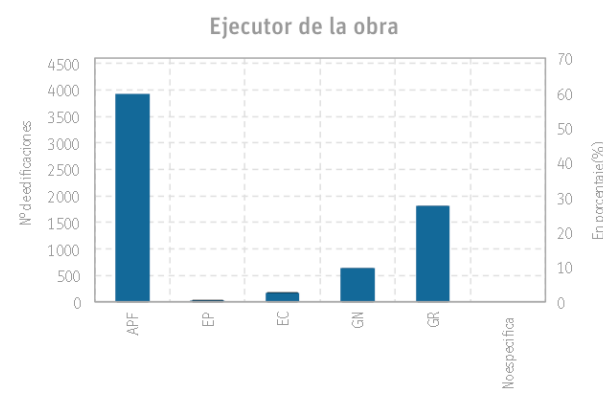
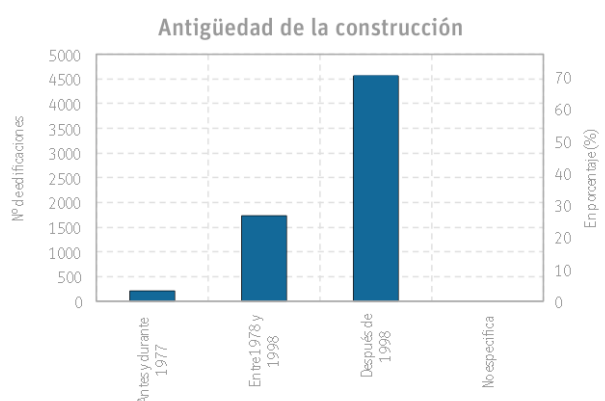
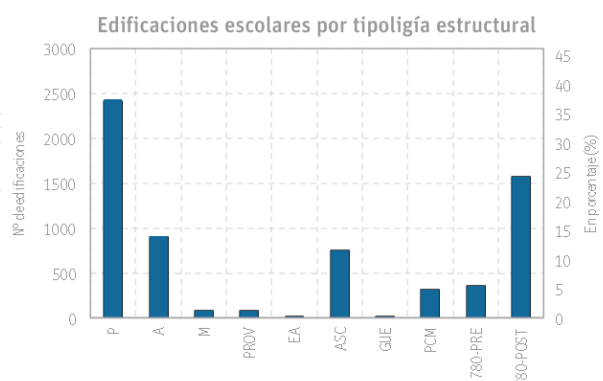
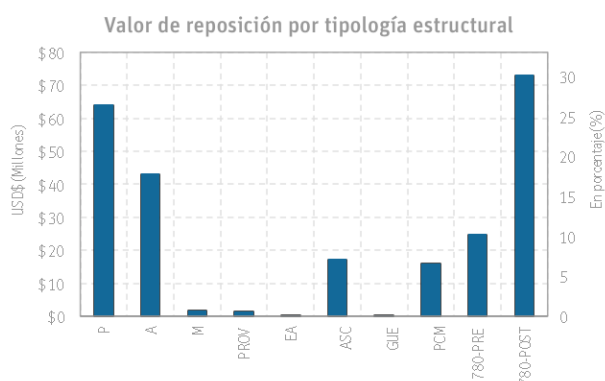
Convención de nombres de ejecutores de la obra	
Nombre ejecutor	Código ejecutor
APAFA/ Autoconstrucción	APF
Empresa privada	EP
Entidades cooperantes	EC
Gobierno Nacional/ Proyecto especial	GN
Gobierno Regional/ Local	GR

Convención de Escenarios Educativos		
Escenario	Descripción	Zona
1	Grandes ciudades	Urbana
2	Ciudades capitales	Urbana
3	Centros urbanos	Urbana
4	Pueblos conectados	Rural
5	Comunidades dispersas	Rural

Convención de nombres de tipos de intervención	
Tipo intervención	Código intervención
Reforzamiento incremental	Reforzamiento incremental
Sustitución por edificaciones Sismo Resistentes	Sust. Sismo resistente
Sustitución por edificaciones temporales a corto plazo	Sust. Temporal
Sustitución temporal o intervención contingente	Sust./ Int. Contingente
Sin intervención	Sin intervención

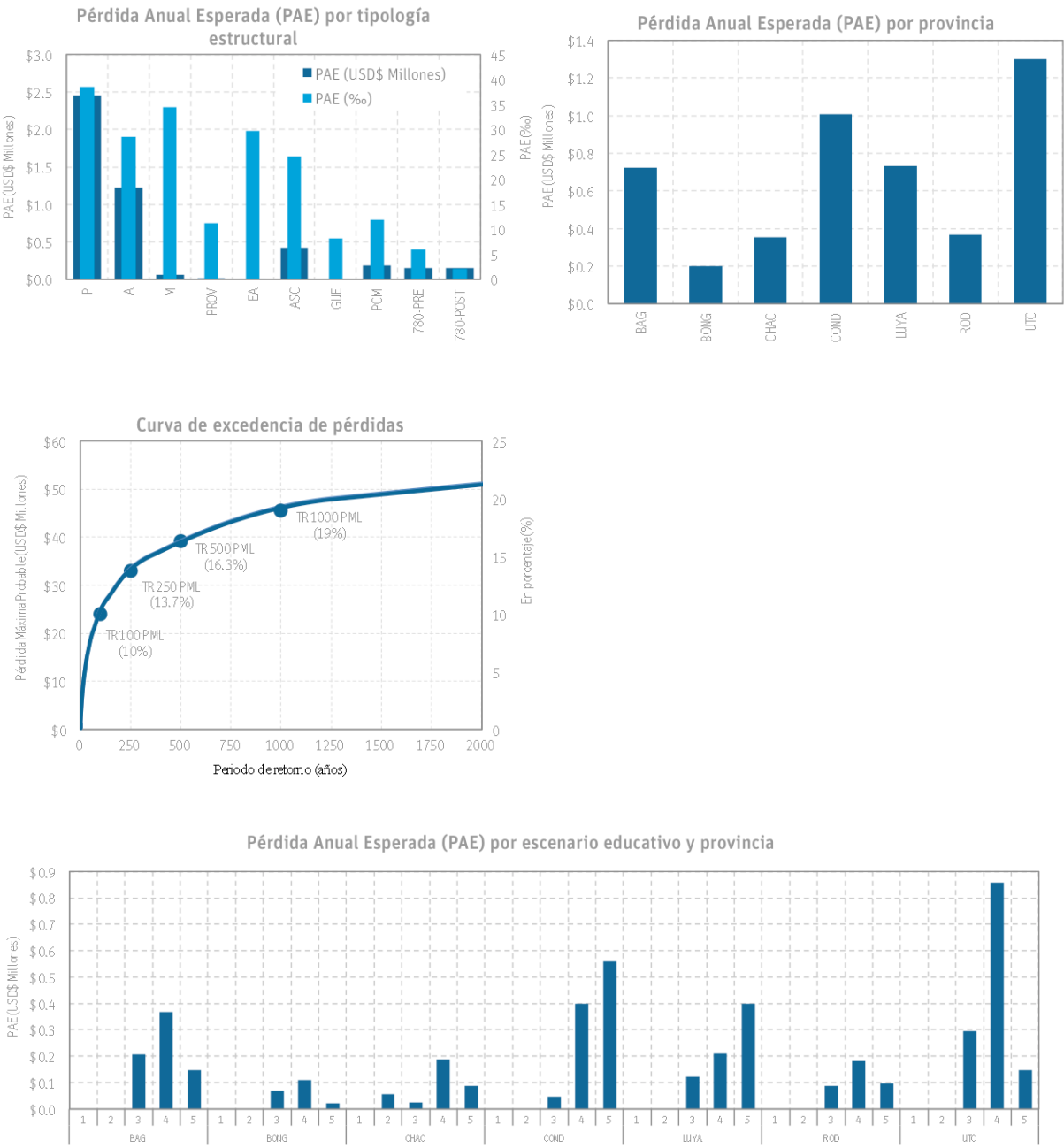
INFORMACIÓN GENERAL DE EXPOSICIÓN

Número de habitantes	375,993	Total Locales Escolares	1,648
Extensión (km ²)	39,249	Total Edificaciones	6,474
Área construida (m ²)	651,840	Valor de reposición (USD\$ Millones)	\$241.2



RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL RIESGO SÍSMICO

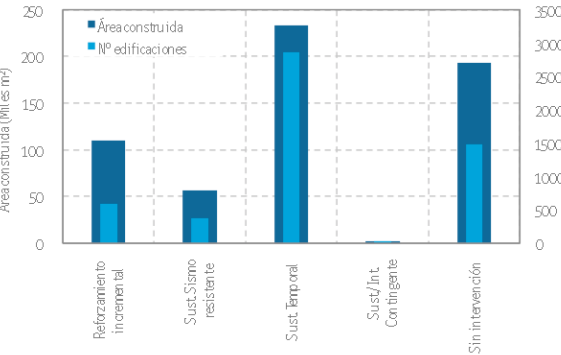
Número de habitantes	375,993	Valor de reposición (USD\$ Millones)	\$241.2
Total Locales Escolares	1,648	PAE (USD\$ Millones)	\$4.7
Total Edificaciones	6,474	PAE (%)	19.5



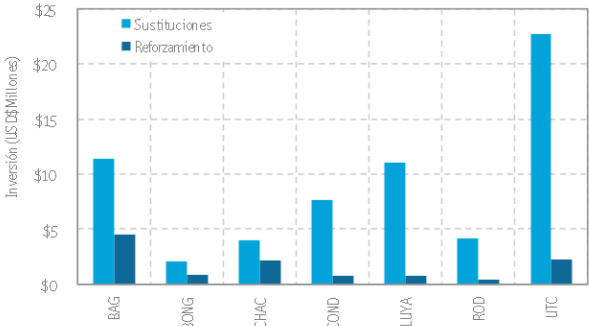
RESUMEN DE INTERVENCIONES

Nº de edificaciones a reforzar	594	Inversión en reforzamientos (USD\$ Millones)	\$11.8
Nº de edificaciones a sustituir	3,261	Inversión en sustituciones (USD\$ Millones)	\$63.1
Total edificaciones a intervenir	3,855	Inversión total (USD\$ Millones)	\$74.9

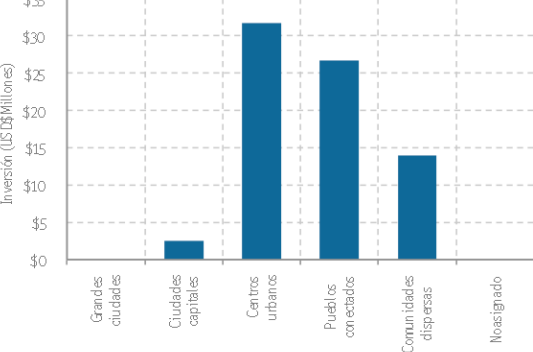
Área total construida y Nº de edificaciones por tipo de intervención



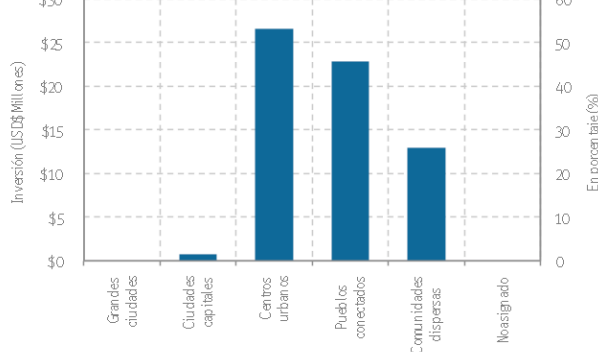
Inversión total según provincia y tipo de intervención



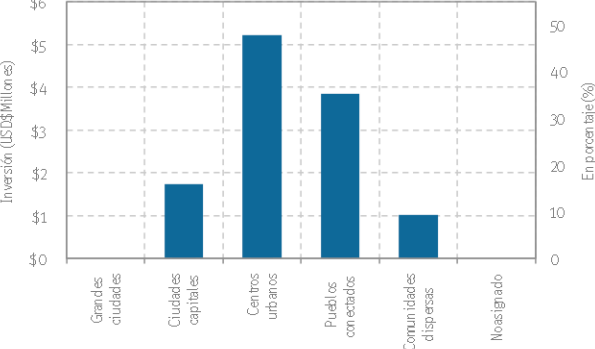
Inversión por escenario educativo para intervenciones totales



Inversión por escenario educativo para sustituciones



Inversión por escenario educativo para reforzamientos



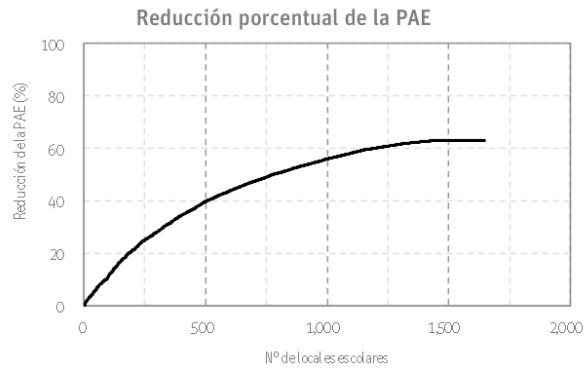
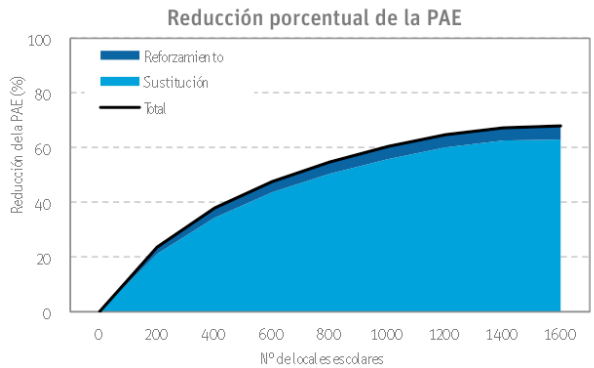
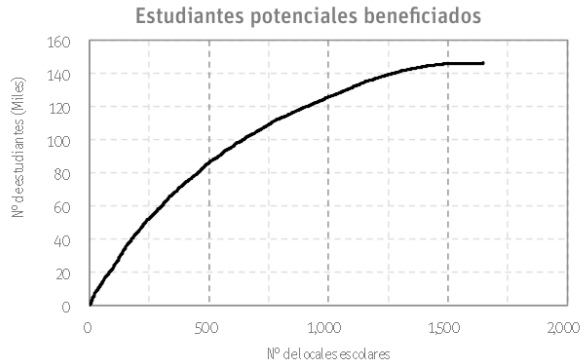
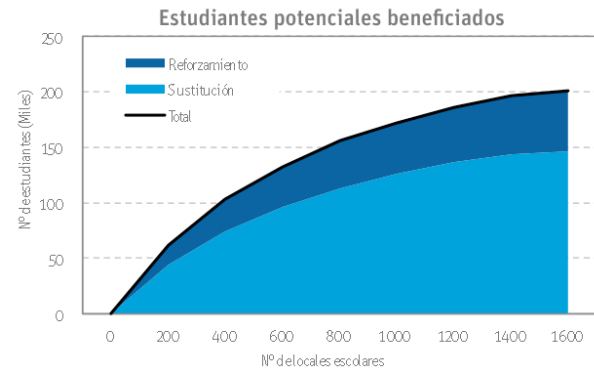
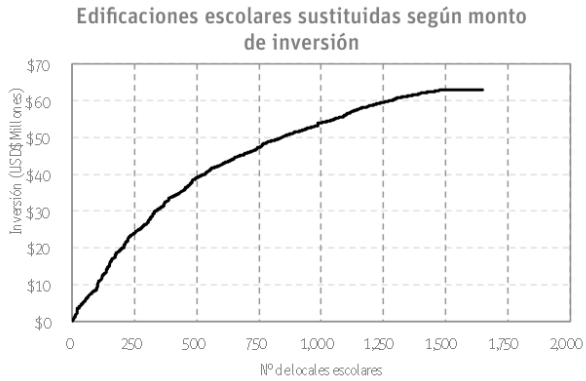
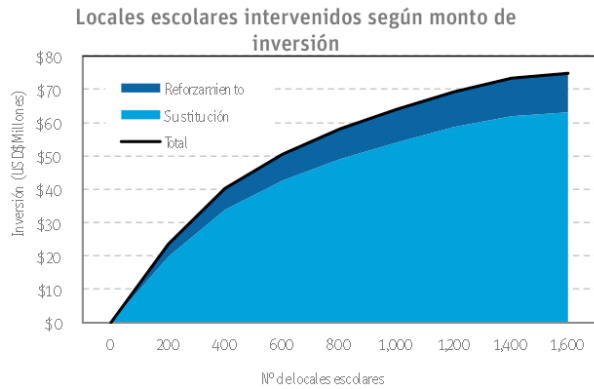
ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DEL RIESGO

PROGRAMA DE REDUCCIÓN DEL RIESGO
SÍSMICO – INTERVENCIÓN POR LOCAL ESCOLAR

Brecha financiera		
Tipo intervención	Nº edificaciones	Inversión (USD\$ Mill.)
Reforzamiento	594	\$11.8
Sustituciones	3,261	\$63.1
Total	3,855	\$74.9

SUBPROGRAMA DE INTERVENCIÓN N°1:
SUSTITUCIONES

Brecha financiera		
Tipo intervención	Nº edificaciones	Inversión (USD\$ Mill.)
Reforzamiento	0	\$ 0
Sustituciones	3,261	\$63.1
Total	3,261	\$63.1



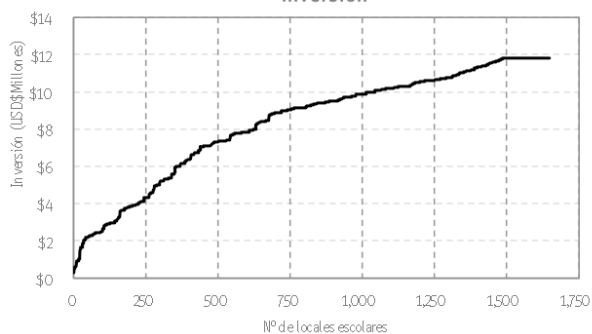
ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DEL RIESGO

SUBPROGRAMA DE INTERVENCIÓN N°2: REFORZAMIENTOS INCREMENTALES

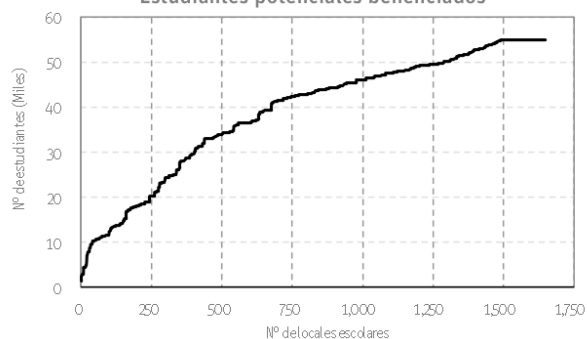
Brecha financiera

Tipo intervención	N° edificaciones	Inversión (USD\$ Mill.)
Reforzamiento	594	\$11.8
Reconstrucción	0	\$ 0
Total	594	\$11.8

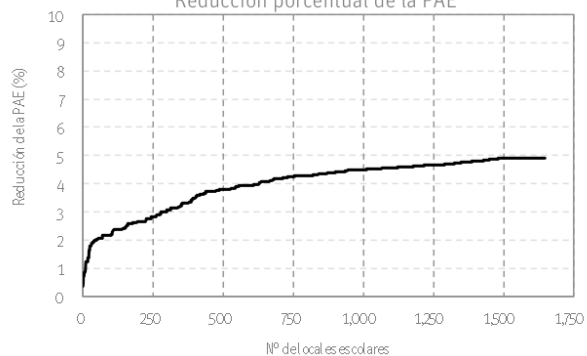
Edificaciones escolares reforzadas según monto de inversión



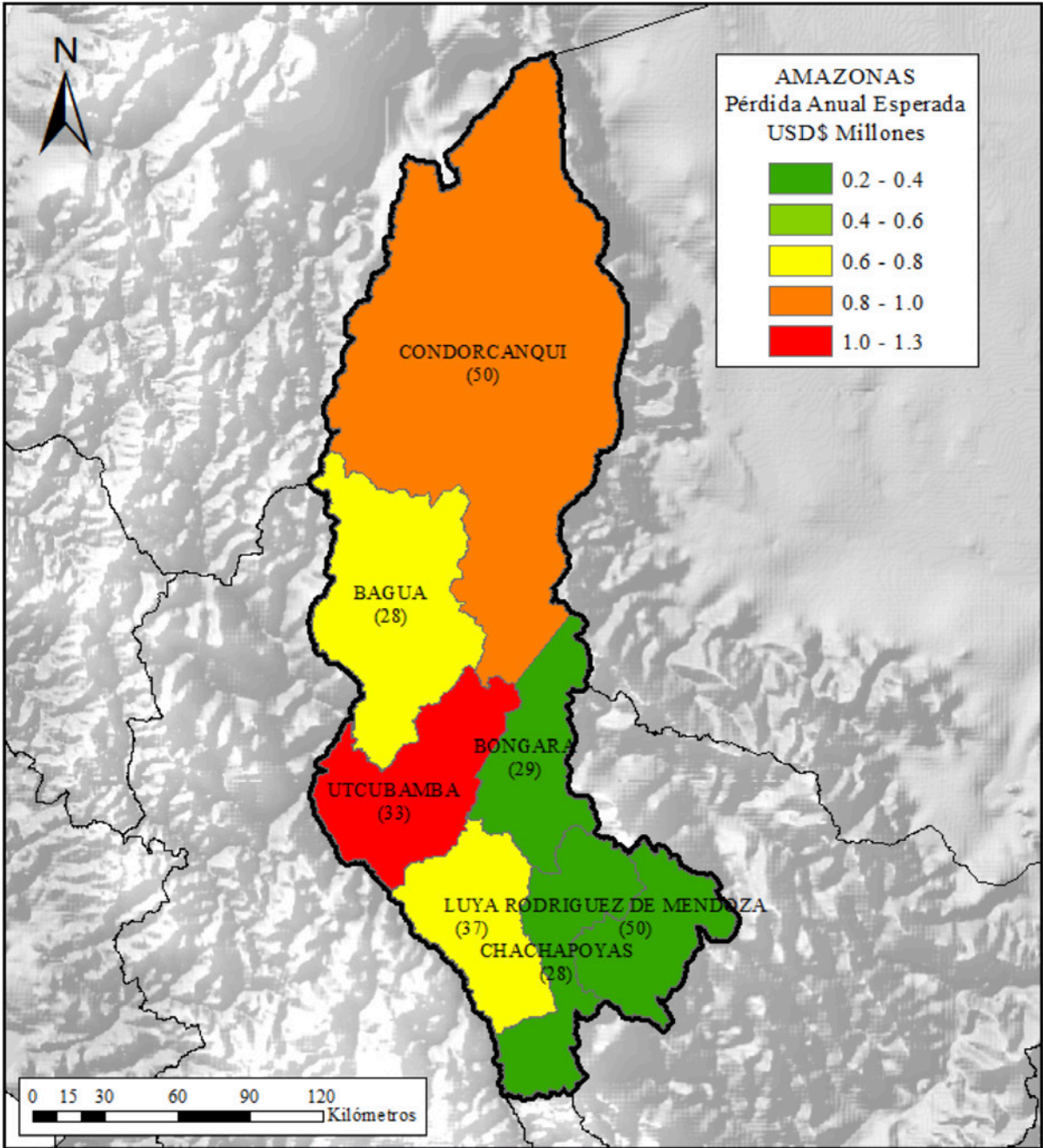
Estudiantes potenciales beneficiados



Reducción porcentual de la PAE



MAPA ILUSTRATIVO



Nota: Los colores de cada provincia corresponden a la PAE en valor monetario y el valor en paréntesis "()" a la PAE relativa al millar. Esta última se calcula: $PAE (\%) = PAE (\$) \times 1000 / \text{Valor expuesto } (\$)$.

