

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**APLICACIÓN DEL MÉTODO ITALIANO DEL ÍNDICE DE
VULNERABILIDAD SÍSMICA EN VIVIENDAS DEL
ASENTAMIENTO HUMANO
“EL ALTILLO” EN EL DISTRITO DEL RIMAC**

TESIS

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

Juan Manuel Rodríguez Zavaleta

LIMA – PERÚ
2005

RESUMEN

En los países en vías de desarrollo, como el Perú, la existencia de un sin número de necesidades, ha originado un crecimiento descontrolado de la población y por ende de las ciudades que la alberga. El crecimiento de ciudades como Lima, se ha producido principalmente en su periferia, en los llamados conos urbanos, donde se han formado los denominados Asentamientos Humanos, que se caracterizan por contar con edificaciones construidas sin ningún tipo de orientación técnica y donde los materiales utilizados son de mala calidad.

El presente estudio centra su atención en el Asentamiento Humano "El Altillo" uno de los más antiguos de la ciudad de Lima, donde gran parte de sus edificaciones son de mampostería y donde es perfectamente aplicable la evaluación de las edificaciones existentes utilizando el Método Italiano del Índice de Vulnerabilidad. En principio, para aplicar este método, fue necesario realizar algunas modificaciones, con el objeto de adaptar algunos parámetros, característicos de la metodología, a la normatividad peruana. Es así que partiendo de esta salvedad se procedió a recopilar información del estado de cada una de las edificaciones existentes en la zona, mediante una ficha de campo, para luego contar con una base de datos, que posteriormente permitió calcular un Índice de Vulnerabilidad (IV), para cada edificación.

Para poder estimar las funciones de vulnerabilidad propuestas en este estudio, fue necesario calcular el Índice de Daño (ID) de cada edificación. Hecho esto, se procedió a generar las respectivas dispersiones (IV vs ID). A partir de éstas, se proponen regresiones exponenciales que definen las funciones de vulnerabilidad.

Obtenidas las funciones de vulnerabilidad, se calcularon los daños para distintos sismo escenarios. Finalmente utilizando un Sistema de Información Geográfica, se elaboraron las láminas mostradas en el Anexo E, que muestran el grado de daño para cada uno de los sismos propuestos.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I	1
1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Objetivos del Estudio	2
1.1.1 Objetivo General	2
1.1.2 Objetivos Específicos	2
1.2 Justificación	3
1.3 Alcances y Limitaciones	4
1.4 Metodología usada en la elaboración de este Estudio	5
1.5 Estado del Arte	6
CAPÍTULO II	11
2 MARCO TEÓRICO	12
2.1 Introducción	12
2.2 Conceptos de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico... ..	13
2.2.1 Aspectos Históricos	13
2.2.2 Definiciones	14
2.2.3 Peligro Sísmico	16
2.2.4 Vulnerabilidad Sísmica	17
2.2.5 Riesgo Sísmico	18
2.3 Tipos de Vulnerabilidad	19
2.3.1 Vulnerabilidad Estructural	19
2.3.2 Vulnerabilidad No-Estructural	20
2.3.3 Vulnerabilidad Funcional	20
2.4 Métodos Analíticos para Evaluar la Vulnerabilidad	21
2.4.1 Descripción General	21
2.4.2 Indicadores de Daño	22
2.4.3 Problemas Asociados con lo Métodos Analíticos ..	22
2.5 Métodos Subjetivos para evaluar la Vulnerabilidad	24
2.5.1 Descripción General	24
2.5.2 Métodos que predicen el daño	26
2.5.2.1 Métodos Basados en Matrices de Probabilidad de Daño	27
2.5.2.2 Método Basados en Funciones de Vulnerabilidad	29
2.5.3 Métodos que Evalúan la Capacidad Sísmica.....	30
2.5.3.1 Métodos Basados en un Sistema de Calificación	30
2.5.3.2 Métodos Basados en Códigos de Construcción	31
2.5.4 Problemas Asociados con lo Métodos Subjetivos ..	32

2.6	Aspectos a tener en cuenta en la Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica	33
2.7	Tipos de Elementos Susceptibles a Sufrir Daños en Edificaciones de Mampostería	34
2.8	Método del Índice de Vulnerabilidad para Evaluar la Vulnerabilidad Sísmica de Áreas Urbanas	37
2.8.1	Introducción	37
2.8.2	Cálculo del Índice de Vulnerabilidad	38
2.8.3	Descripción de Parámetros	40
2.8.4	Cálculos Requeridos por los Parámetros de Naturaleza Cuantitativa	46
2.8.5	Comentarios sobre el método	49
CAPÍTULO III		50
3	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS, GEOTÉCNICAS Y SÍSMICAS DE LA CIUDAD DE LIMA	51
3.1	Características Geológicas	52
3.2	Características Geotécnicas	54
3.3	Características Sísmicas	57
3.3.1	Sismicidad del Perú	57
3.3.2	Principales Rasgos Tectónicos del Perú	57
3.3.2.1	Zonificación Morfológica	57
3.3.2.2	Zonificación Tectónica	60
3.3.3	Sismicidad en Lima Metropolitana	61
CAPÍTULO IV		66
4	CONSIDERACIONES GENERALES DEL DISTRITO DEL RIMAC	67
4.1	Ubicación, Límites y Extensión	67
4.2	Reseña Histórica	68
4.3	Aspectos del Suelo de Cimentación	69
4.3.1	Geología de la Zona	70
4.3.2	Pendiente de la Zona	71
4.3.3	Suelos Observados	71
4.4	Población	72
4.5	Inventario de Edificaciones	75
4.5.1	Información Requerida para el Inventario	75
4.5.2	Inventario de las Edificaciones del AA.HH. "El Altillo"	77
CAPÍTULO V		80
5	APLICACIÓN DE MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD AL ÁREA URBANA ESCOGIDA	81
5.1	Planteamiento y Peso de los Parámetros a tener en cuenta para utilizar el Método del Índice de Vulnerabilidad	81
5.2	Asignación de Clases A, B, C, D para cada parámetro	83
5.3	Cálculo de los Índices de Vulnerabilidad	91

5.4	Análisis del Comportamiento Sísmico de las Edificaciones	
	Tipo de la Zona de Estudio	102
5.4.1	Características Generales	102
5.4.2	Modelos Estructurales	102
	5.4.2.1 Metrado de Cargas	106
	5.4.2.2 Cálculo de los Períodos de Vibración	
	Desplazamientos Máximos y	
	Distorsiones de Entrepiso	106
5.5	Funciones de Vulnerabilidad Estimadas para la Zona en	
	Estudio	109
5.5.1	Relaciones Propuestas entre el Método del	
	Índice de Vulnerabilidad y el Método Utilizado	
	por el CISMID	111
5.5.2	Funciones de Vulnerabilidad Propuestas	113
5.6	Estimación de Daños para Sismo Escenarios	115
5.6.1	Estimación de Daños en el AA.HH. "El Altillo" ...	116
CAPÍTULO VI		119
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
6.1	Introducción	120
6.2	Conclusiones	120
6.3	Recomendaciones	122
REFERENCIAS		124
ANEXO A: Ficha de Levantamiento		
ANEXO B: Cálculo de Masas Traslacionales y Rotacionales		
ANEXO C: Modelos Estructurales		
ANEXO D: Tipos de Suelos del Distrito del Rimac		
ANEXO E: Plano de Lotes del AA.HH. "El Altillo"		
ANEXO F: Láminas		
ANEXO G: Panel Fotográfico		

CAPITULO I

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal es presentar una metodología clara, concisa y bastante aproximada, que permita disponer de la mejor información para realizar un estudio completo de vulnerabilidad sísmica de ciudades. Así mismo, se desea mostrar la operatividad que se le puede proporcionar al método del Índice de Vulnerabilidad, pretendiendo constituirse en un referente para futuros proyectos de vulnerabilidad que adopten la misma línea metodológica.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Clasificar las edificaciones estudiadas de acuerdo a su tipología estructural, detalles constructivos, estado de conservación, año de construcción, irregularidades en planta o altura y número de pisos.

Obtener un mapa de vulnerabilidad del área urbana escogida, haciendo que el mapa mencionado sea una herramienta dinámica al tener la capacidad de reactualizarse. Esto último se consigue con la asistencia de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Si bien el método es aplicado para un pequeño sector, dejar en claro que su uso en todo el Distrito y la ciudad de Lima es factible y serviría como una herramienta para la prevención de Desastres y control del crecimiento urbano.

1.2 JUSTIFICACIÓN

A lo largo de su historia el Perú ha sufrido un sin número de episodios sísmicos, debido a que está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica, la cual se denomina Anillo Circumpacífico por corresponder a los bordes del Océano Pacífico. La convergencia en territorio peruano de la placa de Nazca, y la placa Suramericana implica un emplazamiento tectónico complejo y consecuentemente la exposición a una serie de movimientos sísmicos que traen consigo la pérdida de vidas humanas y materiales.

La ciudad de Lima está ubicada en la costa peruana, y por su localización le corresponde una calificación de Zona 3, siendo esta zona considerada con la mayor aceleración del terreno (0.4g). Además la ocurrencia de fuertes sismos en esta zona justifica el calificativo de zona de alta amenaza sísmica.

Muchas de las construcciones existentes en la ciudad de Lima, no siguieron código alguno de construcción y añadiendo el dato que muchas de estas construcciones son precisamente las que sufren daños en sismos de gran magnitud, se hace necesaria la elaboración de políticas de desarrollo urbano, tales como:

1. Disminución de la densidad poblacional de zonas con estructuras de alta vulnerabilidad.
2. Relocalización de estructuras esenciales.
3. Definición de estrategias de emergencia.

Para poder desarrollar las medidas antes mencionadas es necesario establecer la vulnerabilidad de las estructuras para los diferentes distritos de la ciudad, tomando especial atención en las zonas urbano marginales ubicadas en los conos de crecimiento de la ciudad, donde las construcciones son especialmente más vulnerables debido a los escasos recursos económicos y a la falta de dirección técnica. Tomando las consideraciones anteriores se escogió el Asentamiento Humano “El Altillo” para realizar este estudio, pues constituye por su ubicación e historia un ejemplo clásico de invasiones urbanas en la ciudad de Lima, sin ninguna organización ni preocupación por su grado de seguridad.

Debido a que la ciudad de Lima ha crecido en forma descontrolada, aumentando con esto el riesgo de sufrir pérdidas de vidas humanas y materiales, evidencia la necesidad de implementar programas de evaluación de Riesgo Sísmico para poder evitar en el mejor de los casos, mitigar estas pérdidas.

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

Este estudio determina con la información obtenida de las visitas de campo sin acceso al interior de las viviendas, los índices de vulnerabilidad de cada una de las edificaciones del Asentamiento Humano El Altillo, en el distrito del Rimac, tarea que pretende mostrar a este método como una alternativa viable para evaluar la vulnerabilidad sísmica en las distintas ciudades del Perú.

Sabemos que existen distintos métodos que intentan cuantificar la vulnerabilidad de edificaciones existentes, los cuales siguen una particular línea metodológica en función de la diferencia que existe entre las fuentes sísmicas para distintos puntos del planeta, las tipología estructurales predominantes en la zona y la tecnología desarrollada con la que se puede contar. Es así que los índices de vulnerabilidad obtenidos en este estudio no garantizan el hecho de que una vivienda vaya colapsar o no, es necesario en consecuencia tan solo tomar estos valores como una referencia cualitativa que requerirá en el futuro

compararse con el daño producido en cada edificación por un evento sísmico de considerable magnitud.

1.4 METODOLOGÍA USADA EN LA ELABORACIÓN DE ESTE ESTUDIO

- a) Búsqueda en Internet de referencias sobre el Método Italiano del Índice de Vulnerabilidad además de consultas en la biblioteca del Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) y revisión de publicaciones, libros y tesis en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería.
- b) Contacto con el Servicio Sísmico Nacional Italiano (Ing. Giacomo Di Pasquale), para poder obtener el original de la metodología así como publicaciones y proyectos que ilustren su aplicación.
- c) Contacto con la Red Sísmica del Austro (RSA-Ecuador-Ing. Juan Jiménez) y el Observatorio Sismológico del Sur Occidente (OSSO-Colombia-Ing. Henry Peralta-Ing. Daniel Chavarría), consultando su experiencia y los problemas que enfrentaron al aplicar el método en sus respectivos países.
- d) Acopio y revisión de la información obtenida.
- e) Traducción de Textos
- f) Visitas a la Municipalidad del Rimac y COFOPRI, con el fin de obtener información catastral.
- g) Definición de objetivos, delimitación del área de trabajo y elaboración de los alcances y limitaciones del estudio de investigación.
- h) Realización de visitas de campo para obtener la información necesaria para poder determinar la vulnerabilidad de las construcciones.
- i) Cálculo de los índices de vulnerabilidad, y posibles daños para las viviendas evaluadas en el Asentamiento Humano "El Altillo", así como realización de planos y demás tablas que ilustren correctamente los cálculos obtenidos.

- j) Elaboración de modelos de las viviendas típicas del área de estudio y revisión del trabajo final.

1.5 ESTADO DEL ARTE

El campo dedicado a la estimación de pérdidas ocasionadas por terremotos está sufriendo un desarrollo vertiginoso. La necesidad de una estimación eficiente y confiable del impacto socio económico producido por grandes sismos, fue nuevamente enfatizada después de los grandes terremotos producidos en la década de los noventas en los Estados Unidos y el Japón. Los avances en las tecnologías GIS (Sistemas de Información Geográfica) proveen de nuevas y poderosas herramientas para estimar las pérdidas. Además, los recientes terremotos han proporcionado más datos que han sido útiles para desarrollar modelos que evalúan el comportamiento de las estructuras, para estimar las pérdidas económicas en los edificios y líneas vitales, así como las consecuencias sociales, como son los accidentes y la necesidad de alojamientos provisionales. En este acápite se proporciona una rápida visión del estado del arte de los métodos utilizados para evaluar la estimación de las pérdidas antes mencionadas. Cabe destacar que el tipo de metodología escogida depende del objetivo de la evaluación pero también de la disponibilidad de datos y tecnología. La Tabla 1.1 nos muestra el desarrollo y diferencias de las distintas formas de evaluar la vulnerabilidad de edificaciones existentes, desde la vulnerabilidad observada hasta los procedimientos analíticos detallados. (Kerstin, 2002)

performance	incremento en el desempeño computacional				
	—————→				
aplicación	varias edificaciones			edificación individual	
métodos	vulnerabilidad observada	opinión de expertos	modelos analíticos simples	asignación de valores	procedimientos analíticos detallados

Tabla 1.1: Métodos para la evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones.

La vulnerabilidad observada se refiere a las evaluaciones realizadas basadas en las estadísticas del daño ocasionado por sismos pasados. Es especialmente conveniente para estructuras que no fueron hechas bajo orientación técnica, construidas con materiales de baja resistencia como madera y albañilería sin reforzar, cuya resistencia sísmica es bastante difícil de calcular.

Uno de los primeros en recopilar sistemáticamente la estadística de daños ocasionados por sismos pasados fue Whitman et al (Whitman,1974), el cual realizó un estudio de los daños causados por el terremoto de San Fernando el 9 de febrero 1971, cubrió aproximadamente 1600 edificios de cinco o más pisos y generó matrices de probabilidad de daño (DPM) para los diferentes tipos de edificaciones.

Uno de los primeros sistemas que intenta cuantificar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones nace a partir del Consejo de Tecnología Aplicada (Applied Technology Council, una corporación sin fines de lucro establecida en 1971, para mantener la Ingeniería Estructural a la par con los desarrollos tecnológicos) resumido en un informe (ATC-13,1985) que fue consolidado por la Federal Emergency Management Agency (FEMA). La ATC-13 derivó esencialmente las matrices de probabilidad de daño basándose en la opinión de 58 expertos (ingenieros estructurales renombrados, constructores, etc.); estimó el porcentaje de daño esperado que resultaría para una tipología estructural específica sujeta a una intensidad dada. Basado en su conocimiento personal y experiencia, los expertos tenían que llenar una encuesta formal con sus mejores estimaciones. Sin embargo, algunos de ellos se sintieron tan solo con la experiencia necesaria en una determinada tipología estructural como para aventurarse a dar una opinión.

Claramente, la desventaja de la aproximación de la ATC-13 es su subjetividad, ya que el daño se basa exclusivamente en la opinión subjetiva de los expertos. Por consiguiente, además de las incertidumbres inherentes a cualquier estimación de daño debido a la variabilidad en la respuesta real del edificio, existen las incertidumbres relacionadas a la opinión de los expertos. Las matrices de probabilidad de daño basadas en las opiniones de especialistas también son difíciles de calibrar o modificar al requerir incorporar

nuevos datos o tecnologías. La metodología ATC-13 es difícil de extender a otros tipos de edificaciones y a otras regiones. No obstante, fue el primer estudio relativamente completo de daños ocasionados por terremoto y estimación de pérdidas; así se convirtió en la referencia usada hasta mediados de los noventa.

Debido a la ausencia de datos basados en observaciones y la falta de disponibilidad de la opinión de expertos, se hace necesaria la aparición de otros métodos que evalúen la vulnerabilidad de edificaciones existentes.

Estos métodos tienen la capacidad de analizar un gran número de edificaciones en un período de tiempo bastante corto. Estos métodos analíticos inicialmente involucran modelos simples de edificaciones requiriendo solamente pocos parámetros de ingreso.

Lo simple del método, es el poco tiempo consumido y la alta eficiencia en la elaboración de escenarios sísmicos. Sin embargo, los resultados aún no son fiables, los pocos parámetros ingresados deben ser capaces de establecer el comportamiento sísmico de las edificaciones.

Para estimar las pérdidas probables de los pueblos en el centro de Europa se desarrolló y aplicó un método que evaluara la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en el distrito de Alfama en Lisboa (D'Ayala, 1997) y para los pueblos de Umbría-Marche golpeados por sismos en 1997. La aproximación se basa en la identificación del mecanismo potencial de colapso produciendo una fuerza equivalente, expresada como la aceleración crítica a/g . Para calcular la aceleración crítica solamente son necesarios la geometría y las condiciones límite, datos basados en una estimación visual. La mampostería es tomada como un material perfectamente rígido-plástico. Es lógico pensar que el modelo es más sencillo de elaborar, la evaluación en campo es más rápida, sin embargo los resultados son menos exactos. En consecuencia los resultados deben ser tomados cuidadosamente cuando se trate de una sola edificación, es decir su significado es bastante estadístico.

Otros procedimientos desarrollados son aquellos que apuntan a la asignación de valores que identifican las deficiencias estructurales características que aumentan la vulnerabilidad de la estructura. Estos métodos generalmente parten de una primera fase que forma parte de un procedimiento

multi-fase, que analiza con más detalle las características estructurales que inciden en el aumento de la vulnerabilidad de la estructura. Las potenciales deficiencias estructurales son identificadas por correlaciones observadas entre el daño y las características estructurales. Los valores designados para distintas deficiencias son generalmente calibrados por expertos.

Una de las metodologías que desarrolla estas características es la ATC-14 (ATC-14,1987). La metodología consiste en identificar las fallas y debilidades que podrían ocasionar el colapso estructural de una edificación. Esta metodología fue desarrollada tomando en cuenta las fallas observadas en las edificaciones que soportaron episodios sísmicos en el pasado. Quince (15) tipos de modelos construidos con diferentes materiales fueron evaluados, comparando así las distintas fallas que estos sufrieron.

Unos pocos años después FEMA desarrolló un manual para la evaluación de edificaciones existentes (FEMA 178, 1992), que utiliza la información y los procedimientos desarrollados por la ATC-14. Posteriormente la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (American Society of Civil Engineers-ASCE) asociada con la "Federal Emergency Management Agency" (FEMA) planteó hacer a partir de la FEMA-178 un documento estándar aceptado y usado a escala nacional; el resultado de esta iniciativa fue publicado en 1998 como FEMA-310.

Otra de las metodologías usadas para la evaluación de la vulnerabilidad y estimación del daño basado en la aplicación de valores también se desarrolló y aplicó en Italia (llamado el método GNDT, 1986). Se basa en las observaciones visuales para identificar el sistema estructural primario de los edificios y hacer una recolección de las deficiencias observadas para luego relacionarlas a un índice de vulnerabilidad que se asigna a cada edificio. Claramente, la ventaja de una evaluación de la vulnerabilidad que usa las asignaciones de valores con respecto a las funciones de probabilidad de daño basada solamente en las observaciones o en las opiniones de especialistas, es que permite poner al día la función de vulnerabilidad que depende de las condiciones en las que se encuentra la estructura. Esto es muy importante en regiones como Italia o California, donde es necesario actualizar la información referente a los edificios más antiguos. La asignación de los valores puede

ayudar a decidir los métodos más apropiados para actualizar la función y el efecto de éstos en la vulnerabilidad del edificio puede evaluarse inmediatamente.

Mientras que los métodos que asignan valores a las distintas deficiencias que puede tener una edificación ya tienen establecidos los parámetros respectivos, los métodos analíticos requieren un análisis más detallado y modelos más refinados, que lógicamente requieren de mucho mayor tiempo para poder evaluar individualmente la vulnerabilidad de una edificación. Estos métodos no son recomendables para evaluar una gran cantidad de edificaciones, debido a lo costoso y poco apropiado que resultarían. No obstante, los conceptos detrás de estos métodos pueden ser valiosos para el desarrollo de nuevos métodos simples. Los procedimientos de análisis para estos métodos pueden definirse como lineales (análisis lineal estático y dinámico) y no lineales (análisis no lineal estático y no lineal dinámico).

CAPITULO II

Marco Teórico

2. MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCION

Existen en muchas zonas urbanas estructuras que han sido diseñadas sin que se considere ninguna norma referente a cargas sísmicas, otras que han sido modificadas como resultados de un cambio de destino y algunas otras que han sufrido daño en terremotos pasados, todo lo cual hace más difícil la evaluación de su comportamiento frente a futuros eventos sísmicos. La falta de información acerca de todos estos aspectos sumada a otros tipos de incertidumbres como, por ejemplo, las referentes a la acción o a las propiedades de los materiales, hace que se requieran estudios específicos para predecir el comportamiento sísmico de estructuras existentes.

Actualmente, los estudios que se requieren para estimar el comportamiento sísmico de estructuras existentes se enmarca dentro del campo de la vulnerabilidad sísmica, el cual forma parte del campo más amplio de la ingeniería sísmica y de la dinámica estructural. Obviamente los estudios de vulnerabilidad se extienden también a otras disciplinas relacionadas, como pueden ser la planificación urbana y la protección civil. Sin embargo, una de sus mayores aplicaciones se encuentra en el cálculo y en la mitigación del

riesgo sísmico. Efectivamente, el riesgo sísmico específico es una convolución de la vulnerabilidad del elemento en riesgo con la peligrosidad del sitio donde este elemento se encuentre. Debido a que la peligrosidad sísmica es una característica de la naturaleza que todavía el hombre no es capaz de modificar, la única alternativa disponible para reducir el riesgo sísmico en zonas urbanas existentes consiste en la búsqueda de estrategias adecuadas para reducir la vulnerabilidad de las estructuras. Es en este último aspecto donde los estudios de vulnerabilidad desempeñan un papel fundamental.

Seguidamente se hace referencia a las definiciones de peligro, vulnerabilidad y riesgo, además de tratar un conjunto de conceptos enmarcados todos ellos en dejar una clara idea de los aspectos más importantes en lo que a vulnerabilidad respecta.

2.2 CONCEPTOS DE PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO.

2.2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS

El desarrollo histórico de los conceptos de peligro, vulnerabilidad y riesgo está íntimamente relacionado al desarrollo de las sociedades humanas, es así que todas las antiguas civilizaciones como los Mayas, los Aztecas y los Incas en América o en la China, Egipto y Mesopotamia, realizaron sistemas de control de inundaciones o de deslizamientos, o tuvieron criterios preventivos para reducir el impacto de sucesos naturales o sociales.

Es necesario también mencionar que los fenómenos naturales, las pestes y otras crisis sociales también fueron relacionadas con designios divinos o mala suerte. Durante siglos este tipo de creencias se mantuvo en una u otra forma dentro de las sociedades, particularmente por la influencia de la religión. Las medidas de prevención-mitigación contra inundaciones, incendios y otros sucesos, comúnmente se empezaron a aplicar recientemente sólo después de la ocurrencia de un desastre que hacía evidente la necesidad de protección.

Durante siglos, las decisiones sobre riesgo estuvieron fundamentalmente basadas en el sentido común, el saber tradicional, el ensayo y error, las

creencias o el conocimiento no científico. Kerverm y Rubise (1991) (Kerstin, 2002) distinguen tres períodos: La edad de la sangre, que se caracterizó porque el hombre tranquilizaba su temor con sacrificios ofrecidos a la divinidad; la edad de las lágrimas, en la cual con el desarrollo del Cristianismo el miedo mayor conducía a plegarias y procesiones de diversa índole; y la edad de las neuronas, a partir de 1755, con el terremoto de Lisboa, cuando a raíz de este suceso Rousseau afirmó que el hombre es responsable del peligro e indicó que si los efectos del terremoto fueron tan terribles, la culpa es de los habitantes. Esta opinión marcó el comienzo de lo que en francés se le denomina *cindynique*: la ciencia del peligro (Kerstin, 2002).

En la actualidad el desarrollo técnico y científico hace que la sociedad opte por la planificación, el pronóstico y las alertas, en contraste con las respuestas tradicionales a los eventos esperados.

2.2.2 DEFINICIONES

La aparente similitud de algunos términos involucrados en la ingeniería sísmica, más específicamente de aquellos que definen conceptos relacionados con el riesgo sísmico como son la peligrosidad y la vulnerabilidad, imponen la necesidad de una cuidadosa interpretación, ya que en el ámbito científico es conveniente llegar a un consenso general en cuanto a terminología se refiere con el objeto de mejorar el intercambio de información y facilitar de alguna forma el trabajo de los investigadores (Caicedo, 1994).

Una tentativa de estandarización de los términos relacionados con el riesgo debido a fenómenos naturales, que ha sido aceptada por muchos autores y publicada en diferentes artículos, es la propuesta por un grupo de expertos de la UNDRO (Office of the United Nations Disaster Relief co-Ordinator) (UNDRO, 1979). Las definiciones que se dan a continuación están basadas en dicha referencia, en la cual el concepto de riesgo y de sus partes constituyentes se expresa como una secuencia ordenada de términos interrelacionados entre sí, de la siguiente forma:

- a) **Grado de pérdida:** significa las consecuencias negativas que pueden producirse debido a la ocurrencia de un fenómeno natural. Estas consecuencias indeseables pueden ser, por ejemplo, las pérdidas de vida o de personas heridas, los daños materiales, la pérdida de funcionamiento del sistema productivo, etc. También a nivel estructural las consecuencias negativas pueden ser, por ejemplo, la disminución de la rigidez o de la capacidad de disipación de energía de los elementos estructurales.
- b) **Elementos en riesgo:** son la población, edificios, obras públicas, actividades económicas, servicios públicos, utilidades, infraestructura, y otros, susceptibles de ser afectados por un fenómeno natural en un área determinada.
- c) **Peligrosidad natural:** significa la probabilidad de ocurrencia, dentro de un período específico de tiempo y dentro de un área dada, de un fenómeno natural potencialmente dañino.
- d) **Vulnerabilidad:** significa el grado de pérdida de un elemento en riesgo o de un conjunto de tales elementos resultante de la ocurrencia de un fenómeno natural de una magnitud dada. La vulnerabilidad puede expresarse en una escala desde 0 (sin daño) hasta 1 (colapso total) o en cualquier otra escala proporcional a ésta.
- e) **Riesgo específico:** es la probabilidad esperada de pérdidas debidas a un fenómeno natural expresado como una función de la peligrosidad y de la vulnerabilidad.
- f) **Riesgo:** es el grado esperado de pérdidas debidas a un fenómeno natural expresado como una función del riesgo específico y del valor de los elementos en riesgo.

Aunque la particularización de los anteriores conceptos para el caso del fenómeno sísmico requiere el conocimiento de otros conceptos más específicos, tales como grado de daño y funciones de vulnerabilidad, las anteriores definiciones han sido la base teórica de referencia para el desarrollo

de los estudios de investigación que sobre el riesgo se han efectuado en la última década.

2.2.3 PELIGRO SÍSMICO

El peligro sísmico representa la probabilidad de ocurrencia dentro de un período específico de tiempo y dentro de un área dada, de un movimiento sísmico con una intensidad determinada. Los estudios de peligro sísmico tienen como objetivo estimar el movimiento del terreno en un lugar determinado, o proporcionar una evaluación del tamaño del sismo en la zona en estudio. El peligro sísmico describe los efectos provocados por movimientos sísmicos en el suelo de dicha zona. Tales como la aceleración, velocidad, desplazamiento del terreno o intensidad macrosísmica de la zona. Para evaluar estos efectos es necesario analizar los fenómenos que ocurren a partir de la emisión de las ondas sísmicas ocurridas en el foco mismo hasta que estas ondas sísmicas llegan a la zona de estudio.

La evaluación del peligro sísmico puede llevarse a cabo mediante dos tipos de métodos de cálculo: los deterministas y los probabilistas. Los métodos deterministas parten de los sismos registrados y evalúan los efectos de esos sismos sobre la localidad que se estudie. Para ello hacen uso de diversos criterios de mayoración (por ejemplo, desplazando epicentros dentro de ciertas regiones predeterminadas). Los métodos probabilísticos no utilizan directamente los sismos registrados, sino que esos datos sirven para establecer ciertas leyes de probabilidad de ocurrencia dentro de las regiones que se hayan establecido, dando lugar a modelos regionales de ocurrencia, para finalmente calcular las influencias de cada región sobre la localidad de estudio.

En la actualidad en el modelo simplificado, ampliamente usado a nivel internacional, debido a la incertidumbre y a lo difícil que es incluir todos los parámetros en el modelo, sólo se consideran las variables más significativas: la magnitud del sismo (M); las características locales del sitio en observación, y el decaimiento de las amplitudes de las ondas sísmicas con la distancia epicentral (D), basado principalmente en observaciones instrumentales efectuadas a

diferentes distancias, con lo cual quedan incluidas de manera implícita las características del medio a través del cual viajan las ondas sísmicas.

2.2.4 VULNERABILIDAD SÍSMICA

Para el caso particular del fenómeno sísmico, se define la vulnerabilidad de una estructura o grupo de estructuras como el grado de daño que resulta por la ocurrencia de un movimiento sísmico del terreno de una intensidad dada. (Caicedo, 1994).

La vulnerabilidad es una característica intrínseca de las estructuras, dependiente de la forma como hayan sido diseñadas pero independiente de la peligrosidad sísmica del sitio donde estén ubicadas. En otras palabras una estructura puede ser vulnerable, pero no estar en riesgo si no se encuentra en un lugar con un determinado peligro sísmico.

Teóricamente, todo sistema constructivo susceptible de ser afectado por un terremoto puede ser objeto de un estudio sobre su vulnerabilidad. En la actualidad existen en la literatura estudios sobre la vulnerabilidad de algunos elementos en riesgo tales como: líneas vitales (por ejemplo: líneas de conducción de energía o agua), puentes, edificaciones, entre otros. Sin embargo, el problema de la evaluación de la vulnerabilidad sísmica es tan complejo y extenso, que el presente estudio se ha limitado únicamente al estudio de edificaciones.

La importancia de los estudios de vulnerabilidad sísmica no reside únicamente en ser una parte indispensable para la determinación del riesgo sísmico, sino también en ser una herramienta clave para los planes de mitigación de desastres. Por ejemplo, una entidad del gobierno puede estar interesada en conocer la condición actual de las edificaciones de una ciudad, con el objeto de prever anticipadamente las consecuencias negativas (económicas y sociales) que la ocurrencia de un sismo de una determinada magnitud puede generar en la zona, y de esta forma determinar las medidas necesarias para su mitigación. También puede interesar un análisis de costo-beneficio en el que comparen el costo para el reforzamiento de las estructuras

más precarias, contra el costo de la reconstrucción de las mismas, luego de ocurrido el terremoto (Caicedo, 1993).

En principio la evaluación de la vulnerabilidad puede venir del análisis mediante modelos numéricos del daño sísmico de estructuras, de la inspección de edificios existentes, o de pruebas en el laboratorio. Es aquí donde se hace necesario distinguir entre la vulnerabilidad observada, que significa la vulnerabilidad que ha sido derivada de la observación de los daños posteriores a un terremoto y del análisis estadístico de los mismos para algún tipo definido de estructura, y la vulnerabilidad calculada, que significa la vulnerabilidad que ha sido derivada de un análisis matemático mediante un modelo estructural o mediante ensayos en el laboratorio de modelos reducidos y cuyos resultados han sido expresados en términos probabilísticos.

2.2.5 RIESGO SÍSMICO

Para el caso particular del fenómeno sísmico las definiciones que se consideran más completas son las siguientes (UNDRO, 1982):

- a) **Riesgo específico:** es una función que expresa la probabilidad de que un elemento o grupo de elementos en riesgo sufra varios grados de daño durante un período de tiempo dado. El riesgo específico depende de la vulnerabilidad de los elementos en riesgo y de la peligrosidad sísmica del sitio donde este elemento se encuentre.
- b) **Riesgo:** es una función que expresa el grado esperado de pérdida de un elemento o grupo de elementos en riesgo, durante un período de tiempo dado. El riesgo depende del riesgo específico y del valor económico o social del elemento en riesgo.

Desde el punto de vista del cálculo del riesgo se define el riesgo específico (S) como la convolución entre las probabilidades de ocurrencia de todas las intensidades posibles para el movimiento del terreno, es decir de la peligrosidad sísmica (H), con la vulnerabilidad (V) correspondiente a cada una de dichas intensidades y por lo tanto, el riesgo (R) se puede definir como la

convolución entre la peligrosidad, la vulnerabilidad y los elementos en riesgo (E). De esta forma las expresiones generales para el riesgo específico y para el riesgo son:

$$S = H \times V \quad (2.1)$$

$$R = S \times E \quad (2.2)$$

La particularidad de las ecuaciones 2.1 y 2.2 depende de la forma como se expresa las escalas de vulnerabilidad y de peligrosidad sísmica en los diferentes métodos existentes, por lo que dichas expresiones son las más generales que se pueden escribir.

Además de lo anterior se puede afirmar que todas las definiciones dadas siguen siendo válidas para cualquier tipo de metodología y para cualquier clase de fenómeno natural.

2.3 TIPOS DE VULNERABILIDAD

Hay tres tipos principales de vulnerabilidad: la vulnerabilidad estructural, la vulnerabilidad no estructural y la vulnerabilidad funcional. Cada una tiene su importancia y debe ser considerada en cualquier evaluación.

2.3.1 Vulnerabilidad Estructural

La vulnerabilidad estructural es el grado en que pueden afectarse los elementos estructurales de una edificación; son todos los aspectos ingenieriles de un edificio y que son la base soportante del mismo (estructura de hormigón armado, o paredes portantes de mampostería, por ejemplo).

Los elementos estructurales de un edificio se conciben en el diseño, dónde se les debe prestar la primera atención para que cumplan con los

requerimientos necesarios para soportar un desastre; luego, en la etapa de construcción se debe cuidar de utilizar los métodos adecuados y los materiales de buena calidad; por último, al hacer reparaciones o al reforzarlos, se debe tomar en cuenta el riesgo al que se expone la edificación y a sus ocupantes debido a las amenazas naturales.

2.3.2 Vulnerabilidad No Estructural

Ésta implica los sistemas arquitectónicos de la edificación; un edificio que sufra daños no estructurales severos puede ser tan mortal como uno que sufra daños estructurales. La falla en los elementos no estructurales de un edificio puede causar la inhabilitación del edificio para su buen funcionamiento o para su ocupación temporal, o puede llegar a causar gran cantidad de pérdidas humanas, además de materiales.

Los elementos arquitectónicos también están sujetos a un diseño y deben cumplir con normas especiales para resistir la avenencia de un evento de desastre. Muchas veces, las pérdidas más grandes se han dado en edificios que no colapsaron, pero que sus elementos no estructurales fueron incapaces de soportar el evento.

De allí que la vulnerabilidad no estructural sea también de gran importancia en una evaluación pre y post desastre como un factor de peligro en caso de un sismo, huracán, deslizamiento, etc.

2.3.3 Vulnerabilidad Funcional

La vulnerabilidad funcional se da en términos de los efectos de un desastre en el buen funcionamiento de una edificación para el fin que tiene propuesto. Por ejemplo en el caso de hospitales, se evalúa lo referente a la infraestructura; en primer lugar, el sistema de suministro de agua y de energía eléctrica, que son las partes más vulnerables, también las tuberías de aguas

servidas, alcantarillado, gas, combustibles, áreas externas, vías adyacentes y su conexión con el entramado urbano, las circulaciones primarias y secundarias, y los accesos generales y particulares de las áreas básicas en que se subdivide el hospital.

2.4 MÉTODOS ANALÍTICOS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD

2.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La evaluación de edificios existentes por medio de métodos analíticos se basa en los mismos principios utilizados para el diseño de construcciones. Esto quiere decir que los edificios poco dúctiles, como los construidos en mampostería, así como los edificios de hormigón construidos sin el reforzamiento adecuado, de aquellos elementos que llegan a presentar grandes deformaciones durante los terremotos, pueden ser evaluados bajo cargas estáticas y en el rango elástico debido a que dichas estructuras no tienen la capacidad de experimentar grandes deformaciones plásticas sin antes fallar. Por el contrario cuando un pórtico de hormigón armado se somete a movimientos sísmicos fuertes, algunas de sus vigas y columnas pueden llegar a tener deformaciones muy importantes en el rango plástico y, por lo tanto, un análisis dinámico inelástico llega a ser un requisito indispensable para una evaluación confiable de la vulnerabilidad.

La literatura disponible para la evaluación de estructuras existentes por métodos analíticos se concentra, primordialmente, en el modelamiento de edificios de hormigón armado. Las propuestas se diferencian entre sí por:

- a) El modelo mecánico utilizado para representar el comportamiento histerético del hormigón armado.
- b) El indicador de daño utilizado para cuantificar la degradación de los elementos estructurales o de la estructura misma.

2.4.2 INDICADORES DE DAÑO

Los indicadores de daño son las funciones que permiten relacionar la respuesta calculada para una estructura con el daño en la misma y pueden ser definidos a nivel de la estructura o de los elementos individuales. Los indicadores de daño definidos a nivel de la estructura hacen uso de la respuesta global de la misma como, por ejemplo, los desplazamientos de los pisos, el cortante en la base, el trabajo realizado por las cargas aplicadas, etc. El cálculo de estos indicadores es generalmente simple, sin embargo no proporcionan la información suficiente para aquellas estructuras en las que el daño tiende a ser localizado. Los indicadores de daño definidos a nivel de los elementos estructurales hacen uso de la respuesta calculada para dichos elementos como, por ejemplo, las rotaciones de la rótula plástica, la degradación de la capacidad de carga, etc. Estos indicadores proveen información más detallada sobre el daño de la estructura, sin embargo tienden a ser más difíciles de calcular (Powell, 1988)

2.4.3 PROBLEMAS ASOCIADOS CON LOS MÉTODOS ANALÍTICOS.

Los problemas asociados con los Métodos Analíticos, básicamente, provienen de las dificultades intrínsecas de la modelización matemática de las estructuras reales. Como ya se dijo en el apartado anterior, es importante recalcar que existen múltiples incertidumbres en la evaluación del daño, sin embargo, se puede señalar dos de las más importantes: la hipótesis del modelo para el análisis estructural y la selección de los movimientos sísmicos del terreno (Powell, 1988).

Respecto a la primera, se puede afirmar que las propiedades actuales de los materiales y de los elementos estructurales pueden llegar a ser muy diferentes a las del análisis y en la mayoría de los casos desconocidas. Es difícil desde un punto de vista matemático tener en cuenta el daño sufrido por la estructura antes del análisis y poder hacer una evaluación precisa de las condiciones iniciales, que permitan una evaluación confiable de la respuesta

obtenida después del análisis. Además, es difícil mediante un único parámetro relacionar la respuesta calculada con el daño.

Respecto a la segunda, es difícil identificar aquellas características del movimiento del terreno que describen la capacidad destructiva de un terremoto y por esta razón, el movimiento del terreno es una de las fuentes más grandes de incertidumbre. Todas estas fuentes de incertidumbres deben ser incluidas durante la fase de interpretación probabilística de los métodos analíticos, con el objeto de deducir propiedades de daño que puedan ser aplicadas en casos reales y que dichas propiedades resulten en una evaluación confiable de la vulnerabilidad sísmica de los edificios.

Además, otro inconveniente que surge para la aplicación práctica de los métodos analíticos en los estudios de riesgo se debe al hecho de que el daño usualmente se requiere en términos económicos como, por ejemplo, el índice de daño económico el cual es la relación entre el costo de reparación y el costo total de la construcción. Sin embargo, los indicadores de daño que se utilizan en estos métodos solo tienen en cuenta el daño de los elementos estructurales y es difícil en la práctica encontrar una correlación consistente entre dichos índices y el daño económico. Por otro lado, un elevado porcentaje de los daños económicos que se esperan por la ocurrencia de un sismo de baja a media intensidad pueden ser debido únicamente a los daños ocasionados en los elementos no estructurales.

Se ha llegado a obtener mediante algunos métodos, buenas correlaciones entre la respuesta medida y la respuesta simulada por el modelo. Sin embargo, el éxito de tales ensayos se debe generalmente a que las respuestas obtenidas están gobernadas por un comportamiento localizado de flexión uniaxial y no por mecanismos más complicados o difíciles de analizar en la práctica. Esto se hace posible, por ejemplo, anclando rígidamente las cimentaciones de los modelos, con lo cual se eliminan las dificultades adicionales provenientes del comportamiento suelo-estructura. También, si las cargas laterales se aplican dentro de un mismo plano de simetría, se eliminan por completo los efectos indeseables de torsión. Más aún, la mayoría de las simulaciones que se efectúan en la práctica constituyen únicamente del análisis

de pórticos planos, en donde los efectos de los elementos tales como muros y escaleras, presentes en una estructura real, son ignorados.

En conclusión, debido al impreciso e incompleto entendimiento del comportamiento estructural de los edificios de hormigón armado no es posible, hasta el momento, predecir analíticamente con suficiente confiabilidad la vulnerabilidad sísmica de dichas estructuras. La evaluación de estructuras por los métodos analíticos, puede llegar a ser una labor muy difícil de implementar a gran escala, por esta razón, se siguen buscando métodos alternativos que permitan un análisis rápido de la vulnerabilidad sísmica. Sin embargo la evaluación confiable de la vulnerabilidad de edificios muy particulares nunca podrá ser efectuada por procedimientos distintos a los métodos analíticos y es aquí donde el desarrollo de este tipo de métodos debe proseguir (Caicedo, 1994).

2.5 MÉTODOS SUBJETIVOS PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD

2.5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Debido a que el número de edificios que existen en una zona urbana puede llegar a ser muy grande, se ha visto la necesidad de desarrollar métodos que permitan un cálculo rápido de la vulnerabilidad. En teoría, estos métodos no son desarrollados para obtener una evaluación precisa de la vulnerabilidad de edificios sino, más bien, para dar una idea sobre el comportamiento sísmico que se puede esperar de toda una zona urbana, como herramienta imprescindible en los planes de mitigación de desastres.

Una de las características más importantes de estos métodos es la de introducir la opinión subjetiva del experto y la utilización de datos empíricos como fuente de conocimiento para la evaluación de la vulnerabilidad. Hoy en día existe un consenso general entre los investigadores en reconocer que la experiencia acumulada durante la observación del daño sufrido por las estructuras durante los terremotos tiene un valor incalculable en el momento de establecer los procedimientos necesarios para evaluación sísmica de edificios

existentes y que, desafortunadamente, este tipo de información es difícil de implementar en los métodos analíticos.

Generalmente, los métodos subjetivos hacen uso de formularios de encuesta o de levantamiento (survey forms), los cuales son rellenos por personal capacitado durante las investigaciones de campo. Existen básicamente dos tipos de formularios: de levantamiento de daños y de levantamiento de vulnerabilidad.

Los primeros se utilizan para recoger los datos de daño de las estructuras, después de ocurrido un terremoto. Estos datos se utilizan para múltiples propósitos, como por ejemplo, para saber a cuanto ascienden las pérdidas materiales o para el estudio de la vulnerabilidad de las estructuras por medio de un análisis estadístico.

Los segundos se utilizan para recoger los datos sobre las características de las estructuras tales como, sus dimensiones, tipos de material, etc; necesarios para la determinación de su vulnerabilidad.

Podemos clasificar tentativamente las metodologías existentes para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios en tres diferentes grupos:

- a) El primer grupo de métodos se basa en el reconocimiento de tipologías estructurales concretas que se pueden subdividir a su vez en tres procedimientos. El primero de ellos se distingue por identificar clases tipológicas muy amplias, tal como las utilizadas en la definición de las escalas de intensidad macrosísmica. El segundo identifica tipologías detalladas por medio de la combinación de diferentes tipos de elementos estructurales como, por ejemplo, los sistemas resistentes horizontal y vertical. El tercero relaciona las tipologías estructurales a las prácticas de construcción tradicionales que, generalmente, se encuentran agrupadas por el período de construcción de las estructuras. De acuerdo con los métodos de este grupo, a cada tipo estructural se le asocia una matriz de probabilidad de daño, bien sea por medio de un análisis estadístico de los datos observados o por el juicio de expertos.

- b) El segundo grupo de métodos se basa en la determinación, por medio de un modelo mecánico simplificado, de un único parámetro de comportamiento como, por ejemplo, el desplazamiento máximo del último piso, la ductilidad residual, etc. Al igual que en el grupo anterior, los rangos de dicho parámetro pueden ser asociados a una matriz de probabilidad de daño, por medio de modelos analíticos más refinados, un análisis estadístico o una investigación experimental.
- c) El tercer grupo de métodos combina las capacidades de los dos anteriores, introduciendo generalmente evaluaciones heurísticas del comportamiento estructural. Este tipo de procedimientos pueden ser llamados métodos híbridos y generalmente proporcionan un “índice de vulnerabilidad” convencional, cuya correlación con una matriz de probabilidad de daño es aún una pregunta abierta.

Aunque la anterior clasificación es muy útil, deja de ser apropiada para propósitos generales por cuanto excluye muchas de las metodologías existentes. En este sentido, es difícil hacer una clasificación estricta de los métodos subjetivos debido a que, por ejemplo, muchos de ellos combinan las mismas características y propiedades de los otros pero, a su vez, llegan a tener principios de evaluación muy diferentes, razón por la que en la presente monografía se utiliza una clasificación propia, que divide a los métodos subjetivos en dos grupos: métodos que predicen el daño y métodos que evalúan la capacidad.

2.5.2 MÉTODOS QUE PREDICEN EL DAÑO

Estos métodos permiten la estimación del daño de una estructura a través de dos tipos de relaciones matemáticas: la primera es una relación discreta, basada en matrices de probabilidad de daño y la segunda es una relación continua, basada en funciones de Vulnerabilidad.

2.5.2.1 MÉTODOS BASADOS EN MATRICES DE PROBABILIDAD DE DAÑO.

Una forma de expresar la vulnerabilidad de una estructura, teniendo en cuenta las múltiples incertidumbres que existen para su evaluación, es a través de una matriz de probabilidad de daño DPM (damage probability matrix) la cual expresa la probabilidad discreta de la distribución de daño, para un tipo de estructura y una intensidad sísmica dadas.

Cada tipología estructural representa una estructura genérica con unas características constructivas muy específicas pero que, a su vez, permite albergar un porcentaje representativo de las estructuras que se encuentran en la zona de estudio. Tal como se ha explicado anteriormente, estas tipologías estructurales pueden ser amplias o detalladas, dependiendo básicamente del tamaño de la zona en estudio. Por otra parte, la escala de intensidad sísmica se representa en términos de un parámetro físico o bien por cualquiera de las escalas macro sísmicas existentes. Asimismo, la escala de daño puede ser una cualquiera de las muchas existentes.

Generalmente, las matrices de probabilidad de daño se deducen por medio de un análisis estadístico del daño observado en las estructuras después de ocurrido un terremoto o también por el juicio subjetivo de expertos, aunque actualmente se utilizan algunos de los métodos analíticos descritos anteriormente para determinar dichas matrices de forma sintética.

Tipología: Edificios de concreto armado

Nivel de daño j	Intensidad del sismo i		
	0.06 g	0.12 g	0.24 g
1. Ninguno, menor	0.750	0.240	0.100
2. Ligero, moderado	0.240	0.600	0.450
3. Serio, grave	0.010	0.155	0.400
4. Colapso	0.000	0.005	0.050

Tabla 2.1: Ejemplo de una matriz de probabilidad de daño o DPM.

En la tabla 2.1 se muestra un ejemplo de una DPM para una estructura hipotética. Cada columna representa un nivel distinto de intensidad sísmica y cada fila un nivel distinto de daño estructural. Un valor cualquiera $P[D = j/i]$ en la

matriz, da la probabilidad de que esa tipología estructural en particular experimente un nivel de daño $D = j$, si ocurre un sismo de intensidad i . A este tipo de sentencias se le conoce con el nombre de probabilidad condicional; en este caso la condición para el daño de la estructura es la ocurrencia de un sismo de una determinada intensidad. Aunque en este ejemplo solo se ha utilizado una descripción subjetiva de daño, lo usual es asignar una escala de valores que represente el nivel de daño del edificio. Esto se hace, generalmente, a través de un parámetro que expresa el daño en términos económicos.

Es conveniente señalar en este momento que la convolución requerida para que el cálculo del riesgo específico S , tal como se definió anteriormente, se reduce en este caso a una simple sumatoria del producto entre todos los valores discretos de probabilidad de daño de la estructura, es decir de la vulnerabilidad del edificio expresada por los coeficientes de la DPM, con la peligrosidad sísmica, de la siguiente forma:

$$S = \sum_j \sum_i P[D = j/i] \times P[i] \quad (2.3)$$

En la ecuación 2.1 la peligrosidad sísmica se expresa por medio del término $P[i]$ que significa la probabilidad de ocurrencia de un sismo de intensidad i , para un período de retorno dado. El riesgo específico S también queda con el mismo período de retorno asociado.

Un ejemplo muy importante donde se deducen DPM por medio de la opinión de expertos, aparece en el reporte ATC-13 (ATC, 1985). En dicho estudio realizado para California, se utiliza una clasificación de las estructuras en 40 topologías, la escala de intensidad sísmica adoptada es la MMI (grados VI hasta XII) y la escala de daño es de 7 niveles, expresados con base en un factor de daño DF (damage factor) el cual se define como el valor del daño dividido entre el costo total de la obra. También se incluyen en este reporte métodos para estimar la pérdida de vidas humanas, métodos para corregir los DF para tener en cuenta la calidad de la construcción y métodos para estimar los efectos de otros peligros colaterales distintos al fenómeno sísmico. Pocos años después de publicarse la ATC-13, aparece la metodología ATC-21 (ATC,

1988), con el objeto de extender las experiencias obtenidas en California a otras partes de los Estados Unidos. Para ello se evaluaron, por medio de la opinión de expertos, una serie de factores de modificación, los cuales multiplican directamente las DPM obtenidas para California, adaptándolas de esta forma a otras regiones.

2.5.2.2 MÉTODOS BASADOS EN FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

Una función de vulnerabilidad es una relación matemática que expresa de forma continua el daño que experimenta una estructura específica cuando es sometida a un movimiento de origen sísmico. Las funciones de vulnerabilidad se deducen por medio de una regresión estadística de los datos de daño observados durante un terremoto o generados artificialmente mediante una simulación.

Al contrario que las matrices de probabilidad de daño descritas en el apartado anterior, las funciones de vulnerabilidad no tienen una forma genérica estándar que sea globalmente aceptada dentro de la ingeniería sísmica. Por el contrario, se puede afirmar que cada una de las metodologías existentes utiliza su propia definición de dichas funciones, lo cual ha resultado en procedimientos muy diferentes para la evaluación del riesgo.

Generalmente, dichas funciones se suelen expresar como curvas que relacionan el grado de daño del edificio con un parámetro de respuesta estructural o del movimiento del terreno. Los parámetros de respuesta estructural que comúnmente se utilizan son, el desplazamiento horizontal del edificio y un coeficiente sísmico que se define, como el factor entre la capacidad lateral del edificio dividido por el peso total del mismo. Por otro lado, los parámetros que expresan el movimiento del terreno son, usualmente la aceleración máxima del terreno, o uno de los grados en las escalas de intensidad sísmica, tales como la MMI o la MSK.

En la figura 2.4 se puede observar un ejemplo de una función de vulnerabilidad para edificios de mampostería, donde "V" es el índice de vulnerabilidad el cual describe la capacidad sísmica del edificio y "D"

representa el grado de daño físico observado en la estructura para un sismo de intensidad I. Esta función ha sido deducida por medio de estadísticas de daño durante terremotos en Italia (Angeletti, 1988).

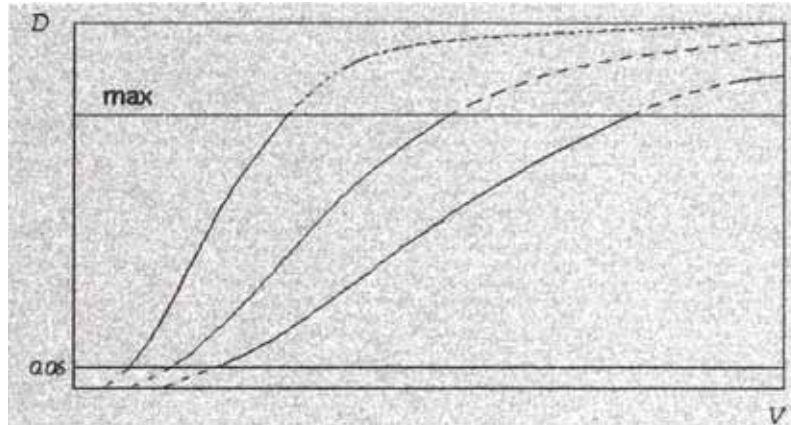


Figura 2.4: Ejemplo de una función de vulnerabilidad.

2.5.3 MÉTODOS QUE EVALÚAN LA CAPACIDAD SÍSMICA.

Los métodos descritos en este apartado, al contrario que los métodos subjetivos que predicen el daño, solo llegan a indicar la capacidad relativa de la estructura para resistir fuerzas sísmicas, por lo que se puede afirmar que no describen su vulnerabilidad como tal. Existen básicamente dos tipos de métodos: los primeros se basan en calificar, de forma empírica, las diferentes características de la estructura y los segundos se basan en comparar la capacidad actual de la estructura con la exigida por un determinado código de construcción.

2.5.3.1 MÉTODOS BASADOS EN UN SISTEMA DE CALIFICACIÓN

Estos métodos utilizan una escala de valores (rating system) para puntuar la calidad de las diferentes características analizadas en la estructura.

Así, por ejemplo, el método de evaluación de campo (field evaluation method) (Culver, 1975), hace uso de 5 formularios de levantamiento, los cuales se analizan por medio de un sistema de calificación general y otro estructural.

Con esta información el edificio es catalogado como bueno, regular, pobre o muy pobre, de acuerdo al puntaje obtenido y al nivel de intensidad MMI para el sitio.

En el método del factor de decisión (Decision Factor Analysis Method, General Services Administration, 1976) se analizan una serie de características del edificio como son la funcionalidad, el criterio de confianza, ubicación del edificio y la sismicidad del sitio, a cada una de las cuales se les asigna un factor numérico. A la suma de dichos números se le denomina factor de decisión, el cual determina el tipo de análisis que se debe utilizar para evaluar la capacidad del edificio. Este factor de decisión también puede utilizarse directamente como una medida cualitativa de su vulnerabilidad.

2.5.3.2 MÉTODOS BASADOS EN CÓDIGO DE CONSTRUCCIÓN

Estos métodos utilizan los mismos criterios que para el diseño de nuevos edificios y se basan en los procedimientos recomendados por los códigos de construcción. El algoritmo básico consiste en evaluar las fuerzas laterales que representan la intensidad sísmica esperada para un determinado sitio y luego comparar dichas fuerzas con la capacidad existente en la estructura. Para ello se utilizan métodos simplificados, como el de la fuerza horizontal equivalente o el del análisis modal con espectros de respuesta. Por otra parte, cuando se requieren parámetros tales como el amortiguamiento o la ductilidad de la estructura, estos se deducen empíricamente. La literatura que hace una descripción general de algunos de estos métodos es muy extensa; sin embargo los métodos más comentados siguen siendo los desarrollados por el ATC (Applied Technology Council) de los Estados Unidos.

La metodología ATC-3-06 (ATC, 1978), propone una evaluación basada en el factor de capacidad sísmica R , que es igual a la capacidad lateral sísmica existente en el edificio dividida entre la correspondiente capacidad requerida para la nueva construcción. Dependiendo de este valor R , el edificio es catalogado como adecuado o inadecuado.

La metodología ATC-14 (ATC, 1987), comienza por clasificar al edificio analizado dentro de una de las 15 tipologías estructurales que se definen en

esa metodología. Cada tipo estructural tiene un apartado en el que se describen sus características particulares y el comportamiento que se ha observado en pasados terremotos, para estructuras similares. Luego, mediante una serie de preguntas de falso o verdadero incluidas en un formulario de levantamiento, el observador de campo es requerido para prestar atención sobre los diferentes elementos estructurales y no estructurales del edificio, con el objeto de detectar todas las posibles fallas que se pueden presentar en el evento de un sismo. Si después de la evaluación no se detectan fallos se considera que el edificio tiene un nivel de seguridad aceptable para salvar la vida de sus ocupantes; en caso contrario, se deben evaluar para los elementos estructurales y no estructurales una serie de factores de capacidad / demanda y compararlos con unos niveles mínimos establecidos empíricamente. Si alguno de estos factores es menor que el permitido, se informa al usuario del edificio sobre los peligros existentes y en el caso contrario, se considera que el edificio es aceptable. La selección estos factores se realiza por procedimientos diferentes, dependiendo si la zona es de alta o de baja sismicidad. En este sentido, se ha encontrado algunas deficiencias en la metodología utilizada para las zonas de baja sismicidad, debido a que la ATC-14 fue desarrollada únicamente en la opinión de expertos de California, por lo que posteriormente se han recomendado algunas modificaciones para adaptar esta metodología a otras regiones de los Estados Unidos. Finalmente, estas recomendaciones han sido incluidas en la metodología ATC-22 (ATC, 1989).

2.5.4 PROBLEMAS ASOCIADOS CON LOS MÉTODOS SUBJETIVOS

Como ya se dijo antes, los métodos subjetivos no permiten una evaluación precisa de la vulnerabilidad de las estructuras; sin embargo, llegan a ser la única herramienta disponible en los casos para los que la modelización matemática por medio de los métodos analíticos es muy costosa, compleja o involucra factores cuyo comportamiento es difícil de predecir. En este sentido, la opinión del experto y una base de datos empíricos extensa, parece ser la solución a los problemas no resueltos hasta el momento.

La opinión subjetiva del experto, en la mayoría de los casos, resulta ser una base de conocimiento difícil de transmitir y de “calibrar”, por lo que los métodos que se basan en este tipo de información deben utilizar conceptos simples, generales y fácilmente comprensibles por el usuario. Lo anterior resulta, generalmente, en metodologías adaptadas a las tipologías y a las prácticas de construcción característica de cada país e inclusive de cada región, lo que dificulta su aplicación en otros lugares.

Así, por ejemplo, los métodos que utilizan matrices de probabilidad de daño son muy apropiados, por que la definición de estas matrices es generalmente sencilla y el cálculo del riesgo específico se simplifica enormemente pero, por otro lado, obliga a adoptar tipologías estructurales muy generales, las cuales son difícilmente adaptables a regiones con prácticas constructivas distintas. Además, estas tipologías por ser tan reducidas, disminuyen el nivel de “resolución” en la evaluación de la vulnerabilidad en zonas urbanas.

Por otra parte, los métodos basados en los códigos de construcción, además de no dar una estimación del daño, son elaborados con los criterios y las fórmulas adoptadas por un código de construcción en particular, lo que dificulta su adaptación para otras regiones donde, por ejemplo, el nivel de desarrollo o las políticas de protección civil son diferentes.

2.6 ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA.

Todas las normas de diseño sismorresistente incluyendo la peruana destacan aspectos generales muy importantes a tener en cuenta al momento de realizar la evaluación de la vulnerabilidad sísmica, los cuales son:

- Aspectos Geométricos:
 - Irregularidad en altura.
 - Irregularidad en planta.
 - Óptima distribución de los elementos estructurales.
- Aspectos Estructurales.

- Tipo de estructura.
- Ductilidad como requisito indispensable para un comportamiento satisfactorio.
- Continuidad en la estructura, tanto en planta como en elevación.
- Detalles de elementos estructurales.
- Tipo y disposición de entrepisos.
- Amarre de cubiertas.
- Aspectos Constructivos.
 - Selección y uso adecuado de los materiales de construcción.
 - Buena práctica constructiva e inspección estructural rigurosa.
- Suelos
 - Blandos
 - Intermedios.
 - Duros.
- Entorno
 - Topografía.
 - Edificios colindantes
 - Otros efectos.

En consecuencia, es de suponer que gran parte de los métodos usados para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones existentes centran su atención en estos aspectos. La metodología planteada en este trabajo de investigación revisa cada uno de estos aspectos de una forma versátil, de tal manera que la evaluación en campo se hace de forma dinámica una vez adquirida la práctica y conociendo el valor de cada parámetro.

2.7 TIPOS DE ELEMENTOS SUSCEPTIBLES A SUFRIR DAÑOS EN EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA.

Básicamente en edificaciones de mampostería los mayores daños han sido observados en los muros portantes, por ser estos los elementos estructurales que además de su peso propio portan el peso de la estructura en

si. A continuación se muestra algunas figuras que ilustran los daños observados por la experiencia Colombiana (La RED, 2001).

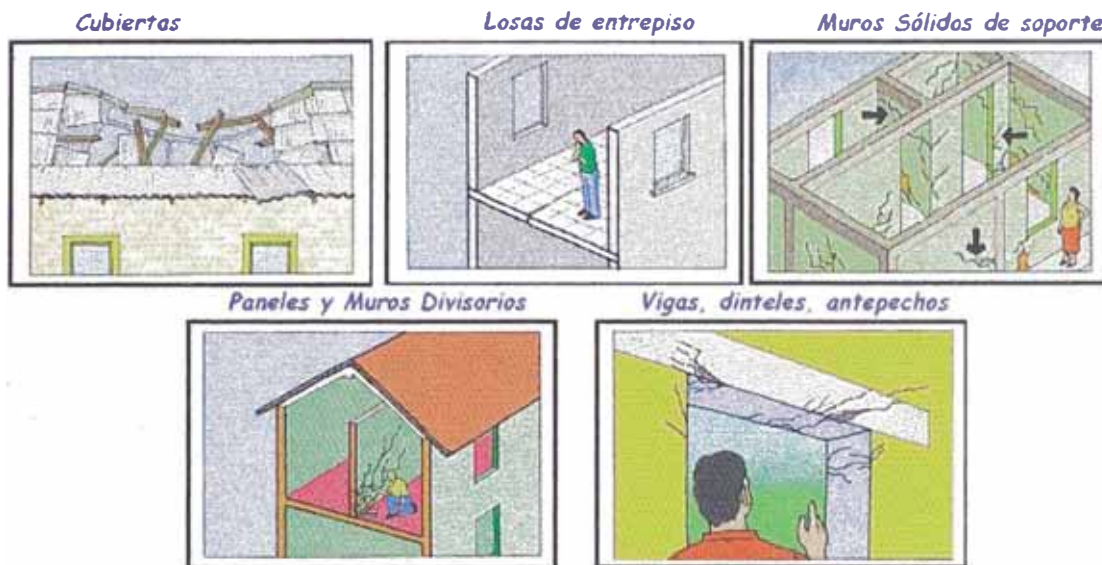


Figura 2.5: Daños observados por la AIS en edificaciones de albañilería.(La RED,2001)

Como se aprecia estos daños en las edificaciones de albañilería son muy parecidos a los daños observados en el Perú para el mismo tipo de edificaciones. Esto hace suponer que en Colombia usan materiales similares y que tienen los mismos defectos en los procesos constructivos y calidad de los materiales.

Además de tomar en cuenta los daños en elementos estructurales también es necesario prestar atención a los elementos no estructurales, en especial a su estado de conservación. En la figura 2.6 puede apreciarse los posibles daños que podrían ocurrir en los elementos no estructurales de una vivienda familiar perteneciente a la clase social menos favorecida del país (La RED, 2001).

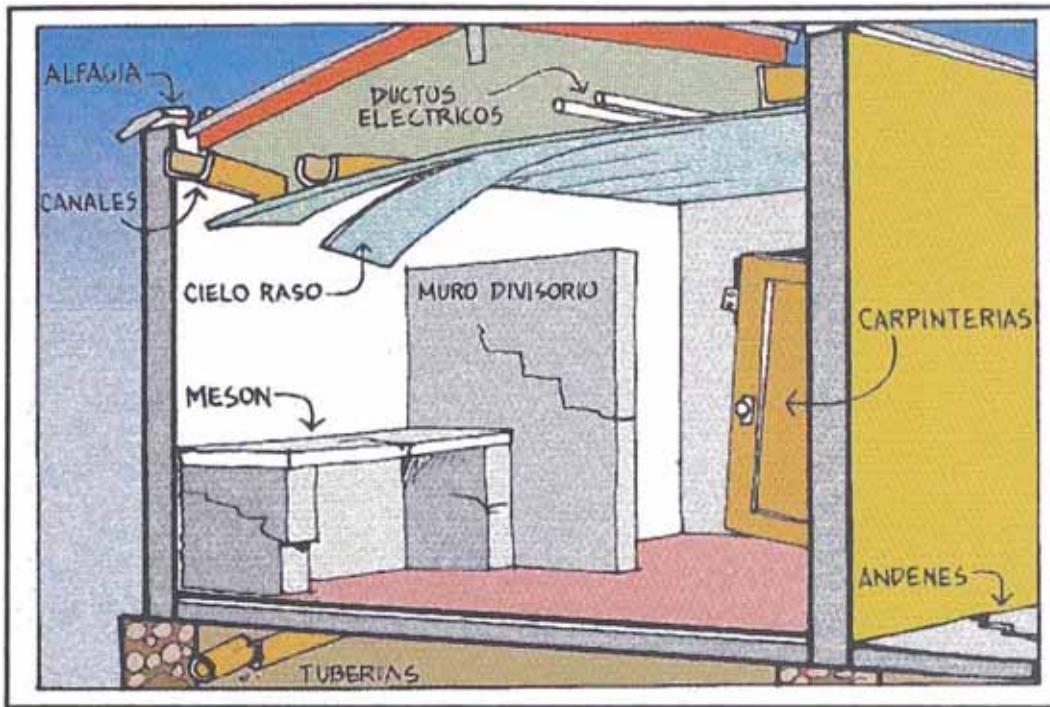


Figura 2.6: Gráfico elaborado por la AIS que ilustra los daños en elementos no estructurales. (La RED, 2001)

Los daños que se presentan en elementos no estructurales por lo general no implican peligro para la estabilidad global de la vivienda y por lo tanto no se incluyen en la evaluación global del daño. Los daños en elementos no estructurales deben someterse a reparación tratando de minimizar la vulnerabilidad de los mismos. Estos daños si pueden poner en peligro la vida de los ocupantes de la vivienda, por lo tanto sí son considerados al evaluar la vulnerabilidad.

De la experiencia recopilada en las últimas décadas en el Perú y otros países que utilizan el mismo sistema constructivo, se destacó que una edificación de albañilería debe tener, en lo posible, una densidad de muros equilibrada en ambas direcciones distribuidas en planta y elevación en tal forma que no provoque excentricidad en planta, ni concentración de esfuerzos por cambio brusco en la altura, en la distribución de masas y rigideces. Es decir debe buscarse simetría estructural tanto en planta como en elevación, ya que existe una correlación entre densidad de muros y los daños ocurridos. Tomar en cuenta estos factores así como confinar todos los muros de albañilería con vigas y columnas de amarre formando un sistema espacial continuo originan

una reducción sustancial en la vulnerabilidad sísmica de este tipo de edificaciones (Kuroiwa, 2002).

2.8 MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD PARA EVALUAR LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE ÁREAS URBANAS.

2.8.1 INTRODUCCIÓN

El análisis del comportamiento de edificios, durante terremotos ocurridos desde el año 1976 en diferentes regiones de Italia, ha permitido a los investigadores de ese país identificar algunos de los parámetros más importantes que controlan el daño en los edificios. Estos parámetros se han compilado en un formulario de levantamiento, el cual se viene utilizando desde el año 1982, con el propósito de determinar de una forma rápida y sencilla la vulnerabilidad sísmica de edificios existentes. La combinación de dichos parámetros, por medio de una escala predefinida, en un único valor numérico llamado Índice de Vulnerabilidad. Es lo que se conoce hoy en día como el método del Índice de Vulnerabilidad.

El formulario para el levantamiento de la vulnerabilidad se ha modificado varias veces, durante los últimos quince años, con el propósito de facilitar las tareas de observación durante las investigaciones de campo o para incluir una mejor descripción del daño, en los casos para los que dicho formulario se utiliza en la recopilación de los efectos producidos por un terremoto. Sin embargo, se puede concluir que las modificaciones son más de forma que de fondo y que, en cualquier caso, se mantienen siempre los mismos parámetros que se identificaron desde un comienzo como los controladores potenciales del daño.

El formulario de levantamiento consta de dos niveles, los cuales se han diseñado con el propósito de tener dos grados de aproximación. El primer nivel sirve para seleccionar los edificios más "peligrosos" desde el punto de vista estructural y, posteriormente, dichos edificios se investigan con el segundo nivel para obtener una apreciación más exacta de su vulnerabilidad. Sin

embargo, actualmente se reconoce que el método en general sólo puede dar una estimación aproximada de la vulnerabilidad de los edificios, suficiente para la toma de decisiones durante los planes de mitigación de desastres.

El primer nivel incluye los datos generales del edificio, tales como: ubicación, dimensiones, utilización, tipología estructural, etc. También incluye un apartado para la recopilación de la extensión y el nivel de daño, que se utiliza durante las investigaciones post-terremoto. Los datos provistos por el primer nivel se han utilizado para deducir matrices de probabilidad de daño. Sin embargo, no forman parte fundamental del método ya que no influyen para nada en el cálculo del índice de vulnerabilidad.

Por el contrario, en el segundo nivel se recopilan los datos y parámetros fundamentales para el cálculo del índice de vulnerabilidad, que consiste a su vez de dos apartados distintos. Uno de ellos está destinado a la evaluación de edificios de mampostería y el otro a edificios de hormigón armado. La escala que se utiliza para calificar los diferentes parámetros que influyen en el comportamiento de los edificios de mampostería se conoce como la escala de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini.

El método del índice de vulnerabilidad ha sido ampliamente utilizado en Italia durante los últimos quince años y su gran aceptación en ese país ha quedado demostrada por el GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti) que lo ha adoptado para los planes de mitigación de desastres a nivel gubernamental. Esto ha permitido la evolución del método, como resultado de la experimentación durante todos esos años, además de la obtención de una extensa base de datos sobre daño y vulnerabilidad (Caicedo, 1993).

2.8.2 CALCULO DEL INDICE DE VULNERABILIDAD

De acuerdo con la escala de vulnerabilidad de Benedetti-Petrini, el índice de vulnerabilidad se obtiene mediante una suma ponderada de los valores numéricos que expresan la "calidad sísmica" de cada uno de los

parámetros estructurales y no estructurales que, se considera, juegan un papel importante en el comportamiento sísmico de las estructuras de mampostería.

A cada parámetro se le atribuye, durante las investigaciones de campo, una de las cuatro clases A, B, C, D siguiendo una serie de instrucciones detalladas con el propósito de minimizar las diferencias de apreciación entre los observadores. A cada una de estas clases le corresponde un valor numérico K_i que varía entre 0 y 45, como se observa en la Tabla 2.2. Así, por ejemplo, si el parámetro número cuatro "posición del edificio y de la fundación" corresponde a una configuración insegura desde el punto de vista sísmico, se le asigna la clase D y el valor numérico $K_4 = 45$, (GNDT, 1993).

Parámetros	Clase K_i				Peso W_i
	A	B	C	D	
1. Organización del sistema resistente.	0	5	20	45	1.00
2. Calidad del sistema resistente.	0	5	25	45	0.25
3. Resistencia convencional.	0	5	25	45	1.50
4. Posición del edificio y cimentación.	0	5	25	45	0.75
5. Diafragmas horizontales.	0	5	15	45	1.00
6. Configuración en planta.	0	5	25	45	0.50
7. Configuración en elevación.	0	5	25	45	1.00
8. Distancia máxima entre los muros.	0	5	25	45	0.25
9. Tipo de cubierta.	0	15	25	45	1.00
10. Elementos no estructurales.	0	0	25	45	0.25
11. Estado de conservación.	0	5	25	45	1.00

Tabla 2.2: Escala de vulnerabilidad Benedetti-Petrini.

Por otra parte, cada parámetro es afectado por un coeficiente de peso W_i , que varía entre 0.25 y 1.5. Este coeficiente refleja la importancia de cada uno de los parámetros dentro del sistema resistente del edificio. De esta forma, el índice de vulnerabilidad VI se define por la siguiente expresión:

$$VI = \sum_{i=1}^{11} K_i W_i$$

Al analizar la ecuación se puede deducir que el índice de vulnerabilidad define una escala continua de valores desde 0 hasta 382.5 que es el máximo valor posible. Como puede verse en la Tabla 2.2, los parámetros 1, 2, 4, 5, 9, 10 y 11 son de naturaleza descriptiva y quedan definidos completamente por los alcances que se presentan más adelante. Por el contrario, los parámetros

3, 6, 7 y 8 son de naturaleza cuantitativa y requieren de ciertas operaciones matemáticas muy sencillas, las cuales también se describen más adelante, (Chavarria, 2001).

2.8.3 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS.

En las siguientes líneas, se describe, de forma muy breve, el fundamento teórico de cada uno de los parámetros con el objeto de proporcionar un cierto criterio de selección al momento de realizar las visitas de campo respectivas, (GNDT, 1993).

Parámetro N° 1. Organización del sistema resistente

Con este parámetro se evalúa el grado de organización de los elementos verticales prescindiendo del tipo de material. El elemento significativo es la presencia y la eficiencia de la conexión entre las paredes ortogonales con tal de asegurar el comportamiento en "cajón" de la estructura. Se reporta una de las clases:

- A) Edificio construido de acuerdo con las recomendaciones de la norma de construcción y diseño sismo-resistente.
- B) Edificio que presenta, en todas las plantas, conexiones realizadas mediante vigas de amarre en los muros, capaces de transmitir acciones cortantes verticales.
- C) Edificio que, por no presentar vigas de amarre en todas las plantas, está constituido únicamente por paredes ortogonales bien ligadas.
- D) Edificio con paredes ortogonales no ligadas.

Parámetro N° 2. Calidad del sistema resistente

Con este parámetro se determina el tipo de mampostería más frecuentemente utilizada, diferenciando, de modo cualitativo, su característica de resistencia con el fin de asegurar la eficiencia del comportamiento en "cajón"

de la estructura. La atribución de un edificio a una de las cuatro clases se efectúa en función de dos factores: por un lado, del tipo de material y de la forma de los elementos que constituyen la mampostería. Por otro lado, de la homogeneidad del material y de las piezas, por toda la extensión del muro. Se reporta una de las clases:

- A) Mampostería en ladrillo o bloques prefabricados de buena calidad. Mampostería en piedra bien cortada, con piezas homogéneas y de dimensiones constantes por toda la extensión del muro. Presencia de ligamento entre las piezas.
- B) Mampostería en ladrillo, bloques o piedra bien cortada, con piezas bien ligadas más no muy homogéneas en toda la extensión del muro.
- C) Mampostería en piedra mal cortada y con piezas no homogéneas, pero bien trabadas, en toda la extensión del muro. Ladrillos de baja calidad y privados de ligamento.
- D) Mampostería en piedra irregular mal trabada o ladrillo de baja calidad, con la inclusión de guijarros y con piezas no homogéneas o privadas de ligamento.

Parámetro N° 3. Resistencia convencional

Con la hipótesis de un perfecto comportamiento en "cajón" de la estructura, la evaluación de la resistencia de un edificio de mampostería puede ser calculada con razonable confiabilidad. El procedimiento utilizado requiere del levantamiento de los datos:

N: número de pisos.

A_t : área total cubierta en (m^2).

$A_{x,y}$: área total de los muros resistentes en el sentido X e Y respectivamente en (m^2). El área resistente de los muros inclinados un ángulo α diferente de cero, respecto a la dirección considerada, se debe multiplicar por $(\cos \alpha)^2$.

τ_k : resistencia a cortante característica del tipo de mampostería en (Ton/m^2). En el caso de que la mampostería se componga de diferentes

materiales, el valor de τ_K se determina como un promedio ponderado de los valores de resistencia a cortante para cada uno de los materiales τ_i , utilizando como factor de peso el porcentaje relativo en área A_i de cada uno de ellos.

$$\tau_K = \frac{\sum \tau_i A_i}{\sum A_i}$$

h: altura media de los pisos en (m).
 P_m : peso específico de la mampostería en (Ton/m³).
 P_s : peso por unidad de área del diafragma en (Ton/m²).

Parámetro N° 4. Posición del edificio y de la cimentación

Con este parámetro se evalúa, hasta donde es posible por medio de una simple inspección visual, la influencia del terreno y de la cimentación en el comportamiento sísmico del edificio. Para ello se tiene en cuenta algunos aspectos, tales como: la consistencia y la pendiente del terreno, la eventual ubicación de la cimentación a diferente cota y la presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén. Se reporta una de las clases:

- A) Edificio cimentado sobre terreno estable con pendiente inferior o igual al 10%. La fundación está ubicada a una misma cota. Ausencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.
- B) Edificio cimentado sobre roca con pendiente comprendida entre un 10% y un 30% o sobre terreno suelto con pendiente comprendida entre un 10% y un 20%. La diferencia máxima entre las cotas de la fundación es inferior a 1 metro. Ausencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.
- C) Edificio cimentado sobre terreno suelto con pendiente comprendida entre un 20% y un 30% o sobre terreno rocoso con pendiente comprendida entre un 30% y un 50%. La diferencia máxima entre las cotas de la fundación es inferior a 1 metro. Presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.
- D) Edificio cimentado sobre terreno suelto con pendiente mayor al 30% o sobre terreno rocoso con pendiente mayor al 50%. La diferencia máxima

entre las cotas de la fundación es superior a 1 metro. Presencia de empuje no equilibrado debido a un terraplén.

Parámetro N° 5. Diafragmas horizontales

La calidad de los diafragmas tiene una notable importancia para garantizar el correcto funcionamiento de los elementos resistentes verticales. Se reporta una de las clases:

A) Edificio con diafragmas, de cualquier naturaleza, que satisfacen las condiciones:

1. Ausencia de planos a desnivel.
2. La deformabilidad del diafragma es despreciable.
3. La conexión entre el diafragma y los muros es eficaz.

B) Edificio con diafragma como los de la clase A, pero que no cumplen con la condición 1.

C) Edificio con diafragmas como los de la clase A, pero que no cumplen con las condiciones 1 y 2.

D) Edificio cuyos diafragmas no cumplen ninguna de las tres condiciones.

Parámetro N° 6. Configuración en planta

El comportamiento sísmico de un edificio depende de la forma en planta del mismo. En el caso de edificios rectangulares es significativa la razón $\beta_1 = a/L$ entre las dimensiones en planta del lado menor y mayor. También es necesario tener en cuenta las protuberancias del cuerpo principal mediante la relación $\beta_2 = b/L$. En la Figura 2.7 se explica el significado de los dos valores que se deben reportar, para lo cual se evalúa siempre el caso más desfavorable.

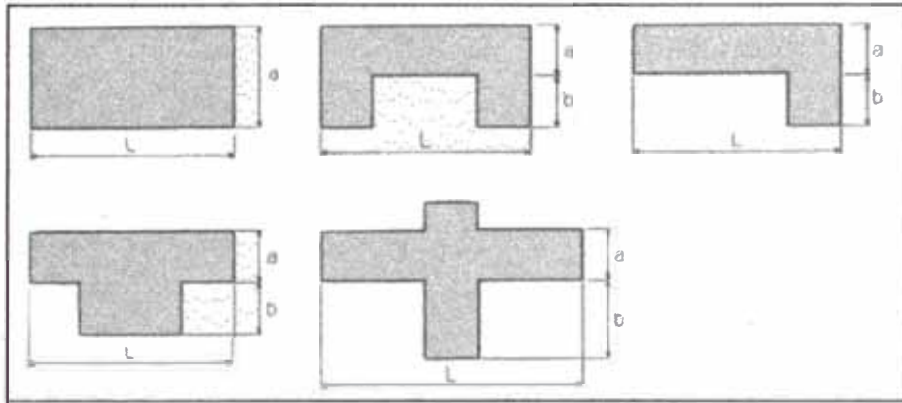


Figura 2.7: Ejemplos de configuración en planta.

Parámetro N° 7. Configuración en elevación

En el caso de edificios de mampostería, sobre todo para los más antiguos, la principal causa de irregularidad está constituida por la presencia de porches y torretas. La presencia de porches se reporta como la relación porcentual entre el área en planta del mismo y la superficie total del piso. La presencia de torretas de altura y masa significativa respecto a la parte restante del edificio se reporta mediante la relación T/H , tal como se indica en la Figura 2.8. No se deben tener en cuenta las torretas de modesta dimensión tales como chimeneas, escapes de ventilación, etc.

También se reporta la variación de masa en porcentaje $\pm \Delta M/M$ entre dos pisos sucesivos, siendo M la masa del piso más bajo y utilizando el signo (+) si se trata de aumento o el (-) si se trata de disminución de masa hacia lo alto del edificio. La anterior relación puede ser sustituida por la variación de áreas respectivas $\pm \Delta A/A$, evaluando en cualquiera de los dos casos el más desfavorable.

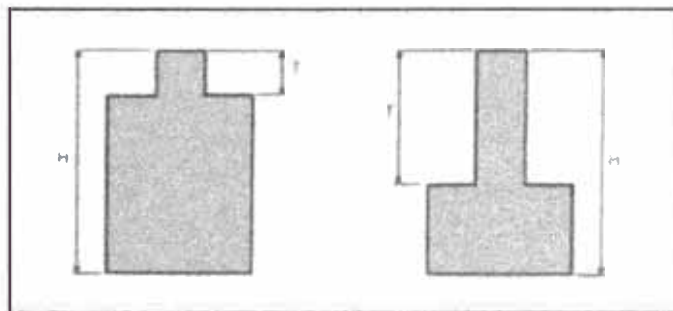


Figura 2.8: Ejemplos de configuración en elevación.

Parámetro N° 8. Distancia máxima entre los muros

Con este parámetro se tiene en cuenta la presencia de muros maestros intersectados por muros transversales ubicados a distancia excesiva entre ellos. Se reporta el factor L/S , donde L es el espaciamiento de los muros transversales y S el espesor del muro maestro, evaluando siempre el caso más desfavorable.

Parámetro N° 9. Tipo de cubierta

Se tiene en cuenta con este parámetro, la capacidad del techo para resistir fuerzas sísmicas. Se reporta una de las clases:

- A) Edificio con cubierta estable y provisto de viga cumbreira. Edificio con cubierta plana.
- B) Edificio con cubierta estable y bien conectada a los muros, pero sin viga cumbreira. Edificio con cubierta parcialmente estable y provista de viga cumbreira.
- C) Edificio con cubierta inestable, provista de viga cumbreira.
- D) Edificio con cubierta inestable, sin viga cumbreira.

Parámetro N° 10. Elementos no estructurales

Se tiene en cuenta con este parámetro la presencia de cornisas, parapetos o cualquier elemento no estructural que pueda causar daño a personas o cosas. Se trata de un parámetro secundario, para fines de la evaluación de la vulnerabilidad, por lo cual no se hace ninguna distinción entre las dos primeras clases. Se reporta una de las clases:

- A) y B) Edificio sin cornisas y sin parapetos. Edificio con cornisas bien conectadas a la pared, con chimeneas de pequeña dimensión y de peso modesto. Edificio cuyo balcón forma parte integrante de la estructura de los diafragmas.

C) Edificio con elementos de pequeña dimensión, mal vinculados a la pared.

D) Edificio que presenta chimeneas o cualquier otro tipo de elemento en el techo, mal vinculado a la estructura. Parapetos u otros elementos de peso significativo, mal contruidos, que pueden caer en caso de terremoto. Edificio con balcones contruidos posteriormente a la estructura principal y conectados a ésta de modo deficiente.

Parámetro N° 11. Estado de conservación

Se reporta una de las clases:

A) Muros en buena condición, sin lesiones visibles.

B) Muros que presentan lesiones capilares no extendidas, con excepción de los casos en los cuales dichas lesiones han sido producidas por terremotos.

C) Muros con lesiones de tamaño medio entre 2 a 3 milímetros de ancho o con lesiones capilares producidas por sismos. Edificio que no presenta lesiones pero que se caracteriza por un estado mediocre de conservación de la mampostería.

D) Muros que presentan un fuerte deterioro de sus materiales constituyentes o, lesiones muy graves de más de 3 milímetros de ancho.

2.8.4 CALCULOS REQUERIDOS POR LOS PARÁMETROS DE NATURALEZA CUANTITATIVA.

Los cálculos requeridos por los parámetros de naturaleza cuantitativa son básicamente de dos tipos: el primer tipo consiste en la aplicación de fórmulas matemáticas sencillas y el segundo tipo consiste en la toma de decisiones con base en condiciones lógicas. Enseguida se explican estos dos tipos de cálculos requeridos por los parámetros 3, 6, 7 y 8. La mayoría de las variables involucradas ya se han explicado.

Parámetro N° 3. Resistencia convencional

El coeficiente sísmico C , se define como el factor entre la fuerza horizontal resistente al pie del edificio dividido entre el peso del mismo y está dado por la expresión:

$$C = \frac{a_0 \tau_K}{q N} \sqrt{1 + \frac{q N}{1.5 a_0 \tau_K (1 + \gamma)}}$$

donde,

$$A = \min\{A_x; A_y\}$$

$$B = \max\{A_x; A_y\}$$

$$a_0 = A / A_t$$

$$\gamma = B / A$$

$$q = \frac{(A + B)h}{A_t} P_m + P_s$$

El valor de q representa el peso de un piso por unidad de área cubierta y es igual al peso de los muros más el peso del diafragma horizontal, suponiendo que no existen variaciones excesivas de masa entre los diferentes pisos del edificio.

Finalmente, la atribución de este parámetro dentro de una de las cuatro clases A, B, C, D se hace por medio del factor $\alpha = C / \bar{C}$, en donde \bar{C} es un coeficiente sísmico de referencia que se toma como 0.4.

- A) Edificio con $\alpha \geq 1$.
- B) Edificio con $0.6 \leq \alpha < 1$.
- C) Edificio con $0.4 \leq \alpha < 0.6$.
- D) Edificio con $\alpha < 0.4$.

Parámetro N° 6. Configuración en planta

La asignación de este parámetro dentro de una de las cuatro clases, se realiza con base en las condiciones:

- A) Edificio con $\beta_1 \geq 0.8$ ó $\beta_2 \leq 0.1$.
- B) Edificio con $0.8 > \beta_1 \geq 0.6$ ó $0.1 < \beta_2 \leq 0.2$.
- C) Edificio con $0.6 > \beta_1 \geq 0.4$ ó $0.2 < \beta_2 \leq 0.3$.
- D) Edificio con $0.4 > \beta_1$ ó $0.3 < \beta_2$.

Parámetro N° 7. Configuración en elevación

La asignación de este parámetro, dentro de una de las cuatro clases, se realiza con base en las condiciones:

- A) Edificio con $-\Delta M/M < 10\%$.
- B) Superficie porche $< 10\%$ ó $10\% \leq -\Delta M/M < 20\%$.
- C) Superficie porche $= 10\% \cong 20\%$ ó $-\Delta M/M > 20\%$ ó $T/H < 2/3$.
- D) Superficie porche $> 20\%$ ó $\Delta M/M > 0$ ó $T/H > 2/3$.

Porche: Conjunto de columnas, a manera de pórticos ubicadas en el primer piso de algunas edificaciones, que pueden originar irregularidad de Masa o Irregularidades de Rigidez (figura 2.9)

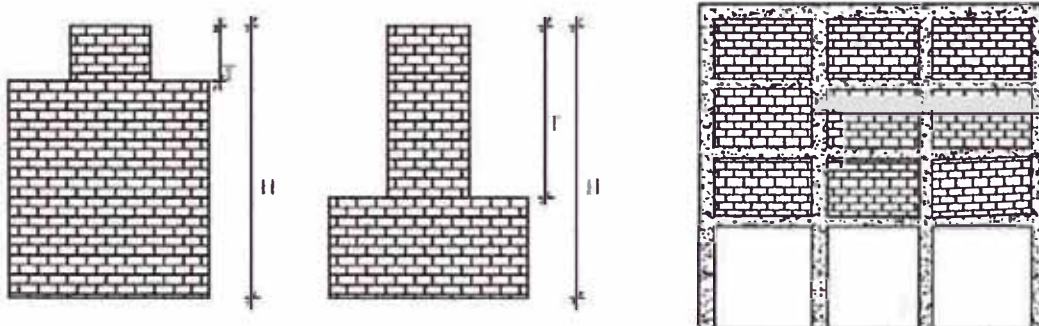


Figura 2.9: Formas originales consideradas para la evaluación del parámetro 7.

8. Distancia máxima entre los muros

La asignación de este parámetro, dentro de una de las cuatro clases, se realiza con base en las condiciones:

- A) Edificio con $L/S < 15$.
- B) Edificio con $15 \leq L/S < 18$.
- C) Edificio con $18 \leq L/S < 25$.
- A) Edificio con $L/S \geq 25$.

2.8.5 COMENTARIOS SOBRE EL MÉTODO.

Una de las ventajas del método es la relativa facilidad con la que se describe la vulnerabilidad del edificio por medio del índice de vulnerabilidad. Este índice por sí solo puede ser utilizado como una herramienta de decisión en los planes de mitigación de desastres a escala urbana. Respecto a esto se puede decir que el método del índice de vulnerabilidad provee un nivel de detalle superior al de los métodos basados en tipologías estructurales, tal como los que utilizan matrices de probabilidad de daño para la descripción de la vulnerabilidad de los edificios. Por otro lado, la extensa base de datos recolectada en Italia ha mostrado relativa eficacia usando este método para edificaciones de mampostería.

El método utiliza la experiencia del experto como base de conocimiento para determinar la vulnerabilidad de los edificios. Por una parte, este conocimiento tiene un valor incalculable a la hora de predecir efectos cuya modelación matemática aún no está bien desarrollada pero, por otro lado, esta información debe ser utilizada con cautela debido a que la opinión subjetiva del observador es difícil de calibrar.

CAPITULO III

Características Geológicas, Geotécnicas y Sísmicas.

3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS, GEOTÉCNICAS Y SÍSMICAS DE LA CIUDAD DE LIMA.

Analizar el peligro sísmico de la zona donde se realizó el presente estudio, involucra necesariamente la evaluación de las características de toda la ciudad de Lima, para luego centrar nuestra atención en aquellos rasgos particulares, que diferencian al sector en estudio de los demás.

A continuación se hace una breve descripción de las características más relevantes que fueron tomadas en cuenta en el presente estudio, entre las cuales podemos citar algunas como:

- Geológicas
- Geotécnicas
- Sismo tectónicas
- Sismológicas
- Sísmicas

3.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.

La figura 3.1, corresponde al mapa geológico de la ciudad de Lima propuesto por el Ingeniero A. Martínez Vargas en 1979; donde se muestran las diferentes formaciones y las Eras Geológicas a las que pertenecen cada una de ellas, su ubicación y extensión territorial.

La ciudad de Lima se halla dentro de los límites de influencia del cono de deyección del río Rimac. Este cono consiste de material aluvial de estructura lentiforme donde se superponen depósitos de cantos rodados, arena, arcilla, y limo, sin orden ni arreglo.

Una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas afloran en los alrededores del área de Lima; comprenden un espesor de 1800 metros medidos en el área del Cerro Puente Piedra. La unidad estratigráfica más antigua se ha denominado formación Puente Piedra y se extiende al NW de Lima. Comprende tres miembros Puente Piedra Inferior, constituido por rocas volcánicas, gris verdosas, porfiroides, pseudoestratificadas y que infrayacen a una secuencia de lutitas denominadas Puente Inga, que contiene fósiles ammonitales que han servido para datar este miembro como de edad Cretáceo-Inferior. Suprayace a Puente Inga otra potente secuencia de rocas volcánicas, con textura brechoide y porfiritica, denominada Puente Piedra Superior. Están ampliamente extendidas en el sector NW de Lima, se hallan atravesados por numerosos diques y fallas, la presencia de numerosos sills es notoria y esta vinculado con el sistema de fracturas.

En el área denominada Morro Solar al NE de Lima afloran rocas sedimentarias de 80 metros de potencia que constituyen la formación Salto del Fraile que litológicamente están formadas por bancos de potentes areniscas, cuarzós de colores claros, que presentan estratificación cruzada y huellas de anélidos, el contacto con las lutitas del miembro La Virgen de la Formación Herradura de 120 metros de potencia es gradacional.

Suprayaciendo al miembro La Virgen se encuentra el miembro La Herradura que está formado por una secuencia intercalada de arenisca y lutitas en menor proporción. Tanto la Formación Salto del Fraile como La

Herradura están atravesadas por numerosos diques de andesita, la presencia de sills concordantes a la estructura sedimentaria es manifiesta.

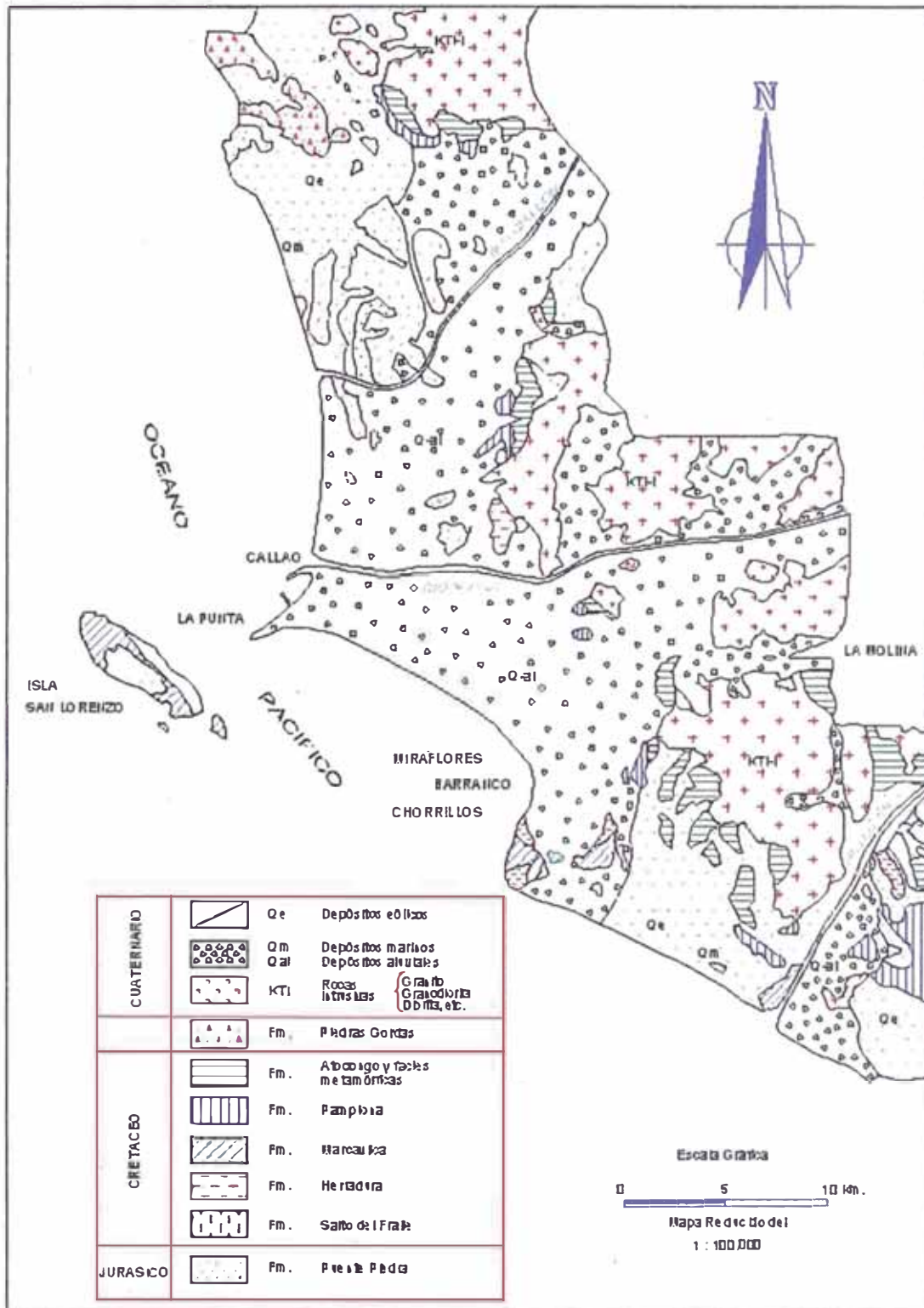


Figura 3.1: Plano Geológico de Lima (Martínez, 1979)

La Formación Marcavilca de 450 metros de potencia suprayace a La Herradura y es representada por las areniscas blancas en estratos potentes.

La Formación Pamplona de 1000 metros de potencia donde destacan las margas, lutitas y calizas intercaladas, infrayace a la formación Atocongo de calizas oscuras y compactas de 400 metros de potencia. El buzamiento de los estratos del Morro Solar y la Isla San Lorenzo es 15 a 10° SW siguiendo un rumbo de NS 52°W.

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS.

Los suelos de Lima han sido estudiados parcialmente por diferentes instituciones, universidades y profesionales. Dicha información se encuentra dispersa y en muchos casos privada al análisis. Según estudios realizados por investigadores, como el Dr. Alva Hurtado, el Ing. Martínez Vargas, y otros, además de trabajos de ingeniería realizados en todo Lima, se ha determinado las principales características de los suelos así como las capacidades admisibles de los suelos típicos en cada uno de los distritos de Lima. A continuación se hace una general y breve descripción de las características predominantes en los suelos de la ciudad capital (Sánchez, 2003).

La Punta presenta una napa freática alta, limos saturados a 2 metros de profundidad. En general tiene una capacidad de carga de trabajo en condiciones de servicio no mayor que aproximadamente 0.5 kg/cm^2 en general.

En el Callao, La Perla, Bellavista y Ventanilla los suelos presentan una capacidad de carga admisible neta del orden de 1.5 kg/cm^2 .

Carmen de La Legua, la zona Este de Bellavista, la zona Oeste de Lima, San Miguel y Pueblo Libre presentan suelos cuyas capacidades admisibles son de alrededor $1.0 - 1.5 \text{ kg/cm}^2$. Muestra también una estratigrafía alterada de limos arenosos y limos arcillosos.

En Lince. Breña, Jesús María, La Victoria (zona Sur), Magdalena del Mar y Miraflores (zona Oeste), se presentan suelos constituidos por gravas empacadas en arenas formando un conglomerado bastante compacto y cuya capacidad portante puede ser de 2.5 hasta 4.0 kg/cm^2 .

Sin embargo, en algunas partes de San Miguel, San Isidro, Miraflores y Magdalena se encontraron suelos finos, limo – arcillosos y lentes arenosas intercaladas y una capacidad de carga admisible de 0.5 kg/cm^2 .

Ate, Lima (zona Este), Surco (zona Norte), La Victoria (zona Norte) y San Luis, presentan gravas con buena graduación, pocos finos y una capacidad admisible entre 4 y 5 kg/cm^2 .

La Molina y Ate (zona Oeste), presentan suelos arenosos limosos y arenas pobremente graduadas con una capacidad admisible entre 0.5 y 2.5 kg/cm^2 .

Lima (zona Central) presenta un conglomerado a base de bolones, cantos rodados y grava, cohesionados por una matriz limo arenosa y una napa freática muy profunda (mayor que 170 metros), cuya capacidad de carga se encuentra entre 4 y 7 kg/cm^2 .

La figura 3.2, corresponde al mapa referencial de mecánica de suelos de Lima propuesto por el Ing. A. Martínez Vargas en 1979; donde se muestra los tipos de rocas y de suelos existentes en Lima Metropolitana.

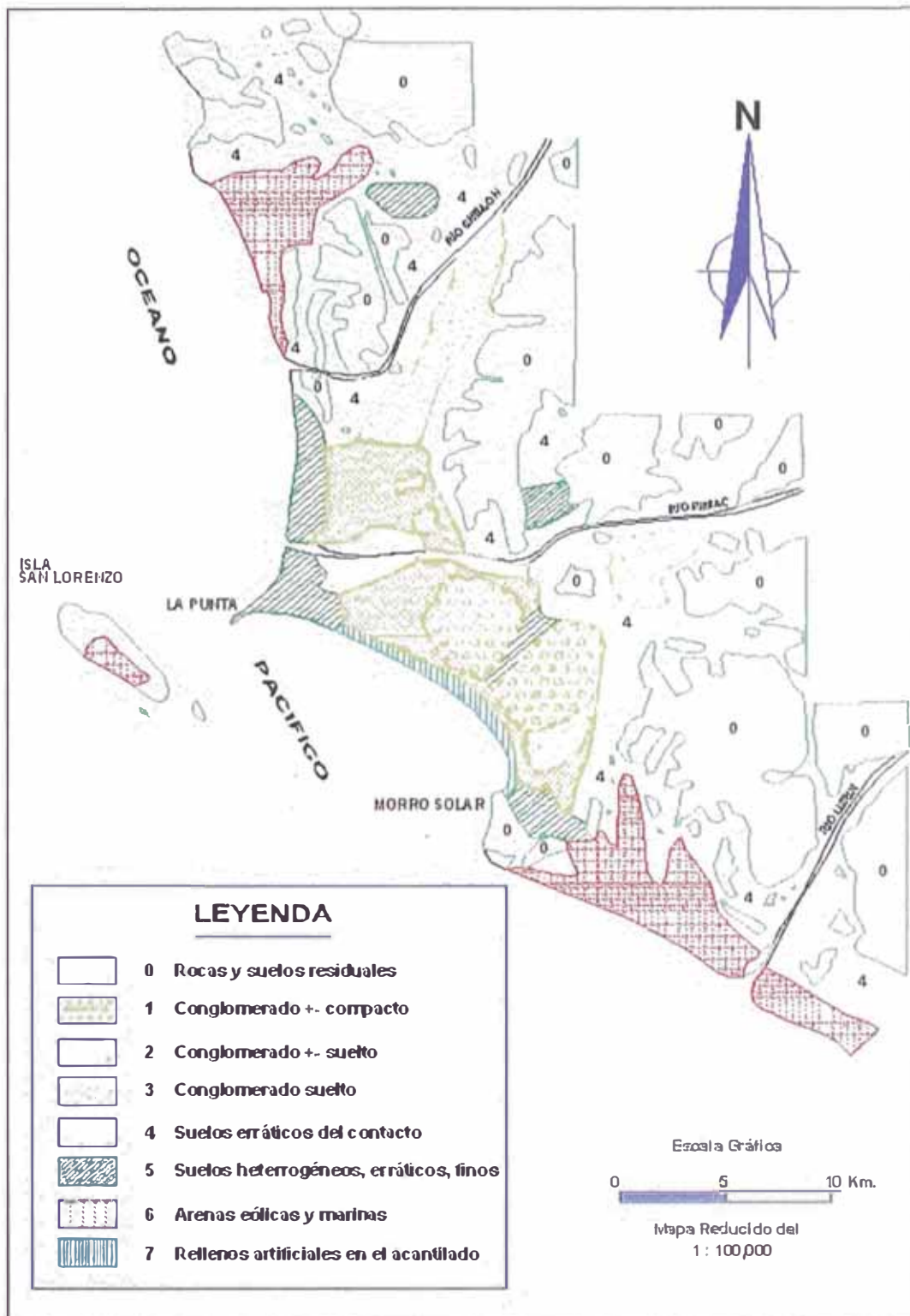


Figura 3.2: Plano Geotécnico de Lima (Martínez, 1979)

3.3 CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS.

3.3.1 SISMISIDAD DEL PERÚ

El Perú es uno de los países de mayor actividad sísmica en el mundo, siendo ésta principalmente relacionada con el proceso de subducción de la placa oceánica (Nazca) bajo la placa continental (Sudamericana). Este proceso genera una constante acumulación de energía que se libera en forma de terremotos. Un segundo tipo de sismicidad es producida por las deformaciones corticales, presentes a lo largo de la Cordillera Andina, con terremotos menores en magnitud y frecuencia. La distribución y origen de los terremotos en el Perú han sido tema de diversos estudios utilizando datos telesísmicos y regionales a fin de estudiar la geometría de la subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana o bien para delinear las zonas de mayor deformación superficial en el interior del continente (Pomachagua, 2000).

Por otro lado, el análisis de la sismicidad histórica ha permitido evaluar la periodicidad de ocurrencia de terremotos de magnitud elevada a lo largo de la costa peruana y delinear las regiones de mayor potencial sísmico.

3.3.2 PRINCIPALES RASGOS TECTÓNICOS DEL PERÚ

Las características tectónicas del Perú pueden ser descritas o evaluadas en función de su Zonificación Morfológica y Tectónica.

3.3.2.1 ZONIFICACIÓN MORFOLÓGICA

Este tipo de zonificación permite distinguir para el Perú cinco zonas morfológicas, referidas a la estructura y características del relieve terrestre (Figura 3.3). A continuación se realiza una descripción de cada una de estas zonas según Tavera y Buforn (1998):

La zona costera (Z.C). Esta zona está formada por una estrecha banda de terreno, la cual está limitada por el Oeste con el Océano Pacífico y por el

Este con una estructura maciza de roca ígnea, llamada Batolito Costero. Esta zona tiene en promedio un ancho de 150 Km. en la región Norte y de 40 Km. en la región Sur. La zona costera se extiende hasta una cota de 300 metros sobre el nivel del mar y de 100 metros bajo el nivel del mar.

La Cordillera Occidental (C.OC). Esta zona se constituye como la de mayor volumen y está formada mayormente por un Batolito granítico cuyas crestas tienen una altitud de 5000 m en la región norte y Centro del Perú. En la región Sur esta altitud disminuye. Esta zona considera el Batolito costero, parte de la zona del altiplano y su ancho aumenta conforma s extiende hacia el Sur. En la Cordillera Occidental, el volcanismo se presenta a partir de 13°S hacia el Sur por decenas de kilómetros.

El Altiplano. El Altiplano se encuentra localizado entre la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental, nítidamente diferenciada en las regiones centro y Sur del Perú. Esta unidad se localiza en las altas mesetas del Altiplano a unos 3,000 m. El Altiplano prácticamente desaparece hacia el norte por encima de 9° S. En la parte Central del Perú, esta unidad tiene un ancho de 10 a 50 Km. y en la Sur de 120 Km. al nivel del Lago Titicaca.

La Cordillera Oriental (C.OR). Esta unidad morfológica se encuentra bien definida de Norte a Sur. La Cordillera Oriental en promedio alcanza una altura de 3700-4000m. La unidad se localiza entre el Altiplano y la Zona Subandina y está compuesta por una zona de extensos plegamientos en la cual las estructuras buzan en sentido contrario de la dirección de formación de los plegamientos. En la región Sur a latitud de 12°S, la Cordillera Oriental toma una dirección E-W para luego continuar paralela a las unidades mencionadas anteriormente.

La Zona Subandina. Corresponde a las faldas o laderas de los Andes imitados por el Este con el escudo brasileño. Esta zona es de ancho variable y es aquí donde se amortiguan las estructuras andinas formando plegamientos

de grandes longitudes de onda. En esta zona se localizan los principales sistemas de fallas inversas orientadas en la dirección NW-SE.

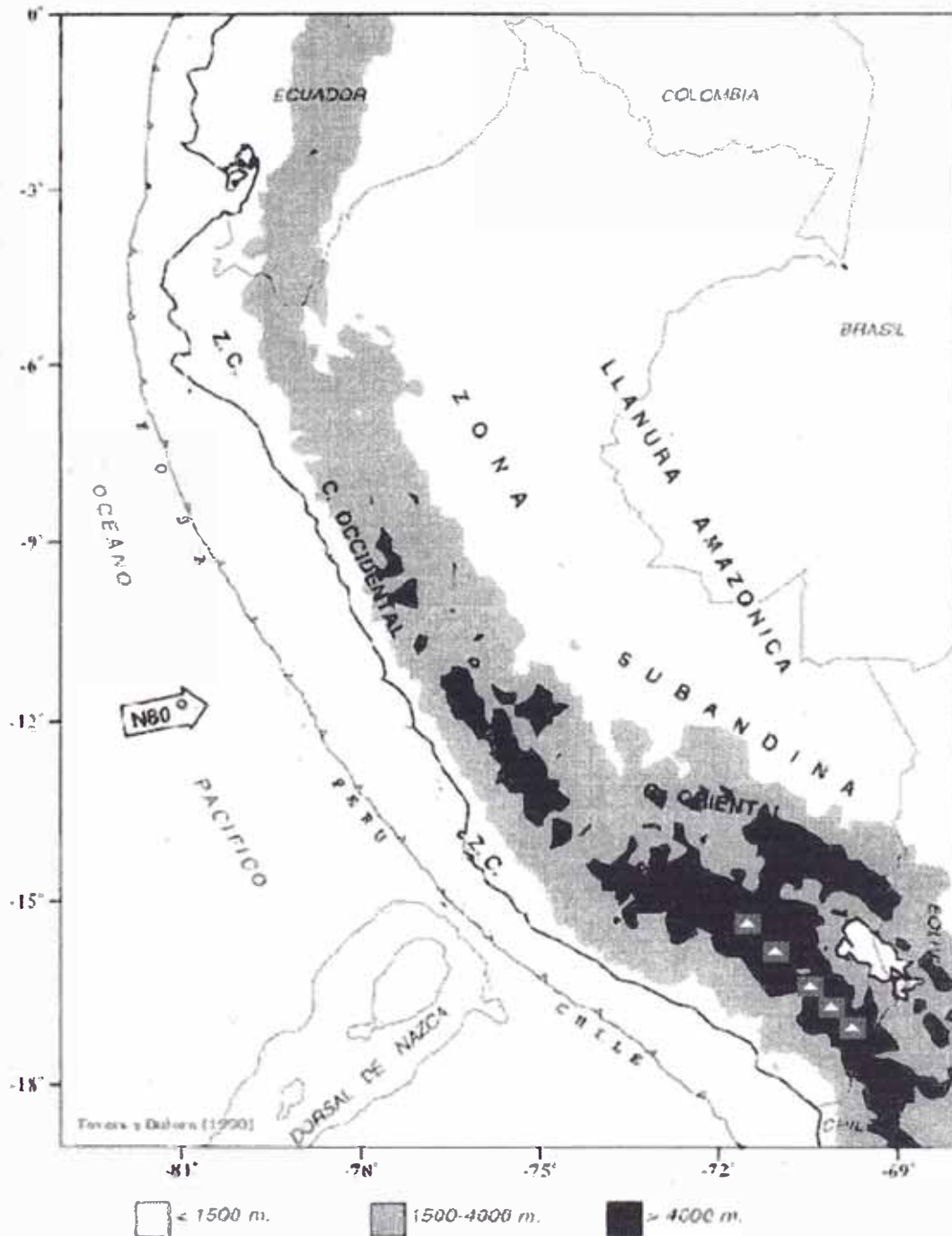


Figura 3.3: Principales Elementos Tectónicos en Perú (Tavera y Bufom, 1998).
 Z.C.= Zona Costera, C. Oc.=Cordillera Occidental, Altiplano, C. Or.=Cordillera Oriental. La Zona sombreada corresponde a la Cordillera Andina, los triángulos indican la cadena volcánica. La flecha indica la dirección de movimiento relativo de las placas.

3.3.2.2 ZONIFICACIÓN TECTÓNICA.

Este tipo de zonificación permite identificar los diferentes relieves formados en el Perú por efecto de la tectónica de placas; es decir, por la colisión de la placa oceánica de Nazca y la placa continental o Sudamericana. Este contacto de placas, conocido como subducción, es causante de todos los procesos orogénicos que se desarrollan en el continente (figura 3.3). Entre los principales elementos tectónicos se puede mencionar los siguientes:

La Fosa Marina, de Norte a Sur y paralela al litoral costero, indica el límite de contacto entre la placa Oceánica y la placa Continental. Este límite tiene la forma de una fosa de gran extensión, la misma que alcanza profundidades de hasta 8000 m. Esta fosa está formada por sedimentos que han sido depositados sobre rocas pre-existentes.

La Cordillera Andina, se ha formado como producto del proceso de compresión entre la placa Oceánica y la placa Continental en diferentes procesos orogénicos. Esta cordillera está conformada en general por rocas ígneas plutónicas que afloran a la superficie terrestre por procesos tectónicos. La Cordillera Andina se distribuye en el Perú de Norte a Sur, alcanzando un ancho de 50 Km. aproximadamente en las regiones Norte y Centro, y hasta 300 Km. en la región Sur. Así mismo, la Cordillera Andina se orienta en promedio en dirección NW-SE, aunque a latitud 13°S, ésta se orienta en dirección E-W a lo largo e la deflexión de Abancay. Estudios de sismicidad, muestran que la Cordillera Andina tiene espesores del orden de 51 Km en la región central (Tavera, 1993); mientras que en la región Sur, su espesor sería de 75 Km aproximadamente.

Los Sistemas de Fallas. Los diferentes sistemas de fallas que se distribuyen en el continente se han formado como un efecto secundario de la colisión e la placa oceánica y la placa continental. Este proceso generó la presencia de plegamientos y fracturas en la corteza terrestre. Estos sistemas de fallas se localizan en el altiplano y en la región Subandina de Norte a Sur.

Asimismo, estos sistemas se localizan a los pies de las Cordilleras o nevados (Cordillera de Huaytapallana, Cordillera Blanca, Cordillera de Vilcabamba) y entre los límites de la Cordillera occidental y la zona costera (Falla de Marcona, Huaypira, etc.).

La Cadena Volcánica. La formación de la cadena volcánica según algunos autores (Udias y Mezcuca, 1997) se debe a la colisión entre los márgenes de las placas Sudamericana y de Nazca; siendo el primero un margen continental y el segundo oceánico. En el Perú, la cadena volcánica se localiza al Sur de la Cordillera Occidental con conos volcánicos activos como los de Ampato, Coropuna, Paucarani, Misti, Ubinas, Sarasara, entre otros. Según Udias y Mezua (1997), los volcanes de la región Sur del Perú deben su origen al tipo de subducción característico de esta región; es decir, una subducción del tipo normal de mayor pendiente mediante la cual el material del manto participa en los diferentes procesos que producen el ascenso del magma. En la región Norte y Centro de Perú hay un ausentismo de volcanes debido a que el proceso de subducción en esas regiones tiende a ser casi horizontal.

Dorsal de Nazca. Esta cadena montañosa o cordillera se localiza en el Océano Pacífico entre 15°S y 19°S. La dorsal está formada por rocas volcánicas con capas de minerales en los cuales predominan el hierro, magnesio, potasio y sodios cálcicos (Marocco, 1980), siendo, estos los minerales más comunes en la corteza terrestre. La estructura de la Dorsal de Nazca es producto de un proceso de distensión de la corteza oceánica y se estima que su formación tiene una edad de 5 a 10 millones de años (Marocco, 1980). Estudios recientes sobre anomalías magnéticas permiten considerar la hipótesis de que la dorsal debe su origen a una antigua zona de creación de corteza.

3.3.3 SISMICIDAD EN LIMA METROPOLITANA

La ciudad de Lima se ubica en la Costa Occidental de Sudamérica, en una franja desértica entre el Océano Pacífico y los Andes. Lima está localizada en los conos de deyección de los ríos Rímac y Chillón, que descienden de los Andes al Océano Pacífico.

La población ha aumentado considerablemente en los últimos años, ocupando en la actualidad terrenos marginales desde el punto de vista de resistencia sísmica. La vulnerabilidad sísmica de Lima ha aumentado paulatinamente con el tiempo principalmente debido a este crecimiento desordenado.

Los terremotos ocurridos en el pasado reciente en la ciudad de Lima (1940, 1966 y 1974) han producido daños mayores en ciertas zonas de ésta, que son los distritos de la Molina, Barranco, Chorrillos y la Punta-Callao. Las características del suelo en estas áreas difieren de las existentes en el centro de Lima, que corresponde a un depósito grueso de grava aluvial con nivel freático profundo, lo cual origina diferentes intensidades sísmicas, tal como se muestra en la **figura 3.4**.

El terremoto ocurrido el 28 de Octubre de 1746 en Lima fue uno de los más serios y posiblemente el más fuerte de todo el período colonial, con más de 1.000 muertos, acompañado por el tsunami que destruyó el puerto del Callao. Un cálculo establece que unas 3,000 casas se vieron afectadas en alrededor de unas 150 manzanas; solo 25 casas quedaron en pie, cayeron monasterios, conventos, hospitales y muchas otras construcciones. Probablemente duró de 3 a 4 minutos y tuvo una intensidad de X-XI en la escala de Mercalli Modificada. Según el relato oficial perecieron en Lima 1,141 de un total de 6,000 habitantes. En el puerto del Callao quedaron arruinadas casi la totalidad de edificaciones; media hora después de haber recuperado los ánimos sus habitantes, el mar se erizó y elevándose a gran altura irrumpió sobre la población ahogando a gran parte de ella. Se relata que el mar avanzó como una lengua tierra adentro; de 4,000 habitantes de que se componía la población del Callao, sólo pudieron salvarse unos 200. El Tsunami prácticamente había lavado el Callao.

Se dice que el período de retorno del sismo destructor ocurrido en Octubre de 1746 ya se ha cumplido; de volver a ocurrir un evento similar como el ocurrido en esa época sería en la actualidad sumamente desastroso, pues en Lima existen muchas zonas tugurizadas (Centro de Lima, Rimac, Conos) en donde predominan las viviendas construidas sin ninguna dirección técnica y cuya vulnerabilidad frente a eventos sísmicos es alta.

Como puede notarse después de una breve revisión de la sismicidad de Lima Metropolitana y el Callao, la amenaza sísmica existe y las construcciones expuestas son vulnerables; por lo tanto el riesgo sísmico para esta ciudad es alto.

MAPA SISMOLOGICO DE LIMA

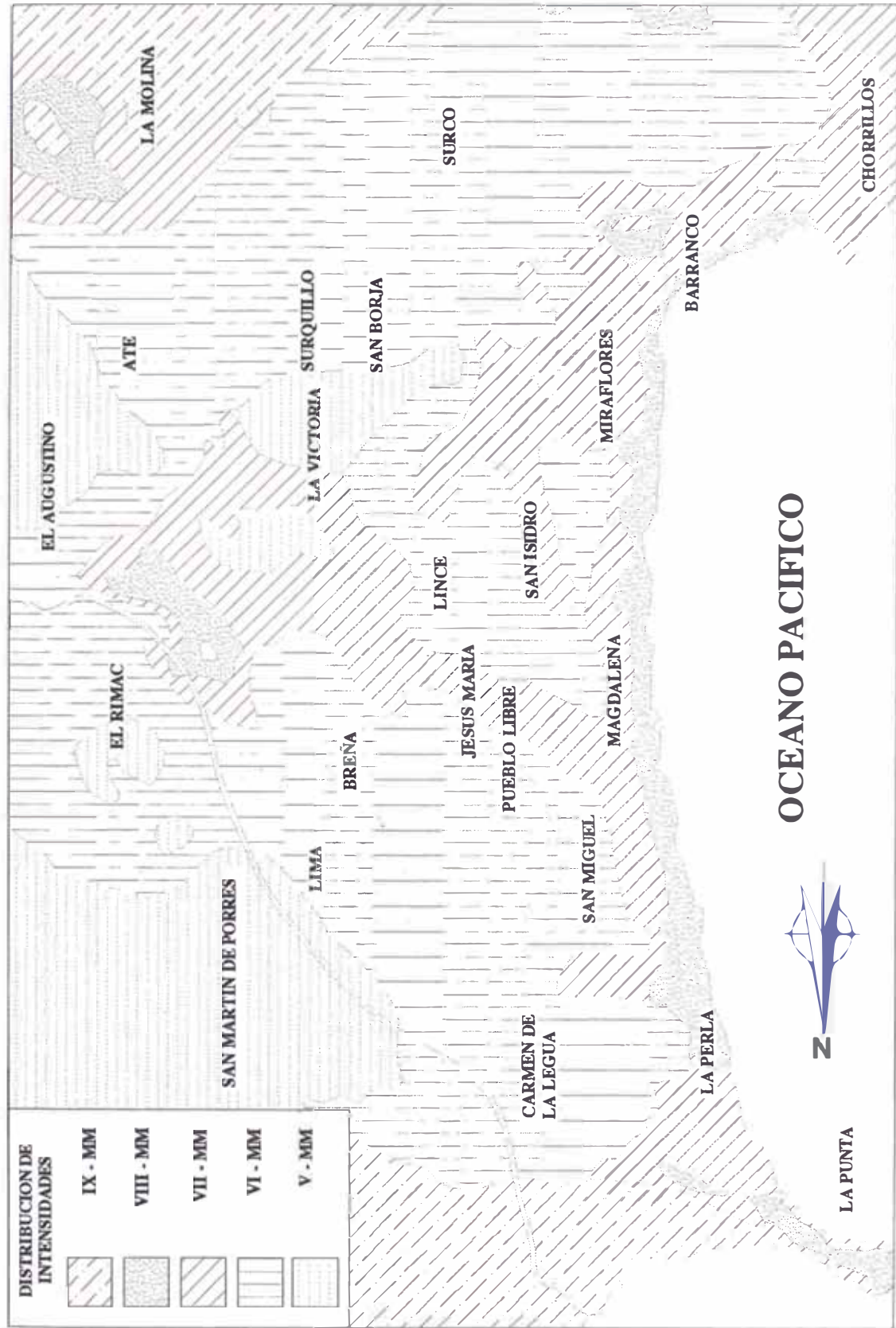


Figura 3.4: Mapa Sismológico de Lima (Martínez, 1979)

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS, GEOTÉCNICAS Y SISMICAS.

FECHA	HORA APROX.	LOCALIZACION (EPICENTRO)	MAGNITUD E INTENSIDAD	COMENTARIOS
15 - 11 - 1555	S. I.	S. I.	S. I.	Viviendas seriamente dañadas. Grietas en muros
04 - 04 - 1563	S. I.	S. I.	S. I.	Daños leves en viviendas
1581	S. I.	S. I.	S. I.	Sismo muy fuerte
17 - 03 - 1584	S. I.	S. I.	S. I.	Daños de consideración en muchas viviendas. Tsunami en la zona del Callao.
09 - 07 - 1586	19:00	S. I.	S. I.	Destrucción de muchas viviendas. Cayeron las torres de La Catedral de Lima. Murieron aproximadamente 20 personas. Grietas en el terreno. Tsunami en el Callao. Daños en muchas partes del Perú.
19 - 10 - 1609	20:00	S. I.	S. I.	Destrucción de muchas viviendas. Daño en Iglesias
27 - 11 - 1630	11:30	S. I.	S. I.	Destrucción de muchas viviendas. Desplome de torres de La Catedral de Lima Muchos muertos
13 - 11 - 1655	14:45	S. I.	S. I.	Destrucción de muchas viviendas. Grietas en el terreno. Destrucción de la Iglesia de La Compañía de Jesús en el Callao.
17 - 06 - 1678	19:45	S. I.	S. I.	Daños en viviendas.
20 - 10 - 1746	4:15 y 5:30	S. I.	S. I.	Destrucción y colapso de muchas viviendas Más de 100 muertos en Lima Más de 500 muertos en el Callao
28 - 10 - 1746	22:30	S. I.	XI MM	Terremoto en Lima. Tsunami en el Callao. 2,975 viviendas dañadas de 3,000 1,141 muertos de 6,000 habitantes Destrucción total en el Callao 3,900 muertos de 4,000 en el Callao
22 - 04 - 1804	S. I.	S. I.	Gran Intensidad	Daños de consideración en muchas viviendas.
30 - 03 - 1828	07:35	S. I.	S. I.	Daños de consideración en muchas viviendas. 30 muertos y numeros heridos. Daños en puertos del Callao, chorrillos y Huarochiri
20 - 09 - 1897	11:25	S. I.	S. I.	Destrucción en Lima y Callao
04 - 03 - 1904	05:17	S. I.	VII - VIII MM	Muros agrietados Caída de comizas Fisuras en La Catedral de Lima
11 - 03 - 1926	06:20	S. I.	V - VI MM	Daños leves.
19 - 01 - 1932	21:33	S. I.	V - VI MM	Daños en muros viejos, daño leve en viviendas
05 - 08 - 1933	21:55	S. I.	S. I.	Deterioro de viviendas antiguas.
24 - 05 - 1940	11:35	Callao	VIII MM	Colapso de viviendas del Centro de Lima Daño y colapso de edificios públicos 200 muertos y 4000 heridos Destrucción de edificaciones del sur de Lima
31 - 01 - 1951	11:39	S. I.	VI - VII MM	Daño severo en viviendas del Centro de Lima Fisuras en un edificio de concreto armado de la Plaza San Martín
15 - 02 - 1956	04:33	S. I.	V - VI MM	Daños leves
09 - 02 - 1955	11:06	S. I.		10 personas afectadas Daños leves en viviendas
17 - 10 - 1966	16:41	10.7°S 78.7°W	VI - VII MM 7.5	Uno de los más fuertes luego del de 1940 100 muertos
31 - 05 - 1970	15:23	09.2°S 78.8°W	7.5	Daños serios en el Distrito de La Molina Daños moderados en otros distritos.
03 - 10 - 1974	09:22	12°05'00''S 77°38'00''W	7.6 VII - VIII MM	colapso de estructuras de concreto armado Agrietamiento de elementos estructurales y tabiques Construcciones de Adobe colapsaron
18 - 04 - 1993	04:16	11.75°S 76.62°W	5.8 V - VI MM	daños moderados en viviendas de adobe y quincha. 8 muertos y 55 heridos.

S.I.: Sin Información

Tabla 3.1: Sismicidad Histórica en la ciudad de Lima (Ríos, 1991)

CAPITULO IV

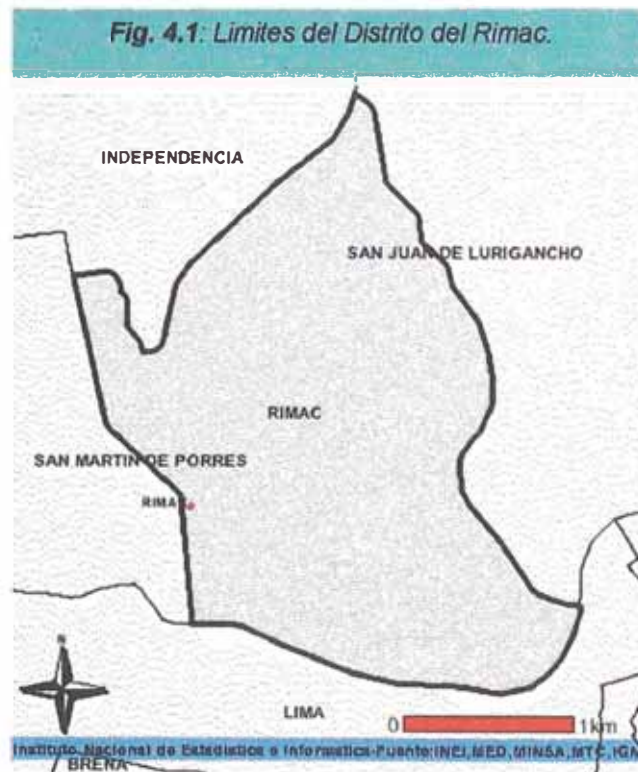
Consideraciones Generales del Distrito del Rimac.

4 CONSIDERACIONES GENERALES DEL DISTRITO DEL RIMAC

4.1 UBICACIÓN, LÍMITES Y EXTENSIÓN

El distrito del Rimac se encuentra situado al Nor Este de la ciudad de Lima; sus coordenadas geográficas son: 11° 56' de Latitud Sur y 76° 06' de Longitud Oeste. Limita por el Norte con los distritos de San Juan de Lurigancho e Independencia; por el Sur con el distrito de Lima, sirviendo como límite natural el río Rimac; por el Oeste, con los distritos de San Martín de Porres e Independencia; y por el Este con el distrito de San Juan de Lurigancho (Paredes, 1974).

Es una zona de limitada expansión urbana, por cuanto



se encuentra rodeada de prominencias rocosas que evitan el crecimiento de la ciudad. Sin embargo se han formado agrupaciones de viviendas en las faldas de los cerros, constituyendo de esta forma los llamados Asentamientos Humanos, uno de los cuales será tomado en cuenta en el presente estudio.

Se encuentra rodeado por cerros que oscilan entre los 150 m.s.n.m. por la Universidad Nacional de Ingeniería; hasta los 756 m.s.n.m, en el límite norte, con el distrito de San Juan de Lurigancho. Así se tiene, el cerro Loma de Azúcar (187.4 metros), cerro La Ladera (200 metros), cerro Polígono (257 metros), cerro Quebrado (282 metros), cerro Arrastre (451 metros), cerro San Jerónimo (753 metros), cerro Segundo (499 metros), Cuello de Amancaes (332 metros), cerro Observatorio (633 metros), cerro Las Ramas, cerro El Altillo (309 metros), Boca de León, cerro San Cristóbal (409 metros).

4.2 RESEÑA HISTÓRICA

El primer núcleo del distrito, hacia el año 1615, estaba constituido aproximadamente por el área comprendida entre los Jirones Ayabaca, Chiclayo, Trujillo, Piura, Cajamarca y el Río Rimac; también, siguiendo por el Jirón Chiclayo hasta la Alameda de los Descalzos.

Este primer núcleo abarcaba una extensión de 17 hectáreas. Luego el desarrollo urbano abarcó las áreas circundantes al primer núcleo, casi en forma semicircular, llegando por el año 1820 hasta la Alameda de los Bobos por el Nor-Este, las primeras cuadras de Francisco Pizarro por el Nor-Oeste y la Plaza de Acho por el Este.

Por el año 1935, la expansión urbana se había orientado decididamente hacia el Oeste, a lo largo de la Avenida Francisco Pizarro, que se constituyó en uno de los ejes principales del distrito; y con menor importancia alrededor del núcleo anterior.

Para el año 1950 se completó el área entre Francisco Pizarro, la Av. Caquetá y el Río Rimac, sin embargo, una franja de 200 metros frente al río no había sido ocupada. Por esta misma época surgen los primeros brotes de

desarrollo en el área natural de expansión, es decir, en los terrenos ubicados al norte del distrito, y se completa por el Este hasta la urbanización Piedra Liza.

A partir del año 1950, hasta 1980 se produce la expansión más importante, tanto en le área habilitada por nuevas urbanizaciones y el conjunto de la Unidad Vecinal, como en densidad poblacional. Aparecen también los pueblos jóvenes que se ubican en las faldas de los cerros circundantes como una muestra de presión migracional hacia la ciudad de Lima.

En la actualidad el distrito ha alcanzado su límite sin poder expandirse más en ninguna dirección, los pueblos jóvenes han pasado a ser denominados Asentamientos Humanos y es en estos en donde a pesar del sin número de dificultades y riesgos se sigue construyendo viviendas sin ningún tipo de orientación técnica.

4.3 ASPECTOS DEL SUELO DE CIMENTACION

De las características geológicas, suelos y profundidad de la napa freática se puede señalar, en el distrito del Rímac, las siguientes zonas:

Zona 1: Formada por la intrusiones de Sienita y Diorita, roca y suelo residual, presencia de las zonas bastante meteorizadas. Es posible encontrar roca sana a unos 20 ó 30 cm de profundidad. En esta zona es lógico pensar en poca amplificación de ondas sísmicas, pero como son zonas de gran pendiente están expuestas a derrumbes de piedras.

Zona 2: Anillo formado por una franja variable de unos 300 metros de ancho. Comprende de la zona de contacto geológico de las faldas de los cerros, desde el A.H. Ramón Castilla hasta el A.H. Piedra liza; y la margen derecha del río Rimac, que presenta suelos de rellenos hasta 6 metros de profundidad, poco consolidados y de napa freática poco profunda. En esta zona es de suponer que las ondas sísmicas se amplifiquen; sin embargo no se observaron grandes daños luego del sismo del 3 de Octubre de 1974, debido hipotéticamente a que las cimentaciones se encuentran sobre el aluvial, que tiene estratos de

gran potencia; poder despejar esta duda conlleva a realizar estudios de suelos exhaustivos en lugares estratégicos de esta zona.

Zona 3: Constituida por el núcleo central del distrito. Presenta suelo aluvial de espesor profundo. Zona donde la napa freática se encuentra a más de 40 metros de profundidad. Las amplificaciones de las ondas sísmicas no serían importantes.

4.3.1 GEOLOGÍA DE LA ZONA

Existen dominios bien diferenciados:

a. Las formaciones secundarias y terciarias.

Están constituidas por rocas sedimentarias que pertenecen al cretácico inferior, representadas en el tiempo por dos complejos volcánicos y sedimentarios, uno del fin del jurásico (formación Puente Piedra) y otro del fin del cretáceo inferior (formación de Piedras Gordas) y las rocas intrusivas de edad cretáceo superior y terciario inferior (dioritas granodioritas y granitos)

Las formaciones intrusivas afloran en el lado Este. Los terciarios, jurásicos y cretácicos se ordenan según su estructura anticlinal erosionada, orientada Norte-Sur y centrada sobre la ciudad de Lima. El conjunto está recortado por numerosas fallas. Las colinas están enteramente constituidas por estas formaciones.

b. El complejo aluvial

El fondo del valle está ocupado por depósitos aluviales muy gruesos. Las formaciones secundarias y terciarias son prácticamente impermeables al escurrimiento de las aguas subterráneas; los aluviones encierran las napas acuíferas que se explotan para el abastecimiento de agua. Morfológicamente es posible distinguir cuatro episodios en el depósito de estos aluviones escalonados del Cuaternario Medio hasta nuestros días. Los afloramientos (acantilados, canteras de grava) y los numerosos cortes

litológicos de sondajes disponibles, proporcionan informes parciales sobre la naturaleza de estos aluviones. Ellos están constituidos de estratificaciones complejas de bloques de guijarros, gravas, arenas y arcillas (Rivera, 1975).

4.3.2 PENDIENTE DE LA ZONA

En el área del distrito se pueden distinguir zonas de gran pendiente; pendiente moderada y zonas planas. Dentro de las primeras se pueden señalar a las laderas de los cerros que son ocupadas por varios Asentamientos Humanos; las zonas de pendiente moderada están localizadas en la parte Norte del distrito en las inmediaciones de la Urbanización El Bosque y parte de los Asentamientos Humanos Ramón Castilla y Piedra liza; las zonas de baja pendiente corresponden al resto de urbanizaciones y a la zona céntrica del distrito.

Teniendo en cuenta este factor, se señala como área más desfavorable y por lo tanto crítica a las faldas de los cerros, por el peligro en cuanto a los derrumbes y caída de piedras en la eventualidad de un sismo.

4.3.3 SUELOS OBSERVADOS

Se observa hasta la presencia de tres tipos de suelo:

a) Suelo residual

Producto de la desintegración de las rocas de los cerros que bordean la ciudad por agentes geológicos externos como el Sol, viento, temperatura, etc. Este suelo se encuentra en la falda de los cerros y se proyecta aparentemente, a corta distancia, ya que observando el perfil de los cerros se nota que tienen una pendiente bastante pronunciada en relación con la horizontal; esto permite decir que estos suelos no se alejan demasiado del afloramiento rocoso.

Se observa que el suelo transportado incursiona bastante cerca de las estribaciones rocosas, por ejemplo en la Urbanización ciudad y Campo, es posible observar, probablemente, la terraza más alejada del cauce actual del río Rimac, que se halla a poca distancia (aproximadamente a unos 200 metros de los cerros); esto también nos induce a pensar que la línea de contacto geológico entre estos suelos se encuentra a corta distancia de los cerros (una o dos cuabras).

b) Suelo Transportado

Forma parte del conglomerado fluvio-aluvional del valle del Rimac, el cual es poderoso y continuo; sin embargo, muestra una distribución muy heterogénea en los estratos de arcilla, arena, grava, etc. Las potencias de este conglomerado varían entre 200 y 400 metros.

c) Suelo de Relleno

Esto se observa en la margen derecha del río Rimac, especialmente en la zona comprendida entre el Puente Santa Rosa y el puente del Ejercito. Se ha observado en el pasado asentamientos diferenciales, en las edificaciones de esta zona.

En las perforaciones practicadas para exploración de agua subterránea, en la década de los 60 en la zona cercada al puente Balta, se observó la presencia de una capa de relleno del orden de los 6 metros, sobre las que están ubicadas las edificaciones de dicha zona.

4.4 Población

El distrito del Rimac tiene una población de 189,736 habitantes según el IX Censo de Población realizado en el año 1993, de la cual el 49.65% son hombres y el 50.35% son mujeres.

Fuente: INEI (1993)

Distrito del Rimac: Población por sexo 1993

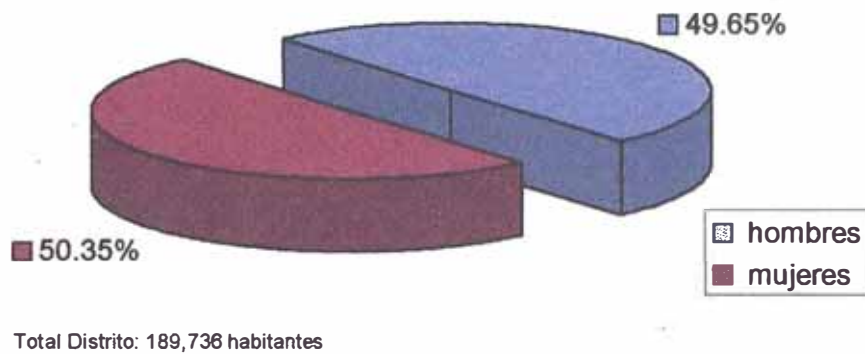


Fig. 4.2: Población por Sexo del Distrito del Rimac.

Ya que el desarrollo del estudio se centra en la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones del Asentamiento Humano “El Altillo”, se presentan a continuación algunas características de esta población.

Fuente: INEI (1993)

Asentamiento Humano “El Altillo”: Población por sexo 1993

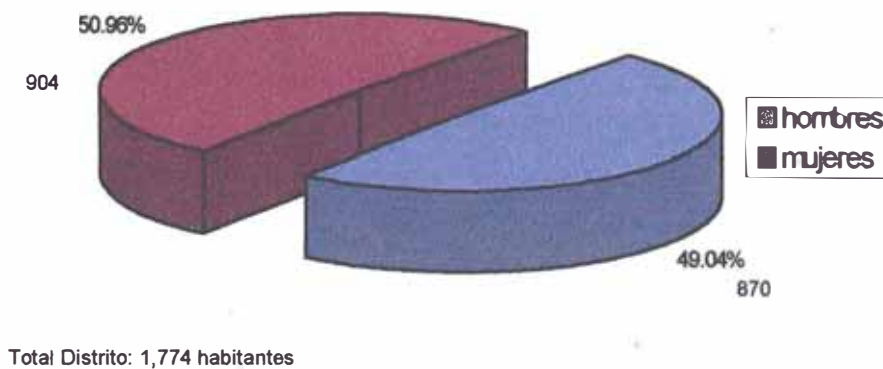


Fig. 4.3: Población por Sexo del AA.HH. “El Altillo”

Fuente: INEI (1993)

Asentamiento Humano " El Altillo " Población por Grupos de Edad

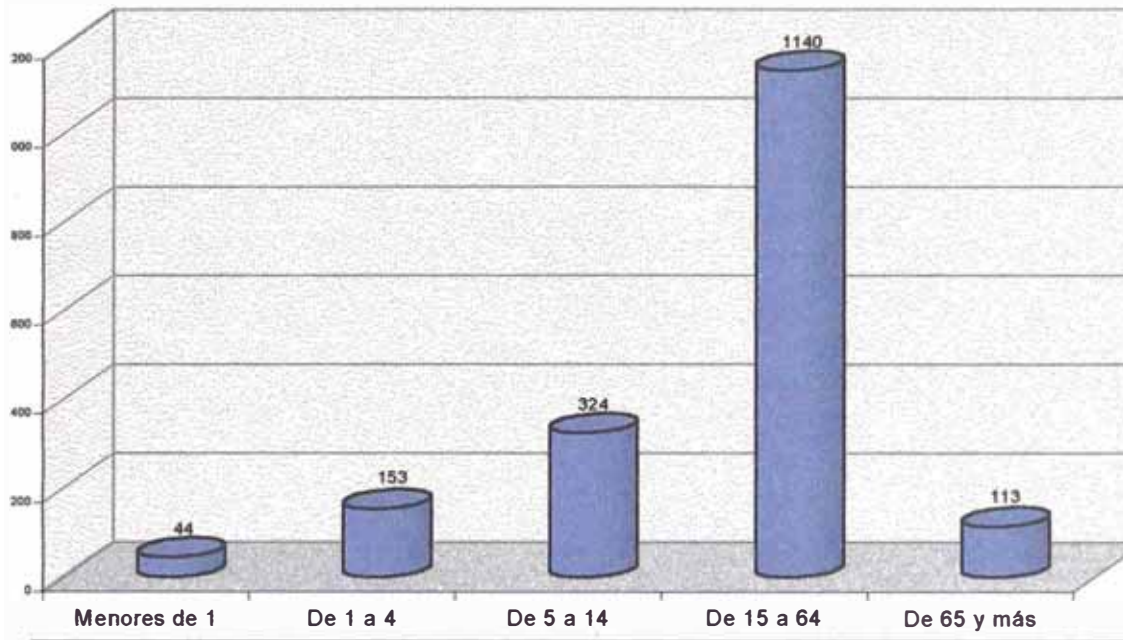


Fig. 4.4: Población por Grupos de Edad AA.HH. "El Altillo"

Fuente: INEI (1993)

Asentamiento Humano " El Altillo " Población por Nivel Educativo

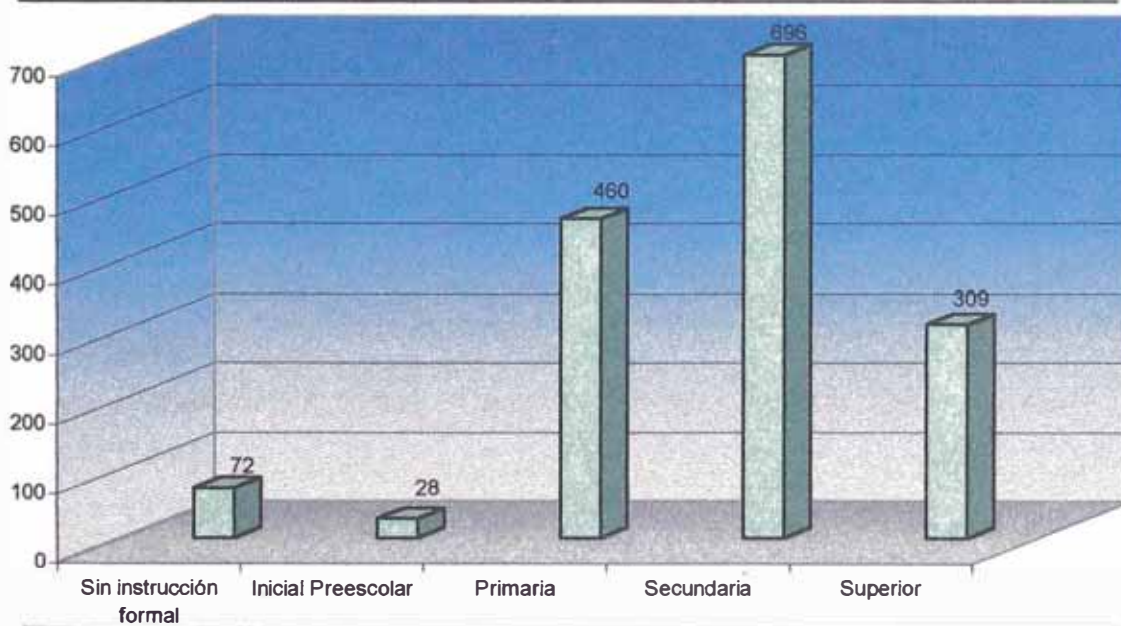


Fig. 4.5: Población por Nivel Educativo AA.HH. "El Altillo"

4.5 Inventario de Edificaciones

El desarrollo de un completo y detallado inventario de estructuras es típicamente el elemento más crucial en lo que a tiempo se refiere y un componente caro de un análisis sísmico a gran escala. La exactitud de la estimación regional de daños y pérdidas es altamente dependiente de la exactitud del inventario de las edificaciones desarrollado para el área en estudio. Aunque la recolección de los datos edificación por edificación produciría el resultado más exacto, este método no es práctico para un estudio a gran escala. Los métodos más ampliamente usados envuelven una consolidación de información contenida en diferentes bases de datos, en la cual se encuentra contenido el inventario de las diferentes construcciones. El desarrollo de un inventario estructural típicamente involucra cuatro partes principales:

- Identificación de la información requerida.
- Adquisición y revisión de las fuentes de datos disponibles.
- Desarrollo de esquemas de clasificación estructural de las edificaciones.
- Integración y compilación del inventario completo.

4.5.1 Información Requerida para el Inventario

La información a ser requerida en un inventario estructural frecuentemente depende de las clases de construcciones a considerar y el tipo de análisis a realizar. Para la mayoría de los análisis de peligro y riesgo sísmico a gran escala, la información acerca de la ubicación, uso y propiedades estructurales de cada tipo de construcción es lo que se busca.

En algunos casos aún para una pequeña región, la base de datos de información estructural puede fácilmente volverse muy extensa, resultando en una excesiva demanda de almacenamiento y consecuentemente en un análisis ineficiente. Por esta razón, la

información a tener en cuenta debe ser estrictamente la necesaria. Es así que algunos parámetros a tener en cuenta pueden ser:

Parámetros de Ubicación: Información tal como número y calle de la edificación, georeferenciación de la edificación. Estos son usados para determinar los peligros a que está expuesta dicha edificación, ya sea por el movimiento sísmico u otras menazas del lugar.

Parámetros de Uso: Características tales como un código de uso o una clasificación social, los cuales serán usados para determinar las pérdidas (costo de reparación, pérdida por el no-funcionamiento del negocio y otros efectos socioeconómicos)

Parámetros de Propiedades Estructurales: Información tal como material de construcción, tipo de sistema estructural, edad, altura, área, longitud y estado de conservación. Estos son usados para determinar la clasificación ingenieril o indicar el daño estructural esperado para una intensidad sísmica dada.

La base de datos aprovechable para compilar un inventario de estructuras puede frecuentemente estar incompleta, desactualizada, inexacta, o son solo aprovechables en formato analógico (papel). La compilación de un inventario estructural completo y exacto típicamente requiere de la integración de base de datos existentes, de varias fuentes privadas y públicas. Avances en tecnología de software, llamados Sistemas de Información Geográfica han incrementado la eficiencia y la exactitud en el desarrollo de inventarios estructurales.

Fuente de Datos para el Inventario

Existen numerosas bases de datos aprovechables para el desarrollo de un inventario, las cuales varían grandemente en integridad, exactitud, y tipo de información. El uso de estas base de datos puede resultar en una gran reducción de tiempo y costo asociado con desarrollar un completo inventario de estructuras. Las bases de datos más usadas como fuente de información son:

- Bases de datos de instituciones públicas: Como COFOPRI, INDECI, INEI, etc.
- Base de datos de instituciones privadas: Las empresas que brindan servicios básicos de agua, luz, teléfono, cuentan con una amplia información, principalmente socioeconómica.

Esquemas de Clasificación e Inferencia

Primeramente para el desarrollo de un inventario de estructuras, típicamente se requiere de dos sistemas de clasificaciones. Un sistema clasifica a cada estructura de acuerdo a su respuesta estructural debida a la excitación sísmica, para propósitos de estimación de daños a gran escala. El segundo sistema clasifica cada estructura de acuerdo a su uso, para encontrar una estimación regional de pérdidas monetarias y no monetarias. Casi todos los estudios realizados a nivel mundial referentes a la evaluación de pérdidas y daños a gran escala han desarrollado definiciones para estos dos sistemas de clasificación (Moreno, 2002).

El uso de una base de datos para el desarrollo del inventario frecuentemente requiere la aplicación de sistemas expertos ó lógica difusa, para inferir atributos perdidos y asignar las dos clasificaciones antes mencionadas. Las reglas de clasificación e inferencia son altamente dependientes del contenido y formato de la base de datos fuente y el conocimiento acerca de la historia y actual estado del desarrollo estructural en la zona o región en estudio. A continuación se describe la manera como se obtuvo la información básica para elaborar el inventario de edificaciones del A.H. “El Altillo”.

4.5.2 Inventario de las edificaciones del A.H. “El Altillo”

Las fuentes de datos utilizadas para el presente estudio, fueron las proporcionadas por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) y la Comisión de formalización de la Propiedad Informal

(COFOPRI). Sin embargo la principal fuente de información para el desarrollo del inventario de las edificaciones del A.H. "El Altillo" fue tomada durante las visitas de campo, orientadas a constatar las características de las edificaciones de la zona.

La información gráfica obtenida a través de COFOPRI, tiene registrada 262 lotes, ninguno de los cuales poseía información que describa a las edificaciones existentes dentro del lote. En consecuencia fue necesario generar una base de datos que contenga las características de las construcciones existentes. Dado el número de lotes relativamente pequeño, se procedió a las respectivas visitas de campo con el objetivo de alimentar la base datos. Al contar con la base gráfica y la base de datos se realiza el proceso de unir dichas bases dentro de un entorno SIG, quedando conectados 257 lotes, y 5 con base gráfica pero sin base de datos, debido a que no fue posible observarlos al estar ubicados en zonas peligrosas o al interior de pasajes que se encontraban cerrados.

En la figura 4-6, se puede apreciar el uso asignado a cada lote. Como era de esperar, gran parte de los lotes son utilizados como vivienda.

La figura 4-7 muestra la distribución de los diferentes tipos de edificaciones. Esta figura nos muestra que el Asentamiento Humano "El Altillo" está constituido principalmente por edificaciones de albañilería, existiendo escasas construcciones de madera y tan solo una de adobe.

La lámina D-06 (Anexo N° 1) muestra la distribución de los diferentes tipos de edificaciones en el Asentamiento Humano "El Altillo"

Dentro de las edificaciones de albañilería se puede considerar el 100% como autoconstrucción, al no haber tenido ningún tipo de orientación técnica durante su construcción.

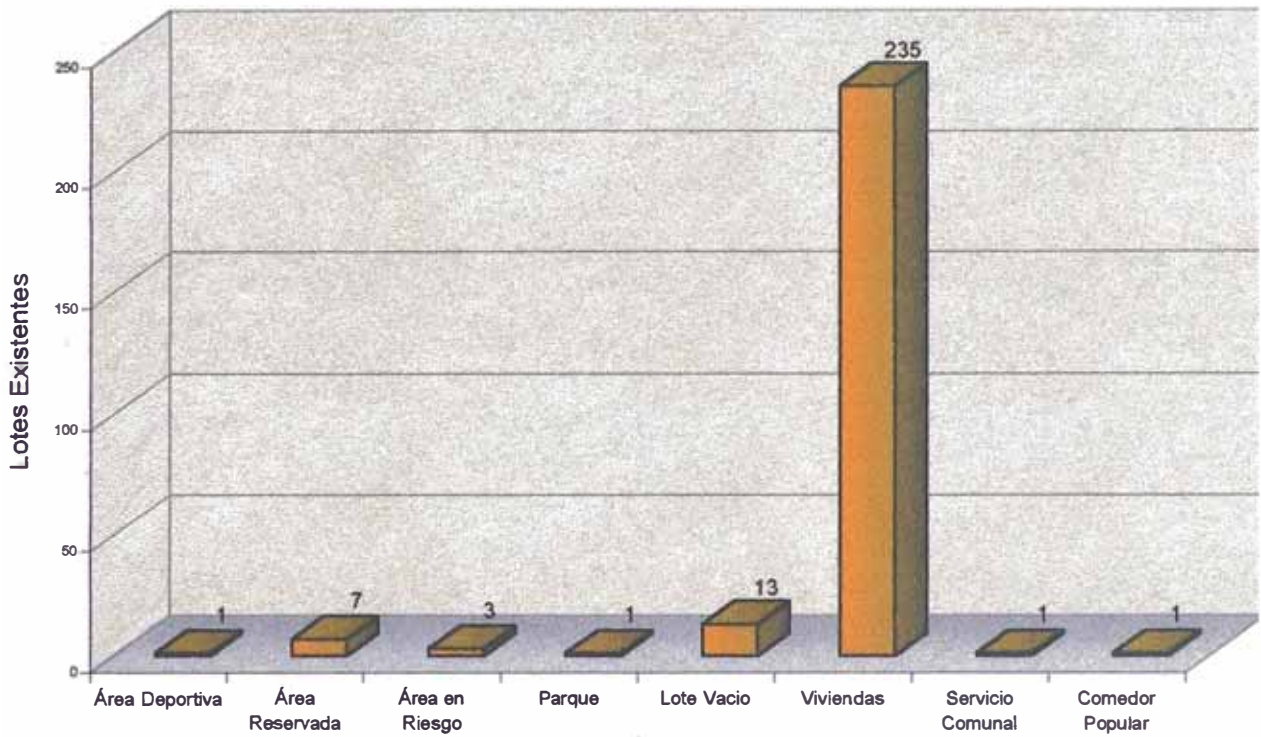


Fig. 4.6: Uso asignado para los lotes del AA.HH. "El Altillo"

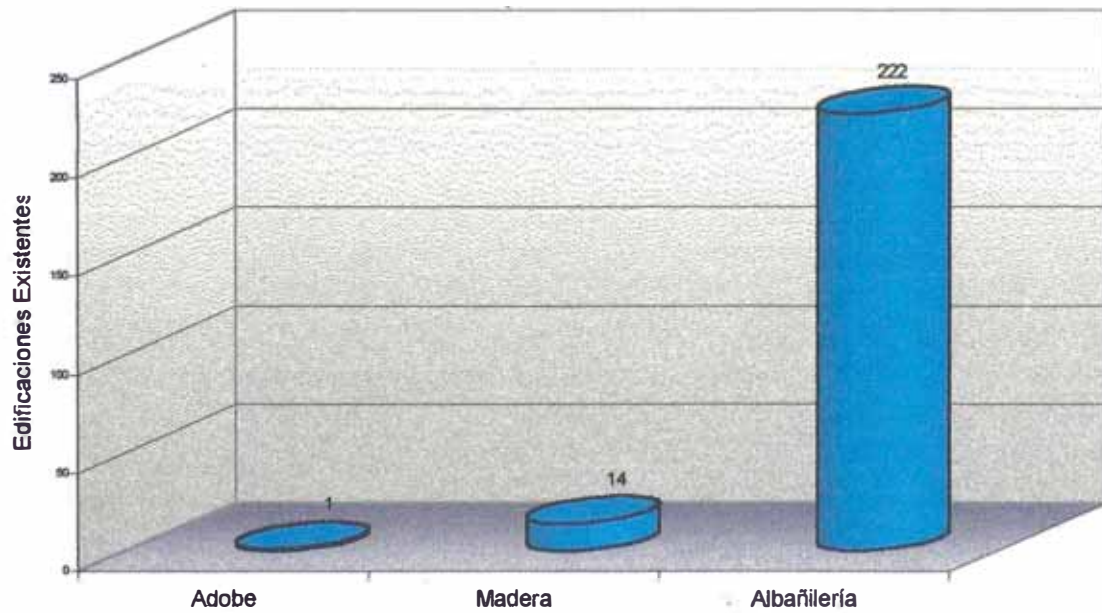


Fig. 4.7: Distribución de los tipos de edificación del AA.HH. "El Altillo"

CAPITULO V

Aplicación del Método del Índice de Vulnerabilidad al Área Urbana Escogida

5 APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD AL ÁREA URBANA ESCOGIDA

5.1 PLANTEAMIENTO Y PESO DE LOS PARÁMETROS A TENER EN CUENTA PARA UTILIZAR EL MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD.

Como se mencionó anteriormente, el Método Italiano del Índice de Vulnerabilidad plantea 11 parámetros para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones de mampostería no reforzada. Estos parámetros describen características arquitectónicas, estructurales y de construcción de una forma práctica y sencilla, tan es así que el formulario de evaluación no requiere más que de una página, facilitando el trabajo en campo y haciéndolo más versátil.

Para desarrollar el presente estudio se tomaron los 11 parámetros tal como los plantea el método italiano, ya que estos abarcan perfectamente los requerimientos de nuestras normas de diseño sismorresistente. Así lo demuestra, la investigación realizada por el Ing. Roberto Sánchez (Sánchez, 2003). Él plantea una metodología que enfatiza los aspectos estructurales desarrollados por las normas peruanas, y la aplica tomando en cuenta los sistemas constructivos predominantes en el Perú es decir al adobe, mampostería y concreto armado.

El método italiano del Índice de Vulnerabilidad jerarquiza los parámetros que tienen mayor influencia en el daño esperado en una edificación mediante los pesos mencionados. Estos pesos no sufren tampoco ninguna variación a la hora de aplicar el método, ya que a nuestro entender los mismos dan la debida importancia a cada parámetro. Tal es así que ciñéndonos a la experiencia acumulada por el Ing. Julio Kuroiwa (Kuroiwa, 2002) en las tres últimas décadas, volcada en su publicación "Reducción de Desastres, viviendo en armonía con la Naturaleza", la cual refiere que una edificación de albañilería debe tener en lo posible, una densidad de muro equilibrada en ambas direcciones distribuida en planta y elevación, en tal forma que no provoque excentricidad en planta, ni concentración de esfuerzos con cambio brusco en la altura, en la distribución de masas y rigideces, es decir debe buscarse simetría estructural en planta y elevación, lo cual se ve reflejado en el peso asignado para cada uno de los parámetros del método Italiano. De lo mencionado anteriormente puede decirse que el parámetro "Resistencia Convencional" es uno de los principales puntos (sino el principal) a tener en cuenta al hacer una evaluación de la vulnerabilidad sísmica de una edificación de albañilería. Así lo demuestra el mayor peso asignado a este parámetro. Asimismo se recalca en la citada publicación, que la existencia de columnas de confinamiento y vigas collar en los muros reduce sustancialmente la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de albañilería. El parámetro "Organización del Sistema Resistente", planteado en la metodología utilizada, toma en cuenta estas características entendiendo que requiere de cuidadosa atención, al ser un factor que interviene directamente en la vulnerabilidad de la edificación.

En resumen, la experiencia italiana, a nuestro entender, logra categorizar de una manera acertada las características necesarias a ser observadas durante las visitas de campo.

Los valores de 0 a 45 asignados a cada clase planteados en el método original se obtuvieron después de una calibración más o menos exhaustiva en Italia (10 años), a partir de respuestas de los edificios ante movimientos sísmicos (daños observados) y de una modelación sistematizada. En realidad podríamos tomar los valores que quisiéramos siempre y cuando mantengamos las relaciones cualitativas y éstas resulten de un trabajo más o menos extenso

de calibración. Se supone que este trabajo fue realizado de antemano por los italianos y lo tomamos tal cual aparece en la bibliografía, pero es importante tomar en cuenta que nosotros podemos ir calibrando la metodología durante el desarrollo del proyecto o después: esa es una de las ventajas del Método del Índice de Vulnerabilidad, que puede ser calibrado con el tiempo.

Debido justamente a estas calibraciones es que se obtienen valores diferentes para las edificaciones de concreto armado (la calibración para edificaciones de concreto armado es realizada por investigadores españoles).

5.2 ASIGNACIÓN DE CLASES A, B, C, D PARA CADA PARÁMETRO

Luego de la descripción hecha sobre el método en el Capítulo II, podríamos decir que los parámetros se desarrollan con conceptos sencillos, pero que requieren como todo algo de preparación y práctica cuando procedemos al llenado de la ficha. Es necesario en algunos casos realizar cálculos sencillos, sin embargo si existieran problemas para tomar los datos necesarios para estos cálculos podríamos estimar su valor en función a las características observadas en edificaciones similares.

El valor que puedan tomar algunos parámetros está estrechamente ligado al año de construcción de la edificación. Las normas han variado con el transcurso de los años y por lo tanto algunas importantes características estructurales también.

Para evitar ser repetitivos en algunas descripciones hechas para establecer las clases correspondientes a los parámetros señalados, se muestra en el Anexo "A", la ficha de campo utilizada en las salidas respectivas. En ella puede observarse una breve descripción de cada clase, que a nuestro entender es suficiente para poder realizar el llenado de la ficha.

En esta ficha requieren una especial atención algunos parámetros que como dijimos anteriormente son de naturaleza cuantitativa.

A continuación una breve descripción de cada parámetro tomando en cuenta la normativa peruana:

Parámetro 1. Tipo y organización del sistema resistente

- A) Edificación con muros enmarcados en sus cuatro lados por elementos de refuerzo vertical y horizontal (vigas y columnas), como lo señala la Norma de Diseño en Albañilería E-070; aceptándose la cimentación de concreto como elemento de refuerzo horizontal para el caso de muros del primer nivel.
- B) Edificación con vigas y columnas de confinamiento, pero que presenta algún tipo de deficiencias en las conexiones viga columna o no cumple con ciertos requisitos de la norma actual (E- 070).
- C) Edificación que presenta vigas y columnas que confinan solo parcialmente los muros portantes, debido a deficiencias constructivas.
- D) Edificación sin vigas y columnas de confinamiento, o autoconstrucción sin ningún tipo de orientación técnica, con paredes ortogonales deficientemente conectadas.

Parámetro 2. Calidad del sistema resistente

- A) El sistema resistente del edificio presenta las siguientes tres características:
 - 1. Mampostería en ladrillo de buena calidad con piezas homogéneas y de dimensiones constantes por toda la extensión del muro.
 - 2. Presencia de trabazón entre las unidades de mampostería.
 - 3. Mortero de buena calidad con espesor de la mayoría de las pegas entre 9 y 12 mm.
- B) El sistema resistente del edificio no presenta una de las características de la clase A.
- C) El sistema resistente del edificio no presenta dos de las características de la clase A.
- D) El sistema resistente del edificio no presenta ninguna de las características de la clase A.

Parámetro 3. Resistencia Convencional

La metodología italiana utiliza para el cálculo de este parámetro un coeficiente sísmico C , definido como la relación entre la fuerza máxima resistente horizontal y el peso del edificio. Si bien es cierto no se tendría ningún inconveniente en calcular este parámetro tal cual ha sido planteado, lo más recomendable es utilizar la normatividad peruana, haciendo una adaptación. Para ello, partiendo de la fuerza cortante en la base definida en la Norma de Diseño sismo Resistente E-030, se realiza el siguiente análisis:

$$V = \frac{ZUSC}{R} \cdot P \quad (5.1)$$

Suponiendo un esfuerzo o cortante promedio en los muros de 12 ton/m² (ladrillo de regular calidad) y un peso promedio de la planta de 0.8ton/m² (reduciendo la sobrecarga al 25%), puede deducirse la siguiente expresión:

- Peso total del edificio = $P = w A_p N$
- Peso promedio de la planta = $w \approx 0.8 \text{ ton} / \text{m}^2$
- Área de la planta típica = A_p
- Número de pisos = N
- Esfuerzo cortante promedio en muros = $\tau_x = V / A_m \approx 12 \text{ ton/m}^2$

$$\tau_x \cdot A_m = \frac{ZUSC}{R} \cdot w A_p N \quad (5.2)$$

$$\frac{\tau_x \cdot A_m}{w A_p N} \geq \frac{ZUSC}{R} \quad (5.3)$$

El lado izquierdo de la ecuación 5.3 representa las características estructurales de la edificación y el lado derecho los parámetros exigidos por la norma de diseño sismorresistente, dependiendo claro está de las condiciones en las que se encuentre la estructura. Es lógico concluir por lo tanto que las características estructurales deben ser iguales o sobrepasar los requerimientos exigidos por la norma.

Finalmente, la atribución de este parámetro dentro de una de las cuatro clases A, B, C, D se hace por medio del factor $\gamma = \alpha/\beta$, en donde α y β quedan definidos de la siguiente manera:

$$\frac{\tau_k \cdot A_m}{w A_p N} = \alpha \quad (5.4)$$

$$\frac{ZUSC}{R} = \beta \quad (5.5)$$

$$\frac{\alpha}{\beta} = \gamma \quad (5.6)$$

- A) Edificación con $\gamma \geq 1$
- B) Edificación con $0.70 \leq \gamma < 1$
- C) Edificación con $0.40 \leq \gamma < 0.70$.
- D) Edificación con $\gamma \leq 0.40$

Parámetro 5. Diafragmas Horizontales

Las clases reportadas para este parámetro se adaptan a la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente E-030, quedando definidas de la siguiente manera:

- A) Edificio con diafragmas que satisfacen las siguientes condiciones:
 1. Ausencia de discontinuidades abruptas o variaciones en rigidez.
 2. La conexión entre el diafragma y los muros es eficaz.
 3. No existen áreas abiertas mayores que 50% del área bruta del diafragma.
- B) Edificio con diafragmas como los de la clase A, pero que no cumplen con la condición 1.
- C) Edificio con diafragmas como los de la clase A, pero que no cumplen con las condición 1 y 2.
- D) Edificio cuyos diafragmas no cumplen con ninguna de las tres condiciones de la clase A.

Parámetro 6. Configuración en planta

La asignación de las calificaciones posibles fue explicada en el Capítulo II donde se hizo la presentación general del método, definiendo los parámetros $\beta_1 = a/L$ y $\beta_2 = b/L$, donde a representa la dimensión menor del edificio, L es la dimensión mayor y b la dimensión de los elementos que sobresalgan de las dimensiones principales a y L de la planta, como lo muestra la figura 5.1.

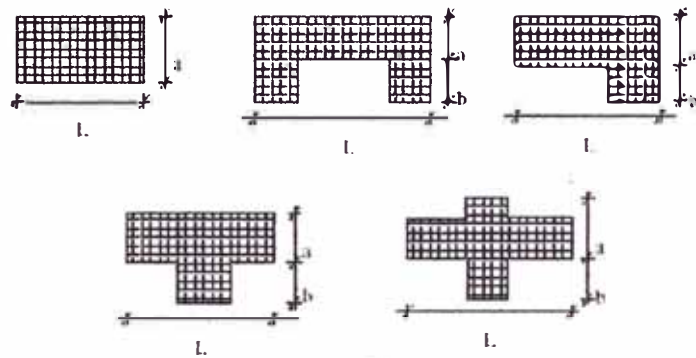


Figura 5.1: Formas originales en planta consideradas en la metodología del Índice de Vulnerabilidad.

El método evalúa la condición de simetría en planta de los edificios, proponiendo los valores más altos del parámetro cuando las dimensiones en planta se asemejan a secciones cuadradas, sin protuberancias adicionales y penalizándose las secciones excesivamente alargadas o con protuberancias demasiado grandes, las cuales pueden provocar problemas de torsión en planta y concentraciones de esfuerzos en las esquinas y en los elementos más alejados de los centros de gravedad y de rigidez.

La forma de las edificaciones en algunos casos obliga a desarrollar un método alternativo para evaluar dicha regularidad. Debido a que este parámetro depende de la geometría de la planta del edificio, el método propuesto es el siguiente:

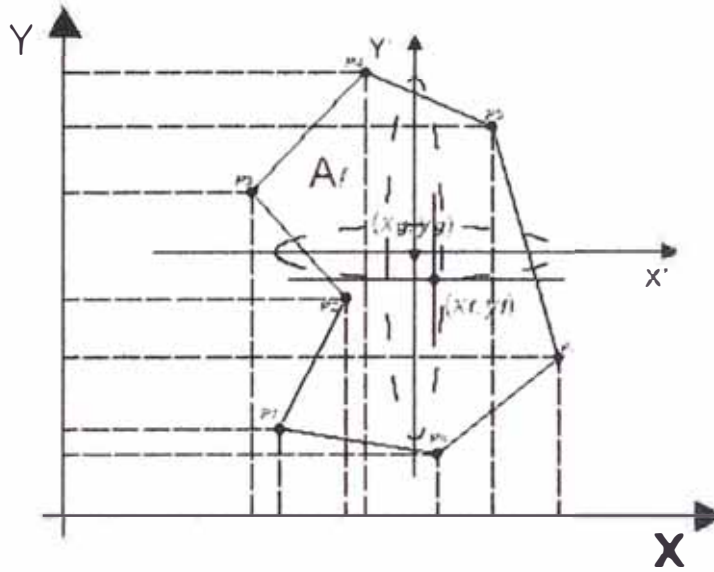


Figura 5.2a: Forma general de un planta considerada para el cálculo del parámetro 6 (Configuración en planta del edificio) (Mena, 2002)

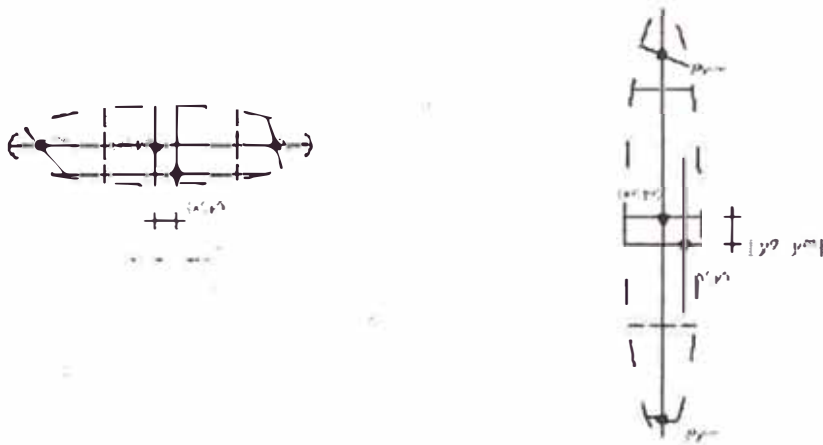


Figura 5.2b: La ampliación de las zonas próximas al centroide permiten observar los valores considerados para el cálculo del parámetro. Las elipses indican la zona ampliada.

Sean $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n$, los puntos de la forma geométrica (Figura 5.2a) correspondientes a las coordenadas $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)$, que definen la planta de cada edificio. El centroide o centro de gravedad (x_g, y_g) se obtiene de las siguientes ecuaciones:

$$x_g = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

$$y_g = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

En donde A_i , son áreas parciales auxiliares de la figura que sirven para obtener el centro de gravedad y se obtienen de multiplicar $x_i * y_i$. Se calcula además, un valor medio de los puntos más alejados de la figura en donde cruza una línea imaginaria que pasa por el centro de gravedad (Figura 5.2b), mediante las ecuaciones 5.1 y 5.2 (Figura 5.2b), en donde, x_{min} , x_{max} , y_{min} y y_{max} , corresponden a los valores de los puntos P_{xmin} , P_{xmax} , P_{ymin} y P_{ymax} , respectivamente.

$$x_m = (P_{x_{min}} + P_{x_{max}})/2$$

$$y_m = (P_{y_{min}} + P_{y_{max}})/2$$

Una vez calculados estos valores se sustituyen en las ecuaciones 5.3 y 5.4, con lo que se obtienen los valores de la regularidad en las direcciones x e y de la estructura. El valor máximo obtenido de la ecuación 5.5, permitirá obtener el parámetro 6.

$$IR_x = \frac{|x_g - x_m|}{\frac{1}{2}|x_{max} - x_{min}|}$$

$$IR_y = \frac{|y_g - y_m|}{\frac{1}{2}|y_{max} - y_{min}|}$$

$$IR = \max\langle IR_x, IR_y \rangle$$

- A) Si $IR \leq 0.10$
- B) Si $0.1 > IR \leq 0.5$
- C) Si $0.5 > IR \leq 1.0$
- D) Si $IR > 1.0$

Esta metodología es tan solo una alternativa en caso de observar una configuración en planta demasiado irregular, y contar con un plano que tenga el suficiente detalle en planta. A nuestro entender la metodología original para calcular este parámetro es la ideal; sin embargo es necesario contar con la segunda alternativa, pues es más general.

Parámetro 7. Configuración en elevación

La asignación de este parámetro, dentro de una de las cuatro clases, se realiza tomando en cuenta la Norma E-030 de Diseño Sismorresistente, con base en las siguientes condiciones:

CLASE	VARIACION % DE MASA - ΔM	IRR. GEOMETRICA VERTICAL	IRR. RIGIDEZ PISO BLANDO	DISCONTINUIDAD SISTEMAS RESISTENTES
A	ΔM ≤ 10%	uniforme	No	No
B	10% < ΔM ≤ 20%	0 < T/H ≤ 10%	No	No
C	20% < ΔM < 50%	10% < T/H ≤ 40%	No	Si
D	ΔM ≥ 50%	T/H > 40%	Si	-

Tabla 5.1: Asignación de las clases para el parámetro Configuración en Elevación.

- A) Edificio con: $\Delta M \leq 10\%$.
- B) Edificio con: $10\% < \Delta M \leq 20\%$ ó $0 < T/H \leq 10\%$.
- C) Edificio con: $20\% < \Delta M < 50\%$ ó $10\% < T/H \leq 40\%$ ó presenta discontinuidad en los sistemas resistentes.
- D) Edificio con: $\Delta M \geq 50\%$ ó $T/H > 40\%$ ó presenta Irregularidades de rigidez-Piso Blando.

Parámetro 9. Tipo de cubierta

Los elementos que caracterizan la influencia de las coberturas en el comportamiento sísmico de un edificio son principalmente dos: la tipología y el peso. Las clases definidas para este parámetro son:

- A) El edificio presenta las siguientes características:
 1. Cubierta estable, provista de una estructura que la soporta con tijerales y correas debidamente espaciadas.

2. Cubierta anclada adecuadamente a la estructura que la soporta mediante accesorios de fijación (tirafones, pernos, etc)
 3. Cubierta plana o liviana, debidamente amarrada y apoyada.
- B) Edificio que no cumple una de las características presentadas en la clase A.
- C) Edificio que no cumple dos de las características presentadas en la clase A.
- E) Edificio que no cumple ninguna de las características presentadas en la clase A.

Los parámetros 3, 4, 8, 10, y 11, quedan establecidos tal cual fueron descritos en el Capítulo II, sección 2.8.

5.3 CÁLCULO DE LOS INDICES DE VULNERABILIDAD

Para obtener los índices de vulnerabilidad de cada una de las viviendas del A. H. "El Altillo", se necesitó realizar visitas de campo periódicas a la zona en estudio. De esta forma se pudo analizar cada parámetro para luego asignar las correspondientes clases, obteniendo mediante la aplicación de la fórmula que caracteriza al método el respectivo índice de vulnerabilidad para cada edificación.

A continuación se presentan los criterios tomados en cuenta al asignar las clases para cada uno de los parámetros del método italiano.

Parámetro 1. Tipo y Organización del Sistema Resistente

Lo común para definir las clases A, B, C, D, de este parámetro es recurrir al año de construcción de la edificación, de esta forma se puede en base a las exigencias de la norma en vigencia, tener una idea de la existencia de columnas y vigas de confinamiento en los muros portantes de la edificación.

Gran parte de las edificaciones de este Asentamiento Humano, fueron construidas en la década de los setenta (1974-1980), y no se tomaron en cuenta muchos criterios técnicos durante su construcción. Como consecuencia de ello, se presentan dos clases. La clase D para aquellas edificaciones

autoconstruídas, que presentan deficiencias notables en el confinamiento de los muros, y la clase C asignada a las edificaciones en las que puede observarse deficiencias constructivas en vigas y columnas.

Tipo y Organización del Sistema Resistente

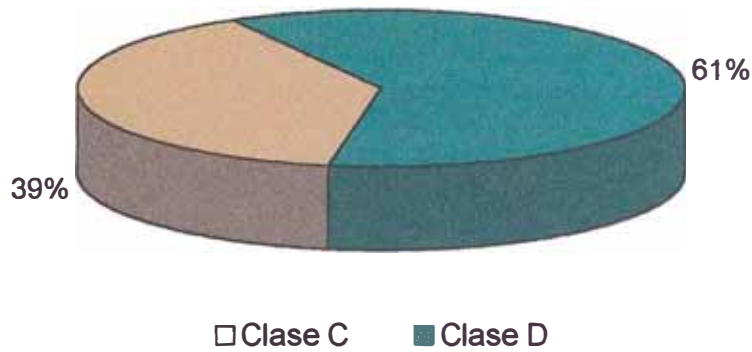


Figura 5.3: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 1

Parámetro 2. Calidad del Sistema Resistente

Debido a que gran parte de la población que vive en este sector carece de recursos económicos, opta por adquirir materiales a precios módicos y muchos de estos son de mala calidad. Esto aunado a las deficiencias constructivas observadas en campo, obligó a establecer las clases C y D en base a las condiciones definidas para este parámetro.

Calidad del Sistema Resistente

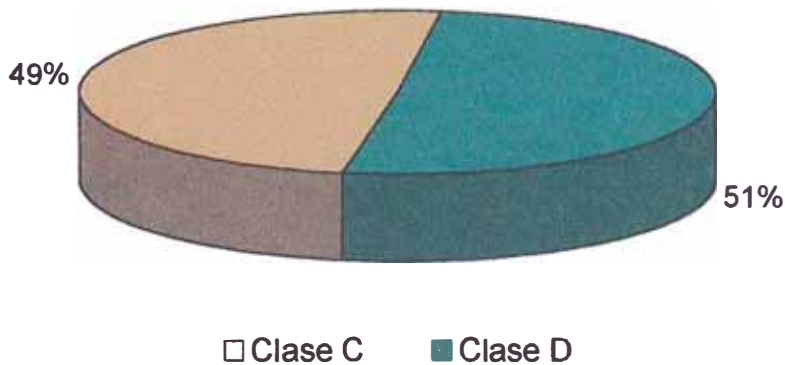


Figura 5.4: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 2

Parámetro 3. Resistencia Convencional

La existencia de lotes demasiado irregulares y como consecuencia de ello la diversidad en las dimensiones en planta de las edificaciones, hizo necesario determinar cuatro modelos estructurales que tuvieran dimensiones (largo-ancho) que se aproximen a las observadas en campo. Los modelos estructurales además guardan una relación en las densidades de muros para las direcciones “X” e “Y”, de manera tal que se asemejen a las edificaciones existentes (figura 5.5.).

Se desarrolló un total de 16 modelos estructurales, tomando en cuenta que el número máximo de pisos para las edificaciones observadas en el A.H. “El Attilio” es de cuatro.

Los modelos presentan características estructurales de las edificaciones observadas en la zona de estudio.

En base a los modelos definidos se desarrolló la tabla 5.2, en la cual quedan definidas las clases asignadas para cada modelo estructural.

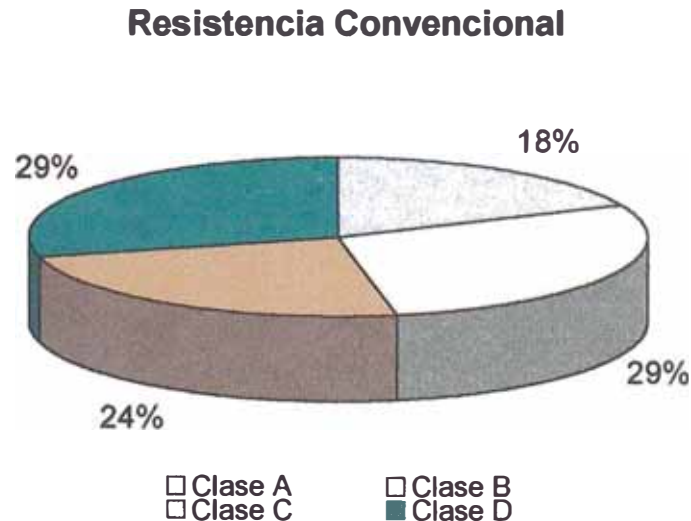
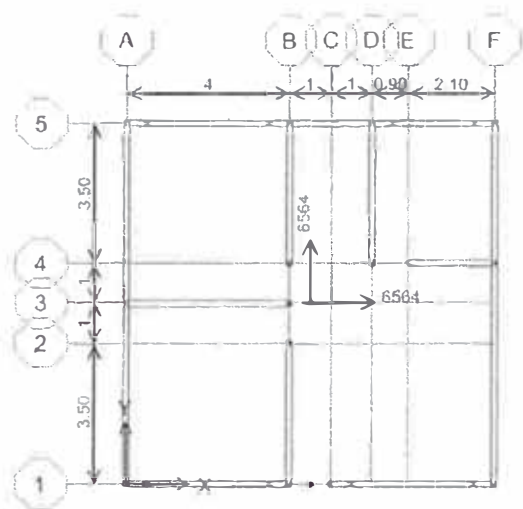


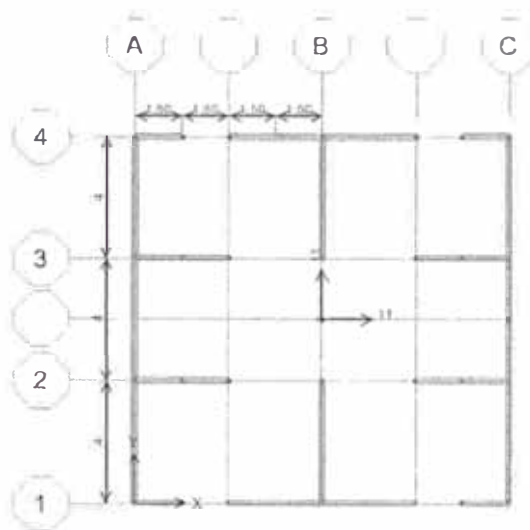
Figura 5.6: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 3

Modelo Tipo "A"



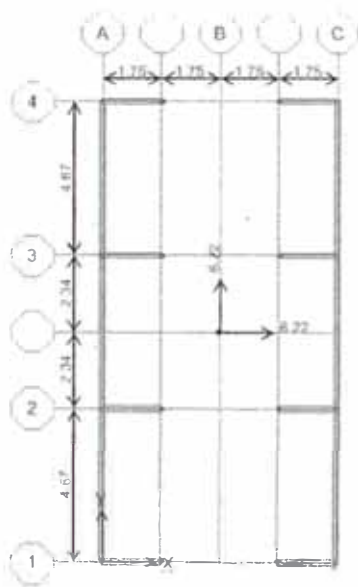
Área = 81.00 m²
 Lmx = 0.29 Lmy
 (1:1)

Modelo Tipo "B"



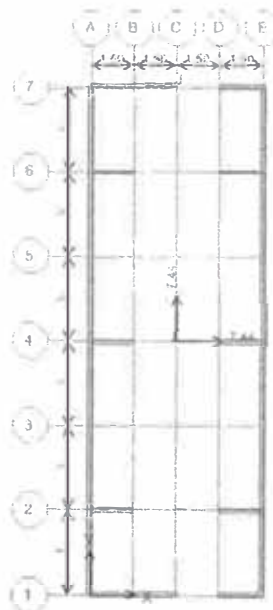
Área = 144.00 m²
 Lmx = 0.75 Lmy
 (1:1)

Modelo Tipo "C"



Área = 98.00 m²
 Lmx = 0.50 Lmy
 (1:2)

Modelo Tipo "D"



Área = 108.00 m²
 Lmx = 0.50 Lmy
 (1:3)

Figura 5.5: Planta de los modelos estructurales propuestos, indicando relación de longitudes de muro en direcciones x e y respectivamente.

CARACTERÍSTICAS Y CLASES ASIGNADAS PARA CADA UNO DE LOS MODELOS ESTRUCTURALES PROPUESTOS

MODELO	Nº de Pisos	Peso Edificación P (Ton)	Area muros X-X A_{mx} (m ²)	Area muros Y-Y A_{my} (m ²)	Area menor A_m (m ²)	Resist. Cortante τ_k (ton/m ²)	Z*U*S*C/R β	$\tau_k^*A_m/P$ α	$\alpha\beta$ γ	Clase A,B,C,D	V (ton)
A	1	54.58	1.22	4.28	1.22	12	0.33	0.27	0.81	B	18.01
	2	121.97	1.22	4.28	1.22	12	0.33	0.12	0.36	D	40.25
	3	189.35	1.22	4.28	1.22	12	0.33	0.08	0.23	D	62.49
	4	256.74	1.22	4.28	1.22	12	0.33	0.06	0.17	D	84.72
B	1	89.86	3.60	4.80	3.60	12	0.33	0.48	1.46	A	29.65
	2	197.72	3.60	4.80	3.60	12	0.33	0.22	0.66	B	65.25
	3	305.58	3.60	4.80	3.60	12	0.33	0.14	0.43	C	100.84
	4	413.44	3.60	4.80	3.60	12	0.33	0.10	0.32	D	136.44
C	1	61.01	2.10	4.20	2.10	12	0.33	0.41	1.25	A	20.13
	2	134.27	2.10	4.20	2.10	12	0.33	0.19	0.57	C	44.31
	3	207.53	2.10	4.20	2.10	12	0.33	0.12	0.37	D	68.49
	4	280.79	2.10	4.20	2.10	12	0.33	0.09	0.27	D	92.66
D	1	72.96	2.70	5.40	2.70	12	0.33	0.44	1.35	A	24.08
	2	159.41	2.70	5.40	2.70	12	0.33	0.20	0.62	B	52.61
	3	245.87	2.70	5.40	2.70	12	0.33	0.13	0.40	C	81.14
	4	332.32	2.70	5.40	2.70	12	0.33	0.10	0.30	D	109.67

Tabla 5.2. Clases asignadas para cada modelo estructural.

Parámetro 4. Posición del Edificio y la Cimentación.

La zona en estudio presenta una pendiente pronunciada, debido a que se encuentra ubicada en las faldas de cerros que constituyen los límites de crecimiento del Distrito del Rimac. Como consecuencia de ello las clases asignadas a este parámetro son C y D, en consideración a los alcances definidos para este parámetro.

Posición del Edificio y la Cimentación

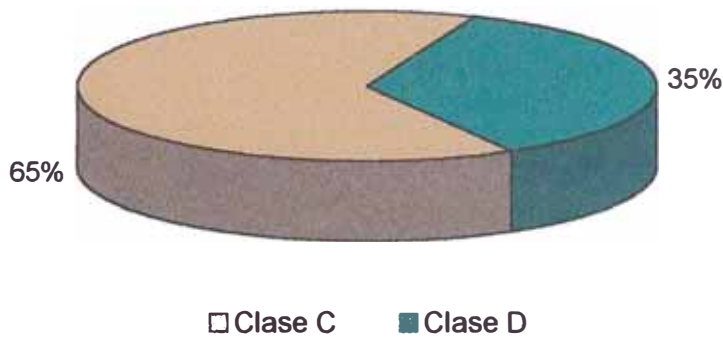


Figura 5.7: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 4

Parámetro 5. Diafragmas Horizontales.

Como ya se indicó en secciones anteriores, la falta de orientación técnica hace que se observen deficiencias ocasionadas por un mala práctica constructiva. Esto se hace notar en vista que gran parte de las edificaciones observadas son clasificadas como de clase C, como lo muestra la figura 5.8.

Diafragmas Horizontales

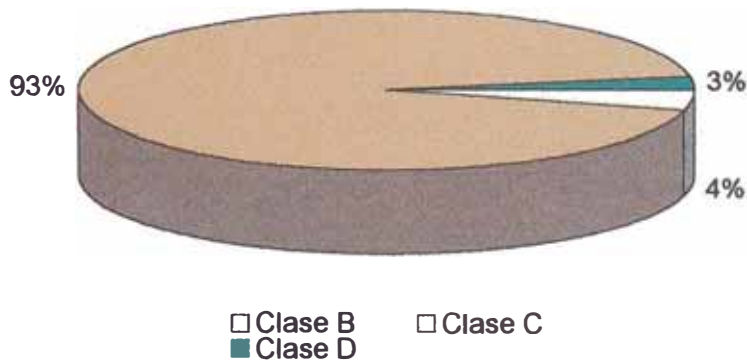


Figura 5.8: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 5

Parámetro 6. Configuración en planta

A pesar de la irregularidades en las dimensiones de los lotes, pudo observarse que buen número de edificaciones guardan una aceptable simetría en planta. Debido a ello se clasificó al 65% de edificaciones comprendidas dentro de la clase B, como lo indica la figura 5.9.

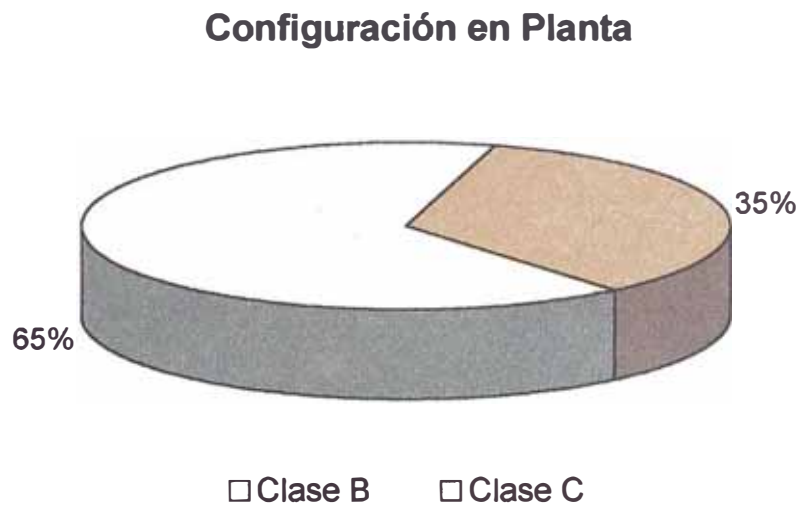


Figura 5.9: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 6

Parámetro 7. Configuración en Elevación

Se asignó la clase “A” a aquellas edificaciones de un solo piso, ya que no presentan irregularidad estructural en altura. Se asignó la clase B a las edificaciones de dos pisos, por contar estas en la mayoría de los casos con una sala comedor ubicada en el primer piso, que origina una pequeña variación en la masa de los dos pisos adyacentes. En las edificaciones de tres y cuatro pisos existe una mayor incertidumbre al no haber podido ingresar al interior de las viviendas, en tal sentido se supuso para éstas una mayor variación de masa, o la existencia de discontinuidad en los sistemas resistentes, asignándoles por ello la clase C.

Configuración en Elevación

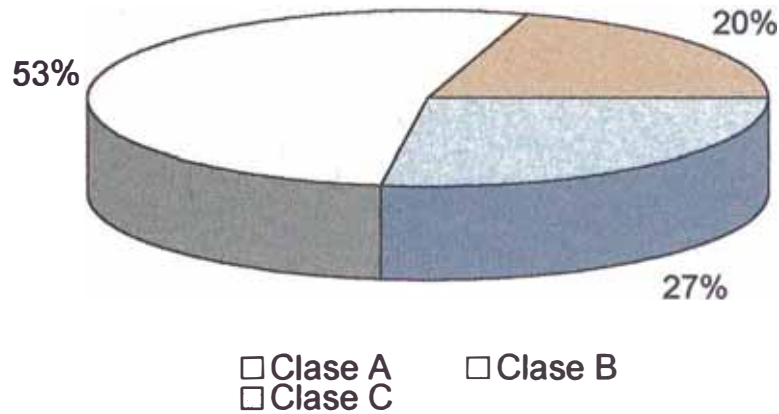


Figura 5.10: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 7

Parámetro 8. Distancia Máxima entre Muros

Partiendo de los modelos estructurales establecidos en el acápite correspondiente al parámetro tres (resistencia convencional), se establecieron las distancias para los muros transversales tal cual lo define el método índice de vulnerabilidad. Se consideró un espesor de muros de 15 centímetros, dando como resultado para la totalidad de edificaciones observadas la clasificación D.

Distancia Máxima entre Muros

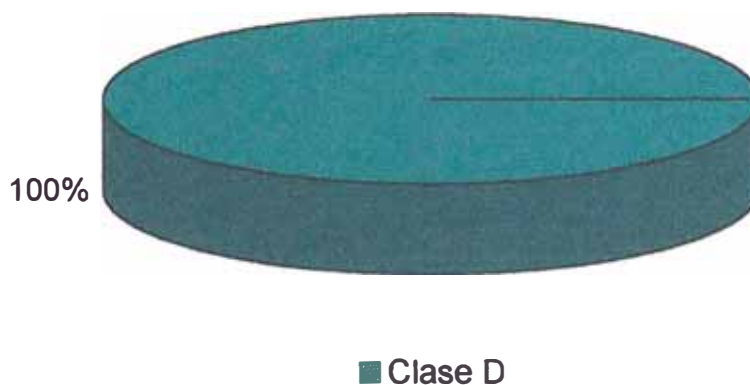


Figura 5.11: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 8

Parámetro 9. Tipo de Cubierta

Gran parte de las edificaciones existentes en la zona de estudio utilizan como cubierta la losa aligerada del último nivel. Esto permitiría definir el tipo de cubierta como plana. Sin embargo, existe otro aspecto a tomar en cuenta, que es el peso del aligerado, por lo general mucho mayor que el de una cubierta liviana. Basándose en los criterios establecidos para analizar este parámetro se optó por designar como de clase B a los aligerados observados en los últimos pisos, así mismo se asignaron las clases C y D a aquellas edificaciones con cubiertas planas de madera y esteras, con deficiencias en correas y vigas que sirven de estructura de apoyo a la cubierta. Se observó edificaciones sin cobertura, que se consideraron dentro de la clase B, debido a que no existe en este caso la posibilidad de desprendimientos en el techo que ocasionen algún tipo de peligro para las personas.

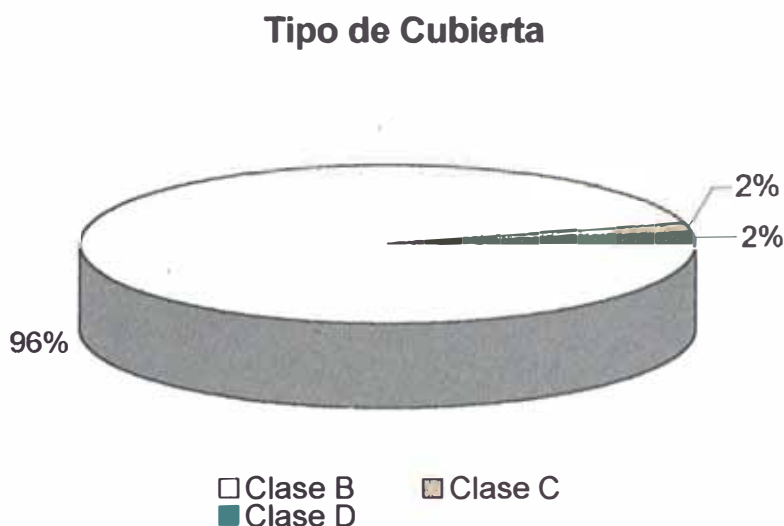


Figura 5.12: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 9

Parámetro 10. Elementos no Estructurales

Las clases asignadas a este parámetro son C y D. Gran parte de las edificaciones presentan pequeños elementos no estructurales con algunas deficiencias al ser vinculados a la estructura, estos son enmarcados dentro de la clase C, mientras que aquellos elementos no estructurales de mayor peso que constituyen mayor peligro, son situados dentro de la clase D.

Elementos no Estructurales

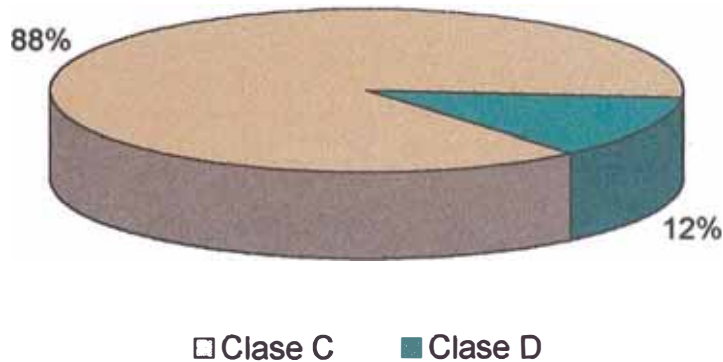


Figura 5.13: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 10

Parámetro 11. Estado de Conservación

Ciñéndonos a las características definidas para este parámetro podemos indicar que debido a los 30 años de construidas gran parte de las edificaciones y a falta de manteniendo adecuado de las mismas, se observó un estado mediocre de conservación. Esto determinó que casi todas las edificaciones estén clasificadas como de clase C, exceptuando tan solo dos (02) cuyo estado es pésimo.

Estado de Conservación

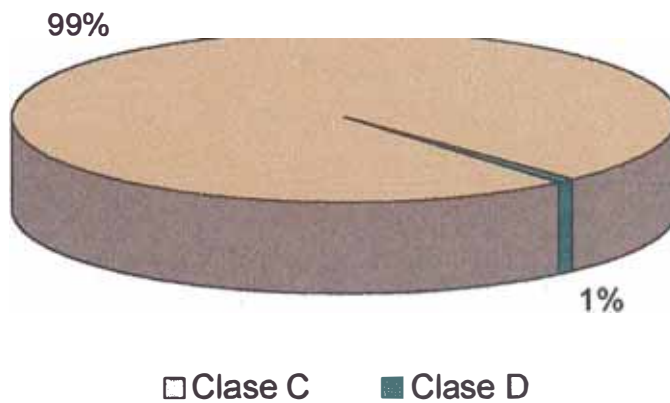


Figura 5.14: Comparación en porcentaje entre las clases observadas para el Parámetro N° 11

Una vez evaluado el índice de vulnerabilidad para cada edificio, se definieron los siguientes rangos de vulnerabilidad:

- VULNERABILIDAD < 20%: BAJA
- $15\% \leq$ VULNERABILIDAD < 40%: MEDIA
- VULNERABILIDAD \geq 40%: ALTA

En este estudio se evaluaron 217 edificaciones de albañilería confinada de las cuales el 21.20% presentan vulnerabilidad media, y 78.80% una vulnerabilidad alta. Puede notarse claramente que la totalidad de las edificaciones presentan un grado de vulnerabilidad entre media y alta, esto debido principalmente a la falta del uso de una normativa sismorresistente y al mal estado de conservación de las construcciones.

Índice de Vulnerabilidad	Albañilería	
	Nº Lotes	%
0 - 15	63	29.03%
15 - 35	123	56.68%
35 - 100	31	14.29%
Total	217	100.00%

Tabla 5.3: Resultado del Índice de Vulnerabilidad para las edificaciones

PORCENTAJES DE VULNERABILIDAD DEL AREA DE ESTUDIO

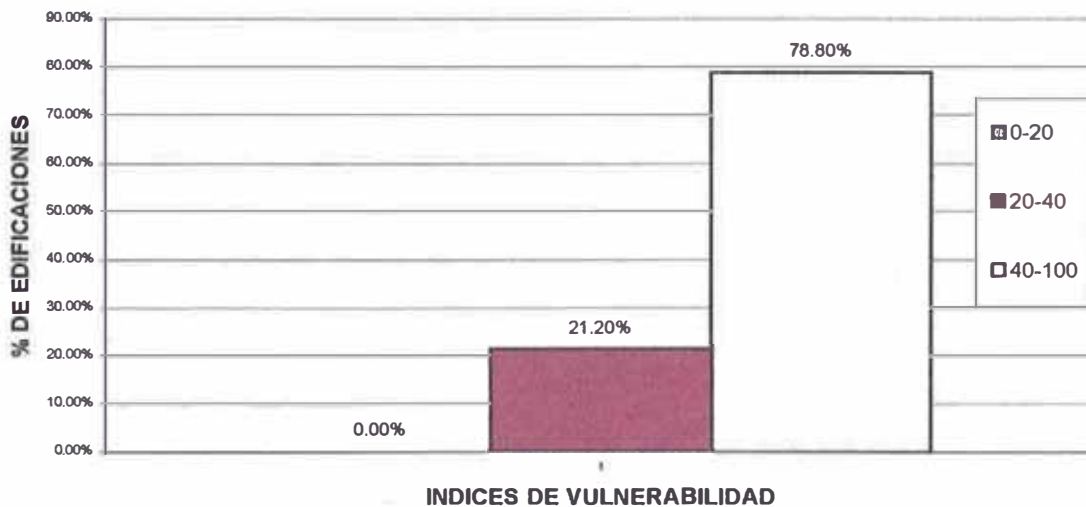


Fig. 5.15: Porcentaje de edificaciones con el Índice de Vulnerabilidad normalizado

5.4 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO SISMICO DE LAS EDIFICACIONES TIPO DE LA ZONA DE ESTUDIO

5.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

El mayor número de edificaciones existentes en la zona donde se realizó el estudio son de albañilería, como consta en las estadísticas mostradas en el Capítulo IV. A pesar que las edificaciones observadas tienen rasgos característicos marcados como el mediocre estado de conservación en el que se encuentran, presentan una heterogeneidad asombrosa cuando se trata de determinar sus dimensiones como son el largo y ancho, esto debido a que no existió lotización alguna que ordenara las edificaciones construidas. Como consecuencia de ello efectuar mediciones para conocer las dimensiones de la construcción resultaría un proceso tedioso y hartó complicado. En tal sentido se prestó mayor atención a observar la densidad de muros, sobre todo al interior de las viviendas. Esto último obviamente con las limitaciones del caso puesto que no se permitió el ingreso a ninguna de las viviendas.

De las observaciones realizadas se pudo establecer cuatro modelos estructurales que presentan variaciones en sus dimensiones, densidad de muros y número de pisos respectivamente. La planta de los modelos estructurales indicados se muestran en la figura 5.5. Se asignó un modelo a cada lote en función al número de pisos, densidad de muros y dimensiones observadas en campo, de tal manera que cada lote de la base gráfica, además de contar con una base de datos, también cuenta con un modelo estructural.

5.4.2 MODELOS ESTRUCTURALES

Es lógico suponer que los modelos estructurales planteados no cubren la totalidad del universo de edificaciones observadas, pero sí reúnen las características estructurales más importante, como son la densidad de muros, geometría en planta y la altura del edificio. Así mismo cada uno de los modelos posee una base de datos constituida por la calificación de los 11 parámetros

del Índice de Vulnerabilidad, que terminan por definir las condiciones en las que se encuentra la construcción.

El modelamiento matemático de los modelos citados, conlleva a tomar en cuenta información que requiere ser preparada, antes de iniciar la elaboración de los modelos estructurales. La definición del Espectro de Diseño, cuyos parámetros son definidos por la Norma E-030, constituye parte de esta información; el mismo que, luego de escalarlo, nos servirá para obtener las aceleraciones horizontales del suelo, que para nuestro caso serán de 100, 250 y 350 gals.

Las tablas 5.4 y 5.5 que a continuación se presentan, muestran los parámetros tomados en cuenta para el cálculo del Espectro de Diseño, y los Espectros de Respuesta considerados para el análisis de los modelos estructurales.

PARAMETROS		DESCRIPCION	
FACTOR DE ZONA	Z	0.40	LIMA
CATEGORIA DE LA EDIFICACION	U	1.00	VIVIENDA
CONDICIONES GEOTECNICAS	S1	1.00	SUELOS RIGIDOS
PERIODO FUNDAMENTAL DEL SUELO	Tp(S)	0.40	
SISTEMA ESTRUCTURAL	R	3.00	ALBAÑILERIA CONFINADA
ACELERACION DE LA GRAVEDAD	g	9.81	m/s ²

TABLA 5.4: Espectro de Diseño según la Norma E-030 (2003).

T	G <= 2.5	(ZUSC/R)*g
0.10	2.500	3.27
0.15	2.500	3.27
0.20	2.500	3.27
0.25	2.500	3.27
0.30	2.500	3.27
0.35	2.500	3.27
0.40	2.500	3.27
0.45	2.222	2.91
0.50	2.000	2.62
0.55	1.818	2.38
0.60	1.667	2.18
0.65	1.538	2.01
0.70	1.429	1.87
0.75	1.333	1.74
0.80	1.250	1.64
0.85	1.176	1.54
0.90	1.111	1.45
0.95	1.053	1.38
1.00	1.000	1.31
1.05	0.952	1.25
1.10	0.909	1.19
1.15	0.870	1.14
1.20	0.833	1.09
1.25	0.800	1.05
1.30	0.769	1.01
1.35	0.741	0.97
1.40	0.714	0.93
1.45	0.690	0.90
1.50	0.667	0.87
1.55	0.645	0.84
1.60	0.625	0.82

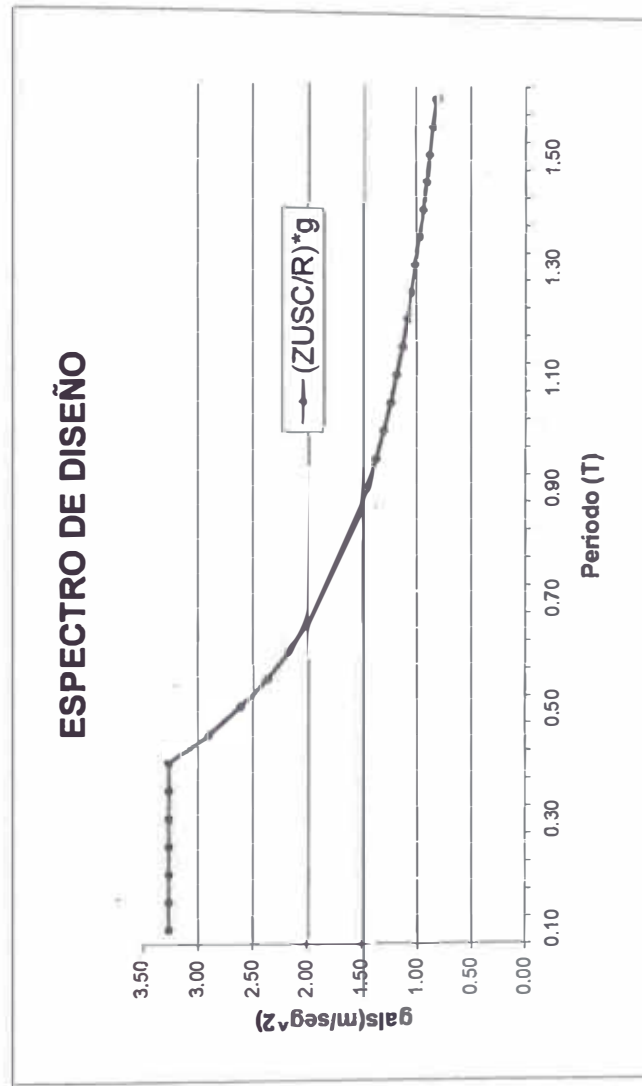


Fig. 5.16: Gráfico del Espectro de Diseño.

T (sec)	100	250	350	ESPECTRO DISEÑO
0.10	1.000	2.500	3.500	3.270
0.15	1.000	2.500	3.500	3.270
0.20	1.000	2.500	3.500	3.270
0.25	1.000	2.500	3.500	3.270
0.30	1.000	2.500	3.500	3.270
0.35	1.000	2.500	3.500	3.270
0.40	1.000	2.500	3.500	3.270
0.45	0.889	2.222	3.111	2.907
0.50	0.800	2.000	2.800	2.616
0.55	0.727	1.818	2.545	2.378
0.60	0.667	1.667	2.333	2.180
0.65	0.615	1.538	2.154	2.012
0.70	0.571	1.429	2.000	1.869
0.75	0.533	1.333	1.867	1.744
0.80	0.500	1.250	1.750	1.635
0.85	0.471	1.176	1.647	1.539
0.90	0.444	1.111	1.556	1.453
0.95	0.421	1.053	1.474	1.377
1.00	0.400	1.000	1.400	1.308
1.05	0.381	0.952	1.333	1.246
1.10	0.364	0.909	1.273	1.189
1.15	0.348	0.870	1.217	1.137
1.20	0.333	0.833	1.167	1.090
1.25	0.320	0.800	1.120	1.046
1.30	0.308	0.769	1.077	1.006
1.35	0.296	0.741	1.037	0.969
1.40	0.286	0.714	1.000	0.934
1.45	0.276	0.690	0.966	0.902
1.50	0.267	0.667	0.933	0.872
1.55	0.258	0.645	0.903	0.844
1.60	0.250	0.625	0.875	0.818

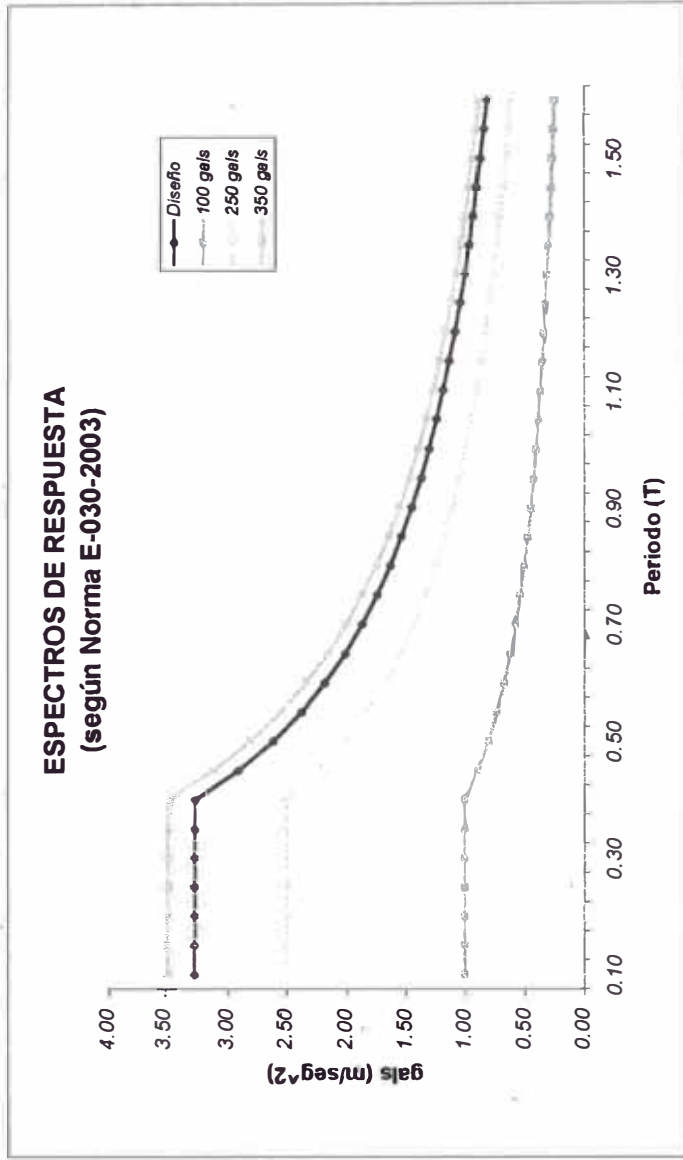


Fig. 5.17: Gráfico de los Espectros de Diseño Propuestos.

TABLA 5.5: Espectro de Diseño Escalado para las aceleraciones propuestas

5.4.2.1 METRADO DE CARGAS

Definidos los espectros que serán utilizados para excitar los modelos estructurales, se procedió a determinar las características de los materiales empleados, las cuales son:

- Concreto: $f'c = 175 \text{ Kg/cm}^2$
- Acero: $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$
- Unidad de Albañilería: $f'b = 130 \text{ Kg/cm}^2$
- Albañilería: $f'm = 40 \text{ Kg/cm}^2$
- Módulo Elasticidad Albañilería: $Ea = 500 f'm$
- Módulo Elasticidad Concreto $Ec = 2 \times 10^6 \text{ Ton/m}^2$
- Módulo de Corte Albañilería $Ga = 0.4 Ea$

Con la finalidad de obtener la masa traslacional y rotacional para cada uno de los modelos pre-establecidos, se realizó el metrado de cargas respectivo.

A continuación se presenta un cuadro resumen de las masas rotacionales y trasnacionales tomadas en cuenta para el análisis. El detalle de los cálculos efectuados pueden verse en el Anexo "A" del presente estudio.

TIPO DE EDIFICACIÓN	MASA TRASLACIONAL (Kg-s ² /m)		MASA ROTACIONAL (Kg-s ² -m)	
	Tipico	Azotea	Tipico	Azotea
AA	6,869	5,869	116,781	100,500
BB	10,995	9,160	323,338	275,632
CC	7,468	6,219	114,749	99,452
DD	8,813	7,437	144,083	131,697

Tabla 5.6: Resumen de masas traslacional y rotacional, por tipo de modelo

5.4.2.2 CÁLCULO DE PERÍODOS DE VIBRACIÓN, DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS Y DISTORSIONES DE ENTREPISO.

Una vez definidos el espectro de diseño, las características de los materiales y las masas traslacional y rotacional, se inició el

modelamiento estructural propiamente dicho, utilizando para ello el programa de análisis estructural ETABS ver. 8.0.

El Anexo "B", muestra la planta y el isométrico de los modelos desarrollados con el mencionado software, además de un conjunto de tablas obtenidas luego de correr el programa.

Seguidamente se presenta tablas, que resumen los resultados obtenidos del Análisis Dinámico Modal Espectral.

CAPÍTULO V

Tipo de Edificación	N° de pisos	Periodo fund. (s)	Distorsión 1er piso	Distorsión 2do piso	Distorsión 3er piso	Distorsión 4to piso	Distorsión Promedio	Distorsión Máxima
AA	1	0.071654	0.000133	-	-	-	0.000133	0.000133
	2	0.125644	0.000212	0.000290	-	-	0.000251	0.000290
	3	0.186382	0.000324	0.000403	0.000466	-	0.000398	0.000466
	4	0.253648	0.000441	0.000583	0.000605	0.000857	0.000572	0.000657
BB	1	0.058244	0.000074	0.000000	0.000000	0.000000	0.000074	0.000074
	2	0.126667	0.000182	0.000257	0.000000	0.000000	0.000219	0.000257
	3	0.228876	0.000324	0.000576	0.000637	0.000000	0.000512	0.000637
	4	0.365499	0.000502	0.001004	0.001253	0.001310	0.001017	0.001310
CC	1	0.081822	0.000146	-	-	-	0.000146	0.000146
	2	0.213697	0.000441	0.000801	-	-	0.000621	0.000801
	3	0.416934	0.000853	0.001838	0.002214	-	0.001635	0.002214
	4	0.691200	0.000866	0.002016	0.002664	0.002905	0.002113	0.002905
DD	1	0.078201	0.000135	-	-	-	0.000135	0.000135
	2	0.192946	0.000369	0.000644	-	-	0.000506	0.000644
	3	0.361945	0.000700	0.001442	0.001690	-	0.001277	0.001690
	4	0.584919	0.000779	0.001737	0.002232	0.002390	0.001784	0.002390

Tabla 5.7: Distorsiones Esperadas para una aceleración de 100 gals.

Tipo de Edificación	N° de pisos	Periodo fund. (s)	Distorsión 1er piso	Distorsión 2do piso	Distorsión 3er piso	Distorsión 4to piso	Distorsión Promedio	Distorsión Máxima
AA	1	0.071654	0.000335	-	-	-	0.000335	0.000335
	2	0.125644	0.000531	0.000725	-	-	0.000628	0.000725
	3	0.186382	0.000812	0.001006	0.001163	-	0.000994	0.001163
	4	0.253648	0.001100	0.001458	0.001517	0.001643	0.001429	0.001643
BB	1	0.058244	0.000187	-	-	-	0.000187	0.000187
	2	0.126667	0.000452	0.000644	-	-	0.000548	0.000644
	3	0.228876	0.000810	0.001440	0.015930	-	0.006060	0.015930
	4	0.365499	0.001256	0.002511	0.003134	0.003276	0.002544	0.003276
CC	1	0.081822	0.000367	-	-	-	0.000367	0.000367
	2	0.213697	0.001100	0.002005	-	-	0.001553	0.002005
	3	0.416934	0.002131	0.004597	0.005537	-	0.004088	0.005537
	4	0.691200	0.002165	0.005045	0.006665	0.007265	0.005285	0.007265
DD	1	0.078201	0.000335	-	-	-	0.000335	0.000335
	2	0.192946	0.000920	0.001609	-	-	0.001265	0.001609
	3	0.361945	0.001753	0.003607	0.004223	-	0.003194	0.004223
	4	0.584919	0.001946	0.004343	0.005580	0.005974	0.004461	0.005974

Tabla 5.8: Distorsiones Esperadas para una aceleración de 250 gals.

Tipo de Edificación	N° de pisos	Periodo fund. (s)	Distorsión 1er piso	Distorsión 2do piso	Distorsión 3er piso	Distorsión 4to piso	Distorsión Promedio	Distorsión Máxima
AA	1	0.071654	0.000468	-	-	-	0.000468	0.000468
	2	0.125644	0.000743	0.001013	-	-	0.000878	0.001013
	3	0.186382	0.001136	0.001406	0.001627	-	0.001390	0.001627
	4	0.253648	0.001541	0.002041	0.002122	0.002297	0.002000	0.002297
BB	1	0.058244	0.000261	-	-	-	0.000261	0.000261
	2	0.126667	0.000635	0.000900	-	-	0.000767	0.000900
	3	0.228876	0.001134	0.002016	0.002230	-	0.001793	0.002230
	4	0.365499	0.001757	0.003517	0.004388	0.004586	0.003562	0.004586
CC	1	0.081822	0.000513	-	-	-	0.000513	0.000513
	2	0.213697	0.001541	0.002806	-	-	0.002174	0.002806
	3	0.416934	0.002981	0.006437	0.007751	-	0.005723	0.007751
	4	0.691200	0.003031	0.007063	0.009326	0.010170	0.007397	0.010170
DD	1	0.078201	0.000470	-	-	-	0.000470	0.000470
	2	0.192946	0.001289	0.002250	-	-	0.001770	0.002250
	3	0.361945	0.002453	0.005049	0.005913	-	0.004472	0.005913
	4	0.584919	0.002723	0.006077	0.007812	0.008361	0.006243	0.008361

Tabla 5.8: Distorsiones Esperadas para una aceleración de 250 gals.

5.5 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD ESTIMADAS PARA LA ZONA EN ESTUDIO.

Calculados los índices de vulnerabilidad, fue necesario establecer un índice de daño global de las edificaciones observadas, a fin de establecer correlaciones para diferentes intensidades, y obtener de esta manera las respectivas funciones de vulnerabilidad. La forma adecuada de establecer un índice de daño global es mediante el levantamiento de daños en estudios post-terremoto.

Es de entender que la no-ocurrencia de eventos sísmicos de intensidades significativas en los últimos años en la ciudad de Lima imposibilita contar con una base de datos post-sismo que pudiera ser utilizada para el presente estudio. En tal sentido, utilizando los resultados obtenidos para los modelos estructurales antes descritos, se estableció un porcentaje de daño estructural, aplicando para ello la ecuación 5.5.1, que permite, calculadas las distorsiones máximas de entrepiso estimar un valor esperado del daño estructural (CISMID, 2003).

$$E(\psi) = 1 - e^{\left[\ln(0.5) \cdot \left(\frac{\psi}{\gamma_0} \right)^\varepsilon \right]} \quad (5.5.1)$$

Donde E es el valor esperado de daño estructural para una distorsión “ ψ ” y los valores γ_0 y ε son función del tipo de estructura, estado de conservación y material utilizado.

Los valores y condiciones necesarias para la aplicación de la ecuación 5.5.1, se basaron en el Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico en Lima y Callao (CISMID, 2003), realizado por el Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres – CISMID, de la Universidad Nacional de Ingeniería.

El método utilizado por el CISMID calcula las máximas distorsiones de entrepiso, para luego obtener un porcentaje de daño global de la estructura. Se debe tener en cuenta que una vez determinada la máxima distorsión de entrepiso de la estructura, deberá ser corregida por irregularidades que se presenten en el sistema estructural. Estas irregularidades (tabla 5.10) vienen a ser aquellas observadas en las visitas de campo y que son reportadas en las fichas con las cuales se evaluó la vulnerabilidad estructural de las edificaciones estudiadas. Es decir, las características estructurales establecidas por la metodología italiana plasmadas en la respectiva ficha de campo, son relacionadas con aquellas características similares o equivalentes planteadas por el método utilizado por el CISMID. De esta forma se logra constituir un nexo entre ambas metodologías.

IRREGULARIDADES ESTRUCTURALES
1. Deterioro
2. Piso Blando
3. Irregularidad en Planta
4. Irregularidad Vertical
5. Torsión
6. Separación Insuficiente
7. Columna Corta
8. Extras Pesados
9. Post Código a la Fecha

Tabla 5.10: Irregularidades tomadas en cuenta por el método utilizado por el CISMID.

Cabe señalar que la fórmula 5.5.1 es usada en el desarrollo de una metodología diferente a la del Índice de Vulnerabilidad; sin embargo, al contar con las distorsiones máximas de entrepiso proporcionadas por los modelos estructurales y las características de cada una de las edificaciones estudiadas, podemos calcular el índice de daño global esperado para la estructura, y de esta forma realizar un análisis estadístico, mediante el cual se plantea una función de vulnerabilidad para cada una de las aceleraciones de suelo propuestas.

5.5.1 RELACIONES PROPUESTAS ENTRE EL MÉTODO DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD Y EL MÉTODO UTILIZADO POR EL CISMID.

De lo descrito anteriormente en este capítulo, queda claro que el Índice de Vulnerabilidad es calculado a partir de los datos recopilados en las fichas de campo y la aplicación del Método del Índice de Vulnerabilidad, con las variaciones propuestas en este estudio para cada parámetro.

Una vez obtenido el Índice de Vulnerabilidad y utilizando las distorsiones obtenidas para cada uno de los modelos estructurales, se consiguió calcular el porcentaje de daño global a partir de la fórmula 5.5.1, efectuando las correcciones requeridas por las irregularidades presentadas por el sistema estructural, tal cual lo establece el método utilizado por el CISMID.

En resumen, se cuenta con el Índice de Vulnerabilidad (IV) para cada edificación y un Índice de Daño (ID) para cada modelo; pretender estimar curvas de vulnerabilidad contando con estos datos requiere analizar las variables utilizadas como nexo entre el Índice de Vulnerabilidad y aquellas usadas en el cálculo del Índice de Daño.

En principio no es posible plotear los datos tal cual están (IV vs ID), el resultado sería una dispersión concentrada, que no consigue tener una línea de tendencia definida. Es necesario, entonces, reconocer aquellas variables comunes que intervienen en el cálculo de ambos índices.

El Índice de Vulnerabilidad utiliza once (11) parámetros, la búsqueda consiste en identificar cuales de estos parámetros están presentes o son tomados en cuenta para calcular el Índice de Daño.

A continuación se muestra la tabla 5.11, que resume las variables de cada una de las metodologías utilizadas, que guardan semejanza o pueden relacionarse de alguna manera.

En la tabla 5.11, puede notarse que existen parámetros cuya relación es obvia como es el caso de la Configuración en planta, Configuración en elevación y Estado de Conservación, que guardan relación con la Irregularidad en Planta, la Irregularidad en Elevación y el Deterioro, del método utilizado en el Estudio APESEG-CISMID. Sin embargo, existen otras irregularidades que

carecen de todo tipo de relación, como es el caso de la Columna Corta, tomada en cuenta sólo en edificaciones aporricadas, y como es lógico pensar, no tiene ningún parámetro, con el cual pueda relacionarse, debido a que el Método del Índice de Vulnerabilidad es aplicado en este estudio solo para edificaciones de mampostería.

CONDICIONES	Parámetros utilizados en el Método del Índice de Vulnerabilidad	Irregularidades tomadas en cuenta en el Estudio APESEG-CISMID
	Resistencia Convencional Organización del Sistema Resistente Configuración en Planta Configuración en Elevación Estado de Conservación	Post Código a la Fecha Irregularidad en Planta Irregularidad Vertical Deterioro Separación Insuficiente

Tabla 5.11: Comparaciones entre el Método Italiano y el usado por el CISMID.

Comentario aparte se merece el parámetro Resistencia Convencional, que aparentemente tampoco tiene semejanza con las irregularidades indicadas; sin embargo, este parámetro se constituye en el más importante, para establecer la relación entre el Índice de Vulnerabilidad y el Índice de Daño que se está buscando. Esto debido a que este parámetro se calcula a partir de la Fuerza Cortante en la Base, que tiene relación directa con el peso de la edificación. La relación planteada es la siguiente:

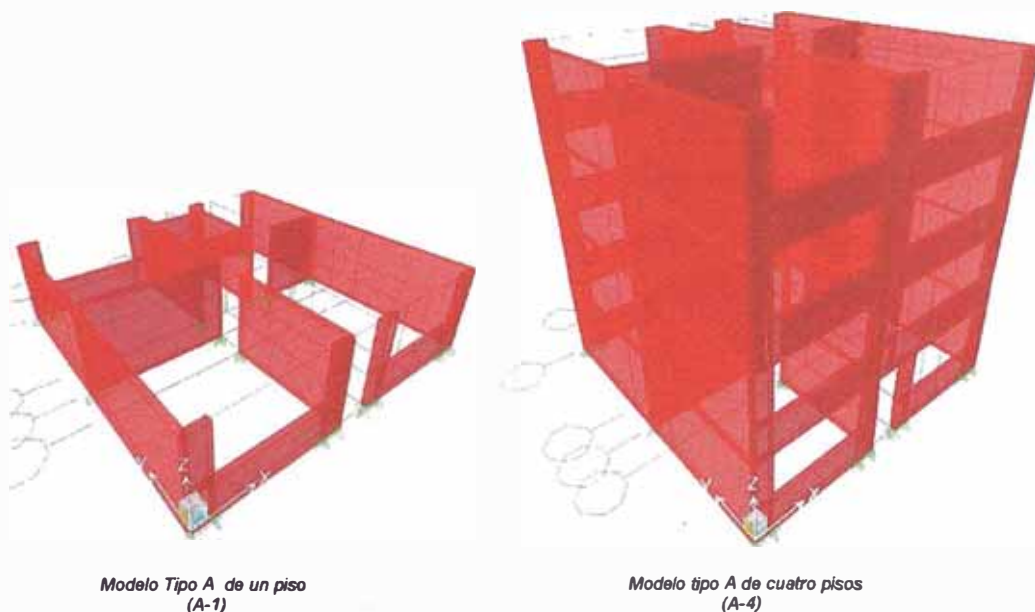


Fig. 5.18: Modelo Estructural tipo A de uno y cuatro pisos

	MODELO TIPO A	
	(A-1)	(A-4)
Nº de pisos	1	4
Resistencia Convencional-Clase	A	D
Distorsión Promedio (350g)	0.000468	0.001429313
% de Daño Global (350g)	3.02%	22.65%

Tabla 5.12: Relaciones observadas entre la Resistencia Convencional y la distorsión de entrepiso.

- El parámetro Resistencia Convencional, alcanza sus valores más críticos cuanto mayor sea el peso de la edificación, es decir cuanto más pisos construidos tenga.
- El porcentaje de Daño Global toma los valores más altos cuanto mayor sea la distorsión de entrepiso y esto sucede cuando la edificación presenta un mayor número de pisos.

Finalmente, la irregularidad denominada Separación Insuficiente fue tomada en cuenta, también, en el formulario utilizado para efectuar el levantamiento de la vulnerabilidad de las edificaciones de la zona estudiada (Anexo A) En consecuencia no hubo inconvenientes en incluir esta característica en el cálculo del índice de daño.

Cabe mencionar que el Método del Índice de Vulnerabilidad, no solo da cuenta de la irregularidad estructural, si no que también la cuantifica proporcionalmente en función de sus clases. Se debe prestar, atención a este hecho, ya que la Metodología del Estudio APESEG-CISMID, castiga directamente cada una de las irregularidades observadas. Esto hace necesario plantear proporciones, que mantengan las relaciones establecidas para cada clase del Método Italiano.

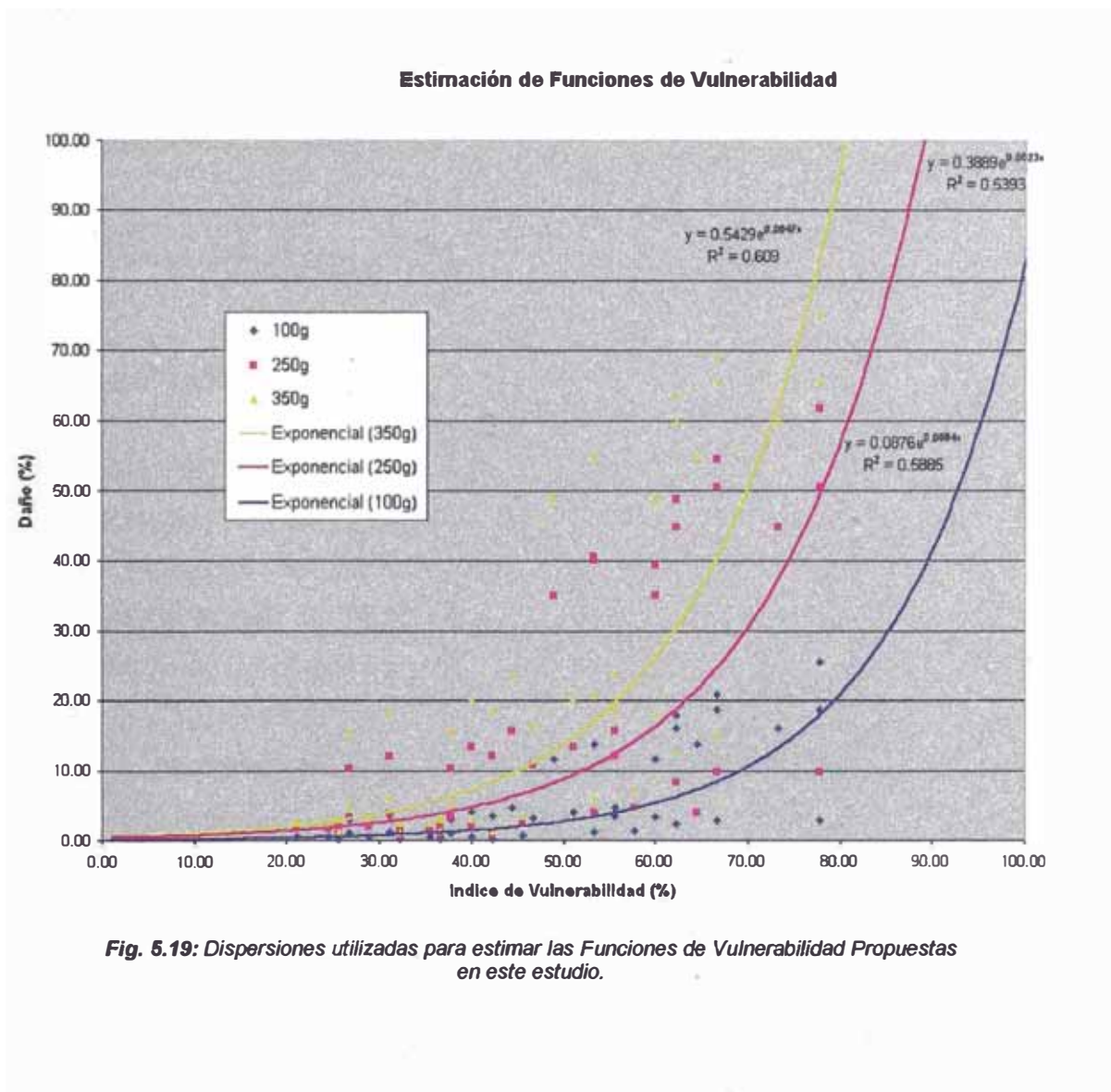
5.5.2 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD PROPUESTAS

Una vez relacionados el Índice de Vulnerabilidad con el Índice de Daño Global, para cada edificación se procedió a elaborar las dispersiones correspondientes a cada una de las aceleraciones de suelo establecidas. Las mencionadas dispersiones se observan en la figura 5.19, donde también puede

apreciarse la regresión exponencial para cada dispersión observada. Esta regresión representa la mejor línea de tendencia para los valores ploteados.

Es de notar que el coeficiente de correlación observado alcanza en el mejor de los casos el 60%, esto como consecuencia de lo fluctuante de algunas relaciones que indican una alta vulnerabilidad pero un daño pequeño debido a características de la edificación.

Finalmente se presenta la figura 5.20, que nos muestra las funciones de vulnerabilidad para las aceleraciones de suelo de 100, 250 y 350 gals, de la zona escogida para el estudio. Partiendo de estas funciones de vulnerabilidad se calcula el nuevo índice de daño global para cada edificación.



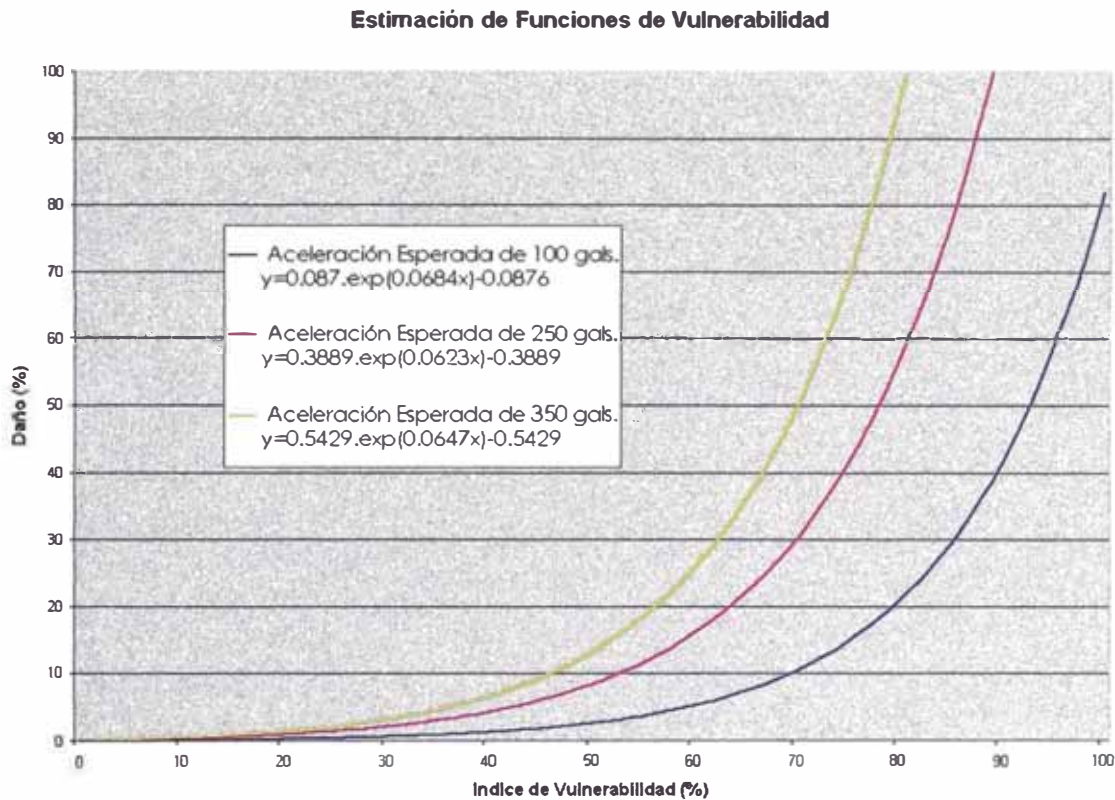


Fig. 5.20: Ecuaciones calculadas para las Funciones de Vulnerabilidad Propuestas en este estudio.

5.6 ESTIMACIÓN DE DAÑOS PARA SISMOS ESCENARIOS.

Métodos para estimar la distribución regional de daños por terremotos a edificaciones, puentes, presas, sistemas de servicios, y otras estructuras hechas por el hombre han sido objeto de extensas investigaciones en las décadas pasadas. La evaluación de daños para una región depende típicamente de tres factores:

1. El nivel de peligro sísmico en la región, incluyendo los efectos de las condiciones de sitio.
2. La distribución de las edificaciones en la región, de acuerdo a una clasificación ingenieril para terremotos.
3. La definición de funciones que relacionen los niveles de daño esperado para diferentes intensidades de peligro sísmico.

La estimación del peligro sísmico regional fue discutida en el Capítulo III, en secciones previas fue desarrollado un inventario para describir el tipo de

edificaciones existentes en la zona de estudio, y se calcularon funciones de vulnerabilidad a efectos de estimar daños en las edificaciones.

La definición de los estados o niveles de daño de acuerdo al daño sufrido por una determinada estructura es de suma importancia para, posteriormente, poder estimar daños de modo cualitativo o subjetivo. La tabla 5.13, muestra la descripción de los niveles de daños adoptada en el presente estudio.

DESCRIPCIÓN	NIVELES DE DAÑO	RANGO (%)
Sin daño	Ninguno	0
Daño mínimo que no requiere reparación	Leve	0-1
Daño menor localiado en algunos elementos que generalmente no requiere reparación	Ligero	1-10
Daño menor localizado en muchos elementos que deben ser reparados	Moderado	10-30
Daño extensivo que requiere reparaciones mayores	Fuerte	30-55
Daño grave generalizado que puede significar su demolición	Severo	55-100
Dstrucción total ó Colapso	Dstrucción	100

TABLA 5.13: Descripción de los niveles de daños adoptados en el presente estudio

5.6.1 ESTIMACIÓN DE DAÑOS EN EL A. H. “EL ALTILLO”

Para estimar el daño estructural se construyeron funciones de vulnerabilidad del tipo exponencial, para la tipología predominante en la zona de estudio, que relacionan el Índice de vulnerabilidad (IV) con el Índice de daño, condicionado sobre las aceleraciones horizontales del suelo debido a un sismo propuesto.

Con el fin de calcular el índice de daño de cada edificación se escogieron aceleraciones máximas del suelo a nivel de basamento rocoso. Empleando la información con que se cuenta respecto a la sismicidad del país, es posible estimar las aceleraciones asociadas a los tres sismos de diseño para la zona en estudio. La tabla 5.14 muestra los períodos de retorno para los sismos elegidos (SEAOC, 1995), junto a la aceleración esperada en la costa del país según los estudios de peligro sísmico evaluados en el Capítulo III.

	Sismos Frecuentes	Sismos Moderados	Sismos Severos
Período de Retorno	45	75	500
Aceleración en la Roca para la Costa del Perú (g)	0.20	0.25	0.35

TABLA 5.14: Sismos de Diseño, períodos de retorno y aceleraciones en la roca para la costa del Perú.

Las funciones de vulnerabilidad propuestas para este estudio, fueron elaboradas relacionando la metodología utilizada por el CISMID durante la elaboración del “Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de la Gran Lima-Fase I” y la del Índice de Vulnerabilidad tal como se describió en acápites anteriores.

Para hacer uso de estas funciones se tuvo que utilizar los valores del índice de vulnerabilidad normalizado cuya variación se encuentra entre $0 < IV < 100$. Asimismo se tomó en cuenta la clasificación de los Índices de Daño global indicados en la tabla 5.2.1.

Los resultados obtenidos se observan en la tabla 5.14, correspondiente al número de edificios y porcentaje de ellos, que sufren cierto nivel de daño dependiendo de la aceleración horizontal aplicada.

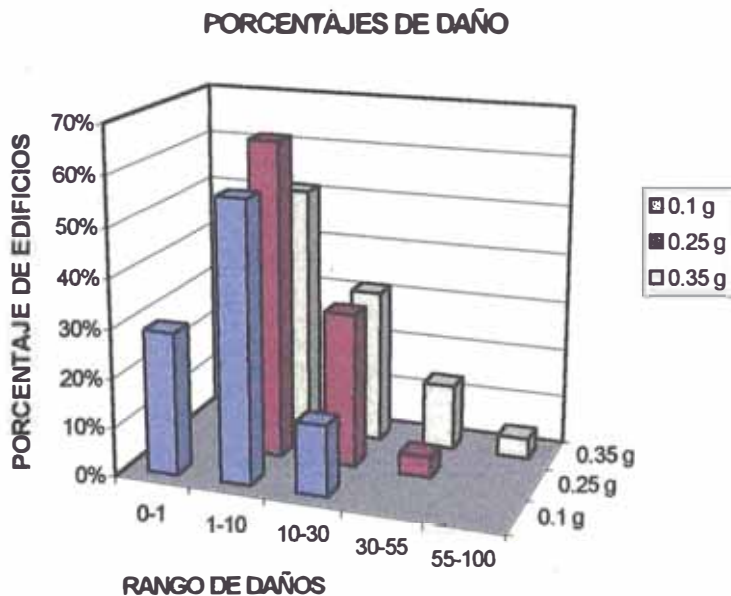


Fig. 5.21: Porcentaje de edificios clasificados por grado de daño, dependiendo del sismo de estudio considerado.

Rango de daño	DAÑO OBTENIDO PARA LAS ACELERACIONES					
	100 gals		250 gals		350 gals	
	Nº Lotes	%	Nº Lotes	%	Nº Lotes	%
0-1	63	29.03%	-	-	-	-
1-10	123	56.68%	140	64.52%	111	51.15%
10-30	31	14.29%	68	31.34%	68	31.34%
30-55	-	-	9	4.15%	29	13.36%
55-100	-	-	-	-	9	4.15%

Tabla 5.14: Resultados del índice de daños obtenidos, considerando los tres sismos.

Para el escenario de daño correspondiente a una aceleración de 0.1g, se calcula que 14.29% de las edificaciones sufrirían un daño moderado es decir no corre peligro la estabilidad de la estructura, el resto tendría a lo más daños ligeros.

Para el escenario de daño correspondiente a 0.25g, puede notarse que el 64.52% presenta daño ligero, el 31.34% daño moderado, es decir las edificaciones presentan daños considerables en los elementos estructurales, requiriendo reparaciones, aunque no es necesario su desalojo; el 4.15% sufrirá un daño fuerte lo que implica que el daño en los elementos estructurales es importante, poniendo en peligro la estabilidad de la estructura y en donde en la mayoría de los casos el costo de reparación es igual al costo del edificio, por lo que se sugiere la demolición de la estructura.

Para el escenario de daño correspondiente a 0.35g, puede observarse que el 4.15% de las edificaciones tienen una alta probabilidad de ser demolidas, al presentar una daño estructural generalizado.

CAPITULO VI

Conclusiones y Recomendaciones

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 INTRODUCCION

En este último capítulo se recogen los principales resultados y logros de la tesis, que permiten llegar a las conclusiones más relevantes del estudio. Por último, el capítulo termina con las recomendaciones correspondientes para complementar el trabajo expuesto y se sugieren futuras líneas de investigación.

6.2 CONCLUSIONES

- El método del índice de vulnerabilidad es adecuado para implementarlo en grandes ciudades (aplicación en el ámbito urbano), sólo en el caso que se disponga de la información mínima necesaria para evaluar la calidad sismorresistente de los edificios ó estructuras que se estudien.
- Para la evaluación del daño de los edificios es importante disponer de funciones de vulnerabilidad calibradas para la zona de estudio. Los resultados obtenidos aplicando funciones de otras zonas pueden inducir errores considerables, con el riesgo evidente en los resultados finales.

- Las curvas vulnerabilidad – daño, han sido obtenidas a partir de la relación entre dos metodologías, la del Índice de Vulnerabilidad y la desarrollada por el CISMID en el Proyecto APESEG.
- Las visitas de campo realizadas a la zona de estudio permitieron contar con una base de datos lo suficientemente buena para aplicar el método del índice de vulnerabilidad a las edificaciones del asentamiento humano escogido.
- A pesar que la aplicación de la metodología descrita permite asignar un índice de vulnerabilidad y un índice de daño a cada edificio singular, no hay que perder de vista el sentido probabilista del método y de los resultados obtenidos.
- Aplicar la metodología del índice de vulnerabilidad a una escala mayor, requiere obligadamente disponer de una herramienta de almacenamiento, análisis y gestión de un volumen enorme de información.
- Con el paso de los años la ciudad de Lima se ha visto rodeada de un gran número de asentamientos humanos, donde se tienen prácticas constructivas sin ningún tipo de orientación técnica, lo que hace que estas zonas presenten alta vulnerabilidad sísmica.
- La experiencia recopilada de anteriores estudios metodológicos realizados por otros, ha permitido generar escenarios de daño particulares para la zona de estudio.
- La vulnerabilidad de las edificaciones del A. H. “El Altillo” se encuentra entre moderada y alta, principalmente debido a la falta de aplicación de normas sísmicas, al mal estado de conservación de las construcciones y a una falta de cultura sísmica.
- Las curvas obtenidas a partir del Análisis Dinámico Modal Espectral para cada modelo estructural, ponen de manifiesto algunas características saltantes de la zona, entre la que podemos destacar el daño relativamente moderado para la alta vulnerabilidad que presentan las edificaciones.
- El daño esperado para una intensidad de VIII MM correspondiente a una aceleración de 350 gals estaría aproximadamente entre el 15-20%, para

un índice de daño superior, lo cual tomando en cuenta la alta vulnerabilidad de la zona puede considerarse razonable, esto principalmente debido a la disminución del peligro sísmico en comparación con otras zonas de ciudad de Lima.

- Es fundamental transferir los resultados obtenidos a los organismos con responsabilidad de gestión de la protección civil y en la planificación y gestión de emergencias, para elaborar planes de emergencia viables.

6.3 RECOMENDACIONES

- En este trabajo se han analizado sólo edificios con estructuras de mampostería. Es conveniente desarrollar funciones de vulnerabilidad para las restantes tipologías existentes en el país. Ello permitiría ampliar la muestra de edificios a los que se aplicaría el método.
- Comparar los resultados obtenidos con otras metodologías de manera de contar con información más detallada acerca del comportamiento de las estructuras.
- Prestar atención al desarrollo de los SIG para adoptar sistemas más amigables y potentes.
- Los datos son el núcleo de todo estudio de vulnerabilidad y riesgo. Es imprescindible actualizar la información. Para ello es necesario contar con sistemas de actualización automática de las bases de datos.
- Es muy conveniente involucrar a los organismos públicos y privados en la evaluación del riesgo sísmico para obtener su interés y participación en la obtención de datos necesarios para este tipo de estudios.
- Incorporar a las bases de datos información anual económica y de valor de las instalaciones, edificios y servicios para alimentar un módulo de evaluación de costo que permita re-evaluar el valor económico del daño de forma automática.
- Incorporar otra información sensible de tipo socio-económico como evolución de la población y su movilidad, que permita establecer de forma automática escenarios de daño espacio-temporales.

- Dotar a las base de datos de una estructura que permita el análisis a nivel regional. Este aspecto es particularmente importante cuando se quieren incorporar aspectos referentes a las líneas vitales. Estas trascienden el entorno urbano.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Angeletti, P., Bellina, A., Grandori, E., Moretti, A., Petrini, V. (1988). *“Comparison between Vulnerability Assessment and Damage Index, some results”*. Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 7, págs 181-186, Tokyo.

ATC-13. Applied Technology Council (1985). *“Earthquake damage evaluation data for California”*. Redwood City, California, USA.

ATC-14. Applied Technology Council (1987). *“Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings”*. Redwood City, California, USA.

ATC-21. Applied Technology Council (1988). *“Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook”*. Report, California, USA.

ATC-22. Applied Technology Council (1989). *“Handbook for the Evaluation of Existing Buildings”*. Report, California, USA.

ATC-3-06. Applied Technology Council (1978). *“Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings”*. Report, California, USA.

Caicedo, C., Barbat, A.H., Canas, J.A., Aguiar, R. (1994). *“Vulnerabilidad Sísmica de Edificios”*. Monografías de Ingeniería Sísmica, Barcelona, España.

REFERENCIAS

Caicedo, C., Barbat, A.H., Canas, J.A., Roca, A., Goula, X., Maña, F. (1993). *“Metodologías para la Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica en Zonas Urbanas”*. Seminario Taller sobre Desastres Naturales – Popayán diez años después, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.

CISMID (2003). *“Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de la Gran Lima-Fase I. Estudio APESEG/CISMID-EVR-LYC”*. Asociación Peruana de Empresas de Seguros APESEG, Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres-CISMID, Lima, Perú.

Culver, C. G., Lew, H.s., Hart, G.C., Pinkham, C. W. (1975). *“Natural Hazards Evaluation of Existing Buildings”*. Building Science Series 61. National Bureau of Standards, Washington D.C.

Chavarria, D. A. , Gomez, D. (2001). *“Estudio Piloto de Vulnerabilidad Sísmica en viviendas de 1 y 2 pisos del Barrio Cuarto de Legua en el Cono Cañaveralejo”*. Universidad del Valle Santiago de Cali, Colombia.

D’Ayala D., Spence R., Oliveira C., Pomonis A. (1997). *“Earthquake Loss Estimation for Europe’s Historic Town Centres”*. Earthquake Spectra, Vol. 13, No.4.

FEMA 178 (1992). NEHRP *“Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings”*. Washington, USA.

FEMA 310 (1998). NEHRP *“Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings – a Prestandard”*. Washington, USA.

General Services Administration. (1976). *“Earthquake Resistance of Buildings”*. Vol. II: Evaluation of Existing Structures, Washington D.C.

GNDT (1986). Grupo Nazionale per la Difesa dai Terremoti. *“Instruzioni per la compilazione della scheda di rilevamento esposizione e vulnerabilità sísmica degli edifici”*. Regione Emilia Roma, Italia.

GNDT. Grupo Nazionale per la Difesa dai Terremoti. (1993). *“Rilevamento della Vulnerabilità Sísmica Degli Edifici in Muratura”*. Apéndice N° 2 alla pubblicazione: Rischio Sísmico di Edifici Pubblici, Parte I–Aspetti Metodologici, Roma, Italia.

Kerstin Lang (2002). *“Seismic Vulnerability of Existing Buildings”*. Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Suiza.

Kuroiwa, J. (2002). *“REDUCCIÓN DE DESASTRES – Viviendo en Armonía con la Naturaleza”*. Lima, Perú.

La Red. (2001). *“Manual de Construcción, Evaluación y Rehabilitación Sísmo Resistente de Viviendas de Mampostería”*. La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Colombia.

- Marocco, R. (1980). "*Géologie des Andes peruviennes: Un segment E-W de la chaîne des Andes péruviennes: la deflexión d'Abancay Etude géologique de la Cordillère Orientale et des Hauts Plateaux entre Cuzco et San Miguel Sud du Pérou*". Doc. ORSTOM 94.
- Martínez Vargas, A. J. (1979). "*Análisis Geotécnicos de los Terremotos de Lima Perú*". Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Mena, H. (2002). "*Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas*". Tesis de Doctorado, Barcelona, España.
- Moreno Llacza, R. A. (2002). "*Análisis de Riesgo Sísmico de la ciudad de Moquegua usando Sistemas de Información Geográfica*". Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Paredes Vargas, R. A. (1974). "*Estudio Sísmico de las Viviendas en el Distrito del Rimac bajo la hipótesis de un sismo destructor en el área de Lima Metropolitana*". Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Pomachagua, P. (2000). "*Características Generales de la Geotectónica y Sismicidad de Perú*". Revista de trabajos de investigación CNDG. Biblioteca del Instituto Geofísico del Perú, págs. 93-104. Lima, Perú.
- Powell, G. H., Allahabadi, R. (1988). "*Seismic Damage Prediction by Deterministic Methods: Concepts and Procedures*". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*". Vol. 16, págs. 719-734.
- Ríos V., J. F. (1991). "*Estudio de Vulnerabilidad y Medidas de Prevención en el Cercado de Lima*". Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Rivera Chicata, J. L. (1975). "*Estudio sobre el sismo del 3 de Octubre: Distrito del Rimac*". Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Sánchez R., R. C. (2003). "*Vulnerabilidad Sísmica en el Distrito de San Juan del Lurigancho: comportamiento sísmico de las construcciones de tierra*". Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- SEAOC. (1995). "*Vision 2000 Committee, A Framework for Performance Based Design*". Structural Engineers Association of California.
- Tavera, H., Buforn, E. (1998). "*Sismicidad y Sismotectónica del Perú*". Física de la Tierra, Num.; págs 187-219, Madrid, España.
- Tavera, J. (1993). "La Tierra, Tectónica y Sismicidad. Monografía.
- Udias, A., Mezcua, J. (1997). "*Fundamentos de Sismología*". Edición UCA.

REFERENCIAS

UNDRO (1979), United Nations Disaster Relief co-Ordinator. *“Natural Disasters and Vulnerability Analysis”*. Report of Expert Group Meeting, Geneva.

UNDRO (1982), United Nations Disaster Relief co-Ordinator. *“Seismic Risk Assessment and Development of Model Code for Seismic Design – Working Group C”*. UNESCO/UNDRO Project Earthquake Risk Reduction in the Balkan Region, Sofia.

Whitman R.V., Reed J.W., Hong S.T. (1974): *“Earthquake Damage Probability Matrices”*. Proceedings of the fifth World Conference on Earthquake Engineering, pp. 2531, Roma, Italia.